





دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

گروه مهندسی معدن

تأثیر دگرسانی و هوازدگی بر روی پارامترهای ژئومکانیکی سنگ به منظور

تحلیل احتمالاتی پایداری دیواره‌های معدن شماره ۱ گل‌گهر

دانشجو: مجتبی سالاری

اساتید راهنما:

دکتر محمد عطایی

دکتر سعید کریمی نسب

استاد مشاور:

مهندس حمید رضا محمدی

پایان نامه ارشد جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

شهریور ۱۳۹۲

دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده: مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

گروه: مهندسی معدن

پایان نامه کارشناسی ارشد آقای مجتبی سالاری

تحت عنوان: تاثیر دگرسانی و هوازدگی بر روی پارامترهای ژئومکانیکی سنگ به منظور تحلیل احتمالاتی پایداری دیواره‌های معدن شماره ۱ گل‌گهر

در تاریخ ۱۳۹۲/۰۶/۱۹ توسط کمیته تخصصی زیر جهت اخذ مدرک کارشناسی ارشد مورد ارزیابی و با درجه مورد پذیرش قرار گرفت.

امضاء	اساتید مشاور	امضاء	اساتید راهنما
	نام و نام خانوادگی : مهندس حمیدرضا محمدی		نام و نام خانوادگی : دکتر محمد عطایی
	نام و نام خانوادگی :		نام و نام خانوادگی : دکتر سعید کریمی نسب

امضاء	نماینده تحصیلات تکمیلی	امضاء	اساتید داور
	نام و نام خانوادگی : دکتر فرهنگ سرشکی		نام و نام خانوادگی : دکتر رضا خالوکاکایی
			نام و نام خانوادگی : دکتر شکرا... زارع
			نام و نام خانوادگی :
			نام و نام خانوادگی :

تقدیم بہ:

روح پاک مادرم

تشکر و قدردانی:

پیش از آنکه دست‌های درخت به نور برسد پاهایش تاریکی را تجربه کرد

گاهی برای رسیدن به نور باید از تاریکی عبور کرد

سپاس بی‌کران پروردگار یکتا را که هستی‌مان بخشید و به طریق علم و دانش رهنمونمان شد و به همنشینی رهروان علم و دانش مفتخرمان نمود و خوشه چینی از علم و معرفت را روزیمان ساخت. بر خود لازم می‌دانم که از حمایت‌های بی‌دریغ جناب آقای دکتر محمد عطایی و دکتر سعید کریمی‌نسب، استادان راهنمای این پایان‌نامه، به خاطر تهیه مقدمات و امکانات این تحقیق، راهنمایی‌ها و پیگیری‌های مداومشان که در تمام مراحل تحقیق راه‌گشای اینجانب بوده‌اند صمیمانه تشکر و قدردانی کنم. از جناب آقای مهندس حمیدرضا محمدی دانشجوی دکترای دانشگاه شهید باهنر کرمان و مسئول واحد مکانیک سنگ معدن گل‌گهر که مشاور صنعتی اینجانب بوده‌اند و آقای مهندس حسین زارع کارشناس بخش مکانیک سنگ معدن گل‌گهر که در تمام مراحل تحقیق با راهنمایی‌ها و تلاش‌هایشان به اینجانب کمک کردند کمال تشکر را دارم. از آقای مهندس اسحاق پورزمانی سرپرست دفتر نظارت طراحی معدن گل‌گهر به خاطر راه‌گشایی‌ها و حمایت‌هایشان صمیمانه سپاسگزاری می‌کنم. در نهایت با تقدیر و درود فراوان خدمت خواهر عزیزیم که همچون مادری مهربان در تمام مراحل زندگی همراه و یاور اینجانب بوده است.

مجتبی سالاری

تعهد نامه

اینجانب مجتبی سالاری دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی معدن دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه **تأثیر دگرسانی و هوازدگی بر روی پارامترهای ژئومکانیکی سنگ به منظور تحلیل احتمالاتی پایداری دیواره‌های معدن شماره ۱ گل‌گهر** تحت راهنمایی دکتر محمد عطایی و دکتر سعید کریمی نسب متعهد می‌شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت‌های آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود .
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد

چکیده

در طراحی شیب‌های سنگی و خاکی چه در معادن و چه در سدها و ترانشه‌های راه، باید کلیه عواملی که بطور مستقیم و غیر مستقیم تاثیرگذار هستند در نظر گرفته شوند. هوازگی و دگرسانی بعنوان عوامل مخرب، پارامترهای ژئومکانیکی سنگ‌ها را به شدت تحت تاثیر قرار داده و مقاومت سنگ‌ها را به میزان قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌دهند. شیبست‌های موجود در معدن سنگ آهن گل‌گهر به شدت از هوازگی و دگرسانی تاثیر پذیرفته‌اند. دخیل کردن این پدیده در تحلیل‌های پایداری که تا به حال از دید زمین شناسی و به صورت کیفی بررسی شده است، جز از طریق عددی و کمی سازی تاثیر آن بر روی پارامترهای ژئومکانیکی سنگ‌ها میسر نمی‌باشد. در این پایان نامه در راستای بررسی تاثیر هوازگی و دگرسانی بر روی پارامترهای ژئومکانیکی سنگ‌ها در معدن سنگ آهن شماره ۱ گل‌گهر تعداد زیادی داده‌های کمی گردآوری شد. درجات مختلف هوازگی و دگرسانی سنگ‌ها با استفاده از اندیس‌های صحرایی مشخص شدند و خصوصیات فیزیکی و مکانیکی آنها در آزمایشگاه مورد مطالعه قرار گرفت. با استفاده از سیستم طبقه‌بندی احتمال پایداری شیب (SSPC)، مقادیر فاکتور کاهش درجات هوازگی و دگرسانی برای هر کدام از پارامترها محاسبه شد. مشخص شد اکثر پارامترهای ژئومکانیکی سنگ‌ها با افزایش درجه هوازگی به شدت کاهش می‌یابند. مقاومت فشاری تک محوری، مقاومت کششی و مدول الاستیسیته استاتیکی بیشتر از سایر ویژگی‌ها تحت تاثیر هوازگی قرار می‌گیرند. نتایج آزمایش نشان داد که آسیب‌پذیری شیبست‌های معدن سنگ آهن گل‌گهر در مقابل هوازگی، از درجه III به بعد به اوج خود می‌رسد. همچنین مهندسی سطوح شیب‌دار جزء مسائل ژئوتکنیکی می‌باشد که عدم قطعیت بسیار زیادی بر آن حاکم است. اغلب اثرات عدم قطعیت‌ها روی پیش بینی پایداری سطوح شیب‌دار قابل توجه هستند. در روش‌های قطعی (تعادل حدی و . . .)، تحلیل پایداری فقط بر اساس فاکتور اطمینان انجام می‌شود و این روش‌ها قادر به مشخص نمودن اثر عدم قطعیت‌ها نیستند. تحلیل‌های احتمالاتی پایداری سطوح

شیب‌دار، ابزاری مناسب جهت در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها در فرآیندهای طراحی می‌باشند. در این تحقیق سعی شده است ضمن معرفی انواع عدم قطعیت‌ها در برآورد پارامترهای ژئوتکنیکی، اصول و مبانی روش‌های مرسوم احتمالاتی از قبیل روش شبیه سازی مونت کارلو که به عنوان یکی از روش‌های احتمالاتی به منظور کاهش عدم قطعیت‌های پارامترهای ژئوتکنیکی اخیراً به طور وسیعی مورد استفاده قرار گرفته است معرفی شود. همچنین با استفاده از نرم افزار Slide و انتخاب روش تعادل حدی بیشاپ به عنوان تابع عملکرد، تحلیل احتمالاتی مونت کارلو بر روی دیواره‌های معدن سنگ آهن شماره ۱ گل‌گهر انجام و تاثیر هوازدهی و دگرسانی بر روی مقادیر فاکتور اطمینان مورد ارزیابی قرار گرفت. پس از کمی سازی تاثیر هوازدهی و دگرسانی بر روی فاکتور اطمینان مشاهده شد که مقدار فاکتور اطمینان تا درجه IV به میزان ۰/۷۴ مقدار اولیه خود کاهش می‌یابد.

کلمات کلیدی: معدن سنگ آهن گل‌گهر، هوازدهی و دگرسانی، SSPC، خصوصیات ژئومکانیکی، عدم قطعیت، فاکتور اطمینان، تحلیل احتمالاتی، مونت کارلو

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۱.....	فصل اول: مقدمه و اهداف
۲.....	۱-۱- مقدمه
۳.....	۲-۱- هدف از انجام تحقیق
۳.....	۳-۱- پیشینه تحقیق
۴.....	۴-۱- روند انجام تحقیق
۴.....	۱-۴-۱- جمع‌آوری اطلاعات اولیه زمین شناسی، آب شناسی و هواشناسی
۵.....	۲-۴-۱- بررسی وجود هوازدگی و یا دگرسانی در منطقه
۵.....	۳-۴-۱- بررسی کلیه عوامل موثر بر هوازدگی
۵.....	۴-۴-۱- تعیین نوع هوازدگی و یا دگرسانی
۶.....	۵-۴-۱- طبقه‌بندی مهندسی سنگ‌های هوازده
۶.....	۶-۴-۱- برداشت و انجام آزمون‌های ژئوتکنیکی بر روی نمونه‌های دگرسان شده
۷.....	۷-۴-۱- تحلیل نتایج و کمی‌سازی تاثیر هوازدگی بر روی ویژگی‌های ژئومکانیکی سنگ‌ها
۷.....	۸-۴-۱- تعیین خواص ژئومکانیکی توده‌سنگ
۷.....	۹-۴-۱- تحلیل احتمالاتی و ارائه توصیه‌های طراحی و مطالعاتی
۹.....	فصل دوم: آشنایی با معدن سنگ آهن گل‌گهر
۱۰.....	۱-۲- موقعیت جغرافیایی و راه‌های ارتباطی معدن سنگ آهن گل‌گهر
۱۰.....	۲-۲- تاریخچه
۱۱.....	۳-۲- شرایط آب و هوایی
۱۱.....	۴-۲- پوشش گیاهی
۱۲.....	۵-۲- ژئومورفولوژی
۱۳.....	۶-۲- جایگاه ناحیه معدنی گل‌گهر در زمین ساخت ایران
۱۳.....	۷-۲- زمین شناسی ناحیه معدنی گل‌گهر و نواحی اطراف آن
۱۴.....	۸-۲- زمین ساخت ناحیه گل‌گهر
۱۴.....	۹-۲- شکل و طبیعت ماده معدنی
۱۵.....	۱۰-۲- دسته‌بندی مواد معدنی
۱۵.....	۱-۱۰-۲- مگنتیت پایینی
۱۶.....	۲-۱۰-۲- زون اکسیده

۱۷	۲-۱۰-۳- مگنتیت بالایی
۱۷	۲-۱۱- مشخصات کاواک نهایی معدن
	فصل سوم: مروری کلی بر پدیده هوازدهی و دگرسانی سنگ‌ها از دیدگاه زمین شناسی ۱۸
۱۹	۳-۱- مقدمه
۱۹	۳-۲- فرآیند هوازدهی
۱۹	۳-۳- هوازدهی فیزیکی یا مکانیکی
۲۰	۳-۳-۱- انجماد
۲۰	۳-۳-۲- گرم و سرد شدن مکرر
۲۰	۳-۳-۳- عدم تجانس سنگ‌ها
۲۱	۳-۳-۴- تبلور نمک‌ها
۲۱	۳-۴- هوازدهی شیمیایی
۲۲	۳-۴-۱- اکسیداسیون
۲۲	۳-۴-۲- هیدراته شدن
۲۳	۳-۴-۳- هیدرولیز
۲۳	۳-۴-۴- انحلال
۲۴	۳-۵- تاثیر عوامل مختلف در هوازدهی
۲۴	۳-۵-۱- نوع سنگ
۲۴	۳-۵-۲- شیب زمین (توپوگرافی)
۲۵	۳-۵-۳- آب و هوا
۲۵	۳-۵-۴- زمان
۲۶	۳-۶- طبقه بندی سنگ‌های هوازده برای مقاصد مهندسی
۲۷	۳-۶-۱- طبقه بندی بر اساس تغییرات ظاهری و رنگ
۲۸	۳-۶-۲- طبقه بندی بر اساس سرعت موج اولتراسونیک
۲۹	۳-۶-۳- طبقه بندی بر اساس مقدار پس رانش چکش اشمیت
۳۰	۳-۶-۴- طبقه بندی سنگ‌های هوازده بر اساس درجه سختی
۳۱	۳-۶-۵- طبقه بندی بر اساس شاخص فاصله داری شکستگی‌ها
۳۲	۳-۶-۶- طبقه بندی مهندسی سنگ بر اساس اندیس بار نقطه‌ای
۳۳	۳-۶-۷- طبقه بندی بر اساس نسبت سنگ به خاک (RSR)
۳۴	۳-۶-۸- طبقه بندی سنگ‌های هوازده بر اساس اندیس (SMC) و (MFI)
۳۵	۳-۶-۹- طبقه بندی بر اساس شاخص کیفیت سنگ

۳۵	 طبقه‌بندی بر اساس تخلخل
۳۶	 ۷-۳- تاثیر هوازدگی و دگرسانی بر ویژگی‌های ژئومکانیکی سنگ‌ها
۳۷	 ۱-۷-۳- رطوبت، تخلخل و دانسیته
۳۹	 ۲-۷-۳- نفوذپذیری
۴۰	 ۳-۷-۳- مقاومت فشاری تک محوری
۴۱	 ۴-۷-۳- مقاومت کششی
۴۲	 ۵-۷-۳- مدول یانگ
۴۴	 ۸-۳- کمی‌سازی تاثیر هوازدگی و دگرسانی بر ویژگی‌های ژئومکانیکی سنگ‌ها
۴۴	 ۱-۸-۳- تشریح کامل کمی‌سازی بر مبنای روش SSPC
۴۷	 ۹-۳- هوازدگی و فعالیت‌های مهندسی
۴۸	 ۱-۹-۳- هوازدگی و پایداری شیب
۴۹	 ۱-۱-۹-۳- نحوه تاثیر هوازدگی و دگرسانی در تحلیل‌های مربوط به پایداری دیواره ...
۵۱	 ۱۰-۳- جمع بندی
۵۲	 فصل چهارم: اعمال عدم قطعیت‌ها در تحلیل پایداری شیب
۵۳	 ۱-۴- مقدمه
۵۳	 ۲-۴- منشأ عدم قطعیت
۵۴	 ۱-۲-۴- عدم اطمینان مکانی
۵۴	 ۲-۲-۴- عدم اطمینان داده‌ای
۵۴	 ۳-۴- مفاهیم اساسی در احتمال و قابلیت اطمینان
۵۵	 ۱-۳-۴- فاکتور اطمینان
۵۷	 ۲-۳-۴- احتمال شکست و اندیس اطمینان
۶۳	 ۴-۴- تحلیل احتمالاتی شیب‌ها
۶۳	 ۱-۴-۴- روش سریهای تیلور
۶۳	 ۲-۴-۴- روش برآورد نقطه‌ای
۶۳	 ۳-۴-۴- شبیه سازی مونت کارلو
۶۴	 ۱-۳-۴-۴- روش مونت کارلو
۶۵	 ۲-۳-۴-۴- روش مونت کارلو در تحلیل پایداری شیب
۶۷	 ۵-۴- ارزیابی عدم قطعیت
۷۰	 ۶-۴- آشنایی با نرم افزار @Risk
۷۱	 ۷-۴- جمع بندی

فصل پنجم: مطالعات میدانی و آزمایشگاهی..... ۷۲

- ۷۳ ۱-۵- مقدمه
- ۷۳ ۲-۵- بررسی وجود هوازدگی و دگرسانی در معدن گل گهر
- ۷۳ ۳-۵- انتخاب نمونه جهت انجام آزمایش
- ۷۶ ۴-۵- تعیین نوع هوازدگی و یا دگرسانی
- ۷۷ ۵-۵- طبقه‌بندی مهندسی سنگ‌های هوازده و تعیین فازهای دگرسانی
- ۸۰ ۶-۵- آماده سازی نمونه جهت انجام آزمایش‌های ژئومکانیکی
- ۸۱ ۷-۵- تاثیر هوازدگی و دگرسانی بر خواص ژئومکانیکی شیست‌های گل گهر
- ۸۱ ۱-۷-۵- مقاومت فشاری تک محوری سنگ بکر
- ۸۲ ۲-۷-۵- مقاومت کششی برزیلی
- ۸۴ ۳-۷-۵- مقاومت بار نقطه‌ای
- ۸۵ ۴-۷-۵- سرعت موج فشاری
- ۸۷ ۵-۷-۵- سختی چکش اشمیت
- ۸۹ ۶-۷-۵- چگالی و تخلخل
- ۹۰ ۷-۷-۵- شاخص دوام وارفنگی
- ۹۲ ۸-۷-۵- مدول الاستیسیته استاتیکی (مدول یانگ)
- ۹۳ ۸-۵- کمی سازی تاثیر هوازدگی و دگرسانی
- ۹۶ ۹-۵- جمع بندی

فصل ششم: تعیین خصوصیات ژئومکانیکی توده سنگ..... ۹۷

- ۹۸ ۱-۶- مقدمه
- ۹۸ ۲-۶- تعیین خصوصیات مهندسی سنگ‌ها
- ۹۹ ۳-۶- تعیین پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ معدن
- ۱۰۰ ۱-۳-۶- معیار هوک - براون برای توده سنگ‌های درزه‌دار
- ۱۰۱ ۲-۳-۶- ثابت هوک - براون سنگ بکر
- ۱۰۳ ۳-۳-۶- اندیس مقاومت زمین شناسی
- ۱۰۵ ۴-۳-۶- فاکتور اغتشاش
- ۱۰۶ ۴-۶- تعیین توزیع پارامترهای ورودی جهت تحلیل احتمالاتی
- ۱۰۷ ۵-۶- تعریف رابطه هوک - براون در نرم افزار @Risk
- ۱۰۸ ۱-۵-۶- تعیین ورودی‌ها و خروجی‌های نرم افزار
- ۱۱۰ ۲-۵-۶- انجام شبیه‌سازی و تعیین پارامترهای ژئومکانیکی C و ϕ

۱۱۲	۶-۶- جمع بندی
۱۱۳	فصل هفتم: تحلیل احتمالاتی پایداری شیب دیواره نهایی معدن شماره ۱ گل گهر.....
۱۱۴	۱-۷- مقدمه
۱۱۵	۲-۷- تحلیل پایداری مقطع ۱۰۱۵۰۰
۱۱۵	۱-۲-۷- لیتولوژی
۱۱۶	۲-۲-۷- سطح شکست و احتمال ریزش مقطع ۱۰۱۵۰۰
۱۱۷	۳-۲-۷- توزیع آماری فاکتور اطمینان و احتمال شکست مقطع ۱۰۱۵۰۰
۱۱۸	۴-۲-۷- نمودار تجمعی فاکتور اطمینان مقطع ۱۰۱۵۰۰
۱۱۸	۵-۲-۷- تحلیل حساسیت بر روی پارامترهای مقطع ۱۰۱۵۰۰
۱۱۹	۳-۷- تحلیل پایداری مقطع ۱۰۱۸۰۰
۱۱۹	۱-۳-۷- لیتولوژی
۱۲۱	۲-۳-۷- سطح شکست و احتمال ریزش مقطع ۱۰۱۸۰۰
۱۲۲	۳-۳-۷- توزیع آماری فاکتور اطمینان و احتمال شکست مقطع ۱۰۱۸۰۰
۱۲۲	۴-۳-۷- نمودار تجمعی فاکتور اطمینان مقطع ۱۰۱۸۰۰
۱۲۳	۵-۳-۷- تحلیل حساسیت بر روی پارامترهای مقطع ۱۰۱۸۰۰
۱۲۴	۴-۷- تحلیل پایداری مقطع ۱۰۲۰۰۰
۱۲۴	۱-۴-۷- لیتولوژی
۱۲۶	۲-۴-۷- سطح شکست و احتمال ریزش مقطع ۱۰۲۰۰۰
۱۲۷	۳-۴-۷- توزیع آماری فاکتور اطمینان و احتمال شکست مقطع ۱۰۲۰۰۰
۱۲۷	۴-۴-۷- نمودار تجمعی فاکتور اطمینان مقطع ۱۰۲۰۰۰
۱۲۸	۵-۴-۷- تحلیل حساسیت بر روی پارامترهای مقطع ۱۰۲۰۰۰
۱۲۹	۵-۷- معیارهای پذیرش
۱۳۰	۶-۷- مقایسه فاکتور اطمینان و احتمال شکست در مقاطع مختلف
۱۳۱	۷-۷- تاثیر هوازدگی و دگرسانی بر فاکتور اطمینان و کمی سازی مقادیر آن
۱۳۳	۸-۷- جمع بندی
۱۳۴	فصل هشتم: نتایج و پیشنهادات.....
۱۳۵	۱-۸- نتایج
۱۳۷	۲-۸- پیشنهادات
۱۳۸	منابع و مراجع
۱۴۱	پیوست ها

فهرست شکل‌ها

عنوان	صفحه
شکل ۱-۱: فلوچارت روند انجام تحقیق	۸
شکل ۱-۲: موقعیت جغرافیایی معدن سنگ آهن گل‌گهر	۱۰
شکل ۲-۲: موقعیت ذخایر شش‌گانه گل‌گهر	۱۱
شکل ۳-۲: گسل‌های محدوده کاواک شماره یک	۱۴
شکل ۴-۲: مقطع زمین شناسی دیواره شمالی - جنوبی معدن شماره ۱ گل‌گهر	۱۵
شکل ۵-۲: محدوده نهایی معدن شماره ۱ گل‌گهر	۱۷
شکل ۱-۳: تغییرات دانسیته خشک بازالت‌های هوازده با درجه هوازده‌گی	۳۸
شکل ۲-۳: تغییرات تخلخل بازالت‌های هوازده با درجه هوازده‌گی	۳۹
شکل ۳-۳: تغییرات نفوذپذیری بازالت‌های هوازده با درجه هوازده‌گی	۴۰
شکل ۴-۳: تغییرات مقاومت فشاری تک محوری بازالت‌های هوازده با درجه هوازده‌گی	۴۱
شکل ۵-۳: تغییرات مقاومت کششی بازالت‌های هوازده با درجه هوازده‌گی	۴۱
شکل ۶-۳: تغییرات مدول ینگ بازالت‌های هوازده با درجه هوازده‌گی	۴۳
شکل ۱-۴: توزیع‌های فرضی مقاومت R و بار L برای یک المان ساختاری	۵۶
شکل ۲-۴: توزیع فرضی حاشیه اطمینان	۵۷
شکل ۳-۴: توزیع احتمال شکست برای توابع چگالی نرمال لگاریتمی و نرمال	۵۸
شکل ۴-۴: ارتباط بین احتمال شکست و اندیس اطمینان برای یک فاکتور اطمینان با توزیع	۶۰
شکل ۵-۴: مقایسه فاکتورهای اطمینان دو شیب A و B	۶۲
شکل ۱-۵: تعدادی از محل‌های نمونه‌برداری سطحی	۷۵
شکل ۲-۵: موقعیت کاواک و محل‌های نمونه‌برداری شده	۷۵
شکل ۳-۵: آماده‌سازی نمونه‌ها در آزمایشگاه مکانیک سنگ گل‌گهر	۸۱
شکل ۴-۵: ارتباط بین مقاومت فشاری تک محوری و درجه هوازده‌گی	۸۲
شکل ۵-۵: ارتباط بین مقاومت کششی و درجه هوازده‌گی	۸۳
شکل ۶-۵: ارتباط بین اندیس بار نقطه‌ای و درجه هوازده‌گی	۸۵
شکل ۷-۵: ارتباط بین سرعت موج فشاری و درجه هوازده‌گی	۸۶
شکل ۸-۵: همبستگی بین چگالی، مقاومت فشاری تک محوری و عدد اشمیت	۸۸
شکل ۹-۵: ارتباط بین سختی اشمیت و درجه هوازده‌گی	۸۸
شکل ۱۰-۵: ارتباط بین چگالی و درجه هوازده‌گی	۹۰
شکل ۱۱-۵: ارتباط بین تخلخل و درجه هوازده‌گی	۹۰

- شکل ۵-۱۲: ارتباط بین شاخص دوام و درجه هوازدگی ۹۲
- شکل ۵-۱۳: ارتباط بین ضریب الاستیسیته استاتیکی و درجه هوازدگی ۹۳
- شکل ۵-۱۴: مقایسه فاکتور کاهش برخی از پارامترها ۹۵
- شکل ۶-۱: توزیع احتمال تعیین شده توسط @Risk برای پارامتر UCS ۱۰۹
- شکل ۶-۲: توزیع احتمال تعیین شده توسط @Risk برای پارامتر GSI ۱۰۹
- شکل ۶-۳: هیستوگرام مربوط به چسبندگی (C) سنگ سالم در مقطع ۱۰۱۵۰۰ ۱۱۱
- شکل ۶-۴: هیستوگرام مربوط به زاویه اصطکاک داخلی (ϕ) سنگ سالم در مقطع ۱۰۱۵۰۰ .. ۱۱۲
- شکل ۷-۱: مقطع زمین شناسی ۱۰۱۵۰۰ ۱۱۵
- شکل ۷-۲: سطح شکست احتمالی در مقطع ۱۰۱۵۰۰ ۱۱۷
- شکل ۷-۳: توزیع آماری فاکتور اطمینان و احتمال شکست مقطع ۱۰۱۵۰۰ ۱۱۷
- شکل ۷-۴: توزیع تجمعی فاکتور اطمینان و احتمال شکست مقطع ۱۰۱۵۰۰ ۱۱۸
- شکل ۷-۵: حساسیت فاکتور اطمینان مقطع ۱۰۱۵۰۰ به پارامترهای متغیر ۱۱۹
- شکل ۷-۶: مقطع زمین شناسی ۱۰۱۸۰۰ ۱۲۰
- شکل ۷-۷: سطح شکست احتمالی در مقطع ۱۰۱۸۰۰ ۱۲۱
- شکل ۷-۸: توزیع آماری فاکتور اطمینان و احتمال شکست مقطع ۱۰۱۸۰۰ ۱۲۲
- شکل ۷-۹: توزیع تجمعی فاکتور اطمینان و احتمال شکست مقطع ۱۰۱۸۰۰ ۱۲۳
- شکل ۷-۱۰: حساسیت فاکتور اطمینان مقطع ۱۰۱۸۰۰ به پارامترهای متغیر ۱۲۴
- شکل ۷-۱۱: مقطع زمین شناسی ۱۰۲۰۰۰ ۱۲۵
- شکل ۷-۱۲: سطح شکست احتمالی در مقطع ۱۰۲۰۰۰ ۱۲۶
- شکل ۷-۱۳: توزیع آماری فاکتور اطمینان و احتمال شکست مقطع ۱۰۲۰۰۰ ۱۲۷
- شکل ۷-۱۴: توزیع تجمعی فاکتور اطمینان و احتمال شکست مقطع ۱۰۲۰۰۰ ۱۲۸
- شکل ۷-۱۵: حساسیت فاکتور اطمینان مقطع ۱۰۲۰۰۰ به پارامترهای متغیر ۱۲۸
- شکل ۷-۱۶: ریزش‌های رخ داده در مقطع ۱۰۲۰۰۰ ۱۳۱

فهرست جداول

عنوان	صفحه
جدول ۱-۳: طبقه بندی پیشنهادی برای سنگ‌های هوازده (ISRM,1981)	۲۸
جدول ۲-۳: تقسیم بندی سنگ‌های هوازده بر اساس سرعت موج	۲۹
جدول ۳-۳: ارتباط بین هوازدگی و سرعت لرزه‌ای در منطقه‌ای در هنگ کنگ	۲۹
جدول ۴-۳: نتایج داده‌های چکش اشمیت برای طبقه‌بندی سنگ‌های هوازده	۳۰
جدول ۵-۳: معیار سختی سنگ برای پی سنگ هوازده پل (Honsho_shikoku)	۳۱
جدول ۶-۳: طبقه‌بندی سنگ‌های هوازده بر اساس شاخص فاصله‌داری	۳۲
جدول ۷-۳: طبقه‌بندی سنگ‌های هوازده پی سنگ پل Honshu_shikaku بر اساس	۳۲
جدول ۸-۳: طبقه‌بندی بر اساس اندیس بار نقطه‌ای	۳۳
جدول ۹-۳: نسبت سنگ به خاک برای سنگ‌های هوازده بلوری	۳۴
جدول ۱۰-۳: اندیس هوازدگی برای سینیت هوازده	۳۵
جدول ۱۱-۳: تخلخل سنگ‌های هوازده	۳۷
جدول ۱۲-۳: دانسیته سنگ‌های هوازده (اشباع و خشک)	۳۷
جدول ۱۳-۳: مقدار رطوبت اشباع سنگ‌های هوازده	۳۸
جدول ۱۴-۳: مدول الاستیسیته سنگ‌های هوازده	۴۲
جدول ۱۵-۳: نسبت پواسون سنگ‌های هوازده	۴۳
جدول ۱-۴: مقادیر توزیع تجمعی متغیر نرمال استاندارد	۶۰
جدول ۲-۴: توصیف عملکرد شیب در ارتباط با اندیس اطمینان و احتمال شکست	۶۱
جدول ۳-۴: ضریب تغییرات برای پارامترهای مختلف	۶۹
جدول ۱-۵: اطلاعات مربوط به مطالعه میکروسکوپی نمونه Mc_1	۷۶
جدول ۲-۵: نتایج حاصل از آزمایش اولتراسونیک بر روی نمونه‌های معدن گل‌گهر	۷۸
جدول ۳-۵: نتایج آزمایش سختی اشمیت	۷۸
جدول ۴-۵: طبقه‌بندی بر اساس وضعیت ظاهری، سرعت موج و سختی اشمیت	۷۹
جدول ۵-۵: ارتباط بین مقاومت فشاری تک محوری (بر حسب مگاپاسکال) و درجه هوازدگی	۸۲
جدول ۶-۵: ارتباط بین مقاومت کششی (بر حسب مگاپاسکال) و درجه هوازدگی	۸۳
جدول ۷-۵: ارتباط بین اندیس بار نقطه‌ای (بر حسب مگاپاسکال) و درجه هوازدگی	۸۴
جدول ۸-۵: مقادیر پیشنهادی ضریب تبدیل	۸۵
جدول ۹-۵: ارتباط بین سرعت موج فشاری (بر حسب متر بر ثانیه) و درجه هوازدگی	۸۶

جدول ۵-۱۰: ارتباط بین سختی اشمیت و درجه هوازدهگی	۸۷
جدول ۵-۱۱: ارتباط بین چگالی (بر حسب gr/cm^3) و تخلخل (بر حسب $\%$) با درجه هوازدهگی	۸۹
جدول ۵-۱۲: ارتباط بین شاخص دوام وارفنگی (بر حسب $\%$) و درجه هوازدهگی	۹۱
جدول ۵-۱۳: ارتباط بین ضریب الاستیسیته استاتیکی (بر حسب گیگا پاسکال) و درجه	۹۲
جدول ۵-۱۴: میزان فاکتور کاهش پارامترها در درجات مختلف هوازدهگی (WE_i)	۹۵
جدول ۶-۱: روش‌های تعیین خصوصیات توده سنگ	۹۹
جدول ۶-۲: مقادیر ثابت m_i برای سنگ بکر با توجه به گروه سنگ	۱۰۲
جدول ۶-۳: دامنه معمول GSI در شیست‌ها	۱۰۴
جدول ۶-۴: انتخاب نوع تابع چگالی احتمال برای پارامترهای مختلف	۱۰۷
جدول ۶-۵: مشخصه‌های آماری پارامترهای UCS و GSI شیست‌های معدن گل‌گهر	۱۱۰
جدول ۷-۱: مشخصه‌های آماری پارامترهای C و ϕ توده سنگ‌های مقطع ۱۰۱۵۰۰	۱۱۶
جدول ۷-۲: خواص ثابت رس، کنگلومرا و مگنتیت برای مقطع ۱۰۱۵۰۰	۱۱۶
جدول ۷-۳: مشخصه‌های آماری پارامترهای C و ϕ توده سنگ‌های مقطع ۱۰۱۸۰۰	۱۲۰
جدول ۷-۴: خواص ثابت رس، کنگلومرا و مگنتیت برای مقطع ۱۰۱۸۰۰	۱۲۱
جدول ۷-۵: مشخصه‌های آماری پارامترهای C و ϕ توده سنگ‌های مقطع ۱۰۲۰۰۰	۱۲۵
جدول ۷-۶: خواص ثابت رس، کنگلومرا و مگنتیت برای مقطع ۱۰۲۰۰۰	۱۲۶
جدول ۷-۷: معیارهای پذیرش در طراحی شیب‌ها	۱۲۹
جدول ۷-۸: مشخصه‌های آماری فاکتور اطمینان در مقاطع مختلف	۱۳۰
جدول ۷-۹: مقادیر فاکتور کاهش برای پارامترهای C و ϕ در مقاطع مختلف	۱۳۲
جدول ۷-۱۰: تاثیر هوازدهگی و دگرسانی بر روی مقادیر فاکتور اطمینان و احتمال شکست	۱۳۲
جدول ۷-۱۱: مقادیر فاکتور کاهش محاسبه شده برای فاکتور اطمینان	۱۳۳

۱ فصل اول: مقدمه و اهداف

۱-۱- مقدمه

هوازدگی و دگرسانی خواص ژئومکانیکی سنگ‌ها را دستخوش تغییراتی قرار می‌دهند. عوامل مختلفی از قبیل نوع سنگ میزبان و خصوصیات فیزیکی شیمیایی سیالات گرمایی بر روی دگرسانی تاثیر دارند، در حالی که استعداد سنگ‌ها در مقابل هوازدگی به فاکتورهای متعددی از قبیل ترکیب کانی‌شناسی، اندازه‌دانه، بافت، ساخت و شرایط محیطی بستگی دارد. تعیین و تشخیص درجات دگرسانی سنگ‌ها و مطالعه آنها در این قالب، به پیش بینی بهتری از خصوصیات مهندسی آنها می‌انجامد. کلیه عملیات مهندسی از جمله طراحی شیب‌های سنگی که با سنگ و خاک سر و کار دارند، تحت تاثیر فرآیندهای هوازدگی و دگرسانی قرار خواهند گرفت. لذا بررسی تاثیر هوازدگی و دگرسانی بر پایداری شیب‌ها ضروری به نظر می‌رسد.

از طرفی در بررسی پایداری شیروانی‌ها، معمول است که نیروهای محرک و مقاوم محاسبه گردیده و بزرگی آنها نسبت به هم سنجیده شود. با دقت در تک‌تک عوامل موثر در این محاسبات، مشخص می‌شود که تعیین یک مقدار عددی مشخص و دقیق برای آنها غیر ممکن است چرا که اولاً این پارامترها معمولاً در فضای محاسبات ثابت نیستند، ثانیاً اندازه‌گیری آنها با خطا همراه بود. به همین دلیل می‌توان گفت این پارامترها قطعی و دقیق نبوده و همراه با تغییر و نامعینی و به بیان دیگر احتمالاتی می‌باشند. بنابراین اگر برای هر کدام از آنها با توجه به میزان عدم قطعیت، توزیع احتمالاتی تعریف شود، نهایتاً تمامی این نامعینی‌ها در نتیجه خروجی نیز منعکس شده و به جای ضریب اطمینان یک توزیع احتمالاتی بدست می‌آید. در این پایان‌نامه سعی شده است که با ارائه یک روند نمای ساده تاثیر فرآیند هوازدگی و دگرسانی بر پایداری دیواره‌های معدن سنگ آهن شماره ۱ گل‌گهر مورد ارزیابی قرار گیرد.

۱-۲- هدف از انجام تحقیق

در این تحقیق تاثیر دگرسانی و هوازدهی بر روی پارامترهای ژئومکانیکی سنگ‌ها مطالعه و مقادیر فاکتور کاهش برای هر کدام از پارامترهای مقاومتی سنگ تعیین خواهد شد. در این راستا داده‌های کمی از معدن شماره ۱ گل‌گهر گردآوری و درجات مختلف دگرسانی و هوازدهی سنگ‌ها مشخص خواهد شد. در مرحله بعد اندیس‌های صحرایی و خصوصیات فیزیکی و مکانیکی سنگ‌ها در آزمایشگاه تعیین و تاثیر دگرسانی و هوازدهی بر روی آنها مورد مطالعه قرار خواهد گرفت. همچنین در این پایان‌نامه، با لحاظ کردن وضعیت طراحی فعلی دیواره‌های معدن گل‌گهر و با نرمال کردن توزیع پارامترهای ورودی و در نظر گرفتن روش‌های متداول تعادل حدی، تحلیل احتمالاتی مونت کارلو انجام و تحلیل حساسیت روی تک تک پارامترها انجام خواهد شد. همچنین تاثیر عدم قطعیت هر پارامتر روی نتیجه نهایی مورد توجه قرار خواهد گرفت.

۱-۳- پیشینه تحقیق

تاثیر هوازدهی و دگرسانی بر روی خواص مهندسی سنگ‌ها توسط محققان مختلفی مورد مطالعه قرار گرفته و سیستم‌های طبقه‌بندی مختلفی نیز پیشنهاد کرده‌اند. انون^۱ (۱۹۹۵) و ISRM (۱۹۸۱) سیستم طبقه‌بندی سنگ‌های هوازده را بر اساس مشاهدات وضعیت ظاهری توده سنگ بر طبق درجه هوازدهی در ۶ کلاس پیشنهاد کردند [۱]. لیو^۲ (۱۹۶۷) پنج کلاس هوازدهی بر اساس سرعت موج فشاری تعیین کرده است [۲]. هاسکینز و بل^۳ (۱۹۹۵) هوازدهی و مقاومت بازالت‌ها را مورد مطالعه قرار دادند [۳]. همچنین تغرل و گورپینار^۴ (۱۹۹۷) بر روی تاثیر هوازدهی شیمیایی خواص مهندسی بازالت‌ها کار

¹ Anon

² Lliev

³ Haskins & Bell

⁴ Tugrul & Gurpinar

کردند [۴]. کیلیک^۱ (۱۹۹۹) سیستم طبقه بندی شاخص دگرسانی متحد (UAI) را بر اساس سرعت موج فشاری و مقاومت فشاری تک محوری بازالت‌ها و دیابازها پیشنهاد کرد و این سنگ‌ها را در ۵ گروه قرار داد [۵]. نوروز تقی پور (۱۳۸۰) تاثیر هوازدگی و دگرسانی بر روی پارامترهای ژئومکانیکی سنگ‌های معدن مس سرچشمه را مورد مطالعه قرار داده است.

۱-۴- روند انجام تحقیق

این پایان‌نامه در راستای نایل شدن به اهداف بالا انجام خواهد گرفت و مسیرهای زیر به ترتیب در حین اجرای آن انجام خواهد گرفت (شکل ۱-۱):

۱-۴-۱- جمع‌آوری اطلاعات اولیه زمین‌شناسی، آب‌شناسی و هواشناسی

جمع‌آوری و تفسیر اطلاعات زمین‌شناسی از مستندات، نقشه‌های زمین‌شناسی، عکس‌های هوایی، نقشه برداری سطحی، اطلاعات حاصل از مغزه‌گیری، مطالعات مربوط به عوارض ساختاری و همچنین جمع‌آوری و تفسیر اطلاعات مربوط به آب‌شناسی و هواشناسی منطقه مربوط به این مرحله می‌باشد. بعد از مطالعات کتابخانه‌ای، لازم است ناحیه را مورد بازدید مقدماتی قرار داد تا وضعیت عمومی ناحیه از نزدیک مشاهده شود و از ساختمان کلی آن یک ایده کلی بدست آید. نقشه‌هایی که برای این منظور مورد استفاده قرار می‌گیرند معمولاً در مقیاس $\frac{1}{\dots\dots\dots}$ هستند. علاوه بر موارد فوق کلیه اطلاعات مربوط به میزان بارندگی سالانه، دمای سالانه و تغییرات آب و هوایی جمع‌آوری و مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. همچنین نقشه‌های مربوط به مسیرهای جریان آب‌های زیرزمینی و سطحی و میزان دبی آنها تهیه و بررسی می‌شوند. گاهی برای تکمیل اطلاعات علاوه بر حفر گمانه‌ها نیاز به حفر و برداشت ترانشه و چاهک نیز می‌باشد.

¹ Kilic

۱-۴-۲- بررسی وجود هواز دگی و یا دگرسانی در منطقه

در مرحله بعد با استفاده از اطلاعات جمع شده از مرحله اول، بازدید دقیق منطقه و اهمیت پروژه باید شناسایی شود که آیا هواز دگی و دگرسانی در منطقه وجود دارد. در صورتی که جواب منفی است از ادامه مطالعات مربوط به هواز دگی و دگرسانی خودداری شود. البته باید متذکر شد در هر منطقه که در معرض تغییرات محیطی قرار می گیرد و جریان های سطحی و زیرزمینی مایعات وجود دارد، باید حداقل انتظار هواز دگی و دگرسانی را داشت.

۱-۴-۳- بررسی کلیه عوامل موثر بر هواز دگی

میزان، نوع و درجه هواز دگی و همچنین عمق تاثیر هواز دگی و نوع کانی های ثانویه تشکیل شده و سرعت هواز دگی تابعی از عوامل گوناگون است که بررسی این عوامل بسیار مهم می باشد. همچنین در این مرحله کانی های ثانویه تشکیل شده و درزه و شکاف های بوجود آمده از هواز دگی و دگرسانی به کمک مطالعات میکروسکوپی مورد بررسی قرار می گیرند.

۱-۴-۴- تعیین نوع هواز دگی و یا دگرسانی

هواز دگی به دو صورت فیزیکی و شیمیایی صورت می گیرد. در هواز دگی فیزیکی یا مکانیکی بر خلاف هواز دگی شیمیایی کانی ثانویه ایجاد نمی شود. بلکه سنگ خرد شده به ذرات ریز تبدیل می شود. اگر این تغییرات کانی ها در اعماق زیاد و در اثر تاثیر آب های گرم صورت گیرد، دگرسانی نامیده می شود. تعیین نوع هواز دگی و دگرسانی معمولاً از طریق اطلاعات بدست آمده از مراحل قبل و همچنین بررسی های کانی شناسی کانی های ثانویه، یا بررسی درزه و شکاف های بوجود آمده و تغییر رنگ های ایجاد شده صورت می گیرد. این قسمت در فصل پنجم آورده شده است.

۱-۴-۵- طبقه‌بندی مهندسی سنگ‌های هوازده

طبقه‌بندی سنگ‌های هوازده یکی از مهمترین مراحل این روندنما می‌باشد. زیرا با ارائه یک طرح طبقه‌بندی درست و کامل، مطالعه سنگ‌های هوازده آسان شده و نتیجه‌گیری نیز براحتی انجام خواهد گرفت. همانطور که در فصل سوم ملاحظه خواهد شد طبقه‌بندی باید بر اساس ویژگی‌هایی از سنگ‌های هوازده صورت گیرد که اندازه‌گیری آن در منطقه و یا آزمایشگاه براحتی میسر باشد. طبقه‌بندی می‌تواند بر اساس تغییر رنگ سنگ‌ها و آزمایش سختی چکش اشمیت در منطقه صورت گیرد، گاهی نمونه‌هایی از سنگ‌ها به آزمایشگاه منتقل شده و طبقه‌بندی بر اساس مقاومت فشاری و یا سایر آزمون‌های ساده آزمایشگاهی صورت می‌گیرد. تعدادی از طبقه‌بندی‌های سنگ‌های هوازده در فصل سوم آورده شده است.

