

## ارزیابی میزان تأثیر فرسایش شیمیایی محلول اسیدشویی مس بر نفوذپذیری توده‌سنگ به کمک روش مدلسازی شبکه درزه منفصل - المان مجزا (مطالعه موردی معدن مس دره‌زار کرمان)

محمد رضا اکبری فروز<sup>1\*</sup>، علیرضا باغبانان<sup>2</sup>، حمید هاشم‌الحسینی<sup>3</sup>، علی احمدی عامله<sup>4</sup>

1- کارشناس ارشد مکانیک سنگ، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان

2- دانشیار، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان

3- دانشیار، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان

3- استادیار، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان

(دریافت: شهریور 1392 پذیرش: تیر 1394)

### چکیده

هدف این مقاله ارزیابی اثرات محلول اسیدسولفوریک مورد استفاده در اسیدشویی فلز مس بر رفتار هیدرومکانیکی توده‌سنگ واقع در زیر تأسیسات انباشته اسیدشویی و درک بهتر فرآیندهای توأمان مرتبط با این پدیده است. فرآیند اسیدشویی به‌عنوان یک روش امیدبخش و انقلابی در رفع مشکلات روش استخراج فلزات به کمک حرارت شناخته شده است. این روش نویدبخش کاهش قابل توجه هزینه‌های سرمایه‌گذاری است. این روش همچنین موجب کاهش آلودگی‌های محیط‌زیست می‌شود. یک سری آزمون آزمایشگاهی باهدف ارزیابی اثرات محلول اسیدسولفوریک با مقادیر pH مساوی 1، 3، 5 و 7 بر خصوصیات سه نوع درزه‌سنگ آندزیتی متعلق به شیروانی اسیدشویی معدن مس دره‌زار اجرا شد. ضریب زبری، سختی برشی، بازشدگی و مقاومت برشی درزه‌سنگ‌های فرسایش‌یافته توسط محلول‌های اسیدسولفوریک با غلظت‌های مختلف اندازه‌گیری شد. همچنین از نگرش شبکه درزه مجزا- المان مجزا، به‌منظور ارزیابی اثرات محلول اسیدشویی بر نفوذپذیری توده‌سنگ درزه‌دار استفاده شد. نتایج مؤید این نکته است، که با کاهش مقدار pH محلول اسیدشویی فلز مس، ضرایب ماتریس نفوذپذیری معادل افزایش می‌یابند. به‌علاوه اثر ضریب نسبت تنش‌های افقی به قائم ( $k_{\eta}$ ) بر خصوصیات هیدرولیکی توده‌سنگ آندزیتی ناچیز است.

### کلمات کلیدی

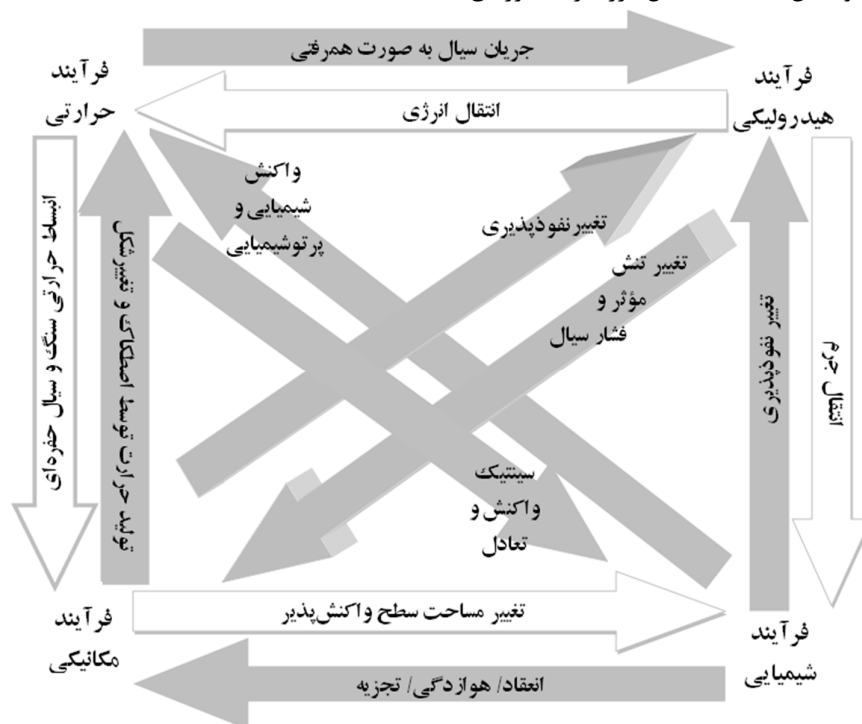
فلزشویی، فرآیندهای توأمان CHM، pH محلول، منطقه اسیدشویی، نگرش شبکه درزه منفصل - المان مجزا، تانسور نفوذپذیری، معدن مس دره‌زار

## 1- مقدمه

یک سیال واکنشگر، مانند محلول اسیدشویی، بدون در نظر گرفتن همبستگی فرآیندها ممکن نیست. امروزه در بسیاری از شاخه‌های مهندسی، مدل عددی شیمیایی-هیدرو- مکانیکی توأمان (CMH)، باهدف تحلیل دقیق تر رفتار سنگ، توسعه یافته است. منظور از فرآیند توأمان، اثرگذاری یک فرآیند بر آغاز و پیشروی یک یا چند فرآیند دیگر است، که می‌تواند یک یا دو طرفه باشد [1]. در شکل 1 مهم‌ترین اندرکنش‌های بالقوه فرآیندهای اثرگذار بر پروژه‌های مهندسی سنگ نمایش داده شده است. پیکان‌های تیره رنگ مؤید اهمیت بیشتر اندرکنش مد نظر در فعالیت‌های مهندسی سنگ هستند [2].

در قیاس با استحصال فلزات توسط حرارت، فن‌آوری شستشو فلز توسط بیوتکنولوژی به‌عنوان یک راه‌حل امیدبخش و انقلابی به جهان صنعت معرفی شد. اهداف اولیه این روش کاهش چشمگیر هزینه‌های سرمایه‌گذاری و آلودگی محیط‌زیست است. فرآیندهای بیولوژیکی در شرایط ملایم و معمولاً بدون اضافه کردن سموم شیمیایی انجام می‌شوند. از طرف دیگر، محصولات فرآیندهای بیولوژیکی به‌صورت محلول آبدار هستند، که از لحاظ محدود کردن و طرز عمل، رام‌شدنی‌تر از زباله‌های گازی هستند [3].

