

## طبقه بندی بر اساس لرزه نگاری

### چکیده

برای به کار گیری از بهترین روشهای ایمنی ، زمین لرزه های دست ساز انسان باید به عنوان تابعی از منشأ آنها متفاوت باشند. حداقل چهار نوع تنظیمات مختلف را می توان تشخیص داد که در آن فعالیت های انسانی می تواند لرزه ایجاد کند: (1) برداشت مایعات از یک مخزن چینه شناسی در زیر زمین می تواند باعث فشردگی حفره ها و فروپاشی حجم پوشاننده یعنی لرزه جاذبه ای (گراوی کوییک) شود. هرچه مخزن عمیق تر باشد، حجم و بزرگی زلزله بیشتر است. (2) فاضلاب یا تزریق مجدد گاز باعث کاهش اصطکاک در حجم و در امتداد سطوح گسلی می شود و باعث فعال شدن خزش یا فعال شدن ناگهانی ناپیوستگی های تکتونیکی، یعنی زلزله های مجدد می شود. (3) تزریق مایع در فشار فوق لیئاستاتیک باعث ایجاد شکست توسط آب و ریز لرزه ای، یعنی ساختار آب می شود (4) استخراج مایعات یا تزریق مایعات، پر کردن یا خالی کردن دریاچه های مصنوعی بار سنگین را تغییر می دهد که حداکثر تنش اصلی در شرایط تکتونیک کششی، حداقل فشار اصلی در شرایط تکتونیک انقباضی و فشار متوسط اصلی در شرایط ضربه ای، یعنی لرزه های بار است. بیش از مقادیر فشار داده شده، افزایش بار لیئوستاتیک می تواند به فعال شدن گسل های طبیعی منجر شود، در حالی که کاهش آن ممکن است به عنوان گسل های رانش کمک کند. به عنوان مثال، پر کردن یک دریاچه مصنوعی ممکن است زلزله عادی مرتبط با گسل را ایجاد کند. بنابراین، هر شرایط ویژگی های خاص خود را دارد و اطلاع از مکانیسم های مختلف ممکن است در به کارگیری اقدامات احتیاطی مناسب در فعالیت های مختلف صنعتی کمک کند.

**کلمات کلیدی:** لرزه نگاری انسانی، لرزه جاذبه ای (گراوی کوییک)، تزریق مجدد لرزه، زلزله هیدروساختار (ساختار آبی)، لرزه های بار

## 1. مقدمه

لرزه خیزی اخیر نیز به یک مساله علمی و اجتماعی مرتبط شده است (ساکال ، 2009؛ گریگولی و همکاران، 2017). گرچه لرزه ها در برابر شدت لرزه های طبیعی و انسانی همیشه مستقیم نیستند (داهم و همکاران، 2015)، لرزه ها ناشی از تزریق مایع یا سیال به طور حتم توسط رالی و همکاران (1976) اثبات شده است. تزریق مایع به زیر سطح زمین با عملیات صنعتی، به خصوص دفع فاضلاب، ذخیره سازی گاز یا زمین گرمایی مربوط است (هالی و همکاران، 1968؛ 2007؛ زوباک شورای تحقیقات ملی، 2013). همچنین ثابت شده است که فعالیت های انسانی میتواند اندازه رخدادها را به عنوان تابعی از حجم و میزان تزریق شده سیال تعیین کند (وینگارتن ؛ 2014، مک گر ، 2015) و افزایش فشار سیال (هسیه و بردهوفت، 1981) به خصوص در اوکلاهاما، میزان لرزه خیزی یا شدت لرزه را با توجه به تزریق فاضلاب در عمق نشان داده است که افزایش شدیدی داشته است (السورث، 2013؛ کرنان و همکاران، 2014). زمین لرزه همچنین با بارگذاری اثرات بر روی دریاچه ها و حفاری های سنگ مصنوعی کشف شد (سیمپسون، ۱۹۷۶، ۱۹۸۶). این گزارش خاطر نشان ساخت که فعالیت های صنعتی، انرژی را برای پدیده زمین شناسی تامین نمی کنند، بلکه آن ها را به کاهش اصطکاک بر روی سازه های تکتونیک یا زمین ساخت که در حال حاضر در حالت بحرانی شکست فشار هستند، در زمانی که سیالات فشار منافذ را افزایش می دهند، تسریع می کنند (والش و زوباک، ۲۰۱۵).

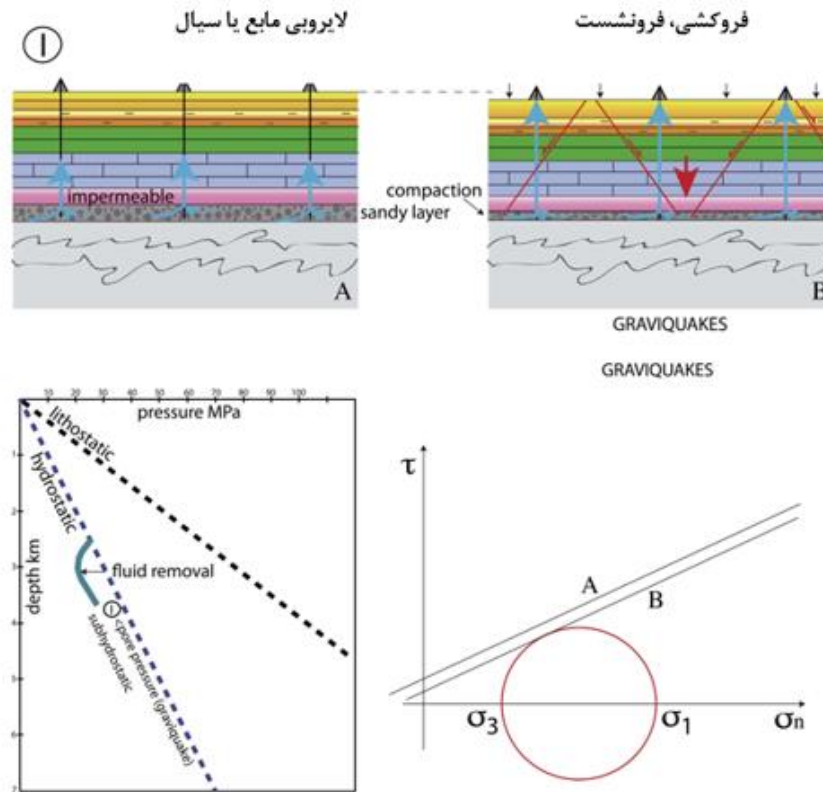
شواهدی از لرزه ها ناشی از تزریق مایع پساب در مخازن نفت تهی شده، به خوبی ایجاد شده اند (شاپیرو و همکاران، ۲۰۱۰؛ استبیلی و همکاران، ۲۰۱۵؛ بوتینلی و همکاران، ۲۰۱۶)، و همچنین برای ذخیره سازی گاز تثبیت شده است. (رویز باراجاس و همکاران، ۲۰۱۷ و مراجع در آن). بنابراین، یک سیاست مبتنی بر پایه لرزه ای ، مورد نیاز است (جیاردینی ، ۲۰۰۹؛ مک گار و همکاران ، ۲۰۱۵؛ لنگنبروچ و زوباک ، ۲۰۱۶). به همین دلیل، وزارت صنایع دولت