۱-۴-۶- برداشت و انجام آزمون‌های ژئوتکنیکی بر روی نمونه‌های دگرسان شده

بعد از طبقه‌بندی سنگ‌های هوازده، خواص ژئومکانیکی (خواص فیزیکی و مکانیکی) سنگ‌های هوازده اندازه‌گیری می‌شود. معمولاً برای اندازه‌گیری این خواص نیاز به نمونه‌هایی است که در منطقه گرفته شده و به آزمایشگاه منتقل شده است. خواص فیزیکی اندازه‌گیری شده شامل تخلخل و دانسیته می‌باشد. خواص مکانیکی اندازه‌گیری شده شامل مقاومت فشاری تک محوره، مقاومت کششی، ضریب الاستیسیته استاتیکی، دوام، سرعت موج طولی و عرضی می‌باشد. بعد از انجام کلیه آزمایش‌ها و تعیین خواص ژئومکانیکی سنگ‌ها، منحنی‌های مربوط به این خواص برحسب درجات مختلف هوازدگی رسم می‌شود. گاهی برای نشان دادن این تغییرات می‌توان از جدول استفاده کرد. البته نوع خواص ژئومکانیکی ماده‌سنگ و توده‌سنگ که اندازه‌گیری شده و مورد بررسی قرار می‌گیرد بستگی به نوع پروژه و پارامترهای موثر در آن دارد.

۱-۴-۷- تحلیل نتایج و کمی سازی تاثیر هواز دگی بر روی ویژگی های ژئومکانیکی سنگ ها

هواز دگی و دگرسانی به عنوان عواملی هستند که اکثر خواص ژئومکانیکی را که در عملیات مهندسی مهم می باشند تحت تاثیر و تغییر قرار می دهند. برای در نظر گرفتن این تغییرات به کمی سازی آنها نیاز است. که در فصل سوم روشی برای کمی سازی هواز دگی آورده شده است.

۱-۴-۸- تعیین خواص ژئومکانیکی توده سنگ

تحلیل پایداری دیواره های معادن روباز شامل تعیین رفتار، پیش بینی حالت تغییر شکل و وقوع گسیختگی احتمالی توده سنگ می باشد. برای نیل به این هدف، لازم است که پارامترهای کنترل کننده خصوصیات توده سنگ تعیین شوند. در اغلب تحلیل هایی که برای طراحی شیب ها، شالوده ها و فضاهای زیر زمینی انجام می پذیرد، به ارزیابی معتبر و با ارزشی از خواص مقاومتی و تغییر شکل پذیری نیاز است. معمولاً تخمین این پارامترها که شامل چسبندگی و زاویه اصطکاک هستند بر اساس آزمون های آزمایشگاهی و صحرایی و معیارهای تجربی موجود صورت می گیرد. در فصل ششم به تعیین این خواص پرداخته خواهد شد.

۱-۴-۹- تحلیل احتمالاتی و ارائه توصیه های طراحی و مطالعاتی

روش های مختلفی برای تحلیل پایداری شیروانی ها ارائه شده که اساس بیشتر آنها بر روش تعادل حدی می باشد، به این ترتیب که نیروها یا ممان های محرک و مقاوم محاسبه گردیده و پایداری شیروانی با مقایسه آنها ارزیابی می شود. اما وقتی نامعینی ها^۱ و خطاها^۲ در اندازه گیری یا تخمین پارامترهای ورودی تحلیل به روش قطعی^۳ به حدی باشد که اعتبار محاسبات را کاهش دهد، استفاده از روش تحلیل احتمالاتی برای اطمینان سنجی جواب ها راه حل مناسبتری است. همه روش های احتمالاتی مبتنی بر نامعین بودن

^۱ Uncertainties

^۲ Errors

^۳ Deterministic Method

پارامترهای ورودیست و نامعینی به صورت تابع چگالی احتمال ظاهر می شود. در فصل هفتم تحلیل احتمالاتی بر روی دیواره شمالی معدن شماره ۱ گل گهر انجام خواهد شد.

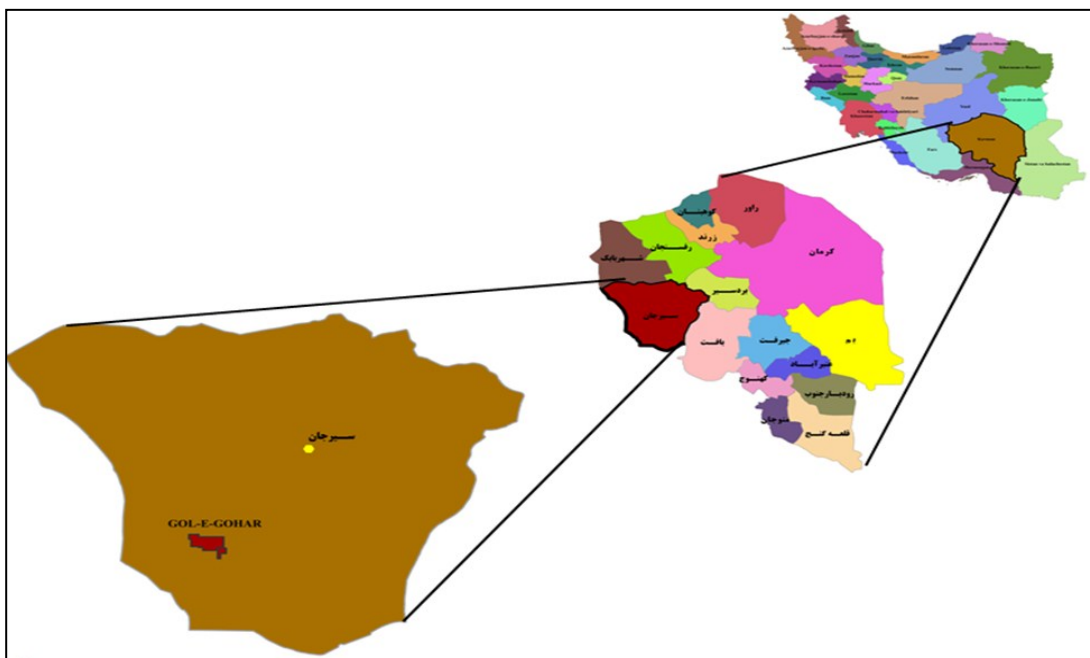


شکل ۱-۱: فلوچارت روند انجام تحقیق

۲ فصل دوم: آشنایی با معدن سنگ آهن گل‌گهر

۱-۲- موقعیت جغرافیایی و راه‌های ارتباطی معدن سنگ آهن گل گهر

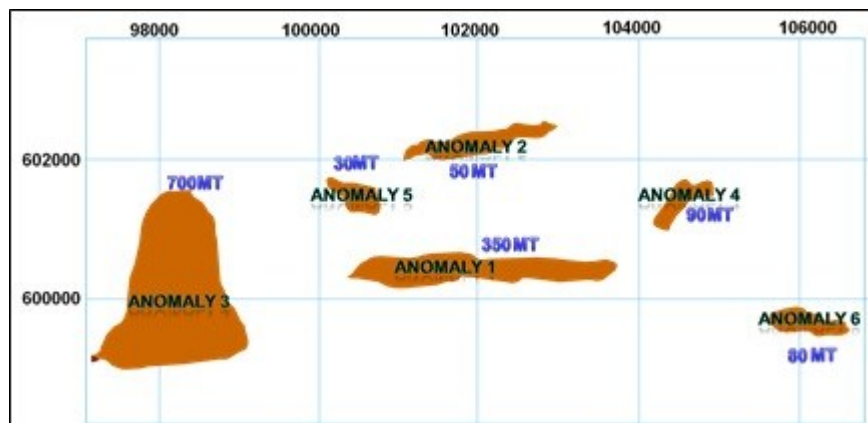
مجموعه معدن سنگ آهن گل گهر در محدوده استان کرمان و شهرستان سیرجان قرار دارد. این منطقه در فاصله ۵۵ کیلومتری جنوب غربی شهر سیرجان و ۳۲۵ کیلومتری شمال شرقی شیراز قرار دارد (شکل ۱-۲).



شکل ۱-۲: موقعیت جغرافیایی معدن سنگ آهن گل گهر [۶]

۲-۲- تاریخچه

مجموع ذخایر شش گانه گل گهر (شکل ۲-۲) بیش از ۱۱۳۵ میلیون تن می‌باشد، که بزرگترین آنها ذخیره شماره ۳ می‌باشد. ذخیره شماره ۱ آن پس از آماده سازی و احداث کارخانه تغلیظ در سال ۱۳۷۳ رسماً به بهره‌برداری رسید [۶].



شکل ۲-۲: موقعیت ذخایر شش گانه گل گهر [۶]

۳-۲- شرایط آب و هوایی

آب و هوای منطقه گل گهر خشک و کویری بوده و میزان بارندگی سالیانه در خلال سال‌های ۱۳۶۳ تا ۱۳۹۱ از ۳۲/۱ تا ۴۲۴ میلیمتر متغیر بوده است. در سال ۱۳۹۱ میزان بارندگی آن ۹۵/۷ میلیمتر بوده است. در نواحی غیر کوهستانی منطقه، این مقدار قبل از آنکه به مصرف تغذیه سفره‌های آبی زیرزمینی برسد، تحت تاثیر درجه حرارت و تبخیر و تعرق گیاهان مجدداً به شکل بخار به جو برگردانده می‌شود. به طور کلی بارندگی در این مناطق در زمستان و بهار و گاهی در میانه مرداد ماه صورت می‌گیرد ولی مقدار آن چندان چشمگیر نمی‌باشد. باران‌های بهاری سیلابی است. حداکثر درجه حرارت ۴۲ درجه و مربوط به مرداد ماه و حداقل آن ۱۶- درجه سانتیگراد و مربوط به دی ماه است. متوسط درجه حرارت مینیم و ماکزیمم از ۶/۳ درجه سانتیگراد در دی (سردترین ماه) تا ۲۸/۱ درجه سانتیگراد در مرداد ماه (گرمترین ماه) متغیر است [۶].

۴-۲- پوشش گیاهی

پوشش گیاهی منطقه ناچیز است و تنها منحصر به مراتعی است که بوته‌های بسیار کوتاه داشته و در دشت آبرفتی اطراف معدن گسترده است. آب‌های جاری دائم به هیچ وجه در منطقه معدن و اطراف آن

دیده نمی‌شود. فقط در بخش جنوبی معدن و جنوب ارتفاعات چاه سفید می‌توان درخت‌های پسته (پسته وحشی)، مورد و بادام کوهی را با تراکم‌های مختلف دید. در بقیه نقاط این گیاهان به طور پراکنده مشاهده می‌شود [۶].

۲-۵- ژئومورفولوژی

ناحیه معدنی گل گهر در دامنه جنوبی یک آنتی کلینوریوم قرار دارد که آبرفت‌های عهد حاضر روی معدن را پوشانده‌اند. ناحیه مورد مطالعه شامل سه نوع مورفولوژی است. کوه‌های ستیغ دار که اطراف آنها را دشت‌های آبرفتی و نمکزارهای مسطح فرا گرفته است. امتداد عمومی ارتفاعات شمال غربی - جنوب شرقی است. ارتفاع متوسط دشت‌های آبرفتی ناحیه معدنی از سطح دریا حدود ۱۷۳۰ متر است. در شمال معدن نمکزار کفه خیرآباد قرار دارد. در شمال غرب، رشته کوه‌های باغ حسن (خارج از ناحیه مورد مطالعه) با ارتفاع ۲۸۰۰ متر و در غرب معدن دو رشته کوه موازی بنام چاه بره در امتداد شمال غرب - جنوب شرق در ارتفاع ۱۹۸۶ متر قرار گرفته است. در جنوب ناحیه معدنی رشته کوه‌های عین البقر با ارتفاع ۲۰۳۷ متر و امتداد شرقی - غربی قرار گرفته است. در قسمت جنوبی‌تر به نواحی پست و نمکزار کفه مرگ منتهی می‌گردد. ناحیه معدنی گل گهر توسط دو نمکزار کفه خیرآباد در شمال و کفه مرگ در جنوب محصور شده است. رسوبات این کفه مخلوطی از رس، نمک و گچ است (رسوبات کولابی تبخیری) که در فصول بارندگی تبدیل به باتلاق می‌شود و در فصل خشک سطح صاف و مسطحی را تشکیل می‌دهد، که قشری از نمک بصورت چند ضلعی‌های منشوری شکل کوتاه، قسمت اعظم آنرا می‌پوشاند. از ارتفاعات جنوب شرقی و شرق ناحیه می‌توان به ترتیب از کوه‌های چاه سفید با ارتفاع حداکثر ۲۰۰۰ و رشته کوه بی بی مکو با ارتفاع ماکزیمم ۱۸۱۵ متر نام برد. رشته کوه کم ارتفاع بی بی مکو دارای ریزش‌های بلوکی است و از آهک‌های ائوسن تشکیل شده است [۶].

در جنوب غربی ناحیه معدنی عوارض توپوگرافی بدلند^۱ با فرسایش‌های آبراهه‌ای متعدد (هزار دره) در کنگلومرای نئوژن مشاهده می‌شود، ارتفاعاتی که قبل از آن ذکری به میان آمد، دارای دامنه‌های نامنظم، آبراهه‌های فرسایشی و کارستی نامنظم می‌باشد. در اطراف این ارتفاعات سه زون دشت سرلخت، دشت سرانتهایی و دشت سرپوشیده قابل تشخیص است [۶].

۲-۶- جایگاه ناحیه معدنی گل گهر در زمین ساخت ایران

ناحیه معدنی گل گهر در لبه شمال شرقی زون سنندج - سیرجان و لبه فرو افتادگی نمک زار کفه خیرآباد، که خود در حدفاصل زون سنندج - سیرجان و زون ارومیه دختر بوجود آمده، قرار گرفته است [۶].

۲-۷- زمین شناسی ناحیه معدنی گل گهر و نواحی اطراف آن

منطقه مورد مطالعه عموماً از آبرفت‌های عهد حاضر پوشیده شده و ارتفاعات محدودی که رخنمون دارند، شامل سنگ‌های دگرگونی پالئوزوئیک در جنوب و جنوب غرب معدن و سنگ‌های رسوبی مزوزوئیک و سنوزوئیک در شرق معدن می‌باشند.

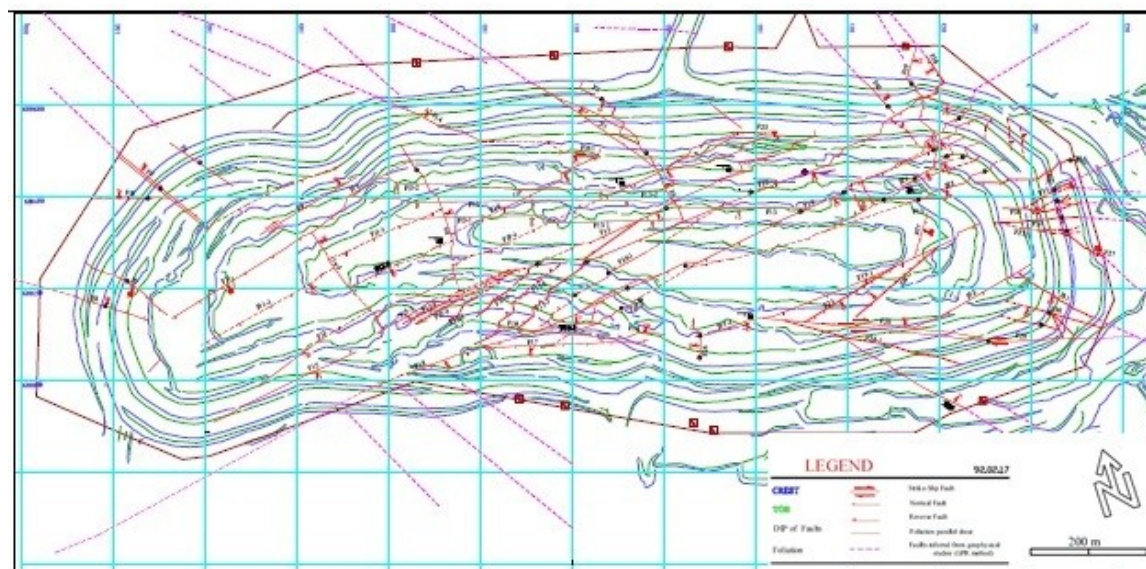
سنگ‌های پالئوزوئیک شامل کمپلکس گل گهر بوده که این مجموعه قدیمی‌ترین مجموعه دگرگونی این منطقه را تشکیل می‌دهد. ذخایر شش گانه سنگ آهن گل گهر در این کمپلکس قرار گرفته‌اند. بخش تحتانی این کمپلکس شامل تناوبی از گنایس، میکاشیست، آمفیبولیت و کوارتزشیست می‌باشد. بر روی این بخش تناوبی از مرمرهای دولومیتی، میکاشیست، شیست سبز و گرافیت شیست، بدون دگرشیمی قرار گرفته است. این مجموعه به یک واحد مرمری دولومیتی یا کلسیتی ختم می‌شود که در تمام کمربند سنندج - سیرجان به نام کرسفید نامیده می‌شود.

¹ Bad Land

بیرون زدگی رسوبات مزوزوئیک سنوزوئیک عمدتاً در شمال شرق معدن قابل مشاهده است. روی رسوبات مذکور سکانسی از رسوبات عهد حاضر از پلئستوسن تا امروز قرار گرفته است [۶].

۲-۸- زمین ساخت ناحیه گل گهر

بر پایه مطالعات ژئوفیزیکی گسل‌های اصلی منطقه گل گهر امتداد شمالی - جنوبی و شمال غربی - جنوب شرقی دارند. این مطالعات هدایت آب‌های زیرزمینی توسط گسل‌های یاد شده را تایید نموده است (شکل ۳-۲) [۶].

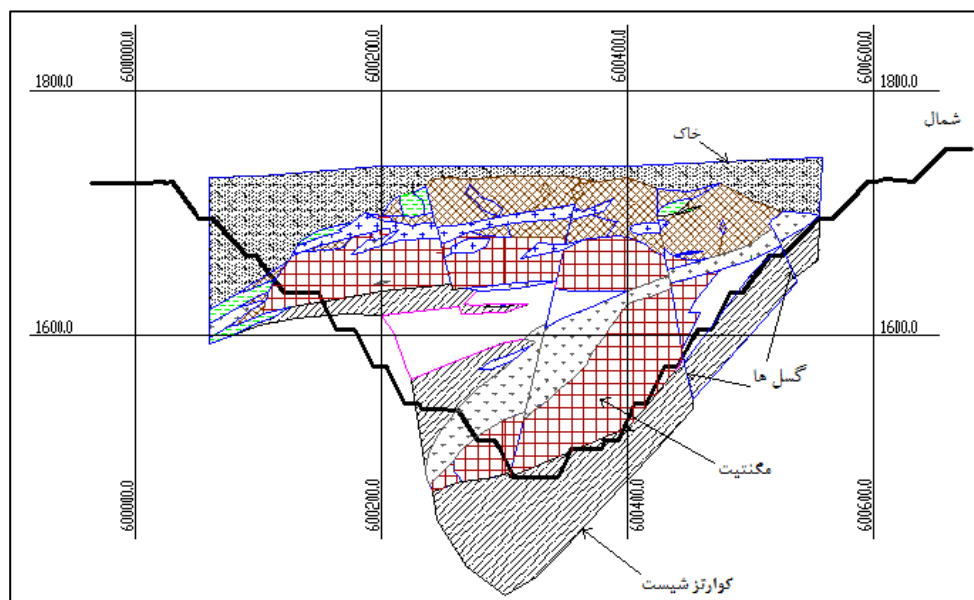


شکل ۳-۲: گسل‌های محدوده کاواک شماره یک [۶]

۲-۹- شکل و طبیعت ماده معدنی

در ذخیره شماره ۱ تا کنون ۲۵۲ چاه اکتشافی به متر اژ ۳۲۶۵۴ متر حفاری گردیده است، که از این میزان ۱۲۲۸۵ متر در سنگ آهن و ۱۰۰۸۳ متر در سنگ باطله و ۹۸۸۶ متر آن در خاک بوده است. بر اساس حفاری‌های اکتشافی انجام شده شکل کلی ذخیره شماره ۱ تقریباً به صورت یک عدسی

کشیده با امتداد شمال غرب - جنوب شرق است. وضعیت کلی زمین شناسی آن در یک مقطع عرضی در شکل ۲-۴ قابل مشاهده است [۶].



شکل ۲-۴: مقطع زمین شناسی دیواره شمالی - جنوبی معدن شماره ۱ گل گهر [۶]

۲-۱۰- دسته بندی مواد معدنی

دسته بندی مواد معدنی ابتدا توسط شرکت گرانگز انجام گرفت، که با تغییرات اندکی توسط شرکت ADM و دفتر طراحی و زمین شناسی گل گهر ارائه شده است. دسته بندی مواد معدنی در معدن به صورت مگنتیت بالایی، اکسیده و مگنتیت پایینی می باشد [۷].

۲-۱۰-۱- مگنتیت پایینی^۱

این نوع کانسنگ با مقدار باطله خیلی کم و درصد بالای مگنتیت (تا حدود ۸۰٪ محصول مغناطیسی) مشخص می شود.

در حدود ۹ درصد سنگ مگنتیت پایینی گوگردی در حدود ۳ تا ۶ درصد دارد. گوگرد بیشتر به

^۱ Bottom Magnetite

شکل پیریت دیده می‌شود و در آزمایش‌های جدایش مغناطیسی به راحتی به قسمت باطله منتقل می‌گردد. در بعضی نقاط، مقدار قابل ملاحظه‌ای از گوگرد در داخل کنسانتره باقی می‌ماند. برای این حالت دو دلیل عمده می‌توان متصور شد:

- گوگرد به صورت پیروتیت یعنی سولفید مغناطیسی آهن وجود داشته باشد.
 - گوگرد به صورت دانه‌های خیلی ریز پیریت در داخل بلورهای مگنتیت وجود داشته باشد.
- موضوع گوگرد در داخل مگنتیت پایینی و مسائل مطرح شده در این مورد، مسأله‌ای مهم در کانه‌آرایی و طراحی معدن به شمار می‌آید.

۲-۱۰-۲- زون اکسیده^۱

سنگ‌های این زون به صورت لایه‌ای روی مگنتیت پایینی را پوشانده‌اند. این لایه در هنگام بالا آمدگی لایه آهن، در معرض هوازدگی قرار گرفته و اکسیده شده است و بعد از آن رسوبات جوان ترشیاری روی آن را پوشانده‌اند.

در طی مرحله اکسیداسیون پیریت و گوگرد از این کانسنگ به طور کامل خارج شده و توسط لیمونیت جایگزین گردیده و مگنتیت تبدیل به اکسید آهن قرمز رنگ (هماتیت و گوتیت) شده است.

در سنگ‌های زون اکسیده، به طور میانگین ۱۲٪ هماتیت و گوتیت وجود دارد. در مجموع کنسانتره حاصل از این سنگ، مقدار آهن کمتری نسبت به کنسانتره تولید شده از سنگ مگنتیتی دارد (۶۲٪ آهن در مقابل ۶۹٪ در سنگ مگنتیت).

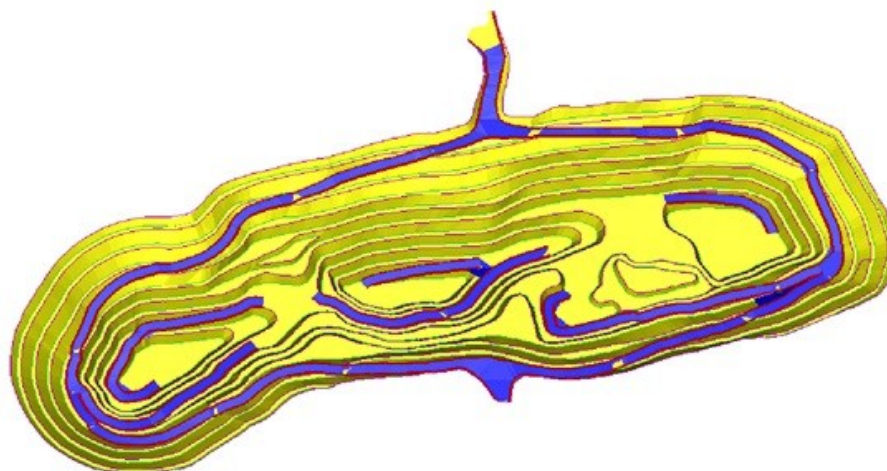
¹ Oxidized Magnetite

۲-۱۰-۳- مگنتیت بالایی^۱

این کانسنگ در منطقه‌ای محدود، در بالای توده معدنی قرار دارد و در حدود ۳ درصد تناژ کل توده معدنی را تشکیل می‌دهد. سنگ معدنی این توده تا اندازه‌ای اکسید شده اما همچنان به شدت مغناطیسی است. میزان اکسیدشدگی این سنگ برای از بین رفتن پیریت کافی بوده و عیار کلی گوگرد در داخل این سنگ معدنی به شدت پایین آمده است. درصد فسفر نیز در داخل این کانسنگ بسیار پایین است.

۲-۱۱- مشخصات کاواک نهایی معدن

کاواک نهایی معدن دارای ۲۲۰۰ متر طول و ۷۵۰ متر عرض می‌باشد و عمق نهایی آن به ۲۶۰ متر می‌رسد. ارتفاع پله‌ها ۱۵ متر و شیب کلی دیواره‌های معدن بین ۳۸ تا ۴۵ درجه است. رمپ‌های دسترسی به معدن با شیب ۸٪ و عرض ۲۵ متر طراحی شده‌اند. عرض پله‌های ایمنی ۱۰ متر بوده و به ازای هر دو پله (۳۰ متر) یک پله ایمنی در دیواره نهایی باقی خواهد ماند. محدوده نهایی معدن شماره ۱ گل گهر در شکل ۲-۵ نشان داده شده است [۷].



شکل ۲-۵: محدوده نهایی معدن شماره ۱ گل گهر (این تصویر از نرم افزار Gemcom استخراج شده است) [۷]

^۱ Top Magnetite

۳ فصل سوم: مروری کلی بر پدیده هوازدگی و

دگرسانی سنگ‌ها از دیدگاه زمین‌شناسی مهندسی

۳-۱- مقدمه

وجود ساختارهای متنوع زمین‌شناسی، تکتونیکی و سنگ‌های دگرسان شده در منطقه گل‌گهر، تشکیلات معدنی را از حالت یک توده متجانس خارج نموده و وضعیت دشوار و پیچیده در تحلیل پایداری پله‌های معدن، بهینه‌سازی حفاری، انفجار، استخراج و ... پدید آورده است. هوازدهی و دگرسانی به عنوان یکی از عوامل تغییردهنده پارامترهای ژئومکانیکی، سنگ‌ها را به شدت تحت تاثیر قرار داده و پایداری و مقاومت سنگ‌ها را به میزان قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌دهند. بنابراین در مسائل ژئوتکنیک باید این عامل به عنوان یک فاکتور مهم و اساسی در نظر گرفته شود.

۳-۲- فرآیند هوازدهی

هوازدهی به زبان ساده عبارت است از پاسخی که مواد سطح زمین در مقابل تغییر محیط از خود بروز می‌دهند و شامل از هم پاشیدن سنگ‌ها و تجزیه آنها در سطح زمین و یا نزدیک به سطح زمین است. بعد از میلیون‌ها سال، در اثر بالا آمدگی و فرسایش، سنگ‌های موجود در سقف توده‌های نفوذی از بین رفته و توده در سطح زمین رخنمون پیدا می‌کند. این توده متبلور که در دما و فشار زیاد و احتمالاً در چند کیلومتری زیر زمین تشکیل شده بود، اکنون در سطح زمین و در معرض شرایطی کاملاً متفاوت قرار دارد. در چنین وضعیتی توده سنگ به تدریج تغییر می‌کند تا جایی که دوباره با شرایط جدید به حالت تعادل برسد، به چنین تغییراتی در سنگ هوازدهی می‌گویند [۹].

۳-۳- هوازدهی فیزیکی یا مکانیکی

این نوع از هوازدهی در اثر عوامل فیزیکی - مکانیکی انجام می‌گیرد. که انواع آن در ادامه آورده شده است [۹].

۳-۳-۱- انجماد

آبی که در منافذ و شکاف‌های سنگ جمع می‌شود، در اثر انجماد ۹٪ افزایش حجم می‌دهد و در نتیجه، فشار قابل توجهی به دیواره شکاف‌ها وارد می‌کند و به مرور باعث تخریب سنگ می‌شود. علاوه بر شکاف‌ها، تخلخل طبیعی موجود در سنگ نیز باعث جمع شدن آب و در نتیجه تاثیر این نوع هوازدگی می‌شود. باید توجه داشت که این نوع هوازدگی در مواردی که رطوبت هوا و سرمای لازم جهت انجماد موجود باشد انجام می‌گیرد.

۳-۳-۲- گرم و سرد شدن مکرر

تغییر دمای هوا سبب تغییر حجم سنگ‌ها می‌شود. بدین معنی که در روز به علت حرارت خورشید، سنگ‌ها منبسط و در شب به علت کاهش دما، منقبض می‌شوند. علاوه بر این، در مقیاس بزرگتر، در فصول مختلف نیز به علت اختلاف دما حجم سنگ‌ها متفاوت است. این انبساط و انقباض مکرر سنگ‌ها باعث سست شدن و در نتیجه متلاشی شدن آنها می‌شود و این امر در مواردی که اختلاف دمای شبانه روز و فصول زیاد است بیشتر به چشم می‌خورد.

گاهی نیز تغییر حجم مداوم سنگ‌ها شکستگی‌هایی در آنها به وجود می‌آورد که این شکستگی‌ها در مراحل بعد، در نتیجه تاثیر سایر هوازدگی‌ها باعث تخریب سنگ می‌شود.

۳-۳-۳- عدم تجانس سنگ‌ها

سنگ‌ها معمولاً متجانس نیستند و از کانی‌های مختلفی تشکیل شده‌اند. از آنجا که ضریب انبساط حرارتی کانی‌های مختلف لزوماً یکسان نیست، در اثر تغییر دما، کانی‌های مختلف سنگ به گونه‌ای نابرابر منبسط می‌شوند و همین امر سبب تولید نیروهای داخلی (تنش) در سنگ می‌شود که در اثر تکرار به متلاشی شدن آن می‌انجامد.

تأثیر این پدیده در مواردی که سنگ از کانی‌های درشت تشکیل شده بیشتر است.

۳-۴-۳- تبلور نمک‌ها

در مناطقی که آب و هوای خشک دارد دمای هوا باعث تبخیر سریع آب موجود در شکاف سنگ‌ها می‌شود و در نتیجه املاح موجود در آن رسوب می‌کنند. در مرحله بعد تبلور این نمک‌ها، باعث ایجاد فشارهای ناشی از تبلور و در نتیجه تخریب سنگ می‌شود.

۳-۴-۳- هوازدگی شیمیایی

مراحلی که طی آن عوامل شیمیایی سنگ را تجزیه و تخریب می‌کنند هوازدگی شیمیایی نامیده می‌شود. در این نوع هوازدگی، وجود آب یکی از عوامل اساسی است زیرا آب با عناصر موجود در هوا و زمین ترکیب می‌شود و اسیدها و بازهای مختلف را تولید می‌کند که این مواد باعث فعل و انفعالات شیمیایی و تغییر سنگ‌ها می‌شوند [۹].

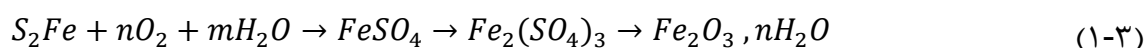
بر عکس هوازدگی فیزیکی، هوازدگی شیمیایی در اعماق نیز اثر می‌کند. مثلاً در نواحی کوهستانی گاهی اثرات آن تا عمق ۱۰۰ متری نیز دیده شده است. به طور کلی می‌توان گفت که این نوع هوازدگی حتی در نواحی خشک بیشتر از سایر هوازدگی‌ها در تخریب سنگ‌ها موثر است.

هوازدگی شیمیایی باعث تغییرات زیر می‌شود:

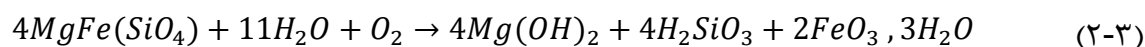
- ازدیاد حجم همراه با ایجاد فشارهای داخلی و تغییر شکل در سنگ‌ها
- تشکیل مواد سبک‌تر
- خرد شدن سنگ‌ها و در نتیجه ایجاد سطح آزاد بیشتر جهت تأثیر سایر هوازدگی‌ها
- تشکیل کانی‌های با ثبات‌تر در شرایط موجود
- از بین رفتن جلای کانی

۳-۴-۱- اکسیداسیون

هنگامی که دو عامل هوا و آب وجود داشته باشد، عمل اکسیداسیون که معمولی‌ترین تغییرات سنگ‌ها است صورت می‌گیرد. یکی از مشخص‌ترین مراحل اکسیداسیون، تاثیر آب اکسیژن‌دار بر سولفورها است که در نتیجه آن سولفورها به سولفات‌ها، کربنات‌ها و اکسیدها تجزیه می‌شوند. مثلاً این تجزیه که به نام دگرسانی نیز خوانده می‌شود در مورد پیریت به صورت زیر است:

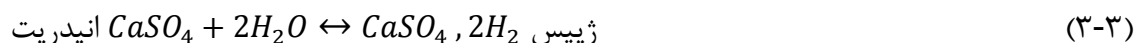


همانطوری که دیده می‌شود اولین محصول اکسیداسیون سولفات فرو است و در مرحله بعد در اثر تکرار فرآیند، به ترتیب سولفات فریک و لیمونیت (اکسید آهن هیدراته) تولید می‌شود. به همین دلیل است که در اغلب معادن و سولفورهای فلزی آهن‌دار، قسمت‌های سطحی در اثر اکسیداسیون به اکسید آهن قهوه‌ای تبدیل می‌شود و این جسم روی تمامی ماده معدنی را به صورت پوششی از اکسیدهای آهن، به نام کلاهک آهنی می‌پوشاند. اکسیداسیون در تمامی کانی‌های فرومنیزیم دیده می‌شود. مثلاً تجزیه الیون‌ها به صورت زیر انجام می‌شود:



۳-۴-۲- هیدراته‌شدن

تاثیر آب بر روی کانی‌ها به نام هیدراته‌شدن موسوم است که در نتیجه آن کانی آب جذب می‌کند. به عنوان یکی از معمولی‌ترین حالات می‌توان تبدیل انیدریت به ژیپس را نام برد:

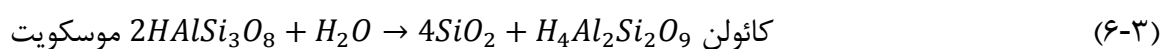
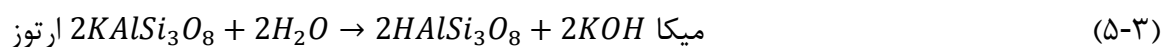


تبدیل هماتیت به لیمونیت نیز جزو معمول‌ترین حالات این نوع تجزیه است:



۳-۴-۳- هیدرولیز

هیدرولیز عملی است که در اثر تاثیر آب عامل (OH) وارد فرمول شیمیایی جسم شده و سبب تغییر ساختمان شیمیایی آن می‌شود. بر خلاف عمل هیدراته‌شدن که معمولاً فعل و انفعال دو طرفه است، در اینجا یک طرفه است و به آسانی قابل برگشت نیست. از جمله این مراحل می‌توان تبدیل فلدسپات‌ها به میکاها و کائولن را نام برد:



پتاسی که در اثر عمل بالا تولید می‌شود با دی‌اکسیدکربن هوا ترکیب می‌شود و کربنات پتاسیم تولید می‌کند که جسم اخیر به علت قابلیت انحلال، توسط آب حاوی دی‌اکسید کربن از محیط عمل خارج می‌شود.

۳-۴-۴- انحلال

آب چه به تنهایی و چه همراه با سایر عوامل مثل دی‌اکسیدکربن باعث انحلال سنگ‌ها و در نتیجه تخریب آنها می‌شود. قابلیت انحلال املاح مختلف در آب خالص متفاوت است، مثلاً در حالی که آب خالص در دمای ۱۰ درجه سانتی‌گراد قادر است ۲۶۳ گرم نمک طعام را در هر لیتر حل کند، در همین شرایط فقط قادر به انحلال ۱/۹ گرم گچ است. وجود دی‌اکسیدکربن در آب باعث افزایش قدرت انحلال آن می‌شود. مثلاً تاثیر آب خالص بر سنگ‌های آهکی ناچیز است ولی اگر آب حاوی دی‌اکسیدکربن باشد به سهولت باعث انحلال این سنگ‌ها می‌شود:



در شهرهای صنعتی، در اثر احتراق سوخت‌های مختلف مثل زغال‌سنگ و نفت همیشه مقداری دی‌اکسیدکربن و دی‌اکسیدگوگرد در هوا وجود دارد که به هنگام باران این گازها در آب حل می‌شوند و به علت تشکیل اسیدهای H_2CO_3 و H_2SO_4 ، قابلیت انحلال آب افزایش می‌یابد.

۳-۵- تاثیر عوامل مختلف در هوازدگی

عوامل مختلفی را که در شدت هوازدگی و نحوه آن موثرند می‌توان به شرح زیر تقسیم کرد [۱۰]:

۳-۵-۱- نوع سنگ

از نظر کلی می‌توان گفت کانی‌هایی که در سنگ‌ها دیده می‌شوند اکثراً در شرایطی غیر از شرایط فعلی به وجود آمده‌اند. مثلاً کانی‌های سنگ‌های آذرین در شرایط فشار و دمای بالا تولید شده‌اند و شرایط تشکیل سنگ‌های رسوبی نیز با شرایط سطح زمین متفاوت است. بنابراین، کانی‌ها و در نتیجه سنگ‌ها که از تجمع آنها به وجود می‌آیند در شرایط موجود زمین به حالت تعادل نیستند و همانطوری که دیده شد در اثر عوامل مختلف هوازدگی، تجزیه و به مواد دیگر تبدیل می‌شوند. اما مقاومت کانی‌ها در برابر عوامل هوازدگی متفاوت است و در شرایط ثابت، یک کانی ممکن است با سرعت زیاد تجزیه شود و کانی دیگر بدون تغییر باقی بماند. بنابراین مقاومت کانی و نوع سنگ نیز در نحوه و شدت هوازدگی موثر است.

۳-۵-۲- شیب زمین (توپوگرافی)

در مواردی که شیب سطح زمین زیاد است ذرات خرد شده در اثر وزن خود و یا اولین باران به قسمت‌های پایین حمل می‌شوند و بدین ترتیب قسمت تازه‌ای از سنگ‌ها در معرض هوازدگی قرار می‌گیرد. بنابراین در چنین مواردی هوازدگی با سرعت بیشتری انجام می‌شود. بر عکس، اگر شیب زمین کم باشد اولین قشرهای هوازده مانع نفوذ عوامل هوازدگی به پایین شده و باعث کندی هوازدگی می‌شود.

۳-۵-۳- آب و هوا

از آنجا که رطوبت و دما از عوامل مهم هوازدگی به شمار می‌آیند، لذا نوع آب و هوا در شدت هوازدگی تأثیر به‌سزائی دارد و طبیعتاً در آب و هوای گرم و مرطوب تأثیر آن زیادتر از آب و هوای گرم و خشک است. مثلاً سنگ‌های آهکی که به علت تأثیر مشترک آب و دی‌اکسیدکربن در آب و هوای مرطوب به سهولت تجزیه می‌شوند، در آب و هوای خشک بسیار مقاومند.

در اینجا به یکی از خواص آب و هوای مناطق صحرایی اشاره شده است. در این مناطق معمولاً یک قشر قهوه‌ای تا سیاه‌رنگ برآق روی سنگ‌ها را می‌پوشاند که به نام جلا یا ورنی بیابان نامیده می‌شود و قسمت اعظم آن از اکسیدهای آهن و منگنز تشکیل شده است. این مواد در اثر خاصیت مویینگی از قسمت‌های داخل به سطح می‌آید و در اثر تبخیر سریع در سطح سنگ متمرکز می‌شود.

۳-۵-۴- زمان

از عوامل مهم موثر در هوازدگی زمان است. مطالعه تجزیه سنگ‌ها در ساختمان‌های قدیمی و کوه‌ها نشان داده که برای تجزیه چند میلیمتر از سنگ، چندین صد سال و حتی هزاران سال وقت لازم است. مثلاً گرانیت و انواع دیگر سنگ‌های موجود در قسمت‌هایی از آمریکا و اروپا سطح صیقلی خود را از عصر دومین یخبندان (حدود ۱۰,۰۰۰ سال پیش) تا به حال حفظ کرده‌اند.

در اینجا به نامگذاری محصولات هوازدگی اشاره شده است. معمولاً در اثر هوازدگی قسمت‌های سطحی سنگ‌ها خرد می‌شود. اگر این قطعات خرد شده در محل باقی بماند و روی سنگ را بپوشاند، به نام خرده سنگ خوانده می‌شود ولی اکثراً در اثر شیب سطح زمین قطعات خرد شده از محل تشکیل به پایین می‌غلطند و دامنه کوه‌ها و تپه‌ها را می‌پوشانند که در این صورت به آنها واریزه اطلاق می‌شود.

۳-۶- طبقه بندی سنگ‌های هوازده برای مقاصد مهندسی

تاثیر هوازدگی و دگرسانی بر روی خواص مهندسی سنگ‌ها توسط محققان مختلفی مورد مطالعه قرار گرفته و سیستم‌های طبقه‌بندی مختلفی نیز پیشنهاد کرده‌اند. مراحل اولیه هوازدگی معمولاً با تغییر رنگ مواد شروع می‌شود، که این تغییرات با افزایش درجه هوازدگی از تغییر رنگ کم تا به شدت تغییر رنگ یافته زیاد می‌شوند. از آنجا که هوازدگی باعث تغییر در خواص مهندسی سنگ می‌شود، به ویژه اینکه معمولاً منجر به افزایش تخلخل و کاهش در مقاومت و تراکم می‌شود، این تغییرات را در میزان تغییر رنگ منعکس می‌کند. به عنوان محصول هوازدگی مواد سنگ تا زمانی که خاک شکل بگیرد تجزیه می‌شوند. از این رو مراحل مختلف این فرآیند باید شناسایی شوند [۱۱].

تلاش‌های متعددی برای طبقه‌بندی مهندسی سنگ‌های هوازده صورت گرفته است. تعیین طبقه‌بندی و کمی‌سازی دگرسانی کانی‌ها و ضعف ساختاری با استفاده از میکروسکوپ یک راه‌حل پیچیده می‌باشد. برخی دیگر با ترکیبی از آزمون‌های ساده درجه هوازدگی را مشخص کرده‌اند. برخی از اولین روش‌های ارزیابی درجه هوازدگی با استفاده از مطالعات میدانی سنگ بکر صورت گرفته است.

تعیین درجه هوازدگی در ابتدا بر اساس یک توصیف ساده از مشخصات زمین‌شناسی توسط مویه^۱ (۱۹۵۵) توسعه داده شده است. یک سیستم طبقه‌بندی برای درجات هوازدگی مشاهده شده در کوه برفی استرالیا ارائه داده است. طبقه بندی‌های مشابه متعاقباً بیشتر برای سنگ گرانیت توسعه یافته‌اند. بعضی دیگر بر روی انواع مختلف سنگ کار کردند و سیستم طبقه‌بندی اصلاح شده‌ای را پیشنهاد کردند. به عنوان مثال، طبقه‌بندی گچ هوازده و گلسنگ (مارن) هوازده به ترتیب توسط واردتال^۲ (۱۹۶۸) و چاندلر^۳ (۱۹۶۹) توسعه داده شدند. معمولاً بالاترین درجه هوازدگی در یک پروفیل تک سنگ هوازده مربوط به

^۱ Moyer

^۲ Vardetal

^۳ Chandler

سطح می‌باشد. اما این لزوماً در شرایط پیچیده زمین‌شناسی صحت ندارد. با این حال می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. چنین طبقه‌بندی را می‌توان برای نشان دادن توزیع درجه هوازدگی برای کارهای مهندسی ویژه مورد استفاده قرار داد [۱۱].

با توجه به ترکیب کانی‌ها و بافت نفوذی از خواص فیزیکی سنگ، تکنیک سنگ‌شناسی برای ارزیابی تغییرات پی‌درپی کانی‌شناسی و بافت در اثر هوازدگی می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. بر این اساس ایرفان و دیرمن^۱ (۱۹۷۸) یک روش کمی ارزیابی درجه هوازدگی گرانیات را بر حسب سنگ‌شناسی ماکروسکوپی و میکروسکوپی ارائه کردند [۱۲]. فاکتورهای ماکروسکوپی شامل ارزیابی میزان تغییر رنگ، تجزیه و فروپاشی سنگ می‌باشد. تحلیل میکروسکوپی به ارزیابی ترکیب کانی‌ها و درجه هوازدگی بوسیله تحلیل کیفی و تحلیل ریزترک‌ها می‌پردازد. تغییرات شیمیایی مختلف در سنگ نیز برای تعیین (ارزیابی) درجه هوازدگی مورد استفاده قرار گرفته است (کیم و پارک^۲ ۲۰۰۳). به طور مشابه، خواص فیزیکی مانند چگالی حجمی و شاخص‌هایی مانند تست جذب سریع برای تشخیص درجات مختلف هوازدگی مورد استفاده قرار گرفته است [۱۱].

