پایان‌نامه کارشناسی ارشد گرایش خاک و پی

موضوع پایان‌نامه :

اثر اسیدسولفوریک بر پارامترهای مقاومتی خاک

استاد راهنما: جناب آقای دکتر قاسم زاده

تهیه‌کننده: محمد صنایع پسند

شماره دانشجویی: 8704304

تابستان 90

فرم شماره 3

تأیید پایان‌نامه کارشناسی ارشد توسط دانشجو

موضوع پایان‌نامه: 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 پایان‌نامه 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 کطالب مندرج در پایان‌نامه تاکنون برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی توسط اینجانب یا فرد دیگری در هیچ جا ارائه نشده است و در تدوین متن پایان‌نامه فرمت مصوب دانشکده مهندسی عمران را به‌طور کامل رعایت کرده‌ام.

امضاء دانشجو

تاریخ

بسم الله الرّحمن الرّحيم

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 پایان‌نامه از بذل هیچ‌گونه کمک و راهنمایی دریغ نکردند، ابراز می‌دارم.

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 گران‌بها 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 به‌دست 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 به‌دست 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

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

1-4-4-مقاومت برشی در خاک غیراشباع 52
1-5-بررسی تراوش اسید در خاک 53
1-6-بررسی تغییرات پارامترهای مقاومتی خاک با گذر زمان در اثر عبور اسید 54
1-7-نکات مهم در بررسی پایداری سازه‌های خاکی 57
1-7-1- عوامل ناپایداری شیروانی‌ها 57
1-7-2-روش‌های مختلف محاسبه‌ی پایداری شیروانی خاکی 60
1-7-3-بررسی پایداری سازه فروشویی 62
فصل دوم 68
بررسی اثرات اسید بر خاک در آزمایشگاه 68
2-1- نمونه خاک و اسید بکار رفته در آزمایش‌ها 69
2-2-معرفی دستگاه ساخته شده برای بررسی عبور اسید از خاک 71
2-2-1-معرفی آزمایش‌های فروشویی ستونی و نحوه انجام آن‌ها 72
2-2-2-شرح دستگاه و نحوه انجام آزمایش‌ها 72
2-3-بررسی تشکیل گرفتگی در اثر عبور اسید از خاک 74
2-3-1- روش پیش‌بینی شده برای انجام آزمایش گرفتگی در آزمایشگاه 76
2-3-2-شرح سری اول آزمایش‌های گرفتگی انجام شده در آزمایشگاه 77
2-3-3-بررسی افزایش سرعت عبور اسید بر تشکیل گرفتگی 78
2-3-4-بررسی عوامل مؤثر در تشکیل گرفتگی شیمیایی 79
2-3-4-1-بررسی نقش عنصر کلسیوم در تشکیل گرفتگی شیمیایی 79
2-3-4-2-بررسی اثر زمان ماند اسید بر تشکیل گرفتگی شیمیایی 80
2-3-4-3-بررسی اثر هوا بر تشکیل گرفتگی شیمیایی 83
2-3-4-4-بررسی اثرات دما و گذر زمان بر تشکیل گرفتگی شیمیایی 84
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 87
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 .. 89
2-5- بررسی تغییرات میزان جذب فلز توسط اسید با گذر زمان در شرایط مختلف 93
2-6-نتایج جانبی به‌دست آمده از آزمایش‌های فروشویی ستونی 103
2-6-1-بررسی سرعت حرکت اسید در استوانه‌های فروشویی 103
2-6-2-بررسی افزایش نشست خاک با عبور اسید 105
2-7- بررسی شاخص دوام نمونه‌های خاک و شن قبل و بعد از عبور اسید از آن‌ها 109
2-8-طراحی لایه نفوذ ناپذیر زیرین سازه فروشویی 111
2-9-نتیجه گیری 113

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 نرم‌افزارSIGMA/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 درنظر 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 مدل‌سازی 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 به‌دست 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 مدل‌سازی 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 یه 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 نرم‌افزار 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 اندازه‌گرفته شده است 129
شکل 27_نمونه‌ای از شبکه‌بندی و شبیه‌سازی سازه فروشویی در نرم افزار SIGMA/W 133
شکل 28_ جابه‌جایی 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 $17/5\ KN/m^3$ برای خاک، محدوده اجرای برم‌ها با خطوط برجسته نشان داده شده اند..... 163
شکل 32_ سطح لزش 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 $17/5\ KN/m^3$ برای خاک 166
شکل 33_ سطح لزش 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 $17/5\ KN/m^3$ 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 درسازه 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 (v) در آنالیز SEEP/W-SIGMA/W-CONSOLIDATION 146
جدول 50_مقایسه بین نشست‌های به‌دست آمده در اثر تغییر ضریب پواسون لایه‌های خاک (v) 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 KN/m^3 باشد. 161