مدلسازی توسط نرم‌افزارهای رایج علم مکانیک سنگ، به‌عنوان یک راه‌حل کارآمد برای ارزیابی خصوصیات توده‌سنگ شناخته می‌شود. در آغاز مدلسازی باید تعدادی داده ورودی به نرم‌افزار کامپیوتری معرفی گردد. این اطلاعات عمدتاً از آزمون‌های آزمایشگاهی اجرا شده بر نمونه‌های کوچک و استاندارد سنگ بکر و درزه‌سنگ حاصل می‌شوند. از طرف دیگر، حضور مواد شیمیایی در محیط سنگی موجب دگرگونی کلیه پارامترهای مکانیکی و فیزیکی سنگ بکر و درزه‌سنگ می‌شود. بنابراین در صورت وجود عوامل شیمیایی در محیط‌زیست منطقه معدنکاری، ارزیابی میزان اثرگذاری آن بر کلیه پارامترهای فیزیکی و مکانیکی سنگ بکر و درزه‌سنگ ضروری است. در معادنی که از روش اسیدشویی به‌منظور استحصال فلزات بهره می‌برند، از موادی با قابلیت خوردگی قابل توجه (مانند اسیدسولفوریک) استفاده می‌شود، که در صورت نفوذ به توده‌سنگ واقع در محدوده اسیدشویی، تأثیرات زیادی بر خصوصیات مکانیکی و هیدرولیکی آن خواهد گذاشت. پیش‌بینی دقیق واکنش سنگ متخلخل درزه‌دار به تریق



شکل 1: فرآیندهای توأمان برجا مؤثر در رفتار توده‌سنگ (برگرفته از یووا و هانت) [2]

درزه منفصل - المان مجزا، میزان اثرگذاری محلول اسیدسولفوریک مورد استفاده در اسیدشویی فلز مس بر نفوذپذیری و الگوی جریان سیال توده‌سنگ آندزیتی مورد تحلیل قرار می‌گیرد.

در این کار تحقیقاتی پس از مطالعه آماری مشخصات درزه‌های برداشت‌شده از منطقه فرآوری معدن دره‌زار، شبکه درزه منفصل (DFN) ساخته شد. سپس به کمک نرم‌افزار المان مجزا دوبعدی UDEC چهار مدل مختلف از یک DFN یکسان، با خصوصیات درزه‌سنگ متفاوت مورد تحلیل قرار گرفت. این خصوصیات بر اساس مطالعات آزمایشگاهی بر روی درزه‌هایی که توسط محلول‌های اسیدسولفوریک با مقادیر pH متفاوت فرسایش یافته‌اند، استخراج شده است. هدف این مقاله ارزیابی تأثیر محلول اسیدشویی مس بر نفوذپذیری و الگوی جریان توده‌سنگ زیرین انباشته اسیدشویی است. در گذشته، مطالعاتی در زمینه تأثیر این محلول بر خصوصیات هندسی و مکانیکی درزه‌سنگ و سنگ بکر انجام شده است [15]. بنابراین، در این تحقیق از داده‌های آزمایشگاهی کارهای پیشین، به‌عنوان داده‌های ورودی مدلسازی عددی استفاده شده است. در ادامه، در بخش دوم پس از معرفی نرم‌افزار مورد استفاده، نحوه مدلسازی شبکه درزه و خصوصیات مدل عددی مطرح می‌گردد. در بخش سوم نتایج مدلسازی عددی ارائه شده است و سرانجام در بخش 4 بحث و نتیجه‌گیری کلی مقاله بیان شده است.

## 2- مواد و روش تحقیق

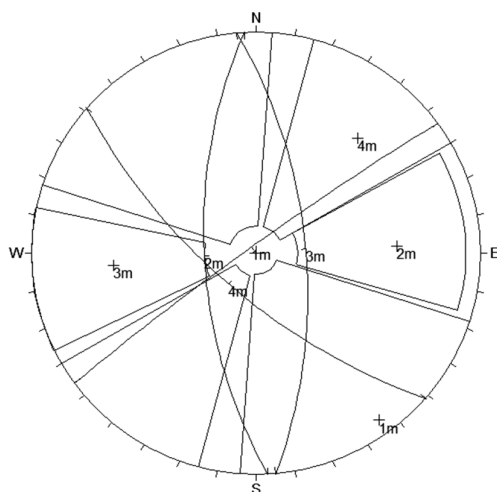
در این بخش پس از ارائه خصوصیات منطقه تحت مطالعه و محلول شیمیایی، مراحل ساخت شبکه DFN بیان می‌شود. در روش DFN برای هر یک از دسته‌درزه‌ها با برآزش توابع توزیع مناسب در مورد هر یک از خصوصیات، میانگین و مقدار انحراف مجاز خصوصیت مذکور مشخص می‌شود. سپس خصوصیات آزمایشگاهی درزه‌سنگ در معرض فرسایش توسط مقادیر مختلف محلول اسیدشویی، ارائه می‌شود. در پایان نحوه مدلسازی به کمک نرم‌افزار UDEC بیان شده است.

### 2-1- مشخصات منطقه و محلول شیمیایی

اگر با نصب عایق‌های مناسب بر سطح اسیدشویی، یک سطح کاملاً نفوذناپذیر تشکیل گردد، مضرات این روش بر محیط‌زیست منطقه نیز تا حد قابل توجهی کاهش می‌یابد [4]. معضل اصلی مرتبط با اسیدشویی، نفوذ مواد شیمیایی اسیدی به سنگ بستر زیر سطح انباشته، در صورت عایق نبودن بخشی از سطح است، که پی‌آمد آن تغییر رفتار هیدرولیکی و مکانیکی توده‌سنگ زیرین خواهد بود. در واقع محلول اسیدسولفوریک مورد استفاده در اسیدشویی باعث تغییر خواص فیزیکی و مکانیکی سنگ بکر و درزه‌سنگ‌ها می‌شود و اگر قرار باشد، در آینده تأسیسات فرآوری دیگری مانند سنگ‌شکن در این منطقه احداث شود، باید میزان تغییر خصوصیات ایجادشده توسط محلول شستشو ارزیابی گردد.

به دلیل پیچیدگی‌های موجود و تغییرپذیری زیاد پارامترها، در حال حاضر شبیه‌سازی فرآیند توأمان CMH هنوز با مشکلات زیادی مواجه است. از طرف دیگر، اطلاعات موجود در رابطه با ماهیت همبستگی کامل بین اثرات شیمیایی و مکانیکی نیز اندک هستند [5]. با این وجود، طی دهه آغازین قرن 21، با توجه اهمیت فرآیند توأمان CMH در پروژه‌های مهندسی سنگ، توجه پژوهشگران به درک بهتر این فرآیند جلب شده است. مطالعات زیادی در زمینه برآورد میزان اثرات محلول شیمیایی اسیدی بر خصوصیات فیزیکی و مکانیکی نمونه سنگ بکر [7-15] و درزه‌سنگ [16-18] به کمک آزمون‌های آزمایشگاهی انجام گرفته است. در سال 2004 از روش شبیه‌سازی به‌منظور پیش‌بینی واکنش (تغییر تخلخل و نفوذپذیری) یک ستون از سنگ تحت تنش به تخریب سیال واکنش‌پذیر استفاده شد [1]. به‌علاوه، گزارش‌های حاصل از اجرای پروژه‌های تحقیقاتی در منطقه تخریب حاصل حفاری سنگ‌های بلورین، مؤید بروز نشانه‌هایی از واکنش عوامل اسیدی با برخی کانی‌های سازنده سنگ و حضور فرآیند توأمان CMH هستند. این اسید به دلیل تماس اکسیژن و دی‌اکسیدکربن هوا با منطقه آسیب‌دیده تشکیل می‌شود [19]. برخلاف اثبات اهمیت زیاد تأثیر محلول شیمیایی بر رفتار هیدرولیکی و مکانیکی توده‌سنگ، هنوز مطالعه جامعی در زمینه تأثیر محلول‌های شیمیایی بر خصوصیات توده‌سنگ انجام نگرفته است. در این مطالعه به کمک روش مدلسازی عددی شبکه