۳-۶-۱- طبقه‌بندی بر اساس تغییرات ظاهری و رنگ

مرحله نخست طبقه‌بندی هوازدگی معمولاً بوسیله تغییرات رنگ ماده سنگ صورت می‌گیرد که تغییرات رنگ با افزایش درجه هوازدگی افزایش می‌یابد. چون هوازدگی تغییراتی را در خصوصیات مهندسی سنگ ایجاد می‌کند این تغییرات در میزان تغییر رنگ منعکس می‌شود. عبارت دیگر خصوصیات مهندسی یک سنگ با تغییرات رنگ کم ممکن است بطور قابل ملاحظه‌ای از سنگ‌های مشابهی که تغییرات رنگ بالایی دارند متفاوت باشد [۱۲].

¹ Irfan & Dearman

² Kim & Park

انون (۱۹۹۵) و (۱۹۸۱) ISRM سیستم طبقه‌بندی سنگ‌های هوازده را بر اساس مشاهدات وضعیت ظاهری توده سنگ بر طبق درجه هوازدهی در ۶ کلاس پیشنهاد کرده‌اند (جدول ۱-۳) [۱].

جدول ۱-۳: طبقه‌بندی پیشنهادی برای سنگ‌های هوازده (ISRM, 1981) [۱]

درجه	نشانه	نشانه‌های تشخیص
سالم F	I	نشانه مشخصی از تجزیه یا رنگ برگشتگی دیده نمی‌شود. بر اثر ضربه چکش صدای زنگ داری از سنگ بر می‌خیزد.
کمی هوازده WS	II	رنگ برگشتگی جزئی به سمت داخل درزه‌ها و دیگر اشکال باز دیده می‌شود. دیگر مشخصات مانند F است.
نیمه هوازده WM	III	رنگ برگشتگی در همه جا توسعه یافته، کانی‌های ضعیف‌تر مثل میکا تجزیه شده‌اند. مقاومت سنگ تا حدی کمتر از نمونه سالم است، ولی نمی‌توان مغزه حفاری را با دست شکست و یا با چاقو خراشاند. بافت سنگ محفوظ مانده است.
به شدت هوازده WH	IV	اغلب کانی‌های سنگ تا حدی تجزیه شده‌اند. نمونه سنگ به زحمت با دست شکسته می‌شود یا با چاقو خراش بر می‌دارد. در توده سنگ هسته‌های هوازده هنوز وجود دارد، بافت نامشخص است.
کاملاً هوازده WC	V	کانی‌ها به خاک تبدیل شده‌اند ولی فابریک و ساخت سنگ هنوز محفوظ مانده است. نمونه به سهولت خرد می‌شود.
خاک برجا RS	VI	حالت پیشرفته تجزیه در خاک‌های پلاستیک دیده می‌شود. فابریک و ساخت سنگ کاملاً از بین رفته است. تغییر حجم زیادی حاصل شده است.

۳-۶-۲- طبقه‌بندی بر اساس سرعت موج اولتراسونیک

آزمایشات فیزیکی برای شناسایی درجات هوازدهی بوسیله لیو^۱ (۱۹۶۷) صورت گرفته است که ضریب مربوط به هوازدهی (k) را برای سنگ‌های گرانیتی بر اساس سرعت اولتراسونیک مواد سنگ بر طبق رابطه زیر توسعه داده است [۲]:

$$k = \frac{v_u - v_w}{v_u} \quad (۸-۳)$$

که v_u و v_w به ترتیب سرعت‌های اولتراسونیک سنگ سالم و سنگ هوازده می‌باشند (جدول ۲-۳).

¹ Liev

جدول ۳-۲: تقسیم بندی سنگ‌های هوازده بر اساس سرعت موج [۲]

درجه هوازدهی	سرعت اولتراسونیک (m/s)	ضریب هوازدهی
سنگ سالم	بالای ۵۰۰۰	۰
سنگ با کمی هوازدهی	۴۰۰۰-۵۰۰۰	۰-۰/۲
سنگ با هوازدهی متوسط	۳۰۰۰-۴۰۰۰	۰/۲-۰/۴
سنگ با درجه هوازدهی بالا	۲۰۰۰-۳۰۰۰	۰/۴-۰/۶
سنگ با درجه هوازدهی بسیار بالا	زیر ۲۰۰۰	۰/۶-۱/۰

امواج اولتراسونیک توسط افراد مختلف برای تعیین درجه هوازدهی مخصوصاً سنگ‌های آذرین بکارگرفته شده است. آقای فورت^۱ و همکارانش در منطقه وسیعی در هنگ کنگ روی سنگ‌های گرانیته، ولکانیکی و رسوبی پی‌جویی لرزه‌ای انجام دادند و رابطه بین سنگ‌های هوازده و سرعت لرزه‌ای را طبق جدول ۳-۳ بدست آوردند [۸].

جدول ۳-۳: ارتباط بین هوازدهی و سرعت لرزه‌ای در منطقه‌ای در هنگ کنگ [۸]

درجه هوازدهی	شرایط هوازدهی	سرعت (m/s)
V,VI	خاک، سنگ کاملاً هوازده	۳۰۰-۱۰۰۰
IV	سنگ، درجه هوازدهی بالا	۱۰۰۰-۲۲۰۰
III	سنگ، درجه هوازدهی متوسط	۲۲۰۰-۳۰۰۰
I,II	کم هوازده تا سنگ سالم	بیشتر از ۳۰۰۰

۳-۶-۳- طبقه بندی بر اساس مقدار پس رانش چکش اشمیت

چکش اشمیت برای اولین بار در سال ۱۹۴۸ از طرف یک مهندس سوئیسی برای اندازه‌گیری سختی سطح بتون ساخته شد. دستگاه مزبور بعدها در مسائل مربوط به معدنکاری و تعیین خواص مکانیکی سنگ و ذغال مورد استفاده قرار گرفت.

¹ R.A.Forth

این دستگاه بعدها برای مطالعه و اندازه‌گیری خواص مکانیکی سنگ‌ها در آزمایشگاه و بصورت درجا مورد استفاده قرار گرفت و روابط خوبی بین سختی اشمیت، وزن مخصوص سنگ و مقاومت فشاری تک محوره و مدول الاستیسیته سنگ بدست آمد.

چکش اشمیت در موارد متعددی در زمینه‌های مربوط به معدنکاری و تعیین خواص مکانیکی سنگ‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. یکی از این موارد، مطالعه‌ای است که آقای موریوکا^۱ برای طبقه‌بندی سنگ‌های هوازده در حالتی که چند نوع سنگ آذرین در منطقه وجود داشته باشد انجام داده است. جدول ۳-۴ درجه هوازدگی را بر اساس تابعی از داده‌های چکش اشمیت برای چهار نوع سنگ کوارتز دیوریت، آندزیت، داسیت و بازالت برای منطقه مزبور نشان می‌دهد [۸].

جدول ۳-۴: نتایج داده‌های چکش اشمیت برای طبقه‌بندی سنگ‌های هوازده [۸]

نوع سنگ	کوارتز دیوریت				آندزیت، داسیت، بازالت			
درجه هوازدگی	۱	۲	۳	۴	۱	۲	۳	۴
میزان پس رانش چکش اشمیت	>۶۰	۴۵-۶۰	۳۰-۴۵	۰-۳۰	>۵۵	۴۰-۵۵	۲۵-۴۰	۰-۲۵

۳-۶-۴ - طبقه‌بندی سنگ‌های هوازده بر اساس درجه سختی

میزان سختی سنگ از دیگر ویژگی‌های سنگ می‌باشد که می‌توان برای طبقه‌بندی سنگ‌های هوازده بکار برد. این روش برای طبقه‌بندی سنگ‌های هوازده و ارزیابی پارامترهای ژئومکانیکی پی‌سنگ پل Honshu-Shicocu در ژاپن بکار گرفته شده است. جدول ۳-۵ طبقه‌بندی سنگ هوازده را بر اساس معیار سختی برای پل مذکور نشان می‌دهد [۸].

^۱ Morioka

جدول ۳-۵: معیار سختی سنگ برای پی سنگ هوازده پل (Honsho_shikoku) [۸]

درجه هوازدگی	معیار
A	تکه‌های سنگ در برخورد با چکش به آسانی نمی‌شکنند، با صدای فلزی، سالم، کانی‌های تشکیل دهنده متلاشی نشده‌اند.
B	هنگامی که با چکش برخورد می‌کند صدای تشدید کننده فلزی ایجاد می‌کند، درزه‌ها به هم چسبیده هستند، سالم.
C	هنگامی که به آرامی به چکش برخورد می‌کند می‌شکند. صدای تشدید ایجاد می‌کند (با ضربه زدن بوسیله فشار انگشت برای بیشتر از ۲۰ مرتبه تکه سنگ معمولاً دست نخورده باقی می‌ماند).
D	به ندرت ممکن است با فشار انگشت خرد شود بیش از ۷۰٪ تکه‌های سنگ بوسیله ۱۰-۷ مرتبه ضربه انگشت به تکه‌های متوسط تا کوچک خرد می‌شوند.
E ₁	با فشار انگشت خرد می‌شوند (با ۳-۵ بار ضربه انگشت ۵۰٪-۳۰٪ تکه‌ها به شکل پودر و ۹۰٪-۵۰٪ آنها به ذرات کوچک تبدیل می‌شوند).
E ₂	عموماً با ضربه انگشت به شکل پودر در می‌آیند (با ۳-۱ مرتبه ضربه انگشت بیش از ۷۰٪-۵۰٪ تکه‌ها به شکل پودر در می‌آیند).

۳-۶-۵- طبقه بندی بر اساس شاخص فاصله‌داری شکستگی‌ها

این شاخص بعنوان فاصله میانگین شکستگی‌ها در مغزه‌ها و یا رخنمون سنگ تعریف می‌شود. فاصله شکستگی‌ها معمولاً با افزایش هوازدگی کاهش می‌یابد. بنابراین شاخص فاصله‌داری می‌تواند بعنوان راهنمای درجه هوازدگی برای یک نوع توده‌سنگ مخصوص باشد. نمونه‌ای از موارد استفاده این شاخص در طبقه‌بندی گرانیات هوازده در پی سنگ پل Honshu-Shikoku توسط ایشیکاوا^۱ و همکارانش در ژاپن صورت گرفته است.

جدول ۳-۶ خلاصه نتایج گرفته شده از شاخص فاصله‌داری شکستگی‌ها برای پی سنگ پل مذکور را

نشان می‌دهد [۸].

¹ K.Ishikawa

جدول ۳-۶: طبقه بندی سنگ‌های هوازده بر اساس شاخص فاصله‌داری [۸]

درجه	معیار
I	بزرگتر از ۵۰ سانتی‌متر
II	۳۰-۵۰ سانتی‌متر
III	۱۵-۳۰ سانتی‌متر
IV	۵-۱۵ سانتی‌متر
V	کوچکتر از ۵ سانتی‌متر

شرایط درزه و شکستگی‌ها نیز از جمله ویژگی‌هایی است که می‌تواند برای طبقه‌بندی سنگ‌های هوازده مورد استفاده قرار گیرد. برای پی‌سنگ پل Honshu-Shikoku ذکر شده در بالا، یک طبقه‌بندی دیگر بر اساس این ویژگی صورت گرفت که در جدول ۳-۷ آمده است [۸].

جدول ۳-۷: طبقه بندی سنگ‌های هوازده پی سنگ پل Honshu_shikaku بر اساس شرایط درزه‌ها [۸]

درجه هوازدگی	معیار
A	درزه‌ها بازشدگی ندارند. تغییر رنگ و یا تخریب و تجزیه سنگ دیده نمی‌شود.
B	در امتداد ترک‌ها، لیمونیت یا رس بسیار نازک (به رنگ قهوه‌ای) جای گرفته است.
C	در امتداد ترک‌ها، سنگ متلاشی شده است. ۱-۲ cm رس (سفید مایل به خاکستری) درون درزه‌ها قرار گرفته است.
D	درزه باز است.

۳-۶-۶- طبقه بندی مهندسی سنگ بر اساس اندیس بار نقطه‌ای

هوازدگی سنگ‌ها اغلب سبب کاهش مقاومت سنگ می‌شود مگر در مواردی که سیمانی شدن ثانویه توسط سیلیس، اکسیدهای آهن یا کربنات‌ها بعنوان نتایج فرآیندهای هوازدگی صورت بگیرد. برای یک سنگ خاص معمولاً انتظار می‌رود با افزایش درجه آلتراسیون مقاومت آن کاهش یابد.

آزمایش اندیس بار نقطه‌ای بعنوان یک وسیله سریع و بسیار مفید برای تعیین مقاومت‌های نسبی

سنگ‌های هوازده با انجام تعداد زیادی از آن بکار گرفته می‌شود. بر پایه چنین آزمایشاتی فوکس^۱ و همکارانش (۱۹۷۱) طبقه‌بندی مقاومتی سنگ را بر اساس اندیس بار نقطه‌ای بر طبق جدول ۳-۸ ارائه دادند [۱۳].

جدول ۳-۸: طبقه بندی بر اساس اندیس بار نقطه‌ای [۱۳]

تشریح وضعیت سنگ	اندیس بار نقطه‌ای I_{cs} (Mpa)
مقاومت فوق‌العاده زیاد	> 10
مقاومت بسیار زیاد	$3-10$
مقاومت زیاد	$1-3$
مقاومت متوسط	$0.3-1$
مقاومت کم	$0.1-0.3$
مقاومت خیلی کم	$0.03-0.1$
مقاومت فوق‌العاده کم	< 0.03

آزمایش بار نقطه‌ای یک اندیس مقاومتی است که می‌تواند در خلال مدت تهیه نقشه‌های صحرایی و مغزه‌گیری برای تعیین مقاومت‌های نسبی بکار گرفته شود.

مزایای این روش آن است که نیروهای کوچکتر مورد نیاز بوده و در نتیجه دستگاه آزمایش کوچک و قابل حمل است. از طرف دیگر نمونه‌ها به هر شکلی (مغزه و یا توده نامنظم) قابل استفاده بوده و احتیاج به ماشین‌کاری ندارند و همچنین سنگ‌های خرد و شکسته قابل آزمایش مجدد هستند [۱۳].

۳-۶-۷- طبقه بندی بر اساس نسبت سنگ به خاک (RSR^2)

نسبت سنگ به خاک در یک توده هوازده سنگ بلورین، یک شاخص بحرانی درجه هوازدهی است. این مسأله از طرف زمین‌شناسان مهندسی که در صحرا کار کرده‌اند تصدیق شده است. تعیین این نسبت

¹ Fookes

² Rock Structure Rate

در صحرا و یا مغزه‌های حفاری بصورت کاملاً ساده‌ای امکانپذیر است. این نسبت یک شاخص ضروری در طبقه‌بندی سنگ‌های گرانیتی هوازده مخصوصاً در تشخیص درجات I، II و V است. آن در توده سنگ‌های رسوبی اغلب کاربرد ندارد (جدول ۳-۹) [۱۱].

جدول ۳-۹: نسبت سنگ به خاک برای سنگ‌های هوازده بلوری [۱۱]

درجه هوازدهی	RSR	توضیحات
سالم I	۹۵-۱۰۰	مقداری خاک در درزه‌های بزرگ
کمی هوازده II	۹۰-۹۵	مقداری خاک در تمام درزه‌ها
با هوازدهی متوسط III	۶۰-۹۰	هوازدهی در تمام درزه‌ها پیشرفته است و سنگ‌های مغزه بزرگ هستند.
درجه هوازدهی بالا IV	۳۰-۶۰	سنگ‌های مغزه در توده خاک کوچک هستند.
کاملاً هوازده V	۰-۳۰	حتی سنگ‌های مغزه هم ندارند.

۳-۶-۸- طبقه‌بندی سنگ‌های هوازده بر اساس اندیس (SMC^۱) و (MFI^۲)

ایرفان و دیرمن (۱۹۷۸) شاخص پتروگرافی PI^۳ را که نسبت درصد کانی‌های اولیه به کانی‌های ثانویه است، برای تعیین درجه هوازدهی ارائه دادند. از طرفی انون (۱۹۸۲) شاخص مشابه (SMC) را که نسبت کانی‌های ثانویه به کل کانی‌ها (کانی‌های اولیه و ثانویه) است پیشنهاد کرد. در این تحقیق شاخص دیگری که اصطلاحاً اندیس ریزشکاف‌ها (MFI) نامیده می‌شد، تعریف شد که نسبت مساحت پوشیده شده بوسیله ریزشکاف‌ها به کل مساحت نمونه است. (SMC) و اندیس (MFI) در مقاطع میکروسکوپی با استفاده از تکنیک شمارش نقطه‌ای هاتچینسون^۴ (۱۹۷۴) اندازه گرفته می‌شوند. جدول ۳-۱۰ مقادیر هر

^۱ Secondary Minerals Criteria

^۲ Micro Fracture Index

^۳ Petrographic Index

^۴ Hutchinson

دوی SMC و MFI را برای سینیت هوازده در ناحیه Alba (شمال AL-Baha در عربستان سعودی) نشان می‌دهد [۱۴].

جدول ۳-۱۰: اندیس هوازدگی برای سینیت هوازده [۱۴]

نسبت کانی ثانویه (%) SMC		اندیس ریز شکاف (%) MFI		درجه هوازدگی
محدوده	میانگین	محدوده	میانگین	
۴/۹-۶/۹	۶/۱	۱/۸-۳/۳	۲/۶	کم
۲۰/۴-۲۴/۳	۲۲/۵	۷/۹-۹/۶	۸/۷	متوسط
۴۲/۷-۴۵/۱	۴۳/۵	۱۸/۴-۲۹/۵	۲۳/۱	بالا
۷۷/۰-۷۹/۳	۷۸/۳	۳۵/۸-۵۰/۷	۴۲/۸	کامل

۳-۶-۹- طبقه‌بندی بر اساس شاخص کیفیت سنگ

RQD تابعی از فاصله و شرایط شکستگی‌ها در سنگ است. بنابراین انتظار می‌رود بتواند درجه دگرسانی را نشان بدهد. اطلاعات بسیار کمی در مورد ارتباط RQD و هوازدگی وجود دارد ولی در مواردی نشان داده شده است که RQD با افزایش آلتراسیون از درجه III به بعد کاهش می‌یابد.

برای سنگ‌های با درجه آلتراسیون کمتر از III، RQD فقط به فاصله شکستگی‌ها بستگی دارد و مستقل از هوازدگی است. بنابراین آن برای درجات هوازدگی I و II نمی‌تواند شاخص خوبی باشد.

استفاده از این کمیت در سنگ‌های آذرین و سنگ‌های رسوبی با لایه‌های ضخیم، مانند ماسه‌سنگ و سنگ آهک منجر به نتایج اطمینان بخش‌تر می‌گردد و در سنگ‌های دارای تورق و شیسستوزیته، ملاحظات ویژه‌ای لازم دارد [۱۸].

۳-۶-۱۰- طبقه‌بندی بر اساس تخلخل

فرآیند هوازدگی باعث افزایش خلل و فرج و نتیجتاً تخلخل سنگ می‌شود. حجم خلل و فرج و

توزیع اندازه حفره‌ها بوسیله تزریق جیوه بداخل هر نوع سنگ تعیین می‌شود.

عموماً درجات هوازدگی I تا III شاخص‌های پوکی بسیار پائینی دارند و حفره‌ها عموماً ریز ترک‌ها هستند. گسترش اساسی حفره‌ها بعد از درجه III هوازدگی شروع می‌شوند و تا درجات آخر هوازدگی ادامه می‌یابند. ریز ترک‌های از پیش موجود نیز ممکن است توسعه یابند.

فلدسپارها به رس‌ها آلتره می‌شوند که ممکن است از سنگ شکسته شوند و یا اغلب ممکن است در درون ریز ترک‌ها ته نشست شوند. نهایتاً در مراحل آخر هوازدگی مادامی که سنگ اساساً ساختمان بلوری اولیه خودش را از دست نداده است (درجه آلتراسیون V) حجم حفره توسط میکرو حفره‌های با قطر کمتر از یک میکرون کنترل می‌شود.

این نتیجه‌گیری از روی شواهد مشاهده‌ای مطالعات^۱ SEM گرفته شده است. در این مرحله سنگ شامل هزاران حفره از درون بهم متصل با شکل‌ها و اندازه‌های متفاوت اما اغلب کوچکتر از یک میکرون است [۱۰].

۳-۷- تاثیر هوازدگی و دگرسانی بر ویژگی‌های ژئومکانیکی سنگ‌ها

فرآیندهای هوازدگی شامل تخریب و تلاشی خصوصیات توده سنگ و ماده سنگ است. دلایل این امر نیز واضح است، هوازدگی نتیجه سست شدن و شکستن پیوندهای بین دانه‌های کانی در ماده سنگ و بین بلوک‌ها در توده سنگ می‌باشد. کانی‌های با مقاومت و مدول الاستیسیته بالا به کانی‌های با مقاومت و مدول الاستیسیته پائین آلتره می‌شوند، بطوریکه تغییرات بارزی در الگوی بافت رخ می‌دهد. در ارزیابی تاثیر هوازدگی، داده‌های سیستماتیک کمی موجود است ولی مطالعه محدودی که روی گرانیته‌ها، رسوبی‌های آواری و سنگ‌های دگرگونی کم عیار صورت گرفته است، کافی است تا برخی نتایج در رابطه

¹ Scanning Electron Microscope

با تاثیر آن بر روی مقاومت‌های فشاری، کششی، الاستیسیته، دانسیته، رطوبت، تخلخل و نفوذپذیری گرفته شود [۴].

۳-۷-۱- رطوبت، تخلخل و دانسیته

همچنان که هوازدگی پیشرفت می‌کند تمایل عمومی بر آن است که مقدار درصد جذب آب و تخلخل افزایش یابد و دانسیته کاهش پیدا کند. روندها برای برخی از سنگ‌ها در جداول ۳-۱۱ تا ۳-۱۳ نشان داده شده‌اند. بازشدگی شکستگی‌ها در توده سنگ با افزایش زیاد تخلخل در توده سنگ همراه است که این امر باعث تغییراتی در میزان دانسیته و مقدار درصد جذب آب می‌شود [۱۳].

جدول ۳-۱۱: تخلخل سنگ‌های هوازده [۱۳]

سنگ	I	II	III	IV	V
ماسه سنگ	۱۴/۱۸	۲۰/۷۰	۲۱/۴۲	۲۲/۰۷	-
ماسه سنگ	۹/۰۳	۱۰/۴۵	۱۲/۴۶	۱۴/۳۲	-
گرانیت	۰/۲۷	۲/۷۸	۳/۷۸	۹/۶۰	۲۰/۲۰
اسلیت	۵/۳۸	۱۱/۰۰	۱۷/۶۵	۱۵/۴۰	۱۸/۷۷
فیلیت	۷/۰۸	۸/۱۱	۱۱/۸۳	۱۱/۰۱	-

جدول ۳-۱۲: دانسیته سنگ‌های هوازده (اشباع و خشک) [۱۳]

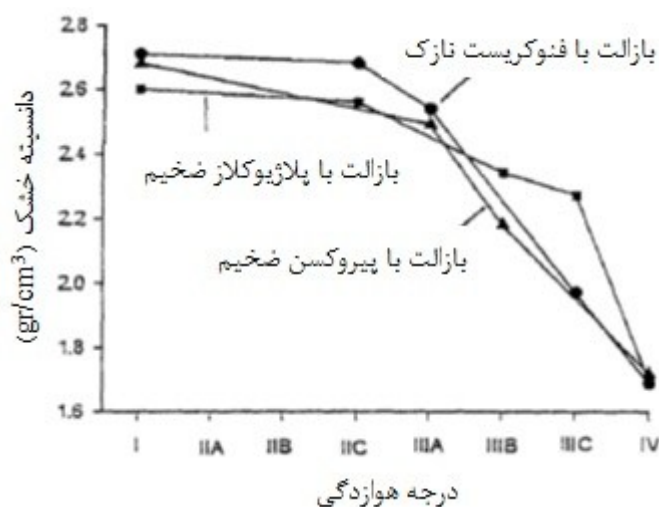
سنگ	دانسیته (gr/cm^3)									
درجه هوازدگی	I		II		III		IV		V	
	اشباع	خشک	اشباع	خشک	اشباع	خشک	اشباع	خشک	اشباع	خشک
ماسه سنگ	-	۲/۲۲	-	۲/۰۹	-	۲/۰۶	-	۲/۰۳	-	-
ماسه سنگ	۲/۵۶	-	۲/۴۰	-	۲/۳۰	-	۲/۱۸	-	۲/۰۰	-
اسلیت	۲/۷۴	۲/۶۹	۲/۴۰	۲/۲۹	۲/۴۲	۲/۱۹	۲/۴۶	۲/۳۱	۲/۰۲	۱/۸۵
گرانیت	۲/۶۱	-	۲/۴۸	-	۲/۵۶	-	۲/۴۳	-	۲/۲۳	-
فیلیت	۲/۶۹	۲/۶۲	۲/۶۳	۲/۴۴	۲/۴۳	۲/۴۲	۲/۵۵	۲/۴۵	-	-

جدول ۳-۱۳: مقدار رطوبت اشباع سنگ‌های هوازده [۱۳]

سنگ	مقدار رطوبت اشباع (%)				
	V	IV	III	II	I
ماسه‌سنگ	۷/۴۱	۵/۰۶	۳/۴۲	۲/۱۰	۲/۱۰
اسلیت	۱۰/۱۶	۶/۶۷	۷/۹۷	۴/۸۴	۲/۰۰
گرانیت	۱۰/۰۲	۴/۱۳	۱/۵۲	۱/۰۹	۰/۱۱
فیلیت	-	۴/۲۲	۴/۹۰	۳/۱۸	۲/۷۰

رابطه بین دانسیته خشک و درجه هوازدگی در شکل ۳-۱ نشان داده شده است. همانطور که انتظار

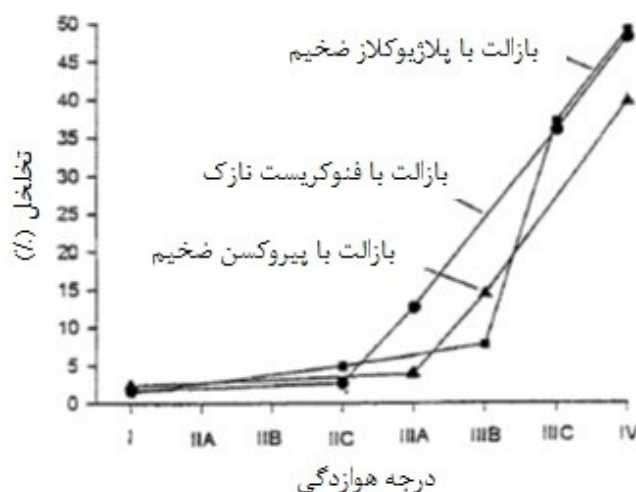
می‌رود با افزایش درجه هوازدگی دانسیته خشک کاهش می‌یابد [۴].



شکل ۳-۱: تغییرات دانسیته خشک بازالت‌های هوازده با درجه هوازدگی [۴]

تغییرات تخلخل برای انواع بازالت‌ها در شکل ۳-۲ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده

می‌شود با افزایش درجه هوازدگی میزان تخلخل افزایش پیدا می‌کند [۴].



شکل ۳-۲: تغییرات تخلخل بازالت‌های هوازده با درجه هوازدهی [۴]

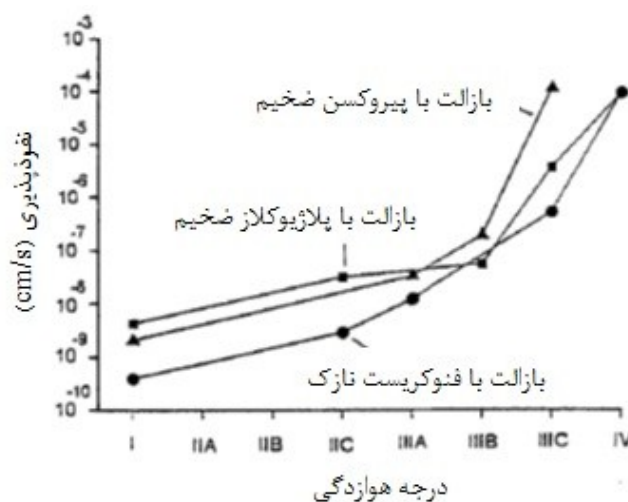
۳-۷-۲- نفوذپذیری

تغییرات در تخلخل که با پیشرفت هوازدهی رخ می‌دهد نفوذپذیری توده و ماده سنگ را تغییر می‌دهد. با پیشرفت هوازدهی مخصوصاً در درجات بالای هوازدهی که با گسترش و پراکندگی کانی‌های رسی و تشکیل سیمان‌های ثانویه همراه است ممکن است نفوذپذیری تقلیل پیدا کند.

تغییرات در نفوذپذیری اولیه گرانیت از 10^{-8} cm/s به 10^{-6} cm/s در گرانیت کم هوازده و به 10^{-4} cm/s در گرانیت کاملاً هوازده به ثبت رسیده است. اندازه‌گیری‌های نفوذپذیری در فیلیت‌ها، یک افزایش از 10^{-9} cm/s $\times 6$ برای سنگ سالم به 10^{-8} cm/s برای سنگ کاملاً هوازده را نشان می‌دهد. نفوذپذیری توده سنگ (اساساً نفوذپذیری ثانویه) مخصوصاً با هوازدهی افزایش می‌یابد، اما پرشدگی دوباره شکاف‌ها و ترک‌ها ممکن است از تاثیر آن بر روی جریان آب از بین توده سنگ جلوگیری بعمل آورد. هیچ داده منتشر شده‌ای وجود ندارد تا مطالعات سیستماتیک نفوذپذیری یک توده سنگ امکانپذیر باشد [۱۳].

رابطه بین هوازدهی و نفوذپذیری در شکل ۳-۳ نشان داده شده است. افزایش نسبی نفوذپذیری

همه بازالت‌ها با افزایش درجه هوازدهی مشاهده می‌شود [۴].

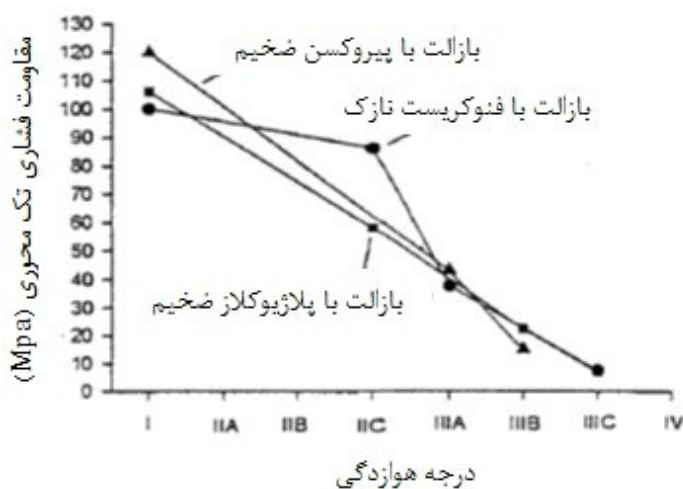


شکل ۳-۳: تغییرات نفوذپذیری بازالت‌های هوازده با درجه هوازدگی [۴]

۳-۷-۳- مقاومت فشاری تک محوری

در سنگ‌های با مقاومت بسیار بالا مانند گرانیت کاهش مقاومت بین درجه I و III ممکن است تا ۸۰٪ هم برسد. حتی در سنگ‌های با مقاومت پائین هم کاهش ممکن است بالای ۶۰٪ باشد. هنگامی که هوازدگی از درجه III بیشتر می‌رود، کاهش مقاومت با سرعت کمتری ادامه می‌یابد. از روی این ممکن است استنباط شود که سست شدن و شکستن پیوندهای بین دانه‌های کانی‌ها و گسترش ریزترک‌ها که همه از مشخصات انتقال از درجه II به III هستند عامل از دست دادن مقاومت هستند، همچنین در این مرحله کانی‌های رسی ضعیف شروع به جایگزینی کانی‌های مقاوم می‌کنند [۱۳].

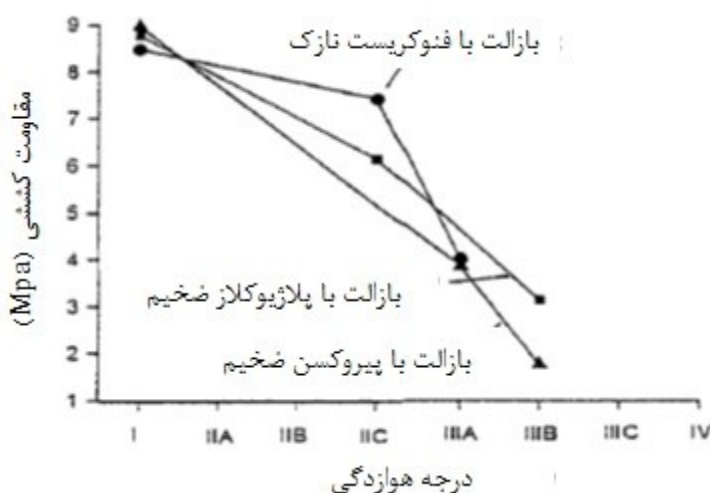
مقاومت فشاری تک محوری با تغییر بازالت‌های هوازده از سالم تا کاملاً هوازده به شدت کاهش می‌یابد. شکل ۴-۳ نشان می‌دهد که مقاومت فشاری تک محوری به شدت تحت تاثیر هوازدگی قرار می‌گیرد [۴].



شکل ۳-۴: تغییرات مقاومت فشاری تک محوری بازالت‌های هوازده با درجه هوازدگی [۴]

۳-۷-۴- مقاومت کششی

نتایج آزمایش مقاومت کششی غیر مستقیم مشابه آزمایشات مقاومت فشاری تک محوری می‌باشد. اگرچه مقاومت کششی یک پارامتر مفید می‌باشد اما انجام این آزمایش از مقاومت فشاری تک محوری دشوارتر است. نتایج در شکل ۳-۵ نشان داده شده است. کاهش تدریجی مقاومت کششی با افزایش درجه هوازدگی می‌تواند یک پارامتر مهم برای طبقه‌بندی مهندسی بازالت‌ها باشد [۴].



شکل ۳-۵: تغییرات مقاومت کششی بازالت‌های هوازده با درجه هوازدگی [۴]

۳-۷-۵- مدول یانگ

همانطوری که انتظار می‌رود با بالا رفتن درجه هوازدگی که با افزایش درزه و شکاف همراه است، کانی‌های ترد و شکننده بوسیله کانی‌های نرم و رسی جایگزین می‌شوند و افت بارزی در الاستیسیته سنگ حاصل می‌شود (جدول ۳-۱۴) [۱۳].

بدلیل نبود اطلاعات کافی، امکان بررسی وسیع حالت‌های مختلف تاثیر هوازدگی بر روی الاستیسیته وجود ندارد.

جدول ۳-۱۴: مدول الاستیسیته سنگ‌های هوازده [۱۳]

مدول الاستیسیته (Gpa)									سنگ
V	IV	III	II _{IV}	II _{III}	II _{II}	II _I	II	I	
۱/۵	۱۲/۷	۲۲/۸	۳۲/۵	۴۰/۲	-	۴۷/۹	-	۶۹/۵	گرانیت
-	۴/۶	۵/۵	-	۷/۶	-	۷/۸	-	۱۰/۷	ماسه سنگ
-	۹/۲	۱۰/۷	-	-	-	-	۱۸/۹	۲۴/۶	ماسه سنگ
-	۷/۵	۸/۷	-	-	-	-	۹/۰	۱۱/۰	ماسه سنگ
-	-	۱/۹	-	-	-	-	۳/۹	-	سنگ رس
-	۱/۶	۱/۹	-	-	-	-	۲/۶	۴/۹	فیلیت
۰/۸	۱/۴	۱/۶	-	-	-	-	۱/۵	۲/۵	فیلیت
-	-	۱/۹	-	-	-	-	۲/۶	۴/۲	مارن

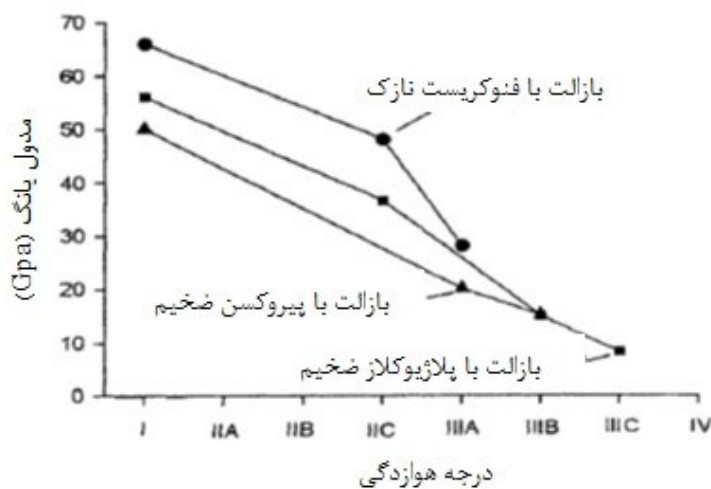
مقادیر نسبت پواسون در جدول ۳-۱۵ نشان داده شده است. در این مورد در اصل هیچ داده‌ای بطور سیستماتیک وجود ندارد. همانطوری که می‌توان دید مقدار این پارامتر ممکن است با افزایش هوازدگی کاهش و یا افزایش یابد [۱۳].

جدول ۳-۱۵: نسبت پواسون سنگ‌های هوازده [۱۳]

سنگ	I	II	III	IV
گرانیت	۰/۲۵	۰/۲۳	۰/۳۵	-
گرانیت	۰/۲۵	۰/۱۹	۰/۱۹	۰/۲۷
ماسه سنگ	۰/۲۲	۰/۳۵	۰/۱۷	-
سنگ رس	۰/۲۶	۰/۳۳	۰/۴۲	-
ماسه سنگ	۰/۱۲	۰/۱۸	۰/۲۳	۰/۲۳

رابطه بین مدول یانگ و درجه هوازدهی در شکل ۳-۶ نشان داده شده است. مدول یانگ با افزایش

درجه هوازدهی کاهش می‌یابد [۴].



شکل ۳-۶: تغییرات مدول یانگ بازالت‌های هوازده با درجه هوازدهی [۴]

۳-۸- کمی‌سازی تاثیر هوازدگی و دگرسانی بر ویژگی‌های ژئومکانیکی سنگ‌ها

در راستای گسترش یک سیستم طبقه‌بندی پایداری شیب، رابرت هک و دیوید پرایس^۱ سیستم طبقه‌بندی احتمال پایداری شیب^۲ SSPC را توسعه دادند و مقدار زیادی داده برای کمی‌سازی اثرات هوازدگی بر روی پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ، جمع‌آوری کردند. تحقیق در ناحیه‌ای در اطراف فالست و سالو^۳ واقع در ایالت تاراگونا^۴ اسپانیا انجام شد. در این محل تنوع زیادی از لحاظ سنگ‌شناسی، در درجات مختلف هوازدگی وجود دارد. لیتولوژی‌ها شامل ماسه‌سنگ، سنگ‌آهک، دولومیت، اسلیت، شیل و توده‌های نفوذی شامل گرانودیوریت و دایک‌های آپلیتی هستند. جمع‌آوری مقدار زیادی داده این امکان را داد تا تعیین فاکتورهای کاهش با اطمینان بالا صورت بگیرد [۱۵].

۳-۸-۱- تشریح کامل کمی‌سازی بر مبنای روش SSPC

کمی‌سازی اثر هوازدگی بر روی پارامترهای ژئومکانیکی بسیار ساده است. نحوه کار بدین صورت است که رخنمونی از توده‌سنگ انتخاب می‌شود که شامل سنگ سالم و درجات مختلف هوازدگی باشد. سپس پارامترهای مختلف توده‌سنگ از قبیل مقاومت، شرایط ناپیوستگی، مدول‌های مختلف و ... برای هر یک از درجات هوازدگی و سنگ سالم تعیین می‌شود، سپس مقایسه ساده هر یک از این پارامترها با پارامتر توده‌سنگ سالم مقدار کاهش کمی (WE_j) را معین می‌کند [۱۵]:

$$WE_j = \frac{(Par)_j}{(Par)_{fresh}} \quad (9-3)$$

که j درجه هوازدگی، $(Par)_j$ پارامتر سنگ هوازده و $(Par)_{fresh}$ پارامتر سنگ سالم می‌باشد.

¹ Hack R & Price D

² The Slope Stability Probability Classification

³ Falset & Salou

⁴ Taragona

در برخی محل‌ها این کار عملی است و می‌توان رخنمونی را انتخاب کرد که شامل واحد سنگ سالم و درجات مختلف هوازدهی باشد. ولی تعداد محل‌هایی که این شرایط را دارند بسیار کم هستند و برای محاسبه مقادیر کاهش با اطمینان بالا کافی نیستند.

به عنوان راه حل دیگر مقادیر کاهش می‌تواند از روی رخنمون‌های مستقل تعیین شوند، به شرطی که بتوان تشخیص داد که واحدها در رخنمون‌های مختلف یکسان هستند. غالباً تعداد رخنمون‌هایی که باید در آنها واحد سنگ سالم پیدا شود، محدود هستند و تعیین فاکتور کاهش بر اساس مقایسه با واحدهای سالم در تعداد کمی از مشاهدات امکان‌پذیر است. بنابراین از نسبت بین هر دو درجه متوالی هوازدهی برای تعیین فاکتور کاهش هر پارامتر ژئوتکنیکی استفاده می‌شود.

برای مثال فرض می‌شود مقدار پارامتر واحد U_1 با درجه هوازدهی سالم (f) ، $(Par)_{U_1,f}$ باشد. در این واحد اگر مشاهده دیگری با درجه هوازدهی متوسط (m) وجود داشته باشد $(Par)_{U_1,m}$ ، نسبت بین دو درجه هوازدهی، $ratio_{U_1,m,f}$ است. اگر پذیرفته شود که تاثیر هوازدهی مستقل از واحد است (با فرض اینکه واحدها در رخنمون‌های مختلف یکسان هستند این شرط برآورده می‌شود) نسبت بین درجه هوازدهی متوسط و سالم مستقل از واحد خواهد بود. بنابراین مقدار کاهش برای درجه هوازدهی متوسط (WE_m) عبارت است از [۱۵]:

$$WE_m = ratio_{U_1,m,f} = ratio_{m,f} \quad (۱۰-۳)$$

فرض می‌شود مشاهدات دیگری برای درجات هوازدهی بالاتر در این واحد موجود نیست، پس امکان ساختن نسبت‌ها برای درجات هوازدهی بالاتر در این واحد وجود ندارد. مجدداً فرض می‌شود دو تا مشاهده دیگر در واحد U_2 پیدا شود ولی مشاهده درجه هوازدهی سنگ سالم در این واحد موجود نباشد.

مشاهدات موجود در این واحد عبارتند از: درجه هوازدهی متوسط $(Par)_{U_2,m}$ و درجه هوازدهی بالا

$(Par)_{U2,h}$ ، بنابراین با فرض اینکه نسبت مستقل از واحد است:

$$ratio_{h,m} = \frac{(Par)_{U2,h}}{(Par)_{U2,m}} = \frac{\frac{(Par)_{U2,h}}{(Par)_{U2,f}}}{\frac{(Par)_{U2,m}}{(Par)_{U2,f}}} = \frac{ratio_{U2,h,f}}{ratio_{U2,m,f}} = \frac{WE_h}{WE_m} \quad (11-3)$$

و یا

$$WE_h = ratio_{h,m} \times WE_m \quad (12-3)$$

بنابراین با ترکیب معادلات (۱۱-۳) و (۱۲-۳) حتی بدون وجود مشاهده سنگ سالم در واحد U_2 ، تعیین مقدار کاهش (در این مثال WE_h) امکان‌پذیر شد.