ایتالیا خطوط راهنما را برای فعالیت‌های صنعتی زیرسطحی در آینده معرفی کرد (گروه کاری MISE - CIRM ۲۰۱۴). براساس مروری بر تنظیمات مختلف زمین‌شناسی موجود، این مقاله یک طبقه‌بندی از انواع مختلف لرزه‌ای ایجاد شده را برای تمایز بین چندین محیط تکتونیک و اثرات اختلالات انسانی پیشنهاد می‌کند. تعدادی از طبقه‌بندی‌های مفید پیش از این پیشنهاد شده‌اند، اما این مقاله به ترتیب با توجه به فشارهای هیدرواستاتیک (ساختار آبی) و لیتواستاتیک (فشار سنگ ایستایی) به ترتیب مورد بررسی قرار می‌گیرد. فشار هیدرواستاتیک (ساختار آبی) به طور متوسط ۱۰ MPa در کیلومتر افزایش می‌یابد. فشار لیتواستاتیک (فشار سنگ ایستایی) به ترتیب ۱S، ۳S، ۲S در تنظیمات تکتونیک (زمین ساخت) کششی، انقباضی و اعتصابی است. بارگذاری لیتواستاتیک (ساختار آبی)،  $rgz$  که در آن  $r =$  چگالی سنگ است،  $g$  شتاب ثقل و  $Z =$  عمق) با عمق بین ۲۳ تا ۲۷ MPa در کیلومتر، با فرض چگالی ۲.۳ یا ۲.۷ گرم بر سانتی متر مکعب افزایش می‌یابد. نسبت بین فشار منفذی و بارگذاری لیتواستاتیک (ساختار آبی) (هابرت و روبی، ۱۹۵۹) به طور متوسط ۰.۳۵ در پوسته بالا کم عمق است، اما این نسبت به لیتواستاتیک (مثلاً، ۰.۹) با عمق افزایش می‌یابد (سیبسون، ۱۹۹۲). مقدار اصطکاک استاتیک ( $m$ ) در پوسته بالایی به طور متوسط  $> 0.6$  می‌باشد (زوباک و تاونند، 2001). تغییرات کوچک این مقادیر می‌توانند تنش انحرافی را در یک منطقه مشخص تغییر داده و لرزه‌ها را القا کنند. تغییرات شیمیایی و دمایی در ترکیب سنگ و مایعات ممکن است به طور قابل توجهی بر مقادیر متوسط تاثیر بگذارد (به عنوان مثال، فسیل، ۲۰۱۰).

## 2. انواع لرزه‌ها در ارتباط با فعالیت‌های انسانی

اصطلاحات ناشی از لرزه نگاری القا شده و ایجاد شده، برای ایجاد لرزه‌ها توسط عملیات‌های صنعتی و لرزه‌ای طبیعی و پیش‌بینی آن توسط فعالیت‌های انسانی، مورد استفاده قرار می‌گیرند (هورنباخ و همکاران، ۲۰۱۵). تغییر در میان این دو نوع لرزه‌ای ظریف است، زیرا پوسته به طور گسترده در حالت بحرانی فشار قرار دارد و اغلب لرزه‌ای القا شده می‌تواند به عنوان تشدید در نظر گرفته شود. در اینجا، به دلیل سادگی، همه لرزه نگاری‌های انسانی را در نظر

