

تأثیر بارگذاری دینامیکی بر نفوذپذیری توده سنگ درزه‌دار به روش

شبکه‌ی درزه‌ی منفصل-روش المان مجزا

میثم لک^{۱*}، علیرضا باغبانان^۲، حمید هاشم‌الحسینی^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان

۳- دانشیار، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان

(دریافت: تیر ۱۳۹۴، پذیرش: خرداد ۱۳۹۵)

چکیده

بارگذاری دینامیکی پدیده‌ای است که ممکن است در طبیعت به توده سنگ اعمال شده و حتی باعث تغییر در برخی ویژگی‌های ژئومکانیکی آن شود. نفوذپذیری یکی از خواص مهم و حیاتی توده سنگ در پروژه‌های معدنی و عمرانی است که ممکن است تحت تأثیر بارگذاری‌های دینامیکی مذکور، دچار تغییر شود. از طرفی طبیعت توده سنگ شامل شبکه‌ی شکستگی‌های مجزا است که می‌توان آن را با رویکرد تلفیقی شبکه‌ی درزه‌ی منفصل و روش المان مجزا (DFN-DEM) و نرم‌افزار UDEC مدل کرد. از این‌رو در این مطالعه، مدلسازی هیدرومکانیکی عددی تحت شرایط استاتیکی و دینامیکی به منظور مشخص کردن تأثیر بارگذاری دینامیکی بر نفوذپذیری انجام گرفته است. پس از بارگذاری‌های مذکور، جریان سیال در مدل‌ها شبیه‌سازی شده و مؤلفه‌های نفوذپذیری محاسبه و با یکدیگر مقایسه شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که بر خلاف نظرات منعکس شده در مطالعات قبلی، بارگذاری دینامیکی قابلیت انتقال درزه‌ها را تغییر داده و به تبع آن نفوذپذیری توده سنگ درزه‌دار را تحت تأثیر قرار می‌دهد. با وجود سختی نسبتاً بالای درزه‌ها در این مطالعه، نفوذپذیری محاسبه‌شده در شرایط بارگذاری دینامیکی به میزان ۲۶٪ بیشتر از بارگذاری استاتیکی است. علت عمده‌ی این مسئله جابه‌جایی پی‌درپی بلوک‌ها طی بارگذاری دینامیکی و تا حدود اندکی تغییر در نحوه‌ی قرارگیری آنها نسبت به حالت قبل از عبور موج است.

کلید واژه‌ها

زلزله، تحلیل دینامیکی، شبکه‌ی درزه‌ی مجزا، نفوذپذیری، UDEC

ارجاع به این مقاله:

لک، م.، باغبانان، ع.، هاشم‌الحسینی، ح.، (۱۳۹۵)، تأثیر بارگذاری دینامیکی بر نفوذپذیری توده سنگ درزه‌دار به روش شبکه‌ی درزه‌ی منفصل-روش المان مجزا، روش‌های تحلیلی و عددی در مهندسی معدن، ۱۱(۶)، ۱۰۱-۱۱۱.

۱- مقدمه

مشخصات هیدرولیکی توده‌سنگ مانند نفوذپذیری^۱ و قابلیت هدایت هیدرولیکی^۲ از جمله پارامترهای مهم در بحث رفتار هیدرومکانیک توده‌سنگ هستند. اهمیت این پارامترها در مقوله‌ی آب‌های زیرزمینی، مخازن نفتی و گازی، مخازن دفن زباله‌های هسته‌ای و در کل چگونگی و نحوه‌ی انتقال هر نوع سیال در داخل توده‌سنگ بیشتر نمود پیدا می‌کند. به‌عنوان مثال اگر در یکی از پروژه‌های مهم و حیاتی مذکور، میزان نفوذ جریان سیال از مقدار پیش‌بینی شده بیشتر و یا حتی کمتر شود، می‌تواند صدمات و خسارات زیادی وارد کند. در مطالعات ژئومکانیکی اگر بررسی چند عامل به‌صورت هم‌زمان یا پی‌درپی مدنظر باشد، به آن بررسی رفتار توأمان توده‌سنگ اطلاق می‌شود. از جمله این رفتار توأمان می‌توان به رفتار هیدرومکانیکی^۳ توده‌سنگ اشاره کرد. مطالعاتی که در زمینه‌ی هیدرومکانیک توده‌سنگ انجام می‌گیرند، عمدتاً تأثیر هم‌زمان وجود یا جریان سیال را در مقابل تغییر شکل در سنگ و ترک بررسی می‌کنند. بررسی رفتار توأمان می‌تواند شامل شرایط مرزی متفاوتی باشد. شرایط مرزی موردبحث در این مطالعه، اعمال تنش به دو صورت استاتیکی و دینامیکی است که در نهایت تأثیر همین شرایط بر نفوذپذیری توده‌سنگ منطقه‌ی مورد مطالعه بررسی خواهد شد.

با توجه به موارد ذکرشده ضرورت بررسی تأثیر نوع بارگذاری بر توده‌سنگ و چگونگی انتقال سیال در آن احساس می‌شود. تاکنون به‌طور جداگانه تأثیر عوامل مختلف بر روی خصوصیات هیدرومکانیکی توده‌سنگ در شرایط متفاوت مورد بررسی قرار گرفته است. به عنوان مثال، ارتباط بین جریان ورودی به تونل، زاویه‌ی اصطکاک داخلی ترک و میزان سختی برشی بررسی شده است [۱]. در اطراف فضاها‌ی زیرزمینی معمولاً یک ناحیه‌ی خردشده به وجود می‌آید که مطالعاتی نیز در زمینه‌ی مدلسازی هیدرومکانیکی این ناحیه به انجام رسیده است [۲-۴]. همچنین تحقیقات گسترده‌ای در زمینه‌ی بررسی تأثیر مقیاس روی خصوصیات هیدرومکانیکی توده‌سنگ درزه‌دار انجام گرفته است [۵، ۶]. در این زمینه برای مشخص کردن اثرات هیدرومکانیکی حفر چاه در محیط‌های شکسته نیز

تحقیقاتی به عمل آمده است [۷]. به دست آوردن تنسور نفوذپذیری معادل برای توده‌سنگ درزه‌دار نیز یکی از زمینه‌های تحقیقات هیدرومکانیکی است که در گذشته به بررسی آن پرداخته شده است [۸]. همان‌طور که گفته شد، مطالعات پیشین در زمینه‌ی هیدرومکانیک توده‌سنگ گسترده بوده و حتی در مطالعاتی تأثیر سطح تنش اعمالی بر نفوذپذیری توده‌سنگ درزه‌دار نیز بررسی شده است [۵، ۶، ۹-۱۱]. اما خلأ بررسی تأثیر نوع تنش (استاتیکی یا دینامیکی) بر میزان نفوذپذیری توده‌سنگ احساس می‌شود. لازم به ذکر است که برخلاف تصور عام، تأثیر امواج دینامیکی و تبعات آن همیشه مخرب و مضر نیست و در مواردی می‌تواند مفید و کاربردی باشد. به عنوان مثال در صنعت نفت و گاز امواج دینامیکی گاهی می‌توانند باعث افزایش تولید یک چاه و کاهش هزینه‌ی حفر چاه‌های متعدد و یا افزایش بهره‌دهی یک حوزه‌ی نفتی یا گازی شوند [۱۲-۱۵].

