



(مقاله پژوهشی)

محاسبه پارامترهای موج الکترومغناطیس ناشی از سنگ های آذرین تحت فشار

محمد میر^۱، بابک حقیقی^{*}، روح الله تقوی مندی^۱، ایمان مطیع^۱

۱- گروه فیزیک، واحد مشهد، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد، ایران

(دریافت: آذر ۱۴۰۱، پذیرش: بهمن ۱۴۰۱)

چکیده

بررسی خواص الکتریکی سنگ های تحت فشار دارای اهمیت خاصی است. بررسی این خواص، به دلیل ایجاد امواج الکترومغناطیس در اثر اعمال تنش فشاری بر سنگ ها، امکان هشدار اولیه در صورت ریزش معادن و تونل ها، کاهش آسیب های جانی و غیره را فراهم می کند. برای این منظور ما با اعمال تنش فشاری بر سنگ های آذرینی مثل گابرو و گرانیت، به بررسی تغییرات پارامترهای الکتریکی نمونه ها می پردازیم. اعمال تنش فشاری توسط دستگاه فشار هیدرولیک باعث ایجاد فرآیندهای فیزیکی و شیمیایی در نمونه ها می شود و زوج الکترون-حفره تولید می گردد. در نتیجه، شارش جریان الکتریکی و اختلاف پتانسیل بین حجم مرکزی سنگ تحت فشار و لبه های بدون فشار را در پی خواهد داشت. تنش فشاری بر نمونه ها به طور یکنواخت افزایش و سپس ثابت و در ادامه نیز به طور یکنواخت کاهش می یابد. با اندازه گیری تغییرات جریان بر حسب فشار در طول زمان اعمال تنش فشاری، معادلات جریان الکتریکی، اختلاف پتانسیل الکتریکی سطحی نمونه و همچنین میدان های الکتریکی و مغناطیسی حاصل از تغییرات فشار بر نمونه را به دست می آوریم و نشان می دهیم عامل اصلی به وجود آورنده امواج الکترومغناطیس، حفره های با بار مثبت هستند که در اثر شکستن پیوندهای پراکسی سنگ ایجاد می شوند. نتایج این مقاله علاوه بر تصحیح و تکمیل آزمایش های قبلی، می تواند به عنوان روشی برای تشخیص تغییرات فشار مکان های تحت فشار مثل دیوارها و سقف معادن و ساختمان ها و نیز تغییرات فشار لایه های تکتونیکی زمین لرزه با استفاده از بررسی تغییرات پتانسیل سطحی بکار رود و می تواند روشی با دقت بالا در پیش نشانگری زلزله باشد؛ بنابراین این تحقیق برای بسیاری از محققان رشته های فیزیک، زمین شناسی، مهندسی معدن و غیره می تواند مفید واقع شود.

کلمات کلیدی

گابرو، سنگ های آذرین، جریان الکتریکی، اختلاف پتانسیل الکتریکی سطحی، میدان الکتریکی متغیر با زمان، میدان مغناطیسی متغیر با زمان

*عهده دار مکاتبات: haghighi3735@mshdiau.ac.ir

۱- مقدمه

اولین مطالعات خواص الکتریکی سنگ‌ها برای بهبود درک روش‌های الکتریکی اکتشاف انجام شد [۱]. مطالعه پارامترهای الکتریکی سنگ‌های آذرین برای بسیاری از گرایش‌های فیزیک زمین جامد مورد توجه هستند [۲،۳]. این مطالعات شامل فرآیندهایی است که می‌تواند به زلزله و شرایط قبل از زلزله و حفظ امنیت مکان‌هایی مثل معادن و تونل‌ها، ساختمان‌ها و نیز پیشگیری در مقابل ریزش احتمالی آن‌ها مرتبط باشد [۴-۸]. در سطح زمین، سنگ‌های پوسته، عایق‌های الکتریکی نسبتاً خوبی هستند. یک روش معمول برای بررسی خواص الکتریکی سنگ‌ها در آزمایش‌های تجربی، اندازه‌گیری هدایت الکتریکی [۹] و جریان الکتریکی آن‌ها است. همچنین جریان‌های تحریک‌شده توسط اعمال تنش فشاری و انتشارات صوتی که هم‌زمان از سنگ‌ها هنگام تغییر شکل و شکستگی شارش می‌شوند، در حفاری‌های زیرزمینی (معادن و تونل‌ها) مورد توجه قرار می‌گیرند [۱۰]. برای انجام این پژوهش، تنش فشاری بر سنگ‌های مگنیتو الکتریک و پیرو الکتریک، تحقیق در مورد امواج الکترومغناطیسی قبل از زلزله و فرایندهای شیمیایی سنگ‌های تحت تنش فشاری و غیره مورد بررسی قرار گرفته است.

در یک کار تجربی فروند و همکاران [۹] به دنبال آن بودند که چگونه جریان‌های الکتریکی در سنگ‌ها در عمق حدود ۳۵-۴۵ کیلومتر ایجاد می‌شود. جایی که اکثریت زمین‌لرزه‌های مخرب رخ می‌دهد و دما به‌طور معمول حدود ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد افزایش می‌یابد. آن‌ها همچنین به دنبال این بودند که چگونه اعمال تنش فشاری بر خواص الکتریکی سنگ‌ها تأثیر می‌گذارد [۹]. اعمال فشارهای مکانیکی به سنگ‌های آذرین یا سنگ‌های با دگرگونی درجه بالا منجر به افزایش هدایت الکتریکی می‌شود [۱۱]. آزمایش‌های تجربی در این راستا می‌تواند شرایط محاسبه معادله جریان الکتریکی در اثر اعمال تنش فشاری را برای ما فراهم کند و به درک فرایندهایی که در اثر افزایش کاهش فشارهای تکتونیکی در پوسته زمین اتفاق می‌افتد و نیز تغییر خواص الکتریکی سنگ‌ها کمک کند و بیان کند که چگونه این موضوع ممکن است به سیگنال‌های قابل‌شناسایی منجر شود که زمین قبل از زمین‌لرزه‌های بزرگ ارسال می‌کند. به عبارتی با توجه به فراوانی

سنگ‌های آذرین (از جمله گابرو) در عمقی که اکثر زمین‌لرزه‌های بزرگ رخ می‌دهد و با توجه به ایجاد جریان الکتریکی و تابش امواج الکترومغناطیسی سنگ‌ها در اثر فشارهای تکتونیکی در آن عمق؛ ما در یک آزمایش تجربی به مشابهت از سنگ‌هایی که در عمق محل زلزله تحت تنش‌های شدید هستند، یک سنگ گابرو با ابعاد مشخص را جهت بررسی ویژگی‌های الکتریکی و تابش الکترومغناطیسی آن سنگ‌ها، تحت اعمال تنش فشاری قرار می‌دهیم. سپس به کمک تابع جریان الکتریکی به‌دست‌آمده از نمودار جریان الکتریکی - زمان، به محاسبه و بررسی پارامترهای الکتریکی دیگر آن از جمله روابط میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی آن خواهیم پرداخت. لذا با توجه به امکان دریافت امواج الکترومغناطیسی در سطح زمین قبل از وقوع زلزله، این امر می‌تواند برای پیش‌نشانگری زلزله مفید باشد.

فروند و همکاران این کار را با بررسی تنش فشاری نقص‌های پراکسی آغاز کردند. نقص‌های پراکسی (Peroxy defects) ابتدا در کریستال MgO شناسایی شد [۱۲] و در طیف گسترده‌ای از مواد نیز مشاهده شده است [۱۳]. تنش فشاری، نقص‌های پراکسی را فعال می‌کند و باعث تولید حامل‌های بار مثبت حفره (Positive hole charge carriers) می‌شود [۱۴-۱۶]. به عبارتی وقتی که یک پیوند شکسته می‌شود، یک الکترون اتم، جای خود را ترک می‌کند و آنچه بر جای می‌ماند یک اتم با بار مثبت است که آمادگی پذیرش یک الکترون جدید را دارد. این محل خالی یک حفره نامیده می‌شود. این حفره می‌تواند توسط الکترون جدا شده دیگر پر شود. در نتیجه این کار باعث می‌شود تا حفره در محل دیگری تشکیل شود. بدین ترتیب با جابجا شدن الکترون‌ها، حفره‌ها هم جابجا خواهند شد و جریانی از حفره‌ها را خواهیم داشت. این اتفاق شارش جریان الکتریکی و اختلاف پتانسیل سطحی را در پی خواهد داشت که در ادامه به بررسی آن می‌پردازیم.