- تابع چگالی احتمال (PDF) جهت شیب (ثابت فیشر دسته‌درزه‌ها)
  - تابع چگالی احتمال (PDF) طول خط اثر درزه‌ها
  - چگالی دوبعدی (P20) هر دسته‌درزه
- تعداد 113 درزه توسط 16 پنجره برداشت در رخنمون‌های منطقه برداشت شد. پس از ترسیم درزه‌های برداشت‌شده از منطقه در شبکه استریونوت و شناسایی دسته‌درزه‌ها (شکل 2)، به‌منظور تعیین توابع چگالی احتمال خصوصیات دسته‌درزه‌ها، در هر مورد بهترین توزیع بر داده‌های موجود برازش می‌شود و از پارامترهای توزیع مذکور، در ساخت شبکه DFN استفاده شد. با توجه به شکل 2 داده‌های حاصل از برداشت درزه در منطقه فرآوری معدن دره‌زار، مؤید حضور 4 دسته‌درزه، در این محدود است. شیب، جهت شیب و ثابت فیشر (پارامتر توزیع فیشر) جهت شیب دسته‌درزه‌ها در جدول 1 ارائه شده است.



شکل 2: چهار دسته‌درزه شناسایی‌شده در منطقه

با برازش توزیع لاگ‌نرمال بر طول خط اثر درزه‌ها نیز پارامترهای  $\mu$  و  $\sigma$  (مقدار گشتاور مرتبه دوم و اول) طول اثر 4 دسته‌درزه تخمین زده شد (جدول 1). به‌علاوه، به کمک اطلاعات حاصل از برداشت درزه‌های منطقه با روش پنجره برداشت، چگالی دوبعدی (فراوانی در واحد سطح) درزه‌ها معادل 7/062 تعیین شد. از طرف دیگر، چگالی دوبعدی هر کدام از دسته‌درزه‌ها نیز تعیین شد (جدول 1).

معدن مس دره‌زار کرمان در کمربند ماگمایی ارومیه دختر واقع شده است. عمده سنگ‌های منطقه، تناوبی از آندزیت دگرسان شده در سطح و آندزیت، آندزیت بازالت، آندزیت پورفیری و در برخی موارد توف و توف‌آندزیتی در عمق است. با توجه به این نکته، که بخش اصلی سنگ معدن موجود در منطقه هنوز استخراج نشده است، انتخاب فن‌آوری استحصال فلز مورد استفاده در معدن از اهمیت قابل توجهی برخوردار است. در چند سال اخیر، از روش اسیدشویی به‌منظور فرآوری فلز مس منطقه استفاده شده است. اما در حال حاضر، مهندسان شرکت ملی صنایع مس در حال ارزیابی مزایا و معایب تغییر تأسیسات استحصال فلز هستند. بنابراین، احتمال تأسیس تسهیلات فرآوری مانند سنگ‌شکن یا کارخانه تغلیظ در محدوده ناحیه اسیدشویی وجود دارد. بنابراین، باید میزان اثرگذاری این محلول بر خصوصیات هیدرولیکی توده‌سنگ ارزیابی گردد. محلول‌های شیمیایی با مقادیر pH برابر 1، 3 و 5 توسط رقیق کردن اسیدسولفوریک غلیظ تهیه شد. برای تهیه محلول آبی با مقادیر pH برابر 1، 3 و 5 به ترتیب 0/2 و 0/05 میلی‌لیتر (معادل 11/04، 0/368 و 0/092 gr) اسیدسولفوریک غلیظ با درجه خلوص 98٪ و چگالی 1/84 kg/lit در هر لیتر از آب حل شد. البته در مدت زمان فرسایش، pH محلول‌ها توسط pH متر کنترل و توسط افزودن اسید، ثابت نگه داشته شد. نمونه‌های درزه‌سنگ و سنگ بکر به مدت 24 روز در معرض فرسایش این محلول بوده‌اند. از آنجاکه نرخ نفوذ اسید در سنگ بکر کند است و در ارزیابی تأثیر کوتاه‌مدت (چندساله)، تأثیر فرسایش سنگ بکر در اعماق مدلسازی مد نظر این مقاله مطرح نیست. بنابراین، در این مقاله تنها تأثیر محلول شیمیایی بر خصوصیات درزه‌سنگ در نظر گرفته شده و خصوصیات سنگ بکر در تمامی مدل‌ها مشابه حالت طبیعی (اشباع از آب) فرض شده است.

## 2-2- ساخت شبکه درزه منفصل

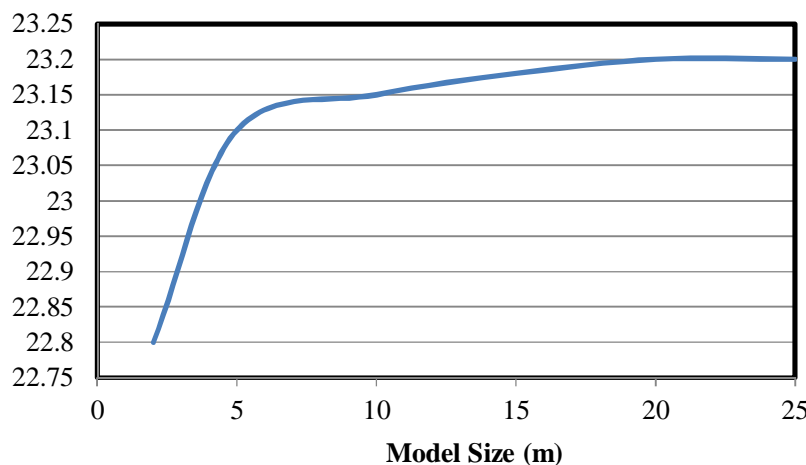
در این کار تحقیقاتی وضعیت درزه‌ها توسط روش شبکه درزه منفصل و به کمک کد FracIUT2D (ساخت محققین دانشگاه صنعتی اصفهان) شبیه‌سازی شده است. اطلاعاتی که در ساخت شبکه DFN دوبعدی مورد استفاده قرار می‌گیرد، عبارت‌اند از:

