



دانشگاه صنعتی خواجه نصیر الدین گوہر
دانشکده عمران

پایان نامه کارشناسی ارشد گرایش خاک و پی

موضوع پایان نامه :

اثر اسیدسولفوریک بر پارامترهای مقاومتی خاک

استاد راهنما: جناب آقای دکتر قاسم زاده

تهیه کننده: محمد صنایع پسند

شماره دانشجویی: 8704304

تابستان 90

تأیید پایان نامه کارشناسی ارشد توسط دانشجو

موضوع پایان نامه: اثر اسید سولفوریک بر پارامترهای مقاومتی خاک

استاد راهنما: دکتر حسن قاسم زاده

نام دانشجو: محمد صنایع پسند

شماره دانشجویی: 8704304

اینجانب محمد صنایع پسند دانشجوی دوره کارشناسی ارشد مهندسی عمران، گرایش مکانیک خاک و پی دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی گواهی می‌نمایم که تحقیقات ارائه شده در پایان نامه فوق الذکر توسط شخص اینجانب انجام شده و صحت و اصالت مطالب نگارش شده مورد تأیید می‌باشد، و در موارد استفاده از کار دیگر محققان به مرجع مورد استفاده اشاره شده است. بعلاوه گواهی می‌نمایم که کتالاب مندرج در پایان نامه تاکنون برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی توسط اینجانب یا فرد دیگری در هیچ جا ارائه نشده است و در تدوین متن پایان نامه فرمت مصوب دانشکده مهندسی عمران را به طور کامل رعایت کرده‌ام.

امضاء دانشجو

تاریخ

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

تقدیم به پدر و مادر عزیز و همسر مهربانم تقدیم به پدر و مادر عزیز و همسر مهربانم

مراتب سپاس و قدردانی خود را از استاد ارجمند جناب آقای دکتر حسن قاسم زاده که
در مراحل مختلف انجام پایان نامه از بذل هیچ گونه کمک و راهنمایی دریغ نکردند، ابراز
می دارم.

چکیده:

از مواردی که در صنعت مسئله عبور اسید از خاک مطرح است می‌توان به نشت اسید از مخازن و عبور اسید از سازه‌های فروشویی در فرآیند هیدرومتالوژی نام برد. با توجه به اینکه روش هیدرومتالوژی امروزه پرطرفدارترین روش برای استخراج فلزات گران بها مانند اورانیوم، طلا، نقره، مس، آلومینیوم، روی و ... از کانسنگ‌های کم عیار است، نیاز به بررسی دقیق اثرات عبور اسید بر خاک بیش از گذشته احساس می‌گردد. عبور اسید از خاک علاوه بر اثرات زیست محیطی به مرور زمان باعث ایجاد تغییراتی در پارامترهای خاک می‌گردد. برای مثال عبور اسید بر تخلخل خاک اثرگذار بوده و باعث ایجاد تغییر در نفوذپذیری آن می‌شود. همچنین اسید با عبور خود زاویه اصطکاک داخلی و شاخص دوام خاک را به میزان قابل توجهی کاهش داده و نشست خاک را افزایش می‌دهد. در این پایان‌نامه برای بررسی اثرات عبور اسید از خاک ابتدا با ساختن دستگاهی در آزمایشگاه عبور اسید از خاک شبیه‌سازی شده، سپس با انجام آزمایش‌های نفوذپذیری، برش مستقیم و دوام بر روی نمونه‌هایی از خاک که در آن‌ها اسید در مدت زمان‌های مختلف عبور کرده بود، رابطه تغییرات نفوذپذیری و پارامترهای مقاومتی خاک با مدت زمان عبور اسید به دست آورده شد.

سپس با توجه به اینکه از کاربردهای مهم عبور اسید از خاک در سازه‌های فروشویی ساخته شده در فرآیندهای هیدرومتالوژی است، با مدل‌سازی یک سازه فروشویی در نرم‌افزار نحوه و میزان تغییرات تراوش اسید، نشست و پایداری سازه مورد نظر با لحاظ کردن اثرات عبور اسید که در آزمایشگاه به دست آمده بودند بررسی شده و با جواب‌های شرایط عدم تأثیر عبور اسید مقایسه شده‌اند.

واژه‌های کلیدی: پارامترهای مقاومتی خاک، کلوگینگ (گرفتگی)، اسید سولفوریک، تراوش، نشست،

پایداری شیروانی، سازه فروشویی

فهرست

1	مقدمه
1	کلیات تحقیق
1	زمینه تحقیق
2	هدف تحقیق
2	ساختار پایان نامه
4	محدوده تحقیق
5	فصل اول
5	مروری بر ادبیات موضوع
6	1-1- روش هیدرومتالوژی
8	1-1-1- طراحی سازه فروشویی
8	1-1-1-1- مشخصات فیزیکی کانسنگ سازه فروشویی
10	1-1-1-2- مشخصات مینرالوژی و شیمیایی کانسنگ سازه فروشویی
11	1-1-1-3- تعیین نوع اسید، غلظت، PH، مدت زمان و شدت پاشش آن بر سازه فروشویی
14	1-1-1-4- طراحی لایه نفوذناپذیر زیرین سازه فروشویی
19	1-1-1-5- بررسی چگونگی نشت اسید از سازه های فروشویی و خطرات زیست محیطی آن
20	1-1-1-6- طراحی زهکش کافی برای عبور اسید در سازه های فروشویی
24	1-1-1-7- چگونگی ریختن لایه های کانسنگ و نحوه پاشش اسید بر روی آنها
25	1-2- بررسی ایجاد گرفتگی در اثر عبور اسید از خاک
28	1-2-1- انواع گرفتگی
32	1-2-2- گرفتگی در روزنه و شیار لوله ها
33	1-2-3- روش های جلوگیری از انواع گرفتگی
33	1-2-4- آزمایش هایی که تا کنون برای بررسی انواع گرفتگی انجام گشته اند
37	1-2-4-1- آزمایش های نفوذپذیری با آب
39	1-2-4-2- آزمایش های نفوذپذیری با محلول
41	1-2-4-3- تأثیر عبور محلول بر عناصر موجود در خاک
43	1-3- بررسی نشست خاک در اثر عبور اسید
45	1-4- نحوه رفتار خاک های غیراشباع و روابط حاکم بر آنها
45	1-4-1- پدیده مکش
49	1-4-2- نفوذپذیری در خاک غیراشباع
51	1-4-3- جریان آب در خاک غیراشباع