با توجه به مطالب عنوان‌شده، در این تحقیق سعی شده است که تأثیر نوع بارگذاری بر روی نفوذپذیری توده‌سنگ بررسی شود. با این بررسی می‌توان به طور دقیق اثر اعمال تنش‌های دینامیکی را بر نفوذپذیری توده‌سنگ مشاهده کرد. برای اینکه نتایج حاصل از روش‌های عددی هر چه بیشتر به واقعیت نزدیک باشد، لازم است که مدلسازی کامل و شامل تمام خصوصیات و شرایط زمین باشد. به همین منظور برای شرایط مرزی دینامیکی در این مطالعه از اطلاعات یک زلزله‌ی واقعی بهره گرفته شده است. برای مشخص شدن تأثیر بارگذاری دینامیکی موردنظر بر نفوذپذیری توده‌سنگ، مدلسازی‌ها در این مطالعه در دو گروه انجام شده است. گروه ۱ مدل‌هایی هستند که بدون بارگذاری دینامیکی (در شرایط استاتیکی) مورد نفوذ جریان سیال قرار گرفته و نفوذپذیری‌شان محاسبه شده است. در گروه ۲ همان مدل‌ها تحت بارگذاری دینامیکی قرار گرفته و سپس مورد نفوذ جریان سیال قرار می‌گیرند و نفوذپذیری‌شان در این مرحله محاسبه می‌شود. در نهایت نفوذپذیری هر دو گروه با یکدیگر مقایسه شده و مورد بحث قرار می‌گیرد. شرح کلیه‌ی مراحل مدلسازی در ادامه به تفصیل آمده است.

۲- روش مدل‌سازی

در این تحقیق ۱۰ مدل با ابعاد 20×20 متر که در آنها ناپیوستگی‌ها به صورت شبکه‌ی درزه‌ی مجزا (DFN) وجود دارند، با استفاده از نرم‌افزار $FracIUT^{2D}$ [۱۶] ساخته شده و کلیه‌ی مراحل استاتیکی، دینامیکی و هیدرولیکی تحلیل روی این مدل‌ها انجام شده است. دلیل انتخاب این ابعاد برای مدل‌ها، از بین بردن اثر مقیاس بوده است. زیرا بر اساس تحقیقات گذشته مدلی با این ابعاد در حیطه‌ی حجم اولیه‌ی معرف^۴ قرار دارد و با انتخاب آن اثر مقیاس از بین می‌رود [۱۷]. همچنین تعدد مدل‌ها باعث از بین بردن اثر تصادفی در تحلیل می‌شود. تمام داده‌های ورودی اعم از خصوصیات مربوط به ساخت شبکه‌ی درزه‌ی مجزا و خصوصیات مکانیکی مدل‌ها، مربوط به سایت سلافیلد^۵ در کامبری^۶ واقع در انگلستان است.

۲-۱- مدل‌سازی هندسی درزه‌ها

سیستم هندسی و طرز قرار گرفتن درزه‌ها در توده سنگ بسیار پیچیده است. کیفیت و کمیت پارامترهای هندسی برداشت شده از درزه‌های منطقه‌ی مورد مطالعه که در دیدرس قرار دارند، محدود و غیرقابل اطمینان است. راه حل عمده برای از بین بردن این عدم قطعیت و نزدیک کردن سیستم درزه ترک‌های موجود در زیر سطح زمین به واقعیت، استفاده از شبکه‌ی درزه‌های مجزای^۷ تصادفی (DFN) با فرض توزیع آماری مشخصات هندسی ترک‌ها است [۱۷، ۱۸].

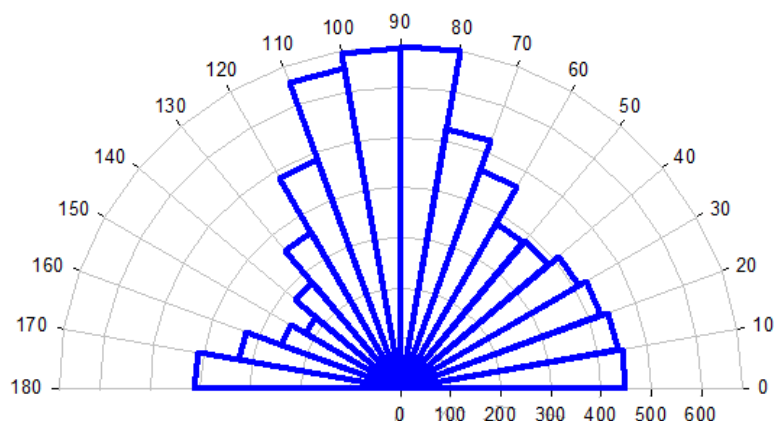
جدول ۱: مشخصات هندسی درزه‌ها [۵، ۶، ۸، ۱۷-۱۹]

دسته درزه	میانگین شیب	میانگین جهت شیب	ثابت فیشر (K)	چگالی درزه‌داری (m^{-2})	میانگین طول اثر (m)
۱	۸	۱۴۵	۵/۹	۴/۶	۰/۹۲
۲	۸۸	۱۴۸	۹	۴/۶	۰/۹۲
۳	۷۶	۲۱	۱۰	۴/۶	۰/۹۲
۴	۶۹	۸۷	۱۰	۴/۶	۰/۹۲

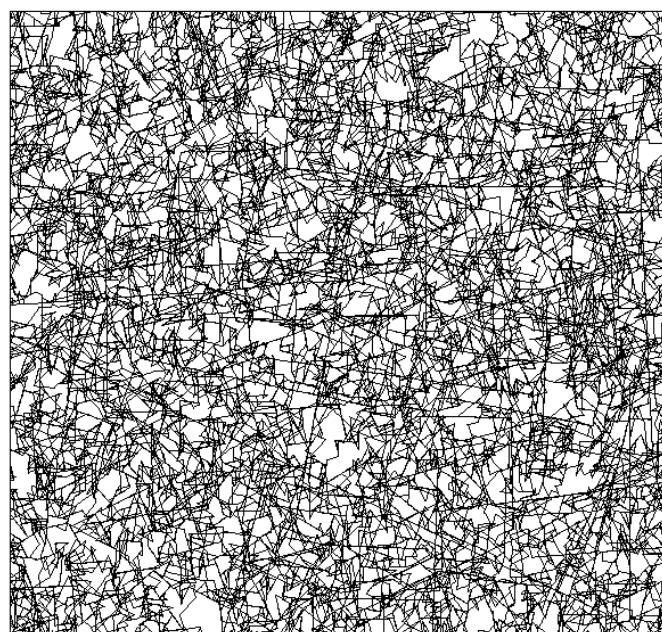
عبور داده شده است. گروه ۲ مدل‌هایی هستند که پس از مدل‌سازی هندسی و تعادل استاتیکی، زلزله‌ی موردنظر را نیز تجربه کرده‌اند و سپس جریان سیال از داخل آنها عبور داده شده است. در حقیقت مدل‌های گروه ۲، همان مدل‌های گروه ۱ قبل از جریان سیال هستند که تحت بارگذاری دینامیکی قرار می‌گیرند.