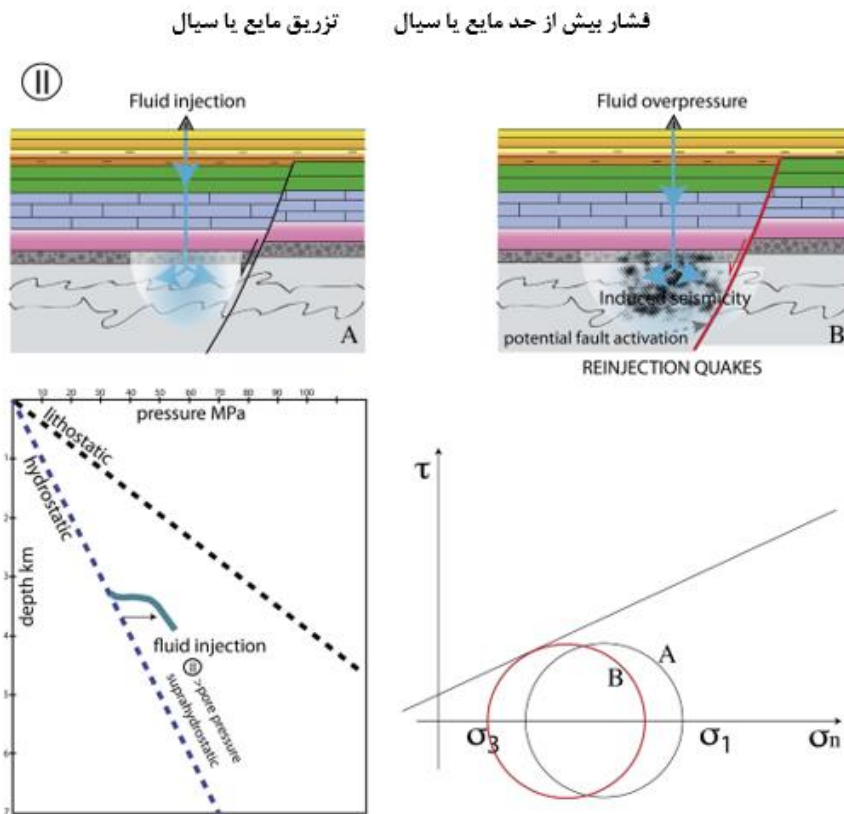
می‌گیریم، که دلالت بر فعال کردن گسل های بلقوه آماده برای حرکت ، صرف نظر از اهمیت تکتونیکی منطقه‌ای آن‌ها دارد. پایه اصلی تحلیل فعالیت‌های مختلف انسانی با توجه به انحراف از فشار ایستایی و فشار طبیعی است.



شکل ۱. لرزه ای یا گراوییک های (لرزه جاذبه ای) ناشی از نوع اول. حذف سیال (یا گاز، نفت یا آب) از یک لایه با تخلخل اولیه گرانول ممکن است باعث ایجاد یک زیر هیدرو استاتیک و فروپاشی تدریجی یا آنی حجم صخره پوشاننده شود که باعث وقوع زلزله و فرونشست می‌گردد. تخلیه یک خلا ایجاد می‌کند که ممکن است با وزن حجم بالایی، کاهش معیار خرابی کولوم، بسته شود. علاوه بر این، ممکن است فشار طبیعی را افزایش دهد چون فشار حفره را کاهش می‌دهد و نسبت بین فشار سیال و فشار ایستایی کاهش می‌یابد. هرچه لایه تهی شده باشد، حجم بزرگ‌تر است و اندازه زلزله بیشتر است. از آنجا که لرزه‌ها با انتشار پتانسیل گرانشی کنترل می‌شوند، ممکن است این رویدادها را به عنوان گراوییک ها (لرزه جاذبه ای) در نظر بگیریم.

2.1 حذف گاز یا نفت از یک فاصله کانونی می‌تواند باعث فشردگی حفره و ریزش حجم بالای زمین شود که لرزه‌ها و فرونشست را تحریک می‌کند. مثالی از این امر، میدان گرونینگ در هلند (وان ویسر و تینن، 2015 ،

برونزی) است که در آن مخزن گاز در حدود ۳ کیلومتر در عمق متخلخل میدان شن های ماسه ای یافت شده در رودخانه واقع شده است. مکانیزم های کانونی لرزه ها در میدان های القا شده توسط میدان گاز، گسل های طبیعی را نشان می دهند. نشان داده شده است که شدت لرزه های با گسل های عادی، اتلاف انرژی گرانشی ذخیره شده و عمق حجم لرزه ای فعال شده حدود یک سوم طول دیوار (یعنی، دگلیونی و همکاران، 2015) هستند. این نشان دهنده عمق مخزن، هرچه حجم و اندازه زلزله بزرگ تر باشد. در مثال، گرونینگن حذف سیال از حفره های ماسه ای، امکان فروپاشی ضخامت لایه توالی چینه شناسی را فراهم می آورد. از آنجا که مخزن در عمق ۳ کیلومتری قرار دارد، حداکثر حجمی که می تواند تجهیز شود حدود ۴۰ کیلومتر مکعب است که مربوط به اتلاف انرژی یک زلزله در حدود ۳ / ۳ کیلومتر مکعب است که در ۳.۶، بزرگ ترین مقدار ثبت شده در میدان گاز است (وان ویز و همکاران، 2014). برای پشتیبانی از برداشت ساده از فشرده سازی و تغییر تدریجی و فروپاشی مخروطی، بهره برداری میدان گازی یک فرونشست حدود ۲۰ e30 سانتیمتر (وان ویسر و تین، 2015، برونزی) ایجاد کرده است. با توجه به (زوباک و زینک 2002)، تغییرات فشار تخلخل ممکن است منجر به توضیح خطای ناشی از فرسایش مایع در طول تولید شود. با این حال، حذف نفت از مخازن (Ekofisk و Valhall، والاله و اکوفیسک) در دریای شمال، لرزه خیزی یا شدت لرزه گسل طبیعی را ایجاد کرده است که می تواند به عنوان سقوط گرانشی صخره های زیرین تفسیر شود. این نوع شدت لرزه ناشی از نوع اول در شکل 1، یعنی گراویک ها ایجاد شده است.



شکل ۲. در نوع دوم زلزله خیزی یا تزریق مجدد لرزه را القا کردند. تزریق مایع یکی از رایج‌ترین مکانیزم

زمین‌لرزه‌های القایی است. اگر تزریق مایع، فشار منفذی طبیعی را تحت‌تاثیر قرار دهد، به سمت شرایط

هیدرواستاتیک (ساختار آبی) بالا حرکت می‌کند، و سیستم ممکن است با نزدیک شدن به پوشش نارسایی بحرانی

ناپایدار شود. افزایش فشار منافذ فشار نرمال شده و نسبت بین فشار سیال و فشار ایستایی را افزایش می‌دهد. مایعات

در یک حجمی در ته چاه نفوذ می‌کنند و به صخره‌های نفوذ پذیر حرکت می‌کنند و معمولاً ظرف یک نیمه ماه،

میکروزیسم تبدیل می‌کنند، جدا از زمانی که ناپیوستگی طبیعی رخ می‌دهد، در نتیجه شدت لرزه‌ها را در امتداد

سطوح گسل انجام می‌دهند.