52	1-4-4-مقاومت برشی در خاک غیراشباع.....
53	1-5-بررسی تراوش اسید در خاک.....
54	1-6-بررسی تغییرات پارامترهای مقاومتی خاک با گذر زمان در اثر عبور اسید
57	1-7-نکات مهم در بررسی پایداری سازه‌های خاکی.....
57	1-7-1-عوامل ناپایداری شیروانی‌ها.....
60	1-7-2-روش‌های مختلف محاسبه‌ی پایداری شیروانی خاکی.....
62	1-7-3-بررسی پایداری سازه فروشویی.....
68	فصل دوم.....
68	بررسی اثرات اسید بر خاک در آزمایشگاه.....
69	2-1-نمونه خاک و اسید بکار رفته در آزمایش‌ها.....
71	2-2-معرفی دستگاه ساخته شده برای بررسی عبور اسید از خاک.....
72	2-2-1-معرفی آزمایش‌های فروشویی ستونی و نحوه انجام آن‌ها.....
72	2-2-2-شرح دستگاه و نحوه انجام آزمایش‌ها.....
74	2-3-بررسی تشکیل گرفتگی در اثر عبور اسید از خاک.....
76	2-3-1-روش پیش‌بینی شده برای انجام آزمایش گرفتگی در آزمایشگاه.....
77	2-3-2-شرح سری اول آزمایش‌های گرفتگی انجام شده در آزمایشگاه.....
78	2-3-3-بررسی افزایش سرعت عبور اسید بر تشکیل گرفتگی.....
79	2-3-4-بررسی عوامل مؤثر در تشکیل گرفتگی شیمیایی.....
79	2-3-4-1-بررسی نقش عنصر کلسیم در تشکیل گرفتگی شیمیایی.....
80	2-3-4-2-بررسی اثر زمان ماند اسید بر تشکیل گرفتگی شیمیایی.....
83	2-3-4-3-بررسی اثر هوا بر تشکیل گرفتگی شیمیایی.....
84	2-3-4-4-بررسی اثرات دما و گذر زمان بر تشکیل گرفتگی شیمیایی.....
87	2-3-5-تعیین ضرایب گرفتگی برای نمونه خاک مورد نظر.....
87	2-4-بررسی تغییرات پارامترهای مقاومتی خاک در اثر عبور اسید با گذر زمان.....
	2-4-1-بررسی تغییرات پارامترهای مقاومتی خاک سازه فروشویی شماره 2 معدن مس سرچشمه در اثر عبور اسید با گذر زمان.....
88	2-4-2-بررسی تغییرات پارامترهای مقاومتی خاک سازه فروشویی مجتمع مس میدوک در اثر عبور اسید با گذر زمان.....
93	2-5-بررسی تغییرات میزان جذب فلز توسط اسید با گذر زمان در شرایط مختلف.....
103	2-6-نتایج جانبی به‌دست آمده از آزمایش‌های فروشویی ستونی.....
103	2-6-1-بررسی سرعت حرکت اسید در استوانه‌های فروشویی.....
105	2-6-2-بررسی افزایش نشست خاک با عبور اسید.....
109	2-7-بررسی شاخص دوام نمونه‌های خاک و شن قبل و بعد از عبور اسید از آن‌ها.....
111	2-8-طراحی لایه نفوذ ناپذیر زیرین سازه فروشویی.....
113	2-9-نتیجه‌گیری.....

فصل سوم.....	116
بررسی عددی تراوش، نشست و پایداری سازه فروشویی میدوک با لحاظ اثر عبور اسید بر خاک.....	116
3-1- مقدمه‌ای بر مدل‌سازی انجام شده.....	117
3-2- بررسی تراوش اسید در لایه‌های سازه فروشویی و ترسیم مسیر عبوری آن.....	118
3-2-1- معرفی ویژگی‌های نرم افزار مورد استفاده قرار گرفته برای آنالیز تراوش.....	118
3-2-2- نحوه مدل‌سازی سازه فروشویی در نرم افزار SEEP/W.....	120
3-2-3- نتایج آنالیز تراوش سازه فروشویی مجتمع مس میدوک.....	127
3-2-4- نتایج آنالیز حساسیت پارامترهای تأثیر گذار بر آنالیز تراوش با نرم افزار SEEP/W.....	128
3-2-4-1- بررسی میزان تأثیر وجود یا عدم وجود گرفتگی، توابع محتوای آب و هدایت هیدرولیکی برای لایه‌های خاک و شن زهکش.....	128
3-2-4-2- تغییر سرعت پاشش اسید بر روی لایه‌های کانسنگ.....	129
3-2-4-3- تغییر حداکثر فشار منفی ایجاد شده توسط اسید.....	130
3-3- بررسی نشست سازه فروشویی در اثر وزن لایه‌های بالایی با گذر زمان در شرایط نیمه اشباع بودن لایه‌های کانسنگ در اثر عبور اسید از آن‌ها.....	131
3-3-1- معرفی ویژگی‌های نرم افزار مورد استفاده قرار گرفته برای آنالیز نشست.....	131
3-3-2- نحوه مدل‌سازی سازه فروشویی در نرم افزار SIGMA/W.....	133
3-3-3- نتایج آنالیز نشست سازه فروشویی مجتمع مس میدوک.....	134
3-3-4- بررسی صحت آنالیزهای نشست انجام شده.....	137
3-3-5- نتایج آنالیز حساسیت پارامترهای تأثیر گذار بر تراوش بر مقدار نشست محاسبه شده در نرم افزار SIGMA/W در آنالیز SEEP/W-SIGMA/W-CONSOLIDATION.....	138
3-3-5-1- آنالیز حساسیت در اثر تغییر روش به‌دست آوردن توابع محتوای آب و هدایت هیدرولیکی برای لایه‌های خاک و شن زهکش.....	138
3-3-5-2- تغییر سرعت پاشش اسید بر روی لایه‌های کانسنگ.....	138
3-3-5-3- تغییر دانه‌بندی لایه شن زهکش.....	140
3-3-5-4- تغییر حداکثر فشار منفی ایجاد شده توسط اسید.....	141
3-3-6- نتایج آنالیز حساسیت پارامترهای تأثیر گذار بر آنالیز نشست سازه فروشویی با نرم‌افزار SIGMA/W.....	141
3-3-6-1- بررسی آنالیز حساسیت مدول الاستیسیته یانگ بر نشست سازه فروشویی.....	142
3-3-6-2- بررسی آنالیز حساسیت تغییرات وزن مخصوص خاک بر نشست سازه فروشویی.....	145
3-3-6-3- بررسی آنالیز حساسیت تغییرات ضریب پواسون بر نشست سازه فروشویی.....	146
3-3-6-4- بررسی آنالیز حساسیت تغییرات زاویه اصطکاک داخلی بر نشست سازه فروشویی.....	148
3-3-6-5- بررسی آنالیز حساسیت تغییرات چسبندگی بر نشست سازه فروشویی.....	151
3-3-6-6- بررسی آنالیز حساسیت تغییرات زاویه اصطکاک مرتبط با مکش بر نشست سازه فروشویی.....	153
3-3-6-7- بررسی آنالیز حساسیت تغییرات زاویه اتساع خاک بر نشست سازه فروشویی.....	156
3-3-6-8- تغییر سرعت پاشش اسید بر روی لایه‌های خاک.....	157

3-4- بررسی پایداری سازه فروشویی در مقابل لغزش با در نظر گرفتن کاهش پارامترهای مقاومتی در اثر عبور اسید.....	158
3-4-1- معرفی ویژگی‌های نرم افزار مورد استفاده قرار گرفته برای آنالیز پایداری.....	158
3-4-2- نحوه مدل سازی سازه فروشویی در نرم افزار SLOPE/W.....	159
3-4-3- نتایج آنالیز پایداری سازه فروشویی مجتمع مس میدوک.....	162
3-4-4- بررسی صحت آنالیزهای پایداری انجام شده.....	166
3-4-5- مقایسه بین فاکتورهای ایمنی به دست آمده از روش‌های مختلف آنالیز تعادل حدی برای سازه فروشویی در شرایط استاتیکی و دینامیکی.....	168
3-4-6- آنالیز حساسیت پارامترهای تأثیر گذار بر مدل سازی با نرم افزار SLOPE/W در آنالیز پایداری در برابر لغزش سازه فروشویی.....	173
3-4-6-1- آنالیز حساسیت تغییرات وزن مخصوص لایه‌های کانسنگ بر فاکتور ایمنی سازه فروشویی در برابر لغزش.....	174
3-4-6-2- آنالیز حساسیت تغییرات زاویه اصطکاک داخلی لایه‌های خاک بر فاکتور ایمنی سازه فروشویی در برابر لغزش.....	175
3-4-6-3- آنالیز حساسیت تغییرات چسبندگی لایه‌های خاک بر فاکتور ایمنی سازه فروشویی در برابر لغزش.....	175
3-4-6-4- آنالیز حساسیت تغییرات زاویه اصطکاک مرتبط با مکش لایه‌های خاک بر فاکتور ایمنی سازه فروشویی در برابر لغزش.....	176
3-4-6-5- آنالیز حساسیت تغییرات سطح تراز اسید در سازه فروشویی بر فاکتور ایمنی آن در برابر لغزش.....	177
3-4-6-6- آنالیز حساسیت تغییرات زاویه اصطکاک بین لایه‌های نفوذناپذیر سازه فروشویی بر فاکتور ایمنی آن در برابر لغزش.....	178
3-4-6-7- آنالیز حساسیت تغییرات ضرایب افقی و قائم زلزله بر فاکتور ایمنی سازه فروشویی در برابر لغزش.....	178
3-5- بررسی چگونگی نشت اسید از سازه‌های فروشویی و خطرات زیست محیطی ناشی از آن.....	179
3-6- نتیجه‌گیری.....	181
فصل چهارم.....	185
نتیجه‌گیری و پیشنهاد برای کارهای آتی.....	185
4-1- مقدمه.....	186
4-2- نتایج آزمایشگاهی.....	186
4-3- نتایج عددی.....	188
4-4- پیشنهاد برای کارهای آتی.....	189
فهرست مراجع.....	191