۲-۲- مدل‌سازی مکانیکی-هیدرولیکی

در مطالعه‌ی حاضر مدل‌سازی‌ها در دو گروه صورت پذیرفته‌اند. گروه ۱ مدل‌هایی هستند که پس از مدل‌سازی هندسی و ساخت شبکه‌ی درزه‌ی مجزا، تحت تعادل استاتیکی قرار گرفته و بعد از آن جریان سیال از داخل آنها



شکل ۱: نمونه‌ای از نمودار شیب درزه‌ها. محور شعاعی فراوانی درزه‌ها را نشان می‌دهد.

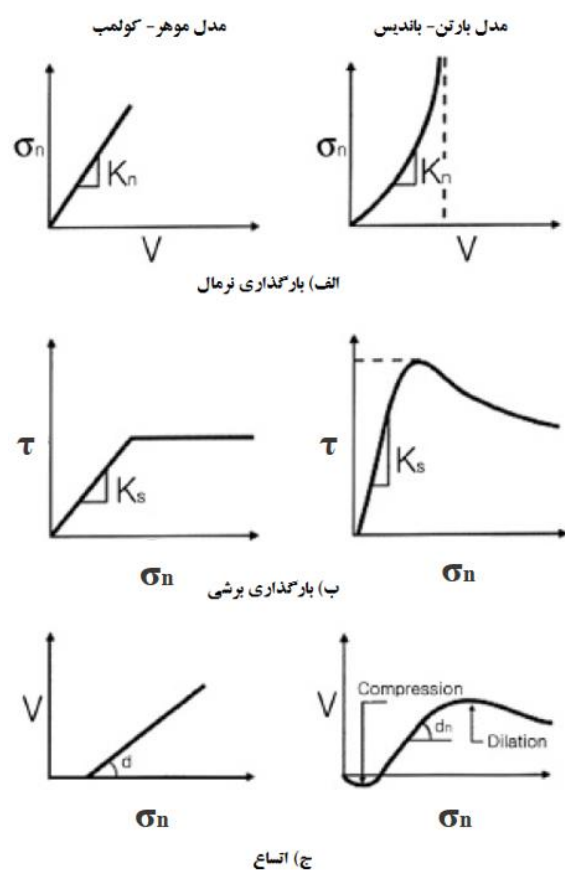


شکل ۲: نمونه‌ای از هندسه کلی مدل‌های ساخته‌شده

آن برای تشخیص عبور جریان سیال در اطراف یک مخزن زباله‌های هسته‌ای^۹ استفاده شده است [۱۹].

در اکثر مطالعات انجام‌شده‌ی پیشین، رفتار ناپیوستگی‌ها با مدل موهر-کولمب بیان شده است. ولی مدل موهر-کولمب پارامترهای C و ϕ را ثابت می‌گیرد. ثابت فرض کردن پارامترهای C و ϕ در واقعیت صحیح نیست، چون این پارامترها وابسته به سطح تنش و مقیاس هستند. استفاده از مدل‌های خطی با سختی‌های نرمال و برشی ثابت، وقتی که سطح تنش ثابت نباشد ایجاد محدودیت می‌کند. زیرا سختی‌های نرمال (K_n) و برشی (K_s) به طور کاملاً معنی‌دار با تغییرات سطح تنش تغییر می‌کنند. بنابراین مدل‌های خطی برای ناپیوستگی‌ها چندان مناسب نیستند و در عوض مدل‌های غیرخطی همچون مدل بارتن-

از آنجایی که مدل‌های ساخته‌شده در تمام مراحل استاتیکی، دینامیکی و هیدرولیکی استفاده می‌شوند، هندسه‌ی مدل‌ها باید منطبق بر کلیه‌ی مراحل کار باشد. برای اینکه در مرحله‌ی دینامیکی، شبکه‌ی درزه بعد از گذشت چند مرحله‌ی محاسباتی دچار فروپاشی نشود، باید مدل اصلی که شامل شبکه‌ی درزه‌های مجزا می‌شود را در داخل ۸ بلوک دیگر قرار داد. در این صورت مانند شکل ۳ مدلی بزرگتر به ابعاد 60×60 متر و شامل ۹ بلوک بزرگ ایجاد می‌شود که برای ۸ بلوک کناری از E_{mass} و برای ماده سنگ موجود در بلوک مرکزی (که در حقیقت بلوک اصلی است)، از E_{intact} استفاده شده است. این روش، به تئوری بلوک-در-بلوک^۸ موسوم است که در مطالعات پیشین از



شکل ۴: تفاوت مدل‌های رفتاری موهر-کولمب و بارتن-باندیس [۲۱]

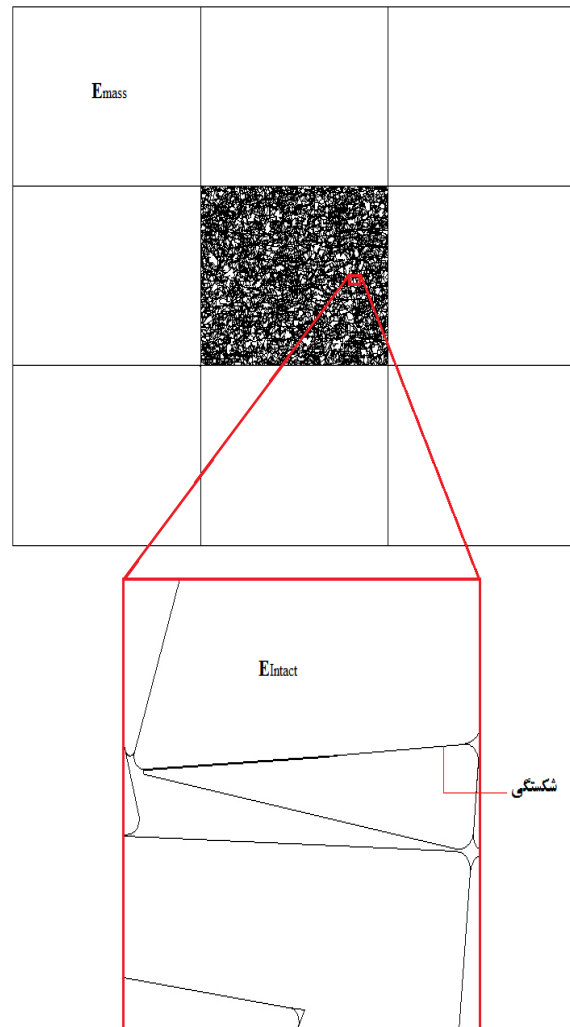
جدول ۲: مشخصات مکانیکی سنگ بکر [۱۹]