نقص‌های پراکسی از پیوند کوالانسی جفت آنیون‌های اکسیژن در حالت ظرفیت ۱ - به‌جای حالت معمول ۲- تشکیل شده است [۱۷،۹]. وجود نقص‌های پراکسی در سیلیس [۱۸] و سیلیکات‌ها [۱۹] نشان داده شده است. این فرایند به این صورت است که یک نوع نقص پراکسی در یک ماده معدنی سیلیکات $O_3Si-OO-SiO_3$ جایگزین حالت عادی $O_3Si-O-SiO_3$ می‌شود. به‌طوری‌که فشارهای بالا

قبل زلزله، نیروهای تکتونیکی بر سنگ‌های عمیق پورته زمین وارد می‌شوند. در نتیجه این نیروها، سطح تنش افزایش می‌یابد و بنابراین الکترون‌ها و حفره‌ها در اثر شکستن پیوندهای پراکسی، ایجاد می‌شوند. حفره‌ها توانایی خروج از سنگ‌های تحت تنش را دارند و می‌توانند به داخل سنگ و به سمت سنگ‌های بدون تنش اطراف پخش شوند. در مقابل الکترون‌ها، فقط در داخل حجم سنگ تحت تنش پخش می‌شوند [۹]. حفره‌های مثبت، جریان‌های الکتریکی را تشکیل می‌دهند که سریع و در فاصله‌های دور حرکت می‌کنند و در طول مسیر باعث ایجاد طیف گسترده‌ای از فرآیندهای فیزیکی و شیمیایی از جمله پتانسیل‌های الکتریکی زمین، انتشار مادون قرمز، یونیزاسیون عظیم هوا، انتشار رادون، افزایش سطوح ازن، سطوح سمی مونوکسید کربن (CO) و ... می‌شوند [۳۰]. حرکت این بارها موجب ایجاد جریان الکتریکی شده و در نهایت باعث ایجاد اختلاف پتانسیل الکتریکی می‌شود. ما با محاسبه معادله تغییرات جریان با استفاده از محاسبه تابع فوریه آن، معادله تغییرات اختلاف پتانسیل سطحی را برای سنگ تحت تنش فشاری میسر می‌سازیم.

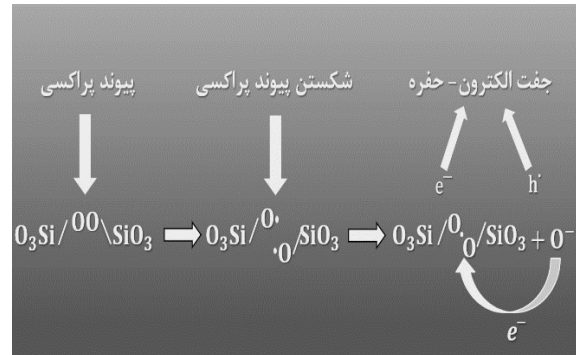
همانند زلزله، برای نمونه سنگ تحت تنش فشاری نیز شارش حامل‌های بار خروجی دارای بار مثبت وجود دارد. این شارش جریان الکتریکی باعث ایجاد میدان‌های الکتریکی میکروسکوپی می‌شوند؛ بنابراین با وجود میدان الکتریکی متغیر با زمان، یک میدان مغناطیسی متغیر با زمان خواهیم داشت. روابط مربوط به میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی حاصل از تغییرات فشار بر نمونه، به کمک روابط معادلات جریان الکتریکی و تغییرات اختلاف پتانسیل الکتریکی، قابل محاسبه است. لذا به کمک این تحقیق می‌توان بیان کرد که چگونه این موضوع ممکن است به سیگنال‌های الکترومغناطیسی قابل شناسایی منجر شود که زمین قبل از زمین‌لرزه‌های بزرگ ارسال می‌کند.

۲- روش تحقیق

۲-۱- نمونه

نمونه‌های تهیه‌شده از جنس گابرو و گرانیت در اندازه‌های متفاوتی تحت تأثیر تنش فشاری تک‌محور قرار می‌گیرند. بدین گونه که تعدادی تحت تأثیر فشار ثابت و تعدادی نیز با اعمال فشار و بعد کاهش آن، مورد آزمایش

مطابق شکل ۱ موجب شکل‌گیری جفت الکترون-حفره می‌شود. جایی که الکترون e^- در پیوند شکسته شده $O^- - O^-$ به دام افتاده است. در حالی که حالت الکترونیکی مرتبط با O^- در ساختار O^{2-} نشان‌دهنده یک نقص الکترون یا حفره است که توسط h^+ نشان داده شده است [۲۳-۲۰].

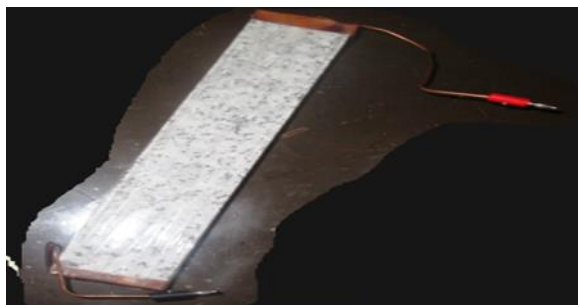


شکل ۱: نمایش شماتیک شکستن پیوند پراکسی در ساختار سیلیکات. مرحله اول نحوه تجزیه نقص پراکسی را مشخص می‌کند. مرحله دوم انتقال الکترون را از یک O^{2-} به پیوند پراکسی جداشده را نشان می‌دهد که منجر به تولید زوج الکترون-حفره می‌شود [۹].

اعمال فشارهای مکانیکی به سنگ‌های آذرین یا سنگ‌های با درجه دگرگونی بالا به مدت طولانی منجر به افزایش هدایت الکتریکی، به‌ویژه در هنگام بارگذاری است [۱۱]. فروند و همکاران [۹] نیز این آزمایش را با اعمال تنش فشاری مرکز نمونه گابرو انجام دادند. مقایسه جریان تحریک‌شده با اعمال تنش فشاری نمونه‌های گابرو خشک و اشباع از مایعات نیز انجام شده است [۲۴]. همچنین خواص الکتریکی سنگ گابرو در دما و فشار بالا در چندین کار مورد بررسی قرار گرفته است [۲۵-۲۸].

فعال شدن بارهای الکترونی (الکترون‌ها و حفره‌های مثبت) در سنگ‌ها با فعال‌سازی یا تجزیه نقص‌های پراکسی در طول تنش‌های تکتونیکی فزاینده قبل از هرگونه فعالیت لرزه‌ای یک فرایند فیزیکی قابل بررسی است [۲۹]. لذا ما در این مقاله با تحت فشار قرار دادن سنگ نمونه گابرو علاوه بر بررسی پارامترهای الکتریکی سنگ‌های آذرین تحت تنش فشاری، به دنبال بیان مدل فیزیکی جدید در مقیاس کوچک هستیم که بتوانیم زلزله را پیش‌نشانگری کنیم. این کار با انجام آزمایش‌های تجربی اعمال تنش فشاری تک‌محوری بر نمونه‌هایی از سنگ‌های آذرین مانند گابرو و گرانیت انجام می‌شود.

کاملاً می‌چسبانیم (شکل ۴). سپس اتصالات را بر اساس آنچه توضیح داده شد مطابق شکل ۵ انجام می‌دهیم.



شکل ۴: نمایش دو سیم مسی لحیم شده به صفحات مسی دو طرف سنگ گابرو



شکل ۵: نمایش کلی از نحوه اتصالات سنگ گابرو جهت اعمال فشار تک‌محوری

دستگاه اعمال فشار در آزمایشگاه سازه به‌منظور وارد کردن نیرو به قطعات بتنی در ابعاد تقریبی ۱۰۵ سانتی‌متر مکعب، فشار تک‌محور معادل ۵ تن بر سانتی‌متر مربع را تحمل می‌کند.

۲-۲- انجام آزمایش

ابتدا سنگ گابروی (نمونه) عایق شده را روی دستگاه فشار هیدرولیک قرار می‌دهیم و مدار لازم را مطابق شکل ۶ ایجاد می‌کنیم. سنگ گابرو را تحت تنش فشاری افزایشی تا ۳۰ مگا پاسکال، در مدت حدود ۷ ثانیه قرار می‌دهیم. البته سنگ گابرو از سنگ‌های مقاوم است و آستانه شکست آن بسیار بیشتر از نمونه مورد آزمایش است. این اعمال فشار بدین‌صورت است که بعد از افزایش فشار، برای مدت‌زمان کوتاهی فشار را ثابت نگه می‌داریم و سپس آن را کاهش می‌دهیم تا به صفر برسد. کل این فرایند حدود ۲۳ ثانیه است. تغییرات فشار به‌صورت خطی است.

قرار گرفتند. نمونه شرح داده‌شده در زیر از نوع گابرو است. گابروها معادل درونی بازالت‌ها و از قسمت اعماق گوشته بالایی زمین هستند [۹] که از ماگماهای مذاب تشکیل شده‌اند. [۳۱]

برای اندازه‌گیری جریان الکتریکی، ابتدا به تهیه نمونه سنگ گابرو اقدام نمودیم (شکل ۲) و بعد از برش‌های مناسب، سنگی به ابعاد ۵×۵×۱۰ سانتی‌متر مکعب از نوع گابرو تهیه شد. (شکل ۳) از آنجاکه یکی از اهداف ما در این کار به دست آوردن جریان الکتریکی از سنگ در اثر تنش فشاری است؛ بنابراین، ابعاد سنگ اهمیت چندانی ندارد. اگرچه هرچه ابعاد سنگ بزرگ‌تر باشد می‌تواند فشار بیشتری را تحمل کند و احتمالاً جریان الکتریکی را بهتر نشان می‌دهد.