فهرست اشکال، جداول و نمودارها

فهرست اشکال

- شکل 1_ سازه فروشویی در روش هیدرومتالوژی 8
- شکل 2_ نحوه پاشش یکنواخت اسید بر روی سازه فروشویی 12
- شکل 3_ اجرای لایه نفوذناپذیر بر روی بستر سازه فروشویی 14
- شکل 4_ لایه GCL به عنوان یکی از لایه‌های نفوذناپذیر در بستر سازه فروشویی 17
- شکل 5_ پی سازه فروشویی مجتمع مس میدوک 18
- شکل 6_ نحوه اجرای لایه فونداسیون سازه فروشویی مجتمع مس میدوک 19
- شکل 7_ نحوه پاشش اسید بر روی بخش‌های لایه فوقانی سازه فروشویی [26] 25
- شکل 8_ انواع گرفتگی در اثر نیروهای فیزیوشیمیایی بین ذرات محلول و دانه‌های فیلتر [40] 32
- شکل 9_ سلول نفوذپذیری در استاندارد ASTM D1987 [44] 36
- شکل 10_ گوه گسیختگی و لایه‌های سازه فروشویی در نظر گرفته شده توسط بریتن باخ (حالت طراحی) [16] 66
- شکل 11_ گوه گسیختگی و لایه‌های سازه فروشویی در نظر گرفته شده توسط بریتن باخ (حالت عملیات) [16] 66
- شکل 12_ دستگاه فروشویی ستونی 73
- شکل 13_ نقشه شماتیک دستگاه فروشویی ستونی 74
- شکل 14_ گرفتگی شیمیایی در لوله‌های شیاردار لایه زهکش سازه فروشویی 75
- شکل 15_ گرفتگی در محیط اطراف سازه فروشویی 75
- شکل 16_ تأثیر زیاد گرفتگی بر روی سنگ‌های موجود در اطراف سازه فروشویی در اثر نشت اسید 75
- شکل 17_ انجام آزمایش تشکیل گرفتگی در اثر وجود اسید ثابت الف (شروع آزمایش ب) گرفتگی تشکیل شده پس از 4 ماه (ج) پاشش اسید بر روی گرفتگی تشکیل شده 82
- شکل 18_ تشکیل گرفتگی در مناطق اطراف سازه فروشویی که همواره در معرض حرکت کند اسید بوده اند 83
- شکل 19_ نحوه ورود هوا به داخل سلول نفوذپذیری 84
- شکل 20_ گرفتگی شیمیایی تشکیل شده در مجاورت ورودی هوا 84
- شکل 21_ انجام آزمایش کمکی برای درک بهتر گرفتگی الف (قبل از شروع آزمایش ب) هفت روز پس از شروع آزمایش ج) پس از پاشش اسید بر روی گرفتگی تشکیل شده 86
- شکل 22_ لایه نفوذناپذیر سازه فروشویی مجتمع مس میدوک 112
- شکل 23_ شبکه بندی بزرگ‌ترین مقطع طولی سازه فروشویی میدوک در نرم افزار SEEP/W 119
- شکل 24_ میزان و جهت جریان اسید در سازه فروشویی در شرایطی که تمام 18 لایه خاک اجرا شده اند، جهت جریان با بردار نشان داده شده و میزان آن با تغییر اندازه بردارها نمایش داده شده است 128
- شکل 25_ سرعت جریان اسید در شرایطی که تمام 18 لایه اجرا شده اند، دراین شکل با زیاد شدن سرعت رنگ لایه‌های سازه فروشویی کمرنگ می‌شود 128
- شکل 26_ سطوح لایه زهکش که در آن‌ها دبی اندازه گرفته شده است 129
- شکل 27_ نمونه‌ای از شبکه بندی و شبیه سازی سازه فروشویی در نرم افزار SIGMA/W 133
- شکل 28_ جابه جایی قائم سازه فروشویی پس از نشست تحت آنالیز به روش Sigma/seep elastoplastic 135
- شکل 29_ نمایش تغییر شکل یافته سازه فروشویی پس از نشست تحت آنالیز به روش Sigma/seep elastoplastic 135

- شکل 30_ مقطع طولی شبیه‌سازی شده از سازه فروشویی در نرم افزار SLOPE/W 160
- شکل 31_ سطح لغزش بحرانی سازه فروشویی و فاکتور ایمنی آن در حالت درنظر گرفتن پارامترهای متغیر برای لایه‌های خاک در آنالیز استاتیکی به روش‌های تعادل حدی بیشاپ، جانبو و مورگنسترن پرایس در شرایط وزن مخصوص اولیه $17/5 \text{ KN/m}^3$ برای خاک. محدوده اجرای برم‌ها با خطوط برجسته نشان داده شده اند. 163
- شکل 32_ سطح لغزش بحرانی و فاکتور ایمنی سازه فروشویی پس از اجرای برم‌ها در آنالیز استاتیکی به روش‌های تعادل حدی بیشاپ، جانبو و مورگنسترن پرایس با درنظر گرفتن پارامترهای متغیر برای لایه‌های خاک و وزن مخصوص اولیه $17/5 \text{ KN/m}^3$ برای خاک 166
- شکل 33_ سطح لغزش بحرانی و فاکتور ایمنی سازه فروشویی پس از اجرای برم‌ها در آنالیز دینامیکی به روش‌های تعادل حدی بیشاپ، جانبو و مورگنسترن پرایس با درنظر گرفتن پارامترهای متغیر برای لایه‌های خاک و وزن مخصوص اولیه $17/5 \text{ KN/m}^3$ برای خاک 166
- شکل 33_ نیروهای وارد بر گوه گسیختگی جهت انجام آنالیز پایداری 167
- شکل 34_ نیروهای وارد بر یک ورقه فرضی در توده لغزش [68] 169
- شکل 35_ نتایج آنالیز نحوه نشت و انتشار مایع از قسمت معیوب لایه لاینر و بزرگ نمایی شده این قسمت، با استفاده از آنالیز تراوش اسید در سازه فروشویی با نرم افزار SEEP/W [73] 180

