



## بررسی رفتار نفوذپذیری کانسنگ اکسیدی معدن مس سرچشمه در فرآیند فروشویی توده‌ای

وحیده شجاعی<sup>۱</sup>، سعید کریمی‌نسب<sup>۲</sup>، حمید خوشدست<sup>۳</sup>

### چکیده

در پژوهش حاضر تأثیر نوع حلال، ابعاد خوراک و زمان ماند بر توزیع دانه‌بندی و ضریب نفوذپذیری محصول فروشویی کانسنگ اکسیدی معدن مس سرچشمه مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور نمونه‌ها در ۱۲ گروه ابعادی از ۲۵۰ میکرون تا ۵۰ میلی‌متر به مدت ۰.۳، ۶ و ۹ روز توسط اسید سولفوریک و آب به طور جداگانه به عنوان حلال تحت شستشو قرار گرفتند. نتایج نشان داد که با افزایش زمان ماند و نیز کاهش ابعاد خوراک، سهم ذرات ریز در محصول فروشویی افزایش می‌یابد. بعلاوه استفاده از اسید نسبت به آب، ابعاد محصول را کاهش داد. تغییرات ضریب نفوذپذیری محصولات فروشویی که با استفاده از روش Hazen محاسبه شدند، روندی عکس ابعاد محصول نشان دادند؛ چنانچه افزایش زمان ماند و کاهش ابعاد خوراک و نیز استفاده از اسید به جای آب به دلیل افزایش سهم ذرات ریز و لذا پر شدن منافذ بین ذرات درشت‌تر، ضریب نفوذپذیری را کاهش دادند.

کلمات کلیدی: نفوذپذیری، کانسنگ اکسیدی مس، مجتمع مس سرچشمه، فروشویی

## Studies on permeability behavior of oxide ore of Sarcheshmeh copper mine in heap leaching

V. Shojaee, S. Kariminasab, H. Khoshdast

### Abstract

Effects of solvent type, feed particle size and retention time on size distribution and coefficient of permeability of copper oxide ore of Sarcheshmeh mine were evaluated. In this regard, 12 individual particle size groups of 250  $\mu$ m to 50 mm were leached by using sulfuric acid and water as solvents separately for 3, 6 and 9 days of the process. Results showed that by increasing retention time and decreasing bulk particle size, fineness of the leaching product increased. Besides, the utilization of acid in stead of water as the solvent led to a rather increase in product's fineness. Permeability variations calculated by Hazen equation represented contrary behavior as increase in retention time and decrease in feed size as well as utilizing acid resulted in decreasing permeability values due to increasing fine particle proportion in the product by occupying pores between larger grains.

**Keywords:** Permeability, Copper oxide ore, Sarcheshmeh copper mine, Leaching

۱- دانشجوی دکتری فراوری مواد معدنی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، دانشکده فنی و مهندسی، بخش مهندسی معدن  
۲- عضو هیات علمی دانشگاه شهید باهنر کرمان، بخش مهندسی معدن  
۳- دانشجوی دکتری فراوری مواد معدنی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، دانشکده فنی و مهندسی، بخش مهندسی معدن، تلفن:  
khoshdast\_hamid@yahoo.com .۰۹۱۷۳۰۲۹۲۲۱



### ۱- مقدمه

با کاهش عیار حد معادن و افزایش عمق استخراج مواد معدنی، روش‌های متداول پیرومتالورژی جوابگوی نیاز امروزه صنایع نیستند؛ از این رو روش‌های هیدرومتالورژی به عنوان جایگزین روش‌های متداول مطرح شده‌اند. روش‌های فروشویی، چه به شکل توده‌ای و چه ستونی، روش‌های مناسبی برای فرآوری مواد معدنی کم عیار به ویژه طلا و مس به شمار می‌آیند. این روش‌ها از نظر اجرایی ساده و اقتصادی و قابل تطبیق با هر اندازه عملیاتی می‌باشند. در این روش‌ها، حلال پس از پاشش و نفوذ به داخل توده، کانی مورد نظر را حل کرده و آن را از فاز جامد به فاز محلول منتقل می‌نماید و در مراحل بعدی، فلز مورد نظر از محلول جدا می‌گردد. اگر چه این روش‌ها از نظر اجرایی جزء روش‌های ساده محسوب می‌گردند اما از نظر مدلسازی سیستم‌های پیچیده‌ای محسوب می‌شوند. در روش فروشویی می‌توان سه فرایند را در نظر گرفت: الف) نفوذ محلول به داخل ذرات سنگ معدن، ب) واکنش محلول با کانی و ج) نفوذ و جابجایی محلول در طول توده؛ بنابراین برای شبیه‌سازی فرایند فروشویی به مدلی نیاز است که بتواند مراحل سه‌گانه فوق و سرعت‌های آنها را پوشش دهد [۱، ۲]. تا کنون مدل‌های ریاضی متعددی در مقیاس آزمایشگاهی، نیمه صنعتی و صنعتی برای شبیه‌سازی این فرایندها ارائه گردیده است که بطور کلی می‌توان آنها را به سه گروه زیر تقسیم نمود [۱-۷]:

- میکرومدل‌ها یا مدل ذره: که فرایند را در مقیاس ذره و در رابطه با نفوذ محلول به داخل ذرات سنگ معدن، واکنش با آنها و استخراج از آنها مورد مطالعه قرار می‌دهد.
- ماکرومدل‌ها یا مدل توده: که شبیه‌سازی را در مقیاس توده و براساس حرکت محلول در سراسر توده و استخراج از آن بررسی می‌کند.
- مدل‌های جامع: که فرایند را با درنظر گرفتن همزمان شرایط حاکم بر ذرات و کل توده شبیه‌سازی می‌کند.

چنانچه ملاحظه می‌شود قوانین نفوذ و نفوذپذیری چه در مقیاس ذره و چه توده، قوانین غالب و جزء لاینفک کلیه مدل‌ها را تشکیل می‌دهند. لذا بررسی عوامل مؤثر بر نفوذپذیری مواد معدنی جهت مدلسازی و بهینه‌سازی فرآیندهای فروشویی ضروری می‌نماید. در پژوهش حاضر تأثیر نوع حلال، ابعاد خوراک و زمان ماند بر توزیع دانه‌بندی و ضریب نفوذپذیری محصول فروشویی کانسنگ اکسیدی معدن مس سرچشمه مورد بررسی قرار گرفته است.

### ۲- روش تحقیق

به منظور انجام مطالعات، نمونه‌ای کلی از کانسنگ اکسیدی معدن مس سرچشمه تهیه شد تا تأثیر نوع حلال (اسید و آب)، زمان ماند (۳، ۶ و ۹ روز) و ابعاد خوراک بر توزیع دانه‌بندی و



رفتار نفوذپذیری محصول فروشویی بررسی گردد. نمونه اولیه در ۱۲ گروه ابعادی از ۲۵۰ میکرون تا ۵۰ میلیمتر طبقه‌بندی و از هر گروه سه کیلوگرم جهت انجام آزمایش‌ها به روش مخروطی تهیه شد. سپس، نمونه آماده شده به سه گروه یک کیلوگرمی تقسیم شد: یک کیلوگرم برای قرار دادن در اسید، یک کیلوگرم برای قرار دادن در آب و یک کیلوگرم نیز به عنوان نمونه شاهد. اسید سولفوریک با  $\text{pH}=2$  به عنوان حلال اسیدی مورد استفاده قرار گرفت. در طول مدت هر آزمایش،  $\text{pH}$  به طور روزانه اندازه‌گیری شد تا در صورت تغییر از مقدار ۲، با اضافه نمودن اسید مجدداً تنظیم گردد. هر نمونه به مدت ۳ روز در حلال مورد نظر قرار داده و سپس به روش تر آنالیز سرنندی شد. پس از سرنند کردن، جزء نمونه‌ها جهت خشک شدن، به مدت یک روز در هوای آزاد گذاشته شدند و پس از توزین، مجدداً با یکدیگر مخلوط شده و به مدت سه روز در حلال اولیه قرار گرفتند. این روند برای سه دوره سه روزه تکرار شد تا تأثیر سه زمان ماند ۳، ۶ و ۹ روزه بر محصول فروشویی بررسی گردد. بعلاوه، در پایان هر دوره ضریب نفوذپذیری برای هر نمونه به روش Hazen محاسبه شد که در ادامه شرح داده خواهد شد.