مزیت دیگر تعیین نسبت‌ها، نسبت به محاسبه مستقیم مقادیر کاهش، این است که تمام نسبت‌ها می‌توانند بین هر دو درجه هوازدگی در هر واحدی مورد استفاده قرار گیرند و این صحت مقادیر کاهش را بطور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌دهد. علتش هم این است که مشاهدات زیادی می‌توانند مورد استفاده قرار گیرند [۱۵].

موارد بالا به‌صورت زیر عملی است:

هر پارامتری روی واحد (U) میانگین گرفته می‌شود. میانگین پارامترهای با درجه هوازدگی (i) به‌صورت $(Par)_{U,i}$ می‌باشد. سپس نسبت‌ها بین هر دو درجه هوازدگی در واحد تعیین می‌شود.

$$ratio_{U,i,j} = \frac{mean(Par)_{U,i}}{mean(Par)_{U,j}} \quad (13-3)$$

U : تعداد واحد

i, j : درجات هوازدگی

و چون نسبت‌ها مستقل از واحد می‌باشند. بنابراین $ratio_{U,i,j}$ می‌تواند به‌صورت زیر میانگین گرفته

شود.

$$mean(ratio_{i,j}) = \frac{1}{U} \sum^U ratio_{U,i,j} \quad (۱۴-۳)$$

در نتیجه برای یک پارامتر مشخص با در نظر گرفتن WE_f برابر با یک، ضریب کاهش بر حسب درجه هواز دگی تعیین می‌شود:

$$WE_f = 1 \quad ۳(۱۵-۳)$$

$$WE_s = ratio_{s,f} \times WE_f \quad ratio_{s,f} = \frac{1}{U} \sum^U ratio_{U,s,f}$$

$$WE_m = ratio_{m,s} \times WE_s \quad ratio_{m,s} = \frac{1}{U} \sum^U ratio_{U,m,s}$$

$$WE_h = ratio_{h,m} \times WE_m \quad ratio_{h,m} = \frac{1}{U} \sum^U ratio_{U,h,m}$$

$$WE_c = ratio_{c,h} \times WE_h \quad ratio_{c,h} = \frac{1}{U} \sum^U ratio_{U,c,h}$$

در روابط بالا f = سالم، s = ناچیز، m = متوسط، h = بالا و c = کامل می‌باشد.

با کمی‌سازی تغییرات ناشی از هواز دگی و دگرسانی تنها به راحتی می‌توان این تغییرات را در کلیه تحلیل‌ها وارد کرد. همچنین نتیجه‌گیری نیز آسان خواهد بود و گزارش‌های کیفی ارائه شده درباره تاثیرات هواز دگی و دگرسانی بر خواص ژئومکانیکی سنگ‌ها به تنهایی کافی نمی‌باشد [۱۵].

۹-۳- هواز دگی و فعالیت‌های مهندسی

تغییراتی که هواز دگی بر خواص فیزیکی و مکانیکی توده سنگ و مواد تشکیل دهنده سنگ ایجاد می‌کند باعث می‌شود که روش‌های تونل‌زنی و نگهداری، طراحی شیب‌های سنگی و خاکی، طراحی پی‌ها

و سایر فعالیت‌های مهندسی تحت تاثیر فرایندهای هوازدهی قرار گیرند. لذا تعیین دقیق ویژگی‌های هوازدهی باید صورت گیرد، نقشه‌ها (پلان) مستقیماً از طریق مشاهده و یا حفاری آماده شوند و کلیه پارامترهای مهندسی که تحت تاثیر هوازدهی قرار گرفته‌اند مورد ارزیابی قرار گیرند. این ارزیابی‌ها نه تنها در هنگام طراحی یک واحد مهندسی باید صورت گیرند بلکه در طول ساخت آن و همچنین در طول عمر کار برای آن نیز باید بطور مداوم بررسی شوند [۱۶].

۳-۹-۱- هوازدهی و پایداری شیب

ایجاد دیواره‌های شیبدار در بسیاری از کارهای معدنی و عمرانی ضرورت دارد و تعیین شیب این دیواره‌ها یکی از مهمترین موارد در این کارها می‌باشد. بعنوان نمونه در معادن روباز، در نتیجه فعالیت‌های استخراجی حفره‌ای با دیواره‌های شیبدار در زمین ایجاد می‌شود که بنابر ضرورت‌های ایمنی و باربری، این دیواره‌ها بصورت پله‌ای در می‌آیند. این پله‌ها برای تحمل بهتر فشارهای وارده اغلب شیبدار می‌باشند. در مورد پروژه‌های سد سازی انتخاب شیب مناسب برای شیروانی‌ها از نظر پایداری، مهمترین بخش از طراحی را تشکیل می‌دهد. علاوه بر این موارد، انتخاب شیب مناسب برای ترانشه‌های راه و سدهای باطله و خاکریزها از اهمیت زیادی برخوردار می‌باشد. این حساسیت و اهمیت از آنجا ناشی می‌شود که سنگ بر خلاف فولاد یا بتن موادی است به شدت پیچیده و خصوصیات آن در فواصل بسیار کوتاه نیز ممکن است متغیر باشد، اغلب دارای درزه و شکاف بوده و ممکن است با مواد رس و یا کوارتز پر شده باشند. گاهی بعلت تاثیر عوامل گوناگون در نظر گرفته نشده بر روی شیب‌ها باعث ایجاد ریزش‌هایی بصورت جزئی و یا کلی شود.

عواملی که باعث افزایش تنش سنگ‌ها و یا کاهش مقاومت سنگ‌ها و بروز ریزش‌ها می‌شوند عبارتند از: یکسری عوامل ذاتی و داخلی توده سنگ مانند ساخت و بافت سنگ، درزه و شکاف سنگ، ناپیوستگی‌ها و شرایط ناپیوستگی‌های توده سنگ، مقاومت سنگ (نیروی چسبندگی C، زاویه اصطکاک

داخلی (φ) و دانسیته سنگ. یکسری دیگر عوامل خارجی می‌باشند مانند نیروی دینامیکی و استاتیکی خارجی از جمله زمین‌لرزه، نیروی ناشی از آب (آب‌های زیرزمینی، آب‌های جاری و یا آب محتوی)، هوازدهی و یا دگرسانی.

در نتیجه هوازدهی، سنگ در مسیر تبدیل شدن به خاک می‌باشد و چنانچه می‌دانیم خاک سریعتر از سنگ ناپایدار شده و ریزش می‌کند. از طرفی هوازدهی باعث کاهش مقاومت (فشاری و کششی) و ضریب الاستیسیته می‌شود که خود باعث ناپایداری و بروز ریزش و شکست می‌باشد. همچنین هوازدهی باعث افزایش تخلخل، افزایش درزه و شکاف و افزایش تراوایی سنگ شده و این خود باعث نفوذ هر چه بیشتر آب در شیب شده و تنش برشی (لغزشی) را افزایش می‌دهد. گاهی ملاحظه می‌شود که تاثیر هوازدهی باعث کاهش نفوذپذیری شده در نتیجه آب در شیب و پشت شیب جمع و باعث افزایش نیروی لغزشی می‌شود. همچنین بروز هوازدهی با درجات متفاوت باعث ناهمگنی شیب شده و این خود عاملی برای ریزش می‌باشد.

در حالت کلی می‌توان نتیجه گرفت که هوازدهی یک عامل کاملاً ناپایدار کننده غیر مستقیم است که تاثیر عوامل ناپایدار کننده دیگر را بیشتر می‌کند. لذا برای یک کارشناس زمین‌شناس مهندسی ضروری است که در گزارش ارزیابی منطقه، درجه هوازدهی، الگوی هوازدهی، تاثیرات هوازدهی بر روی خواص مهندسی و رده‌بندی رضایت بخش از سنگ‌های هوازده ارائه کند [۱۶].

۳-۹-۱-۱- نحوه تاثیر هوازدهی و دگرسانی در تحلیل‌های مربوط به پایداری دیواره‌های سنگی

در مرحله اول کلیه پارامترهای ژئومکانیکی موثر در تحلیل مشخص می‌شوند، در مورد تحلیل‌های مربوط به پایداری دیواره‌های سنگی مهمترین پارامترها مقاومت فشاری تک محوره، زاویه اصطکاک داخلی، نیروی چسبندگی، فاصله‌داری درزه و شرایط درزه می‌باشند.

در مرحله دوم بعد از شناسایی کلیه پارامترها، ضریب کاهش که در درجات مختلف هوازدگی و دگرسانی محاسبه شده‌اند در میزان عددی پارامترهای ژئومکانیکی که برای سنگ‌های سالم بدست آمده‌اند ضرب شده و در تحلیل‌های مربوط به پایداری دیواره‌های سنگی استفاده می‌شوند.

برای درک بهتر موضوع مثال ساده‌ای آورده می‌شود:

فرض می‌شود یک بلوک سنگ سالم (بدون هوازدگی و یا دگرسانی) به وزن W_f بر روی سطح شیب‌داری که با افق زاویه α را تشکیل می‌دهد قرار گرفته است. همچنین فرض می‌شود زاویه اصطکاک و نیروی چسبندگی بین بلوک و سطح شیب‌دار به ترتیب برابر با ϕ_f و C_f باشد. چنانچه مقاومت برشی سطح دارای پتانسیل شکست (سطح شکست) از رابطه کولمب تبعیت کند فاکتور اطمینان از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۱۶].

$$F_f = \frac{C_f A + W_f \cos \alpha \tan \phi_f}{W_f \sin \alpha} \quad (۱۶-۳)$$

برای محاسبه فاکتور اطمینان بلوک سنگی که در نتیجه هوازدگی و یا دگرسانی ضرایب کاهش پارامترهای وزن حجمی، زاویه اصطکاک داخلی و نیروی چسبندگی به ترتیب W_{EC} و $W_{E\phi}$ ، W_{ED} باشند بصورت زیر خواهد بود.

$$F^* = \frac{C^* A + W^* \cos \alpha \tan \phi^*}{W^* \sin \alpha} \quad (۱۷-۳)$$

(F^* فاکتور ایمنی سنگ هوازده و یا آلت‌ره شده)

$$C^* = W_{EC} \times C_f$$

$$W^* = V_f \times W_{ED} \times D_f \quad (۱۸-۳)$$

$$\phi^* = W_{E\phi} \times \phi_f$$

(V_f حجم بلوک سنگ سالم)

C^* ، W^* و ϕ^* به ترتیب نیروی چسبندگی، وزن و زاویه اصطکاک داخلی بلوک سنگی هوازده و یا آلت‌ه شده می‌باشند [۱۵].

۳-۱۰- جمع بندی

در این فصل فرآیند هوازدهی و تاثیر عوامل مختلف در هوازدهی مورد بررسی قرار گرفت. سیستم‌های طبقه‌بندی مختلفی برای سنگ‌های هوازده معرفی گردید. همچنین تاثیر هوازدهی بر ویژگی‌های ژئومکانیکی سنگ‌ها مورد مطالعه قرار گرفت. سپس سیستم طبقه‌بندی احتمال پایداری شیب (SSPC)، جهت کمی‌سازی تاثیر هوازدهی و دگرسانی بررسی گردید. در نهایت نحوه تاثیر هوازدهی و دگرسانی در تحلیل‌های مربوط به پایداری دیواره‌های سنگی توضیح داده شد. این فصل مقدماتی برای بررسی تاثیر هوازدهی و دگرسانی بر روی پارامترهای ژئومکانیکی سیستم‌های گل‌گهر فراهم آورده که در فصل پنجم مورد استفاده قرار خواهند گرفت.

۴ فصل چهارم: اعمال عدم قطعیت‌ها در تحلیل

پایداری شیب

۴-۱- مقدمه

در تحلیل پایداری شیروانی‌ها همواره عدم قطعیت‌هایی وجود دارند که از منابع مختلفی نشأت می‌گیرند، به منظور اعمال این عدم قطعیت‌ها در محاسبات تحلیل پایداری و طراحی شیب‌ها، استفاده از تکنیک‌های آماری و احتمالی رونق خاصی یافته و منجر به ارائه روش‌هایی برای تحلیل شده که طی سالیان متمادی توسط متخصصین ژئوتکنیک استفاده می‌شوند.

علاوه بر این در مورد یک معدن، پایداری شیب تماماً تابع ملاحظات ژئوتکنیکی نیست، بلکه محدودیت‌های ناشی از نیاز تولید و اقتصاد کل عملیات در هر مقطع زمانی بر آن اثر می‌گذارند. بنابراین به منظور ارزیابی ملاحظات ژئوتکنیکی و محدودیت‌های معدنکاری ضروری است که احتمال پایداری شیب همراه با حجم، موقعیت، نوع مکانیسم و زمان ریزش مشخص شود. بدیهی است که با روش‌های معمول تحلیل پایداری نمی‌توان چنین اطلاعاتی را بدست آورد و تنها با استفاده از آمار و احتمالات می‌توان تا حدودی به این سوالات پاسخ داد [۱۷].

تحت شرایط ایده‌آل حداقل فاکتور ایمنی ۱ طراحی مطمئنی را فراهم خواهد کرد. اما بدلیل وجود عدم اطمینان‌ها یک مقدار بیشتری از فاکتور اطمینان برای طراحی مطلوب است. بر طبق تجارب گذشته اغلب یک فاکتور اطمینان بین $\frac{1}{3}$ تا $\frac{1}{5}$ توصیه می‌شود تا درصد اطمینان بیشتری بدست آورد و احتمال گسیختگی را کاهش داد [۱۷].

۴-۲- منشأ عدم قطعیت

دلایل زیادی برای عدم قطعیت‌ها در تحلیل پایداری یک شیب وجود دارد. این عدم قطعیت‌ها بطور کلی شامل موارد زیر است [۱۸]:

۴-۲-۱- عدم اطمینان مکانی

- توپوگرافی محل
- چینه شناسی محل
- منشأ زمین‌شناسی و خصوصیات مواد زیر سطحی
- طبقات آب زیر زمینی

۴-۲-۲- عدم اطمینان داده‌ای

- خصوصیات برجای خاک و یا سنگ
- خواص مهندسی خاک و یا سنگ
- رفتار خاک و یا سنگ

به علاوه پیش‌بینی در مورد شرایط محیطی نظیر بارهای داخلی، زمین لرزه‌ها و افزایش فشار آب منفذی با اطمینان کامل غیر ممکن است. مقدار عدم اطمینان از یک تحلیل تا تحلیل دیگر و از یک محل تا محل دیگر نیز تغییر می‌کند.

در این پایان‌نامه عدم قطعیت‌های مکانی به علت پیچیدگی آنها، مشکلات اجرا و تفسیر نتایج، مورد استفاده قرار نمی‌گیرند.

یکی از مهمترین عوامل عدم قطعیت در پایداری یک شیب تغییرپذیری در مقادیر خواص خاک و سنگ است [۱۹].

۴-۳- مفاهیم اساسی در احتمال و قابلیت اطمینان

اغلب روش‌های تحلیل و طراحی یک عدد را برای هر یک از پارامترهای ورودی مورد استفاده قرار

می‌دهند، انتخاب یک عدد برای یک پارامتر خاص که بتواند رفتار خاک و یا سنگ را نشان دهد، غیر ممکن است. در این راستا این پارامترها به عنوان متغیرهای تصادفی بررسی می‌شوند تا بتوان رفتار خاک و یا سنگ را در دامنه وسیعتری از تغییرات پارامترهای ژئوتکنیکی مشاهده نمود [۱۷].

تحلیل‌های احتمالاتی را می‌توان در سه سطح متمایز کرد، تحلیل‌های مرتبه اول که اصولاً تحلیل‌های قطعی هستند و فقط یک مقدار برای هر متغیر استفاده می‌شود، در تحلیل‌های مرتبه دوم هر متغیر تصادفی بوسیله دو پارامتر میانگین و انحراف معیار مشخص می‌شود و سرانجام در تحلیل‌های مرتبه سوم که کاملترین روش ارزیابی احتمال است، خصوصیات آماری دقیق همه پارامترها برای محاسبه بکار برده می‌شود و تابع چگالی احتمال توأم محاسبه می‌شود. چون اغلب تعریف و ارزیابی تابع چگالی احتمال توأم خیلی مشکل است، استفاده از تحلیل‌های مرتبه سوم در ژئومکانیک و ژئوتکنیک غیر معمول است و غالباً در طراحی‌ها از تحلیل‌های مرتبه دوم استفاده می‌شود [۲۰].

برای استفاده از تحلیل‌های احتمالاتی شناخت کامل متغیرهای تصادفی و خصوصیات آنها ضروری می‌باشد.

۴-۳-۱- فاکتور اطمینان^۱

در ساده‌ترین شکل فاکتور اطمینان F بصورت نسبت بین ماکزیمم مقاومت موجود R به بار موثر L تعریف می‌شود [۱۹]:

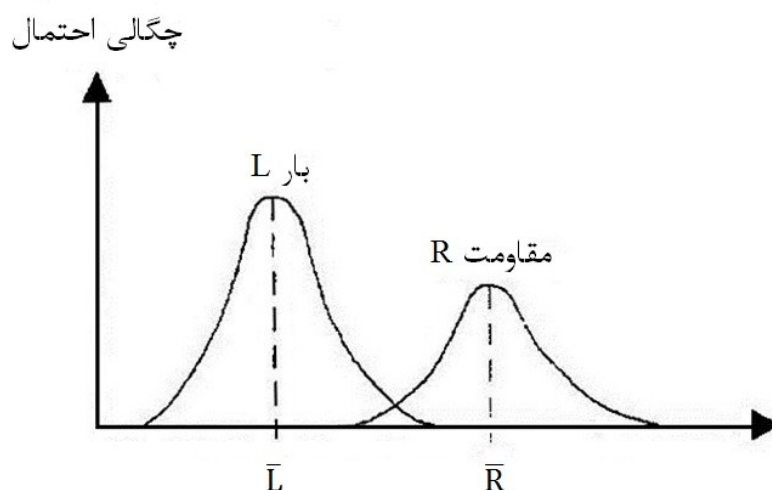
$$F = \frac{R}{L} \quad (۱-۴)$$

توزیع‌های فرضی مقاومت و بار برای یک المان ساختاری مثل یک شیب در شکل ۴-۱ نشان داده شده است که $\bar{R}$ و σ_R مقادیر میانگین و انحراف معیار برای مقاومت و $\bar{L}$ و σ_L مقادیر همان پارامترها برای

^۱ Safety factor

بار هستند.

با توجه به شکل ۱-۴ در تحلیل‌های قطعی (مرتبه اول) که از میانگین مقادیر مقاومت و بار برای محاسبه استفاده می‌شود، فاکتور اطمینانی بزرگتر از ۱ بدست می‌آید که دلالت بر شرایط پایدار دارد، ولی همانطور که در شکل مشاهده می‌شود در قسمتی که مقادیر R کمتر از L است امکان ناپایداری و شکست وجود دارد.



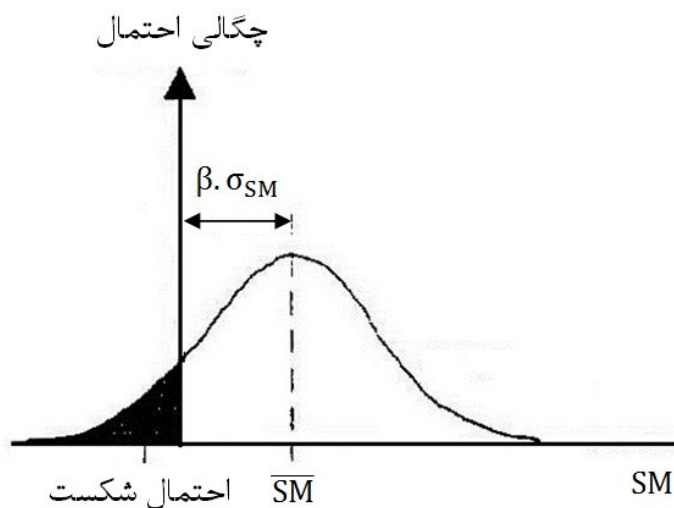
شکل ۱-۴: توزیع‌های فرضی مقاومت R و بار L برای یک المان ساختاری [۲۰]

اختلاف بین متغیرهای L و R را حاشیه یا حد اطمینان^۱ SM گویند که خود یک متغیر تصادفی است.

$$SM = R - L \quad (۲-۴)$$

سطح هاشور خورده در شکل ۲-۴ نشان دهنده احتمالی است که متغیر تصادفی $SM \leq 0$ شود و ناپایداری رخ دهد.

^۱ Safety Margin



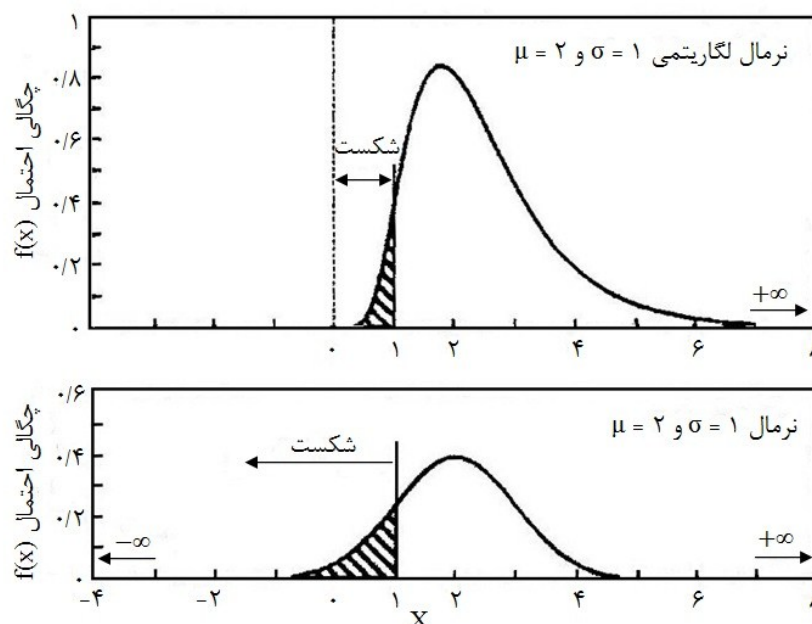
شکل ۴-۲: توزیع فرضی حاشیه اطمینان [۲۰]

۴-۳-۲- احتمال شکست^۱ و اندیس اطمینان^۲

در تحلیل پایداری شیب پارامترهای ورودی بصورت متغیرهای تصادفی مدلسازی شده و تابع چگالی احتمال فاکتور اطمینان F تخمین زده می‌شود. این تابع چگالی بوسیله میانگین μ_F و انحراف معیار σ_F مشخص می‌شود، اگرچه تابع چگالی احتمال فاکتور اطمینان می‌تواند هر شکلی داشته باشد اما همانطور که در شکل ۴-۳ مشاهده می‌شود اغلب توزیع نرمال و نرمال لگاریتمی فرض می‌شود، اگر مقادیر F کمتر از ۱ نشان دهنده شکست باشند، سطح هاشور خورده این توزیع‌ها نشان دهنده احتمال شکست P_F است. از آنجا که متغیرهای با توزیع نرمال لگاریتمی همیشه مقادیر بزرگتر از صفر خواهند داشت، در مورد فاکتور اطمینان این توزیع مناسب‌تر به نظر می‌رسد [۱۸].

^۱ Probability Of Failure

^۲ Reliability Index



شکل ۳-۴: توزیع احتمال شکست برای توابع چگالی نرمال لگاریتمی و نرمال [۱۸]

هیچ ارتباط مستقیمی بین فاکتور اطمینان و احتمال شکست وجود ندارد، به عبارت دیگر ممکن است یک شیب با فاکتور اطمینان بالاتر، از یک شیب با فاکتور اطمینان پایین‌تر، ناپایدارتر باشد. برای مثال یک شیب با فاکتور اطمینان $1/5$ و انحراف معیار $0/5$ احتمال شکست بیشتری از یک شیب با فاکتور اطمینان $1/2$ و انحراف معیار $0/1$ دارد [۱۹].

برای ارزیابی پایداری از فاکتور دیگری بنام اندیس اطمینان استفاده می‌شود که یک اندازه معنی‌دارتری از پایداری را در مقایسه با فاکتور اطمینان فراهم می‌کند.

برای فاکتور اطمینان F با تابع چگالی نرمال لگاریتمی، اندیس اطمینان β بصورت زیر تعریف می‌شود [۱۸]:

$$\beta = \frac{|\ln(F_C) - \mu_N|}{\sigma_N} \quad (3-4)$$

که F_C فاکتور اطمینان بحرانی متناظر با عملکرد نامطلوب یا ۱ برای حالت شکست است و

$$\sigma_N = \sigma_{\ln F} = \sqrt{\ln(1 + V_F^2)} \quad (۴-۴)$$

$$\mu_N = \mu_{\ln F} = \ln(\mu_F) - \frac{1}{2} \sigma_N^2 \quad (۵-۴)$$

که μ_F و σ_F و V_F به ترتیب میانگین، انحراف معیار و ضریب تغییرات فاکتور اطمینان با توزیع نرمال لگاریتمی می‌باشند.

برای حالت خاص احتمال شکست $F_C=1$ ، معادله بصورت زیر خلاصه می‌شود:

$$\beta = \frac{-\mu_N}{\sigma_N} = \frac{\ln \left[\mu_F / \sqrt{1 + V_F^2} \right]}{\sqrt{\ln(1 + V_F^2)}} \quad (۶-۴)$$

اگر تابع چگالی احتمال F نرمال فرض شود، اندیس اطمینان بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$\beta = \frac{|F_C - \mu_F|}{\sigma_F} \quad (۷-۴)$$

و برای حالت شکست بصورت زیر خلاصه می‌شود [۱۸]:

$$\beta = \frac{\mu_F - 1}{\sigma_F} \quad (۸-۴)$$

با توجه به رابطه (۸-۴) می‌توان گفت که اندیس اطمینان در حقیقت فاکتور اطمینان را تبدیل به یک متغیر نرمال استاندارد می‌کند.

وقتی که شکل تابع چگالی متناظر با فاکتور اطمینان مشخص شد (نرمال یا نرمال لگاریتمی)،

می‌توان با استفاده از اندیس اطمینان β احتمال شکست P_F را محاسبه نمود [۱۹]:

$$P_F = \varphi(-\beta) = 1 - \varphi(\beta) \quad (۹-۴)$$

که در آن $\varphi(x)$ مقادیر تابع توزیع تجمعی برای یک متغیر نرمال استاندارد (متغیری با میانگین صفر

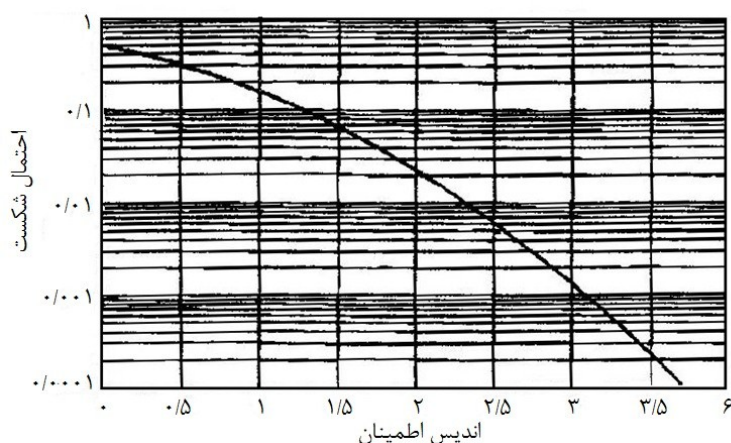
و انحراف معیار (۱) است، که برای نمونه چند مقدار مشخص آن در جدول ۴-۱ آورده شده است.

جدول ۴-۱: مقادیر توزیع تجمعی متغیر نرمال استاندارد [۱۹]

x	$\Phi(x)$
۰	۰/۵
۰/۵	۰/۶۹۱
۱/۰	۰/۸۴۱
۱/۵	۰/۹۳۳
۲/۰	۰/۹۷۷
۲/۵	۰/۹۹۳۸
۳/۰	۰/۹۹۸۷
۳/۵	۰/۹۹۹۷۷
۴/۰	۰/۹۹۹۹۶۸
۵/۰	۰/۹۹۹۹۹۷

شکل ۴-۴ هم ارتباط اندیس اطمینان با احتمال شکست را برای یک فاکتور اطمینان با توزیع

نرمال بیان می‌کند.



شکل ۴-۴: ارتباط بین احتمال شکست و اندیس اطمینان برای یک فاکتور اطمینان با توزیع نرمال [۱۹].

یک رده‌بندی در مورد عملکرد شیب توسط گروهی از مهندسين صورت گرفته است که با استفاده

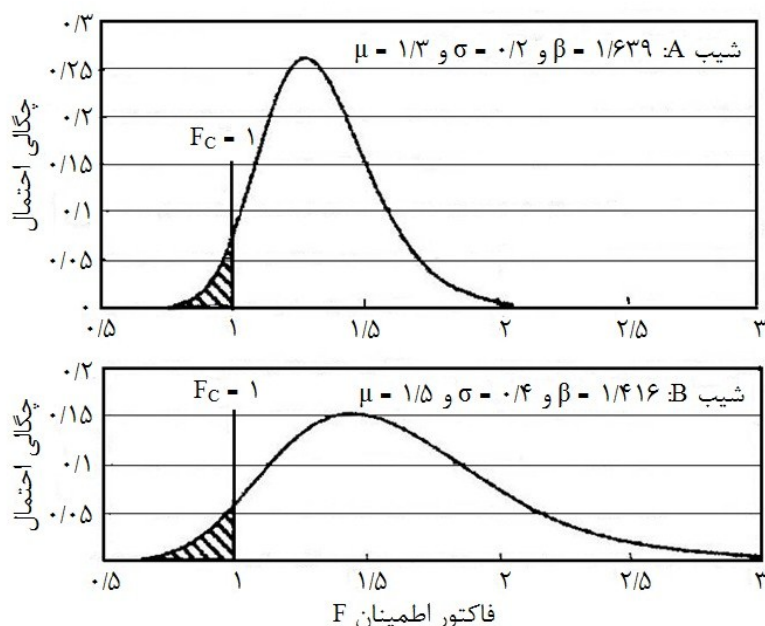
از مقادیر اندیس اطمینان یا احتمال شکست، سطح عملکرد یک شیب مشخص می‌شود (جدول ۴-۲).

جدول ۴-۲: توصیف عملکرد شیب در ارتباط با اندیس اطمینان و احتمال شکست [۱۸]

عملکرد شیب	انديس اطمینان	احتمال شکست $P_F = P(F \leq F_C)$
بالا	۵/۰	$2/871 \times 10^{-7}$
خوب	۴/۰	$3/169 \times 10^{-5}$
متوسط بالا	۳/۰	۰/۰۰۱۳۵
متوسط پایینی	۲/۵	۰/۰۰۶۲۱
ضعیف	۲/۰	۰/۰۲۲۷۵
نامطلوب	۱/۵	۰/۰۶۶۸۱
خیلی خطرناک	۱	۰/۱۵۸۶۶

شکل ۴-۵ توابع چگالی احتمال فاکتور اطمینان را برای دو شیب A و B نشان می‌دهد، که توزیع هر دو نرمال لگاریتمی فرض شده است. با بدست آوردن مقادیر اندیس اطمینان β برای حالت بحرانی ۱ $F_C =$ مشاهده می‌شود که شیب A اندیس اطمینان بیشتری دارد. با استفاده از مقادیر اندیس اطمینان احتمال شکست P_F برای شیب‌های A و B به ترتیب ۰/۰۵۰۶ و ۰/۰۷۸۴ بدست می‌آید که در اینصورت شیب A بعنوان نامطلوب و شیب B خطرناک رده‌بندی می‌شود [۱۸].

هدف نهایی تحلیل احتمالاتی، تخمین اندیس اطمینان β با استفاده از میانگین و انحراف معیار تابع توزیع فاکتور اطمینان است، علاوه بر این ممکن است تابع چگالی احتمال F تخمین زده شود و احتمال شکست مستقیماً محاسبه شود.



شکل ۴-۵: مقایسه فاکتورهای اطمینان دو شیب A و B [۱۸]

عکس‌العمل فاکتور اطمینان به متغیرهای موجود در پارامترهای ورودی مثل c ، ϕ ، w ، u و ... تابع عملکرد $g(x)$ نامیده می‌شود. تابع عملکرد را می‌توان توسط روش‌های قطعی تحلیل پایداری شیب (مثل روش‌های بیشاب و جانبو) تعیین کرد.

$$F = g(x_1, x_2, \dots, x_n) + e \quad (۴-۱۰)$$

که x_i ها مولفه‌های متغیرهای ورودی هستند که بعنوان متغیر تصادفی تعریف می‌شوند و e خطای مدلسازی است که اختلاف بین مدل پذیرفته شده و رفتار واقعی را محاسبه می‌کند.

روش‌های دقیق محاسبه احتمال شکست فقط در موارد ساده امکان‌پذیر است. چون تابع عملکرد شامل چندین متغیر برای بیان بار و مقاومت است و اغلب غیر خطی است، که مانع از روش‌های تحلیلی دقیق می‌شود. بنابراین باید سعی کرد تا جواب‌های تقریبی را با روش‌های عددی بدست آورد. اغلب روش‌های عددی یک تابع چگالی احتمال فاکتور اطمینان را فراهم نمی‌کنند، اما مقادیر امید ریاضی و

واریانس را برای محاسبه اندیس اطمینان فراهم خواهند کرد.

۴-۴- تحلیل احتمالاتی شیب‌ها

چون تابع عملکرد پذیرفته شده برای فاکتور اطمینان اغلب غیر خطی است، بنابراین انتگرال‌گیری مستقیم از آن امکان‌پذیر نیست، ولی مقادیر امید ریاضی و واریانس فاکتور ایمنی را می‌توان با استفاده از روش سری‌های تیلور، روش برآورد نقطه‌ای و شبیه‌سازی مونت کارلو^۱ بدست آورد [۱۸].

۴-۴-۱- روش سریهای تیلور

این روش بر اساس بسط سری تیلور تابع عملکرد حول مقادیر امید ریاضی متغیرهای تصادفی بنا نهاده شده است. اگر عبارت‌های مرتبه اول این بسط را نگهداریم و از بقیه صرف‌نظر کنیم، تابع عملکرد به یک عبارت خطی تقریب زده می‌شود، با استفاده از این عبارت خطی، میانگین و انحراف معیار تابع عملکرد به آسانی محاسبه شده و در نهایت اندیس اطمینان تعیین می‌شود.

۴-۴-۲- روش برآورد نقطه‌ای

این روش دراصل توسط روزنبلوت^۲ در سال ۱۹۷۵ پیشنهاد شد و توسط هار^۳ در سال ۱۹۸۱ برای حل مسائل ژئومکانیکی بکار برده شد. در این روش تابع چگالی احتمال متغیرهای تصادفی بوسیله نقاط قرار گرفته در مجموع و تفاضل یک انحراف معیار از مقدار میانگین شبیه‌سازی می‌شود [۲۱].

۴-۴-۳- شبیه‌سازی مونت کارلو

انجام شبیه‌سازی به دلایل مختلفی صورت می‌گیرد، یکی از آنها هنگامی است که پیچیدگی مسئله به حدی باشد که به‌کار بردن راه حل‌های قطعی بسیار زمان‌گیر، غیرممکن و یا مدلسازی قطعی غیر

^۱ Monte Carlo Simulation

^۲ Rosenblueth

^۳ Har

ممکن باشد. در مسئله تحلیل پایداری شیب، زمانیکه تابع عملکرد پیچیده و شامل چندین متغیر باشد، به جای روش‌های قبلی می‌توان از یک روش شبیه‌سازی استفاده کرد.

روش شبیه‌سازی معمول در این موارد روش مونت کارلو است که به منظور حل مسائل قطعی و یا برخی مسائل تصادفی که گذشت زمان نقش اساسی در آنها ندارد، از اعداد تصادفی استفاده می‌کند. منظور از اعداد تصادفی، متغیرهای تصادفی مستقل با توزیع یکنواخت در بازه [۰ و ۱] است [۲۲].

۴-۳-۱- روش مونت کارلو

مونت کارلو روشی ایستا (نه پویا) شمرده می‌شود. در مقابل روش مونت کارلو می‌توان روش شبیه‌سازی را قرار داد، گرچه شبیه‌سازی نیز مانند مونت کارلو از اعداد تصادفی استفاده می‌کند ولی در واقع عامل زمان در شبیه‌سازی دخالت دارد و به بیان دیگر شبیه‌سازی روشی پویا محسوب می‌شود. مضافاً اینکه اکثر مسائل شبیه‌سازی دارای طبیعتی تصادفی هستند [۲۳].

روش مونت کارلو عمومی‌ترین روش تقریب احتمالاتی حالت‌های یک مدل از طریق نمونه‌های آزمایشی است. این نوع شبیه‌سازی تفکیک ثابت نمونه‌ها می‌باشد که تصویر یک مدل را فراهم نمی‌آورد بلکه همبستگی آماری بین ورودی‌ها و خروجی‌ها کاوش می‌شود. اجزای سیستم بوسیله متغیرها ارائه می‌شوند و ارتباط آنها از طریق تکرار تولید اعداد تصادفی یا توزیع احتمالاتی اعداد برقرار می‌گردد. زمانی که روش‌های غیر احتمالاتی پیچیده و پرهزینه شوند از این روش استفاده می‌شود که در آن نتایج تحلیل نمی‌شود بلکه همبستگی آماری جستجو خواهد شد [۲۴].

همانطور که ذکر شد برای روش مونت کارلو دو نوع کاربرد می‌توان در نظر گرفت:

- حل مسائل قطعی (غیر تصادفی) با استفاده از اعداد تصادفی
- نمونه‌گیری از توزیع‌های آماری مجهول

هدف از این نمونه‌گیری‌ها یافتن توزیع آماری یک یا چند متغیر تصادفی یا پارامترهای آن است. متغیر تصادفی مورد نظر متغیر پاسخ نامیده می‌شود، که خود تابعی از یک یا چند متغیر تصادفی شناخته شده است. به منظور ارائه تخمینی برای توزیع آماری متغیر پاسخ، مقادیری برای کلیه متغیرهای تصادفی ورودی تولید و مقدار متناظر متغیر پاسخ بر اساس آنها محاسبه می‌شود، این نمونه‌گیری آنقدر تکرار می‌شود تا تخمینی از توزیع آماری متغیر پاسخ ایجاد شود [۲۴].

مراحل مختلف روش عمومی مونت کارلو بصورت زیر است [۲۳]:

۱- تعریف یک مدل قطعی که چند متغیر ورودی برای تخمین یک مقدار خروجی بکار برده می‌شود.

۲- تعیین پارامترها یا متغیرها

۳- اخذ نمونه‌هایی از پارامترهای مورد نیاز

۴- تخمین و تعیین توزیع آماری حاکم بر نمونه‌ها و بدست آوردن پارامترهای آماری آن

۵- تولید مقادیر تصادفی بر حسب توزیع بدست آمده و گرفتن پارامترهای جدید

۶- این مقادیر تولید شده بعنوان ورودی بکار برده می‌شوند

۷- محاسبه رفتار و عمل سیستم بر اساس داده‌های مرحله قبل

۸- تعبیر و تفسیر طرز عمل و اجرای سیستم

۴-۳-۲- روش مونت کارلو در تحلیل پایداری شیب

روش مونت کارلو در تحلیل پایداری شیب، عکس‌العمل تابع عملکرد فاکتور اطمینان را نسبت به مقادیر متغیرهای تصادفی ورودی شبیه‌سازی می‌کند. در این روش توزیع چگالی احتمال فاکتور اطمینان تعیین می‌شود [۲۵].

تحلیل پایداری شیب با استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو شامل مراحل زیر است [۲۶]:

۱- یک روش حل قطعی مثل روش ساده شده بیشاب یا جانبو انتخاب و برای تعیین ارتباط بین

فاکتور اطمینان با پارامترهای ورودی مسئله بکار می‌رود.

۲- پارامترهای ورودی که تغییر پذیرند مثل C و ϕ بعنوان متغیر تصادفی در نظر گرفته شده و

توزیع آماری حاکم بر آنها تعیین می‌شود.

۳- اعداد تصادفی تولید می‌شوند و پارامترهای ورودی جدید با استفاده از این اعداد تصادفی تعیین

می‌شوند.

۴- فاکتور اطمینان با استفاده از پارامترهای ورودی جدید تعیین می‌شود.

۵- مراحل ۳ و ۴ بارها تکرار می‌شوند تا یک توزیع چگالی احتمال برای فاکتور اطمینان بدست

آید.

به این نکته باید توجه کرد که هر شبیه‌سازی مونت کارلو از یک رشته اعداد تصادفی متفاوت

استفاده خواهد کرد و نتایج احتمالاتی میانگین، واریانس و هیستوگرام، کمی متفاوت خواهد بود، هرچه

تعداد آزمایش‌ها افزایش یابد اختلاف کمتر خواهد شد.

بدلیل اینکه شبیه‌سازی مونت کارلو به محاسبات زیادی نیاز دارد، اغلب مشاهده شده که مقبولیت

کمتری در مقایسه با روش سری‌های تیلور و برآورد نقطه‌ای دارد، اما با افزایش سرعت کامپیوترها، روش

مونت کارلو بعلا سادگی ذاتی آن و توانایی در استفاده از برنامه‌های کامپیوتری مقبولیت بیشتری پیدا

کرده است.

البته قبل از اعتماد کردن به خروجی مونت کارلو، مهندس طراح بایستی در مورد تعداد آزمایش‌های

(تکرار) مورد نیاز برای تولید نتایج سازگار و مطمئن تصمیم‌گیری کند.

تا اینجا همه بحث‌های انجام شده در مورد تحلیل احتمالاتی شیب‌ها فقط به متغیرهای تصادفی اشاره کردند بدون اینکه هیچ کوششی در توصیف این پارامترها صورت گیرد. در قسمت بعد به ارزیابی عدم قطعیت در پارامترهای ورودی پرداخته خواهد شد.

۴-۵- ارزیابی عدم قطعیت

برای هر پارامتری عدم قطعیت توسط واریانس مطابق با موارد زیر بیان می‌شود [۱۸].

۱- پراکندگی داده‌ها که منتسب است به:

- تغییر پذیری فضایی (فاصله‌ای) در مقطع و شکل خاک
- خطاهای آزمایش تصادفی

۲- خطای سیستماتیک که تحت تاثیر موارد زیر قرار می‌گیرد:

- مدلسازی آماری میانگین بسته به مقدار محدود نمونه‌ها و آزمون‌های آزمایشگاهی یا برجا
- انحراف در روش‌های اندازه‌گیری بسته به مشخصاتی چون روش‌های نمونه‌گیری و وسعت اختلال نمونه

دانش فعلی ما در مورد سهم دقیق این دو در کل عدم قطعیت‌ها محدود است. اما هر چه اطلاعات بیشتری در این چارچوب گردآوری شود، امید است که تاثیر هر گروه در قطعیت بیشتر، جدا شود.

برای اغلب تحلیل‌های پایداری پارامترهای بحرانی شامل موارد زیر است:

- مقاومت برشی به شکل پارامترهای C و ϕ برای شرایط مختلف زهکشی و نرخ‌های بارگذاری
- فشار آب منفذی

- وزن مخصوص سنگ و خاک
- محل سطح شکست
- ضخامت ناحیه نرم و کم مقاومت
- اثرات محیطی خارجی مثل افت بارهای سطحی

اگر که پارامترهای فوق در تحلیل دخیل شوند، نیاز به اطلاعاتی در مورد عدم قطعیت پارامترهای فوق می‌باشد. این عدم قطعیت بایستی بوسیله یک تابع چگالی احتمال با پارامترهای مرتبط مثل میانگین و انحراف معیار مشخص شود. البته اغلب پروژه‌های ژئوتکنیکی به ندرت اطلاعات کافی برای تعیین یک تابع چگالی احتمال دارند. پس بایستی یک تابع چگالی احتمال برای متغیرهای جزئی بر طبق آزمایش‌های گذشته و پروژه‌های مشابه انتخاب کرد.

عموماً توزیع نرمال برای اغلب پارامترها بکار برده می‌شود مگر آنکه دلایل کافی توزیع دیگری را پیشنهاد کرده باشند [۱۸].