فهرست جداول

جدول 1_ موارد مهم بیان شده در فصل اول.....	3
جدول 2_ آزمایش‌های انجام شده در فصل دوم به همراه هدف انجام هر آزمایش.....	3
جدول 3_ آنالیزهای انجام شده در فصل سوم به همراه هدف انجام هرآنالیز.....	4
جدول 4_ غلظت مس و آهن در ارتفاع‌های مختلف سلول قبل و بعد از آزمایش فروشویی [10].....	13
جدول 5_ زاویه اصطکاک بین خاک‌های مختلف با انواع ژئوممبرین [14].....	15
جدول 6_ مشخصات لایه‌های پی سازه فروشویی مجتمع مس میدوک.....	18
جدول 7_ ضریب مانینگ برای لوله‌های پلی‌اتیلنی با قطرهای متفاوت [1].....	24
جدول 8_ تخمین ضرایب کاهش گرفتگی در حالت استفاده از ژئونت به عنوان زهکش [28].....	28
جدول 9_ محدوده تغییرات ضرایب کاهش ناشی از گرفتگی‌های شیمیایی و بیولوژیکی [38].....	31
جدول 10_ تأثیر غلظت کلسیم و بیکربونات بر تشکیل گرفتگی شیمیایی [36].....	34
جدول 11_ غلظت عناصر مختلف در محلول ورودی و خروجی سلول حاوی شن در مدت زمان‌های مختلف از شروع آزمایش فروشویی [35].....	42
جدول 12_ مشخصات مصالح سازه فروشویی تحت آنالیز پایداری قرار گرفته [16].....	64
جدول 13_ پارامترهای مقاومتی برای قسمت‌های مختلف سازه فروشویی تحت آنالیز پایداری قرار گرفته [16].....	65
جدول 14_ نتایج آزمایش XRF بر روی نمونه خاک استفاده شده در آزمایشگاه.....	70
جدول 15_ نتایج آزمایش XRD بر روی نمونه خاک استفاده شده در آزمایشگاه.....	70
جدول 16_ نتایج آزمایش ICP بر روی نمونه خاک استفاده شده در آزمایش.....	70
جدول 17_ نتایج آزمایش XRF بر روی نمونه شن استفاده شده در آزمایشگاه.....	71
جدول 18_ نتایج آزمایش XRD بر روی نمونه شن استفاده شده در آزمایشگاه.....	71
جدول 19_ مشخصات آزمایش‌های فروشویی انجام شده.....	74
جدول 20_ نتایج کاهش نفوذپذیری سلول حاوی شن در اثر افزودن آهک.....	80
جدول 21_ نتایج آزمایش XRD بر روی گرفتگی‌های شیمیایی پس از اضافه کردن کربنات کلسیم.....	80
جدول 22_ نتایج آزمایش XRD بر روی گرفتگی‌های شیمیایی قابل حل در اسید.....	85
جدول 23_ نتایج آزمایش XRD بر روی گرفتگی‌های شیمیایی غیرقابل حل در اسید.....	85
جدول 24_ پارامترهای مقاومتی کاهش یافته خاک لایه‌های مختلف سازه فروشویی شماره 2 مجتمع مس سرچشمه در اثر عبور اسید.....	88
جدول 25_ نتایج آزمایش‌های برش مستقیم انجام شده بر روی نمونه‌های خاک اسید خورده میدوک.....	90
جدول 26_ مشخصات خاک پرکننده استوانه‌ها.....	106
جدول 27_ طبقه‌بندی گمبل برای دوام سنگ‌ها [63].....	110
جدول 28_ نتایج آزمایش‌های دوام بر روی نمونه‌های استفاده شده در آزمایشگاه در شرایط مختلف.....	110
جدول 29_ پارامترهای مقاومتی لایه لاینر HDPE استفاده شده به عنوان لایه نفوذناپذیر در سازه فروشویی میدوک.....	111
جدول 30_ پارامترهای مقاومتی بین لاینر، GCL و ذرات خاک مجاور آن‌ها.....	112
جدول 31_ مشخصات سازه فروشویی مس میدوک.....	118

جدول 32_مقادیر محتوای آب و نفوذپذیری در شرایط اشباع لایه‌های سازه فروشویی میدوک.....	124
جدول 33_نتایج حاصل از تکنیک شبکه‌های عصبی و به کار گیری مدل ون جان اشتاین برای تخمین منحنی محتوای رطوبت خاک سازه فروشویی سرچشمه [65].....	124
جدول 34_نتایج بررسی دبی در نقاط مختلف سازه فروشویی در آنالیزهای با توابع محتوای رطوبت و هدایت هیدرولیکی مختلف.....	129
جدول 35_نتایج بررسی دبی در نقاط مختلف سازه فروشویی در آنالیزهای با سرعت‌های پاشش اسید مختلف.....	130
جدول 36_نتایج بررسی تغییرات دبی در نقاط مختلف سازه فروشویی با تغییر مکش حداکثر.....	131
جدول 37_پارامترهای مورد نیاز برای تعریف کردن لایه‌های خاک در نرم افزار SIGMA/W.....	134
جدول 38_مقایسه بین نشست‌های به‌دست آمده از روش‌های مختلف آنالیز.....	135
جدول 39_مقایسه بین نشست‌های به‌دست آمده، به دلیل استفاده از روش‌های مختلف محاسبه توابع محتوای آب و هدایت هیدرولیکی، در آنالیز پایه SEEP/W-SIGMA/W-CONSOLIDATION.....	138
جدول 40_مقایسه بین نشست‌های به‌دست آمده در اثر تغییر دبی پاشش اسید بر روی سازه فروشویی در آنالیز پایه SEEP/W-SIGMA/W-CONSOLIDATION.....	139
جدول 41_مقایسه بین نشست‌های مناطق مختلف سازه فروشویی در اثر تغییر دانه‌بندی مصالح لایه زهکش در آنالیز SEEP/W-SIGMA/W-CONSOLIDATION.....	140
جدول 42_مقایسه بین نشست‌های به‌دست آمده در اثر تغییر حداکثر فشار منفی در آنالیز SEEP/W-SIGMA/W-CONSOLIDATION.....	141
جدول 43_مقایسه بین نشست‌های به‌دست آمده در اثر تغییر مدول الاستیسیته یانگ (E) لایه‌های خاک در آنالیز SEEP/W-SIGMA/W-CONSOLIDATION.....	142
جدول 44_مقایسه بین نشست‌های به‌دست آمده در اثر تغییر مدول الاستیسیته یانگ (E) لایه‌های خاک در آنالیز LOAD_DEFORMATION.....	143
جدول 45_مقایسه بین نشست‌های به‌دست آمده در اثر تغییر مدول الاستیسیته یانگ (E) در لایه شن زهکش در آنالیز SEEP/W-SIGMA/W-CONSOLIDATION.....	143
جدول 46_مقایسه بین نشست‌های به‌دست آمده در اثر تغییر مدول الاستیسیته یانگ (E) در لایه شن زهکش در آنالیز LOAD_DEFORMATION.....	144
جدول 47_مقایسه بین نشست‌های به‌دست آمده در اثر تغییر وزن مخصوص لایه‌های خاک ($B.L$) در آنالیز SEEP/W-SIGMA/W-CONSOLIDATION.....	145
جدول 48_مقایسه بین نشست‌های به‌دست آمده در اثر تغییر وزن مخصوص لایه‌های خاک ($B.L$) در آنالیز LOAD_DEFORMATION.....	145
جدول 49_مقایسه بین نشست‌های به‌دست آمده در اثر تغییر ضریب پواسون لایه‌های خاک (ν) در آنالیز SEEP/W-SIGMA/W-CONSOLIDATION.....	146
جدول 50_مقایسه بین نشست‌های به‌دست آمده در اثر تغییر ضریب پواسون لایه‌های خاک (ν) در آنالیز LOAD_DEFORMATION.....	147