2.2 اب شور یا تزریق مجدد گازها در زیر سطحی بالاتر از آستانه طبیعی، افزایش فشار منفذی و کاهش اصطکاک

در حجم و در نتیجه خطوط گسل را فراهم می‌کند که اجازه تغییر تدریجی یا فعال شدن ناگهانی ناپیوستگی‌های

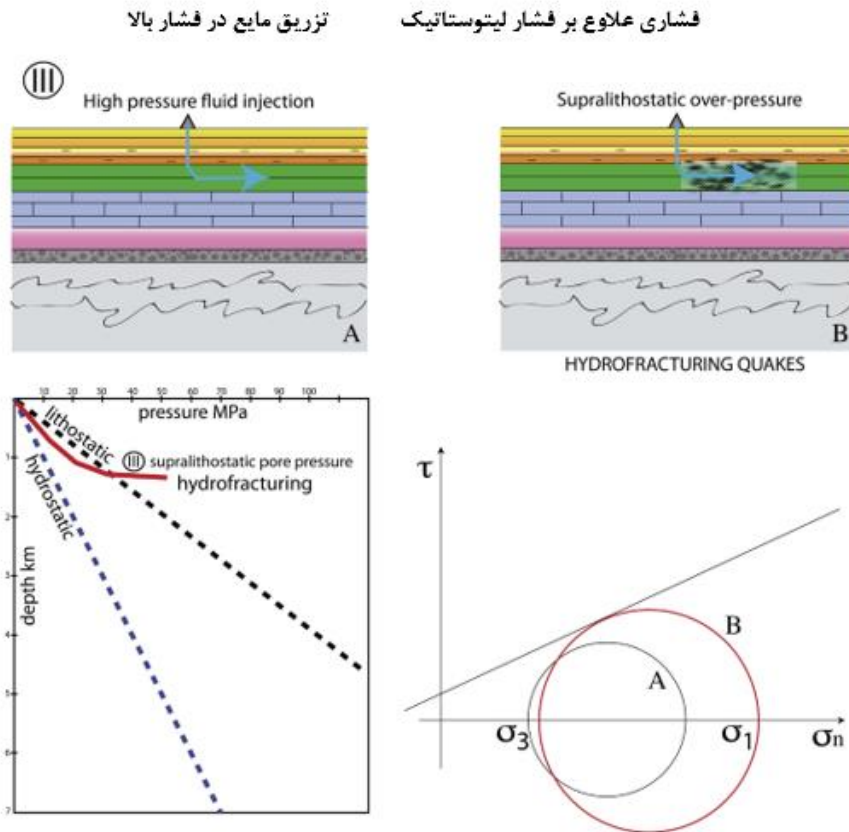
تکتونیکی می‌شود. این پدیده با هر نوع مایع تزریق‌شده در زمین گرمایی نشان داده می‌شود (به عنوان مثال، زمین

گایزر در شمال کالیفرنیا، ایبره‌ارت فیلیپس و اوپنهایمر، 1984، یا نیروگاه بازل در سوئیس، کرافت و همکاران،

2009). در تزریق فاضلاب از قبیل تشکیل (Arbuckle, اربکل) در میدان نفتی اوکلاهما (کرنان و همکاران، ۲۰۱۳) یا مخزن زیگونگ در جنوب غربی استان سیچوان چین (لی و همکاران، ۲۰۱۳؛ دل پتر و دیز، ۲۰۱۵؛ وایت و فاکسال، ۲۰۱۶). ثابت شده است که پوسته در وضعیت بحرانی فشار، نزدیک به شکست قرار دارد و اختلالات کوچک فشار منافذ ممکن است، فعال سازی گسیختگی سنگ را در امتداد سطوح مرتبط با گسل را با توجه به میدان تنش منطقه‌ای تعیین کند (به عنوان مثال، دگرساز + زوباک، ۲۰۱۷).

بنابراین، افزایش فشار منفذی به مقادیر بزرگتر از آنچه که به طور طبیعی در یک حجم پوسته اتفاق می‌افتد، ممکن است فعال سازی عیب، صرف نظر از تنظیمات تکتونیک، را تعیین کند. با این حال تشخیص بین مصرف تزریق مایع و تحریک بسیار مهم است که آشفتگی زیادی از فشار منافذ ایجاد می‌کند.

یشتترین مقدار گزارش شده برای این نوع لرزه ها یا شدت لرزه در اوکلاهما، 5.8 M در رویداد pawnee ۲۰۱۶ است (لنگنبروچ و زوباک، ۲۰۱۶). فشار میدان دور ممکن است به تولید زمین لرزه حتی در چندین کیلومتر فاصله با توجه به چاه های تزریق رخ دهد (یک و همکاران، ۲۰۱۶). وابستگی زمانی زمین لرزه مرتبط به فاصله، میزان فشار ارایه شده و نفوذپذیری بستگی دارد (به عنوان مثال، جوانز و همکاران، ۲۰۱۶؛ آلبانو و همکاران، ۲۰۱۷ و مراجع در آن).



شکل ۳. نوع سوم را شدت لرزه یا زمین لرزه های با شدت هیدرولیکی القا داده می شود. تزریق مایع یا سیال در فشار بالایی ایستایی ممکن است موجب ایجاد شکستگی هیدرولیکی شود که معمولاً شکست هیدرولیکی نامیده می شود. این پدیده همچنین به طور طبیعی در طول مرحله (مخروطی) coseismic رخ می دهد. افزایش فشار منفذی بالای تنش های طبیعی، نسبت بین فشار سیال و فشار ایستایی بزرگ تر از ۱ را تعیین می کند.