جدول 1: مشخصات دسته‌درزه‌های تعیین شده توسط برازش توزیع

چگالی دوبعدی	برازش توزیع لاگ‌نرمال		برازش توزیع فیشر		دسته‌درزه
	گشتاور مرتبه 2	گشتاور مرتبه 1	ثابت فیشر	شیب / جهت شیب	
3/81904	0/8603	-0/1577	5/32	324/85	1
1/3639	1/0285	0/2823	25/24	267/63	2
0/8565	0/8899	-0/2656	12/68	85/64	3
1/0229	0/5758	-0/2682	4/56	221/68	4

نسی این پارامتر تکرار گردید. در شکل 4 این نمونه شبکه درزه متعلق به منطقه فرآوری معدن دره‌زار نمایش داده شده است. این اندازه مدل به اندازه کافی بزرگ است، که اثر تصادفی تولید درزه‌ها و اندازه مدل بر خصوصیات هیدرومکانیکی آن ناچیز باشد. به عبارت دیگر، اندازه آن بزرگ‌تر از اندازه حجم نمونه معرف است. در واقع ابعاد مدل تا حدی افزایش یافت، که اثر اندازه مدل بر نفوذپذیری توده‌سنگ حذف شود. از صحت این موضوع به کمک ساخت چندین مدل با اندازه کوچک به بزرگ تا جایی که تغییرات نفوذپذیری ناچیز باشد، اطمینان حاصل شد [17].

لازم به ذکر است، که در کلیه موارد فوق برازش به کمک نرم‌افزار easyfit انجام شده است. پس از اینکه پارامترهای موردنیاز کد FracIUT<sup>2D</sup> تعیین و به این کد معرفی شد، خروجی کد به صورت یک فایل نوت‌پد متشکل از چندین درزه (DFN) در دسترس قرار می‌گیرد و یک DFN با ابعاد 300 در 300 متر ساخته شد. سپس یک شبکه 20 در 20 متر به عنوان حجم نمونه معرف (REV) از درون شبکه مرجع استخراج شد. لازم به ذکر است، این ابعاد با ساختن چندین مدل با ابعاد مختلف (مطابق شکل 3) و اندازه‌گیری نفوذپذیری توده‌سنگ تا زمان ثابت ماندن



شکل 3: نمودار تغییرات نفوذپذیری بر حسب تغییرات اندازه مدل

عمودی درزه به کمک قانون تخمینی مورد استفاده در کد UDEC (معادله 1) تخمین زده شد.

$$jk_n = 10 * \max \left[ \frac{(K + \frac{4}{3}G)}{\Delta z_{\min}} \right] \quad (1)$$

### 3-2- خصوصیات آزمایشگاهی درزه‌سنگ

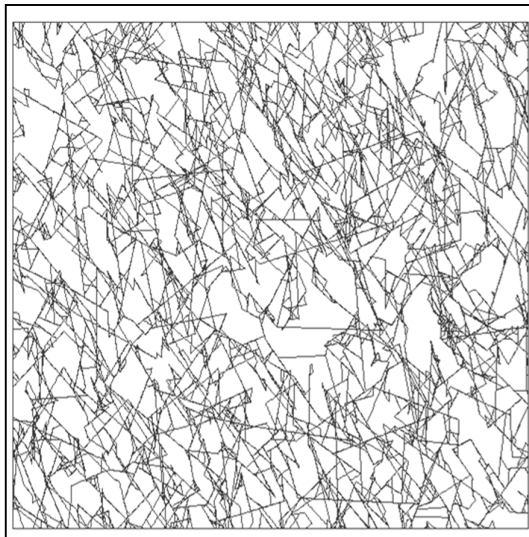
با فرض پیروی رفتار درزه‌سنگ‌های منطقه از معیار موهر-کولمب، مقادیر متوسط سختی عمودی ( $jk_n$ ) و برشی درزه ( $jk_s$ )، زاویه اصطکاک داخلی درزه، بازشدگی اولیه و باقیمانده درزه به نرم‌افزار UDEC معرفی شد. البته، سختی

طبیعی (منحنی تنش برشی - جابجایی برشی)، در محاسبه سختی برشی درزه استفاده شد. در این مورد به دلیل تأثیرگذاری متفاوت مقادیر مختلف pH محلول اسیدی بر مقاومت برشی درزه سنگ، بر حسب pH محلول اسیدی، مقادیر  $k_s$  متفاوت به کد معرفی شد (جدول 2). مقادیر زاویه اصطکاک داخلی درزه نیز در مقادیر pH مختلف، از طریق آزمون برش مستقیم محاسبه شد (جدول 2).

بازشدگی اولیه (تحت تنش صفر) درزه متناسب با JRC متوسط سطوح درزه و از طریق معادله 2 محاسبه شد [20]:

$$e_h = \frac{e^2}{JRC 2.5} \quad (2)$$

در این رابطه  $e_h$  و  $e$  به ترتیب معرف بازشدگی هیدرولیکی و فیزیکی درزه سنگ هستند. با توجه به تغییر زبری سطوح درزه به دلیل فرسایش توسط محلول اسیدی، در مقادیر pH مختلف، با توجه به مقدار JRC (ضریب زبری درزه) متوسط محاسبه شده، مقادیر بازشدگی هیدرولیکی متفاوت به کد UDEC معرفی شد (جدول 2). به علاوه، مقدار بازشدگی هیدرولیکی باقیمانده معادل 10% بازشدگی هیدرولیکی اولیه فرض شد (بنا بر پیشنهاد نرم‌افزار).



شکل 4: DFN 20 متر در 20 متر منطقه فرآوری معدن دره‌زار

در این رابطه  $K$  و  $G$  به ترتیب معرف مدول بالک و برشی سنگ بکر و  $\Delta z_{min}$  کوچک‌ترین عرض ناحیه مجاور درزه در راستای عمود بر درزه است (قابل محاسبه توسط نرم‌افزار UDEC). از آنجا که  $K$  و  $G$  جزء خصوصیات سنگ بکر محسوب می‌شود، بنابراین از دخول اثر فرسایش شیمیایی بر سختی عمودی درزه صرف‌نظر شد. مقدار  $k_s$  تمام مدل‌ها برابر  $3/2 \text{ GPa/m}$  در نظر گرفته شد. از طرف دیگر، از شیب منحنی‌های آزمون برش مستقیم درزه