جدول 51_مقایسه بین نشست‌های به‌دست آمده در اثر تغییر ضریب پواسون لایه شنی (ν) در آنالیز SEEP/W-SIGMA/W-CONSOLIDATION	147
جدول 52_مقایسه بین نشست‌های به‌دست آمده در اثر تغییر ضریب پواسون لایه شنی (ν) در آنالیز LOAD_DEFORMATION	148
جدول 53_مقایسه بین نشست‌های به‌دست آمده در اثر تغییر زاویه اصطکاک داخلی لایه‌های خاک در آنالیز SEEP/W-SIGMA/W-CONSOLIDATION	149
جدول 54_مقایسه بین نشست‌های به‌دست آمده در اثر تغییر زاویه اصطکاک داخلی لایه‌های خاک در آنالیز LOAD_DEFORMATION	149
جدول 55_مقایسه بین نشست‌های به‌دست آمده در اثر تغییر زاویه اصطکاک داخلی لایه نفوذناپذیر در آنالیز SEEP/W-SIGMA/W-CONSOLIDATION	150
جدول 56_مقایسه بین نشست‌های به‌دست آمده در اثر تغییر زاویه اصطکاک داخلی ترکیب لایه نفوذناپذیر در آنالیز LOAD_DEFORMATION	150
جدول 57_مقایسه بین نشست‌های به‌دست آمده در اثر تغییر چسبندگی لایه‌های کانسنگ در آنالیز SEEP/W-SIGMA/W-CONSOLIDATION	152
جدول 58_مقایسه بین نشست‌های به‌دست آمده در اثر تغییر چسبندگی لایه‌های کانسنگ در آنالیز LOAD_DEFORMATION	152
جدول 59_مقایسه بین نشست‌های به‌دست آمده در اثر تغییر زاویه اصطکاک داخلی مرتبط با مکش لایه‌های خاک در آنالیز SEEP/W-SIGMA/W-CONSOLIDATION	153
جدول 60_مقایسه بین نشست‌های به‌دست آمده در اثر تغییر زاویه اصطکاک داخلی مرتبط با مکش لایه‌های خاک در آنالیز LOAD_DEFORMATION	154
جدول 61_مقایسه بین نشست‌های به‌دست آمده در اثر تغییر زاویه اصطکاک داخلی لایه نفوذناپذیر در آنالیز SEEP/W-SIGMA/W-CONSOLIDATION	154
جدول 62_مقایسه بین نشست‌های به‌دست آمده در اثر تغییر زاویه اصطکاک داخلی لایه نفوذناپذیر در آنالیز LOAD_DEFORMATION	155
جدول 63_مقایسه بین نشست‌های به‌دست آمده در اثر تغییر زاویه اتساع لایه‌های خاک در آنالیز SEEP/W-SIGMA/W-CONSOLIDATION	156
جدول 64_مقایسه بین نشست‌های به‌دست آمده در اثر تغییر زاویه اتساع لایه‌های کانسنگ در آنالیز LOAD_DEFORMATION	157
جدول 65_مقایسه بین نشست‌های به‌دست آمده در اثر تغییر دبی پاشش اسید بر روی سازه فروشویی در آنالیز LOAD_DEFORMATION	158
جدول 66_پارامترهای مورد نیاز برای مدل‌سازی لایه‌های سازه فروشویی و میزان تغییر پارامترهای مقاومتی هر لایه در اثر افزایش وزن مخصوص و مدت زمان عبور اسید از آن، در حالتی که وزن مخصوص کانسنگ در شرایط طبیعی $14/5 \text{ KN/m}^3$ باشد.	161

جدول 67_ پارامترهای مورد نیاز برای مدل سازی لایه های سازه فروشویی و میزان تغییر پارامترهای مقاومتی هر لایه در اثر افزایش وزن مخصوص و مدت زمان عبور اسید از آن، در حالتی که وزن مخصوص کانسنگ در شرایط طبیعی $17/5 \text{ KN/m}^3$ باشد. 162

جدول 68_ فاکتور ایمنی سازه فروشویی با در نظر گرفتن پارامترهای ثابت و متغیر برای لایه های خاک، در آنالیزهای استاتیکی و دینامیکی به روش های تعادل حدی بیشاپ، جانبو و مورگنسترن پرایس 164

جدول 69_ فاکتور ایمنی سازه فروشویی پس از اجرای برم ها در شرایط در نظر گرفتن پارامترهای متغیر برای لایه های خاک در آنالیزهای استاتیکی و دینامیکی به روش های تعادل حدی بیشاپ، جانبو و مورگنسترن پرایس با در نظر گرفتن وزن مخصوص اولیه $14/5 \text{ KN/m}^3$ و $17/5 \text{ KN/m}^3$ برای خاک سازه 165

جدول 70_ فاکتورهای ایمنی حاصل از آنالیز پایداری سازه فروشویی با روش های مختلف موجود در نرم افزار SLOPE/W در شرایط استاتیکی 171

جدول 71_ فاکتورهای ایمنی حاصل از آنالیز پایداری سازه فروشویی با روش های مختلف موجود در نرم افزار SLOPE/W در شرایط دینامیکی 172

جدول 72_ مقایسه بین فاکتورهای ایمنی به دست آمده در اثر تغییر وزن مخصوص اولیه خاک در آنالیزهای استاتیکی و دینامیکی به روش های بیشاپ، جانبو و مورگنسترن پرایس با تابع جانبی HALF-SINE 174

جدول 73_ مقایسه بین فاکتورهای ایمنی به دست آمده در اثر تغییر زاویه اصطکاک داخلی اولیه خاک در آنالیزهای استاتیکی و دینامیکی به روش های بیشاپ، جانبو و مورگنسترن پرایس با تابع جانبی HALF-SINE 175

جدول 74_ مقایسه بین فاکتورهای ایمنی به دست آمده در اثر تغییر چسبندگی خاک در آنالیزهای استاتیکی و دینامیکی به روش های بیشاپ، جانبو و مورگنسترن پرایس با تابع جانبی HALF-SINE 176

جدول 75_ مقایسه بین فاکتورهای ایمنی به دست آمده در اثر تغییر زاویه اصطکاک مرتبط با مکش خاک در آنالیزهای استاتیکی و دینامیکی به روش های بیشاپ، جانبو و مورگنسترن پرایس با تابع جانبی HALF-SINE در شرایط زاویه اصطکاک داخلی اولیه 39 درجه برای خاک 177

جدول 76_ مقایسه بین فاکتورهای ایمنی به دست آمده در اثر تغییر سطح تراز اسید سازه فروشویی در آنالیزهای استاتیکی و دینامیکی به روش های بیشاپ، جانبو و مورگنسترن پرایس با تابع جانبی HALF-SINE 177

جدول 77_ مقایسه بین فاکتورهای ایمنی به دست آمده در اثر تغییر زاویه اصطکاک بین لایه های نفوذناپذیر در آنالیزهای استاتیکی و دینامیکی به روش های بیشاپ، جانبو و مورگنسترن پرایس با تابع جانبی HALF-SINE 178

جدول 78_ مقایسه بین فاکتورهای ایمنی به دست آمده در اثر تغییر ضریب افقی زلزله (K_h) در آنالیز دینامیکی به مجموع روش های بیشاپ، جانبو و مورگنسترن پرایس با تابع جانبی HALF-SINE 179

جدول 79_ مقایسه بین فاکتورهای ایمنی به دست آمده در اثر تغییر ضریب قائم زلزله (K_v) در آنالیز دینامیکی به مجموع روش های بیشاپ، جانبو و مورگنسترن پرایس با تابع جانبی HALF-SINE 179