پارامتر	نماد	واحد اندازه‌گیری	مقدار
دانشسته	ρ	kg/m^3	۲۷۵۰
مدول یانگ	E	GPa	۸۴
ضریب پواسون	ν	-	۰/۲۴
مقاومت فشاری تک محوری	UCS	MPa	۱۵۷

جدول ۳: مشخصات مکانیکی درزه‌ها مربوط به معیار بارتن-باندیس [۱۹]

پارامتر	نماد	واحد اندازه‌گیری	مقدار
ضریب زبری ترک	JRC	-	۳/۸۵
مقاومت فشاری دیواره‌ی ترک	JCS	MPa	۱۱۲/۲
سختی نرمال	K_n	MPa/m	۴۳۴۰۰۰
سختی برشی	K_s	MPa/m	۴۳۴۰۰۰
زاویه‌ی اصطکاک باقیمانده	Φ_r	درجه	۲۷/۲
بازشدگی اولیه	a_i	mm	۰/۰۶۵

باندیس رفتار ناپیوستگی‌ها را هنگام تغییر در سطح تنش بهتر نشان می‌دهند. همچنین در مدل موهر-کولمب زاویه‌ی اتساع^{۱۰} ثابت فرض شده است درحالی‌که در مدل بارتن-باندیس این پارامتر نیز وابسته به تنش بوده و طی سیکل‌های بارگذاری تغییر می‌کند [۲۰، ۲۱]. شکل ۴ تفاوت مدل‌های رفتاری موهر-کولمب و بارتن-باندیس را نشان می‌دهد.

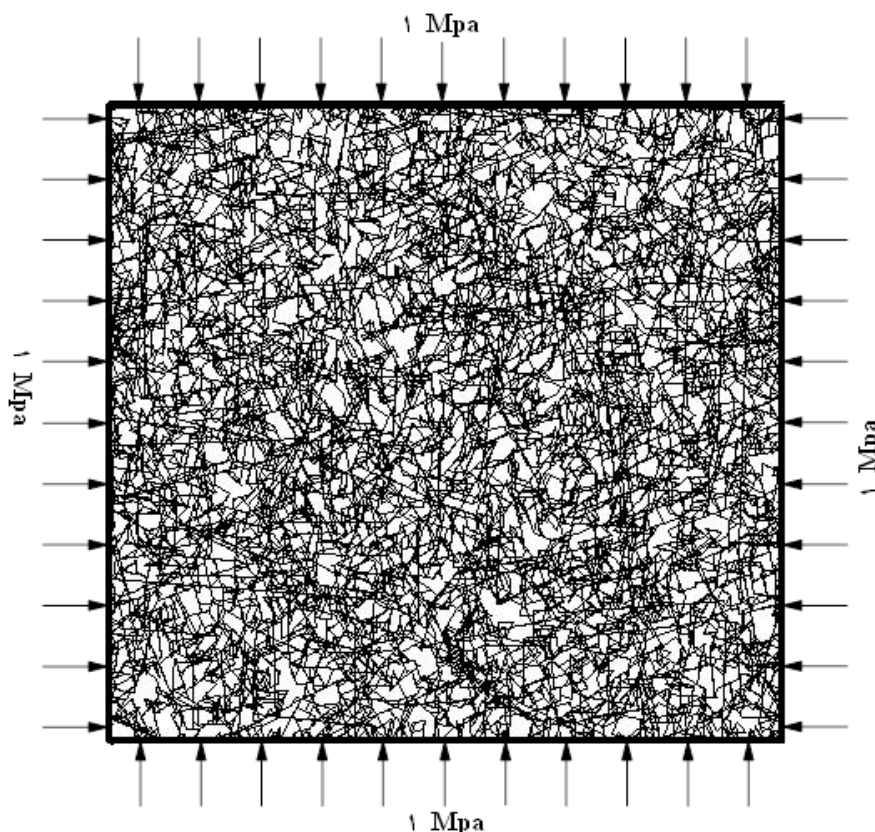


شکل ۳: نمونه‌ای از مدل‌های ساخته‌شده به روش بلوک-در-بلوک

در نتیجه در این مطالعه نیز برای بیان رفتار ناپیوستگی‌ها از مدل رفتاری بارتن-باندیس استفاده شده است. همچنین برای بیان رفتار بلوک‌ها نیز از مدل الاستیک ایزوتروپ بهره گرفته شده است. جدول ۲ خصوصیات سنگ بکر و جدول ۳ خصوصیات مربوط به درزه سنگ‌های این منطقه را نشان می‌دهند.

در مرحله‌ی تعادل استاتیکی^{۱۱} شرایط مرزی با اعمال ۱ مگاپاسکال تنش هیدرواستاتیک^{۱۲} روی هر مرز ارضا شده است. شکل ۵ شرایط مرزی وارد بر مدل‌ها را نشان می‌دهد. یک تحلیل دینامیکی پس از اتمام تحلیل استاتیکی آغاز می‌شود که در آن معادلات کاملاً دینامیکی حرکت حل می‌شوند و توزیع یا پراکندگی انرژی جنبشی نیز مستقیماً در روند حل تأثیر می‌گذارد. تحلیل‌های دینامیکی روی