جدول 2: خصوصیات درزه سنگ (ورودی کد UDEC) در مقادیر pH متفاوت

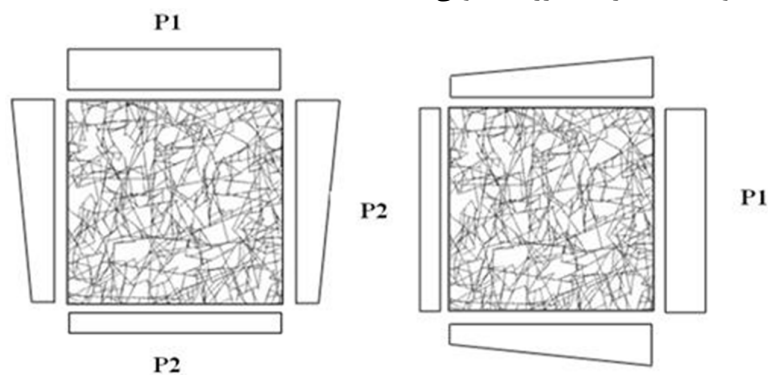
pH = 5	pH = 3	pH = 1	شرایط عادی	پارامتر
0/62	0/36	0/22	0/68	سختی برشی درزه (GPa/m)
5/2	6/2	7/4	4/7	بازشدگی اولیه درزه ( $\mu\text{m}$ )
0/52	0/62	0/74	0/47	بازشدگی باقیمانده درزه ( $\mu\text{m}$ )
35/15	34/6	30/3	36/9	زاویه اصطکاک سطحی درزه (درجه)

به قائم) برابر 2، 3 و 4 در مدل وارد شد. از آنجا که عمق روباره مدل 100 متر در نظر گرفته شده است، نسبت تنش افقی ناشی از فعالیت تکنونیک منطقه به تنش قائم حاصل از وزن روباره بزرگ‌تر از یک فرض شده است. اگر توده سنگ به عنوان یک محیط متخلخل همگن و آنیزوتروپ در نظر گرفته شود، تانسور نفوذپذیری معادل ( $K_{ij}$ ) بر اساس قانون دارسی (معادله 3) تعیین می‌شود. در این

#### 4-2- مدل‌سازی عددی المان مجزا

نرم‌افزار UDEC یک برنامه عددی دوبعدی مبتنی بر روش مدل‌سازی المان مجزا است، که رفتار محیط‌های غیر پیوسته (مانند توده سنگ درزه‌دار) را در معرض بارگذاری استاتیکی و دینامیکی شبیه‌سازی می‌کند. مدل‌های DFN تولیدشده به بلوک‌های شکل‌پذیر با حداکثر اندازه  $0/1 \text{ m}$  تقسیم شد. پس از اختصاص خصوصیات مواد به مدل، تنش مکانیکی معادل وزن روباره در مقادیر  $k_0$  (نسبت تنش افقی

مستقل خطی ثابت و شیب‌دار تعیین کرد [22]. پس از حل شدن مدل در شرایط تنش مکانیکی مذکور، شرایط مرزی هیدرولیکی (شکل 4) بر مدل اعمال شد و پس از محاسبه جریان سیال، نفوذپذیری مدل DFN در حالت عادی و وضعیتی که توده سنگ توسط محلول‌های اسیدسولفوریک با مقادیر pH برابر 1، 3 و 5 فرسایش یافته است، ارزیابی و مقایسه شد. فشار هیدرولیکی در مرکز مدل برابر 200kPa است. فاکتورهای P1 و P2 معرف فشار هیدرولیکی طرفین مرز مدل هستند.



شکل 5: شرایط مرزی هیدرولیکی مورد استفاده در محاسبات جریان سیال و درایه‌های تانسور نفوذپذیری در مدل DFN

است. آنچه به طرز واضح در شکل‌ها نمایان شده است، افزایش ضخامت خطوط (بازشدگی درزه) با کاهش pH محلول اشباع کننده است. به علاوه، با تغییر نسبت تنش  $k_0$  از 2 به 3 تغییر قابل توجهی در بازشدگی درزه‌ها مشاهده نمی‌شود.

در شکل 6-a کم ضخامت‌ترین خط مدل در حالت نرمال (pH=7) که معرف نرخ جریانی برابر  $4 \times 10^{-11} \text{ m}^3/\text{s}$  است، با خط قرمز نمایش داده شده است. این قسمت از مدل پنجره‌ای با ابعاد 2 در 2 متر است، که مطابق شکل 6 از قسمت مشخصی از مدل DFN 20 در 20 متر استخراج شده است.

در شکل 8 نیز الگوی جریان سیال در یک مدل 10 متر در 10 متر که دقیقاً از وسط مدل DFN اصلی استخراج شده است، در نسبت تنش افقی به قائم 2، نمایش داده شده است. ضخامت هر خط معرف نرخ جریانی برابر  $4 \times 10^{-11} \text{ m}^3/\text{s}$  است. در شرایطی که pH سیال اشباع کننده مساوی 7، 5، 3 و 1 باشد، حداکثر نرخ جریان سیال

حالت، فرض می‌شود، سیال تنها درون درزه‌ها جریان می‌یابد [21]:

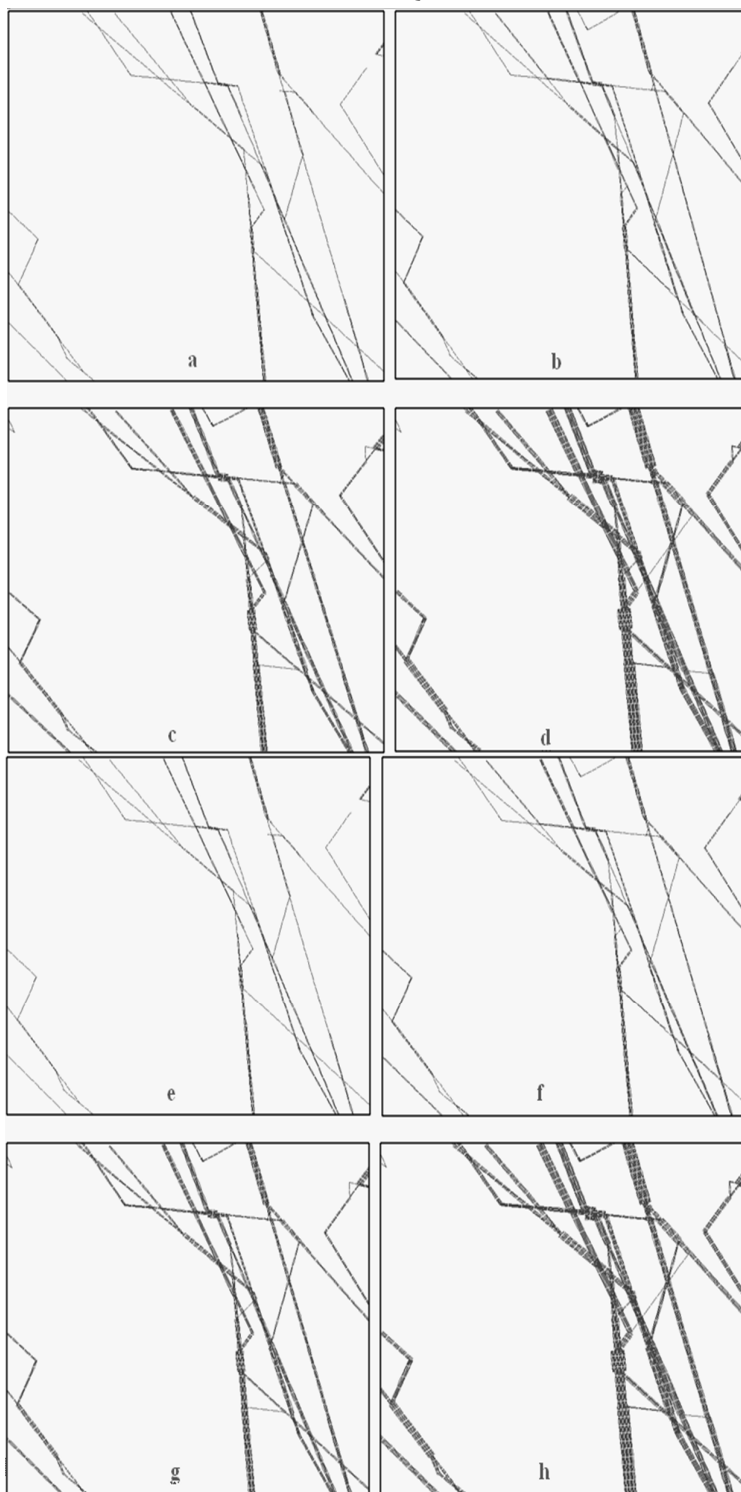
$$Q_i = A \frac{k_{ij}}{\mu} \cdot \frac{\partial p}{\partial x_j} \quad (3)$$