وقتی که یک فرم تابع چگالی احتمال در نظر گرفته شد، پارامترهای دیگری مثل میانگین و انحراف معیار بایستی برای توزیع نرمال و نرمال لگاریتمی تعیین شده باشند. در اغلب موارد انحراف معیار از مقادیر منتشر شده ضریب تغییرات V_x برآورد می‌شود. به عنوان نمونه تعدادی ضریب تغییرات که در نوشته‌ها گزارش شده است در جدول ۳-۴ آورده شده است. نکته قابل توجه این است که محدوده داده شده فقط نماینده مقادیر هستند و همه محدوده مقادیر ممکن را پوشش نمی‌دهند [۱۸].

جدول ۳-۴: ضریب تغییرات برای پارامترهای مختلف [۱۸]

ضریب تغییرات V_x	پارامترهای ژئوتکنیکی
۳-۸٪	وزن مخصوص
۲-۲۱٪	زاویه اصطکاک داخلی موثر φ'
۱۳-۴۹٪	مقاومت زهکشی نشده S_u
۱۰-۲۰٪	مقاومت زهکشی نشده از آزمایش‌های vane و S_u
۵-۱۵٪	نسبت مقاومت زهکشی نشده $\frac{S_u}{\sigma_v'}$

با فراهم شدن چند ضریب تغییرات و یک تخمین از مقدار میانگین μ_x ، انحراف معیار با استفاده از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\sigma_x = V_x \times \mu_x \quad (۱۱-۴)$$

اگر اطلاعات ناکافی و مقادیر ضریب تغییرات موجود نباشد، بایستی به قوانین سرانگشتی که وانگ و دیا^۱ پیشنهاد کرده‌اند متوسل شد. این قانون به این فرض بنا نهاده شده که اغلب اطلاعات دارای توزیع نرمال هستند و بنابراین ۹۹/۷۳ درصد همه مقادیر در محدوده $\mu \pm 3\sigma$ قرار دارند. اگر یک محدوده از مقادیر که حول میانگین متقارن هستند، انتخاب شوند، انحراف معیار را می‌توان توسط رابطه ساده زیر تخمین زد [۱۸]:

$$\sigma_x = \frac{X_{max} - X_{min}}{6} \quad (۱۲-۴)$$

که

$$X_{max} = \text{ماکزیمم مقدار متغیر تصادفی } x$$

$$X_{min} = \text{مینیمم مقدار متغیر تصادفی } x$$

^۱ Wang & Dia

اما عموماً در نظر گرفتن کران پایین محدوده مقادیر ممکن واقع گرایانه‌تر خواهد بود، به این ترتیب انحراف معیار از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\sigma_x = \frac{X_{max} - X_{min}}{4} \quad (۴-۱۳)$$

با استفاده از این رابطه محدوده ۹۵/۵ درصد مقادیر ممکن در نظر گرفته می‌شود.

۴-۶- آشنایی با نرم افزار @Risk

@Risk به عنوان یک نرم افزار قدرتمند در تحلیل ریسک پروژه‌ها به شمار می‌رود که بر روی نرم افزار صفحه گسترده Microsoft Excel نصب می‌شود و به صورت یک نرم افزار افزودنی کار می‌کند. @Risk با تلفیق قابلیت‌های مدل‌سازی Excel، قادر به طراحی مدلی برای برآوردن نیازهای تحلیل ریسک با بهترین کاربری می‌باشد.

این نرم افزار برای تحلیل پروژه‌هایی با پارامترهای احتمالی به کار می‌رود. توزیع احتمال هر یک از پارامترهای مذکور بایستی قبلاً مشخص شود. این پارامترها به همراه توزیع‌شان به عنوان ورودی وارد نرم افزار می‌شوند. سپس @Risk با استفاده از روش‌های شبیه‌سازی مونت کارلو و یا لاتین‌هایپرکیوب^۱ و تولید اعداد تصادفی، مدل را بارها اجرا کرده و پارامترهای پروژه را تحلیل می‌کند و در نهایت مقادیر خروجی‌های مشخص شده و توزیع احتمال آنها را ارائه می‌کند. با بررسی مقادیر خروجی، می‌توان میزان ریسک عددی پروژه را با توجه به انتظارات مورد نظر به دست آورد. این نرم افزار قادر است تا نتایج حاصله را بصورت گرافیکی نیز ارائه دهد. که این قابلیت، باعث فهم بهتر و سریع‌تر جواب‌ها می‌گردد. تقریباً در تمام مدل‌هایی که با عدم قطعیت همراه است، می‌توان از این نرم افزار استفاده کرد [۲۷].

^۱ Latin Hypercube

۴-۷- جمع بندی

در این فصل به معرفی عدم قطعیت‌ها در تحلیل پایداری شیب پرداخته شد. همچنین انواع روش‌های تحلیل احتمالاتی مورد مطالعه قرار گرفت. روش مونت کارلو به عنوان روش شبیه‌سازی انتخاب شده در این تحقیق به طور مختصر شرح داده شد. سپس نرم افزار @Risk برای تحلیل و شبیه‌سازی پارامترهای ژئومکانیکی معرفی گردید که این مطالعات اساس فصل ششم را تشکیل می‌دهند.

۵ فصل پنجم: مطالعات میدانی و آزمایشگاهی

۵-۱- مقدمه

هدف از این فصل نشان دادن تاثیر هوازدگی و دگرسانی بر روی پارامترهای ژئومکانیکی شیبست‌های معدن سنگ آهن شماره ۱ گل‌گهر می‌باشد. با مشاهده و آزمایش بر روی نمونه مغزه‌ها، یک طبقه‌بندی برای سنگ‌های هوازده تعیین شد. در مرحله بعد چگالی، تخلخل، مقاومت فشاری تک محوری، مقاومت کششی، سرعت موج فشاری، دوام، بارنقطه‌ای و ضریب الاستیسیته در آزمایشگاه تعیین شد. اطلاعات به دست آمده از مطالعات میدانی و آزمایشگاهی در جهت بررسی تاثیر هوازدگی و دگرسانی بر روی پارامترهای ژئومکانیکی و همچنین کمی‌سازی این تاثیرات مورد ارزیابی قرار گرفت.

۵-۲- بررسی وجود هوازدگی و دگرسانی در معدن گل‌گهر

در هر منطقه که در معرض تغییرات محیطی قرار می‌گیرد و جریان‌های سطحی و زیرزمینی مایعات وجود دارد، باید حداقل انتظار هوازدگی و دگرسانی را داشت. با توجه به پیمایش معدن گل‌گهر و بررسی وجود یا عدم وجود آب‌های زیرزمینی مشاهده گردید که سطح آب‌های زیرزمینی در معدن گل‌گهر به طور میانگین ۱۰۳ متر پایین‌تر از سطح اولیه معدن بوده که از بیشتر دیواره‌های معدن در حال تراوش می‌باشد. همچنین مشاهده گردید که در دیواره شمالی معدن ریزش‌هایی رخ داده است، با متمرکز شدن بر روی این دیواره مشخص شد که در محدوده‌ای ۵۰۰ متری از ریزش، سنگ‌های منطقه دارای تغییر رنگ‌های زیادی است که می‌تواند ناشی از تاثیر هوازدگی و دگرسانی باشد. بدین منظور جهت تعیین درجه هوازدگی و دگرسانی مطالعات اولیه آغاز گردید.

۵-۳- انتخاب نمونه جهت انجام آزمایش

با توجه به اینکه انجام آزمایش‌ها روی تمام سنگ‌های معدن ممکن نبود، جهت انتخاب سنگ برای انجام آزمایش سه منطق خاص در نظر گرفته شد:

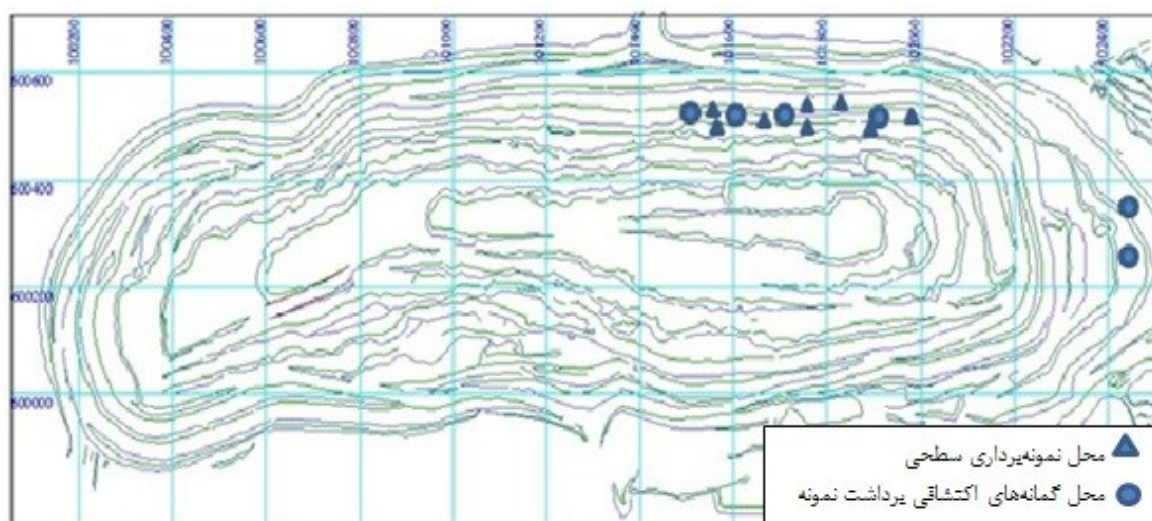
- ۱- سنگ‌هایی که دارای بیشترین وسعت و گسترش در کاواک نهایی معدن می‌باشند.
- ۲- سنگ‌هایی که در دیواره‌های نهایی معدن بوده و در پایداری شیب مشکل ساز می‌باشند.
- ۳- سنگ‌هایی که در منطقه ریزش کرده یا در حال ریزش می‌باشند.

با توجه به این اهداف و بررسی‌های انجام شده مشخص شد که بیشترین درصد را در دیواره‌های نهایی معدن، شیست‌ها شامل (کوارتز شیست، میکا شیست و ...) تشکیل می‌دهند. بدین منظور نمونه‌های سطحی از مناطق ریزش کرده در دیواره شمالی معدن که همگی شامل کوارتز شیست و میکا شیست بودند انتخاب شد (شکل ۵-۱). همچنین نمونه‌های مغزه‌ای سنگ‌های فوق از گمانه‌های موجود در انبار مغزه به گونه‌ای انتخاب شد که به خوبی دیواره شمالی را پوشش دهند. نمونه‌ها از گمانه‌هایی برداشت شدند که یا در داخل کاواک نهایی بوده یا سنگ‌های فوق در گمانه با دیواره‌های نهایی معدن برخورد داشته باشند. در ضمن نمونه‌ها از عمق فعلی کاواک تا عمق نهایی کاواک برداشت شده‌اند (شکل ۵-۲).

در محدوده ۵۰۰ متری از دیواره شمالی کاواک معدن که دچار ریزش شده بود تعداد ۸ واحد سنگ مختلف که از لحاظ رنگ با یکدیگر متمایز بودند تشخیص داده شد و محل نمونه‌برداری هر واحد توسط GPS ثبت گردید. همچنین در هر واحد مقدار ۲۰ بار پسرانش چکش اشمیت جهت طبقه‌بندی مهندسی سنگ‌های هوازده برداشت شد. سپس از هر واحد بلوک‌هایی به ابعاد تقریبی $20 \times 30 \times 40$ سانتی متر جهت مغزه‌گیری و انجام آزمایش‌های ژئومکانیکی جمع‌آوری گردید. با توجه به محل‌های نمونه‌برداری سطحی تعداد ۴ گمانه اکتشافی قدیمی و ۲ گمانه اکتشافی جدید تعیین و از مترآزهایی که از لحاظ سنگ شناسی با نمونه‌های سطحی تطبیق داشت، مقدار ۱ متر نمونه از هر گمانه اکتشافی تهیه شد. بدین ترتیب در مجموع، نمونه‌ها از ۱۴ واحد مختلف سنگی در آزمایشگاه مکانیک سنگ معدن سنگ آهن گل‌گهر مورد بررسی قرار گرفت.



شکل ۵-۱: تعدادی از محل‌های نمونه‌برداری سطحی

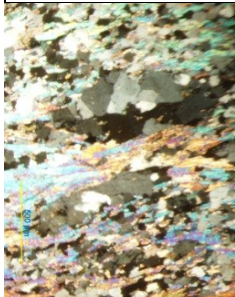


شکل ۵-۲: موقعیت کاواک و محل‌های نمونه‌برداری شده

۵-۴- تعیین نوع هوازدگی و یا دگرسانی

به منظور تعیین خواص میکروسکوپی و در نتیجه تعیین نوع هوازدگی، از هر واحد سنگ مقاطع نازک تهیه و در آزمایشگاه کانی شناسی دانشگاه شهید باهنر کرمان مورد مطالعه قرار گرفت. برای مثال مطالعات مربوط به نمونه شماره Mc_1 در جدول ۵-۱ آورده شده است. اطلاعات مربوط به دیگر نمونه‌ها در پیوست ۱ آورده شده است.

جدول ۵-۱: اطلاعات مربوط به مطالعه میکروسکوپی نمونه Mc_1

مشخصات نمونه		شماره نمونه
 	لیپیدوبلاستیک (شیستوز یا متورق)	Mc_1
	کوارتز فراوان (ریز تا درشت دانه، بی رنگ، بی شکل، دارای مقدار زیادی اینکلوژن، خاموشی موجی، بیرفرانژانس ضعیف سری اول، یک محوری مثبت) - مسکویت (از ریز تا درشت دانه، نیمه شکل دار، دارای کلیواژ یک جهته، برجستگی متغیر، خاموشی موازی، بیرفرانژانس سری سوم) - کمی بیوتیت (متوسط دانه، رنگ سبز تا قهوه‌ای، دارای چند رنگی، یکسری کلیواژ، خاموشی مستقیم، خاموشی چشم گربه‌ای، بیرفرانژانس بالا اوایل سری سوم، نیمه شکل دار)	
	بیوتیت‌ها کمی کلریتی شده‌اند	
	مقدار کمی زیرکن، کمی تورمالین، مقدار کمی اپیدوت	
	بیوتیت موسکویت شایست (میکا شایست)	
بافت		کانی‌ها
مشخصه بارز		کانی‌های فرعی
نام سنگ		

پس از انجام مطالعات میکروسکوپی نتایج زیر حاصل شد:

- تمام واحدهای سنگی جزء خانواده شپیست‌ها بوده و نام کلی میکاشیست به تمام واحدها داده شد.
- عمده کانی‌های تشکیل دهنده سنگ‌های مورد مطالعه شامل کوارتز، موسکویت و بیوتیت هستند.
- اکثر نمونه‌ها شامل بافت لیپیدوبلاستیک (شیستوز یا متورق) و برخی از نمونه‌ها دارای بافت هتروژن (کانی‌های درشت در زمینه ریز) و برخی دارای بافت چشمی بودند.
- هر سنگی که بیوتیت داشته باشد مستعد هوازدگی می‌باشد و معمولاً بیوتیت‌ها به کلریت تبدیل می‌شوند.
- موسکویت از دگرسانی سایر کانی‌ها تشکیل می‌شود و معمولاً از دگرسانی فلدسپارها بوجود می‌آید.

همچنین از مطالعات میکروسکوپی این نتیجه به دست آمد که در منطقه مورد مطالعه هوازدگی و دگرسانی از نوع شیمیایی بوده و جهت طبقه‌بندی مهندسی سنگ‌های هوازده این نتایج مورد استفاده قرار گرفته شد.

۵-۵- طبقه‌بندی مهندسی سنگ‌های هوازده و تعیین فازهای دگرسانی

تصمیم بر آن شد که طبقه‌بندی مهندسی سنگ‌های هوازده بر اساس سه روش تغییر رنگ سنگ‌ها، سرعت موج اولتراسونیک و آزمایش سختی چکش اشمیت انجام گیرد. برای رسیدن به این هدف مغزه‌هایی از هر نمونه تهیه گردید و تست اولتراسونیک طبق استاندارد ISRM بر روی نمونه‌ها انجام شد که نتایج این آزمایش در جدول ۵-۲ خلاصه شده است.

همچنین آزمایش سختی چکش اشمیت طبق روش پیشنهادی ISRM بر روی نمونه‌های سطحی و نمونه‌های گرفته شده از انبار مغزه با استفاده از چکش نوع L انجام شد که نتایج این آزمایش پس از میانگین‌گیری و اعمال ضریب کالیبراسیون در جدول ۵-۳ خلاصه شده است.

جدول ۵-۲: نتایج حاصل از آزمایش اولتراسونیک بر روی نمونه‌های معدن گل‌گهر

شماره نمونه	V_s (m/s)			V_p (m/s)			تعداد نمونه
	میانگین	حداکثر	حداقل	میانگین	حداکثر	حداقل	
Mc₁	۵۰۲۵	۵۲۹۰	۵۱۵۴	۲۸۹۳	۳۳۵۷	۳۱۰۵	۳
Mc₂	۴۴۵۳	۴۵۶۶	۴۵۰۹/۵	۳۷۰۵	۳۷۴۰	۳۷۲۲/۵	۲
Mc₃	۵۳۰۰	۵۳۰۰	۵۳۰۰	۳۴۲۶	۳۴۲۶	۳۴۲۶	۱
Mc₄	۴۳۲۸	۴۴۳۶	۴۳۸۲	۲۹۱۰	۲۹۱۴	۲۹۱۲	۲
Mc₅	۲۰۳۷	۲۷۶۵	۲۴۷۱	۲۰۱۱	۲۱۶۳	۲۰۷۶/۲۵	۴
Mc₆	۴۹۷۷	۵۰۷۳	۵۰۳۷/۳	۳۰۳۵	۳۵۸۸	۳۳۹۴	۳
Mc₇	۲۷۷۳	۲۷۷۳	۲۷۷۳	۲۳۴۶	۲۳۴۶	۲۳۴۶	۱
Mc₈	۴۹۱۸	۵۱۶۹	۵۰۷۵/۷۵	۳۱۷۳	۳۴۳۹	۳۲۸۸/۲۵	۴
104	۳۵۷۶	۳۹۰۴	۳۷۴۰	۲۷۰۲	۲۹۰۷	۲۸۰۴/۵	۲
130	۴۸۷۱	۵۳۲۹	۵۱۲۵	۲۸۲۹	۳۹۴۸	۳۲۳۳/۳	۳
146	۳۰۰۰	۴۲۵۰	۳۵۱۱/۲۵	۲۳۴۴	۳۰۵۷	۲۵۸۷/۷۵	۴
200	۴۹۹۵	۵۳۵۶	۵۰۹۱/۵	۳۲۷۳	۴۰۸۵	۳۵۰۳/۷۵	۴
1205	۵۰۲۳	۵۲۴۸	۵۱۵۷/۶	۳۱۷۵	۳۵۷۷	۳۳۲۱/۳	۳
1212	۴۷۵۲	۴۷۵۲	۴۷۵۲	۳۲۹۴	۳۲۹۴	۳۲۹۴	۱

جدول ۵-۳: نتایج آزمایش سختی اشمیت

شماره نمونه	سختی اشمیت
Mc₁	۴۸/۹۴
Mc₂	۳۶/۸۷
Mc₃	۴۴
Mc₄	۳۶/۳۶
Mc₅	۲۴/۵۸
Mc₆	۴۱/۰۶
Mc₇	۲۹/۶۳
Mc₈	۴۰/۵۵
104	۳۰
130	۴۲/۳۳
146	۳۱/۹
200	۴۳/۸
1205	۴۶/۱۹
1212	۳۹/۱

بر اساس سیستم طبقه‌بندی پیشنهادی برای سنگ‌های هوازده توسط (۱۹۸۱) ISRM و همچنین نتایج حاصله از مطالعات میکروسکوپی، شیست‌های معدن گل‌گهر در چهار گروه طبقه‌بندی شدند که از ۱۴ واحد نمونه‌برداری شده، ۷ واحد در گروه سنگ‌سالم، ۳ واحد در گروه کمی هوازده، ۲ واحد در گروه نیمی هوازده و ۲ واحد در گروه شدیداً هوازده قرار گرفتند. در معدن گل‌گهر هوازدگی سنگ‌ها هنوز تا مرحله کاملاً هوازده پیش نرفته است، به همین دلیل فازهای دیگر هوازدگی در طبقه‌بندی‌ها لحاظ نشده است.

سپس وقتی که فازهای دگرسانی با استفاده از طبقه‌بندی پیشنهادی لیو (۱۹۶۷) که از سرعت موج فشاری تبعیت می‌کند تعیین شد، دقیقاً نتایجی مشابه با طبقه‌بندی (۱۹۸۱) ISRM حاصل شد.

جدول ۵-۴: طبقه‌بندی بر اساس وضعیت ظاهری، سرعت موج و سختی اشمیت
برای شیست‌های معدن گل‌گهر

سختی اشمیت	Lliev (1967)	ISRM (1981)	شماره نمونه	فازهای دگرسانی تعیین شده
	سرعت موج فشاری (متر بر ثانیه)	مشاهدات وضعیت ظاهری		
۴۸/۹۴	۵۱۵۴	نشانه مشخصی از تجزیه یا رنگ برگشتگی دیده نمی‌شود. بر اثر ضربه چکش صدای زنگ داری از سنگ بر می‌خیزد.	Mc ₁	I
۴۴	۵۳۰۰		Mc ₃	
۴۱/۰۶	۵۰۳۷/۳		Mc ₆	
۴۰/۵۵	۵۰۷۵/۷۵		Mc ₈	
۴۲/۳۳	۵۱۲۵		130	
۴۳/۸	۵۰۹۱/۵		200	
۴۶/۱۹	۵۱۵۷/۶		1205	
۳۶/۸۷	۴۵۰۹/۵	رنگ برگشتگی جزئی به سمت داخل درزه‌ها و دیگر اشکال باز دیده می‌شود. دیگر مشخصات مانند F است.	Mc ₂	II
۳۶/۳۶	۴۳۸۲		Mc ₄	
۳۹/۱	۴۷۵۲		1212	
۳۰	۳۷۴۰	رنگ برگشتگی در همه جا توسعه یافته، کانی‌های ضعیف‌تر مثل میکا تجزیه شده‌اند.	104	III
۳۱/۹	۳۵۱۱/۲۵		146	
۲۴/۵۸	۲۴۷۱	اغلب کانی‌های سنگ تا حدی تجزیه شده‌اند. نمونه سنگ به زحمت با دست شکسته می‌شود.	Mc ₅	IV
۲۹/۶۳	۲۷۷۳		Mc ₇	

همچنین مشاهده شد که نتایج سختی چکش اشمیت برای سنگ سالم بین ۴۵-۴۰، برای کمی هوازده بین ۴۰-۳۵، برای نیمی هوازده بین ۳۵-۳۰ و برای شدیداً هوازده بین ۳۰-۲۵ بدست آمده و با این دو طبقه‌بندی همخوانی دارد و روند مشابه‌ای را دنبال می‌کند. به منظور درک بهتر این موضوع نتایج هر سه طبقه‌بندی در جدول ۴-۵ آورده شده است.

۵-۶- آماده سازی نمونه جهت انجام آزمایش‌های ژئومکانیکی

بعد از طبقه‌بندی سنگ‌های هوازده، خواص ژئومکانیکی (خواص فیزیکی و مکانیکی) سنگ‌های هوازده اندازه‌گیری می‌شود. معمولاً برای اندازه‌گیری این خواص نیاز به نمونه‌هایی است که در منطقه گرفته شده و به آزمایشگاه منتقل شده است. خواص فیزیکی اندازه‌گیری شده شامل تخلخل و چگالی می‌باشد. خواص مکانیکی اندازه‌گیری شده شامل مقاومت فشاری تک محوره، مقاومت کششی، سختی چکش اشمیت، ضریب الاستیسیته استاتیکی، دوام و سرعت موج طولی می‌باشد.

بعد از انجام کلیه آزمایش‌ها و تعیین خواص ژئومکانیکی سنگ‌ها، منحنی‌های مربوط به این خواص بر حسب درجات مختلف هوازده‌گی رسم می‌شود. گاهی برای نشان دادن این تغییرات می‌توان از جدول استفاده کرد.

به منظور تعیین خواص ژئومکانیکی شیست‌های معدن سنگ آهن گل‌گهر باید نمونه‌هایی که قبلاً به آزمایشگاه مکانیک سنگ منتقل شده است، جهت انجام آزمایش‌های مختلف بر اساس استاندارد ISRM آماده سازی می‌شد. به همین منظور مغزه‌هایی از نمونه‌های سطحی گرفته شد و به همراه نمونه‌های انبار مغزه جهت برش آماده گردید (شکل ۵-۳).



شکل ۵-۳: آماده‌سازی نمونه‌ها در آزمایشگاه مکانیک سنگ گل‌گهر

۵-۷- تأثیر هوازدگی و دگرسانی بر خواص ژئومکانیکی شیست‌های گل‌گهر

مطالعات زمین‌شناسی و میکروسکوپی منطقه معدنی گل‌گهر نشان می‌دهد که اکثر شیست‌های موجود در این منطقه تحت اثر فرآیند کلریته‌شدگی قرار گرفته‌اند که این باعث تغییر بسیاری از خواص ژئومکانیکی سنگ‌های مربوطه شده است. بدین منظور، در ادامه تأثیر این فرآیند بر روی خواص ژئومکانیکی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۵-۷-۱- مقاومت فشاری تک محوری سنگ بکر

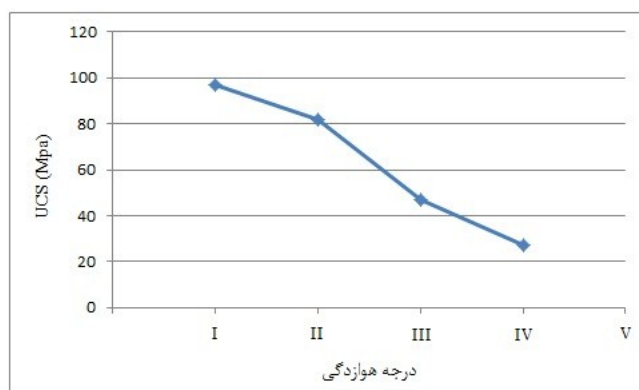
آزمایش مقاومت فشاری تک محوره یا نامحصور (UCS) مرسوم‌ترین آزمون آزمایشگاهی برای مطالعات مکانیکی سنگ بکر می‌باشد. این آزمایش به عنوان آزمایش پایه در اکثر پروژه‌های مهندسی انجام گرفته و به ندرت اتفاق می‌افتد که در پروژه‌ای مقاومت فشاری تک محوری نیاز نباشد [۲۸]. آزمایش مقاومت فشاری تک محوری بر روی گروه‌های مختلف هوازدگی انجام شد. آزمایش‌ها مطابق استاندارد ISRM در آزمایشگاه مکانیک سنگ معدن سنگ آهن گل‌گهر انجام گرفت که نتایج آن بصورت خلاصه شده در جدول ۵-۵ آورده شده است.

جدول ۵-۵: ارتباط بین مقاومت فشاری تک محوری (بر حسب مگاپاسکال) و درجه هوازدهی

درجه هوازدهی	میانگین	حداقل	حداکثر	تعداد نمونه
I	۹۶/۷۹	۶۷/۴	۱۱۸/۵	۱۸
II	۸۲/۰۸	۷۶/۶	۸۹	۵
III	۴۷/۱	۳۷/۱	۶۵/۳	۵
IV	۲۷/۲۸	۲۰	۴۲/۶	۵

همانگونه که مشاهده می‌شود، هوازدهی تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر مقاومت سنگ‌های مورد آزمایش دارد به‌طوری که می‌تواند تا بیش از ۷۵٪ از مقاومت سنگ را کاهش دهد.

همچنین در شکل ۴-۵ نمودار مربوط به ارتباط بین مقاومت فشاری تک محوری با درجه هوازدهی نشان داده شده است.



شکل ۴-۵: ارتباط بین مقاومت فشاری تک محوری و درجه هوازدهی

۵-۷-۲- مقاومت کششی برزیلی

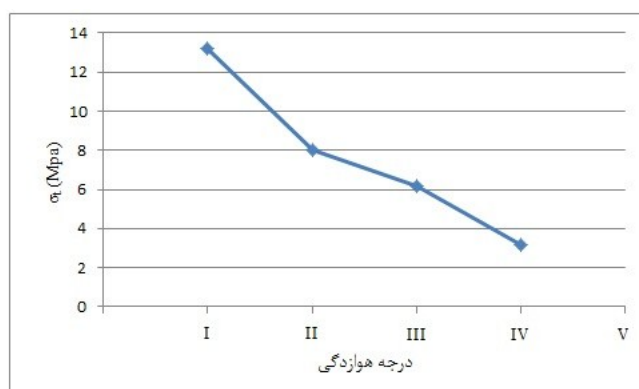
به طور کلی آگاهی از مقاومت کششی سنگ‌ها یکی از پیش شرط‌های مهم موفقیت در طراحی معادن، تونل‌ها، شیروانی‌ها و کنترل موثر لایه‌ها و طبقات زمین می‌باشد و درک مکانیزم‌های خرابی در چنین حالاتی را ساده می‌سازد. سنگ‌ها و به طور کلی تمامی مواد شکننده، ذاتاً در کشش بسیار ضعیف‌تر از فشار عمل می‌کنند. بدین ترتیب علت وقوع اکثر گسیختگی‌ها و ریزش‌ها در معادن، تونل‌ها، مغارها و

سایر سازه‌های مهندسی، ایجاد تنش‌های کششی در آنها می‌باشد [۲۸]. به همین دلیل آزمایش مقاومت کششی برزیلی بر روی گروه‌های مختلف هوازدگی انجام شد. آزمایش‌ها مطابق استاندارد ISRM در آزمایشگاه مکانیک سنگ معدن سنگ آهن گل‌گهر انجام گرفت که نتایج آن بصورت خلاصه شده در جدول ۵-۶ آورده شده است.

جدول ۵-۶: ارتباط بین مقاومت کششی (بر حسب مگاپاسکال) و درجه هوازدگی

درجه هوازدگی	میانگین	حداقل	حداکثر	تعداد نمونه
I	۱۳/۲۱	۸/۷۷	۱۷/۹	۲۰
II	۸/۰۲	۶/۸۹	۹/۴۶	۵
III	۶/۱۴	۲/۷۹	۸/۲۸	۵
IV	۳/۱۹	۲	۵/۳۱	۸

همانگونه که انتظار می‌رفت، هوازدگی تاثیر قابل ملاحظه‌ای نیز بر مقاومت کششی سنگ‌های مورد آزمایش می‌گذارد به طوری که می‌تواند تا بیش از ۷۵٪ از مقاومت کششی سنگ را نیز کاهش دهد. همچنین در شکل ۵-۵ نمودار مربوط به ارتباط بین مقاومت کششی با درجه هوازدگی نشان داده شده است.



شکل ۵-۵: ارتباط بین مقاومت کششی و درجه هوازدگی

۵-۷-۳- مقاومت بار نقطه‌ای

انجام آزمایش مقاومت فشاری تک محوری، مستلزم آماده سازی دقیق نمونه و در اختیار داشتن دستگاه‌های گران و حساس می‌باشد و در عین حال، نتایج حاصل وابستگی شدیدی به شیوه بارگذاری دارد. بنابراین در مواقعی که انجام آزمایش‌های متعدد برای کسب اطلاعات اولیه و مقدماتی مورد نیاز است، می‌توان از نتایج آزمایش بار نقطه‌ای که در آن آماده‌سازی نمونه مختصر و قابلیت انجام آن در صحرا نیز وجود دارد استفاده نمود [۲۹]. آزمایش مقاومت فشاری تک محوری بر روی گروه‌های مختلف هوازگی انجام شد. آزمایش‌ها مطابق استاندارد ISRM در آزمایشگاه مکانیک سنگ دانشگاه صنعتی شاهرود انجام گرفت که نتایج آن بصورت خلاصه شده در جدول ۵-۷ آورده شده است.

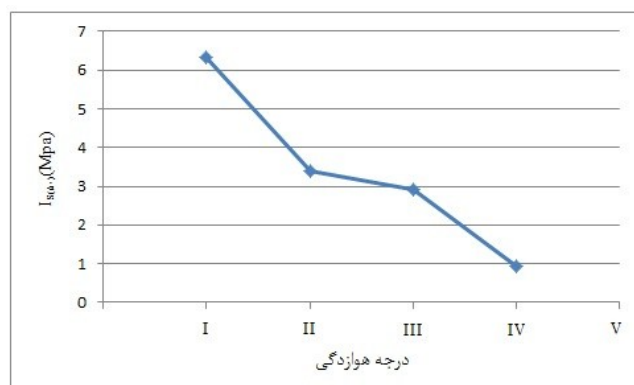
جدول ۵-۷: ارتباط بین اندیس بار نقطه‌ای (بر حسب مگاپاسکال) و درجه هوازگی

درجه هوازگی	میانگین	حداقل	حداکثر	تعداد نمونه
I	۶/۳۳	۴	۸/۸	۳۲
II	۳/۳۹	۲/۹	۴/۱	۱۰
III	۲/۹۲	۲/۱	۴/۱	۸
IV	۰/۹۲	۰/۵۸	۱/۳۸	۱۰

همانگونه که مشاهده می‌شود، هوازگی اندیس بار نقطه‌ای ($I_{s(0)}$) را به شدت کاهش می‌دهد.

همچنین در شکل ۵-۶ نمودار مربوط به ارتباط بین اندیس بار نقطه‌ای ($I_{s(0)}$) با درجه هوازگی

نشان داده شده است.



شکل ۵-۶: ارتباط بین اندیس بار نقطه‌ای و درجه هوازدگی

برای به دست آوردن مقاومت فشاری تک محوری از نتایج بار نقطه‌ای، از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$\sigma_{ci} = K \times I_{s(50)} \quad (۱-۵)$$

که K ضریب تبدیل مقاومت می‌باشد. بر حسب حدود مقاومت سنگ و مقدار اندیس بار نقطه‌ای ضرایبی پیشنهاد شده که در جدول ۸-۵ آورده شده است. مقدار این ضریب در سنگ‌های مختلف تغییر می‌کند. در واقع مقدار ضریب K وابسته به نسبت مقاومت فشاری به کششی، نسبت پواسون و نسبت طول به قطر نمونه می‌باشد [۳۰].

جدول ۸-۵: مقادیر پیشنهادی ضریب تبدیل [۳۱]

K	$I_{s(50)} (MPa)$	$\sigma_c (MPa)$
۱۴	۱/۸-۳/۵	۲۵-۵۰
۱۶	۳/۵-۶	۵۰-۱۰۰
۲۰	۶-۱۰	۱۰۰-۲۰۰
۲۵	۱۰>	۲۰۰>

۵-۷-۴- سرعت موج فشاری

امروزه استفاده از روش‌های دینامیکی برای برآورد دقیق و سریع ثابت‌های الاستیک در مهندسی

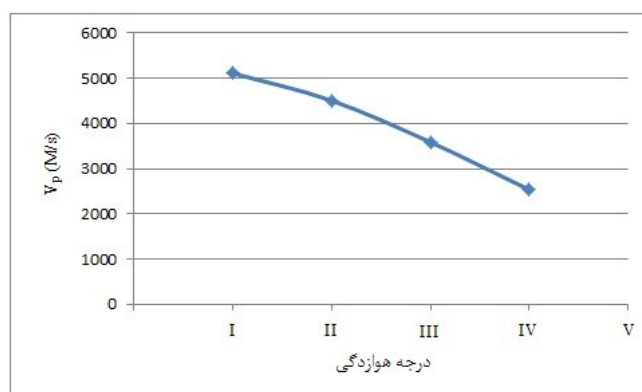
سنگ کاملاً پذیرفته شده است و از آنجایی که این آزمایش‌ها غیر مخرب هستند، مورد استقبال زیادی قرار گرفته‌اند. از عوامل موثر بر سرعت انتشار امواج صوتی و ثابت‌های الاستیک دینامیکی سنگ می‌توان به نوع سنگ، بافت، چگالی، تخلخل، ناهمسانگردی، سطح تنش، درصد رطوبت و درجه حرارت اشاره نمود [۲۸]. با توجه به نتایجی که در بخش (۵-۵) بدست آمد، پس از طبقه‌بندی نمونه‌ها و میانگین گیری از هر گروه هوازدگی، نتایجی که در جدول ۹-۵ مشاهده می‌کنید حاصل شد.

جدول ۹-۵: ارتباط بین سرعت موج فشاری (بر حسب متر بر ثانیه) و درجه هوازدگی

درجه هوازدگی	میانگین	حداقل	حداکثر	تعداد نمونه
I	۵۱۱۳/۸۵	۴۸۷۱	۵۳۵۶	۲۱
II	۴۵۰۷	۴۳۲۸	۴۷۵۲	۵
III	۳۵۸۷/۵	۳۰۰۰	۴۲۵۰	۶
IV	۲۵۳۱/۴	۲۰۳۷	۲۷۷۳	۵

همانگونه که مشاهده می‌شود، هوازدگی سرعت موج فشاری (طولی) را به شدت کاهش می‌دهد.

همچنین در شکل ۷-۵ نمودار مربوط به ارتباط بین سرعت موج فشاری (V_p) با درجه هوازدگی نشان داده شده است.



شکل ۷-۵: ارتباط بین سرعت موج فشاری و درجه هوازدگی

۵-۷-۵ - سختی چکش اشمیت

سختی یکی از مفاهیم رایجی است که برای توصیف رفتاری سنگ‌ها به کار می‌رود. سختی تابعی از عوامل ذاتی متفاوتی چون نوع کانی‌ها، ابعاد دانه‌ها، چسبندگی مرزی کانی‌ها، مقاومت و رفتار الاستیک و پلاستیک سنگ می‌باشد. ترکیب و اندرکنش این عوامل، تعیین کننده سختی یک سنگ است [۲۸]. سختی اشمیت کاربردهای مختلفی در طبقه‌بندی سنگ‌ها و تعیین خواص مهندسی آنها دارد. دیر و میلر در سال ۱۹۶۵ در مطالعاتی که برای طبقه‌بندی سنگ‌ها انجام دادند از سختی اشمیت استفاده کردند. این مطالعات توسط چکش اشمیت نوع L روی نمونه‌های مغزه‌ای از ۲۸ محل مختلف که در دامنه وسیعی از سنگ‌ها را پوشش می‌داد انجام گرفت. آنها دریافتند که سختی اشمیت با مقاومت فشاری تک محوری، ضریب همبستگی معادل ۰/۸۸ دارد. چنانچه سختی اشمیت در چگالی خشک سنگ ضرب شود، عدد حاصل با مقاومت فشاری تک محوری یک رابطه لگاریتمی با ضریب همبستگی ۰/۹۴۳ تشکیل می‌دهد (شکل ۵-۸) [۲۸].

با توجه به نتایجی که در بخش (۵-۵) بدست آمد، پس از طبقه‌بندی نمونه‌ها و میانگین‌گیری از هر گروه هوازدگی نتایجی که در جدول ۵-۱۰ مشاهده می‌کنید، برای ارتباط بین درجه هوازدگی و مقدار سختی چکش اشمیت برای شیبست‌های معدن سنگ آهن گل‌گهر حاصل شد.

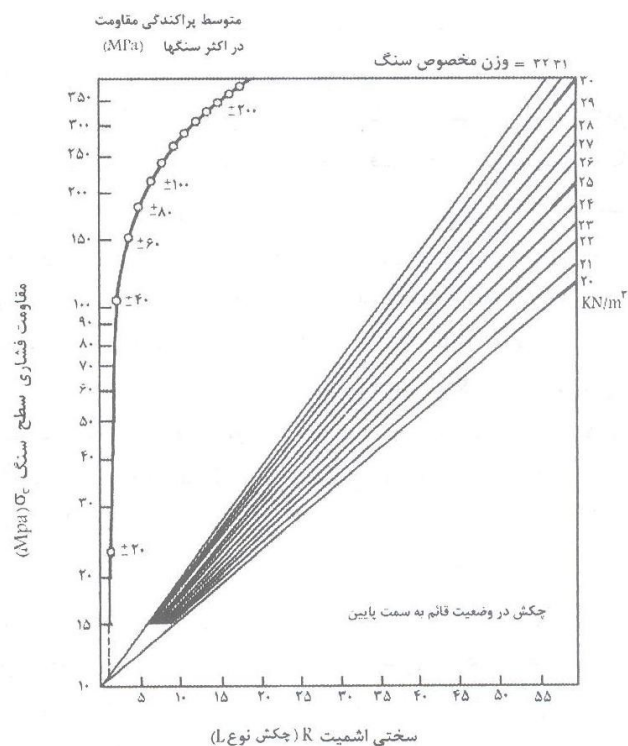
جدول ۵-۱۰: ارتباط بین سختی اشمیت و درجه هوازدگی

درجه هوازدگی	میانگین	حداقل	حداکثر	تعداد آزمایش
I	۴۳/۸۴	۴۰/۵۵	۴۸/۹۴	۷
II	۳۷/۴۴	۳۶/۳۶	۳۹/۱	۳
III	۳۰/۹۵	۳۰	۳۱/۹	۲
IV	۲۷/۱	۲۴/۵۸	۲۹/۶۳	۲

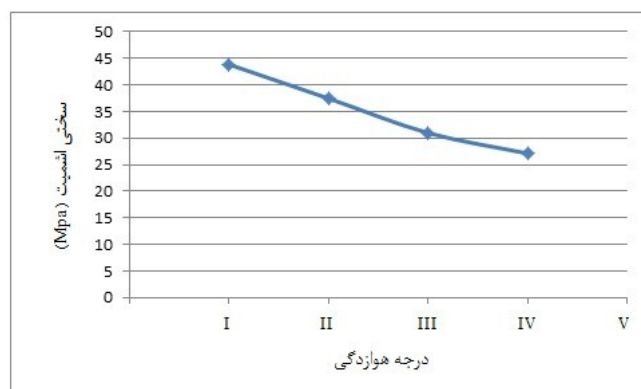
همانطور که مشاهده می‌شود، هوازدگی سختی چکش اشمیت را تا ۵۰٪ کاهش داده است.

همچنین در شکل ۵-۹ نمودار مربوط به ارتباط بین سختی چکش اشمیت با درجه هوازدگی نشان

داده شده است.



شکل ۵-۸: همبستگی بین چگالی، مقاومت فشاری تک محوری و عدد اشمیت در حالتی که چکش در وضعیت قائم به سمت پایین قرار دارد [۲۸]



شکل ۵-۹: ارتباط بین سختی اشمیت و درجه هوازدگی

۵-۷-۶- چگالی و تخلخل

چگالی سنگ تابع منافذ، درزه‌ها، شکاف‌ها و سایر فضاهای باز موجود در سنگ می‌باشد. چگالی یک نمونه مشخص سنگ، با افزایش عمق بیشتر می‌شود، چرا که با افزایش عمق و در نتیجه فشار سنگ‌های فوقانی، درزه‌ها و ترک‌های موجود در سنگ به تدریج بسته می‌شوند. بنابراین سن سنگ نیز رابطه مستقیم با چگالی آن دارد. از طرف دیگر هوازدگی سنگ‌ها باعث کاهش چگالی آنها می‌شود. این موضوع به خاطر افزایش درزه و ترک در سنگ، تجزیه شیمیایی و تورم برخی از کانی‌ها در اثر هوازدگی می‌باشد [۲۸].