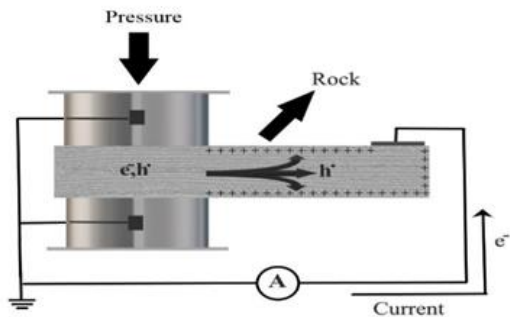
شکل ۲: نمونه سنگ گابرو قبل از برش



شکل ۳: نمونه گابرو بعد از برش (سمت راست) و نمونه گرانیات بعد از برش (سمت چپ)

سنگ‌های آذرین و سنگ‌های با درجه دگرگونی بالا تحت تنش فشاری به‌مانند یک باتری عمل می‌کنند [۳۲، ۳۳]. برای نشان دادن خاصیت باتری در سنگ و تحت فشار قرار دادن سنگ‌ها، دو طرف آن‌ها را توسط اتصالات مسی می‌بندیم و در یک مدار بسته با نانوآمپر متر قرار می‌دهیم. بدین‌جهت ابتدا دو قطعه مسی کمی بزرگ‌تر از ابعاد دو طرف سنگ برش می‌دهیم و به دو طرف سنگ

به ابعاد نمونه‌ها و مقدار فشار وارد شده، تغییر دمای سنگ، باعث تغییر مقدار جریان الکتریکی خواهد شد.



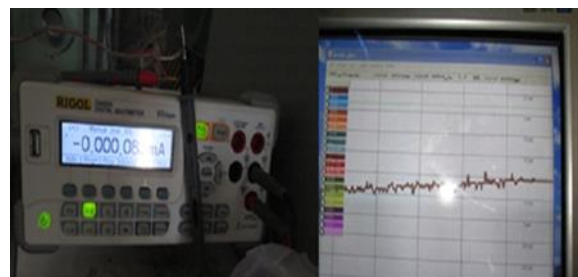
شکل ۸: نحوه خروج حفره در اثر فشار و ایجاد جریان الکتریکی [۲۱]

به کمک داده‌های به‌دست‌آمده از نانوآمپرمتر و با استفاده از نرم‌افزار؛ نمودار جریان برحسب زمان را رسم می‌کنیم. محور عمودی شدت جریان الکتریکی برحسب نانو آمپر و محور افقی زمان برحسب ثانیه را نشان می‌دهد (شکل ۹). مطابق نمودار به‌دست‌آمده وقتی سنگ گابرو تحت تنش فشاری قرار می‌گیرد، با افزایش فشار، مقدار جریان الکتریکی شبیه به پیک‌های پیوسته صعودی خواهد شد. به‌گونه‌ای که پس از مدت حدود ۷ ثانیه مقدار جریان به ۱۴۱ nA می‌رسد. با ثابت نگه‌داشتن مقدار فشار، جریان الکتریکی تقریباً ثابتی مشاهده می‌شود؛ به‌طوری‌که در زمان ۱۴/۳ ثانیه مقدار جریان الکتریکی برابر ۱۳۷ nA است. پس‌ازاین زمان مقدار فشار را کاهش می‌دهیم و مشاهده می‌کنیم که مقدار جریان الکتریکی برخلاف حالت افزایش فشار به‌صورت پیک‌های نزولی پیوسته است؛ تا جایی که در زمان ۲۳ ثانیه مقدار جریان الکتریکی به میزان صفر می‌رسد. در نمودار، بخش تقریباً صاف با شیب کم زمانی است که فشار برای مدت کوتاهی ثابت است و پس‌از آن شروع به کاهش می‌کند. شکل به‌دست‌آمده شباهت فراوانی با آزمایش فروند و همکاران در کار [۹] دارد و صحت انجام آزمایش را تأیید می‌نماید به عبارتی در نمودار شکل ۹ به دلیل نوسان بارهای الکترونی در اثر اعمال تنش فشاری با یک سیگنال جریان الکتریکی روبرو هستیم. با افزایش فشار بر سنگ گابرو شاهد شکستن پیوندهای بیشتر و نیز افزایش تعداد بارهای الکترونی جدا شده از پیوندها و در نتیجه افزایش دامنه فرکانسی سیگنال جریان الکتریکی خواهیم بود. این افزایش فرکانس، ناشی از تداخل سازنده



شکل ۶: نمونه گابرو تحت فشار

هم‌زمان تغییرات جریان الکتریکی برحسب فشار را در طول زمان اعمال تنش فشاری ثبت می‌کنیم. این تغییرات به‌وسیله دستگاه نانوآمپرمتر (تغییرات جریان برحسب زمان) نشان داده می‌شود (شکل ۷ الف). تنش فشاری با افزایش زمان به ترتیب افزایش، ثابت و کاهش می‌یابد. نمودار آن توسط سیستمی که به دستگاه اعمال فشار متصل شده بود نمایش داده می‌شود (شکل ۷ ب).



شکل ۷: الف) دستگاه نانوآمپرمتر برای ثبت جریان عبوری از سنگ تحت فشار ب) نمودار سرعت و میزان فشار با زمان

در شکل ۷ افزایش جریان الکتریکی به‌طور هماهنگ با افزایش فشار مشاهده می‌شود و با شکسته شدن نمونه مقدار ثابت جریان را در منحنی مشاهده می‌کنیم. در این آزمایش دمای محیط ثابت در نظر گرفته شده است؛ زیرا تغییر دمای محیط می‌تواند در جریان ایجاد شده اختلال ایجاد کند. البته انجام آزمایش در دماهای بالاتر [۲۵-۲۸] تغییرات مشابه دارد و تفاوت در میزان جریان را شاهد خواهیم بود.

در این آزمایش مشاهده می‌شود که جریان خروجی از سنگ، در اثر اعمال تنش فشاری است (شکل ۸). با توجه

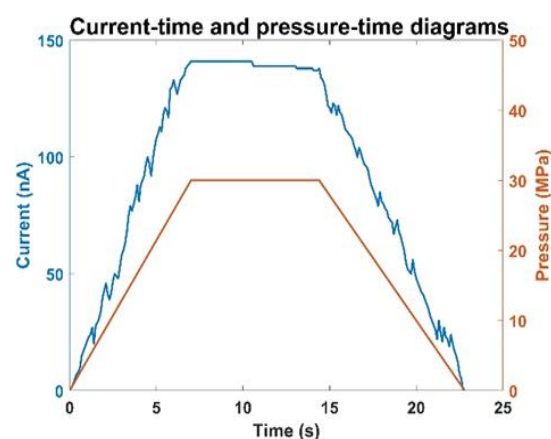
افزایش‌ها و کاهش‌های ناگهانی دیده می‌شود (شکل ۹). البته در کل در یک روند زمانی با اعمال تنش فشاری، باتری شارژ می‌شود و با کاهش فشار نیز همراه کاهش‌ها و افزایش‌های ناگهانی، میزان شارژ کاهش می‌یابد.

در طی اعمال تنش فشاری، انواع مختلفی حامل بار مثبت فعال می‌شوند که در نمودار دیده می‌شوند و با زمان‌های متفاوت واپاشی یا افت پیدا می‌کنند. بعضی حامل‌های بار مثبت با عمر کوتاه، در طی فشار، سریع ظاهر و نابود می‌شود و زمان‌های بقا و نابودی آن‌ها از چند ثانیه تا چند دقیقه است و برخی دیگر برای مدت بیشتری فعال باقی می‌مانند. این حامل‌های بار موجب: (۱) اختلاف پتانسیل بین حجم مرکزی سنگ تحت فشار و لبه‌های بدون فشار می‌شوند و (۲) جریان خروجی از زیر حجم تحت تنش فشاری را تولید می‌کنند [۹].

یکی دیگر از مشاهدات قابل توجه در آزمایش فعال شدن حفره‌ها است (شکل ۸). جریان‌هایی خروجی از یک حجم معین سنگ، به فشارهای اعمال شده مرتبط نیستند و حتی در تنش فشاری کم (کمتر از ۱۰ مگا پاسکال) برای ایجاد جریان‌های خروجی به شکل حیرت‌انگیزی کافی است. این نشان می‌دهد تعداد زیادی حفره در حال فعال شدن هستند. حفره‌ها نیز با تنش فشاری بیشتر همچنان فعالیتشان ادامه می‌یابد. هنگامی که فشار ثابت می‌شود، جریان‌ها به آرامی کاهش می‌یابند؛ اما فشار اضافی متناوب موجب افزایش ناپایدار در جریان خروجی می‌شود. هنگامی که تنش فشاری حذف می‌شوند، جریان‌های خروجی در نهایت به سرعت کاهش می‌یابد. این موضوع نشان می‌دهد که بیشتر حفره‌ها به حالت غیرفعال و ساکن باز می‌گردند که در کارهای [۳۴، ۹] هم قابل مشاهده است.

یکی دیگر از ویژگی‌های قابل توجه این است که هنگام فعال‌سازی حفره‌ها، آن‌ها توانایی خروج از زیر حجم تحت تنش فشاری در مرکز را به لبه‌های بدون فشار نمونه دارند. وقتی فشار سریع‌تر اعمال می‌شود، جریان‌های خروجی بزرگ‌تر هستند. همچنین هنگامی که یک فشار ثابت حفظ می‌شود، یعنی زمانی که یک گرادیان فشار پایدار بین مرکز و لبه‌های سنگ حفظ می‌شود، جریان خروجی حفره‌ها همچنان ادامه می‌یابد. این اتفاق نشان‌دهنده عمر طولانی مدت آن‌هاست؛ اما در نهایت وقتی که تمام حامل‌های بار بازترکیب می‌شوند، این فرایند متوقف می‌شود.