فهرست نمودارها

- نمودار 1_ اثر ابعاد دانه‌های کانسنگ اکسیدی مس سرچشمه بر نرخ استحصال مس [9]..... 10
- نمودار 2_ اثر تغییرات PH اسید بر روی میزان استحصال مس از کانسنگ اکسیدی [9]..... 14
- نمودار 3_ تغییرات زاویه اصطکاک بین لاینر و خاک مجاور آن در اثر گذر زمان [16]..... 16
- نمودار 4_ مقایسه شدت گرفتگی‌های تشکیل شده با گذر زمان در دو حالت جریان‌های آرام و آشفته [29]، در این نمودار E_1 معرف جریان آرام و E_2 معرف جریان آشفته می‌باشد..... 26
- نمودار 5_ درصد عناصر تشکیل دهنده گرفتگی شیمیایی قبل و بعد از افزودن اسید فرمیک [46]..... 35
- نمودار 6_ اثرات تغییر سرعت عبور اسید بر تشکیل گرفتگی [47]..... 36
- نمودار 7_ تغییرات نفوذپذیری آب در شن در گرادیان هیدرولیکی 2 درصد با گذر زمان [35]..... 38
- نمودار 8_ تغییرات نفوذپذیری آب در ماسه خوب دانه‌بندی شده در گرادیان هیدرولیکی 2 درصد با گذر زمان [35]..... 38
- نمودار 9_ تغییرات نفوذپذیری آب در ماسه بد دانه‌بندی شده در گرادیان هیدرولیکی 2 درصد با گذر زمان [35]..... 38
- نمودار 10_ تغییرات نفوذپذیری محلول در شن در گرادیان هیدرولیکی 2/3 درصد با گذر زمان [35]..... 40
- نمودار 11_ تغییرات نفوذپذیری محلول در ماسه بد دانه‌بندی شده در گرادیان هیدرولیکی 1 درصد با گذر زمان [35]..... 40
- نمودار 12_ تغییرات نفوذپذیری محلول در ماسه بد دانه‌بندی شده در گرادیان هیدرولیکی 2/17 درصد با گذر زمان [35]..... 40
- نمودار 13_ تغییرات نفوذپذیری محلول در ماسه خوب دانه‌بندی شده در گرادیان هیدرولیکی 1 درصد با گذر زمان [35]..... 40
- نمودار 14_ تغییرات نفوذپذیری محلول در ماسه خوب دانه‌بندی شده در گرادیان هیدرولیکی 2 درصد با گذر زمان [35]..... 41
- نمودار 15_ منحنی دانه‌بندی کانسنگ استفاده شده توسط بوفارد [7]..... 44
- نمودار 16_ رابطه بین افزایش ارتفاع سازه فروشویی و افزایش چگالی حجمی کانسنگ [7]..... 44
- نمودار 17_ تغییرات نفوذپذیری آب با درجه اشباع در حالت‌های خشک شدن و مرطوب شدن [52]..... 49
- نمودار 18_ تغییرات نفوذپذیری آب با مکش در حالت‌های خشک شدن و مرطوب شدن [52]..... 50
- نمودار 19_ تغییرات مقاومت برشی در اثر مکش تحت مقادیر مختلف تنش عمودی [51]..... 53
- نمودار 20_ اثر دانه بندی، تراکم و چگالی در پارامترهای مقاومتی کانسنگ [54]..... 55
- نمودار 21_ اثرات افزایش ارتفاع سازه فروشویی در تغییرات چگالی کانسنگ [16]..... 56
- نمودار 22_ رابطه بین تنش‌های محدود کننده قائم و زاویه اصطکاک داخلی در سازه فروشویی [55]..... 57
- نمودار 23_ ضرایب اطمینان سازه بر حسب ارتفاع آن در شرایط بررسی گوه‌های گسیختگی استاتیکی در حالات طراحی، مدت زمان طولانی پس از ساخت و عملیات [16]..... 66
- نمودار 24_ منحنی دانه‌بندی خاک استفاده شده در آزمایش..... 69
- نمودار 25_ منحنی دانه‌بندی شن استفاده شده در آزمایش‌های گرفتگی..... 71
- نمودار 26_ نتایج نفوذپذیری با بار ثابت بر روی سلول‌های شن که تحت عبور اسید با سرعت اولیه در بازه‌های زمانی مختلف قرار گرفته بودند..... 77
- نمودار 27_ تغییرات نفوذپذیری شن در اثر افزودن آهک..... 80
- نمودار 28_ نمودار زاویه اصطکاک داخلی خاک با افزایش مدت زمان عبور اسید در نمونه‌های سازه فروشویی مس سرچشمه..... 89
- نمودار 29_ زاویه اصطکاک داخلی خاک که در زمان معادل یک ماه، اسید با سرعت‌های عبور متفاوت از آن عبور کرده است..... 91

نمودار 30_ تغییرات زاویه اصطکاک داخلی خاک در اثر عبور اسید از آن با گذر زمان 92

نمودار 31_ نتایج آزمایش‌های جذب اتمی انجام شده در آزمایش فروشویی با زمان گذشت معادل 8 ماه و سرعت عبور اسید 20 برابر سرعت اولیه در دوره‌های مختلف عبور اسید. دور اول عبور اسید 1 روز، دور دوم 72 روز و دور سوم 206 روز پس از آغاز آزمایش، شروع شدند. 94

نمودار 32_ نتایج آزمایش‌های جذب اتمی انجام شده در آزمایش فروشویی با زمان گذشت 5 ماه و سرعت عبور اسید اولیه در دوره‌های مختلف عبور اسید. دور اول عبور اسید 1 روز، دور دوم 15 روز، دور سوم 39 روز و دور چهارم 90 روز پس از آغاز آزمایش، شروع شدند. 94

نمودار 33_ مقدار فلز مس موجود در اولین محلول خارج شده از استوانه‌های فروشویی که با سرعت‌های پاشش متفاوت تحت عبور اسید قرار گرفته بودند. طول استوانه با سرعت 20 برابر سمت راست یک سوم بقیه استوانه‌ها است. 96

نمودار 34_ مقدار فلز مس موجود در محلول خارج شده از استوانه‌های فروشویی یک روز پس از شروع آزمایش‌ها با سرعت‌های پاشش متفاوت. طول استوانه با سرعت 20 برابر سمت راست یک سوم بقیه استوانه‌ها است. 96

نمودار 35_ نتایج آزمایش‌های جذب اتمی انجام شده در آزمایش فروشویی با زمان معادل 1 ماه و سرعت عبور اسید 20 برابر سرعت اولیه، در دوره‌های مختلف عبور اسید. دور اول عبور اسید 1 روز، دور دوم 4 روز و دور سوم 7 روز پس از آغاز آزمایش فروشویی شروع شدند. 98

نمودار 36_ نتایج آزمایش‌های جذب اتمی انجام شده در آزمایش فروشویی با زمان معادل 1 ماه و سرعت عبور اسید 15 برابر سرعت عبور آن از سازه فروشویی، در زمان‌های گذشت مختلف از شروع آزمایش. دور اول تست‌ها 1 روز، دور دوم تست‌ها 4 روز، دور سوم 7 روز و دور چهارم 10 روز پس از آغاز آزمایش فروشویی شروع شدند. 99

نمودار 37_ نتایج آزمایش‌های جذب اتمی انجام شده در آزمایش فروشویی با زمان معادل 1 ماه و سرعت عبور اسید 10 برابر سرعت اولیه، در دوره‌های مختلف عبور اسید. دور اول عبور اسید 1 روز، دور دوم 4 روز، دور سوم 7 روز، دور چهارم 10 روز و دور پنجم 13 روز پس از آغاز آزمایش فروشویی شروع شدند. 100

نمودار 38_ نتایج آزمایش‌های جذب اتمی انجام شده در آزمایش فروشویی با طول یک سوم استوانه‌های دیگر در زمان معادل 1 ماه و سرعت عبور اسید 20 برابر سرعت اولیه، در دوره‌های مختلف عبور اسید. دور اول عبور اسید 1 روز و دور دوم 4 روز پس از آغاز آزمایش فروشویی شروع شدند. 101

نمودار 39_ سرعت عبور اسید از خاک موجود در دو استوانه هنگام پاشش اسید با سرعت اولیه بر روی آن‌ها. 103

نمودار 40_ سرعت عبور اسید از خاک موجود در استوانه هنگام پاشش اسید با سرعت 10 برابر سرعت اولیه بر روی آن. 104

نمودار 41_ تفاوت منحنی دانه‌بندی خاک خارج شده از استوانه فروشویی که اسید به مدت یک ماه با سرعت اولیه از آن عبور کرده، با خاک اسید نخورده. 105

نمودار 42_ نشست‌های اتفاق افتاده در استوانه‌های فروشویی هنگام عبور اسید با سرعت اولیه. 106

نمودار 43_ مقایسه نشست اتفاق افتاده در استوانه‌های فروشویی در طی زمان معادل یک ماه با سرعت‌های پاشش 10 برابر (G)، 15 برابر (F) و 20 برابر (E) سرعت پاشش اولیه. 107

نمودار 44_ نشست‌های اتفاق افتاده در استوانه‌های فروشویی هنگام عبور اسید با سرعت اولیه با در نظر گرفتن فاکتور نشست. 108

نمودار 45_ مقایسه نشست اتفاق افتاده در استوانه‌های فروشویی در طی زمان معادل یک ماه با سرعت‌های پاشش 10 برابر (G)، 15 برابر (F) و 20 برابر (E) سرعت پاشش اولیه با در نظر گرفتن فاکتور نشست. 109