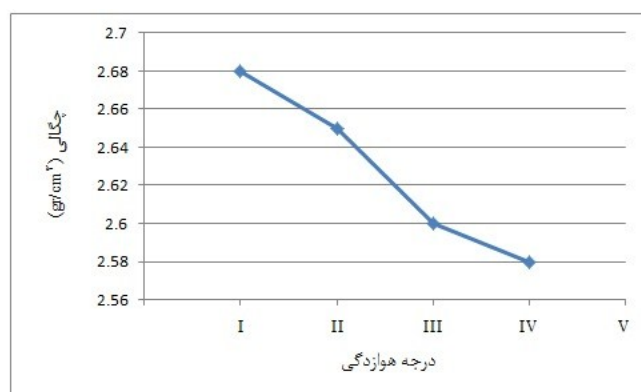
در سنگ‌های رسوبی با افزایش سن و عمق و با فرض یکسان بودن سایر شرایط، تخلخل کاهش می‌یابد. اثر عمق در سنگ‌هایی که از فشردگی رس به وجود آمده‌اند بسیار چشمگیر است. مقادیر چگالی و تخلخل در ارزیابی ذخایر معدنی، انتخاب نوع وسایل حفاری، طراحی سیستم حمل و نقل، محاسبه میزان مواد منفجره مصرفی و همچنین برای تعیین تنش قائم ناشی از وزن سنگ‌های روباره در اعماق مختلف توده سنگ به کار می‌رود [۲۸]. مقدار چگالی و تخلخل شیست‌های معدن سنگ آهن گل‌گهر برای هر یک از درجات هوازدگی با استفاده از روش اشباع و غوطه ورسازی بر طبق استاندارد ISRM، در آزمایشگاه مکانیک سنگ معدن سنگ آهن گل‌گهر محاسبه گردید که نتایج آن در جدول ۵-۱۱ آورده شده است.

جدول ۵-۱۱: ارتباط بین چگالی (بر حسب gr/cm^3) و تخلخل (بر حسب %)
با درجه هوازدگی

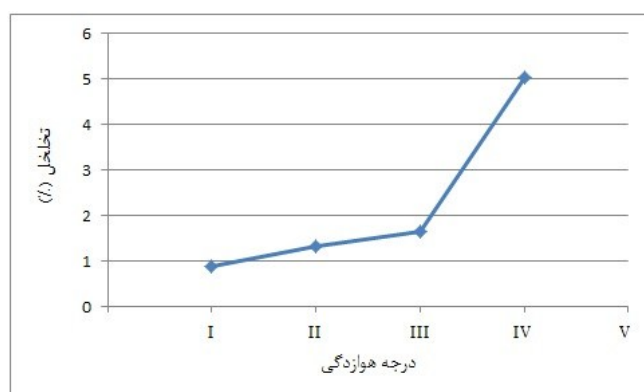
درجه هوازدگی	چگالی	تخلخل
I	۲/۶۸	۰/۸۸
II	۲/۶۵	۱/۳۳
III	۲/۶	۱/۶۶
IV	۲/۵۸	۵/۰۴

مشاهده می‌شود که با افزایش درجه هوازدگی و دگرسانی، چگالی کاهش و تخلخل افزایش می‌یابد. همچنین تاثیر هوازدگی و دگرسانی بر روی تخلخل، به خصوص از درجه III به بعد بیشتر می‌باشد.

همچنین در شکل ۵-۱۰ نمودار مربوط به ارتباط بین چگالی با درجه هوازدگی و در شکل ۵-۱۱ ارتباط بین تخلخل با درجه هوازدگی نشان داده شده است.



شکل ۵-۱۰: ارتباط بین چگالی و درجه هوازدگی



شکل ۵-۱۱: ارتباط بین تخلخل و درجه هوازدگی

۵-۷-۷- شاخص دوام وارفنگی

وارفنگی (شکستگی) از ویژگی‌های اساسی سنگ‌های ضعیف و به خصوص سنگ‌های حاوی کانی‌های رسی می‌باشد. یکی از مسائل مهم در طراحی و اجرای پروژه‌های عمرانی و معدنی، قابلیت

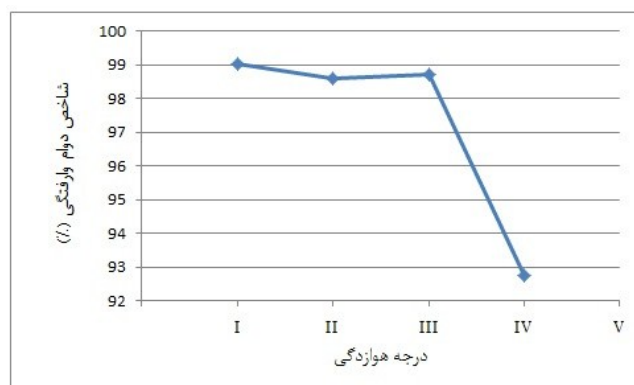
وارفتگی سنگ‌های غنی از رس و تاثیرپذیری آنها از فرآیندهای هوازدگی است. فرآیندهایی مثل پوسته پوسته شدن، هیدراسیون، وارفتگی، انحلال، اکسیداسیون، سایش و ... از جمله عواملی هستند که باعث تغییر ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی سنگ‌ها شده و قابلیت باربری آنها را کاهش می‌دهند [۲۸]. آزمایش دوام وارفتگی بر روی گروه‌های مختلف هوازدگی انجام شد. آزمایش‌ها مطابق استاندارد ISRM در آزمایشگاه مکانیک سنگ معدن سنگ آهن گل‌گهر انجام گرفت که نتایج آن بصورت خلاصه شده در جدول ۵-۱۲ آورده شده است.

جدول ۵-۱۲: ارتباط بین شاخص دوام وارفتگی (بر حسب %) و درجه هوازدگی

درجه هوازدگی	شاخص دوام وارفتگی دومین مرحله (%)	افت وزنی (%)
I	۹۹/۰۲	۰/۹۸
II	۹۸/۶۱	۱/۳۹
III	۹۸/۷۳	۱/۲۷
IV	۹۲/۷۵	۷/۲۵

مشاهده می‌شود که با افزایش درجه هوازدگی و دگرسانی، دوامداری سنگ کاهش می‌یابد. همچنین تاثیر هوازدگی و دگرسانی بر روی دوامداری، به خصوص از درجه III به بعد بیشتر می‌باشد.

همچنین در شکل ۵-۱۲ نمودار مربوط به ارتباط بین شاخص دوام وارفتگی با درجه هوازدگی نشان داده شده است.



شکل ۵-۱۲: ارتباط بین شاخص دوام و درجه هوازدگی

۵-۷-۸- مدول الاستیسیته استاتیکی (مدول یانگ)

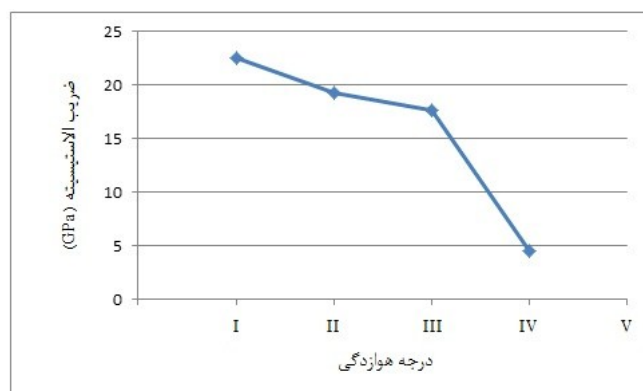
منحنی‌های تنش - کرنش به دست آمده از آزمایش فشاری تک محوری را می‌توان برای محاسبه مدول‌های تغییر شکل پذیری سنگ مورد استفاده قرار داد. مدول‌های تغییر شکل پذیری سنگ شامل مدول یانگ، ضریب پواسون، مدول برشی و مدول حجمی می‌باشند. مهمترین و مفیدترین آنها مدول یانگ می‌باشد که رفتار الاستیک سنگ را به خوبی توصیف می‌کند [۲۸]. مدول الاستیسیته استاتیکی (مدول یانگ) با استفاده از نتایج مقاومت فشاری شیست‌های معدن سنگ آهن گل‌گهر برای هر یک از درجات هوازدگی با استفاده از استاندارد ISRM تعیین شد که نتایج آن در جدول ۵-۱۳ خلاصه شده است.

جدول ۵-۱۳: ارتباط بین ضریب الاستیسیته استاتیکی (بر حسب گیگا پاسکال) و درجه هوازدگی

درجه هوازدگی	میانگین	حداقل	حداکثر	تعداد نمونه
I	۲۲/۵۹	۱۷/۳	۲۹/۹	۱۸
II	۱۹/۲۲	۱۳/۱	۲۵/۲	۵
III	۱۷/۰۶	۱۱/۶	۱۹/۳	۵
IV	۴/۴۸	۲/۲	۷/۲	۵

همچنین در شکل ۵-۱۳ نمودار مربوط به ارتباط بین ضریب الاستیسیته استاتیکی با درجه

هوازدگی نشان داده شده است.



شکل ۵-۱۳: ارتباط بین ضریب الاستیسیته استاتیکی و درجه هوازدگی

مشاهده می‌شود که با افزایش درجه هوازدگی و دگرسانی، ضریب الاستیسیته استاتیکی کاهش می‌یابد. هوازدگی و دگرسانی بر روی ضریب الاستیسیته استاتیکی، به خصوص از درجه III به بعد تاثیر بیشتری می‌گذارد.

۵-۸- کمی سازی تاثیر هوازدگی و دگرسانی

کمی سازی تاثیر هوازدگی و دگرسانی بر روی شیست‌های معدن سنگ آهن گل‌گهر با استفاده از روش احتمال پایداری شیب (SSPC) صورت گرفت، که تشریح کامل این روش در فصل سوم آورده شده است. با قرار دادن فاکتور کاهش سنگ سالم ($WE_1=1$) فاکتور کاهش برای هر پارامتری در هر درجه‌ای از هوازدگی بدست می‌آید.

روابط نهایی که با استفاده از روش SSPC در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفت به صورت زیر

است:

$$WE_I = 1 \quad (2-5)$$

$$\begin{aligned} ratio_{II,I} &= \frac{1}{U} \sum^U ratio_{U,II,I} & WE_{II} &= ratio_{II,I} \times WE_I \\ ratio_{III,II} &= \frac{1}{U} \sum^U ratio_{U,III,II} & WE_{III} &= ratio_{III,II} \times WE_{II} \\ ratio_{IV,III} &= \frac{1}{U} \sum^U ratio_{U,IV,III} & WE_{IV} &= ratio_{IV,III} \times WE_{III} \end{aligned}$$

به عنوان مثال، محاسبه فاکتور کاهش برای مقاومت فشاری تک محوری در اینجا ذکر می‌شود و محاسبه این فاکتور برای سایر پارامترها در پیوست ۲ به طور کامل آمده است.

$$\begin{aligned} WE_I &= 1 \\ ratio_{II,I} &= \frac{1}{5} \sum \frac{77/9}{103/2} + \frac{89}{83/7} + \frac{84}{111/6} + \frac{76/6}{100/3} + \frac{82/9}{87/9} = 0.85 \\ WE_{II} &= 0.85 \times 1 = 0.85 \\ ratio_{III,II} &= \frac{1}{5} \sum \frac{41}{77/9} + \frac{47/1}{89} + \frac{65/3}{84} + \frac{37/1}{76/6} + \frac{45}{82/9} = 0.57 \\ WE_{III} &= 0.57 \times 0.85 = 0.49 \\ ratio_{IV,III} &= \frac{1}{5} \sum \frac{20}{41} + \frac{26/5}{47/1} + \frac{20}{65/3} + \frac{42/6}{37/1} + \frac{27/3}{45} = 0.62 \\ WE_{IV} &= 0.62 \times 0.49 = 0.3 \end{aligned}$$

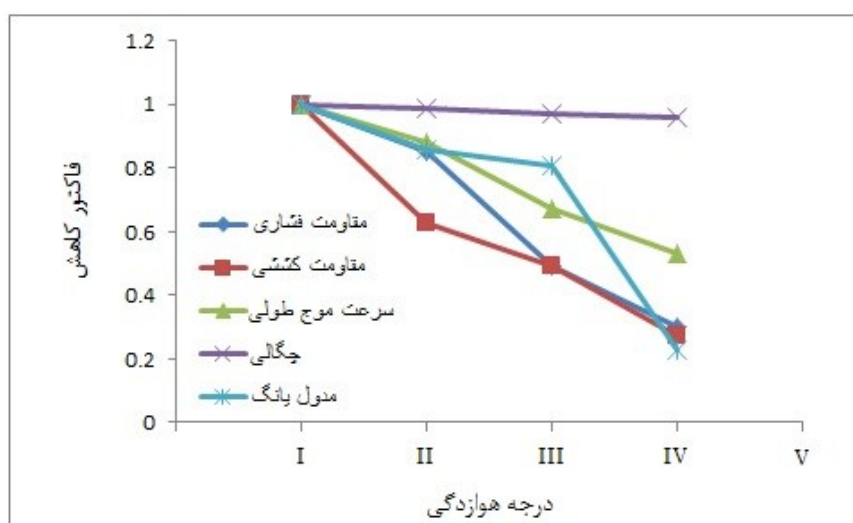
نتایج تعیین مقدار فاکتور کاهش برای مقاومت فشاری تک محوری، مقاومت کششی، مدول الاستیسیته استاتیکی، سرعت موج طولی و چگالی در جدول ۵-۱۴ آورده شده است. همانطوری که از روی جدول مشاهده می‌شود کمترین مقدار فاکتور کاهش مربوط به ضریب الاستیسیته استاتیکی با درجه

هوازدگی IV می باشد که مقدار آن $0/23$ است. بعد از آن مقاومت کششی و مقاومت فشاری تک محوری با مقادیر به ترتیب $0/27$ و $0/3$ در رتبه های بعدی قرار دارند.

جدول ۵-۱۴: میزان فاکتور کاهش پارامترها در درجات مختلف هوازدگی (WE_i)

درجه هوازدگی	فاکتور کاهش پارامترها			
	مقاومت فشاری	مقاومت کششی	مدول الاستیسیته	سرعت موج طولی
I	۱	۱	۱	۱
II	$0/85$	$0/63$	$0/86$	$0/88$
III	$0/49$	$0/49$	$0/81$	$0/67$
IV	$0/3$	$0/27$	$0/23$	$0/53$

جهت مقایسه، فاکتور کاهش مربوط به چند تا از پارامترهای مهم در مقابل درجه هوازدگی رسم گردیده است که در شکل ۵-۱۴ مشاهده می شود. همانطوری که از نمودار مشخص است، تغییرات در مقدار فاکتور کاهش چگالی بسیار ناچیز است. که این می تواند نشان دهنده این باشد که چگالی شیبست های معدن سنگ آهن گل گهر، کمترین تاثیر را از میزان هوازدگی می پذیرند.



شکل ۵-۱۴: مقایسه فاکتور کاهش برخی از پارامترها

۵-۹- جمع بندی

در این فصل به بررسی تاثیر هوازدگی و دگرسانی بر روی پارامترهای ژئومکانیکی شیست‌های معدن سنگ آهن گل‌گهر پرداخته شد. مشاهده شد که هوازدگی و دگرسانی تاثیر شدیدی بر خواص ژئومکانیکی، خصوصاً مقاومت فشاری تک محوری، مقاومت کششی و ضریب الاستیسیته می‌گذارد. همچنین با کمی سازی تاثیر هوازدگی و دگرسانی مشخص گردید که دانسیته تاثیر چندانی از هوازدگی و دگرسانی نمی‌پذیرد. این نتایج در فصل بعد جهت تعیین خصوصیات ژئومکانیکی توده‌سنگ مورد استفاده قرار خواهد گرفت.

۶ فصل ششم: تعیین خصوصیات ژئومکانیکی توده

سنگ

۶-۱- مقدمه

اغلب تحلیل‌هایی که برای طراحی در سنگ انجام می‌گیرند، شامل تعیین رفتار، پیش‌بینی حالت تغییرشکل و وقوع گسیختگی احتمالی توده سنگ می‌باشند. برای نیل به این هدف، لازم است که پارامترهای کنترل‌کننده خصوصیات توده سنگ تعیین شوند. از این رو، تعیین پارامترهای رفتاری توده سنگ یکی از مسائل مهم در مهندسی سنگ می‌باشد. توده سنگ شامل ماده سنگ، سنگ‌سالم و ناپیوستگی‌ها است. توده سنگ شکسته به طور قابل توجهی مقاومت پایین‌تری نسبت به سنگ بکر دارد و به ندرت ممکن است آزمون‌های آزمایشگاهی را روی سنگ شکسته انجام دهند. چرا که به دست آوردن نمونه‌های دست نخورده که به اندازه کافی بزرگ باشند مشکل است. تست‌های آزمایشگاهی نیز تنها بیانگر مشخصات سنگ‌سالم هستند. یکی از مسائل بسیار مهم در پروژه‌های ژئومکانیکی، تعیین پارامترهای مقاومتی توده سنگ است. این پارامترها عمدتاً شامل چسبندگی (C) و زاویه اصطکاک داخلی (ϕ) می‌باشند. شناخت و تهیه اطلاعات دقیق از اندیس‌های مقاومتی و پارامترهای رفتاری توده سنگ در دیواره یک معدن، بسیار حائز اهمیت است. معمولاً تخمین این پارامترها بر اساس آزمون‌های آزمایشگاهی و صحرایی و معیارهای تجربی موجود صورت می‌گیرد.

این فصل به نحوه تعیین خواص فیزیکی و مکانیکی مصالح تشکیل دهنده دیواره نهایی معدن با استفاده از نتایج آزمون‌های آزمایشگاهی و بررسی‌های صحرایی می‌پردازد.

۶-۲- تعیین خصوصیات مهندسی سنگ‌ها

روش‌های مختلفی برای تعیین خصوصیات توده سنگ وجود دارند که می‌توانند به دو گروه کامل تقسیم شوند: روش‌های مستقیم و روش‌های غیر مستقیم (جدول ۶-۱).

روش‌های مستقیم شامل آزمون‌های آزمایشگاهی و تست‌های برجا هستند. بسیاری از منابع

مکانیک سنگ و مهندسی سنگ اطلاعاتی شامل آزمایش‌های برجا و آزمایشگاهی برای تعیین خصوصیات سنگ ارائه می‌دهند. روش‌های مستقیم دارای محدودیت‌های مختلفی هستند. برای به‌دست آوردن نتایج واقعی از خصوصیات سنگ، سنگ‌های با حجم متفاوت که دارای تعدادی از ناپیوستگی‌های شناخته شده متفاوت هستند، باید در سطوح تنش مربوطه، تحت جهت تنش‌های متفاوت آزمایش شوند. انجام یک چنین برنامه آزمایشگاهی در آزمایشگاه تقریباً غیر ممکن است. همچنین با آزمایش‌های برجا، یک چنین برنامه آزمایشی بسیار دشوار، زمان‌بر و گران خواهد بود [۳۲].

روش‌های غیر مستقیم شامل روابط تجربی و نظری، ترکیبی از مشخصات ناپیوستگی‌ها و سنگ‌بکر با استفاده از روش‌های عددی یا تحلیلی و تحلیل برگشتی با استفاده از مشاهده صحرایی نمونه‌های عینی هستند. این روش‌ها به دلیل محدودیت‌های روش‌های مستقیم، نه تنها می‌توانند برای تعیین مشخصات سنگ به کار روند، بلکه می‌توانند برای بررسی نتایج آزمایش مورد استفاده قرار گیرند [۳۲].

جدول ۶-۱: روش‌های تعیین خصوصیات توده سنگ [۳۲]

روش‌های غیرمستقیم	روش‌های مستقیم
روابط تجربی یا نظری	تست‌های آزمایشگاهی
ترکیبی از مشخصات ناپیوستگی‌ها و توده سنگ با استفاده از روش‌های عددی یا تحلیلی	تست‌های برجا
تحلیل برگشتی با استفاده از مشاهدات صحرایی و نمونه‌های عینی	

در ادامه به نحوه تعیین پارامترهای مقاومتی سنگ با استفاده از معیار هوک – براون پرداخته خواهد شد.

۶-۳- تعیین پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ معدن

برای تعیین پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ معدن آهن گل‌گهر از معیار شکست تعمیم

یافته هوک- براون استفاده شد. معیار شکست هوک- براون به دلایل زیر برای تعیین مقاومت برشی توده سنگ شیروانی مناسب می باشد [۳۳]:

- توسعه یافتن معیار هوک- براون به طور ویژه برای سنگ بکر و توده سنگ.
- تعیین آسان پارامترهای ورودی معیار هوک- براون.
- استفاده گسترده و موفقیت آمیز این معیار در طی بیش از دو دهه در طیف گسترده ای از انواع سنگها.

۶-۳-۱- معیار هوک - براون برای توده سنگ های درزه دار

معیار تعمیم یافته هوک- براون^۱ به صورت زیر تعریف می شود [۳۲]:

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma'_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a \quad (۱-۶)$$

که در آن:

$$\sigma'_1 = \text{تنش موثر اصلی حداکثر در لحظه شکست}$$

$$\sigma'_3 = \text{تنش موثر اصلی حداقل در لحظه شکست}$$

$$\sigma_{ci} = \text{مقاومت فشاری تک محوره سنگ بکر}$$

m_b ثابت توده سنگ می باشد که به ماهیت و درجه خردشدگی توده سنگ بستگی داشته و به

صورت زیر محاسبه می شود:

$$m_b = m_i \exp \left(\frac{GSI - 100}{28 - 14D} \right) \quad (۲-۶)$$

^۱ Generalized Hoek – Brown Criterion

در معادله (۲-۶) m_i ثابت هوک- براون سنگ بکر و D فاکتور اغتشاش توده سنگ می باشد که در بخش‌های بعدی توضیح داده می شود. S و a نیز ثابت‌هایی هستند که مطابق روابط زیر محاسبه می‌شوند:

$$S = \exp\left(\frac{GSI - 100}{9 - 3D}\right) \quad (۳-۶)$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left(e^{\frac{-GSI}{15}} - e^{\frac{-GSI}{20}} \right) \quad (۴-۶)$$

۲-۳-۶- ثابت هوک- براون سنگ بکر

به طور ایده آل، مقدار ثابت m_i سنگ بکر بوسیله آزمایش سه محوری تعیین می شود. به هر حال، در بسیاری از موارد به علت محدودیت زمان، بودجه و عدم امکان نمونه‌گیری انجام آزمایش سه محوری میسر نمی‌باشد. هنگامی که امکان انجام آزمایش مذکور فراهم نباشد، تخمین m_i می تواند به کمک جدول ۲-۶ صورت بگیرد [۳۴].

در مورد ثابت هوک- براون سنگ بکر با مراجعه به جدول ۲-۶ مقدار ۱۲ برای شیب‌ها در نظر گرفته شد. خوشبختانه، مقدار m_i نسبت به سه پارامتر دیگر σ_{ci} ، GSI و D کمترین تاثیر را بر مقاومت توده سنگ دارد. لذا یک مقدار میانگین از مقادیر جدول ۲-۶ در مسائل کاربردی برای هر نوع سنگ از دقت کافی برخوردار است [۳۴].

جدول ۶-۲: مقادیر ثابت m_i برای سنگ بکر با توجه به گروه سنگ [۳۲]

نوع سنگ	کلاس	گروه	بافت			
			دانه درشت	متوسط دانه	دانه ریز	بسیار دانه ریز
رسوبی	غیر آواری	کربناته	سنگ آهک	سنگ آهک	لای سنگ	رس ۴±۲
			کریستالی	اسپاریتی	گریواک	شیل (۶±۲)
		تبخیری		ژیپس	انیدریت	مارل (۷±۲)
			آلی			
دگرگونی	کمی متورق	بدون تورق	مرمر	هورنفلس	کوارتزیت	
			۹±۳	(۱۹±۴)	۲۰±۳	
			متاسندستون (۱۹±۳)			
آذرین	بیرونی	روشن	میگماتیت	آمفیبولیت		
			(۲۹±۳)	۲۶±۶		
		تیره	گابرو	دولریت	فیلیت	اسلیت
			(۲۷±۳)	(۱۶±۵)	(۷±۳)	۷±۴
آذر آواری	گدازه	آذر آواری	آگلومرا	برش	توف	
			(۱۹±۳)	(۱۹±۵)	(۱۳±۵)	
			اندزیت	بازالت		
			۲۵±۵	۲۵±۵		

* توجه شود که پارامترهای داخل پرانتز تخمینی هستند.

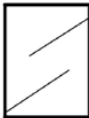
۶-۳-۳- اندیس مقاومت زمین شناسی

هوک و براون دریافتند که یک معیار شکست تا زمانی که نتواند ارتباطی را میان مشاهدات زمین شناسی برقرار نماید و به آسانی توسط مهندسين زمین شناسی در صحرا قابل استفاده نباشد، ارزش عملی ندارد. آنها در اوایل از سیستم RMR جهت توسعه معیار خود استفاده نمودند. اعمال این معیار شکست به توده سنگ‌های با کیفیت پایین منجر به تغییرات دیگر و در نهایت گسترش طبقه‌بندی جدیدی به نام اندیس مقاومت زمین شناسی GSI شد. هوک و همکاران این سیستم رده‌بندی را برای توده سنگ‌های ناهمگن نیز توسعه دادند [۳۴]. اخیراً هم کاربرد این سیستم برای توده سنگ‌های رسوبی با سنگ شناسی متغیر پیشنهاد شده است [۳۵].

خصوصیات سنگ شناسی هر سنگ اجازه ظهور بعضی از خواص را به توده سنگ نمی‌دهد. برای مثال، ضعیف بودن شرایط سطح درزه‌ها در یک توده سنگ آهکی به علت ماهیت سنگ آهک و یا شرایط خوب سطح درزه‌ها در یک توده سنگ شیلی امکان پذیر نمی‌باشد. لذا برای انواع مختلف سنگ‌ها جداول محتمل‌ترین مقادیر GSI تهیه گردیده است. البته انحراف‌هایی هم ممکن است رخ بدهد که استثنا بوده و نیاز به بررسی‌های بیشتر دارد [۳۵]. ایده اصلی سیستم GSI توصیف کیفی زمین شناسی مهندسی توده سنگ است و بر مبنای ارزیابی بصری توده سنگ، ابعاد بلوک‌ها و شرایط درزه‌های توده سنگ می‌باشد، که از طریق بررسی وضعیت رخنمون و یا سطوح حفاری شده تعیین می‌گردد.

با بررسی نقشه‌های زمین شناسی، گمانه‌های حفاری و مطالعات میکروسکوپی مشخص شد که قسمت عمده توده سنگ باطله تشکیل دهنده دیواره نهایی معدن شماره ۱ گل‌گهر از جنس کوارتز مسکویت شیست و کوارتز بیوتیت شیست می‌باشد. لذا در تعیین مقدار GSI توده سنگ، از جدول تخصیص یافته به خانواده سنگ‌های شیست استفاده شد (جدول ۶-۳).

جدول ۳-۶: دامنه معمول GSI در شیست‌ها [۳۲]

GEOLOGICAL STRENGTH INDEX FOR JOINTED ROCKS (Hoek and Marinos, 2000) From the lithology, structure and surface conditions of the discontinuities, estimate the average value of GSI. Do not try to be too precise. Quoting a range from 33 to 37 is more realistic than stating that GSI = 35. Note that the table does not apply to structurally controlled failures. Where weak planar structural planes are present in an unfavourable orientation with respect to the excavation face, these will dominate the rock mass behaviour. The shear strength of surfaces in rocks that are prone to deterioration as a result of changes in moisture content will be reduced if water is present. When working with rocks in the fair to very poor categories, a shift to the right may be made for wet conditions. Water pressure is dealt with by effective stress analysis.		SURFACE CONDITIONS VERY GOOD Very rough, fresh unweathered surfaces GOOD Rough, slightly weathered, iron stained surfaces FAIR Smooth, moderately weathered and altered surfaces POOR Slickensided, highly weathered surfaces with compact coatings or fillings or angular fragments VERY POOR Slickensided, highly weathered surfaces with soft clay coatings or fillings				
STRUCTURE		DECREASING SURFACE QUALITY →				
	INTACT OR MASSIVE - intact rock specimens or massive in situ rock with few widely spaced discontinuities	90			N/A	N/A
	BLOCKY - well interlocked undisturbed rock mass consisting of cubical blocks formed by three intersecting discontinuity sets	80	70			
	VERY BLOCKY - interlocked, partially disturbed mass with multi-faceted angular blocks formed by 4 or more joint sets		60			
	BLOCKY/DISTURBED/SEAMY - folded with angular blocks formed by many intersecting discontinuity sets. Persistence of bedding planes or schistosity		50			
	DISINTEGRATED - poorly interlocked, heavily broken rock mass with mixture of angular and rounded rock pieces		40			
	LAMINATED/SHEARED - Lack of blockiness due to close spacing of weak schistosity or shear planes		30			
			20			
			10			
		N/A	N/A			

با توجه به درجات مختلف هوازدگی، مقادیر GSI برای شیبست‌های معدن شماره ۱ گل‌گهر تعیین شد که مقادیری بین ۳۰-۴۵ بدست آمد که محدوده مشخص شده در جدول ۶-۳ به مقادیر تعیین شده اشاره می‌کند. به دلیل اینکه جدول پیشنهادی GSI شامل پارامترهای کیفی و توصیفی شرایط سطح درزه‌ها می‌باشد، این امکان وجود دارد که برای یک توده سنگ معین، بسته به میزان تجارب شخصی مقادیر متفاوتی از GSI توسط اشخاص مختلف پیشنهاد شود [۳۷]. لازم به ذکر است که در تخمین GSI مقدار بسیار دقیق آن توصیه نمی‌شود. بلکه برای تخمین GSI حاکم بر توده سنگ مورد بررسی باید دامنه‌ای از اعداد بیان شود. برای مثال، ذکر دامنه GSI برابر با ۳۳ تا ۳۷ بسیار واقع‌گرایانه‌تر از عدد منفرد ۳۵ است [۳۸].

در مورد توده سنگ‌های با کیفیت بهتر ($GSI > 25$) مقدار GSI را می‌توان مستقیماً از نسخه سال ۱۹۷۶ طبقه بندی بیناوسکی، RMR_{76} ارزیابی نمود. البته در مورد توده سنگ‌های با کیفیت پایین، ارزیابی مقدار RMR بسیار سخت و مشکل بوده و لذا رده‌بندی RMR را نباید برای تعیین مقادیر GSI توده سنگ‌هایی با کیفیت پایین به کار برد [۲۹]. در مورد ارزیابی وضعیت ماده معدنی، از اطلاعات معدن سنگ آهن شماره ۱ گل‌گهر و سیستم رده‌بندی RMR_{76} استفاده شد. امتیاز RMR_{76} ماده معدنی برابر ۵۵ می‌باشد [۳۷]. بنابراین مقدار GSI توده سنگ حاوی ماده معدنی برابر 55 ± 5 پیشنهاد می‌شود.

۴-۳-۶- فاکتور اغتشاش

در اثر استخراج و ایجاد کاواک، تنش‌های محصور کننده توده سنگ به علت حذف وزن روباره رها شده و به توده سنگ اجازه اتساع و افزایش حجم را می‌دهد. آسیب‌های ناشی از انفجار نیز با ایجاد ترک‌های جدید و باز شدگی ترک‌های موجود موجب کاهش درهم قفل شدگی توده سنگ می‌گردد که این عوامل بر مقاومت توده سنگ تاثیر منفی می‌گذارد. مقدار این فاکتور از صفر برای توده سنگ دست نخورده تا یک برای توده سنگ دست خورده تغییر می‌کند که مقادیر پیشنهادی آن برای شیب‌های سنگی در

پیوست ۳ آورده شده است [۳۳].

در حال حاضر تجربیات کمی در مورد استفاده از این فاکتور وجود دارد و لازم است تجربیات بیشتری درباره این موضوع گردآوری شود. ولی به هر حال تجربیات محدود پیشنهاد می‌کند که این فاکتور تخمین قابل قبولی را درباره اثر انفجار و رهایی تنش در اختیار قرار می‌دهد [۳۷]. به علت حجم نسبتاً بالای آتشکاری در معادن روباز و عدم رعایت تاخیرهای مناسب، توده سنگ شیروانی آسیب نسبتاً زیادی را متحمل می‌شود. بنابراین مقدار فاکتور اغتشاش برای توده سنگ معدن برابر ۱ پیشنهاد می‌شود.

۴-۶- تعیین توزیع پارامترهای ورودی جهت تحلیل احتمالاتی

پارامترهای موثر در تحلیل پایداری سطوح شیبدار عبارتند از:

- پارامترهای مقاومت برشی، چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی
- فشار آب منفذی
- وزن مخصوص
- جانمایی سطح لغزش
- ضخامت لایه با مقاومت پائین
- اثر شرایط محیطی از قبیل بارگذاری سطحی، بارگذاری ناشی از زلزله و ...

برای تحلیل احتمالاتی پایداری سطوح شیبدار می‌بایست عدم قطعیت موجود در پارامترهای ورودی تعیین شوند. این عدم قطعیت‌ها بوسیله توابع توزیع احتمال و مولفه‌های احتمالاتی (مقدار میانگین و انحراف معیار) بیان می‌شوند. در اکثر پروژه‌های ژئوتکنیک، اطلاعات کافی جهت تعیین شکل تابع توزیع احتمال پارامترهای ورودی تحلیل‌ها موجود نمی‌باشد. بنابراین انتخاب یک تابع توزیع احتمال برای پارامترها بر اساس نتایج پروژه‌های مشابه و یا نتایج تحقیقات محققین مربوطه صورت می‌گیرد [۳۹].

گروهی از متخصصین در مورد انتخاب مدل تابع چگالی احتمال توافقاتی کرده‌اند که در جدول ۴-۶ آورده شده است [۳۹]:

جدول ۴-۶: انتخاب نوع تابع چگالی احتمال برای پارامترهای مختلف [۳۹]

ماده	خصوصیات	تابع چگالی احتمال
مغزه‌های رسی فشرده شده	وزن مخصوص خشک	نرمال لگاریتمی
سیلت، ماسه و رس‌ها	نسبت پوکی	نرمال
ماسه سیلتی و سیلت رسی	$\tan \phi'$	نرمال
سیلت رسی	مقاومت برشی زهکشی نشده	نرمال
خاک‌های مختلف دیگر	c', ϕ'	بتا

به طور کلی به نظر می‌رسد تا زمانی که دلیل قانع کننده‌ای برای انتخاب تابع توزیع احتمال دیگری وجود نداشته باشد، تابع توزیع احتمال نرمال برای اکثر پارامترهای ژئوتکنیکی مناسب باشد.

همچنین لازم به ذکر است که پارامتر $\tan(\phi)$ نسبت به زاویه اصطکاک داخلی (ϕ) بیشتر از تابع توزیع احتمال نرمال پیروی کند. برای پارامترهای دیگری که در جدول به آنها اشاره نشده است، می‌توان با دقت خوبی از تابع توزیع احتمال نرمال استفاده کرد. چنانچه در مورد اثر بخشی اعداد منفی تابع توزیع احتمال نرمال نگرانی وجود داشته باشد، می‌توان از توابع لاگ-نرمال و یا مثلثی استفاده کرد [۳۹].

برای تعیین توزیع پارامترهای ورودی جهت تحلیل احتمالاتی پایداری شیب، از نرم افزار @Risk که در فصل چهارم معرفی گردید استفاده شد. همچنین روش شبیه سازی مونت کارلو جهت شبیه سازی مقادیر C و ϕ انتخاب گردید.

۵-۶- تعریف رابطه هوک - براون در نرم افزار @Risk

اولین مرحله جهت شبیه سازی پارامترهای C و ϕ پس از به دست آوردن اطلاعات پایه، تعریف

رابطه هوک - براون است. برای رسیدن به هدف نهایی که همان شبیه سازی پارامترهای C و ϕ جهت تحلیل احتمالاتی پایداری شیب است. بایستی این رابطه در یک صفحه گسترده Excel تنظیم شود که در آن کلیه پارامترهای مرتبط با یکدیگر، در ارتباط مستقیم هستند.

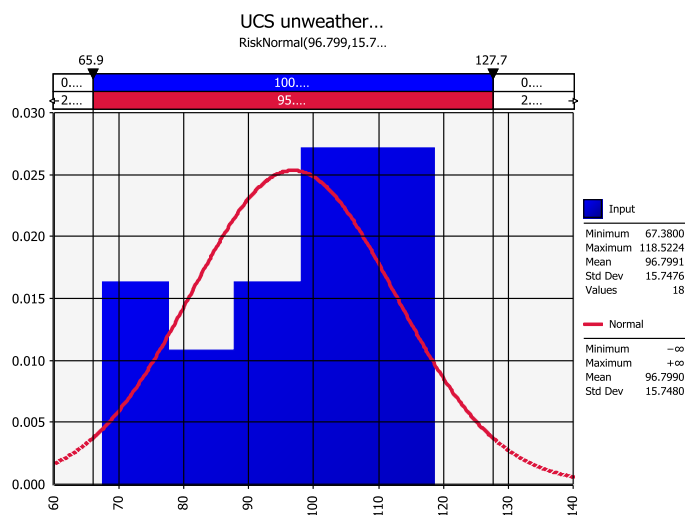
۶-۵-۱- تعیین ورودی‌ها و خروجی‌های نرم افزار

برای آغاز کار با نرم افزار @Risk بایستی ورودی‌ها را برای نرم افزار تعریف کرد. منظور از تعریف ورودی‌ها، تعیین تابع توزیع احتمال مربوط به سلول ورودی است. ورودی‌ها از بین پارامترهایی انتخاب می‌شوند که احتمال تغییر آنها در آینده بیشتر است و می‌توانند تاثیر بیشتری روی مقادیر C و ϕ بگذارند. در اینجا دو پارامتر مقاومت فشاری تک محوری (UCS) و اندیس مقاومت زمین شناسی (GSI) بعنوان ورودی‌های متغیر برای نرم افزار گرفته شدند. مقاومت فشاری تک محوری از این جهت که در درجات مختلف هوازدگی دارای تغییرات زیادی بوده است، انتخاب گردید تا تاثیر آن در آینده پروژه لحاظ گردد. پارامتر اندیس مقاومت زمین شناسی نیز به دلیل اینکه جدول پیشنهادی GSI شامل پارامترهای کیفی و توصیفی شرایط سطح درزه‌ها می‌باشد، این امکان وجود دارد که برای یک توده سنگ معین، بسته به میزان تجارب شخصی مقادیر متفاوتی از GSI توسط اشخاص مختلف پیشنهاد شود، انتخاب گردید.

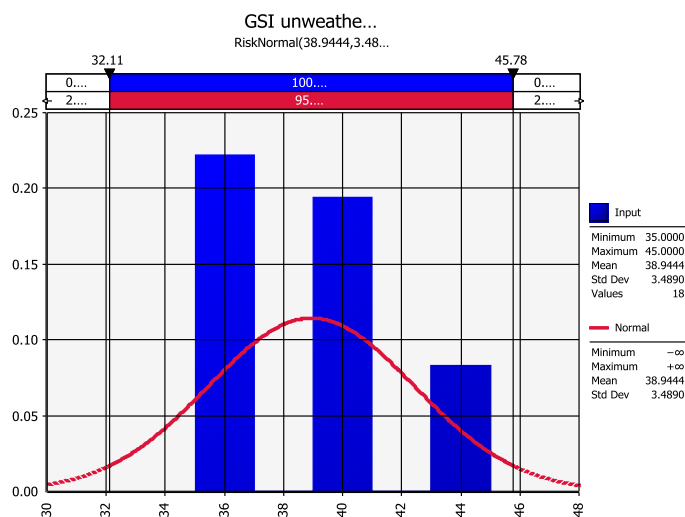
نمودار توزیع‌های تعیین شده توسط @Risk برای ورودی‌های متغیر UCS و GSI در شکل‌های ۶-

۱ و ۶-۲ نشان داده شده اند. قابل به ذکر است که نمودارها مربوط به سنگ غیرهوازده (سالم) می‌باشد.

نمودار مربوط به سایر درجات هوازدگی در پیوست ۴ آورده شده است.



شکل ۶-۱: توزیع احتمال تعیین شده توسط @Risk
برای پارامتر مقاومت فشاری تک محوری (UCS)



شکل ۶-۲: توزیع احتمال تعیین شده توسط @Risk
برای پارامتر اندیس مقاومت زمین شناسی (GSI)

این توابع در سلول‌های مربوط به پارامترهای ورودی وارد شده و باعث می‌شوند تا این پارامترها در

هنگام تحلیل مسئله، با توجه به توزیع‌شان بصورت احتمالی در نظر گرفته شوند.

همچنین مشخصه‌های آماری پارامترهای UCS و GSI توده سنگ، برای کلیه درجات هوازدهی در

جدول ۵-۶ آورده شده است.

جدول ۵-۶: مشخصه‌های آماری پارامترهای UCS و GSI شیست‌های معدن گل‌گهر

بازه با قابلیت اطمینان ۹۵٪	انحراف معیار	میانگین	توزیع	پارامتر	درجه هوازدهی
۶۵/۹-۱۲۷/۷	۱۵/۷۵	۹۶/۸۰	نرمال	UCS (MPa)	I
۳۲/۱۱-۴۵/۷۸	۳/۴۹	۳۸/۹۴	نرمال	GSI	
۷۲/۲۵-۹۱/۸۹	۵/۰۱	۸۲/۰۷	نرمال	UCS (MPa)	II
۳۲/۱۲-۳۸/۶۸	۱/۶۷	۳۵/۴	نرمال	GSI	
۲۵/۸-۶۸/۴	۱۰/۸۷	۴۷/۱۳	نرمال	UCS (MPa)	III
۳۱/۱۱-۳۹/۶۹	۲/۱۹	۳۵/۴	نرمال	GSI	
۹/۲۱-۴۵/۴	۹/۲۳	۲۷/۳	نرمال	UCS (MPa)	IV
۲۷/۶۳-۳۸/۳۷	۲/۷۴	۳۳	نرمال	GSI	

سپس باید خروجی‌ها نیز تعیین شوند. پارامترهای خروجی مقادیر C و ϕ هستند که از رابطه هوک

- براون بدست آمده و برای تحلیل احتمالاتی پایداری شیب مورد استفاده قرار می‌گیرند.

۶-۵-۲- انجام شبیه‌سازی و تعیین پارامترهای ژئومکانیکی C و ϕ

پس از مشخص کردن ورودی و خروجی برای نرم افزار، می‌توان شبیه‌سازی را انجام داد. ولی قبلاً

بایستی تنظیمات مربوط به شبیه‌سازی اعمال گردد. برنامه باید با تعداد تکرارهایی اجرا شود تا همگرایی

لازم را در بدست دادن تابع توزیع‌های متغیرهای خروجی حاصل نماید. در بخش تنظیمات، می‌توان تعداد

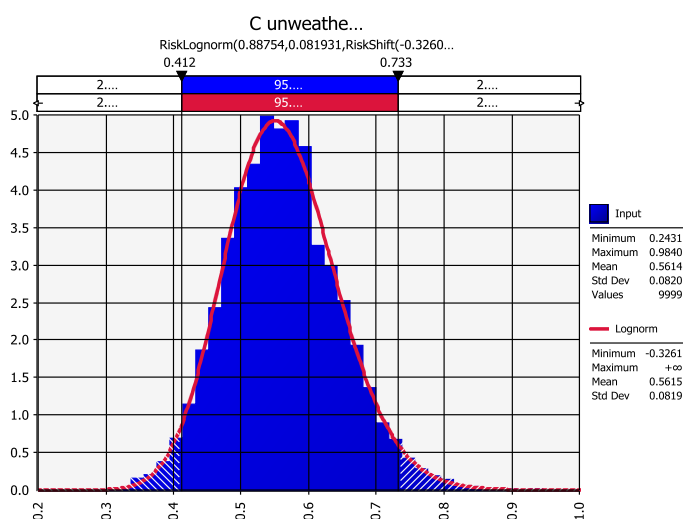
تکرارهای شبیه‌سازی‌ها را تغییر داد و به میزان دلخواه رساند.

دو یا چند شبیه‌سازی بر روی یک مسئله دارای نتایج یکسانی نخواهند بود چرا که اساس این گونه

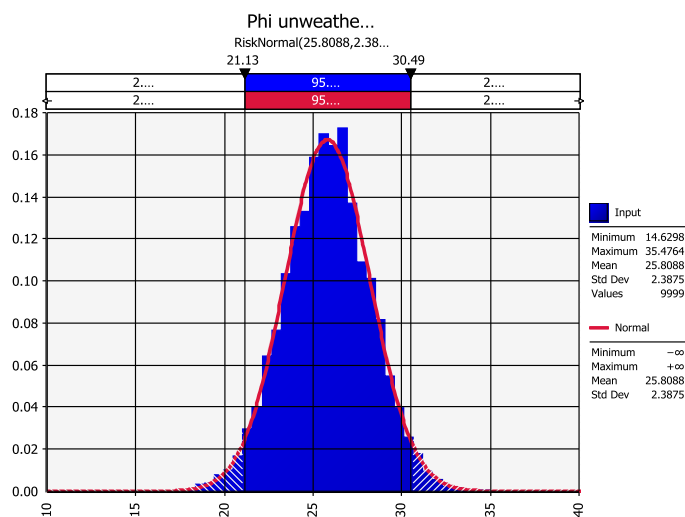
شبیه‌سازی‌ها در @Risk بر مبنای احتمالات بوده و در قانون احتمالات نمی‌توان انتظار داشت که نتایج

حاصل از دو شبیه‌سازی با هم یکسان باشند. اما با بالا بردن تکرارها در هر شبیه‌سازی می‌توان همگرایی جواب‌های بین دو یا چند شبیه‌سازی را بیشتر نمود. همچنین این کار باعث بالا رفتن دقت جواب‌ها خواهد شد. به همین لحاظ در مورد شبیه‌سازی پارامترهای ژئومکانیکی، تعداد تکرارها در نرم افزار ده هزار (۱۰۰۰۰) بار تعیین گردید.