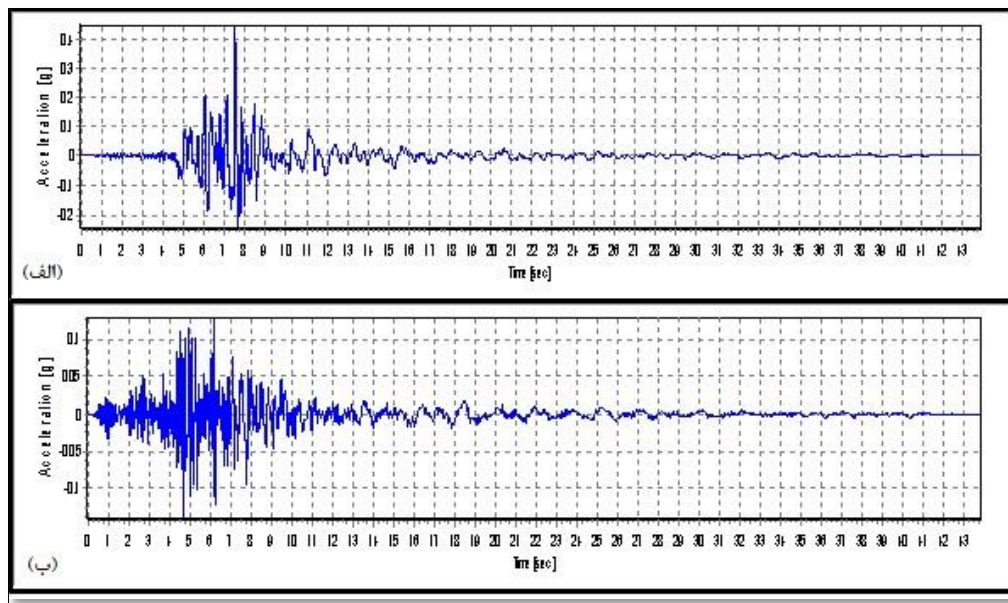
مسائلی انجام می‌شود که شامل فرکانس بالا و مدت‌زمان پایین در بارگذاری باشند (مانند بارگذاری لرزه‌ای و انفجار). نرم‌افزار *UDEC* قابلیت تحلیل‌های دینامیکی را دارد و این قابلیت باعث شده که این نرم‌افزار در حوزه‌ی وسیعی از مسائل دینامیکی از جمله زلزله، انفجار و انفجار سنگ^{۱۳} در اعماق زمین کاربرد پیدا کند [۲۲].



شکل ۵: شرایط مرزی مدل‌های ساخته‌شده در مرحله‌ی مدلسازی استاتیکی

تنش دینامیکی در نرم‌افزار *UDEC* می‌تواند به صورت بارگذاری داخلی (مانند انفجار) و یا به صورت بارگذاری خارجی به یکی از مرزهای مدل وارد شود (مانند زلزله). در این پژوهش از اطلاعات مربوط به زلزله‌ی پارکفیلد^{۱۴} که در حیطه‌ی زلزله‌های مبنای طراحی است، به‌عنوان بارگذاری دینامیکی به مدل‌ها استفاده شده است. این زلزله در تاریخ ۲۸ ژوئن سال ۱۹۶۶ به بزرگی ۶/۱ ریشتر در پارکفیلد واقع در ایالت کالیفرنیا آمریکا به وقوع پیوسته است. دو مؤلفه از زلزله‌ی پارکفیلد در دو راستای x و y به مدل‌ها اعمال شده است. شکل ۶ نشان‌دهنده‌ی شتاب نگاشت‌های حاصل از این زمین‌لرزه است.

وجود هرگونه مرز غیر واقعی در مسائل دینامیکی سبب می‌شود که اعوجاج ایجادشده پس از برخورد به این مرزها به داخل محیط برگشت نماید. در صورتی که در واقعیت این موج‌ها می‌توانند در داخل محیط بی‌نهایت منتشر و جذب گردند و به محیط محاسباتی برگشتی نداشته باشند. روشی که در نرم‌افزار *UDEC* به کار گرفته شده است، با اتصال میراگرهای^{۱۵} مستقلی در گره‌های مرزی در جهات عمودی و برشی سبب می‌شود تا انرژی موج حجمی ورودی، تقریباً به‌طور کامل جذب گردد و انعکاس صورت نگیرد. در این مطالعه تمام مرزهای اطراف مدل‌ها از نوع مرزهای جذب‌کننده (ویسکوز) در نظر گرفته‌شده‌اند. شکل ۷ شرایط مرزی دینامیکی حاکم بر مسئله را نشان می‌دهد.

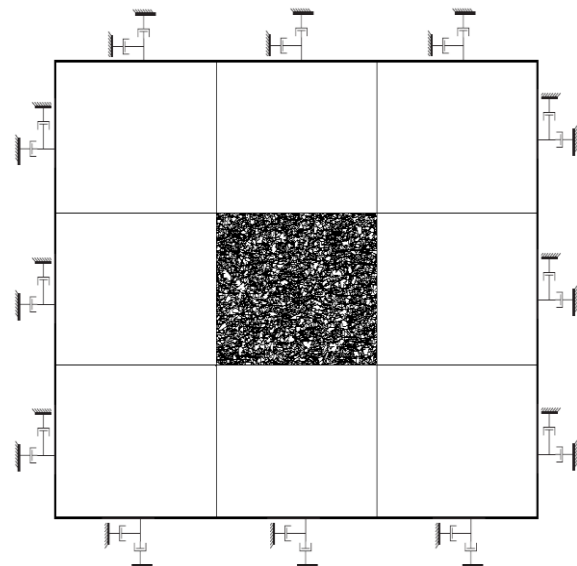


شکل ۶: نمودار مؤلفه‌های مربوط به شتاب‌نگاشت زلزله‌ی پارک‌فیلد (الف) در راستای x ، (ب) در راستای y .

همان‌طور که قبلاً نیز اشاره شد، بعد از انجام مدلسازی‌های استاتیکی و دینامیکی، جریان سیال از تمام مدل‌ها عبور داده شده است تا تفاوت در نفوذپذیری آنها هویدا شود. در این مرحله، از فشار منفذی سیال در مرزهای طرفین مدل‌ها به‌عنوان شرایط مرزی برای جریان سیال در راستای x ، و در مرزهای بالا و پایین به‌عنوان شرایط مرزی برای جریان سیال در راستای y استفاده شده است. این مسئله برای جریان در راستای x به‌صورت شکل ۸-الف و در راستای y به‌صورت شکل ۸-ب به مدل‌ها وارد می‌شود.