دامنه‌های فرکانس بارهای مختلف است. همچنین زمانی که فشار بر سنگ نمونه کاهش می‌یابد، تعداد بارهای الکترونی جدا شده از پیوندها کاهش می‌یابد؛ بنابراین شاهد کاهش دامنه فرکانسی سیگنال جریان الکتریکی هستیم. این موضوع ناشی از تداخل ویرانگر دامنه‌های فرکانسی بارها و کاهش تعداد آن‌هاست. همچنین زمانی که فشار ثابت است بارهای الکترونی جدید ایجاد نمی‌شود؛ بنابراین مقدار سیگنال جریان تقریباً یک مقدار ثابت است. دلیل این اتفاق ثابت بودن دامنه فرکانسی بارها به دلیل ثابت ماندن تعداد بارهای الکترونی است.



شکل ۹: نمودار جریان برحسب زمان برای نمونه آزمایش شده

شباهت این نمودار به زلزله از این جهت قابل بیان است که با گذر روزها و ماه‌ها، گرادیان‌های تنش توسط نیروهای تکتونیکی در پوسته زمین افزایش می‌یابد. این افزایش فشار تا زمانی که زلزله اتفاق بیفتد و زمین بیشترین انرژی خود را آزاد کند وجود دارد. سپس در حین زلزله مقدار این فشار برای مدت کوتاهی در حداکثر مقدار خود ثابت می‌شود و در نهایت کم‌کم با تخلیه انرژی زمین، مدار فشار کاهش می‌یابد تا به صفر برسد.

لازم به ذکر است در مواردی که نمونه تحت اعمال تنش فشاری می‌شکست، فقط نیمه چپ نمودار به دست می‌آید و جریان نیز قطع می‌شود.

همان‌طور که بیان شد، سنگ آذرین تحت تنش فشاری به‌مانند یک باتری است. در این آزمایش نحوه شارژ این باتری نیز بررسی شد. برخلاف آزمایش‌ها [۳۳، ۳۴] که بیان می‌کرد ((سنگ تحت تنش فشاری با استفاده از فشار "روشن" و با حذف فشار "خاموش" می‌شود))؛ ما مشاهده کردیم تغییرات جریان الکتریکی آنی نیست و به‌صورت

۳- تابع جریان الکتریکی و محاسبه تابع اختلاف پتانسیل الکتریکی سطحی نمونه

پس از رسم نمودار جریان الکتریکی-زمان (شکل ۹) با استفاده از نرم‌افزار ممتیکا، به محاسبه تابع فوریه جریان الکتریکی برحسب زمان می‌پردازیم. ما در اینجا یک سیگنال جریان الکتریکی داریم. از آنجاکه سیگنال‌ها توابع متناوبی از زمان هستند؛ فوریه به ما کمک می‌کند تا هر تابع متناوب را به صورت حاصل جمع تعداد نامتناهی از توابع سینوسی و کسینوسی بیان کنیم. لذا ما با استفاده از روش فیت کردن تابع فوریه مربوط به جریان الکتریکی را به دست می‌آوریم که همان تابع جریان الکتریکی است. تابع فوریه حاصل عبارت است از:

$$I(t) = 1.22056 \times 10^{-8} - 1.89897 \times 10^{-8} \cos[t] - 2.15158 \times 10^{-9} \cos[2t] + 7.18606 \times 10^{-10} \cos[3t] + 2.10856 \times 10^{-9} \cos[4t] - 2.28931 \times 10^{-10} \cos[5t] - 8.14266 \times 10^{-10} \cos[6t] + 9.60304 \times 10^{-10} \cos[7t] + 8.33462 \times 10^{-10} \cos[8t] + 9.90279 \times 10^{-10} \cos[9t] + 1.15453 \times 10^{-10} \cos[10t] + 8.11987 \times 10^{-10} \cos[11t] - 9.74549 \times 10^{-10} \cos[12t] + 3.06428 \times 10^{-9} \cos[13t] - 1.53075 \times 10^{-9} \cos[14t] + 1.84577 \times 10^{-9} \cos[15t] - 7.76204 \times 10^{-10} \cos[16t] + 1.17067 \times 10^{-9} \cos[17t] - 5.09854 \times 10^{-11} \cos[18t] + 1.25781 \times 10^{-9} \cos[19t] - 7.56472 \times 10^{-10} \cos[20t] + 1.63216 \times 10^{-8} \sin[t] - 1.66779 \times 10^{-8} \sin[2t] + 2.5485 \times 10^{-9} \sin[3t] - 6.30455 \times 10^{-9} \sin[4t] + 4.47011 \times 10^{-9} \sin[5t] - 5.30915 \times 10^{-9} \sin[6t] + 1.60417 \times 10^{-9} \sin[7t] - 3.71549 \times 10^{-9} \sin[8t] + 2.5742 \times 10^{-9} \sin[9t] - 3.02497 \times 10^{-9} \sin[10t] + 2.71436 \times 10^{-9} \sin[11t] - 3.68605 \times 10^{-9} \sin[12t] + 1.92732 \times 10^{-9} \sin[13t] - 9.73409 \times 10^{-10} \sin[14t] + 6.1008 \times 10^{-10} \sin[15t] - 5.46212 \times 10^{-10} \sin[16t] + 3.59655 \times 10^{-10} \sin[17t] - 7.03231 \times 10^{-10} \sin[18t] + 1.07993 \times 10^{-9} \sin[19t] - 3.06206 \times 10^{-10} \sin[20t] \quad (۱)$$

ضرایب t که درواقع همان فرکانس‌های هر موج می‌باشند، برای هر موج متفاوت هستند. مشابه این نتایج در نمونه‌های دیگر گابرو و گرانتیت مشاهده شد.

همچنین برای راحتی انجام محاسبات ضرایب $\sin$ را به صورت A_1 تا A_{20} و ضرایب $\cos$ را به صورت B_1 تا B_{20} نشان می‌دهیم. با توجه به وجود سیگنال جریان الکتریکی، ضرایب فوریه دامنه هر موج را بیان می‌کنند. ضرایب A_1 تا A_{20} دامنه فرکانس هر موج سینوسی و همچنین ضرایب B_1 تا B_{20} دامنه هر موج کسینوسی را نشان می‌دهند. مقدار

ثابت را I_0 در نظر می‌گیریم؛ بنابراین رابطه (۱) برابر خواهد شد با:

$$I(t) = A_1 \sin(t) + A_2 \sin(2t) + \dots + A_{20} \sin(20t) + B_1 \cos(t) + B_2 \cos(2t) + \dots + B_{20} \cos(20t) + I_0 \quad (۲)$$

به‌طوری‌که:

$$\begin{aligned} B_1 &= -1.89897 \times 10^{-8}, \dots, \\ B_{20} &= -7.56472 \times 10^{-10} \\ A_1 &= 1.63216 \times 10^{-8}, \dots, \\ A_{20} &= -3.06206 \times 10^{-10} \\ I_0 &= 1.22056 \times 10^{-8} \end{aligned}$$

این معادله تابع فوریه جریان الکتریکی نمونه را می‌دهد. در ادامه برای به دست آوردن اختلاف پتانسیل سطحی نمونه ابتدا به محاسبه پتانسیل برداری A می‌پردازیم.

$$A_z(r, t) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{I \left(z', t - \frac{|\vec{r} - z'\hat{k}|}{c} \right)}{|\vec{r} - z'\hat{k}|} dz' \quad (۳)$$

بعد از بسط رابطه (۳) با توجه به تأخیری بودن پتانسیل خواهیم داشت:

$$\begin{aligned} A_r &= \frac{\mu_0 \lambda}{8\pi r} \left[A_1 \sin\left(t - \frac{r}{c}\right) + \dots \right. \\ &+ A_{20} \sin 20\left(t - \frac{r}{c}\right) + B_1 \cos\left(t - \frac{r}{c}\right) \\ &+ \dots + B_{20} \cos 20\left(t - \frac{r}{c}\right) + I_0 \left. \right] \cos \theta \quad (۴ \text{ الف}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_\theta &= -\frac{\mu_0 \lambda}{8\pi r} \left[A_1 \sin\left(t - \frac{r}{c}\right) + \dots \right. \\ &+ A_{20} \sin 20\left(t - \frac{r}{c}\right) + B_1 \cos\left(t - \frac{r}{c}\right) \\ &+ \dots + B_{20} \cos 20\left(t - \frac{r}{c}\right) + I_0 \left. \right] \sin \theta \quad (۴ \text{ ب}) \end{aligned}$$

$$A_\phi = 0 \quad (۴ \text{ ج})$$

r فاصله تا منبع انتشار و c سرعت امواج الکترومغناطیس و θ زاویه بین r و فاصله عمودی منبع انتشار تا سطح سنگ است. با توجه به روابط (۴ الف) و (۴ ب) و همچنین $A_\phi = 0$ و نیز رابطه $c^2 = \frac{1}{\mu_0 \epsilon_0}$ و به کمک رابطه $\nabla \cdot A + \frac{1}{c^2} \frac{\partial V}{\partial t} = 0$ مقدار تابع اختلاف پتانسیل سطحی نمونه $V(r, t)$ که ناشی از اختلاف پتانسیل بین محل

بدین صورت که هنگام زلزله، سنگ‌ها در بالاترین فشارهای تکتونیکی شکسته می‌شوند. در اثر شکسته شدن پیوندهای پراکسی حامل‌های بار مثبت از حجم سنگ تحت فشار به داخل سنگ‌های اطراف که تحت فشار نیستند و یا تحت فشار کم هستند شارش پیدا می‌کند؛ بنابراین یک شارش جریان و انتقال بارهای مثبت به سطح زمین را مشاهده می‌کنیم. چنین جریان خروجی یک جریان الکتریکی را تشکیل می‌دهد که سیگنال‌های الکترومغناطیسی (EM) را تولید می‌کند [۳۵-۳۶]. درواقع این حفره‌ها هستند که در طول انتشار در پوسته زمین، می‌توانند تابش الکترومغناطیسی ULF و ELF را تولید کنند. اگر جریان خروجی به صورت انفجاری رخ دهد، منجر به پالس‌های الکترومغناطیس کوتاه می‌شود. اگر جریان خروجی پیوسته باشد، جریان ممکن است نوسان داشته باشد و انتشارات الکترومغناطیس را در محدوده فرکانس وسیعی ایجاد کند. البته فقط امواج کم فرکانس (ULF/ELF) از میان سنگ عبور می‌کنند و می‌توانند به سطح زمین برسند [۳۵]. ULFها امواجی با فرکانس $f \leq 1$ Hz و ELFها امواجی با فرکانس $f \leq 1$ kHz هستند [۳۶]. امواج الکترومغناطیسی ULF/ELF دارای فرکانس پایین و طول موج بیشتری هستند و در طول انتشار کمتر ضعیف می‌شوند؛ بنابراین این امواج می‌توانند مسافت‌های طولانی‌تری را طی کنند [۸]. در نتیجه به همین دلیل می‌توانند به سطح زمین برسند و برای پیش‌نشانگری قبل از وقوع زلزله دارای اهمیت هستند.