بعنوان نمونه توزیع پارامترهای خروجی C و ϕ برای سنگ غیر هوازده (سالم) در مقطع ۱۰۱۵۰۰ در شکل‌های ۳-۶ و ۴-۶ آورده شده است.



شکل ۳-۶: هیستوگرام مربوط به چسبندگی (C) سنگ سالم در مقطع ۱۰۱۵۰۰



شکل ۴-۶: هیستوگرام مربوط به زاویه اصطکاک داخلی (ϕ) سنگ سالم در مقطع ۱۰۱۵۰۰

۶-۶- جمع بندی

در این فصل به تعیین خصوصیات ژئومکانیکی شیب‌های معدن سنگ آهن گل‌گهر پرداخته شد. روش‌های مستقیم و غیر مستقیم تعیین خواص مهندسی سنگ‌ها معرفی گردید. رابطه هوک - براون جهت تعیین پارامترها معرفی و تشریح شد. با استفاده از روابط مختلف، ثابت‌های هوک - براون بدست آمدند. سپس توزیع پارامترهای ورودی، شامل مقاومت فشاری تک‌محوری و اندیس مقاومت زمین‌شناسی با استفاده از نرم افزار @Risk تعیین و با تعریف رابطه هوک - براون داخل نرم افزار @Risk، توزیع پارامترهای چسبندگی و زاویه اصطکاک به‌دست آمد. این نتایج در فصل بعد جهت تحلیل احتمالاتی پایداری دیواره‌های معدن سنگ آهن گل‌گهر مورد استفاده قرار خواهد گرفت.

۷ فصل هفتم: تحلیل احتمالاتی پایداری شیب دیواره

نهایی معدن شماره ۱ گل گهر

۷-۱- مقدمه

جهت انجام تحلیل احتمالاتی پایداری شیب از نرم افزار Slide استفاده شد. یکی از پرکاربردترین روش‌های احتمالاتی پایداری شیب، روش شبیه‌سازی مونت کارلو می‌باشد. این روش بطور موثری پاسخ تابع عملکرد فاکتور اطمینان را نسبت به متغیرهای ورودی که به طور تصادفی انتخاب و در تابع عملکرد جایگزین می‌شوند، شبیه‌سازی می‌کند. در این روش برای هر پارامتر ورودی که به صورت تصادفی در نظر گرفته شده است با توجه به شکل تابع چگالی احتمال آن و با توجه به دامنه تغییراتش، اعداد تصادفی ایجاد و با توجه به آنها، مقدار تابع عملکرد محاسبه می‌شود. این فرآیند آنقدر ادامه می‌یابد تا اینکه به طور تقریبی شکل تابع چگالی احتمال فاکتور اطمینان تعیین شود و با توجه به آن احتمال گسیختگی و اندیس قابلیت اطمینان محاسبه گردد.

به منظور برآورد احتمال شکست حداقل تعداد ۱۰۰۰۰ تکرار برای شبیه‌سازی استفاده می‌شود

[۴۰].

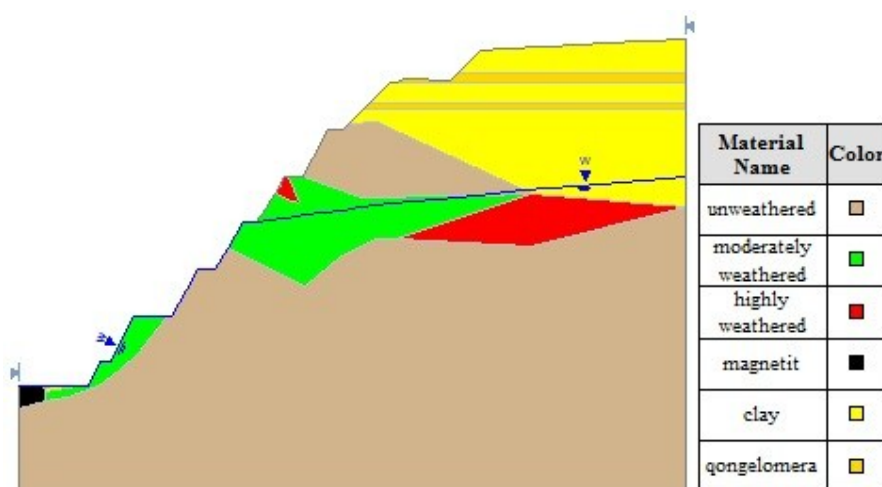
مقدار فاکتور اطمینان با استفاده از تابع عملکرد که در اینجا روش بیشاپ (بدلیل اینکه شیست‌های معدن گل‌گهر رفتاری شبیه به خاک دارند و اینکه روش بیشاپ هم تعادل گشتاور و هم نیروی قائم بین باریکه‌ای را بررسی می‌کند) انتخاب شده است محاسبه می‌شود.

با توجه به مقاطع زمین شناسی دیواره شمالی معدن سنگ آهن شماره ۱ گل‌گهر و همچنین اطلاعاتی که از چاهک‌های نمونه برداری در فصل پنجم به دست آمد سه مقطع ۱۰۱۵۰۰ و ۱۰۱۸۰۰ و ۱۰۲۰۰۰ جهت تحلیل احتمالاتی در نظر گرفته شد که در ادامه به تحلیل این سه مقطع پرداخته خواهد شد.

۲-۷- تحلیل پایداری مقطع ۱۰۱۵۰۰

۱-۲-۷- لیتولوژی

در تمام روش‌های احتمالاتی مدل کردن خواص خاک و یا سنگ قسمت اصلی تحلیل احتمالاتی را تشکیل می‌دهد. مقطع ۱۰۱۵۰۰ شامل میکاشیست با درجه هوازدگی I، III، IV و همچنین رس، کنگلومرا و مگنتیت می‌باشد. که خواص ژئومکانیکی سنگ‌های هوازده متغیر و خواص ژئومکانیکی رس، کنگلومرا و مگنتیت ثابت در نظر گرفته شد. با توجه به مقاطع زمین شناسی، مقطع ۱۰۱۵۰۰ برای دیواره نهایی مدل شد که در شکل ۱-۷ مشاهده می‌شود.



شکل ۱-۷: مقطع زمین شناسی ۱۰۱۵۰۰

مشخصه‌های آماری پارامترهای C و ϕ که از نرم افزار @Risk برای مقطع ۱۰۱۵۰۰ به دست آمده

است در جدول ۱-۷ مشاهده می‌کنید.

جدول ۷-۱: مشخصه‌های آماری پارامترهای C و ϕ توده سنگ‌های مقطع ۱۰۱۵۰۰

درجه هوازدگی	پارامتر	توزیع	میانگین	انحراف معیار	بازه با قابلیت اطمینان ۹۵٪
I unweathered	$C(KN/m^2)$	لاگ نرمال	۵۶۱/۴	۸۲	۴۱۲-۷۳۳
	$\phi (^{\circ})$	نرمال	۲۵/۸	۲/۳۹	۲۱/۱۳-۳۰/۴۹
III moderately weathered	$C(KN/m^2)$	نرمال	۲۴۵/۶	۳۲/۵	۱۸۱/۸-۳۰۹/۴
	$\phi (^{\circ})$	نرمال	۲۶/۲۷	۲/۰۷	۱۹/۲۱-۲۷/۳۲
IV Highly weathered	$C(KN/m^2)$	نرمال	۱۸۷/۷	۳۶/۲	۱۱۶/۶-۲۵۸/۷
	$\phi (^{\circ})$	نرمال	۱۷/۷۷	۲/۵۷	۱۲/۷۴-۲۲/۸۱

همچنین خواص ثابت رس، کنگلومرا و مگنتیت برای مقطع ۱۰۱۵۰۰ در جدول ۷-۲ آورده شده

است.

جدول ۷-۲: خواص ثابت رس، کنگلومرا و مگنتیت برای مقطع ۱۰۱۵۰۰

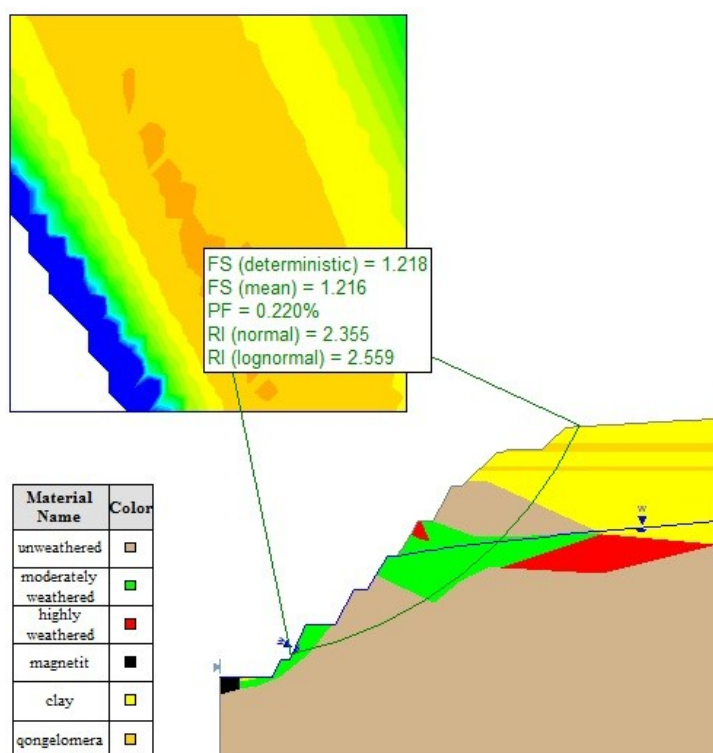
نوع مواد	$C(KN/m^2)$	$\phi (^{\circ})$	دانسیته (KN/m^3)
رس	۱۵۰	۳۵	۲۰
کنگلومرا	۱۵۰	۳۵	۲۰
مگنتیت	۲۳۰	۵۳	۴۵

۷-۲-۲- سطح شکست و احتمال ریزش مقطع ۱۰۱۵۰۰

پس از تحلیل احتمالاتی بر روی مدل تعریف شده، مقدار میانگین فاکتور اطمینان ۱/۲۱ و احتمال

ریزش ۰/۲۲٪ بدست آمد که نشان دهنده شرایط پایدار برای این مقطع می‌باشد. نتایج و سطح شکست

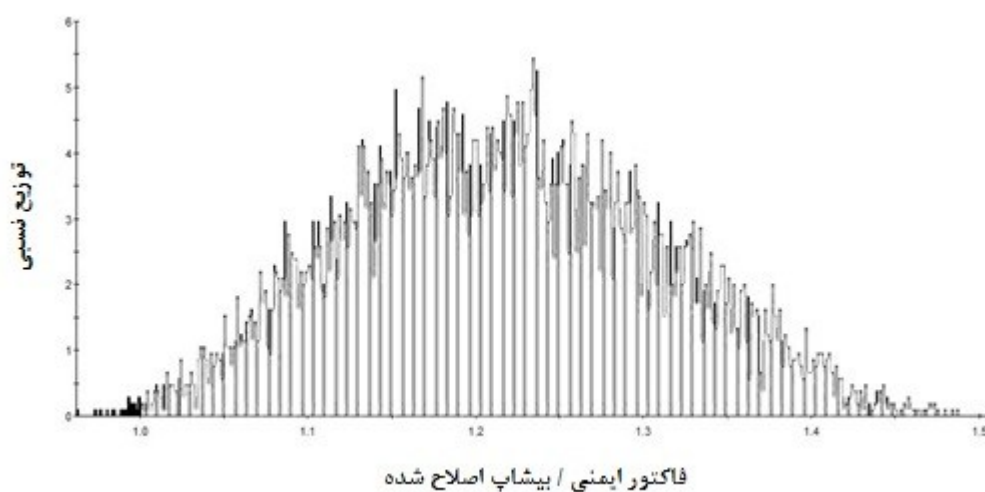
احتمالی در شکل ۷-۲ مشاهده می‌شود.



شکل ۳-۷: سطح شکست احتمالی در مقطع ۱۰۱۵۰۰

۳-۲-۷- توزیع آماری فاکتور اطمینان و احتمال شکست مقطع ۱۰۱۵۰۰

نمودار توزیع آماری فاکتور اطمینان و احتمال شکست در شکل ۳-۷ مشاهده می‌شود.



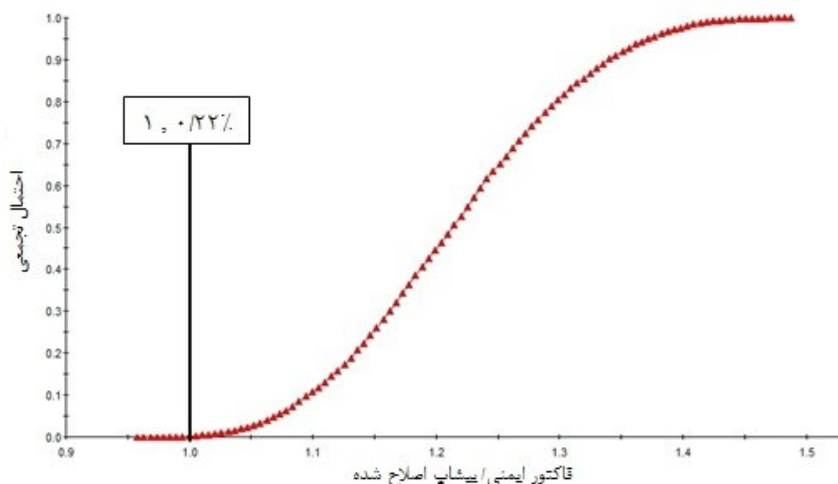
شکل ۳-۷: توزیع آماری فاکتور اطمینان و احتمال شکست مقطع ۱۰۱۵۰۰

همانطوری که داخل هیستوگرام دیده می‌شود، قسمت هایلایت شده تحلیلی را نشان می‌دهد که فاکتور اطمینان کمتر از یک است. این نمایش گرافیکی احتمال شکست را که برابر با مساحت قسمت هایلایت شده تقسیم بر سطح کلی هیستوگرام است را نیز نشان می‌دهد.

در این تحلیل، مشخص شده که ۲۲ نقطه از ۱۰۰۰۰ نقطه فاکتور اطمینان کمتر از یک داشته‌اند. این یعنی ۰/۲۲٪، که احتمال شکست برای روش تحلیل بیشاپ است.

۷-۲-۴- نمودار تجمعی فاکتور اطمینان مقطع ۱۰۱۵۰۰

نمودار توزیع تجمعی بیانگر احتمال تجمعی است که یک داده متغیر تصادفی، می‌تواند کمتر یا معادل یک مقدار باشد. زمانی که این نمودار برای فاکتور ایمنی رسم شود، احتمال تجمعی در $SF=1$ برابر با احتمال شکست است. (شکل ۷-۴)

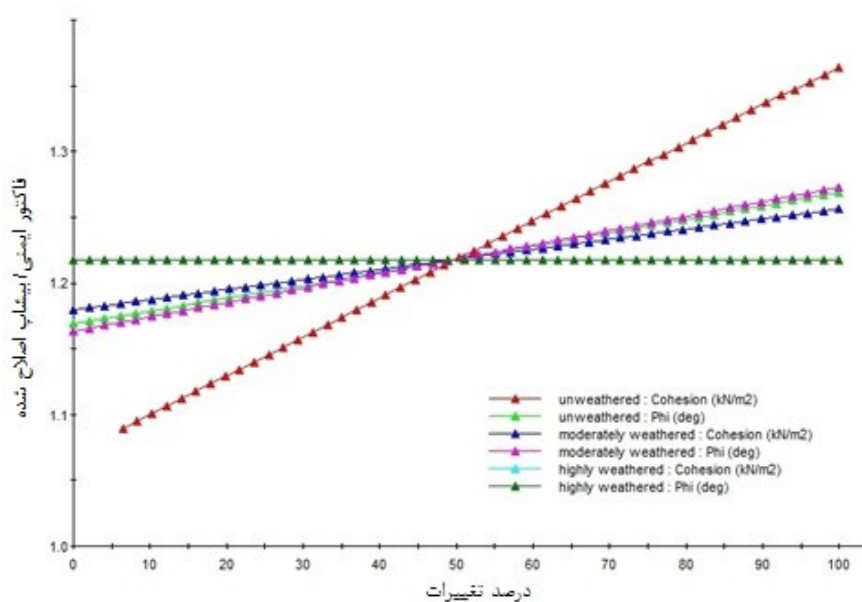


شکل ۷-۴: توزیع تجمعی فاکتور اطمینان و احتمال شکست مقطع ۱۰۱۵۰۰

۷-۲-۵- تحلیل حساسیت بر روی پارامترهای مقطع ۱۰۱۵۰۰

همانطور که در شکل ۷-۵ مشاهده می‌شود، مقدار فاکتور اطمینان بیشترین حساسیت را نسبت به تغییرات چسبندگی سنگ‌های غیرهوازده از خود نشان می‌دهد. به طوری که با تغییرات ۰ تا ۱۰۰

درصدی چسبندگی سنگ‌های غیرهوازده، مقدار فاکتور اطمینان به مقدار $0/3$ افزایش می‌یابد. همچنین کمترین حساسیت مربوط به تغییرات زاویه اصطکاک سنگ‌های شدیداً هوازده می‌باشد که با تغییرات این فاکتور مقدار فاکتور اطمینان ثابت می‌ماند.

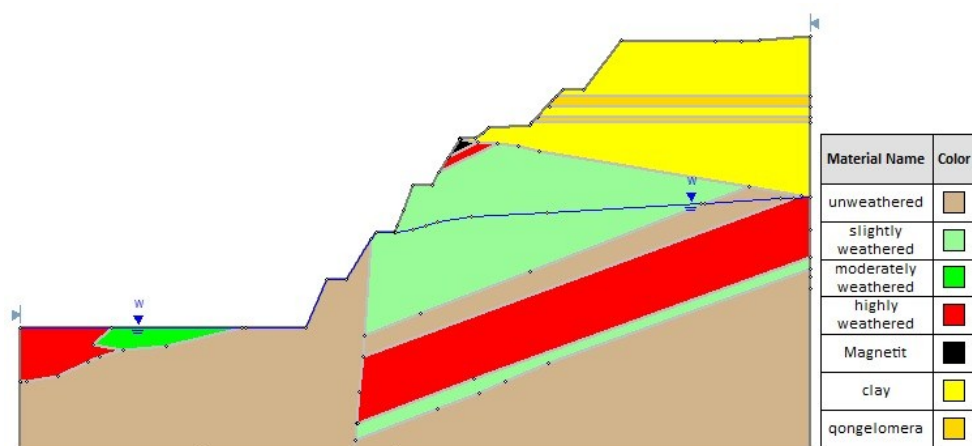


شکل ۷-۵: حساسیت فاکتور اطمینان مقطع ۱۰۱۵۰۰ به پارامترهای متغیر

۷-۳- تحلیل پایداری مقطع ۱۰۱۸۰۰

۷-۳-۱- لیتولوژی

مقطع ۱۰۱۸۰۰ شامل میکاشیست با درجه هوازدهی I، II، III، IV و همچنین رس، کنگلومرا و مگنتیت می‌باشد، که خواص ژئومکانیکی سنگ‌های هوازده متغیر و خواص ژئومکانیکی رس، کنگلومرا و مگنتیت ثابت در نظر گرفته شد. با توجه به مقاطع زمین شناسی، مقطع ۱۰۱۸۰۰ برای دیواره نهایی مدل شد که در شکل ۷-۶ مشاهده می‌شود.



شکل ۶-۷: مقطع زمین شناسی ۱۰۱۸۰۰

مشخصه‌های آماری پارامترهای C و ϕ که از نرم افزار @Risk برای مقطع ۱۰۱۸۰۰ به دست آمده است در جدول ۳-۷ مشاهده می‌کنید.

جدول ۳-۷: مشخصه‌های آماری پارامترهای C و ϕ توده سنگ‌های مقطع ۱۰۱۸۰۰

بازه با قابلیت اطمینان ۹۵٪	انحراف معیار	میانگین	توزیع	پارامتر	درجه هوازدگی
۳۱۰-۵۵۵	۶۲/۶	۴۲۲/۷	لاگ نرمال	$C(KN/m^2)$	I Unweathered
۲۴/۳۵-۳۴/۱۹	۲/۵۱	۲۹/۲۷	نرمال	$\phi (^{\circ})$	
۲۶۸/۱-۳۵۱/۴	۲۱/۳	۳۰۸/۵	لاگ نرمال	$C(KN/m^2)$	II Slightly weathered
۲۵/۰۶-۲۹/۵۶	۱/۱۵	۲۷/۳۱	نرمال	$\phi (^{\circ})$	
۵۷/۶-۱۰۲	۱۱/۳	۷۹	لاگ نرمال	$C(KN/m^2)$	III moderately weathered
۳۲/۷۳-۴۲/۰۲	۲/۳۹	۳۷/۳۸	نرمال	$\phi (^{\circ})$	
۱۳۳-۳۰۰/۷	۴۲/۸	۲۱۶/۸	نرمال	$C(KN/m^2)$	IV Highly weathered
۱۱/۶۴-۲۱/۱۵	۲/۴۲	۱۶/۳۹	نرمال	$\phi (^{\circ})$	

همچنین خواص ثابت رس، کنگلومرا و مگنتیت برای مقطع ۱۰۱۸۰۰ در جدول ۴-۷ آورده شده

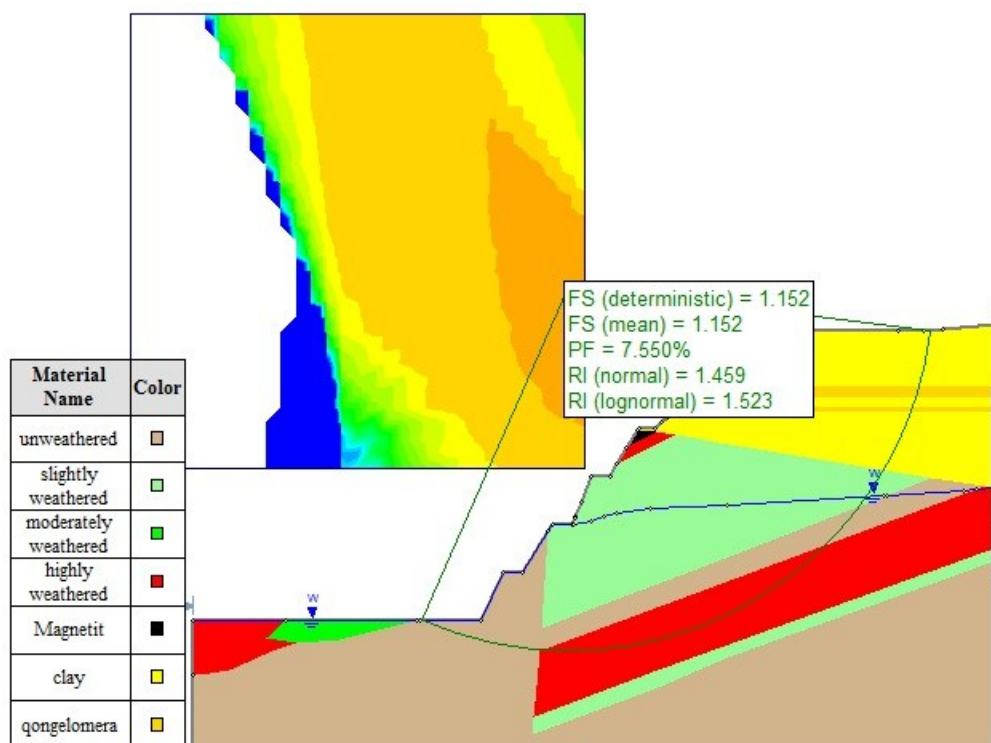
است.

جدول ۴-۷: خواص ثابت رس، کنگلومرا و مگنتیت برای مقطع ۱۰۱۸۰۰

نوع مواد	$C(KN/m^2)$	$\phi (^{\circ})$	دانسیته (KN/m^3)
رس	۱۵۰	۳۵	۲۰
کنگلومرا	۱۵۰	۳۵	۲۰
مگنتیت	۱۶۱/۳	۵۲/۱۵	۴۵

۷-۳-۲- سطح شکست و احتمال ریزش مقطع ۱۰۱۸۰۰

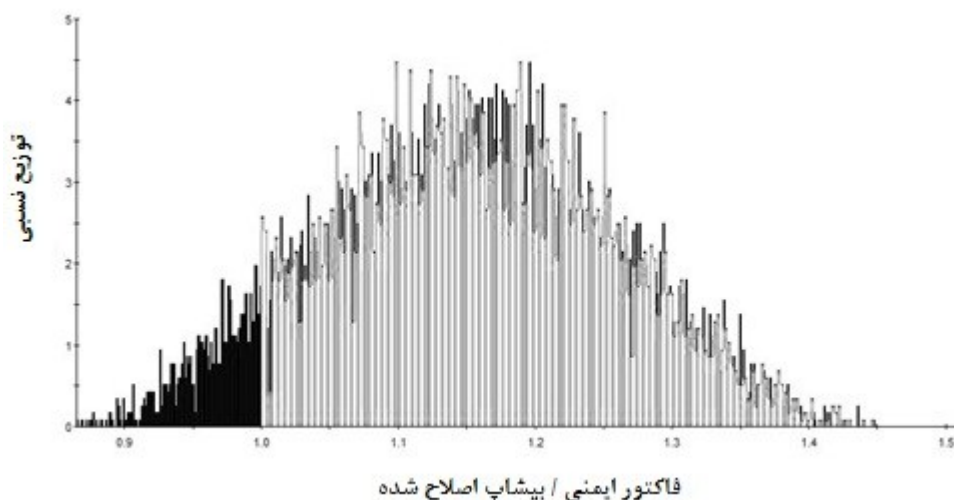
پس از تحلیل احتمالاتی بر روی مدل تعریف شده، مقدار میانگین فاکتور اطمینان ۱/۱۵ و احتمال ریزش ۷/۵۵٪ بدست آمد که نشان دهنده شرایط پایدار برای این مقطع می باشد. نتایج و سطح شکست احتمالی در شکل ۷-۷ مشاهده می شود.



شکل ۷-۷: سطح شکست احتمالی در مقطع ۱۰۱۸۰۰

۳-۳-۷- توزیع آماری فاکتور اطمینان و احتمال شکست مقطع ۱۰۱۸۰۰

نمودار آماری فاکتور اطمینان و احتمال شکست در شکل ۷-۸ مشاهده می‌شود.



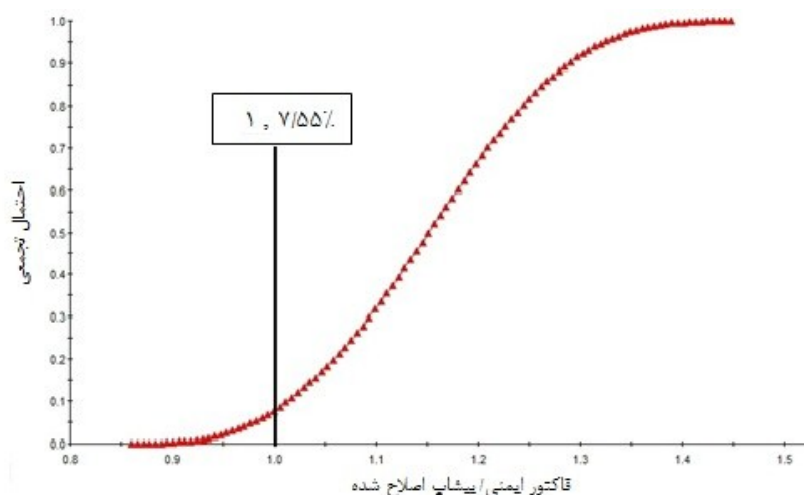
شکل ۷-۸: توزیع آماری فاکتور اطمینان و احتمال شکست مقطع ۱۰۱۸۰۰

همانطوری که داخل هیستوگرام دیده می‌شود، قسمت هایلایت شده تحلیلی را نشان می‌دهد که فاکتور ایمنی کمتر از یک است. این نمایش گرافیکی احتمال شکست را که برابر با مساحت قسمت هایلایت شده تقسیم بر سطح کلی هیستوگرام است را نیز نشان می‌دهد.

در این تحلیل، مشخص شده که ۷۵۵ نقطه از ۱۰۰۰۰ نقطه، فاکتور ایمنی کمتر از یک داشته‌اند. این یعنی ۷/۵۵٪، که احتمال شکست برای روش تحلیل بیشاپ است.

۳-۳-۴- نمودار تجمعی فاکتور اطمینان مقطع ۱۰۱۸۰۰

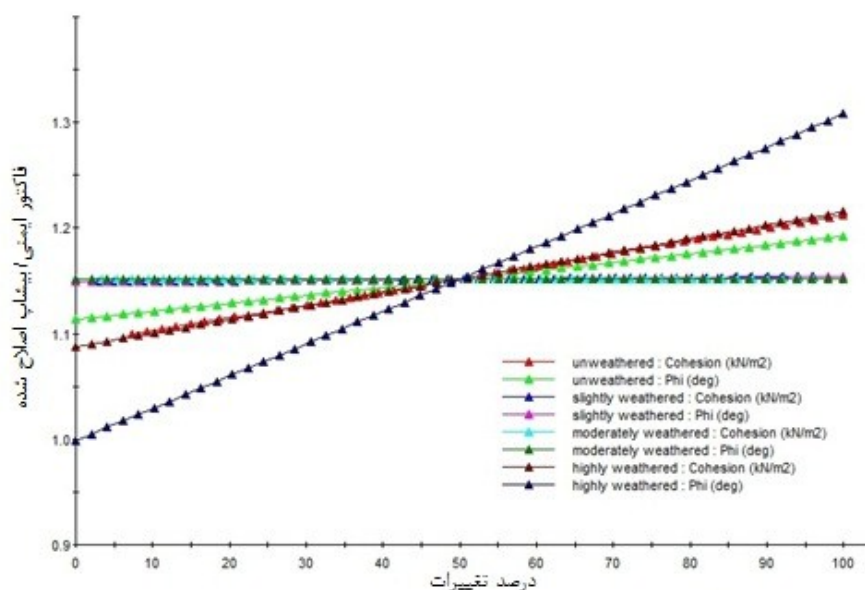
نمودار توزیع تجمعی بیانگر احتمال تجمعی است که یک داده متغیر تصادفی، می‌تواند کمتر یا معادل یک مقدار باشد. زمانی که این نمودار برای فاکتور ایمنی رسم شود، احتمال تجمعی در $SF=1$ برابر با احتمال شکست است. (شکل ۷-۹)



شکل ۷-۹: توزیع تجمعی فاکتور اطمینان و احتمال شکست مقطع ۱۰۱۸۰۰

۷-۳-۵- تحلیل حساسیت بر روی پارامترهای مقطع ۱۰۱۸۰۰

همانطور که در شکل ۷-۱۰ مشاهده می‌شود، مقدار فاکتور اطمینان بیشترین حساسیت را نسبت به تغییرات زاویه اصطکاک سنگ‌های شدیداً هوازده از خود نشان می‌دهد. به طوری که با تغییرات ۰ تا ۱۰۰ درصدی زاویه اصطکاک سنگ‌های شدیداً هوازده، مقدار فاکتور اطمینان به مقدار ۰/۳ افزایش می‌یابد. همچنین کمترین حساسیت مربوط به تغییرات زاویه اصطکاک سنگ‌های کمی هوازده، چسبندگی و زاویه اصطکاک سنگ‌های با هوازدهگی متوسط می‌باشد که با تغییرات این فاکتورها مقدار فاکتور اطمینان ثابت می‌ماند.

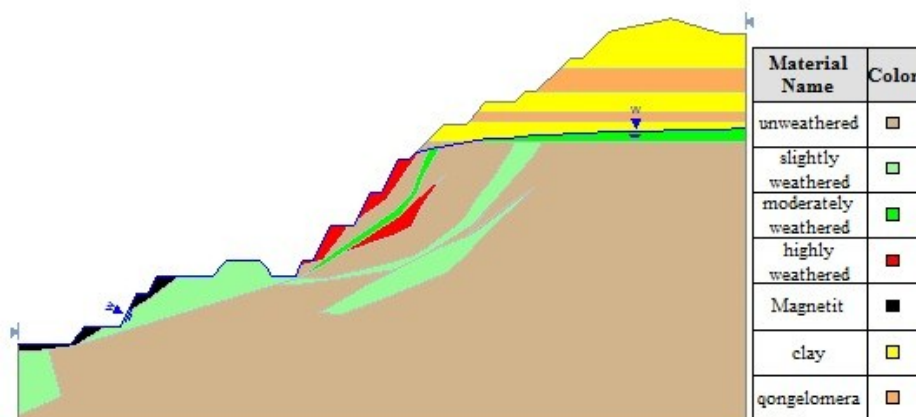


شکل ۷-۱۰: حساسیت فاکتور اطمینان مقطع ۱۰۱۸۰۰ به پارامترهای متغیر

۷-۴- تحلیل پایداری مقطع ۱۰۲۰۰۰

۷-۴-۱- لیتولوژی

مقطع ۱۰۲۰۰۰ شامل میکاشیست با درجه هوازدگی I ، II ، III ، IV و همچنین رس، کنگلومرا و مگنتیت می‌باشد، که خواص ژئومکانیکی سنگ‌های هوازده متغیر و خواص ژئومکانیکی رس، کنگلومرا و مگنتیت ثابت در نظر گرفته شد. با توجه به مقاطع زمین شناسی، مقطع ۱۰۲۰۰۰ برای دیواره نهایی مدل شد که در شکل ۷-۱۱ مشاهده می‌شود.



شکل ۷-۱۱: مقطع زمین شناسی ۱۰۲۰۰۰

مشخصه‌های آماری پارامترهای C و ϕ که از نرم افزار @Risk برای مقطع ۱۰۲۰۰۰ به دست آمده است در جدول ۷-۵ مشاهده می‌کنید.

جدول ۷-۵: مشخصه‌های آماری پارامترهای C و ϕ توده سنگ‌های مقطع ۱۰۲۰۰۰

بازه با قابلیت اطمینان ۹۵٪	انحراف معیار	میانگین	توزیع	پارامتر	درجه هوازدگی
۳۴۶-۶۱۷	۶۹/۲	۴۷۲/۸	لاگ نرمال	$C(KN/m^2)$	I Unweathered
۲۳/۰۶-۳۲/۷۱	۲/۴۶	۲۷/۸۸	نرمال	$\phi (^{\circ})$	
۱۵۳/۲-۲۰۴/۱	۱۳	۱۷۷/۴	لاگ نرمال	$C(KN/m^2)$	II Slightly weathered
۳۱/۸۳-۳۶/۶۹	۱/۲۴	۳۴/۲۶	نرمال	$\phi (^{\circ})$	
۱۲۸/۶-۲۱۹/۱	۲۳/۱	۱۷۳/۴	لاگ نرمال	$C(KN/m^2)$	III moderately weathered
۲۲/۹۴-۳۱/۷۲	۲/۲۴	۲۷/۳۳	نرمال	$\phi (^{\circ})$	
۹۱/۶-۲۰۲/۲	۲۸/۲	۱۴۶/۹	نرمال	$C(KN/m^2)$	IV Highly weathered
۱۴/۸۱-۲۵/۶۸	۲/۷۷	۲۰/۲۴	نرمال	$\phi (^{\circ})$	

همچنین خواص ثابت رس، کنگلومرا و مگنتیت برای مقطع ۱۰۲۰۰۰ در جدول ۷-۶ آورده شده

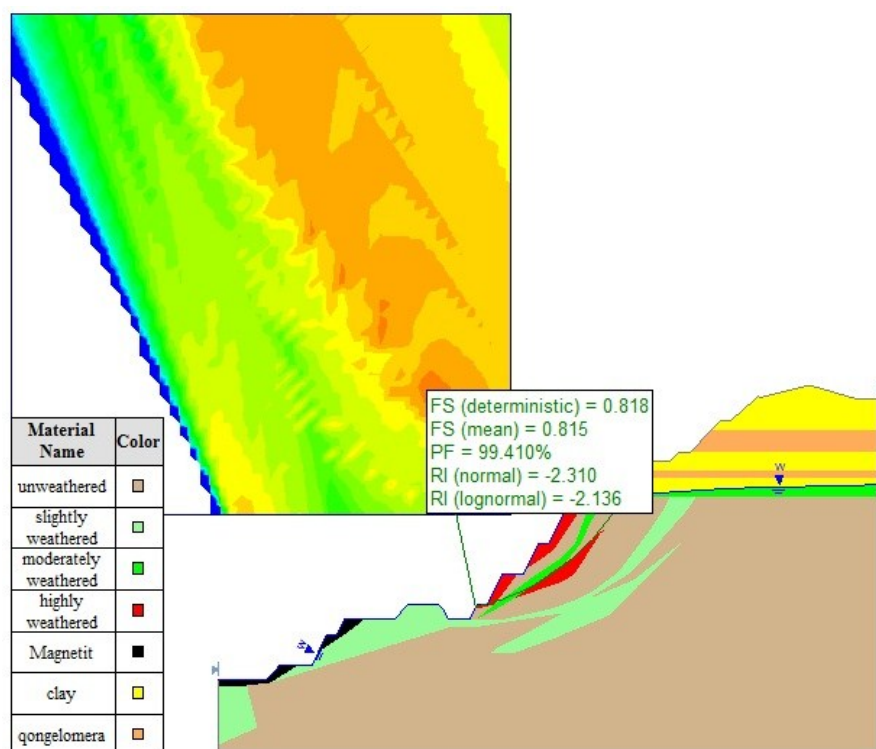
است.

جدول ۶-۷: خواص ثابت رس، کنگلومرا و مگنتیت برای مقطع ۱۰۲۰۰۰

نوع مواد	$C(KN/m^2)$	$\phi (^{\circ})$	دانسیته (KN/m^3)
رس	۱۵۰	۳۵	۲۰
کنگلومرا	۱۵۰	۳۵	۲۰
مگنتیت	۲۲۷/۵	۴۷/۰۳	۴۵

۷-۴-۲- سطح شکست و احتمال ریزش مقطع ۱۰۲۰۰۰

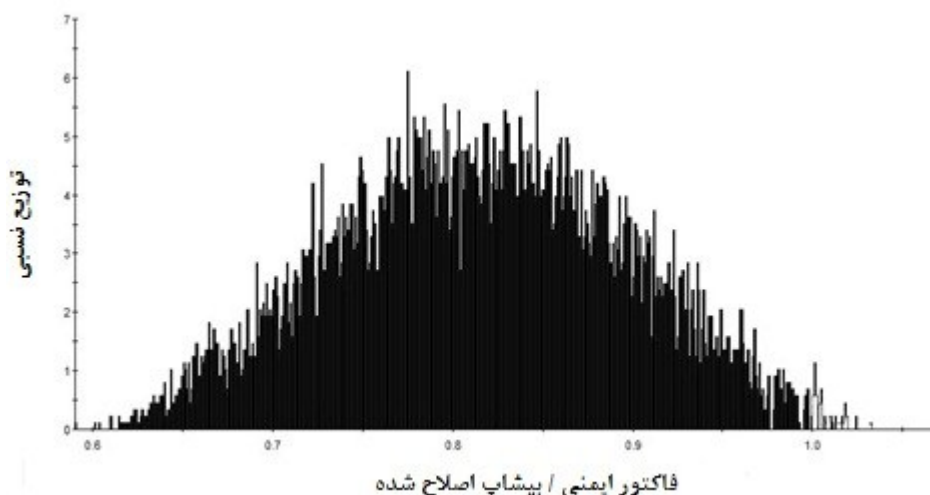
پس از تحلیل احتمالاتی بر روی مدل تعریف شده، مقدار میانگین فاکتور اطمینان ۰/۸۱۵ و احتمال ریزش ۹۹/۴۱٪ بدست آمد که نشان دهنده شرایط ناپایدار برای این مقطع می باشد. نتایج و سطح شکست احتمالی در شکل ۷-۱۲ مشاهده می شود.



شکل ۷-۱۲: سطح شکست احتمالی در مقطع ۱۰۲۰۰۰

۷-۴-۳- توزیع آماری فاکتور اطمینان و احتمال شکست مقطع ۱۰۲۰۰۰

نمودار آماری فاکتور اطمینان و احتمال شکست در شکل ۷-۱۳ مشاهده می‌شود.



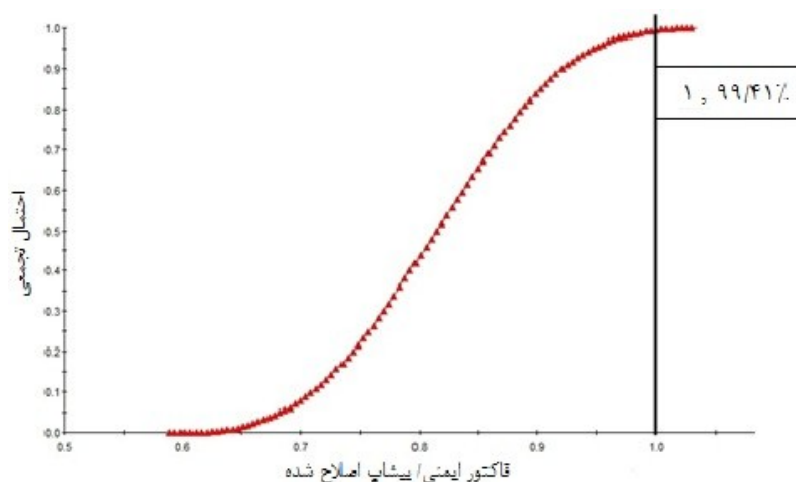
شکل ۷-۱۳: توزیع آماری فاکتور اطمینان و احتمال شکست مقطع ۱۰۲۰۰۰

همانطوری که داخل هیستوگرام دیده می‌شود، قسمت هایلایت شده تحلیلی را نشان می‌دهد که فاکتور اطمینان کمتر از یک است. این نمایش گرافیکی احتمال شکست را که برابر با مساحت قسمت هایلایت شده تقسیم بر سطح کلی هیستوگرام است را نیز نشان می‌دهد.

در این تحلیل، مشخص شده که ۹۹۴۱ نقطه از ۱۰۰۰۰ نقطه فاکتور اطمینان کمتر از یک داشته‌اند. این یعنی ۹۹/۴۱٪، که احتمال شکست برای روش تحلیل بیشاپ است.

۷-۴-۴- نمودار تجمعی فاکتور اطمینان مقطع ۱۰۲۰۰۰

نمودار توزیع تجمعی بیانگر احتمال تجمعی است که یک داده متغیر تصادفی، می‌تواند کمتر یا معادل یک مقدار باشد. زمانی که این نمودار برای فاکتور اطمینان رسم شود، احتمال تجمعی در $SF=1$ برابر با احتمال شکست است (شکل ۷-۱۴).