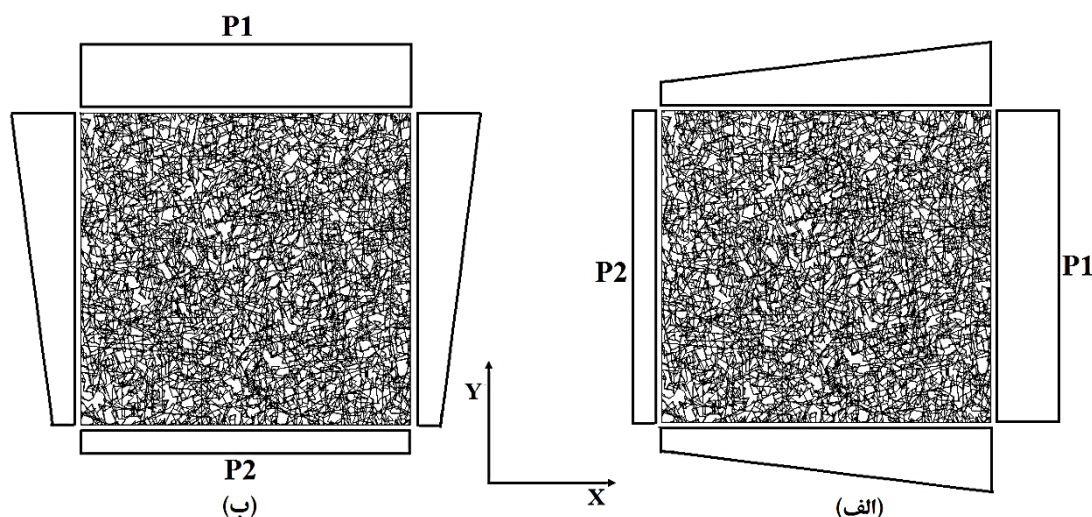
۲-۳- نحوه‌ی محاسبه‌ی نفوذپذیری

همه‌ی مدل‌ها پس از طی مراحل مکانیکی، مورد نفوذ جریان سیال قرار گرفته و بعد از طی کردن سیکل‌های مورد نیاز و رسیدن به حالت پایدار، دبی خروج سیال از هر مرز در مدل‌ها اندازه‌گیری شده است. با داشتن دبی جریان^{۱۷} در هر مرز و آرام فرض کردن جریان سیال در درزه‌ها، می‌توان با استفاده از قانون دارسی، نفوذپذیری مدل را در راستاهای مختلف محاسبه نمود و در نهایت ماتریس نفوذپذیری را برای تمام مدل‌ها به دست آورد. معادلات زیر قانون دارسی را بیان می‌کنند:



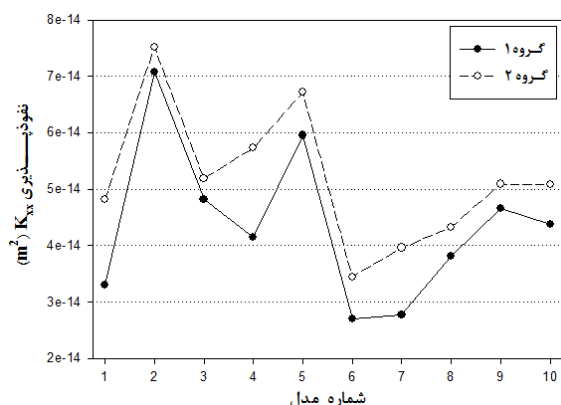
شکل ۷: شرایط مرزی دینامیکی حاکم بر مسئله

هر سیستم دینامیکی دارای میرایی داخلی است. در صورت عدم میرایی، ارتعاش یک سیستم مکانیکی در معرض نیروهای رانشی^{۱۶}، تا ابد ادامه می‌یابد. مقداری از میرایی به‌واسطه‌ی افت انرژی در اثر لغزش در طول تماس‌های بلوک‌های درون سیستم و قسمتی نیز به‌واسطه‌ی افت اصطکاک درونی مواد بکر و مقاومت ایجادشده به‌وسیله‌ی هوا یا سیالات دربرگیرنده‌ی سازه صورت می‌گیرد. در این مطالعه از میرایی محلی استفاده شده است که طبق تجربیات گذشته [۲۳] ضریب آن ۰/۵ درصد در نظر گرفته شده است.

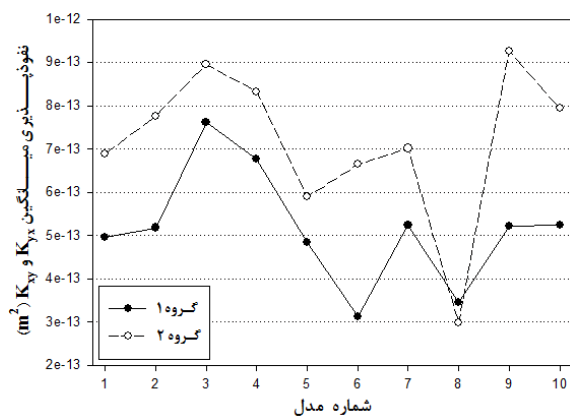


شکل ۸: شرایط مرزی برای جریان سیال. (الف) در راستای x. (ب) در راستای y.

شده‌اند. این نمودارها تفاوت تأثیر بارگذاری دینامیکی و استاتیکی را بر روی نفوذپذیری نشان می‌دهند.



شکل ۹: نمودار K_{xx} در مدل‌های جریان سیال پس از اعمال میدان تنش هیدرواستاتیک (گروه ۱) و جریان بعد از اعمال زلزله (گروه ۲)



شکل ۱۰: نمودار میانگین مقادیر K_{yx} و K_{xy} در مدل‌های جریان سیال پس از اعمال میدان تنش هیدرواستاتیک (گروه ۱) و جریان سیال بعد از اعمال زلزله (گروه ۲)

$$q_{ij} = A \frac{k_{ij}}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (1)$$

$$q_{ij} = A \frac{k_{ij}}{\mu} \frac{\partial p}{\partial y} \quad (2)$$

در این روابط: q_{ij} دبی سیال عبوری از یک مرز (m^3/s), A سطح مقطع مدل در راستای انتقال جریان (m^2), k_{ij} نفوذپذیری مدل در راستای انتقال جریان (m^2), μ ویسکوزیته‌ی سیال موردنظر (برای آب 10^{-1}), $\partial p / \partial x$ گرادیان فشار در نظر گرفته شده برای مدل‌ها در راستای x (Pa/m), $\partial p / \partial y$ گرادیان فشار در نظر گرفته شده برای مدل‌ها در راستای y (Pa/m) هستند. در نهایت ماتریس نفوذپذیری برای یک مدل برابر است با:

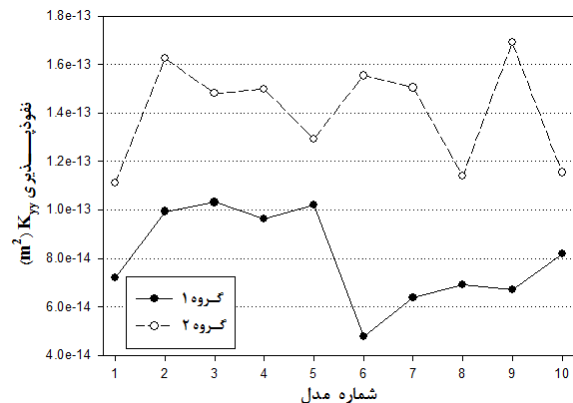
$$K = \begin{bmatrix} k_{xx} & k_{xy} \\ k_{yx} & k_{yy} \end{bmatrix} \quad (3)$$