در توضیح چگونگی ایجاد میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی باید بیان نمود که وقتی حامل‌های بار خروجی دارای بار مثبت از پایین به سطح زمین می‌رسند، میدان‌های الکتریکی میکروسکوپی ایجاد می‌کنند که به اندازه کافی قوی هستند [۳۵]. لذا با وجود میدان الکتریکی متغیر با زمان، یک میدان مغناطیسی متغیر با زمان خواهیم داشت. هدف ما در این قسمت محاسبه میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی برای سنگ نمونه تحت تنش فشاری به مشابیهت از میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی امواج لرزه‌ای است.

در این مقاله بر اساس روش فوریه امکان محاسبه دقیق معادله جریان الکتریکی و سپس محاسبه اختلاف پتانسیل الکتریکی و همچنین محاسبه بار الکتریکی فراهم شده است؛ بنابراین ما در این روش برای هر سنگی که با اعمال تنش

اعمال فشار بر سنگ و لبه‌های بدون فشار، و عامل ارش جریان الکتریکی است، به صورت زیر به دست خواهد آمد:

$$\frac{\partial V}{\partial t} = \frac{\lambda \cos \theta}{8\pi\epsilon_0 r^2} \left(A_1 \sin \left(t - \frac{r}{c} \right) + \dots + A_{20} \sin 20 \left(t - \frac{r}{c} \right) + B_1 \cos \left(t - \frac{r}{c} \right) + \dots + B_{20} \cos 20 \left(t - \frac{r}{c} \right) + I_0 \right) + \frac{\lambda \cos \theta}{8\pi\epsilon_0 r} \left(\frac{A_1}{c} \cos \left(t - \frac{r}{c} \right) + \dots + \frac{20A_{20}}{c} \cos 20 \left(t - \frac{r}{c} \right) - \frac{B_1}{c} \sin \left(t - \frac{r}{c} \right) - \dots - \frac{20B_{20}}{c} \sin 20 \left(t - \frac{r}{c} \right) \right) \quad (5)$$

حال با انتگرال‌گیری از رابطه (۵) نسبت به زمان t مقدار تابع اختلاف پتانسیل سطحی $V(r,t)$ برابر خواهد شد با:

$$V(r,t) = \frac{\lambda \cos \theta}{8\pi\epsilon_0} \left[\left(\frac{1}{r^2} \right) \left(-A_1 \cos \left(t - \frac{r}{c} \right) - \dots - \frac{A_{20}}{20} \cos 20 \left(t - \frac{r}{c} \right) + B_1 \sin \left(t - \frac{r}{c} \right) + \dots + \frac{B_{20}}{20} \sin 20 \left(t - \frac{r}{c} \right) + I_0 t \right) + \left(\frac{1}{rc} \right) \left(A_1 \sin \left(t - \frac{r}{c} \right) + \dots + A_{20} \sin 20 \left(t - \frac{r}{c} \right) + B_1 \cos \left(t - \frac{r}{c} \right) + \dots + B_{20} \cos 20 \left(t - \frac{r}{c} \right) \right) \right] \quad (6)$$

رابطه (۶) تغییرات پتانسیل سطحی را نشان می‌دهد که در کارها و محاسبات بعدی مورد استفاده قرار خواهد گرفت. از جمله برای پیش‌بینی رفتارهای بعدی سطوحی که تحت تنش فشاری هستند قابل استفاده خواهد بود؛ بنابراین با اندازه‌گیری آن می‌توان میزان تغییرات فشار سطوح را مشخص کرد. همچنین می‌تواند برای پیش‌بینی خرابی‌های ناشی از فشار اضافه بر دیواره‌های معادن و ساختمان‌ها و همچنین زلزله مورد استفاده قرار گیرد.

نتایج مشابه در مورد مرمر و گرانیت نیز مشاهده می‌شوند.

۴- محاسبه میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی ایجاد شده توسط نمونه تحت فشار

قبل از زلزله، گرادیان‌های تنش توسط نیروهای تکتونیکی ایجاد می‌شوند که در پوسته زمین افزایش و کاهش می‌یابند. این تنش‌ها در طول روزها و حتی ماه‌ها قبل از زلزله‌های بزرگ تکامل می‌یابند و زمین‌لرزه زمانی رخ می‌دهد که تنش‌های تکتونیکی در اعماق زمین قبل از زلزله‌های بزرگ ایجاد می‌شود [۹]. در طول ایجاد تنش، فرآیندهایی که در سنگ‌های پوسته رخ می‌دهند منجر به فعال شدن حامل‌های بار الکترونی بسیار متحرک می‌شوند.

$$E_r = -\frac{\partial A_r}{\partial t} - \frac{\partial V}{\partial r} = \left(-\frac{\mu_0 \lambda \cos \theta}{8\pi r}\right) \left(A_1 \cos\left(t - \frac{r}{c}\right) + \dots + 20A_{20} \cos 20\left(t - \frac{r}{c}\right) - B_1 \sin\left(t - \frac{r}{c}\right) - \dots - 20B_{20} \sin 20\left(t - \frac{r}{c}\right)\right) - \left(\frac{\mu_0 \lambda \cos \theta}{8\pi r}\right) \left[\left(-\frac{2}{r^3}\right) \left(-A_1 \cos\left(t - \frac{r}{c}\right) - \dots - \frac{A_{20}}{20} \cos 20\left(t - \frac{r}{c}\right) + B_1 \sin\left(t - \frac{r}{c}\right) + \dots + \frac{B_{20}}{20} \sin 20\left(t - \frac{r}{c}\right) + I_0 t\right) + \left(\frac{1}{r^2}\right) \left(-\frac{A_1}{c} \sin\left(t - \frac{r}{c}\right) - \dots - \frac{A_{20}}{c} \sin 20\left(t - \frac{r}{c}\right) - \frac{B_1}{c} \cos\left(t - \frac{r}{c}\right) - \dots - \frac{B_{20}}{c} \cos 20\left(t - \frac{r}{c}\right)\right) + \left(-\frac{1}{r^2 c}\right) \left(A_1 \sin\left(t - \frac{r}{c}\right) + \dots + A_{20} \sin 20\left(t - \frac{r}{c}\right) + B_1 \cos\left(t - \frac{r}{c}\right) + \dots + B_{20} \cos 20\left(t - \frac{r}{c}\right)\right) + \left(\frac{1}{rc}\right) \left(-\frac{A_1}{c} \cos\left(t - \frac{r}{c}\right) - \dots - \frac{20A_{20}}{c} \cos 20\left(t - \frac{r}{c}\right) + \frac{B_1}{c} \sin\left(t - \frac{r}{c}\right) + \dots + \frac{20B_{20}}{c} \sin 20\left(t - \frac{r}{c}\right)\right)\right]$$

با ساده‌سازی عبارات مقدار E_r به شکل رابطه (۷ الف) به دست می‌آید:

$$E_r = \left(\frac{\lambda \cos \theta}{4\pi \epsilon_0}\right) \left[\left(\frac{1}{r^3}\right) \left(-A_1 \cos\left(t - \frac{r}{c}\right) - \dots - \frac{A_{20}}{20} \cos 20\left(t - \frac{r}{c}\right) + B_1 \sin\left(t - \frac{r}{c}\right) + \dots + \frac{B_{20}}{20} \sin 20\left(t - \frac{r}{c}\right) + I_0 t\right) + \left(\frac{1}{r^2 c}\right) \left(A_1 \sin\left(t - \frac{r}{c}\right) + \dots + A_{20} \sin 20\left(t - \frac{r}{c}\right) + B_1 \cos\left(t - \frac{r}{c}\right) + \dots + B_{20} \cos 20\left(t - \frac{r}{c}\right)\right)\right] \quad (۷ الف)$$