که در این رابطه،  $Q_i$  معرف نرخ جریان،  $A$  مساحت مدل DFN،  $K_{ij}$  تانسور نفوذپذیری،  $\mu$  لزجت دینامیکی و  $\frac{\partial p}{\partial x_j}$  گرادیان فشار هیدرولیکی اعمال شده است. با فرض وجود فشار هیدرولیکی گرادیان ثابت (معادل 10kPa/m) مؤلفه‌های نفوذپذیری مدل ( $K_{xx}$ ،  $K_{yy}$ ،  $K_{xy}$  و  $K_{yx}$ ) را می‌توان توسط دو دسته شرایط مرزی عمومی

### 3- نتایج مدل‌سازی عددی

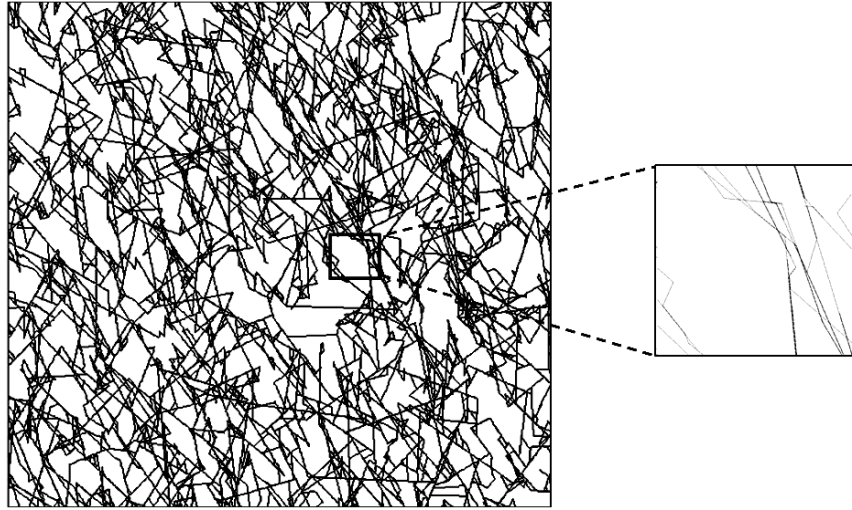
پس از محاسبه جریان سیال در مرزهای خارجی مدل DFN، میزان تغییر مؤلفه‌های تانسور نفوذپذیری معادل اسیدسولفوریک با مقادیر pH برابر 1، 3 و 5، در نسبت‌های تنش افقی به قائم 2، 3 و 4، محاسبه و با حالت عادی مقایسه گردید. با افزایش خاصیت اسیدی محلول شیمیایی، در مقادیر pH برابر 1، 3 و 5، مؤلفه‌های تانسور نفوذپذیری به ترتیب با ضرایب تقریبی 4، 2/4 و 1/4 افزایش یافته است. به عنوان مثال، در نسبت تنش افقی به قائم 2، مؤلفه  $K_{xx}$  در مقادیر pH مذکور، به ترتیب مقادیر 1، 1/38، 2/35 و 4/02 (با ضریب  $10^{-16}$ ) را اختیار کرده است. در شکل 6 تغییر بازشدگی در قسمتی از مدل کلی (شکل 7)، در نسبت‌های تنش افقی به قائم 2 و 3 و در دو حالت عادی و حضور عامل فرسایش شیمیایی توسط محلول اسیدسولفوریک با pH برابر 1، 3 و 5، نمایش داده شده

به ترتیب  $3/043 \times 10^{-10}$ ،  $4/141 \times 10^{-10}$ ،  $7/073 \times 10^{-10}$  و  $12/1 \times 10^{-10} \text{ m}^3/\text{sec}$  است.



شکل 6: نمایش تغییرات بازشدگی درزه‌ها در پنجره با ابعاد 2 در 2 متر از مدل DFN، تحت نسبت تنش افقی به قائم 2 و 3. (a)  $\text{pH}=7$  و  $k_0=2$ ، (b)  $\text{pH}=5$  و  $k_0=2$ ، (c)  $\text{pH}=3$  و  $k_0=2$ ، (d)  $\text{pH}=1$  و  $k_0=2$ ، (e)  $\text{pH}=7$  و  $k_0=3$ ، (f)  $\text{pH}=5$  و  $k_0=3$ ، (g)  $\text{pH}=3$  و  $k_0=3$ ، (h)  $\text{pH}=1$  و  $k_0=3$