- نمودار 46_ تابع محتوای حجمی آب در لایه خاک بر حسب تغییرات فشار آب حفره‌ای 125
- نمودار 47_ تابع محتوای حجمی آب در لایه شن زهکش بر حسب تغییرات فشار آب حفره‌ای 125
- نمودار 48_ تابع هدایت هیدرولیکی اسید در لایه خاک بر حسب تغییرات فشار آب حفره‌ای 126
- نمودار 49_ تابع هدایت هیدرولیکی اسید در لایه شن زهکش بر حسب تغییرات فشار آب حفره‌ای 126

کلیات تحقیق

امروزه با توجه به پیشرفت صنعت در جهان، نیاز بشر به فلزاتی از قبیل اورانیوم، آلومینیوم، مس، روی و ... افزایش یافته است. در نتیجه استخراج فلزات از کانسنگ‌های کم عیار حاوی آن‌ها نیز توجیه اقتصادی پیدا کرده است. روش هیدرومتالوژی مهم‌ترین روش استخراج فلز از کانسنگ‌های کم عیار می‌باشد. در این روش در زمینی با مساحت معین (بیش از 100000 متر مربع) و شیب مشخص (بین 5 تا 15 درجه) یک توده خاکی با استفاده از خاک حاوی فلز اجرا می‌شود. نحوه اجرا و عملکرد توده فوق بدین صورت است که لایه‌های خاک در سطح مورد نظر به ارتفاع 5 تا 10 متر اجرا می‌شوند بر روی هر لایه پس از اجرا اسید پاشیده می‌شود. اسید ضمن عبور از خاک با فلز موجود در آن واکنش داده و از زهکش زیر لایه خاک خارج می‌گردد. در این مرحله در کارخانه، فلز مورد نظر از اسید جدا شده و اسید خالی از فلز مجدداً بر روی لایه‌های توده خاکی پاشیده می‌شود. پس از اینکه درصد قابل توجهی از فلز لایه‌های خاک موجود استخراج گردید، بر روی آن‌ها لایه جدیدی اجرا شده و اسید پاشی تکرار می‌شود. اجرای لایه‌های جدید تا زمانی ادامه پیدا می‌کند که توده تشکیل شده ناپایدار گردد. در صورت عدم محاسبه صحیح پایداری توده مورد نظر علاوه بر امکان لغزش توده و از کارافتادن فرآیند استخراج فلز، امکان ورود اسید به محیط اطراف در اثر لغزش توده وجود خواهد داشت که این امر ضرر جبران ناپذیری به محیط زیست وارد خواهد نمود. امروزه با توجه به کاربرد رو به افزایش روش هیدرومتالوژی در صنعت نیاز به بررسی اثرات اسید بر خاک بیش از پیش احساس می‌گردد.

زمینه تحقیق

موارد مهمی که در زمان عبور اسید از خاک می‌بایست در نظر گرفته شوند، عبارتند از:

1. خاک در حالت معمول یا شامل دو فاز به صورت ذرات جامد خاک و آب یا هوا و یا شامل سه فاز ذرات جامد خاک، آب و هوا می‌باشد. در شرایط عبور اسید از خاک، اسید نیز به فاز آب افزوده شده و خاک در بسیاری از مواقع رفتار غیراشباع دارد. در نتیجه برای محاسبه نفوذپذیری و پارامترهای مقاومتی خاک می‌بایست از روابط مرتبط با خاک‌های غیر اشباع استفاده کرد.
2. هنگامی که به جای آب، محلول اسیدی از میان ذرات خاک عبور می‌کند علاوه بر گرفتگی فیزیکی، امکان وقوع گرفتگی شیمیایی نیز وجود خواهد داشت. در نتیجه نفوذپذیری خاک با گذر زمان بیشتر دچار تغییر می‌شود.

3. محلول اسیدی هنگام عبور از میان ذرات خاک به درون آن‌ها نفوذ کرده و ذرات خاک را پوک می‌نماید. در نتیجه به احتمال زیاد پارامترهای مقاومتی خاک در اثر عبور اسید با گذر زمان کاهش پیدا می‌کنند.

4. عبور اسید از خاک از یک طرف به دلیل جابه‌جایی ذرات ریزدانه با اسید و از طرف دیگر به دلیل پوک کردن ذرات خاک باعث افزایش تراکم و نشست خاک می‌گردد. پارامترهای مقاومتی خاک بسته به میزان نشست آن تا حدی افزایش می‌یابند.

در فصل اول این پایان‌نامه ابتدا با توجه به اینکه اکثر فعالیت‌های انجام شده برای بررسی اثر اسید در ارتباط با روش هیدرومتالوژی و سازه فروشویی بوده است، توضیحات مختصری درباره این روش و نحوه عملکرد سازه فروشویی بیان گردید. سپس هر یک چهار مورد بالا به طور کامل شرح داده شده و تمامی آزمایش‌ها و تحقیقاتی که تا کنون برای هر مورد انجام شده بود، ذکر شد. در فصول دوم و سوم اثرات عبور اسید از خاک به ترتیب با استفاده از روش‌های تحقیق آزمایشگاهی و عددی که شرح آن‌ها در ادامه می‌آید، بررسی گردید. در بخش آزمایشگاهی عبور اسید از خاک با آزمایش‌های فروشویی ستونی مدل گردید؛ سپس با انجام آزمایش‌های برش مستقیم، دوام، نفوذپذیری و جذب اتمی بر روی نمونه‌های خاکی که در طی مدت زمان‌های مختلفی اسید از آن‌ها عبور کرده است، تغییرات به‌وجود آمده در خاک با گذر زمان در اثر عبور اسید به‌دست آمد. در بخش عددی نیز، نتایج حاصل شده در بخش آزمایشگاهی بر روی یک نمونه سازه فروشویی اعمال شد و میزان تأثیر این عناصر بر روی آنالیزهای تراوش، نشست و پایداری این سازه به‌دست آمد.

هدف تحقیق

با توجه به کاربرد روز افزون روش هیدرومتالوژی در صنعت، هدف این پایان‌نامه در درجه اول بررسی اثرات عبور اسید از خاک بر نفوذپذیری و پارامترهای مقاومتی خاک با گذر زمان بود. هدف دوم این پایان‌نامه اعمال نتایج به‌دست آمده برای اثرات عبور اسید از خاک در آنالیزهای تراوش، نشست و پایداری سازه فروشویی و بررسی شدت تأثیر این اثرات در رفتارهای سازه فروشویی با گذر زمان بود.

ساختار پایان‌نامه

این پایان‌نامه دارای چهار فصل می‌باشد. در فصل اول که مرتبط با ادبیات موضوع است، ابتدا با توجه به اینکه از کاربردهای مهم اثر اسید بر خاک در صنعت روش هیدرومتالوژی می‌باشد، به شرح مختصری از این روش مخصوصاً قسمت مرتبط با سازه فروشویی پرداخته شده است. سپس اثرات اسید بر خاک به چند بخش تقسیم گردیده و نظریه‌های بیان شده و فعالیت‌های انجام شده تا کنون برای هر بخش آورده شده است. در جدول 1 موارد مهم شرح داده شده در فصل اول آمده است. در فصل دوم با طراحی و انجام آزمایش‌های

مورد نیاز، اثرات اسید بر خاک سازه فروشویی من جمله تغییرات نفوذپذیری خاک با گذر زمان، سرعت و مسیر حرکت اسید در خاک، تغییرات زاویه اصطکاک داخلی خاک با گذر زمان، اثر عبور اسید بر دوام خاک و همچنین تغییرات میزان جذب فلز موجود در خاک سازه فروشویی توسط اسید در زمان‌های گذشت مختلف از شروع فروشویی بررسی گردیدند. در جدول 2 انواع آزمایش‌های انجام شده در فصل دوم به همراه هدف انجام هر آزمایش آمده است. در فصل سوم با شبیه‌سازی عددی سازه فروشویی مواردی از قبیل تراوش، نشست و پایداری در برابر لغزش سازه فروشویی با و بدون در نظر گرفتن نتایج به‌دست آمده برای عبور اسید از خاک آنالیز شدند و میزان تأثیر در نظر گرفتن اثرات عبور اسید در این آنالیزها به‌دست آمد، سپس برای هریک از پارامترهای تأثیرگذار آنالیز حساسیت انجام گردید. در جدول 3 آنالیزهای انجام شده در فصل سوم به همراه هدف انجام هر آنالیز آمده است. در نهایت در فصل چهارم نتایج حاصل از انجام این پایان‌نامه شرح داده شد و پیشنهاداتی برای کارهای آتی ارائه گردید.