### ۳- ارائه و تحلیل نتایج

به منظور تحلیل نتایج، از منحنی‌های دانه‌بندی و تغییرات ضریب نفوذپذیری محصولات نسبت به زمان استفاده شد. به دلیل تعداد زیاد نمونه‌ها و متعاقباً نمودارها و همچنین روند یکسان حاکم بر آنها، نمونه‌ها به سه گروه زیر تقسیم شدند [۸]:

- گروه ۱: اندازه دانه‌های ۲۵۰ و ۴۲۰ میکرون
  - گروه ۲: اندازه دانه‌های ۵۹۰، ۱۰۰۰، ۱۱۹۰، ۱۴۱۰ و ۲۰۰۰ میکرون
  - گروه ۳: اندازه دانه‌های ۹۵۰، ۱۹۰۰، ۳۰۰۰، ۴۰۰۰ و ۵۰۰۰ میکرون
- در ادامه، نتایج به دست آمده برای ابعاد ۴۲۰، ۲۰۰۰ و ۳۰۰۰ میکرون به عنوان نمونه‌های معرف از هر گروه بررسی خواهند شد.

### ۳-۱- تأثیر زمان ماند و ابعاد نمونه اولیه

در شکل ۱ تأثیر زمان ماند بر توزیع دانه‌بندی محصول نمونه‌های معرف که توسط اسید سولفوریک تحت شستشو قرار گرفته‌اند نشان داده شده است. با توجه به شکل مشاهده می‌شود که با افزایش زمان ماند، سهم ذرات ریزتر در توزیع دانه‌بندی بیشتر می‌گردد. نکته دیگری که از شکل استنتاج می‌شود این است که با افزایش ابعاد نمونه اولیه، اختلاف (فاصله) منحنی‌ها کاهش می‌یابد؛ بدین معنی که با افزایش ابعاد کانه اولیه، از مقدار ذرات ریز در محصول کاسته می‌شود که این بیانگر کاهش تأثیر و لذا عمق نفوذ حلال به ذرات است. شکل ۲ نیز تأثیر زمان



ماند بر توزیع دانه‌بندی محصول نمونه‌های معرف برای آب به عنوان حلال را نشان می‌دهد. در این مورد نیز نتایج مشابه با تأثیر اسید است.

### ۳-۲- تأثیر نوع حلال

با مقایسه شکل‌های ۱ و ۲ تأثیر نوع حلال نیز قابل بررسی است. با توجه به شکل‌ها مشاهده می‌شود که سهم ذرات ریز در محصول نمونه‌هایی که در اسید قرار داشته‌اند در حدود ۱۰-۵ درصد بیشتر است که این روند با افزایش زمان ماند نمایان‌تر می‌شود. اگر چه افزایش ابعاد نمونه اولیه از تأثیر نوع حلال می‌کاهد اما افزایش زمان ماند این تأثیر نامطلوب را تا حدودی جبران می‌کند.

### ۳-۳- بررسی ضریب نفوذپذیری

به منظور اندازه‌گیری ضریب نفوذپذیری خاکها در آزمایشگاه، از روش‌های متفاوتی استفاده می‌گردد که به دو گروه زیر تقسیم می‌شوند [۹]:

- روش‌های دستگاهی: آزمایش با پتانسیل ثابت و نزولی
- روش‌های تجربی

روش‌های تجربی اگر چه دقت کمتری دارند اما می‌توان از آنها برای بررسی روند تغییرات به نحو مطلوبی بهره برد. از میان روابط تجربی متعدد موجود، روش Hazen (۱۹۳۰) به دلیل سادگی و نیاز به حداقل امکانات و پارامترها، بیشترین مورد استفاده را دارد. رابطه Hazen برای ماسه‌های ریز تا متوسط دانه به صورت زیر بیان می‌شود:

$$K = C_{Hz} \cdot D_{10}^2 \quad (1)$$

که  $K$  ضریب نفوذپذیری (cm/s)،  $D_{10}$  اندازه مؤثر Hazen، اندازه‌ای است که ۱۰ درصد ذرات کوچکتر از آن می‌باشند (cm) و  $C_{Hz}$  یک ضریب تجربی است که به اندازه ذرات بستگی دارد (جدول ۱). این رابطه برای ماسه‌های درشت به شکل زیر اصلاح شده است:

$$K = D_{60} \cdot D_{10} \quad (2)$$

که  $D_{60}$  اندازه‌ای است که ۶۰ درصد ذرات کوچکتر از آن هستند [۸، ۹]. بنابراین، مقدار ضریب نفوذپذیری برای سه گروه ابعادی به صورت زیر محاسبه خواهد شد:

- گروه ۱: با اندازه معرف ۴۲۰ میکرون  $K = 0.0004 \times D_{10}^2$
- گروه ۲: با اندازه معرف ۲۰۰۰ میکرون  $K = 0.0008 \times D_{10}^2$
- گروه ۳: با اندازه معرف ۳۰۰۰۰ میکرون  $K = D_{60} \cdot D_{10}$



در گروه ۲، به دلیل نزدیک بودن مقادیر عددی ضریب نفوذپذیری برای ابعاد ۲۰۰۰ میکرون، جهت مقایسه و تحلیل دقیق‌تر نتایج از داده‌های ابعاد ۱۴۱۰ میکرون استفاده شده است. در شکل ۳، تغییرات ضریب نفوذپذیری نسبت به زمان برای نمونه‌های معرف رسم شده است. چنانچه مشاهده می‌شود، برای کلیه نمونه‌ها با افزایش زمان ماند، کاهش ابعاد نمونه اولیه و استفاده از اسید به عنوان حلال ضریب نفوذپذیری کاهش می‌یابد. این نتیجه ناشی از افزایش سهم ذرات ریز در محصول فروشویی است که با اشغال فضای بین ذرات درشت‌تر، کاهش نفوذپذیری را سبب می‌شوند.

#### ۴- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، تأثیر نوع حلال، زمان ماند و ابعاد نمونه اولیه (خوراک فرآیند) بر توزیع دانه‌بندی و ضریب نفوذپذیری محصول فرآیند فروشویی کانسنگ اکسیدی معدن مس سرچشمه مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که با افزایش زمان ماند، ابعاد و متعاقباً ضریب نفوذپذیری محصول فرآیند کاهش می‌یابد. افزایش ابعاد خوراک فرآیند از تأثیر زمان ماند می‌کاهد. استفاده از اسید به جای آب به عنوان حلال نیز کاهش ابعاد محصول فروشویی را به دنبال خواهد داشت. در این پژوهش، از نمونه‌هایی با دانه‌بندی محدود شده استفاده شد تا تأثیر ابعاد خوراک فرآیند به راحتی قابل بررسی باشد؛ در حالی که خوراک فرآیندهای فروشویی در مقیاس صنعتی از یک توزیع دانه‌بندی کامل برخوردار است. لذا پیشنهاد می‌شود که جهت دستیابی به نتایج دقیق‌تر، نمونه‌ای با توزیع دانه‌بندی کامل و حقیقی به طور مجزا مورد مطالعه قرار گیرد. همچنین، غلظت اسید می‌تواند از عوامل مؤثر بر نتایج باشد؛ لذا در نظر گرفتن تأثیر تغییرات این پارامتر در مطالعات آتی ضروری به نظر می‌رسد.

#### مراجع

- ۱- جعفری، مهدی، بررسی مدل‌سازی فرآیند فروشویی توده‌ای به کمک روش CFD، سومین کنفرانس دانشجویی مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ص: ۲۰۶-۱۹۷، آبان ۱۳۸۱.
- 2- Sheikhzadeh, G.A., Mehrabian, M.A., Mansouri, S.H., Sarrafi, A., Computational modelling of unsaturated flow of liquid in heap leaching using the results of column tests to calibrate the model, International Journal of Heat and Mass Transfer, 48: 279-292, 2005.
- 3- Herrera, M.N., Wiertz, J.V., Ruiz, P., Neuburg, H.J., Badilla-Ohlbaum, R., A phenomenological model of the bioleaching of complex sulfide ores, Hydrometallurgy, 22: 193-206, 1989.
- 4- Bhattacharya, P., Sarkar, P., Mukherjee, R.N., Reaction kinetics model for chalcocopyrite bioleaching using *Thiobacillus Ferrooxidans*, Enzyme and Microbial Technology, 12: 873-876, 1990.
- 5- Neuberg, H.J., Castillo, J.A., Herrera, M.N., Wiertz, J.V., Vargas, T., Badilla-Ohlbaum, R., A model for the bacterial leaching of copper sulfide ores in pilot-scale column, International Journal of Mineral Processing, 31: 247-264, 1991.
- 6- Ogbonna, N., Peterson, J., Laurie, H., An agglomerate scale model for the heap bioleaching of chalcocite, University of Cape town, South Africa, pp. 1- 20, 2005.