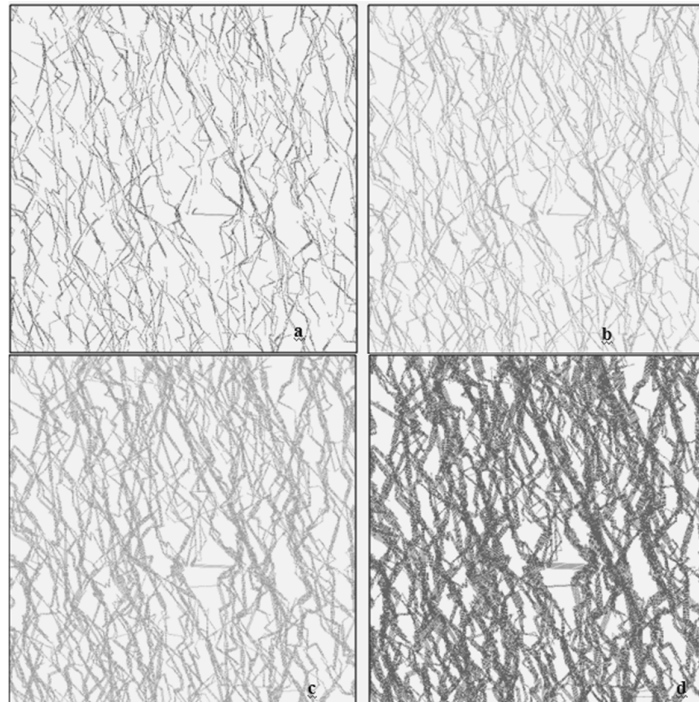




شکل 7: استخراج مدل 2 در 2 متر از مدل DFN 20 در 20 متر،  $k_0=2$  و  $pH=7$

مؤلفه‌های تانسور نفوذپذیری معادل توده‌سنگ ندارد. به‌عبارت‌دیگر، عارضه غالب تأثیرگذار بر نفوذپذیری توده‌سنگ فرسایش شیمیایی است. در واقع افزایش بازشدگی هیدرولیکی است، که نقش اصلی را در افزایش نفوذپذیری ایفا می‌کند.

داده‌های حاصل از مدلسازی عددی در جدول 3 ارائه شده است. با توجه به داده‌های ارائه‌شده در این جدول، با کاهش pH محلول اسیدسولفوریک، مؤلفه‌های تانسور نفوذپذیری معادل توده‌سنگ مقادیر بزرگ‌تری اختیار می‌کنند. از طرف دیگر، افزایش نسبت تنش افقی به قائم (در بازه مورد مطالعه در این تحقیق)، تأثیر قابل توجهی بر



شکل 8: الگوهای جریان سیال در بخش میانی (با اندازه 10 در 10 متر) مدل DFN در حالت  $k_0=2$ ، زمانی که گرادیان هیدرولیکی در راستای عمود بر تنش افقی باشد. (a) ،  $pH=7$  . (b) ،  $pH=5$  . (c) ،  $pH=3$  . (d) ،  $pH=1$  . کمترین ضخامت خط معرف نرخ جریان برابر  $4 \times 10^{-11} m^3/s$  است.

جدول 3: تغییر مؤلفه‌های تانسور نفوذپذیری معادل توده‌سنگ به دلیل فرسایش شیمیایی توده‌سنگ توسط محلول اسیدی

مؤلفه‌های تانسور نفوذپذیری معادل توده‌سنگ (با ضریب $10^{-17}$ )				شرایط محیط	نسبت تنش افقی به قائم ( $k_0$ )
$K_{yy}$	$K_{xy}$	$K_{yx}$	$K_{xx}$		
23/2	4/98	4/57	10	pH = 7	2
31/6	6/78	6/21	13/8	pH = 5	
53/9	11/6	10/6	23/5	pH = 3	
92/1	19/9	18/1	40/2	pH = 1	
23/6	5/07	4/65	10/3	pH = 7	3
32	6/89	6/31	14	pH = 5	
54/5	11/8	10/7	23/8	pH = 3	
93/1	20	18/4	40/7	pH = 1	
20/2	4/35	4/67	10/4	pH = 7	4
31/7	7/07	6/32	14/2	pH = 5	
54	12/1	10/8	24/2	pH = 3	
94	19/27	18/4	41/1	pH = 1	

خاصیت اسیدی، مؤلفه‌های تانسور نفوذپذیری معادل توده‌سنگ مقدار بزرگ‌تری اختیار می‌کنند. به‌عنوان مثال تحت  $k_0$  برابر 2، مؤلفه  $K_{yy}$  در حالات فرسایش توسط محلول اسیدی با pH برابر 5، 3 و 1 به ترتیب نسبت به حالت عادی برابر 36/2، 132/3 و 297 درصد ارتقا یافته است. مقادیر افزایشی برای  $K_{xx}$  به ترتیب 38، 135 و 302 درصد و برای  $K_{xy}$  36، 133 و 300 درصد است.

همان‌طور که پیش از این بحث شد، در این مطالعه اثر نفوذ طول مدت محلول اسیدی در سنگ بکر در نظر گرفته نشد و تنها تغییر خصوصیات درزه‌سنگ مورد تحلیل قرار گرفت. ارزیابی اثر تغییر خصوصیات سنگ بکر بر خصوصیات هیدرولیکی توده‌سنگ مستلزم مطالعه دقیق اثر نفوذ سیال (در راستای عمقی و پهنایی توده‌سنگ) در سنگ بکر است، که در حال انجام توسط این گروه تحقیقاتی است. در ضمن در صورت بررسی اثر اسید بر خصوصیات سنگ بکر و درزه به‌صورت سه‌بعدی، می‌توان از مدل‌سازی سه‌بعدی نیز بهره برد.

#### 5- تشکر و قدردانی

مؤلفین این مقاله از حمایت‌های مالی شرکت ملی صنایع مس ایران (NICICO) از این تحقیق، که در

در مؤلفه  $K_{ij}$ ،  $i$  معرف جهت گرادیان هیدرولیکی اعمال‌شده و  $j$  راستای محاسبه میزان گذر جریان است. واحد مؤلفه‌های  $K$  بر حسب  $m^2/s$  است.

#### 4- بحث و نتیجه‌گیری

هدف این مقاله ارزیابی میزان تأثیر محلول اسیدسولفوریک مورد استفاده در اسیدشویی فلز مس بر نفوذپذیری و الگوی جریان سیال توده‌سنگ واقع در زیر محدوده اسیدشویی بود. این امر به کمک روش مدل‌سازی شبکه درزه منفصل - المان مجزا (DFN-DEM) انجام گرفت. مشخصات درزه‌سنگ‌ها در چهار حالت مختلف عادی (اشباع از آب با pH=7) و فرسایش یافته توسط محلول‌های اسیدی دارای pH برابر 5، 3 و 1 بر اساس تحقیقات آزمایشگاهی پیشین مؤلفین این مقاله در چهار مدل یکسان وارد شد و نتایج مدل‌سازی مورد قیاس قرار گرفت. نتایج حاصل از مدل‌سازی شبکه درزه منفصل توسط نرم‌افزار المان مجزا UDEC شامل موارد زیر است:

نسبت تنش افقی به قائم تأثیر قابل توجهی بر الگوی جریان سیال و مؤلفه‌های تانسور نفوذپذیری معادل توده‌سنگ مورد مطالعه نداشته است. با کاهش pH محلول اسیدسولفوریک مورد استفاده در اسیدشویی، نرخ جریان سیال در مرزهای مدل DFN افزایش می‌یابد. با افزایش

properties of building stone-a case study. IAEG conference, pp. 514.