جدول 67_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 $17/5\ KN/m^3$ باشد..... 162
جدول 68_ فاکتور ایمنی سازه فروشویی با درنظر گرفتن پارامترهای ثابت و متغیر برای لایه‌های خاک، در آنالیزهای استاتیکی و دینامیکی به روش‌های تعادل حدی بیشاپ، جانبو و مورگنسترن پرایس..... 164
جدول 69_ فاکتور ایمنی سازه فروشویی پس از اجرای برم‌ها در شرایط درنظر گرفتن پارامترهای متغیر برای لایه‌های خاک در آنالیزهای استاتیکی و دینامیکی به روش‌های تعادل حدی بیشاپ، جانبو و مورگنسترن پرایس با در نظر گرفتن وزن مخصوص اولیه $14/5\ KN/m^3$ و $17/5\ KN/m^3$ برای خاک سازه..... 165
جدول 70_ فاکتورهای ایمنی حاصل از آنالیز پایداری سازه فروشویی با روش‌های مختلف موجود در نرم افزار SLOPE/W در شرایط استاتیکی..... 171
جدول 71_ فاکتورهای ایمنی حاصل از آنالیز پایداری سازه فروشویی با روش‌های مختلف موجود در نرم افزار SLOPE/W در شرایط دینامیکی..... 172
جدول 72_ مقایسه بین فاکتورهای ایمنی به‌دست آمده در اثر تغییر وزن مخصوص اولیه خاک در آنالیزهای استاتیکی و دینامیکی به روش‌های بیشاپ، جانبو و مورگنسترن پرایس با تابع جانبی HALF-SINE..... 174
جدول 73_ مقایسه بین فاکتورهای ایمنی به‌دست آمده در اثر تغییر زاویه اصطکاک داخلی اولیه خاک در آنالیزهای استاتیکی و دینامیکی به روش‌های بیشاپ، جانبو و مورگنسترن پرایس با تابع جانبی HALF-SINE..... 175
جدول 74_ مقایسه بین فاکتورهای ایمنی به‌دست آمده در اثر تغییر چسبندگی خاک در آنالیزهای استاتیکی و دینامیکی به روش‌های بیشاپ، جانبو و مورگنسترن پرایس با تابع جانبی HALF-SINE..... 176
جدول 75_ مقایسه بین فاکتورهای ایمنی به‌دست آمده در اثر تغییر زاویه اصطکاک مرتبط با مکش خاک در آنالیزهای استاتیکی و دینامیکی به روش‌های 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 به‌دست آمده در اثر تغییر سطح تراز اسید سازه فروشویی در آنالیزهای استاتیکی و دینامیکی به روش‌های بیشاپ، جانبو و مورگنسترن پرایس با تابع جانبی HALF-SINE..... 177
جدول 77_ مقایسه بین فاکتورهای ایمنی به‌دست آمده در اثر تغییر زاویه اصطکاک بین لایه‌های نفوذناپذیر در آنالیزهای استاتیکی و دینامیکی به روش‌های بیشاپ، جانبو و مورگنسترن پرایس با تابع جانبی HALF-SINE..... 178
جدول 78_ مقایسه بین فاکتورهای ایمنی به‌دست آمده در اثر تغییر ضریب افقی زلزله (K_h) در آنالیز دینامییکی به مجموع روش‌های بیشاپ، جانبو و مورگنسترن پرایس با تابع جانبی HALF-SINE..... 179
جدول 79_ مقایسه بین فاکتورهای ایمنی به‌دست آمده در اثر تغییر ضریب قائم زلزله (K_v) در آنالیز دینامییکی به مجموع روش‌های 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 بارثابت 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 دورهای 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 دورهای 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 دورهای 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 15برابر 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 دورهای 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 20برابر سرعت اولیه، در دورهای 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 سرعت های 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 درنظر گرفتن فاکتور نشست 108
نمودار 45_ مقایسه نشست اتفاق افتاده در استوانه‌های فروشویی در طی زمان معادل یک ماه با سرعت های پاشش 10 برابر (G)، 15 برابر (F) و 20 برابر (E)سرعت پاشش اولیه با درنظر گرفتن فاکتور نشست 109

نمودار 46_ تابع محتوای حجمی آب در لایه خاک بر حسب تغییرات فشارآب حفره‌ای 125
نمودار 47_ تابع محتوای حجمی آب در لایه شن زهکش بر حسب تغییرات فشارآب 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

مقدمه

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 نظرعلاوه 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 درنظر 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 به‌جای 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.