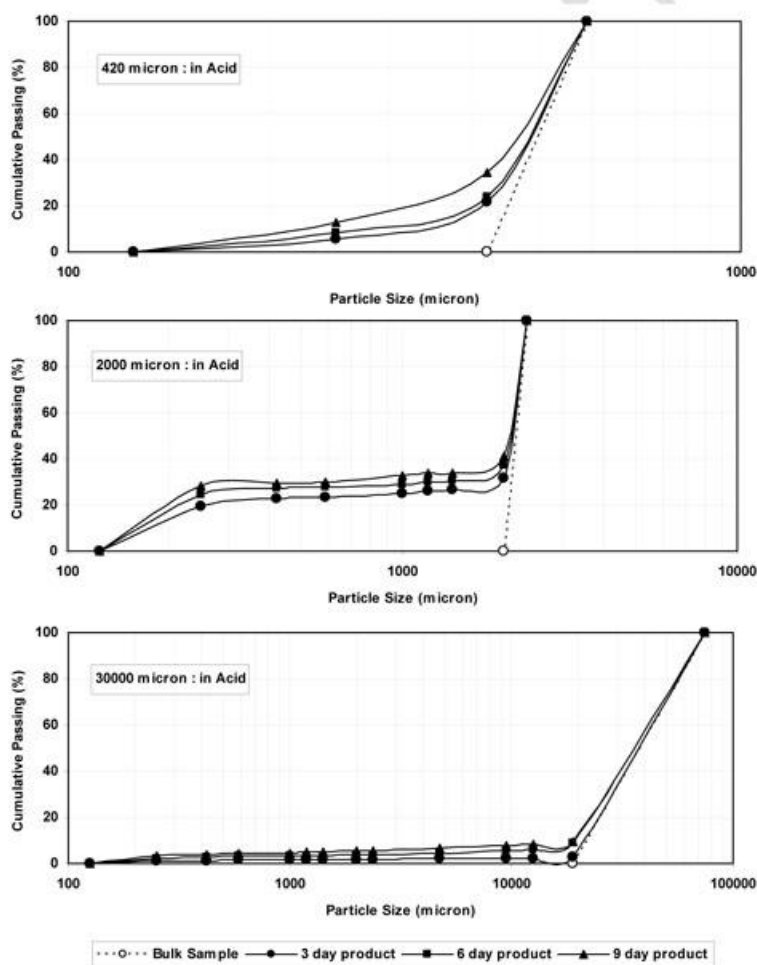


7- Leahy, M.J., Davidson, M.R., Schwarz, M.P., A model for heap bioleaching of chalcocite with heat balance: mesophiles and moderate thermophiles, Hydrometallurgy, 85: 24-41, 2007.

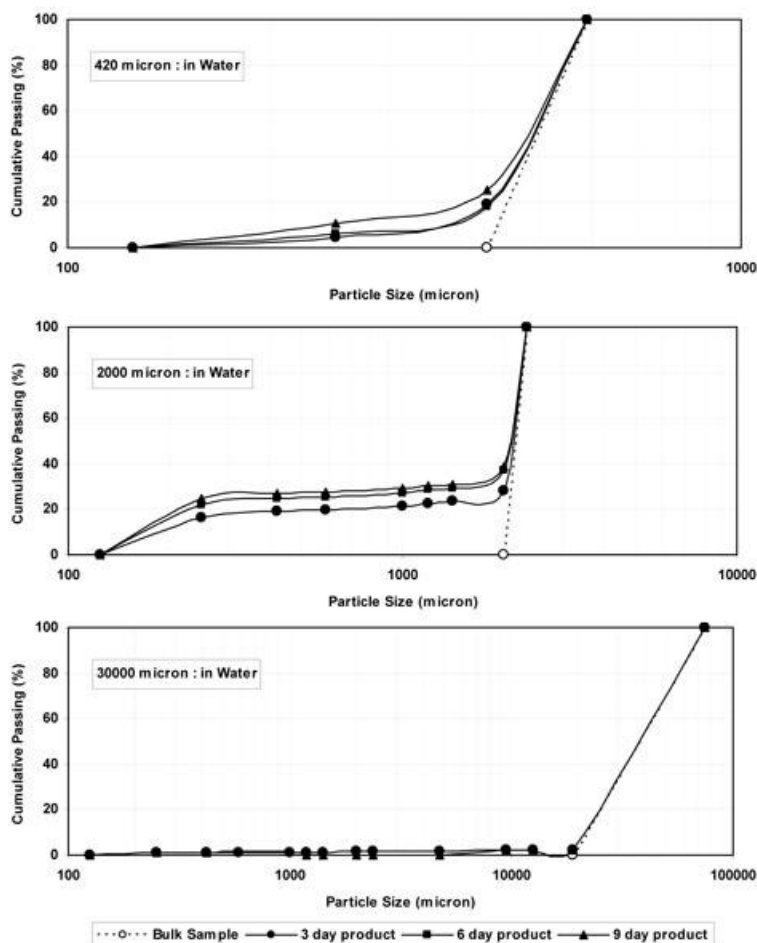
8- Masch, F.D., Denny, K.J., Grain size distribution and its effect on the permeability of sand, W.R.R., volume 3, 665-677, 1966.