۳- نتایج حاصل از مدل‌سازی هیدرومکانیکی

نکته‌ی قابل توجه در مطالعه‌ی حاضر این است که مدل‌سازی دینامیکی بلافاصله پس از مدل‌سازی استاتیکی و بر روی همان گزینه‌ها صورت گرفته است. این مسئله بدین معناست که تفاوت در نتایج حاصله در مورد نفوذپذیری مدل‌های استاتیکی و دینامیکی، تنها تأثیر نوع بارگذاری است. در شکل‌های ۹، ۱۰ و ۱۱ مؤلفه‌های ماتریس نفوذپذیری، جدا شده و بر اساس شماره‌ی مدل مرتب

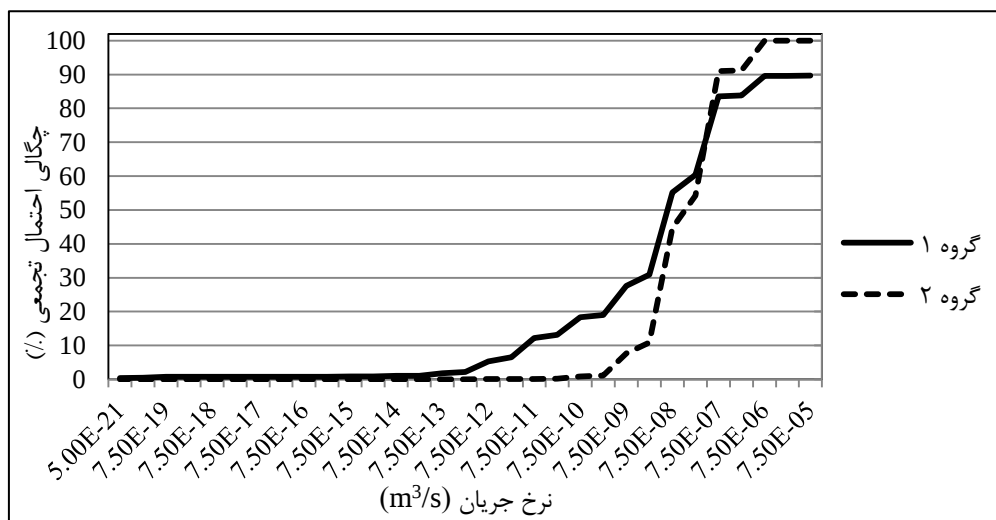
تنش‌ها به صورت استاتیکی، باعث افزایش نفوذپذیری در منطقه‌ی مورد مطالعه شده است. از بررسی جهت‌گیری درزه‌ها در شکل ۱ می‌توان دریافت که شیب عمده‌ی درزه‌های موجود در مدل‌های DFN ساخته‌شده، در راستای قائم است. همین امر سبب می‌شود که پس از اعمال زلزله، بیشینه تأثیر امواج دینامیکی بر روی نفوذپذیری در راستای قائم باشد. این مسئله در مقایسه‌ی شکل ۱۱ با شکل‌های ۹ و ۱۰ مشهود است.

در شکل ۱۲ نمودار توزیع تجمعی نرخ جریان رسم شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در انتهای نمودار درصد فراوانی تجمعی نرخ جریان در مدل‌های دینامیکی به میزان ۱۰٪ بیشتر از مدل‌های استاتیکی است. تغییر روند در نمودار به علت تغییرات در تأثیر بارگذاری دینامیکی در مقادیر پایین و بالای نفوذپذیری است که می‌تواند علل دیگری از جمله وضعیت هندسی ناپیوستگی‌ها داشته باشد. نهایت موارد مذکور نشانگر نرخ بالاتر جریان در مدل‌های دینامیکی است که بیشتر بودن میزان نفوذپذیری را در این مدل‌ها موجب می‌شود.



شکل ۱۱: نمودار K_{yy} در مدل‌های جریان سیال پس از اعمال میدان تنش هیدرواستاتیک (گروه ۱) و جریان بعد از اعمال زلزله (گروه ۲)

در شکل ۹ بارگذاری دینامیکی زلزله باعث افزایش مقدار K_{xx} شده است. مقدار میانگین این افزایش ۱۸/۹٪ است. در اکثر مدل‌های شکل ۱۰ نیز بارگذاری دینامیکی اثر افزایشی بر روی K_{yx} و K_{xy} به میزان ۳۸/۷٪ داشته است. همچنین شکل ۱۱ افزایش مقدار K_{yy} را بعد از اعمال بارگذاری دینامیکی نشان می‌دهد که مقدار میانگین این افزایش نیز ۷۵٪ است. به عبارت دیگر، اعمال تنش‌های مرزی به صورت دینامیکی (زمین‌لرزه) در مقایسه با اعمال



شکل ۱۲: نمودار توزیع تجمعی نرخ جریان

مخازن سنگی خود و دفن زباله‌های هسته‌ای بسیار حیاتی باشد. این پژوهش با هدف بررسی تأثیر بارگذاری دینامیکی زلزله بر نفوذپذیری توده سنگ انجام شده است. برای نیل به این هدف، مدل‌سازی‌ها در دو گروه استاتیکی و دینامیکی صورت گرفته و به هر یک از این گروه‌ها به صورت مجزا شرایط مرزی هیدرولیکی اعمال شده و نفوذپذیری هر یک،

۴- نتیجه‌گیری

برخی از ویژگی‌های توده سنگ از جمله نفوذپذیری ممکن است تحت شرایط تنش دینامیکی تغییر کنند که این مسئله می‌تواند برای پروژه‌های حساسی مثل نیروگاه‌های زیرزمینی، حرکت سیال هیدروکربنی در داخل