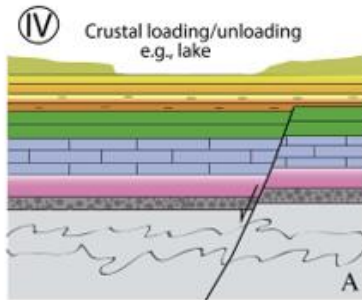
سنگ شنایی ها و تخلخل مرتبط با آن می توانند تشدید شوند؛ به عنوان مثال، تخلخل پراکنده ممکن است باعث فشار منفذی بالاتر نسبت به تخلخل متمرکز شود (شاه و کلر، ۲۰۱۷). در سد زیگونگ، از اوایل سال ۲۰۰۹ تا میانه سال ۲۰۱۱، بیش از ۱۲۰، ۰۰۰ متر مکعب آب فاضلاب تحت فشار سرچاه، در حدود به ۶/۲ مگاپاسکال به داخل کربونات ها در عمق ۲ / ۲ کیلومتر پمپ شد. این باعث بوجود آمدن ۷۰۰۰ شدت لرزه میشود، که دو مورد از آنها بود  $ML 4e4.4$ ، عمدتاً بین ۲.۵ تا ۴ کیلومتر پایینتر از پایین چاه متمرکز بوده و یک توزیع نیمه ماه را نشان میدهد، اما به طور محلی بر روی شکستگی ها و گسل های موجود متمرکز شده است (لی و همکاران، ۲۰۱۳). لرزهها در



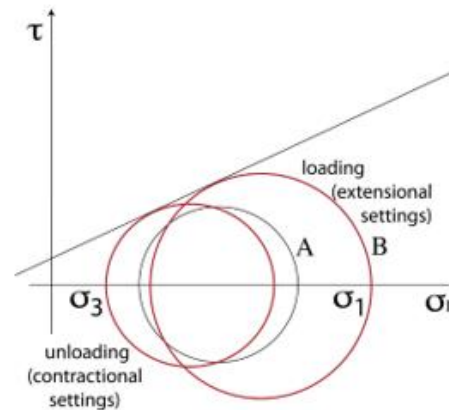
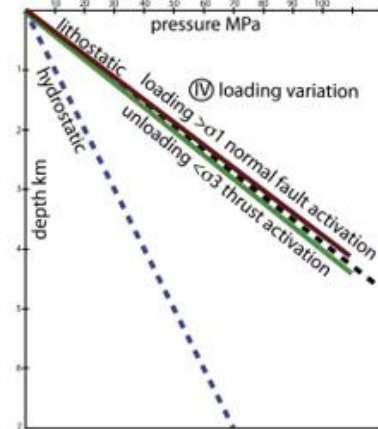
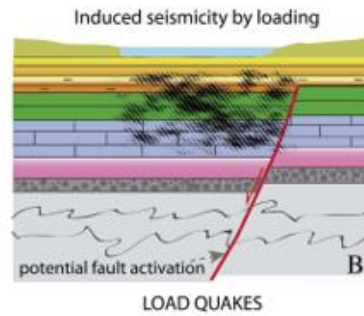
شعاع . e124 از نقطه تزریق، به عنوان تابعی از حجم سیال شناسایی شدند ( مک گر، 2014 ). ضریب نفوذ هیدرولیکی سیال در حجم سنگ اطراف چاه به ۰.۱ متر مربع محاسبه شده است (به عنوان مثال، لی و همکاران، ۲۰۱۳). این نوع فولاد نوع دوم در شکل ۲، یعنی، تزریق مجدد لرزه است.

3. تزریق مایع یا سیال در فشار فوق لیتواستاتیک ، شدت لرزه و شکست هیدرولیکی را تعیین میکند؛ که به عنوان شکست هیدرولیکی یا استخراج نفت از طریق تزریق گاز شناخته می شود. (کینگ و ویلیس ، 1972 ؛ شولتز ، 2013) ، اما این نوع از تکنیک های اجرایی بیشتر در عمق سطحی مورد استفاده قرار می گیرند و بنابراین معمولاً فقط با شدت لرزه سطحی در ارتباط هستند که ممکن است به دلیل عمق کم احساس شوند. شکست هیدرولیکی نشان داده است که حداقل در صورتی که گسل های موجود از قبل دوباره فعال شوند، زلزله حداقل تا  $3.9M$  بزرگتر ، پیش بینی می گردد. شکست هیدرولیکی یک پدیده طبیعی شناخته شده نیز هست (به عنوان مثال، سیبسون، ۱۹۸۱)، از آنجایی که سابقه سنگی اثرات تغییر شکل را با فشار بیش از حد ناشی از پدیده مخروطی (coseismic) نشان می دهد (دگلیونی و همکاران، ۲۰۱۴). این نوع شدت لرزه ناشی از نوع سوم در شکل 3 ، به عنوان مثال ، زمین لرزه های شکست هیدرولیکی می گویند.