۹- داس، ب.م. اصول مهندسی ژئوتکنیک، جلد اول، ترجمه شاپور طاحونی، ناشر: مؤسسه انتشارات پارس آیین،

۱۳۸۱.



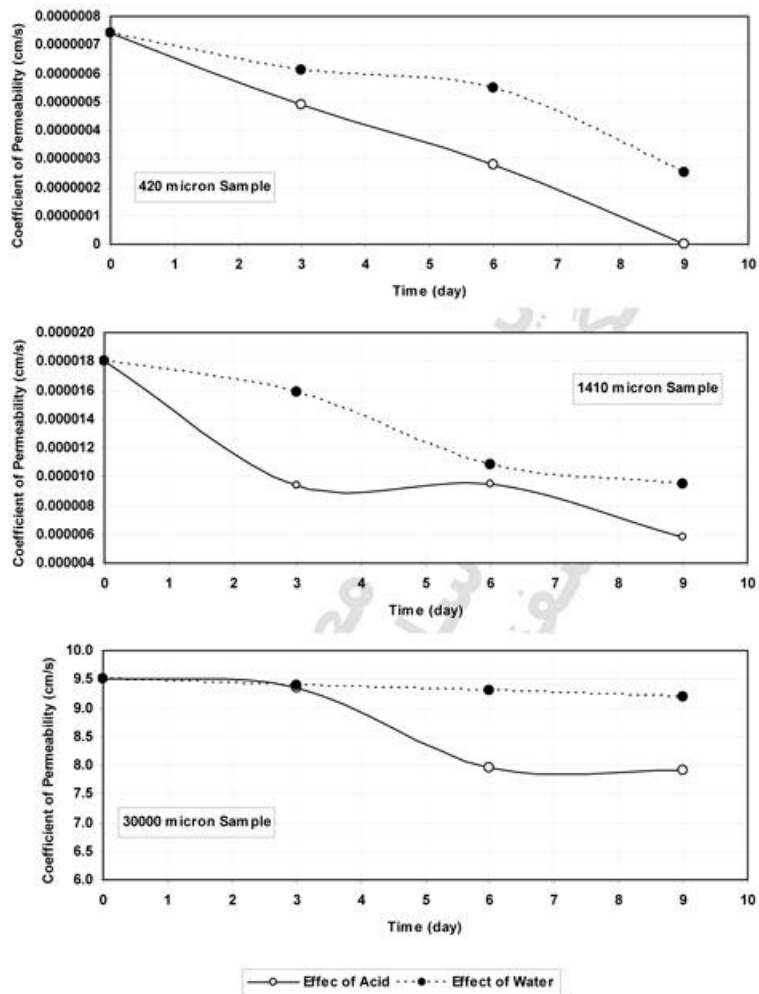
شکل ۱- مقایسه منحنی‌های دانه‌بندی نمونه‌های معرف تحت شرایط فروشویی با اسید



شکل ۲- مقایسه منحنی‌های دانه‌بندی نمونه‌های معرف تحت شرایط فروشویی با آب

جدول ۱- مقادیر ضریب تجربی Hazen بر حسب اندازه و نوع دانه‌بندی [۱۲]

$C_{H_z}$	خصوصیات
$4-8 \times 10^{-1}$	ماسه بسیار ریز و بد دانه‌بندی شده
$4-8 \times 10^{-2}$	ماسه ریز با ذرات محسوس
$8-12 \times 10^{-2}$	ماسه متوسط و خوب دانه‌بندی شده
$8-12 \times 10^{-3}$	ماسه ساحلی و ضعیف دانه‌بندی شده
$1/2-1/5 \times 10^{-2}$	ماسه ساحلی و خوب دانه‌بندی شده



شکل ۳- مقایسه تغییرات ضریب نفوذپذیری نسبت به زمان