مراجع

- طبق روند توضیح داده شده، محاسبه شده است. مدلسازی‌های انجام شده در این پژوهش نتایج زیر را به همراه داشته است:
- در مقایسه‌ی نفوذپذیری بین مدل‌هایی که تحت تنش هیدرواستاتیک قرار گرفته و مدل‌هایی که تحت بارگذاری دینامیکی زلزله قرار گرفته‌اند، بار دینامیکی زلزله باعث جابه‌جایی پی‌درپی بلوک‌ها و تا حدود اندکی باعث تغییر در نحوه‌ی قرارگیری آنها نسبت به حالت قبل از عبور موج شده است. در نتیجه عبور جریان سیال از مسیرها و اتصالات آسان‌تر شده و باعث افزایش نفوذپذیری شده است. این افزایش در راستای x برابر با $12/4$ درصد، در راستای y برابر با $51/8$ درصد و در کل 26 درصد است. همچنین از آنجایی که بارگذاری دینامیکی بر روی همان مدل‌هایی صورت گرفته که مرحله‌ی استاتیکی تحلیل را گذرانده‌اند، پس تفاوت در نتایج تنها حاصل استاتیکی و یا دینامیکی بودن تنش‌ها است. یعنی در یکسری از مدل‌ها تنش به صورت استاتیکی و در یکسری به صورت دینامیکی اعمال شده است. در نهایت برای مدل‌های استاتیکی مقدار میانگین نفوذپذیری در راستاهای x و y به ترتیب برابر با 4×10^{-14} و $8/6 \times 10^{-14}$ مترمربع به دست آمده و برای مدل‌های دینامیکی به ترتیب مقادیری برابر با 5×10^{-14} و $1/3 \times 10^{-13}$ مترمربع حاصل شده است. از مقایسه‌ی این مقادیر و در نظر گرفتن نوع بارگذاری می‌توان نتیجه گرفت که بارگذاری دینامیکی سبب افزایش میزان نفوذپذیری شده است.
 - بنا بر دلایل بالا و از آنجایی که نفوذپذیری محاسبه شده در این پژوهش، بر اساس قانون دارسی است، افزایش نفوذپذیری توسط بارگذاری دینامیکی در نتیجه افزایش نرخ جریان سیال در توده سنگ مورد نظر است. یعنی در حقیقت، بارگذاری دینامیکی باعث افزایش نرخ جریان سیال و در نتیجه افزایش نفوذپذیری در توده سنگ شده است.
 - همان‌طور که قبلاً اشاره شد، زلزله‌ای که در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفته است، یک زمین‌لرزه‌ی مبنای طراحی است. این در حالی است که اگر از یک زلزله با فرکانس بالاتر استفاده شود، اختلاف‌های بین نفوذپذیری در حالت‌های استاتیکی و دینامیکی مشهودتر خواهد شد.
- [1] Ivars, M. (2006), Water inflow into excavations in fractured rock-a three-dimensional hydro-mechanical numerical study. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 43, 705-725.
- [2] Levasseur, L., Charlier, R., Frieg, B., & Collin, F. (2010). Hydro-mechanical modelling of the excavation damaged zone around an underground excavation at Mont Terri Rock Laboratory. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 43, 414-425.
- [3] Chen, H. M., Zhao, Z. Y., Choo, L. Q., & Sun, J. P. (2015). Rock cavern stability analysis under different Hydro-Geological conditions using the coupled Hydro-Mechanical model, *Rock Mechanics and Rock Engineering*.
- [4] Li, L., Liu, H. H. (2015). EDZ formation and associated hydromechanical behaviour around ED-B tunnel: A numerical study based on a two-part Hooke's model (TPHM). *KSCE Journal of Civil Engineering*, 19(1), 318-331.
- [5] Baghbanan, A. (2008), Scale and stress effects on Hydro-Mechanical properties of fractured rock masses. PhD thesis, Supervisor: Lanru Jing, Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm, Sweden.
- [6] Min, K. B., Rutqvist, J., Tsang, Ch. F., & Jing, L. (2004). Stress-dependent permeability of fractured rock masses: a numerical study. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 41, 1191-1210.
- [7] Rejeb, A., Bruel, D. (2001), Hydromechanical effects of shaft sinking at the Sellafield site. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 38, 17-29.
- [8] Min, K. B., Jing, L., & Stefansson, O. (2004), Determining the equivalent permeability tensor for fractured rock masses using a stochastic REV approach: Method and application to the field data from Sellafield, UK. *Hydrogeology Journal*, 12, 497-510.
- [9] Figueiredo, B., Tsang, Ch. F., Rutqvist, J., & Niemi, A. (2015). A study of changes in deep fractured rock permeability due to coupled hydro-mechanical effects. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 79, 70-85.
- [10] Souley, M., Lopez, Ph., Boulon, M., & Thoraval, A. (2015). Experimental Hydromechanical Characterization and Numerical Modelling of a Fractured and Porous Sandstone. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 48, 1143-1161.

- [22] Itasca Consulting Group, Inc, (2000). (UDEC) Universal Distinct Element Code (Version 3.1) User's Guide, Minneapolis, Minnesota.
- [23] Sobhani, E. (2012). "Numerical analysis of blast induced waves propagation in continuous and discontinuous media." MSc thesis, Supervisors: Mahmood Vafaian and Alireza Baghbanan, Isfahan University of Technology (IUT), Department of civil engineering (in Persian).
- [11] Selvadurai, A.P.S. (2015), Normal stress-induced permeability hysteresis of a fracture in a granite cylinder. *Geofluids*, 15, 37-47.
- [12] Mirzaei-Paiaman, A., Nourani, M. (2012). Positive effect of earthquake waves on well productivity: Case study: Iranian carbonate gas condensate reservoir. *Scientia Iranica C*, 19(6), 1601-1607.
- [13] Huh, C. (2006). Improved oil recovery by seismic vibration: a preliminary assessment of possible mechanisms, In first International Oil Conference and Exhibition in Mexico. Cancun, Mexico.
- [14] Kouznetsov, O. L., Simkin, E. M., Chilingar, G. V., & Katz, S. A. (1998), Improved oil recovery by application of vibro-energy to waterflooded sandstones. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 19, 191-200.
- [15] Candela, T. H., Brodsky, E. E., Marone, C. H., & Elsworth, D. (2014), Laboratory evidence for particle mobilization as a mechanism for permeability enhancement via dynamic stressing. *Earth and Planetary Science Letters*, 392, 279-291.
- [16] Joolaie, A. and A. Baghbanan (2013), "3D modeling of fluid transmission network in jointed rocks using pipe network model and discrete element method.", 9th international civil engineering congress, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran (in Persian).
- [17] Baghbanan, A., Jing, L. (2007), Hydraulic properties of fractured rock masses with correlated fracture length and aperture. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 44, 704-719.
- [18] Baghbanan, A., Jing, L. (2008). Stress effects on permeability in a fractured rock mass with correlated fracture length and aperture. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 45, 1320-1334.
- [19] Blum, Ph., Mackay, R., Riley, M. S., & Knight, J. L. (2005). Performance assessment of a nuclear waste repository: Upscaling coupled hydro-mechanical properties for far-field transport analysis. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 42, 781-792.
- [20] Bhasin, R., Kaynia, A. M. (2004), Static and dynamic simulation of a 700-m high rock slope in western Norway, *Engineering Geology*, 71, 213-226.
- [21] Choi, S. O., Chung, S. K. (2004). Stability analysis of jointed rock slopes with the Barton-Bandis constitutive model in UDEC, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 41, 469-475.

-
- 1- Permeability
 - 2- Hydraulic Conductivity
 - 3- Hydro Mechanical (H-M)
 - 4- Representative Elementary Volume (REV)
 - 5- Sellafield
 - 6- Cambria
 - 7- Discrete Fracture Network
 - 8- Block-in-Block theory
 - 9- Nuclear Waste
 - 10- Dilation angle
 - 11- Static equilibrium
 - 12- Hydrostatic
 - 13- Rock burst
 - 14- Parkfield
 - 15- Dashpots
 - 16- Driving
 - 17- Flow rate