بارگذاری و باربرداری پوسته دریاچه



شدت لرزه القا شده (کشش) به وسیله بارگذاری



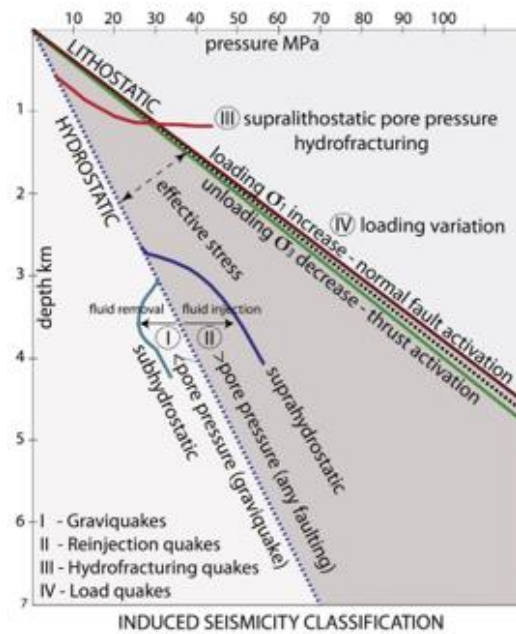
شکل ۴. نوع چهارم شدت لرزه و یا لرزه های بار القا شده می باشد. بارگیری یا تخلیه پوسته می تواند با پر کردن یا تخلیه یک دریاچه آبی یا حذف یا پر کردن مجدد ذخایر عمیق زمین شناسی تولید شود. این تغییر باعث افزایش یا کاهش وزن کلی می شود، یعنی بار ایستایی، از این رو شدت لرزه بالقوه را ایجاد می کند. افزایش بار به نفع فعال سازی گسل های طبیعی (در حال افزایش) است، در حالی که کاهش خطای بار - بالعکس ممکن است باعث فعال سازی عامل فشار (کاهش  $\sigma_3$ ) شود.

2.4 استخراج مایع یا تزریق مایع زیرزمینی، یا پر کردن یا خالی کردن دریاچه های مصنوعی، بارگذاری ایستایی را اصلاح میکند، که بیشترین تنش اصلی در تنظیمات تکتونیک، حداقل فشار اصلی در تنظیمات انقباض تکتونیک، و فشار اصلی میانی در تنظیمات لغزش امتدادی است. در حقیقت، شدت لرزه طبیعی مرتبط با گسل در نواحی دارای بارگذاری ایستایی بزرگتر و در سطح بالاتر توپوگرافی رخ میدهد، در حالی که شدت لرزه در فرایند زمین شناسی توپوگرافی مرتبط با رانش پایین، بیشتر تکرار میشوند (کارمیناتی و همکاران، ۲۰۰۴). با توجه به مقادیر فشار رانش زمین افزایش بارگذاری ایستایی ممکن است به فعال سازی گسل های طبیعی کمک کند، در حالی که کاهش

آن ممکن است باعث ایجاد گسل در آنها شود. به عنوان مثال، پر کردن یک دریاچه مصنوعی میتواند شدت لرزه طبیعی مرتبط را ایجاد کند. بیشترین مقدار استنباط شده برای این نوع شدت لرزه ایجاد شده ناشی از القا در سال ۱۹۶۷ (گوپتا و رستوگی، ۱۹۷۶؛ گوپتا، ۲۰۰۲). در شکل ۶.۵ را در مخزن کوینا در هند نشان می دهد. مایع سیال میتوانند به زیرزمین نفوذ کنند تا اصطکاک را کاهش دهند. این نوع IV شدت لرزه ایجاد شده در شکل ۴، یعنی زین لرزه ای بارگذاری شده است.

### 3. نکات نتیجه گیری

هر فرایند زمین شناسی با چینه شناسی خاص، تخلخل، نفوذپذیری، فشار ایستایی، فشار منفذی، دما، اصطکاک و غیره مشخص می شود. بنابراین هر ناحیه دارای پارامترهای خاص خود است که ممکن است مقدار و میزان شدت لرزه ایجاد شده در مورد اختلال انسانی را تعیین کند. از بحث فوق، حداقل چهار نوع مختلف شدت لرزه ایجاد شده یا القا شده وجود دارد که میتوان آنها را به عنوان تابعی از فرایند تکتونیک، حجم مایعات/سیال و تغییرات فشار نسبت به روش های ایستایی و هیدرواستاتیک (ساختار آبی) طبقه بندی کرد (شکل ۵). هر نوع با حداکثر مقدار خودش مشخص میشود، اما به شیب فشاری که با توجه به پارامترهای طبیعی اصلی ارائه شده، بستگی دارد. مدلسازی در فرایند زمینشناسی به منظور اتخاذ فشارهای مطمئنه در هر مخزن با جلوگیری کردن از شدت لرزه القا شده با شدت آسیب ناشی از فعالیت های صنعتی مورد نیاز است.



طبقه بندی شدت لرزه القا شده

شکل 5. تصویرسازی از چهار نوع اصلی زلزله شناسی انسانی که در متن شرح داده شده است. MPa ، مگا پاسکال.

### تشکر و قدردانی

گفتگوهایی با (ترلیز، کلادیو، چیارابا، دانیلا بوچی، ریکاردو لاناری، جوزپه پانی، انریکو پریلو، آلدو زولو، کارمیناتی) بسیار مثر مثر بودند. نظرات یک منتقد ناشناس و همکار ساکی به شدت مفید بوده اند. این تحقیق توسط وزارت صنایع ایتالیا مورد حمایت قرار گرفت.