جدول 1_ موارد مهم بیان شده در فصل اول

ردیف	عنوان
1	معرفی روش هیدرومتالوژی و سازه فروشویی
2	موارد قابل توجه در طراحی سازه‌های فروشویی به دلیل عبور اسید از آن‌ها
3	شرح ابهامات موجود در طراحی سازه‌های فروشویی در اثر عبور اسید از آن‌ها شامل: نشست اسید، غیراشباع شدن خاک، وقوع گرفتگی، افزایش نشست و تغییرات پارامترهای مقاومتی خاک با گذر زمان

جدول 2_ آزمایش‌های انجام شده در فصل دوم به همراه هدف انجام هر آزمایش

ردیف	آزمایش	هدف از انجام آزمایش
1	دانه‌بندی، XRF، XRD و ICP	بررسی مشخصات خاک‌های تحت آزمایش
2	فروشویی ستونی با سرعت‌های عبور اسید متفاوت	شبیه‌سازی سیکل گردش اسید در خاک، بررسی اثر سرعت عبور اسید بر پارامترهای خاک
3	آزمایش‌های نفوذپذیری در شرایط مختلف	تعیین ضرایب گرفتگی، بررسی عوامل مؤثر در تشکیل گرفتگی شیمیایی
4	آزمایش‌های برش مستقیم و دوام بر روی نمونه‌های خاک تحت عبور اسید در زمان‌های مختلف	بررسی تغییرات پارامترهای مقاومتی خاک با عبور اسید
5	آزمایش‌های جذب اتمی	بررسی تغییرات میزان جذب فلز توسط اسید با گذر زمان در شرایط مختلف
6	آزمایش‌های برش مستقیم بین لایه‌های ژئوممبرین و خاک مجاور آن‌ها	طراحی لایه نفوذناپذیر زیرین سازه‌فروشویی

جدول 3_ آنالیزهای انجام شده در فصل سوم به همراه هدف انجام هر آنالیز

ردیف	آنالیز	هدف از انجام آنالیز
1	تراوش اسید در سازه فروشویی با نرم افزار SEEP	بررسی اثر گرفتگی بر تراوش اسید در خاک، بررسی کفایت لایه زهکش
2	نشست سازه فروشویی در اثر عبور اسید با نرم افزار SIGMA	مقایسه نشست مناطق مختلف سازه فروشویی در شرایط عبور و یا عدم عبور اسید از آن، محاسبه افزایش وزن مخصوص و زاویه اصطکاک داخلی خاک مناطق مختلف سازه فروشویی در اثر نشست
3	پایداری در برابر لغزش سازه فروشویی با نرم افزار SLOPE به صورت استاتیکی و دینامیکی	بررسی میزان تأثیر عبور اسید از خاک بر پایداری در برابر لغزش سازه فروشویی
4	نشست اسید از سازه فروشویی با نرم افزار SEEP	بررسی محل نشست و میزان نشست اسید از سازه فروشویی، خطرات زیست محیطی ناشی از نشست اسید

محدوده تحقیق

تمامی آزمایش‌ها و آنالیزهای انجام شده در این پایان‌نامه بر روی خاک سازه فروشویی مجتمع مس میدوک که حاوی فلز مس بود، انجام گردیده است. در قسمت‌هایی که پارامترهای خاک مورد استفاده قرار گرفته تأثیر قابل توجهی بر نتایج به دست آمده از آزمایش‌ها داشت، بر روی نمونه خاک‌های دیگری نیز آزمایش انجام شد. همچنین در بخش عددی با انجام آنالیز حساسیت میزان و نحوه تأثیر پارامترهای مختلف خاک بر آنالیزها به دست آمد.

با توجه به اینکه خاک تحت آزمایش قرار گرفته حاوی فلز مس بود، در کلیه آزمایش‌ها از اسید سولفوریک رقیق سه گرم بر لیتر با $PH = 1/9$ که مشابه با اسید استفاده شده در سایت بود، استفاده شد. در صورتی که خاک تحت آزمایش حاوی فلز دیگری باشد، نوع و مشخصات اسید عبوری تغییر می‌کند. مورد فوق در این پایان‌نامه بررسی نگردید و همواره نوع اسید ثابت در نظر گرفته شد.

فصل اول

مروری بر ادبیات موضوع

1-1- روش هیدرومتالوژی

در گذشته تولید فلز از رگه‌های فلز خالص و یا کانسنگ‌های با عیار بالا عمدتاً به روش‌های حرارتی صورت می‌گرفت. امروزه با کاهش ذخایر پرعیار و افزایش تقاضای جهانی برای فلزات، ذخایر کم‌عیار و با پیچیدگی بیشتر از لحاظ کانی‌شناسی مورد توجه و بهره‌برداری قرار گرفته‌اند. در نتیجه امروزه جهت‌گیری و رویکرد صنعت تولید فلزات گران‌بها به سمت و سوی روش هیدرومتالوژی برای استخراج آن‌ها از کانسنگ‌های کم‌عیار است. این روش با توجه به مشکلات کمتر آن در مقایسه با دیگر روش‌های استخراج در هزینه‌های مواد اولیه، هزینه‌های سرمایه‌گذاری، به‌کارگیری نیروی انسانی و وجود مشکلاتی نظیر آلودگی‌های زیست محیطی، مصرف انرژی و امکان استفاده مجدد از مواد مصرفی شرایط بهتری را دارا بوده و در نتیجه روز به روز از اهمیت بیشتری برخوردار می‌گردد [1]. با پیشرفت و توسعه فرآیندهای هیدرومتالوژی در سال‌های اخیر روند افزایش تولید فلزات پایه با این روش افزایش چشم‌گیری داشته‌است. برای مثال سهم تولید مس به کمک این روش از 15 درصد در سال 1998 به 20 درصد در سال 2003، به حدود 25 درصد در سال 2006 و حدود 30 درصد در سال 2009 افزایش یافته است. بررسی‌ها و پیش‌بینی‌های انجام شده توسط سازمان‌های معتبر بین‌المللی حاکی از استمرار روند صعودی تولید هیدرومتالوژی در سال‌های آینده است [2].

روش هیدرومتالوژی شامل مراحل زیر است [3]:

1- استخراج کانسنگ معدنی

2- خردایش سنگ و در صورت لزوم آگلومراسیون

3- انحلال فلز موجود در کانسنگ به دو روش لیچینگ و بیولیچینگ

4- پالایش محلول حاوی مس به روش استخراج با حلال

5- الکترووینینگ (جداسازی مس کاتدی از محلول پالایش شده توسط جریان برق)

روش‌های انحلال عموماً به دو دسته اصلی انحلال بدون کمک میکروارگانیزم‌ها (لیچینگ) و انحلال به کمک میکروارگانیزم‌ها (بیولیچینگ) قابل تفکیک می‌باشد. در طی فرآیند لیچینگ، کانسنگ حاوی کانی‌های فلز (مانند مس) قابل حل توسط یک عامل شیمیایی (مانند اسید سولفوریک)، با قرار گرفتن در مجاورت محلول آبی حاوی این عامل در شرایط شیمیایی و فیزیکی مناسب، دچار انحلال شده و عناصر مورد نظر در اثر این انحلال به صورت یون در آمده و از آن جدا می‌شوند. روش لیچینگ خود به انواع مختلف شامل لیچینگ توده‌ای، لیچینگ درجا، لیچینگ با همزن، لیچینگ حوضچه‌ای و لیچینگ تحت فشار تقسیم می‌گردد. در روش لیچینگ توده‌ای یا هیپ لیچینگ، کانسنگ به صورت توده‌ای در محلی انباشته شده و