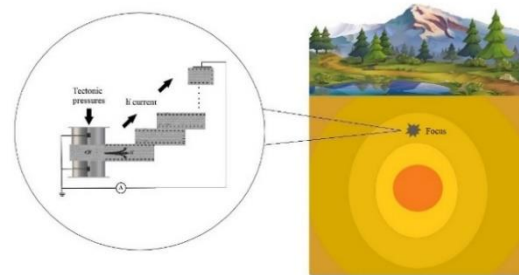
همچنین با استفاده از مقادیر A_θ و V از رابطه‌های (۴ ب) و (۶) مقدار E_θ برابر است با:

$$E_\theta = -\frac{\partial A_\theta}{\partial t} - \frac{1}{r} \frac{\partial V}{\partial \theta} = \left(\frac{\mu_0 \lambda \sin \theta}{8\pi r}\right) \left(A_1 \cos\left(t - \frac{r}{c}\right) + \dots + 20A_{20} \cos 20\left(t - \frac{r}{c}\right) - B_1 \sin\left(t - \frac{r}{c}\right) - \dots - 20B_{20} \sin 20\left(t - \frac{r}{c}\right)\right) + \left(\frac{\lambda \sin \theta}{8\pi \epsilon_0 r}\right) \left[\left(\frac{1}{r^2}\right) \left(-A_1 \cos\left(t - \frac{r}{c}\right) - \dots - \frac{A_{20}}{20} \cos 20\left(t - \frac{r}{c}\right) + B_1 \sin\left(t - \frac{r}{c}\right) + \dots + \frac{B_{20}}{20} \sin 20\left(t - \frac{r}{c}\right) + I_0 t\right) + \left(\frac{1}{rc}\right) \left(A_1 \sin\left(t - \frac{r}{c}\right) + \dots + A_{20} \sin 20\left(t - \frac{r}{c}\right) + B_1 \cos\left(t - \frac{r}{c}\right) + \dots + B_{20} \cos 20\left(t - \frac{r}{c}\right)\right)\right]$$

فشاری و شکستن پیوندهای پراکسی بتواند جریان الکتریکی تولید کند، می‌توانیم با رسم نمودار جریان الکتریکی و استفاده از تابع فوریه آن، روابط اختلاف پتانسیل الکتریکی و میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی را به صورت دقیق محاسبه کنیم.

جریان خروجی‌ای که بر اثر اعمال تنش فشاری بر سنگ ایجاد شده است ناشی از ذرات با بار مثبت یعنی حفره‌هاست. از طرفی طبق آنچه بیان شد، در هنگام زلزله حفره‌های با بار مثبت از سنگ‌های تحت فشار خارج شده و به سمت سنگ‌های با فشار کم و یا بدون فشار حرکت می‌کنند درحالی‌که الکترون‌ها در سنگ تحت فشار باقی می‌مانند و امکان خروج از آن را ندارند [۹]. در اثر اعمال تنش فشاری بر سنگ یک سیگنال جریان الکتریکی داریم که به صورت مجموعه‌ای از امواج تک فرکانس است. طبق بررسی ما در هنگام زلزله سنگ‌ها در بالاترین فشارهای تکتونیکی شکسته می‌شوند. در اثر شکسته شدن پیوندهای پراکسی، حفره‌ها از طریق تماس سنگ‌ها از درون زمین به سطح زمین حرکت می‌کنند و یک شارش جریان و انتقال بارهای مثبت به سطح زمین را مشاهده می‌کنیم (شکل ۱۰). عامل اصلی به وجود آورنده این امواج، حضور بارهای مثبت یعنی حفره‌هاست.

برای گرانیات و مرمر که به ترتیب نمونه‌هایی از سنگ‌های آذرین و سنگ‌های با درجه دگرگونی بالا هستند نیز نتایج کاملاً مشابه به دست آمده است.



شکل ۱۰: نحوه خروج حفره‌های مثبت بر اثر فشارهای تکتونیکی در داخل زمین و حرکت حفره‌ها به طرف سطح زمین از طریق سنگ‌های تحت فشار بیشتر به سنگ‌های تحت فشار کمتر و یا بدون فشار

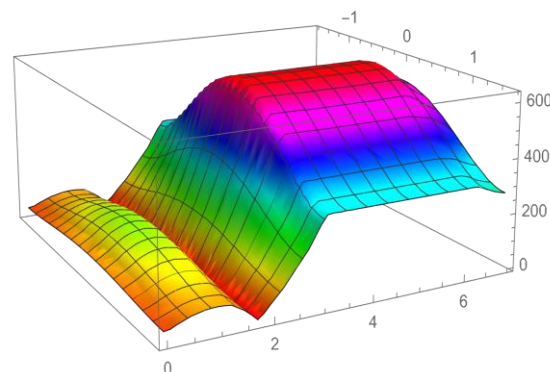
برای محاسبه میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی از توابع پتانسیل برداری و اختلاف پتانسیل الکتریکی نمونه استفاده می‌کنیم که در قسمت‌های قبل در مختصات کروی محاسبه شد؛ بنابراین با داشتن مقدار A_r و V از رابطه‌های (۴ الف) و (۶) مقدار E_r را محاسبه می‌کنیم:

با استفاده از رابطه $C^2 = \frac{1}{\mu_0 \epsilon_0}$ خواهیم داشت:

$$E_\theta = \left(\frac{\mu_0 \lambda \sin \theta}{8\pi r} \right) \left(A_1 \cos \left(t - \frac{r}{c} \right) + \dots + 20A_{20} \cos 20 \left(t - \frac{r}{c} \right) - B_1 \sin \left(t - \frac{r}{c} \right) - \dots - 20B_{20} \sin 20 \left(t - \frac{r}{c} \right) \right) + \left(\frac{\mu_0 c^2 \lambda \sin \theta}{8\pi} \right) \left[\left(\frac{1}{r^3} \right) \left(-A_1 \cos \left(t - \frac{r}{c} \right) - \dots - \frac{A_{20}}{20} \cos 20 \left(t - \frac{r}{c} \right) + B_1 \sin \left(t - \frac{r}{c} \right) + \dots + \frac{B_{20}}{20} \sin 20 \left(t - \frac{r}{c} \right) + I_0 t \right) + \left(\frac{1}{r^2 c} \right) \left(A_1 \sin \left(t - \frac{r}{c} \right) + \dots + A_{20} \sin 20 \left(t - \frac{r}{c} \right) + B_1 \cos \left(t - \frac{r}{c} \right) + \dots + B_{20} \cos 20 \left(t - \frac{r}{c} \right) \right) \right] \quad (7 \text{ ب})$$

$$E_\phi = -\frac{\partial A_\phi}{\partial t} - \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial \phi}{\partial \phi} = 0 \quad (7 \text{ ج})$$

طبق روابط بالا مشاهده می‌کنیم که میدان الکتریکی E در دو راستای $\hat{r}$ و $\hat{\theta}$ است. نمودار میدان الکتریکی که برآیند مؤلفه‌های E_r و E_θ است، مطابق شکل ۱۱ است. در این نمودار، مدت زمان t اعمال تنش فشاری بر اساس نمودار شکل ۹ حدود ۷ ثانیه است. مقدار θ نیز از $\frac{-\pi}{2}$ تا $\frac{\pi}{2}$ در نظر گرفته شده است. این نمودار نشان می‌دهد که مقدار میدان الکتریکی، با افزایش اعمال تنش فشاری بر سنگ نمونه گابرو، افزایش می‌یابد.



شکل ۱۱: نمودار میدان الکتریکی برآیند، در زمان اعمال تنش فشاری بر سنگ گابرو

برای محاسبه میدان مغناطیسی B کافی است مقدار کرل A را با توجه به رابطه (۴) محاسبه کنیم.

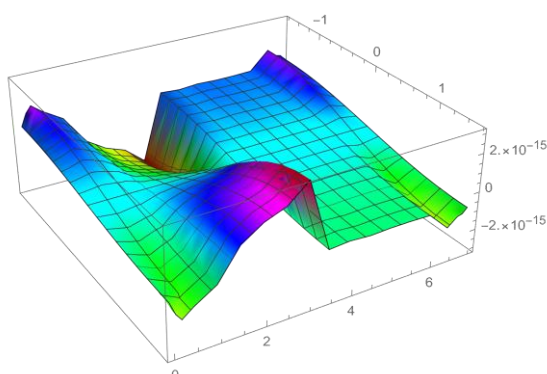
$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A} = \frac{1}{r \sin \theta} \left[\frac{\partial}{\partial \theta} (A_\phi \sin \theta) - \frac{\partial A_\theta}{\partial \phi} \right] \hat{r} + \frac{1}{r} \left[\frac{1}{\sin \theta} \frac{\partial A_r}{\partial \phi} - \frac{\partial (r A_\phi)}{\partial r} \right] \hat{\theta} + \frac{1}{r} \left[\frac{\partial (r A_\theta)}{\partial r} - \frac{\partial A_r}{\partial \theta} \right] \hat{\phi} \quad (8)$$

با توجه به اینکه A_r, A_θ مطابق روابط (۴ الف) و (۴ ب) برحسب $\hat{r}$ و $\hat{\theta}$ هستند و با توجه به اینکه $A_\phi = 0$ است، در نتیجه مقادیر جملات اول و دوم صفر خواهد شد. در نتیجه تنها مؤلفه مماسی $\hat{\phi}$ میدان مغناطیسی B صفر نیست.