## References

- Albano, M., Barba, S., Tarabusi, G., Saroli, M., Stramondo, S., 2017. Discriminating between natural and anthropogenic earthquakes: insights from the Emilia Romagna (Italy) 2012 seismic sequence. *Scientific Reports* 7, 282. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-00379-2>.
- Alt, R.C., Zoback, M.D., 2017. In situ stress and active faulting in Oklahoma. *Bulletin of the Seismological Society of America* 107, 1. <https://doi.org/10.1785/0120160156>.
- Buttinelli, M., Improta, L., Bagh, S., Chiarabba, C., 2016. Inversion of inherited thrusts by wastewater injection induced seismicity at the Val d'Agri oilfield (Italy). *Scientific Reports* 6, 37165. <https://doi.org/10.1038/srep37165>.
- Carminati, E., Doglioni, C., Barba, S., 2004. Reverse migration of seismicity on thrusts and normal faults. *Earth-Science Reviews* 65, 195e222.
- Dahm, T., Cesca, S., Hainzl, S., Braun, T., Krüger, F., 2015. Discrimination between induced, triggered, and natural earthquakes close to hydrocarbon reservoirs: a probabilistic approach based on the modeling of depletion-induced stress changes and seismological source parameters. *Journal of Geophysical Research Solid Earth* 120. <https://doi.org/10.1002/2014JB011778>.
- Del Potro, R., Diez, M., 2015. Induced Seismicity in Underground Gas Storage e The Case of Castor, Offshore NE Spain, 77th EAGE Conference. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201413522>.
- Doglioni, C., Barba, S., Carminati, E., Riguzzi, F., 2014. Fault on-off versus coseismic fluids reaction. *Geoscience Frontiers* 5 (6), 767e780. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2013.08.004>.
- Doglioni, C., Carminati, E., Petricca, P., Riguzzi, F., 2015. Normal fault earthquakes or graviquakes. *Scientific Reports* 5, 12110. <https://doi.org/10.1038/srep12110>.
- Eberhart Phillips, D., Oppenheimer, D.H., 1984. Induced seismicity in the Geysers geothermal area, California. *Journal of Geophysical Research Solid Earth* 89 (B2), 1191e1207.
- Ellsworth, W.L., 2013. Injection-induced earthquakes. *Science* 341 (6142), 7. <https://doi.org/10.1126/science.1225942>.
- Fossen, H., 2010. *Structural Geology*. Cambridge University Press. ISBN-13 978-0-521-51664-8.
- Giardini, D., 2009. Geothermal quake risk must be faced. *Nature* 462, 848e849.
- Grigoli, F., Cesca, S., Priolo, E., Rinaldi, A.P., Clinton, J.F., Stabile, T.A., Dost, B., Fernandez, M.G., Wiemer, S., Dahm, T., 2017. Current challenges in monitoring, discrimination, and management of induced seismicity related to underground industrial activities: a European perspective. *Reviews of Geophysics* 55 (2), 310e340.
- Gupta, H.K., 2002. A review of recent studies of triggered earthquakes by artificial water reservoirs with special emphasis on earthquakes in Koyna, India. *EarthScience Reviews* 58, 279e310.
- Gupta, H.K., Rastogi, B.K., 1976. *Dams and Earthquakes*. Elsevier Amsterdam, pp. 1e229.
- Healy, J.H., Rubey, W.W., Griggs, D.T., Raleigh, C.B., 1968. The Denver earthquakes. *Science* 161, 1301e1310.
- Hornbach, M.J., DeShon, H.R., Ellsworth, W.L., Stump, B.W., Hayward, C., Frohlich, C., Oldham, H.R., Olson, J.E., Magnani, M.B., CaseyBrokaw, C., Luetgert, J.H., 2015. Causal factors for seismicity near Azle, Texas. *Nature Communications* 6, 6728. <https://doi.org/10.1038/ncomms7728>.
- Hsieh, P.A., Bredehoeft, J.D., 1981. A reservoir analysis of the Denver earthquakes: a case of induced seismicity. *Journal of Geophysical Research* 86, 903e920.
- Hubbert, M.K., Rubey, W.W., 1959. Role of fluid pressure in the mechanics of overthrust faulting. *Bulletin of the Geological Society of America* 70, 115e205.
- Improta, L., Valoroso, L., Piccinini, D., Chiarabba, C., 2015. A detailed analysis of wastewater-induced seismicity in the Val d'Agri oilfield, Italy. *Geophysical Research Letters* 42, 2682e2690.
- Juanes, R., Jha, B., Hager, B.H., Shaw, J.H., Plesch, A., Astiz, L., Dieterich, J.H., Frohlich, C., 2016. Were the May 2012 Emilia Romagna earthquakes induced? Acoupled flow-geomechanics modeling assessment. *Geophysical Research Letters* 43 (13), 6891e6897.

Keranen, K.M., Savage, H.M., Abers, G.A., Cochran, E.S., 2013. Potentially induced earthquakes in Oklahoma, USA: links between wastewater injection and the 2011 Mw 5.7 earthquake sequence. *Geology* 2011e2014, G34045. <https://doi.org/10.1130/G34045.1>.

Keranen, K.M., Weingarten, M., Abers, G.A., Bekins, B.A., Ge, S., 2014. Sharp increase in central Oklahoma seismicity since 2008 induced by massive wastewater injection. *Science* 345 (6195), 448e451. <https://doi.org/10.1126/science.1255802>. PMID 24993347.

King, H.M., Willis, D.G., 1972. *Mechanics of Hydraulic Fracturing*. American Association of Petroleum Geologists Memoir, pp. 239e257.

Kraft, T., Mai, P.M., Wiemer, S., Deichmann, N., Ripperger, J., Kästli, P., Bachmann, C., Fäh, D., Wössner, J., Giardini, D., 2009. Enhanced geothermal systems: mitigating risk in urban areas. *Eos Transactions American Geophysical Union* 90 (32), 273e274.

Langenbruch, C., Zoback, M.D., 2016. How will induced seismicity in Oklahoma respond to decreased saltwater injection rates? *Science Advances* 2 (11), e1601542. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1601542>.

Lei, X., Ma, S., Chen, W., Pang, C., Zeng, J., Jiang, B., 2013. A detailed view of the injection-induced seismicity in a natural gas reservoir in Zigong, southwestern Sichuan Basin, China. *Journal of Geophysical Research Solid Earth* 118, 4296e4311. <https://doi.org/10.1002/jgrb.50310>.

Majer, E.L., Peterson, J.E., 2007. The impact of injection on seismicity at the Geysers, California Geothermal Field. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 44 (8), 1079e1090.

McGarr, A., 2014. Maximum magnitude earthquakes induced by fluid injection. *Journal of Geophysical Research Solid Earth* 119, 1008e1019. <https://doi.org/10.1002/2013JB010597>.