[13] Backstrom, A., 2008. Numerical modelling of uniaxial compressive failure of granite with and without saline porewater. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Science* 45 .pp. 1126–1142.

[14] Huayan, Y., Zhenhua, Zh. 2009. Experimental Study on Influences of Chemical Solutions on Mechanical Properties of Brittle Limestone Under Triaxial Compression. Technical note, Three Gorges Reservoir Area, China.

[15] اکبری‌فروز، محمد. باغبانان، علیرضا. هاشم‌الحسینی، حمید. احمدی، علی. 2011. تحلیل شیمیایی- هیدرو- مکانیکی توده‌سنگ درزه‌دار- مطالعه موردی معدن دره‌زار کرمان. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان.

[16] Karfakis, M., G., Akram, M. 1993. Effects of chemical solution on rock fracturing. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Science* 30. pp. 1253-1259.

[17] Azevedo, I., C., Vaz, D. L. E. and Vargas, E., A. 2005. A numerical procedure for the analysis of the hydromechanical coupling in fractured rock masses. *International journal for numerical and analytical methods in geomechanics* 22. pp. 867-901.

[18] Min, K., B., Rutqvist, J., Elsworth, D., 2009. Chemically and mechanically mediated influences on the transport and mechanical characteristics of rock fractures. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Science* 46. pp. 80– 89.

[19] Neretnieks, I., 2006. Potential coupled chemical effects in a crystalline rock EDZ. M.Sc. Thesis, KTH university, Stockholm, Sweden.

[20] Barton, N., Quadros, E., F. 1997. Joint aperture and roughness in the prediction of flow and groutability of rock masses. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 34, no. 3-4, pp. 252.

[21] Long, J. C. S., Remer, J. S., Wilson, C. R., Witherspoon, P. A. 1982. Porous media equivalents for networks of discontinuous fractures. *Water Resour Res* 18(3).pp. 645-658.

[22] Bear, J. 1972. *Dynamics of Fluids in Porous Media*. Elsevier, New York, USA.

راستای قرارداد شماره 8959 با بخش تحقیق و توسعه این شرکت فراهم گردید، تشکر می‌نمایند.

## 6- مراجع

[1] Liu, J., Brady, B., H. 2004. Simulations of a coupled hydro-chemo-mechanical system in rocks. *Geotechnical and Geological Engineering* 22, Kluwer Academic Publishers, Netherlands, pp. 121–133.

[2] Yowa, J., L., Hunt, J., R. 2002. Coupled processes in rock mass performance with emphasis on nuclear waste isolation. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 39, pp. 143–150.

[3] Devasia, P., Natarajan, K., A. 2004. Biotechnology in mining industry- bacterial leaching. Technical note, india.

[4] Beane, R., E., 2001. Solution-mineral interaction during commercial copper leaching. Eleventh Annual V. M. Goldschmidt conference.

[5] Elsworth, D., Yasuhara, H. 2006. Short-Timescale chemo-mechanical effects and their influence on the transport properties of fractured rock. *Pure and applied geophysics* 163 , Basel, Switzerland, pp. 2051–2070.

[6] Rebinder, P., A. 1948. Hardness reducers in drilling: a physico-chemical method of facilitating mechanical destruction of rocks during drilling. AkadNank, USSR, Moscow, transl, by Council of Scientific and Industrial Research(CSIRO), Melbourne, Australia.

[7] Boozer, G., D., Hiller, K., H., Serdengecti, S. 1962. The effect of pore fluids on the deformation behaviors of rocks subjected to triaxial compression. *Proceedings Fifth Symposium Rock Mechanics*, pp. 579-626.

[8] Colback, P., S., B., Wiid, B., L. 1965. The influence of moisture content on compressive strength of rocks. 3rd Canadian Rock Mechanics Symposium, Toronto, Canada, pp. 63-6.

[9] Sing, T., N., Sing, S., K., Mishra, A. 1999. Effect of acidic water on physico-mechanical behaviour of rock. *Indian Journal of Engineering & Material Science* 6, PP. 66-72.

[10] Feng, X., T., Chen, S., Li, Sh. 2001. Effects of water chemistry on micro-cracking and compressive strength of granite. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Science* 38 . pp. 557–568.

[11] Feng, X., T., Chen, S., Zhou, H. 2004. Real-time computerized tomography(CT) experiments on sandstone damage evolution during tri-axial compression with chemical corrosion. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Science* 41 . pp. 181–192.

[12] Sharma, P., K., Wal, M., KH., Singh, T., N., 2006. Effect of acidic water on physio-mechanical

## Evaluation of the Effect of Chemical Degradation of Copper Leaching Solution on Permeability of Rock Mass Using DFN-DEM Modeling (Case Study: DAREZAR Mine-Kerman)

M. Akbariforouz<sup>1\*</sup>, A. Baghbanan<sup>2</sup>, H. Hashemolhosseini<sup>3</sup>, A. Ahmadi Ameleh<sup>4</sup>

1- MSc. Rock Mechanics, Dept. of Mining Engineering, Isfahan University of Technology, Iran

2- Associate Professor, Dept. of Mining Engineering, Isfahan University of Technology, Iran

3- Associate Professor, Dept. of Mining Engineering, Isfahan University of Technology, Iran

4- Assistant Professor, Dept. of Mining Engineering, Isfahan University of Technology, Iran

\* Corresponding Author: [akbarforoz@yahoo.com](mailto:akbarforoz@yahoo.com)

(Received: August 2013, Accepted: June 2015)

### Abstract

Evaluating the effects of sulfuric acid solution used in leaching of copper metal on hydro-mechanical behavior of rock mass, and also understanding of chemo- hydro- mechanical coupling processes related to this phenomenon are the main objectives of this research work. Biotechnology is regarded as one of the most promising and certainly the most revolutionary solution to the defects of pyrometallurgy. It holds the promise of dramatically reducing the capital cost of the projects. It also offers the opportunity to reduce the environmental pollution. A set of laboratory experiments were implemented for evaluating the influences of sulfuric acid with different pH values; 1, 3 and 5 on the properties of three types of Andesite rock joints in heap leaching site of DAREZAR copper mine. Joint roughness coefficient, joint shear stiffness, joint aperture, and shear strength of degraded rock joints in different sulfuric acid concentrations were measured. Using a Discrete Fracture Network-Distinct Element Method (DFN-DEM) approach, the effect of chemical solution on permeability of the fractured rock mass is evaluated. The numerical modeling results show that with decreasing pH value of copper metal leaching solution, the coefficients of equivalent permeability tensor increases. The effect of ratio of horizontal to vertical stresses ( $k_0$ ) on hydraulic properties of Andesite rock mass is also negligible.

### Keywords

Leaching, Coupled process, pH of solution, Discrete fracture network-Distinct element method, Equivalent permeability tensor,  $k_0$  coefficient