$$\vec{B} = \frac{1}{r} \left\{ \frac{\partial}{\partial r} \left[\left(-\frac{\mu_0 \lambda \sin \theta}{8\pi} \right) \left(A_1 \sin \left(t - \frac{r}{c} \right) + \dots + A_{20} \sin 20 \left(t - \frac{r}{c} \right) + B_1 \cos \left(t - \frac{r}{c} \right) + \dots + B_{20} \cos 20 \left(t - \frac{r}{c} \right) + I_0 \right) \right] - \frac{\partial}{\partial \theta} \left[\left(\frac{\mu_0 \lambda \cos \theta}{8\pi r} \right) \left(A_1 \sin \left(t - \frac{r}{c} \right) + \dots + A_{20} \sin 20 \left(t - \frac{r}{c} \right) + B_1 \cos \left(t - \frac{r}{c} \right) + \dots + B_{20} \cos 20 \left(t - \frac{r}{c} \right) + I_0 \right) \right] \right\} \hat{\phi} \rightarrow$$

$$B_\phi = \frac{\mu_0 \lambda \sin \theta}{8\pi r c} \left[A_1 \cos \left(t - \frac{r}{c} \right) + \dots + 20A_{20} \cos 20 \left(t - \frac{r}{c} \right) - B_1 \sin \left(t - \frac{r}{c} \right) - \dots - 20B_{20} \sin 20 \left(t - \frac{r}{c} \right) \right] + \frac{\mu_0 \lambda \sin \theta}{8\pi r^2} \left[A_1 \sin \left(t - \frac{r}{c} \right) + \dots + A_{20} \sin 20 \left(t - \frac{r}{c} \right) + B_1 \cos \left(t - \frac{r}{c} \right) + \dots + B_{20} \cos 20 \left(t - \frac{r}{c} \right) + I_0 \right] \quad (9)$$

طبق رابطه (۹) مشاهده می‌شود که میدان مغناطیسی علاوه بر زمان t ، به مقدار θ و r نیز وابسته است. نمودار میدان مغناطیسی برای سنگ گابرو تحت فشار در مدت ۷ ثانیه افزایش تنش فشاری، مطابق شکل ۱۲ است. اندازه این میدان مغناطیسی بسیار ضعیف، از مرتبه 10^{-15} است. لذا با توجه به ضعیف بودن میدان مغناطیسی امواج تابیده شده، می‌توان نتیجه گرفت که تأثیر میدان الکتریکی در دامنه موج الکترومغناطیسی بسیار بیشتر و تعیین کننده است.



شکل ۱۲: نمودار میدان مغناطیسی در زمان اعمال تنش فشاری بر سنگ گابرو

برای زوایای خاص $\theta = 0$ و $\theta = 90$ مقدار میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی جالب توجه است. به طوری که اگر:

اگرچه می‌دانیم زمین تماماً همگن و همسانگرد نیست اما با بررسی لایه‌ای مختلف زمین می‌توان از این روابط استفاده نمود. نتایج کار نویسندگان مقاله می‌تواند برای محققان زمین جامد، زمین شناسان، محققان زلزله و ... مفید باشد.

۵- نتیجه‌گیری

ما در این مقاله به بررسی جریان الکتریکی تولیدشده ناشی از اعمال تنش فشاری بر سنگ گابرو (و گرانیات به‌طور مشابه) توسط دستگاه فشار هیدرولیک تک‌محوری پرداختیم. این تنش فشاری موجب شارش جریان مثبت از سنگ گابرو به لبه‌های بدون فشار آن شد. تنش‌های فشاری، نقص‌های پراکسی را فعال می‌کنند و باعث شکل‌گیری جفت الکترون-حفره می‌شود. این حامل‌های بار الکتریکی باعث ایجاد اختلاف پتانسیل سطحی بین حجم مرکزی سنگ تحت فشار و لبه‌های بدون فشار می‌شوند و در نتیجه موجب خواهند شد که سنگ تحت تنش فشاری به‌مانند یک باتری عمل کند. هم‌زمان تغییرات جریان برحسب فشار را در طول زمان تنش فشاری را توسط نانوامپرمتر ثبت کردیم. این فشار در مدت ۲۳ ثانیه افزایش، ثابت و کاهش یافت. در این آزمایش دمای محیط را ثابت در نظر گرفتیم. سپس با استفاده از داده‌های ثبت‌شده توسط نانوامپرمتر، نمودار تغییرات جریان الکتریکی-زمان را رسم کردیم و توانستیم به کمک نرم‌افزار متمتیکا و با استفاده از روش فیت کردن تابع فوریه سیگنال جریان الکتریکی برحسب زمان را به‌صورت مجموعه‌ای از جملات $\sin$ و $\cos$ به دست آوریم. سپس تابع تغییرات پتانسیل الکتریکی سطحی $V(r,t)$ سنگ گابرو و گرانیات را در اثر اعمال تنش فشاری محاسبه نمودیم و سپس روابط میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی سنگ محاسبه شد.

از آنجاکه پیش از زلزله جریان خروجی حاصل از عبور حامل‌های بار از حجم سنگ تحت تنش فشاری به داخل سنگ‌های اطراف، سیگنال‌های الکترومغناطیسی (EM) را تولید می‌کند، ما از روابط به‌دست‌آمده برای میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی می‌توانیم برای پیش‌نشانگری زلزله استفاده کنیم. این کار را به کمک ارائه مدل فیزیکی جدید در مقیاس کوچک که از تحت تنش فشاری قرار دادن سنگ‌های آذرین تحت فشار شکل می‌گیرد به‌عنوان نمونه‌ی کوچک از یک زلزله بزرگ، بررسی شد. همچنین به روشی

$$\theta = 0 \rightarrow \vec{E} = E_r, \vec{B} = 0 \quad (۱۰ \text{ الف})$$

$$\theta = 90 \rightarrow \vec{E} = E_\theta, \vec{B} \neq 0 \quad (۱۰ \text{ ب})$$

مشاهده می‌شود در $\theta = 0$ مقدار میدان مغناطیسی سنگ تحت تنش فشاری برابر صفر است و مؤلفه E_θ میدان الکتریکی نیز صفر می‌شود. همچنین در $\theta = 90$ تنها مؤلفه E_θ میدان الکتریکی وجود خواهد داشت. همچنین با توجه به روابط (۷ الف) و (۷ ب) و (۹) مشاهده می‌شود که دو میدان الکتریکی و مغناطیسی بر هم عمودند.

این محاسبات وجود میدان الکترومغناطیسی و در نتیجه انتشار و تابش را در هنگام اعمال تنش فشاری بر سنگ‌های آذرین تحت فشار تأیید می‌کند. لذا با توجه به اینکه تابش الکترومغناطیسی می‌تواند به‌عنوان یک فناوری و یک روش ژئوفیزیکی برای ایجاد هشدار اولیه در مورد خطر ریزش سنگ [۴-۸] و نیز کاهش آسیب‌های جانی مورد استفاده قرار گیرد؛ بنابراین محاسبه میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی می‌تواند بسیار مفید باشد. به‌علاوه با توجه به امکان دریافت امواج الکترومغناطیسی قبل از وقوع زلزله در سطح زمین، این امر می‌تواند برای پیش‌نشانگری زلزله نیز مفید باشد.

همان‌طور که بیان شد، پیش از زلزله تنش‌های تکتونیکی باعث می‌شوند که حامل‌های بار به دلیل شکستن پیوندهای پراکسی امکان شارش از طریق سنگ‌ها را پیدا کنند و باعث ایجاد جریان الکتریکی شوند. انتقال این بارها به لایه‌های بعدی زمین باعث تغییر میدان الکتریکی در سطح شده که در نتیجه باعث ایجاد میدان مغناطیسی متغیر می‌شود و موج الکترومغناطیس را ایجاد می‌کند. درواقع حفره‌ها در طول انتشار در پوسته زمین، می‌توانند تابش الکترومغناطیسی ULF و ELF را تولید کنند. این امواج دارای فرکانس پایین و طول‌موج بلندی هستند و در طول انتشار کمتر ضعیف می‌شوند؛ بنابراین می‌توانند مسافت‌های طولانی را طی کنند و از میان سنگ‌ها عبور کنند و به سطح زمین برسند؛ بنابراین بررسی این امواج الکترومغناطیسی به دلیل امکان دریافت آن‌ها در سطح زمین قبل از وقوع زلزله می‌تواند برای پیش‌نشانگری زلزله مفید باشد. لذا چنانچه محیط انتشار درون زمین را به‌صورت همگن و همسانگرد در نظر بگیریم می‌توانیم از این روابط برای محاسبه میدان الکتریکی و مغناطیسی زلزله برای هر عمقی که زلزله در آن رخ می‌دهد استفاده کنیم.