McGarr, A., Bekins, B., Burkhardt, N., Dewey, J., Earle, P., Ellsworth, W., Ge, S., Hickman, S., Holland, A., Majer, E., Rubinstein, J., Sheehan, A., 2015. Coping with earthquakes induced by fluid injection. *Science* 347 (6224), 830e831. <https://doi.org/10.1126/science.aaa0494>.

MISE-CIRM Working Group, 2014. *Microseismic Monitoring Guidance Document*. [http://unmig.sviluppoeconomico.gov.it/unmig/agenda/upload/151\\_238.pdf](http://unmig.sviluppoeconomico.gov.it/unmig/agenda/upload/151_238.pdf).

Mukuhira, Y., Moriya, H., Ito, T., Asanuma, H., Häring, M., 2017. Pore pressure migration during hydraulic stimulation due to permeability enhancement by low-pressure subcritical fracture slip. *Geophysical Research Letters* 44 (7), 3109e3118.

National Research Council, 2013. *Committee on Induced Seismicity Potential in Energy Technologies. Induced Seismicity Potential in Energy Technologies*. National Academic Press, Washington, DC.

Raleigh, C.B., Healy, J.H., Bredehoeft, J.D., 1976. An experiment in earthquake control at Rangely, Colorado. *Science* 191 (4233), 1230e1237.

Ruiz-Barajas, S., Sharma, N., Convertito, V., Zollo, A., Benito, B., 2017. Temporal evolution of a seismic sequence induced by a gas injection in the Eastern coast of Spain. *Scientific Reports* 7, 2901. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-02773-2>.

Schultz, C., 2013. Marcellus Shale fracking waste caused earthquakes in Ohio. *Eos Transactions American Geophysical Union* 94 (33), 296e296.

Shah, A.K., Keller, G.R., 2017. Geologic influence on induced seismicity: constraints from potential field data in Oklahoma. *Geophysical Research Letters* 44, 152e161. <https://doi.org/10.1002/2016GL071808>.

Shapiro, S.A., Kruger, O.S., Dinske, C., Langenbruch, C., 2011. Magnitudes of induced earthquakes and geometric scales of fluid stimulated rock volumes. *Geophysics* 76, WC55eWC63. <https://doi.org/10.1190/GEO2010-0349.1>.

Sibson, R.H., 1981. Controls on low-stress hydro-fracture dilatancy in thrust, wrench and normal fault terrains. *Nature* 289 (5799), 665e667.

Sibson, R., 1992. Fault-valve behaviour and the hydrostatic-lithostatic fluid pressure interface. *Earth-Science Reviews* 32, 141e144.

Simpson, D.W., 1976. Seismicity changes associated with reservoir loading. In: Milne, W.G. (Ed.), *Induced Seismicity*. *Engineering Geology* 10 (2e4), 123e150.

Simpson, D.W., 1986. Triggered earthquakes. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 14, 21e42.

Stabile, T.A., Giocoli, A., Perrone, A., Piscitelli, S., Lapenna, V., 2014. Fluid injection induced seismicity reveals a NE dipping fault in the southeastern sector of the High Agri Valley, southern Italy. *Geophysical Research Letters* 41, 5847e5854.

Suckale, J., 2009. Induced seismicity in hydrocarbon fields. *Advances in Geophysics* 51, 55e106. [https://doi.org/10.1016/S0065-2687\(09\)05107-3](https://doi.org/10.1016/S0065-2687(09)05107-3).

Valoroso, L., Improta, L., Chiaraluce, L., Di Stefano, R., Ferranti, L., Govoni, A., Chiarabba, C., 2009. Active faults and induced seismicity in the Val d'Agri area (Southern Apennines, Italy). *Geophysical Journal International* 178 (1), 488e502.

Van Thienen-Visser, K., Breunese, J.N., 2015. Induced seismicity of the Groningen gas field: history and recent developments. *The Leading Edge* 34 (6), 664e671.

Van Wees, J.D., Buijze, L., Van Thienen-Visser, K., Nepveu, M., Wassing, B.B.T., Orlic, B., Fokker, P.A., 2014. Geomechanics response and induced seismicity during gas field depletion in The Netherlands. *Geothermics* 52, 206e219.

Walsh, F.R.I., Zoback, M.D., 2015. Oklahoma's recent earthquakes and saltwater disposal. *Science Advances* 1 (5), e1500195. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1500195>.

Weingarten, M., Ge, S., Godt, J.W., Bekins, B.A., Rubinstein, J.L., 2015. High-rate injection is associated with the increase in U.S. mid-continent seismicity. *Science* 348 (6241), 1336e1340. <https://doi.org/10.1126/science.aab1345>.

White, J.A., Foxall, W., 2016. Assessing induced seismicity risk at CO2 storage projects: recent progress and remaining challenges. *International Journal of Greenhouse Gas Control* 49, 413e424. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2016.03.021>.

Yeck, W.L., Weingarten, M., Benz, H.M., McNamara, D.E., Bergman, E.A., Herrmann, R.B., Rubinstein, J.L., Earle, P.S., 2016. Far-field pressurization likely caused one of the largest injection induced earthquakes by reactivating a large preexisting basement fault structure. *Geophysical Research Letters* 43, 10.198e10.207. <https://doi.org/10.1002/2016GL070861>.

Zoback, M.D., 2007. *Reservoir Geomechanics*. Cambridge University Press, ISBN 978- 0-521-77069-9, pp. 1e449.

Zoback, M.D., Gorelick, S.M., 2012. Earthquake triggering and large-scale geologic storage of carbon dioxide. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 109 (26), 10164e10168. <https://doi.org/10.1073/pnas.1202473109>.

Zoback, M.D., Townend, J., 2001. Implications of hydrostatic pore pressures and high crustal strength for the deformation of intraplate lithosphere. *Tectonophysics* 336, 19e30.

Zoback, M.D., Zinke, J.C., 2002. Production-induced normal faulting in the Valhall and Ekofisk oil fields. *Pure and Applied Geophysics* 159, 403e420.