- [6] Liu, X., & Wang, E. (2018). Study on characteristics of EMR signals induced from fracture of rock samples and their application in rockburst prediction in copper mine. *Journal of Geophysics and Engineering*, 15(3), 909-920. <https://doi.org/https://doi.org/10.1088/1742-2140/aaa3ce>
- [7] Qiu, L., Liu, Z., Wang, E., He, X., Feng, J., & Li, B. (2020). Early-warning of rock burst in coal mine by low-frequency electromagnetic radiation. *Engineering Geology*, 279, 105755. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105755>
- [8] Li, Z., Lei, Y., Wang, E., Frid, V., Li, D., Liu, X., & Ren, X. (2022). Characteristics of Electromagnetic Radiation and the Acoustic Emission Response of Multi-Scale Rock-like Material Failure and Their Application. *Foundations*, 2(3), 763-780. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/foundations2030052>
- [9] Scoville, J., Sornette, J., & Freund, F. T. (2015). Paradox of peroxy defects and positive holes in rocks Part II: Outflow of electric currents from stressed rocks. *Journal of Asian Earth Sciences*, 114, 338-351. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2015.04.016>
- [10] Zhang, X., Li, Z., Wang, E., Li, B., Song, J., & Niu, Y. (2021). Experimental investigation of pressure stimulated currents and acoustic emissions from sandstone and gabbro samples subjected to multi-stage uniaxial loading. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 1-18. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s10064-021-02421-0>
- [11] Gorshkov, M., Zaikin, V., & Lobachev, S. (2001). Electrical conductivity of rocks under shock compression. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 42(2), 196-201. <https://doi.org/https://doi.org/10.1023/A:1018807415208>
- [12] Freund, F., & Wengeler, H. (1982). The infrared spectrum of OH-compensated defect sites in C-doped MgO and CaO single crystals. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 43(2), 129-145. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0022-3697\(82\)90131-7](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0022-3697(82)90131-7)
- [13] Hadi, N. I., Freund, M. M., & Freund, F. (2012). Electrical conductivity of rocks and dominant charge carriers: The paradox of thermally activated positive holes. *J. Earth Sci. Clim. Change*, 3(03), 128. <https://doi.org/https://doi.org/10.4172/2157-7617.1000128>
- [14] Freund, F. (2010). Toward a unified solid state theory for pre-earthquake signals. *Acta Geophysica*, 58(5), 719-766. <https://doi.org/https://doi.org/10.2478/s11600-009-0066-x>
- [15] Freund, F. T., & Freund, M. M. (2015). Paradox of peroxy defects and positive holes in rocks. Part I: Effect of temperature. *Journal of Asian Earth Sciences*, 114, 373-383. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2015.04.047>
- [16] Freund, F. T., Heraud, J. A., Centa, V. A., & Scoville, J. (2021). Mechanism of unipolar electromagnetic pulses emitted from the hypocenters of impending earthquakes. *The European Physical Journal Special Topics*, 230(1), 47-65.

ساده می‌توانیم از نمونه سنگ‌های آذرین مانند گابرو، گرانیت و ... در مکان‌های معینی قرار دهیم و دائم میزان جریان الکتریکی آن را رصد کنیم. چنانچه میزان این جریان از حد معمول تعیین‌شده فراتر برود نشانه فشار اضافه‌ای است که معادل تخریب دیواره‌ها و پایه‌های معدن یا ساختمان یا پل‌ها خواهد بود. البته این روش برای پیش‌بینی تغییرات فشار لایه‌های زیرین زمین و زلزله نیز می‌تواند مورداستفاده قرار گیرد. علاوه بر این موارد، از آنجاکه تابش الکترومغناطیسی به‌عنوان یک روش ژئوفیزیکی برای ایجاد هشدار اولیه در مورد خطر ریزش سنگ است؛ محاسبه میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی دارای اهمیت خاصی است و می‌تواند باعث کاهش آسیب‌های جانی ناشی از ریزش معادن و تونل‌ها شود. لذا این آزمایش و نتایج آن می‌تواند شرایطی را فراهم آورد تا پژوهشگران به بررسی خواص الکتریکی سنگ‌های تحت تنش فشاری بپردازند و قابلیت پیش‌بینی وضعیت سطوح تحت فشار را ممکن می‌سازد.

بودجه تحقیق

دکتر بابک حقیقی نویسنده مسئول، حمایت مالی این پژوهش را بر عهده داشت.

مراجع

- [1] Parkhomenko, E. (1982). Electrical resistivity of minerals and rocks at high temperature and pressure. *Reviews of Geophysics*, 20(2), 193-218. <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/RG020i002p00193>
- [2] Nover, G. (2005). Electrical properties of crustal and mantle rocks—a review of laboratory measurements and their explanation. *Surveys in Geophysics*, 26(5), 593-651. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s10712-005-1759-6>
- [3] Xiang, K., Yan, L., Wang, Z., & Lu, Y. (2022). Comprehensive Physical Properties and Exploration Potential of the Permian Igneous Rocks in the Southwestern Sichuan Basin. *Minerals*, 12(7), 789. <https://doi.org/10.3390/min12070789>
- [4] Song, D., Wang, E., Li, Z., Qiu, L., & Xu, Z. (2017). EMR: An effective method for monitoring and warning of rock burst hazard. *Geomechanics & engineering*, 12(1), 53-69. <https://doi.org/https://doi.org/10.12989/gae.2017.12.1.053>
- [5] Kong, B., Wang, E., & Li, Z. (2018). Regularity and coupling correlation between acoustic emission and electromagnetic radiation during rock heating process. *Geomechanics & engineering*, 15(5), 1125-1133. <https://doi.org/https://doi.org/10.12989/gae.2018.15.5.1125>

- [27] Saito, S., & Bagdassarov, N. S. (2018). Laboratory measurements of electrical conductivity in a gabbro of the Oman ophiolite at high-pressures and high-temperatures: implications for interpretation of resistivity structures of lower oceanic crust. *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences*, 113(2), 112-117. <https://doi.org/https://doi.org/10.2465/jmps.171110>
- [28] Wang, M., Dai, L., Hu, H., Sun, W., Hu, Z., & Jing, C. (2022). Effect of Different Mineralogical Proportions on the Electrical Conductivity of Dry Hot-Pressed Sintering Gabbro at High Temperatures and Pressures. *Minerals*, 12(3), 336. <https://doi.org/10.3390/min12030336>
- [29] Sornette, D., Ouillon, G., Mignan, A., & Freund, F. (2021). Preface to the Global Earthquake Forecasting System (GEFS) special issue: Towards using non-seismic precursors for the prediction of large earthquakes. *The European Physical Journal Special Topics*, 230(1), 1-5.
- [30] Freund, F., Ouillon, G., Scoville, J., & Sornette, D. (2021). Earthquake precursors in the light of peroxy defects theory: Critical review of systematic observations. *The European Physical Journal Special Topics*, 230(1), 7-46. <https://doi.org/https://doi.org/10.1140/epjst/e2020-000243-x>
- [31] Schön, J. H. (2015). Rocks—Their Classification and General Properties. In *Developments in petroleum science*, 65, 1-19. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100404-3.00001-9>
- [32] Freund, F. T. (2007). Pre-earthquake signals—Part I: Deviatoric stresses turn rocks into a source of electric currents. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 7(5), 535-541. <https://doi.org/https://doi.org/10.5194/nhess-7-535-2007>
- [33] Freund, F. T., Takeuchi, A., & Lau, B. W. (2006). Electric currents streaming out of stressed igneous rocks—A step towards understanding pre-earthquake low frequency EM emissions. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 31(4-9), 389-396. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.pce.2006.02.027>
- [34] Takeuchi, A., Lau, B. W., & Freund, F. T. (2006). Current and surface potential induced by stress-activated positive holes in igneous rocks. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 31(4-9), 240-247. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.pce.2006.02.022>
- [35] Freund, F., & Stolz, V. (2013). Nature of pre-earthquake phenomena and their effects on living organisms. *Animals*, 3(2), 513-531. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/ani3020513>
- [36] Hayakawa, M. (2013). Possible electromagnetic effects on abnormal animal behavior before an earthquake. *Animals*, 3(1), 19-32. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/ani3010019>
- <https://doi.org/https://doi.org/10.1140/epjst/e2020-000244-4>
- [17] Mäder, M., Leuenberger, F., & Balderer, W. (2018). Effects of seismic activity on the fluorescence signal of groundwater. *Geoenvironmental Disasters*, 5(1), 1-9. <https://doi.org/https://doi.org/10.1186/s40677-018-0102-8>
- [18] Peng, Z., Lu, P., Jia, B., Zhang, J., Yan, B., Wang, Y., ... & Peng, G. D. (2018). Conversion mechanisms of peroxy linkage defect in silica optical fiber. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 498, 103-108. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2018.06.017>
- [19] Singh, P., & Mukherjee, S. (2020). Chemical signature detection of groundwater and geothermal waters for evidence of crustal deformation along fault zones. *Journal of Hydrology*, 582, 124459. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124459>
- [20] Freund, F. (2007). Pre-earthquake signals—Part II: Flow of battery currents in the crust. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 7(5), 543-548. <https://doi.org/https://doi.org/10.5194/nhess-7-543-2007>
- [21] Freund, F. (2011). Pre-earthquake signals: Underlying physical processes. *Journal of Asian Earth Sciences*, 41(4-5), 383-400. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2010.03.009>
- [22] Freund, F. (2013). Earthquake forewarning—A multidisciplinary challenge from the ground up to space. *Acta Geophysica*, 61(4), 775-807. <https://doi.org/https://doi.org/10.2478/s11600-013-0130-4>
- [23] Freund, F. (2019). Co-seismic earthquake lights: The underlying mechanism. *Pure and Applied Geophysics*, 176(8), 3439-3450. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s00024-019-02142-2>
- [24] Dahlgren, R. P., Johnston, M. J., Vanderbilt, V. C., & Nakaba, R. N. (2014). Comparison of the stress-stimulated current of dry and fluid-saturated gabbro samples. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 104(6), 2662-2672. <https://doi.org/https://doi.org/10.1785/0120140144>
- [25] Maumus, J., Bagdassarov, N., & Schmeling, H. (2005). Electrical conductivity and partial melting of mafic rocks under pressure. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 69(19), 4703-4718. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.gca.2005.05.010>
- [26] Dai, L., Hu, H., Li, H., Hui, K., Jiang, J., Li, J., & Sun, W. (2015). Electrical conductivity of gabbro: the effects of temperature, pressure and oxygen fugacity. *European Journal of mineralogy*, 27(2), 215-224. <https://doi.org/https://doi.org/10.1127/ejm/2015/0027-2429>