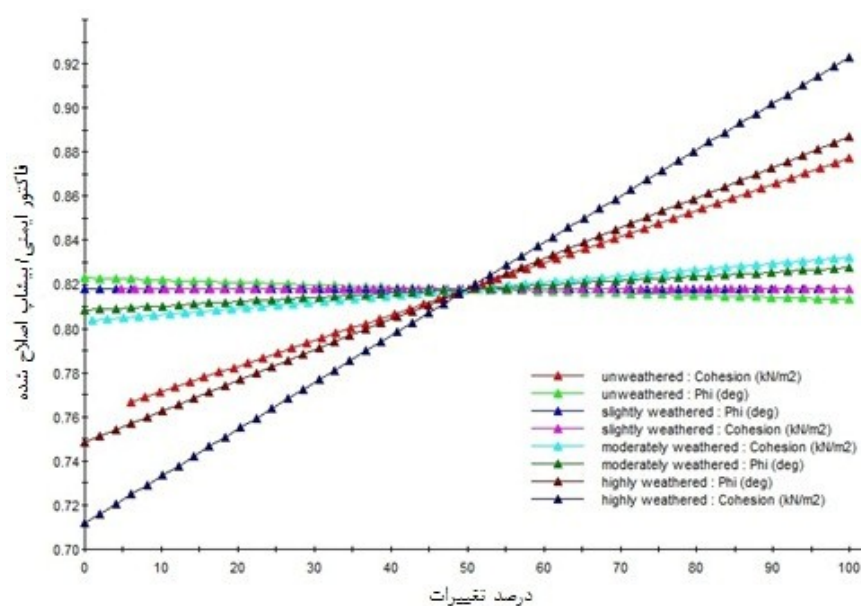
شکل ۷-۱۴: توزیع تجمعی فاکتور اطمینان و احتمال شکست مقطع ۱۰۲۰۰۰

۷-۴-۵- تحلیل حساسیت بر روی پارامترهای مقطع ۱۰۲۰۰۰

همانطور که در شکل ۷-۱۵ مشاهده می‌شود، مقدار فاکتور اطمینان بیشترین حساسیت را نسبت

به تغییرات چسبندگی سنگ‌های شدیداً هوازده از خود نشان می‌دهد. به طوری که با تغییرات ۰ تا ۱۰۰

درصدی چسبندگی سنگ‌های شدیداً هوازده، مقدار فاکتور اطمینان به مقدار ۰/۲۱ افزایش می‌یابد.



شکل ۷-۱۵: حساسیت فاکتور اطمینان مقطع ۱۰۲۰۰۰ به پارامترهای متغیر

همچنین کمترین حساسیت مربوط به تغییرات زاویه اصطکاک سنگ‌های غیرهوازده، چسبندگی و زاویه اصطکاک سنگ‌های کمی هوازده می‌باشد، که با تغییرات این فاکتورها مقدار فاکتور اطمینان ثابت می‌ماند.

۷-۵- معیارهای پذیرش

معیارهای پذیرش به عنوان راهنمای طراحی معادن روباز در سال ۲۰۰۹ توسط وسلو و رید^۱ ارائه شده‌اند. جدول ۷-۷ این معیارها برای تعیین سطح قابل قبول ریسک، برای طراحی مورد استفاده قرار می‌گیرند [۴۰].

جدول ۷-۷: معیارهای پذیرش در طراحی شیب‌ها [۴۰]

مقیاس شیب	خسارت ناشی از شکست	مینیمم فاکتور اطمینان (استاتیک)	مینیمم فاکتور اطمینان (دینامیک)	ماکزیمم احتمال شکست
دیواره ایمنی	کم - زیاد	۱/۱	--	۲۵-۵۰ %
رمپ داخلی	کم	۱/۱۵-۱/۲۰	۱	۲۵ %
	متوسط	۱/۲	۱	۲۰ %
	زیاد	۱/۳۰-۱/۳۰	۱/۱	۱۰ %
دیواره نهایی	کم	۱/۲۰-۱/۳۰	۱	۱۵-۲۰ %
	متوسط	۱/۳	۱/۰۵	۵-۱۰ %
	زیاد	۱/۳۰-۱/۵۰	۱/۱	≤ ۵ %

¹ Wesseloo & Read

۷-۶- مقایسه فاکتور اطمینان و احتمال شکست در مقاطع مختلف

مشخصه‌های آماری فاکتور اطمینان برای هر سه مقطع در جدول ۷-۸ آورده شده است. با مقایسه نتایج مشاهده می‌شود که فاکتور اطمینان در مقطع ۱۰۲۰۰۰ کمترین مقدار را دارد. همچنین در این مقطع احتمال ریزش برابر با ۹۹/۴۱٪ بدست آمد که نشان از شرایط کاملاً خطرناک و ریزشی در این مقطع است.

جدول ۷-۸: مشخصه‌های آماری فاکتور اطمینان در مقاطع مختلف

مقطع	FS قطعی	میانگین FS	انحراف معیار	اندیس قابلیت اطمینان	احتمال گسیختگی (%)
۱۰۱۵۰۰	۱/۲۱۸	۱/۲۱۶	۰/۰۹۱	۲/۳۵	۰/۲۲
۱۰۱۸۰۰	۱/۱۵۲	۱/۱۵۲	۰/۱۰۴	۱/۴۶	۷/۵۵
۱۰۲۰۰۰	۰/۸۱۸	۰/۸۱۵	۰/۰۷۹	۲/۳	۹۹/۴۱

همچنین با توجه به بازدید از دیواره شمالی معدن شماره ۱ گل گهر مشاهده شد که ریزش‌هایی در محدوده مقطع ۱۰۲۰۰۰ به وسعت دو پله رخ داده و پله‌های بالاتر نیز مستعد ریزش هستند (شکل ۷-۱۶). که نشان دهنده ناپایداری این قسمت از دیواره شمالی معدن بوده و با توجه به افزایش درجه هوازگی سنگ‌ها و در نتیجه کاهش مقدار پارامترهای ژئومکانیکی و همچنین افزایش طول عمر معدن، می‌توان خسارات جبران ناپذیری را برای این محدوده از معدن پیش بینی کرد.



شکل ۷-۱۶: ریزش‌های رخ داده در مقطع ۱۰۲۰۰۰

۷-۷- تاثیر هوازدگی و دگرسانی بر فاکتور اطمینان و کمی سازی مقادیر آن

جهت تاثیر هوازدگی بر روی فاکتور اطمینان از توضیحاتی که در بخش (۳-۹) داده شد استفاده

شده است.

مقادیر فاکتور کاهش پارامترهای متغیر چسبندگی (C) و زاویه اصطکاک داخلی (ϕ) برای هر سه

مقطع محاسبه شد و نتایج آن در جدول ۷-۹ آورده شده است.

جدول ۷-۹: مقادیر فاکتور کاهش برای پارامترهای C و ϕ در مقاطع مختلف

فاکتور کاهش پارامترها در مقاطع مختلف						درجه هوازدگی
۱۰۲۰۰۰		۱۰۱۸۰۰		۱۰۱۵۰۰		
φ	C	φ	C	φ	C	
۱	۱	۱	۱	۱	۱	I
۰/۸۸	۰/۸۱	۰/۸۸	۰/۸۱	۰/۸۸	۰/۸۲	II
۰/۷۵	۰/۶۴	۰/۷۶	۰/۶۴	۰/۷۴	۰/۶۴	III
۰/۷۱	۰/۴۷	۰/۶۱	۰/۴۷	۰/۵۹	۰/۴۷	IV

با استفاده از نرم افزار Slide و مدل کردن مجدد هر مقطع داخل نرم افزار، فرض بر آن شد که کل مقطع شامل سنگ سالم می‌باشد. سپس با تاثیر دادن مقادیر فاکتور کاهش چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی در خواص ژئومکانیکی، مدل تحلیل شد و نتایجی که در جدول ۷-۱۰ مشاهده می‌کنید حاصل گردید.

جدول ۷-۱۰: تاثیر هوازدگی و دگرسانی بر روی مقادیر فاکتور اطمینان و احتمال شکست

فاکتور اطمینان و احتمال شکست در مقاطع مختلف						درجه هواز دگی
۱۰۲۰۰۰		۱۰۱۸۰۰		۱۰۱۵۰۰		
فاکتور اطمینان	احتمال شکست (%)	فاکتور اطمینان	احتمال شکست (%)	فاکتور اطمینان	احتمال شکست (%)	
۱/۳۳۳	۰	۱/۴۱۷	۰	۱/۲۹۶	۰	I
۱/۱۳۶	۲/۵	۱/۲۱۴	۰	۱/۱۰۶	۹/۲۴	II
۰/۹۳۴	۷۸/۹۴	۰/۹۹۷	۵۳/۴۷	۰/۹۰۴	۸۸/۸۵	III
۰/۷۱۲	۱۰۰	۰/۷۶۲	۱۰۰	۰/۶۸۸	۱۰۰	IV

همچنین مقادیر فاکتور کاهش فاکتور اطمینان برای هر مقطع محاسبه گردید که نتایج آن در جدول

۱۱-۷ مشاهده می شود.

جدول ۱۱-۷: مقادیر فاکتور کاهش محاسبه شده برای فاکتور اطمینان

مقادیر فاکتور کاهش فاکتور اطمینان در مقاطع مختلف			درجه هوازگی
۱۰۲۰۰۰	۱۰۱۸۰۰	۱۰۱۵۰۰	
۱	۱	۱	I
۰/۸۵	۰/۸۵	۰/۸۵	II
۰/۸۲	۰/۸۲	۰/۸۲	III
۰/۷۶	۰/۷۶	۰/۷۶	IV

با توجه به مقادیر به دست آمده برای فاکتور کاهش، مشاهده می شود که در هر مقطع نتایج کاملاً یکسانی به دست آمده است. که این می تواند نشان دهنده این باشد که هوازگی به میزان برابری بر روی خواص ژئومکانیکی و فاکتور اطمینان مقاطع مختلف تاثیر گذارد.

۷-۸- جمع بندی

در این فصل جهت تحلیل احتمالاتی پایداری شیب از نرم افزار Slide استفاده شد. سه مقطع ۱۰۱۵۰۰، ۱۰۱۸۰۰ و ۱۰۲۰۰۰ جهت تحلیل مدل سازی شدند. پس از انجام تحلیل مشاهده شد که دو مقطع ۱۰۱۵۰۰ و ۱۰۱۸۰۰ تقریباً شرایط پایداری دارند، اما در عین حال احتمال ریزش مقطع ۱۰۲۰۰۰ برابر با ۹۹/۴۱٪ می باشد، که نشان از شرایط خطرناک و ناپایدار برای این مقطع می باشد. همچنین جهت بررسی تاثیر هوازگی و دگرسانی بر روی فاکتور اطمینان، با استفاده از روشی که در فصل سوم توضیح داده شد، مقادیر فاکتور کاهش برای فاکتور اطمینان محاسبه شد که نشان دهنده این است که فاکتور اطمینان از درجه I تا درجه IV به میزان ۰/۷۶ مقدار اولیه خود کاهش می یابد.

۸ فصل هشتم: نتایج و پیشنهادات

۸-۱- نتایج

- عمده سنگ‌های دیواره نهایی معدن سنگ آهن گل‌گهر شامل بیوتیت موسکویت شیست و موسکویت بیوتیت شیست یا به تعبیری همان میکاشیست‌ها تشکیل می‌دهند. که تا کنون همگی با اشتباه کوارتزشیست نامیده می‌شدند.
- با استفاده از مطالعات صحرایی و آزمایشگاهی ۴ نوع درجه هوازدهی در میکاشیست‌ها مشخص گردید.
- بر اساس طبقه‌بندی‌های صورت گرفته ۵۰٪ از میکاشیست‌ها غیرهوازده (سالم)، ۲۱٪ کمی هوازده، ۱۴/۵٪ دارای هوازدهی متوسط و ۱۴/۵٪ شدیداً هوازده هستند.
- تاثیر هوازدهی و دگرسانی بر روی برخی از پارامترهای مختلف ژئومکانیکی میکاشیست‌ها مورد آزمایش قرار گرفت و مشخص شد که تمام پارامترهای مورد بررسی تحت تاثیر دگرسانی به شدت کاهش پیدا کرده‌اند. و تداخل به شدت افزایش پیدا کرده است. همچنین چگالی تاثیر چندانی (حداقل تا درجه IV) نپذیرفته است.
- برخی از پارامترهای ژئومکانیکی از قبیل تخلخل، شاخص دوام وارفنگی و مدول یانگ از درجه سوم به بعد تاثیر شدیدتری از هوازدهی پذیرفته‌اند، که این می‌تواند به دلیل از بین رفتن بافت سنگ از درجه III به بعد باشد. زیرا گسترش اساسی حفره‌ها از درجه III هوازدهی شروع می‌شود و تا درجات آخر ادامه می‌یابد.
- با استفاده از سیستم SSPC، فاکتور کاهش در هر درجه دگرسانی برای هر کدام از پارامترها محاسبه گردید. با توجه به فاکتورهای کاهش محاسبه شده ملاحظه می‌گردد که در برخی از موارد، پارامتر ژئومکانیکی تا درجه چهارم هوازدهی حتی به ۰/۲۷ مقدار اولیه خود کاهش می‌یابد.

- با توجه به مقاطع زمین شناسی دیواره شمالی معدن سنگ آهن شماره ۱ گل گهر و همچنین اطلاعاتی که از چاهک‌های نمونه برداری به دست آمد، سه مقطع ۱۰۱۵۰۰ و ۱۰۱۸۰۰ و ۱۰۲۰۰۰ جهت تحلیل احتمالاتی در نظر گرفته شد. که برای مقطع ۱۰۱۵۰۰ فاکتور اطمینان ۱/۲۲ و احتمال شکست ۰/۲۲٪ به دست آمد. برای مقطع ۱۰۱۸۰۰ فاکتور اطمینان ۱/۱۵ و احتمال شکست ۰/۵۵٪ به دست آمد. و برای مقطع ۱۰۲۰۰۰ فاکتور اطمینان ۰/۸۱ و احتمال شکست ۰/۹۹٪ به دست آمد.
- با توجه به معیارهای پذیرش، دو مقطع ۱۰۱۵۰۰ و ۱۰۱۸۰۰ با احتمال ریزش‌های بین ۰-۱۰٪ شرایط پایداری دارند و از لحاظ ریزش خطرناک نیستند. اما مقطع ۱۰۲۰۰۰ با ۰/۹۹٪ احتمال شکست از لحاظ ریزش، شرایط کاملاً ناپایدار و خطرناکی را نشان می‌دهد.
- با توجه به تحلیل حساسیت مشاهده شد که حساسیت فاکتور اطمینان در مقاطع مختلف نسبت به پارامترهای ژئومکانیکی می‌تواند متفاوت باشد. در مقطع ۱۰۱۵۰۰ بیشترین حساسیت به چسبندگی سنگ‌های غیروازده می‌باشد در صورتی که در مقطع ۱۰۱۸۰۰ بیشترین حساسیت مربوط به زاویه اصطکاک سنگ‌های شدیداً هوازده و در مقطع ۱۰۲۰۰۰ بیشترین حساسیت مربوط به چسبندگی سنگ‌های شدیداً هوازده از خود نشان می‌دهد.
- با تاثیر دادن میزان هوازدهی در پارامترهای ژئومکانیکی C و ϕ و محاسبه فاکتور اطمینان، مشاهده شد که هوازدهی به میزان قابل توجهی مقدار فاکتور اطمینان را کاهش می‌دهد.
- پس از کمی سازی تاثیر هوازدهی و دگرسانی بر روی فاکتور اطمینان مشاهده شد که مقدار فاکتور اطمینان تا درجه IV به میزان ۰/۷۴ مقدار اولیه خود کاهش می‌یابد.

۸-۲- پیشنهادات

- با توجه به اینکه شدت هوازدگی و دگرسانی در سنگ‌های مختلف متفاوت است و اینکه در معدن سنگ آهن گل‌گهر، به سنگ‌های باطله به اشتباه نام کلی کوارتز شایست را اختصاص داده‌اند، جهت پهنه‌بندی دقیق معدن نیاز به تهیه مقاطع نازک از هر تیپ سنگ و مطالعه دقیق کانی‌های تشکیل دهنده احساس می‌شود. که این می‌تواند در مطالعات هوازدگی و دگرسانی و همچنین مطالعات ژئومکانیکی کمک به سزایی برای مهندسين ژئوتکنیک باشد.
- با توجه به اینکه هنوز ۵۰٪ میکاشیست‌های معدن سنگ‌آهن گل‌گهر از هوازدگی تاثیر نپذیرفته‌اند و اینکه آب از دیواره‌های معدن در حال تراوش می‌باشد، این سنگ‌ها نیز مستعد هوازدگی می‌باشند. به همین دلیل تاثیر دادن زمان در میزان پیشروی هوازدگی می‌تواند مورد مطالعه قرار گرفته و جهت پیش‌بینی پارامترهای ژئومکانیکی که در آینده چه مقادیری را دارند مورد استفاده قرار گیرد.
- از آنجا که با افزایش داده‌های ژئوتکنیکی ریسک رخداد شرایط پیش‌بینی نشده کاهش می‌یابد، لذا پیشنهاد می‌شود که مطالعات هوازدگی و دگرسانی در حجم وسیع‌تری از دیواره‌های معدن سنگ آهن گل‌گهر مورد ارزیابی و مطالعه قرار گیرد.
- با توجه به اینکه مقدار فاکتور اطمینان و احتمال ریزش در مقاطع مختلف با هم فرق دارد، اعمال زاویه شیب یکسان به دیواره‌های سنگی در تمام نقاط معدن گزینه مناسبی نمی‌باشد. مقدار این زاویه به پارامترهای مختلفی از قبیل هوازدگی و دگرسانی، ضخامت آبرفت، شرایط آب زیر زمینی و ... بستگی دارد که بر همین اساس محدوده معدن بر حسب زاویه شیب باید به نواحی مختلفی تقسیم‌بندی شود.

منابع و مراجع

1. Anon (1995) "The description and classification of weathered rocks for engineering purposes" **Q. J. Eng Geol.** 28 (3), 207-242
2. Lliev I. G. (1966) "An attempt to estimate the degree of weathering of their phesico-mechanical properties" **Proc. 1st ISRM cong.** 2 (3), 109-114
3. Haskins D. R. and Bell F. G. (1995) "Drakensberg Basalts: their alteration, breakdown and durability" **Q. J. Eng Geol.** 28, 287-302
4. Tugrul A. and Gurbinar O. (1997) "A Proposed Weathering Classification For Basalts And Their Engineering Properties (Turkey)" **of the International Association of Engineering Geology.**, NO 55
5. Kilic R. (1999), "**The Unified Alteretion Index (UAE) for Mafic rocks**", Environ Eng Geosci, AEG, Vol. 4, pp. 475-483
۶. شرکت کوشا معدن، ۱۳۹۰ "گزارش آشنایی با معدن سنگ آهن گل گهر" مدیریت امور معدن شرکت سنگ آهن گل گهر
۷. مهندسین مشاور کوشا معدن، اسفند ماه ۱۳۸۰ "گزارش عملکرد مدیریت امور معدن در سال ۸۰" مدیریت امور معدن شرکت سنگ آهن گل گهر
۸. تقی پور ن، (۱۳۸۰)، پایان نامه ارشد: "تاثیر دگرسانی و هوازدگی بر روی پارامترهای ژئومکانیکی سنگها (بر پایه شرایط موجود در معدن مس سرچشمه)"، دانشکده معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر
۹. مدنی ح، شفیقی س، (۱۳۸۳) "**زمین شناسی عمومی**" چاپ بیست و یکم، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ص ۲۴۷-۲۵۵
10. Bell F. G. (1992), "**Engineering In Rock Masses** ", Vol. 1, pp.27-53
11. Bell F. G. (2007), "**Engineering Geology**", Vol. 2, pp.77-90
12. Irfan T.Y. and Dearman W. R. (1978) "Engineering classification and index properties of a weathered granite" **Bull. Int. Assoc. Engng Geol.** 17, 79-90
13. Beavis F. C. (1985), "**Rock weathering. Engineering Geology**" Blackwell Scientific, Melbourne, pp. 52-91
14. Al-Qudami W. M. (1997) "On The Weathering Of Syenite Under Arid Conditions" **Bull. Int. Assoc. Engng Geol.** 56 , 3-8

15. Price D & Hack R (1997), "**Quanification Of Weathering**", engineering geology and environment , Vol. 1, pp. 145 – 155
16. Hack R. (2003) "A New Approach to Rock Slope Stability, A Probability Classification (SSPC)" **Bull Eng Geol Env.**, 62, 167-184
۱۷. باقریان، ا، (۱۳۸۱)، سمینار ارشد: "کاربرد روش‌های احتمالاتی در تحلیل پایداری شیب"، دانشکده معدن، دانشگاه شهید باهنر کرمان
18. Abramson L. W. Thomas S. Sharma S. and Boyse G. M. (2002), "**Slope Stability and Stabilization Methods**", John Wiley & Sons, New York.
19. Geo-Slope International Ltd. (1999), "**Slope/w Version 4 Users Manual**", Alberta, Canada.
20. Sjoberg J. (1996), "**Large Scale Slope Stability in Open Pit Mine-A review**", Technical Report- Division of Rock Mechanics, LULEA University of Technology, Sweden
21. Lilly P. A. Li J. (2000) "Estimating excavation reliability from displacement modeling" *Int J of Rock Mec.*, 37, pp 1261-1265
۲۲. شانون ، رابرت ، (۱۳۷۱) "**علم و هنر شبیه سازی سیستم‌ها**" ترجمه علی اکبر عرب مازار، مرکز نشر دانشگاهی، تهران.
23. Peterson J. L. (1999), "**Probability Analysis of Slope Stability**", Master of Science thesis in, Civil and Environmental Engineering, West Virginia University, Morgantown. Pp 6-22.
۲۴. مهابادی ، ا ، (۱۳۷۷) "**شبیه سازی**" انتشارات آذرخش، تهران.
25. Ozbay M. U. (2001) "A case study on safety factor and failure probability of rock slope" **IMCET.**, 17.
26. Park H. and West T. R. (2001) "Development of a probabilistic approach for rock wedge failure" **Eng Geol**, 59 , pp 233-251.
27. Manual. (2010), "**Risk Analysis and Simulation Add-In for Microsoft Excel**", Palisade Corporation.

۲۸. فهیمی فر ا، سروش ح، (۱۳۸۰) "آزمایش‌های مکانیک سنگ، مبانی نظری و استانداردها" جلد اول، چاپ اول، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ص ۲-۴۳۶

۲۹. زارع رشکوئیه ح، (۱۳۸۵)، پایان نامه ارشد: "تحلیل پایداری و طراحی شیب نهایی معدن سنگ آهن شماره ۳ گل‌گهر"، دانشکده معدن، دانشگاه شهید باهنر کرمان

30. Kahraman S. (2001) "Evaluation of simple methods for assessing the uniaxial compressive strength of rock" **Int. J. Rock Mech. Min. Sci.**, 38, 981

31. Palmstrom A., (1995), PhD. Thesis, "RMI-A Rock mass characterization system for rock engineering purposes", University of Oslo.

32. Hoek E. and Bray J. (2005), "**Rock Slope Engineering**", Vol. 4, Taylor & Francis e-Library, London and New York, pp 92-109

33. Priest S. D. (2005) "Determination of shear strength and three-dimensional yield strength for the Hoek-Brown criterion" **Rock Mech. Rock Engng.**, 38(4), pp 299-327

34. Marinos P. and Hoek E. (2001) "Estimating the geotechnical properties of heterogeneous rock masses such as flysch" **Bull Eng Geol Env.**, 60, pp 85-92

35. Hoek E. and Marinos P. (2005) "Characterization and engineering properties of tectonically undisturbed but lithologically varied sedimentary rock masses" **Int. J. Rock Mech. Min. Sci.**, 42(2), pp 277-285

36. Sonmez H. and Ulusay R. (2002) "A Discussion on the Hock-Brown failure criterion and suggested modification to the criterion verified by slope stability case studies" **Yerbilimleri (Earthsciences)**., 26, pp 77-99.

۳۷. باقریان، ا، (۱۳۸۲)، پایان نامه ارشد "تحلیل پایداری شیب معدن شماره ۱ گل‌گهر سیرجان" دانشکده معدن، دانشگاه شهید باهنر کرمان

38. Marinos V. and Marinos P. and Hoek E. (2005) "The geological strength index: Applications and limitations" **Bull Eng Geol Env.**, 64(1), pp 55-65

39. El-RAamly H., (2001), PhD thesis, "Probabilistic analysis of landslide hazards and risk: Bridging theory and Practice", University of Alberta, Canada.

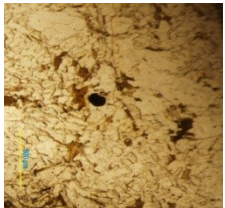
40. Ekkerd J N., (2011), for the degree of Master of Science, "Geotechnical optimization of the venetia open pit" University of Witwatersrand.

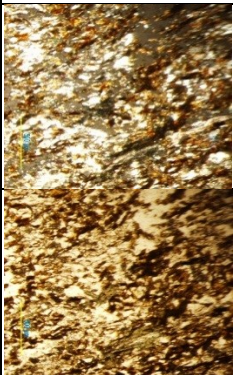
پیوست‌ها

پیوست ۱: خواص میکروسکوپی مربوط به سایر مقاطع در ادامه آورده شده است:

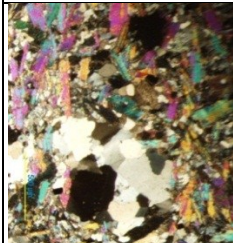
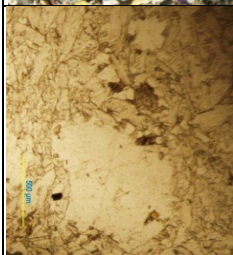
مشخصات نمونه		شماره نمونه
لیپیدوبلاستیک (شیستوز یا متورق)، کمی هتروژن (کانی‌های درشت در زمینه ریز)		بافت
	کوارتز (متوسط دانه، بی رنگ، بی شکل، دارای مقدار زیادی اینکلوژن، خاموشی موجی، بی‌رفرنژانس ضعیف سری اول، یک محوری مثبت) - مسکویت (متوسط دانه، نیمه شکل‌دار، دارای کلیواژ یک جهته، برجستگی متغیر، خاموشی موازی، بی‌رفرنژانس سری سوم) - بیوتیت خیلی کم - مقداری کلسیت - درصد کمی فلدسپار نوع میکروکلین	کانی‌ها
		
دگرسانی خاصی ندارد		مشخصه بارز
اپیدوت، زیرکن، کمی کانی اوپاک		کانی‌های فرعی
موسکویت شیست (میکا شیست)		نام سنگ

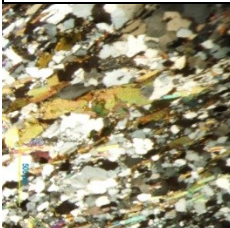
مشخصات نمونه		شماره نمونه
لیپیدوبلاستیک (شیستوز یا متورق)، هتروژن (کانی‌های درشت در زمینه ریز)		بافت
	کوارتز فراوان (ریز تا درشت دانه، بی رنگ، بی شکل، دارای مقدار زیادی اینکلوژن، خاموشی موجی، بی‌رفرنژانس ضعیف سری اول، یک محوری مثبت) - مسکویت (متوسط دانه، نیمه شکل دار، دارای کلیواژ یک جهته، برجستگی متغیر، خاموشی موازی، بی‌رفرنژانس سری سوم) - کمی بیوتیت - مقدار کمی فلدسپار میکروکلین	کانی‌ها
		Mc ₃
دگرسانی خاصی ندارد		مشخصه بارز
کمی اپیدوت، کمی زیرکن		کانی‌های فرعی
مسکویت شیست (میکاشیست)		نام سنگ

مشخصات نمونه		شماره نمونه
لیپیدوبلاستیک (شیستوز یا متورق)		بافت
	کوارتز فراوان (درشت دانه، بی رنگ، بی شکل، دارای مقدار زیادی اینکلوژن، خاموشی موجی، بی رفرنژانس ضعیف سری اول، یک محوری مثبت) - مقداری فلدسپار (از نوع میکروکلین) - موسکویت فراوان (از ریز تا درشت دانه، نیمه شکل دار، دارای کلیواژ یک جهته، برجستگی متغیر، خاموشی موازی، بی رفرنژانس سری سوم) - مقداری بیوتیت (متوسط دانه، رنگ سبز تا قهوه‌ای، دارای چند رنگی، یکسری کلیواژ، خاموشی مستقیم، خاموشی چشم گربه‌ای، بی رفرنژانس بالا اوایل سری سوم، نیمه شکل دار)	کانی‌ها
	بیوتیت‌ها کمی کلریتی شده‌اند	مشخصه بارز
زیرکن، تورمالین، کمی اپیدوت، کانی‌های اوپاک		کانی‌های فرعی
بیوتیت موسکویت شایست (میکا شایست)		نام سنگ

مشخصات نمونه		شماره نمونه
لیپیدوبلاستیک (شیستوز یا متورق)		بافت
	بیوتیت خیلی فراوان (درشت دانه، بی رنگ، بی شکل، دارای مقدار زیادی اینکلوژن، خاموشی موجی، بی - رفرنژانس ضعیف سری اول، یک محوری مثبت) - کلسیت - کلریت (درشت بلور) - کوارتز - اپیدوت فراوان - درصد کمی فلدسپار پلاژیوکلاز	کانی‌ها
به شدت دگرسان شده، دگرسانی پروپلیتی (سائوسیریتی)		مشخصه بارز
اوپاک		کانی‌های فرعی
بیوتیت شایست (میکاشایست)		نام سنگ

مشخصات نمونه		شماره نمونه
لیپیدوبلاستیک (شیستوز یا متورق)		بافت
 	کوارتز فراوان (بی رنگ، بی شکل، دارای مقدار زیادی اینکلوژن، خاموشی موجی، بی رفرنژانس ضعیف سری اول، یک محوری مثبت) - مسکویت (متوسط دانه، نیمه شکل - دار، دارای کلیواژ یک جهته، برجستگی متغیر، خاموشی موازی، بی رفرنژانس سری سوم) - کمی بیوتیت	کانی‌ها
دگرسانی خاصی ندارد		مشخصه بارز
مقدار کمی زیرکن، کمی تورمالین، مقدار کمی اپیدوت		کانی‌های فرعی
مسکویت شایست (میکاشیست)		نام سنگ

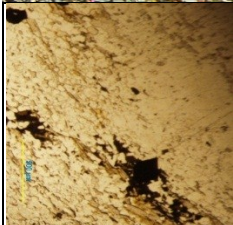
مشخصات نمونه		شماره نمونه
لیپیدوبلاستیک (شیستوز یا متورق)، کینک باند (کانی‌ها چین خوردگی دارند)		بافت
 	بخش زیادی کوارتز (از ریز بلور تا درشت دانه، اندازه دانه - ها حدود ۳mm، بی رنگ، بی شکل، دارای مقدار زیادی اینکلوژن، خاموشی موجی، بی رفرنژانس ضعیف سری اول، یک محوری مثبت) - کمی بیوتیت (از ریز بلور تا درشت دانه، رنگ سبز تا قهوه‌ای، دارای چند رنگی، یکسری کلیواژ، خاموشی مستقیم، خاموشی چشم گربه‌ای، بی - رفرنژانس بالا اوایل سری سوم، نیمه شکل دار) - مسکویت زیاد (از ریز بلور تا درشت دانه، نیمه شکل دار، دارای کلیواژ یک جهته، برجستگی متغیر، خاموشی موازی، بی - رفرنژانس سری سوم) - کمی کلسیت - درصد کمی فلدسپار	کانی‌ها
بیوتیت‌ها کمی به کلریت دگرسان شده‌اند		مشخصه بارز
زیرکون زیاد		کانی‌های فرعی
بیوتیت موسکویت شایست (میکاشیست)		نام سنگ

شماره نمونه		مشخصات نمونه
Mc ₈	بافت	لیپیدوبلاستیک (شیستوز یا متورق)، بافت چشمی (بلورهای کوارتز در یکجا جمع می‌شوند و میکاها از دو طرف عبور می‌کنند که ممکن است از لحاظ ژئومکانیکی تاثیر گذارد)
	کانی‌ها	 بخش زیادی کوارتز (از ریز بلور تا درشت دانه، اندازه دانه-ها حدود ۳mm، بی رنگ، بی شکل، دارای مقدار زیادی اینکلوژن، خاموشی موجی، بی‌رفرنژانس ضعیف سری اول، یک محوری مثبت) - کمی بیوتیت (از ریز بلور تا درشت دانه، رنگ سبز تا قهوه‌ای، دارای چند رنگی، یکسری کلیواژ، خاموشی مستقیم، خاموشی چشم گربه‌ای، بی-رفرنژانس بالا اوایل سری سوم، نیمه شکل دار) - مسکویت (از ریز بلور تا درشت دانه، نیمه شکل دار، دارای کلیواژ یک جهته، برجستگی متغیر، خاموشی موازی، بی-رفرنژانس سری سوم) - کمی کلسیت
	مشخصه بارز	دگرسانی خاصی ندارد، بیوتیت به کلریت تبدیل شده است
	کانی‌های فرعی	اوپاک، زیرکون
	نام سنگ	بیوتیت موسکویت شایست (میکاشیست)

شماره نمونه		مشخصات نمونه	
104	بافت	لیپیدوبلاستیک (شیستوز یا متورق)	
	کانی‌ها		بخش زیادی کوارتز (از ریز بلور تا درشت دانه، بی رنگ، بی‌شکل، دارای مقدار زیادی اینکلوژن، خاموشی موجی، بی‌رفرنژانس ضعیف سری اول، یک محوری مثبت) - کمی بیوتیت - مسکویت زیاد (متوسط دانه، نیمه شکل - دار، دارای کلیواژ یک جهته، برجستگی متغیر، خاموشی موازی، بی‌رفرنژانس سری سوم) - کمی کلسیت
	مشخصه بارز	دگرسانی خاصی ندارد	
	کانی‌های فرعی	اوپاک	
	نام سنگ	بیوتیت موسکویت شایست (میکاشیست)	

شماره نمونه		مشخصات نمونه
130	بافت	لیپیدوبلاستیک (شیستوز یا متورق)
	کانی‌ها	 بخش زیادی کوارتز (اندازه دانه‌ها درشت، بی رنگ، بی-شکل، دارای مقدار زیادی اینکلوژن، خاموشی موحی، بی-رفرنژانس ضعیف سری اول، یک محوری مثبت) - بیوتیت خیلی کم (درشت دانه، رنگ سبز تا قهوه‌ای، دارای چند رنگی، یکسری کلیواژ، خاموشی مستقیم، خاموشی چشم گربه‌ای، بی‌رفرنژانس بالا اوایل سری سوم، نیمه شکل‌دار) - مسکویت فراوان (درشت دانه، نیمه شکل‌دار، دارای کلیواژ یک جهته، برجستگی متغیر، خاموشی موازی، بی-رفرنژانس سری سوم)
	مشخصه بارز	دگرسانی سیریسیتی خیلی اهمیت دارد (بلورهای فلدسپار به سیریسیت دگرسان شده‌اند)
	کانی‌های فرعی	اوپاک
	نام سنگ	موسکویت شیست (میکاشیست)

شماره نمونه		مشخصات نمونه
146	بافت	لیپیدوبلاستیک (شیستوز یا متورق)
	کانی‌ها	 بخش زیادی کوارتز (از ریز بلور تا درشت دانه، اندازه دانه‌ها حدود ۳mm، بی رنگ، بی‌شکل، دارای مقدار زیادی اینکلوژن، خاموشی موحی، بی‌رفرنژانس ضعیف سری اول، یک محوری مثبت) - کمی بیوتیت (متوسط دانه، رنگ سبز تا قهوه‌ای، دارای چند رنگی، یکسری کلیواژ، خاموشی مستقیم، خاموشی چشم گربه‌ای، بی-رفرنژانس بالا اوایل سری سوم، نیمه شکل‌دار) - مسکویت (متوسط دانه، نیمه شکل‌دار، دارای کلیواژ یک جهته، برجستگی متغیر، خاموشی موازی، بی‌رفرنژانس سری سوم) - درصد کمی فلدسپار - کلسیت - اپیدوت (درشت دانه)
	مشخصه بارز	دگرسانی خیلی ضعیف (کلریتی شدن که خیلی شدید نیست)
	کانی‌های فرعی	اوپاک
	نام سنگ	بیوتیت موسکویت شیست (میکاشیست)

شماره نمونه		مشخصات نمونه
200	بافت	لیپیدوبلاستیک (شیستوز یا متورق)، هتروژنیتی خیلی زیاد (کانی‌های درشت در زمینه ریز)
	کانی‌ها	 کوارتز (درشت دانه، بی رنگ، بی شکل، دارای مقدار زیادی اینکلوژن، خاموشی موجی، بی‌رفرنژانس ضعیف سری اول، یک محوری مثبت) - موسکویت خیلی زیاد (متوسط دانه، نیمه شکل دار، دارای کلیواژ یک جهته، برجستگی متغیر، خاموشی موازی، بی‌رفرنژانس سری سوم) - بیوتیت (متوسط دانه، رنگ سبز تا قهوه‌ای، دارای چند رنگی، یکسری کلیواژ، خاموشی مستقیم، خاموشی چشم‌گره‌ای، بی‌رفرنژانس بالا اوایل سری سوم، نیمه شکل دار) - کلریت
	مشخصه بارز	بیوتیت‌ها به کلریت دگرسان شده‌اند
	کانی‌های فرعی	اسفن، لوکوکسین، اوپاک
	نام سنگ	بیوتیت موسکویت شایست (میکاشیست)

شماره نمونه		مشخصات نمونه		
1205	بافت	لیپیدوبلاستیک (شیستوز یا متورق) هتروژن (کانی‌های درشت در زمینه ریز)		
	کانی‌ها		کوارتز فراوان (درشت دانه، بی رنگ، بی شکل، دارای مقدار زیادی اینکلوژن، خاموشی موجی، بی‌رفرنژانس ضعیف سری اول، یک محوری مثبت) - مسکویت (متوسط دانه، نیمه شکل دار، دارای کلیواژ یک جهته، برجستگی متغیر، خاموشی موازی، بی‌رفرنژانس سری سوم) - کمی بیوتیت - فلدسپار نوع میکروکلین - مقداری کلسیت	
				
		دگرسانی خاصی ندارد		
		زیرکن، تورمالین، اپیدوت		
		موسکویت شایست (میکاشیست)		
مشخصه بارز	کانی‌های فرعی			
نام سنگ				

شماره نمونه		مشخصات نمونه
1212	بافت	لیپیدوبلاستیک (شیستوز یا متورق)، هتروژنیته خیلی زیاد (کانی‌های درشت در زمینه ریز)
	کانی‌ها	 کوارتز (درشت دانه، بی رنگ، بی شکل، دارای مقدار زیادی اینکلوزن، خاموشی موجی، بی‌رفرنژانس ضعیف سری اول، یک محوری مثبت) - موسکویت خیلی زیاد (متوسط دانه، نیمه شکل دار، دارای کلیواژ یک جهته، برجستگی متغیر، خاموشی موازی، بی‌رفرنژانس سری سوم) - بیوتیت (متوسط دانه، رنگ سبز تا قهوه‌ای، دارای چند رنگی، یکسری کلیواژ، خاموشی مستقیم، خاموشی چشم گربه‌ای، بی‌رفرنژانس بالا اوایل سری سوم، نیمه شکل دار) - کلریت - مقدار کمی کلسیت 
	مشخصه بارز	بیوتیت‌ها به کلریت دگرسان شده‌اند
	کانی‌های فرعی	اسفن، لوکوکسین، اوپاک
	نام سنگ	بیوتیت موسکویت شپست (میکاشیست)

پیوست ۲: محاسبه مقادیر فاکتور کاهش برای سایر پارامترها:

محاسبه مقادیر فاکتور کاهش برای مقاومت کششی:

$$WE_I = 1$$

$$ratio_{II,I} = -\frac{1}{5} \sum \frac{7/0.8}{11/74} + \frac{9/46}{13/26} + \frac{6/89}{15/0.3} + \frac{7/39}{13/73} + \frac{9/27}{11/21} = 0.63$$

$$WE_{II} = 0.63 \times 1 = 0.63$$

$$ratio_{III,I} = -\frac{1}{5} \sum \frac{2/8}{7/0.8} + \frac{5/27}{9/46} + \frac{8/27}{6/89} + \frac{6/3}{7/39} + \frac{8/0.5}{9/27} = 0.77$$

$$WE_{III} = 0.77 \times 0.63 = 0.49$$

$$ratio_{IV,I} = -\frac{1}{5} \sum \frac{2/41}{2/8} + \frac{2/57}{5/27} + \frac{2/69}{8/27} + \frac{4/3}{6/3} + \frac{3/75}{8/0.5} = 0.56$$

$$WE_{IV} = 0.56 \times 0.49 = 0.3$$

محاسبه مقادیر فاکتور کاهش برای سرعت موج طولی:

$$WE_I = 1$$

$$ratio_{II,I} = -\frac{1}{5} \sum \frac{4453}{5290} + \frac{4566}{5062} + \frac{4328}{5147} + \frac{4436}{5005} + \frac{4752}{5202} = 0.88$$

$$WE_{II} = 0.88 \times 1 = 0.88$$

$$ratio_{III,I} = -\frac{1}{5} \sum \frac{3576}{4453} + \frac{3904}{4566} + \frac{3550}{4328} + \frac{3000}{4436} + \frac{3245}{4752} = 0.77$$

$$WE_{III} = 0.77 \times 0.88 = 0.67$$

$$ratio_{IV,I} = -\frac{1}{5} \sum \frac{2494}{3576} + \frac{2588}{3904} + \frac{2765}{3550} + \frac{2773}{3000} + \frac{2870}{3245} = 0.78$$

$$WE_{IV} = 0.78 \times 0.67 = 0.53$$

محاسبه مقادیر فاکتور کاهش برای ضریب الاستیسیته:

$$WE_I = 1$$

$$ratio_{II,I} = \frac{1}{5} \sum \frac{24/6}{18} + \frac{18/1}{23/2} + \frac{13/1}{20/3} + \frac{15/1}{26/3} + \frac{25/2}{27/3} = 0.86$$

$$WE_{II} = 0.86 \times 1 = 0.86$$

$$ratio_{III,I} = \frac{1}{5} \sum \frac{18}{24/6} + \frac{19/3}{18/1} + \frac{19/2}{13/1} + \frac{11/6}{15/1} + \frac{17/2}{25/2} = 0.94$$

$$WE_{III} = 0.94 \times 0.86 = 0.81$$

$$ratio_{IV,I} = \frac{1}{5} \sum \frac{2/2}{18} + \frac{2/6}{19/3} + \frac{3/5}{19/2} + \frac{6/9}{11/6} + \frac{7/2}{17/2} = 0.29$$

$$WE_{IV} = 0.29 \times 0.81 = 0.23$$

محاسبه مقادیر فاکتور کاهش برای چگالی:

$$WE_I = 1$$

$$ratio_{II,I} = \frac{2/65}{2/68} = 0.99$$

$$WE_{II} = 0.99 \times 1 = 0.99$$

$$ratio_{III,I} = \frac{2/6}{2/65} = 0.98$$

$$WE_{III} = 0.98 \times 0.99 = 0.97$$

$$ratio_{IV,I} = \frac{2/58}{2/6} = 0.98$$

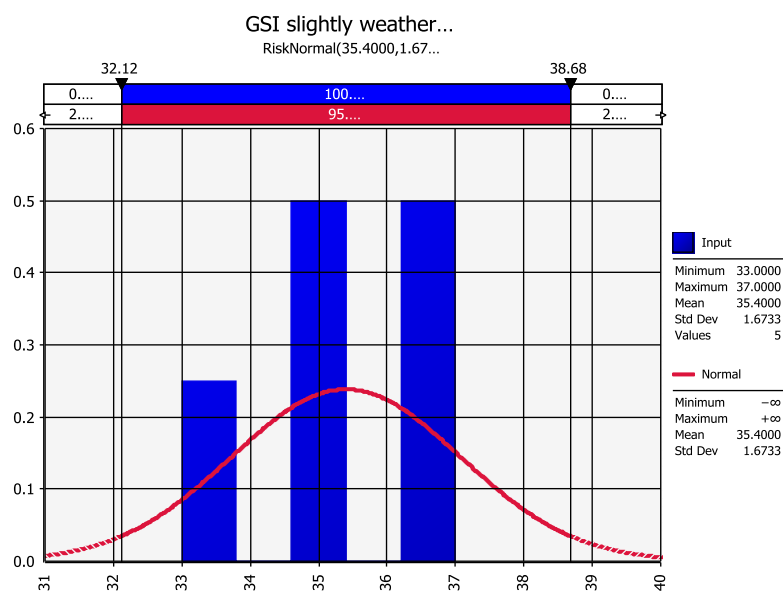
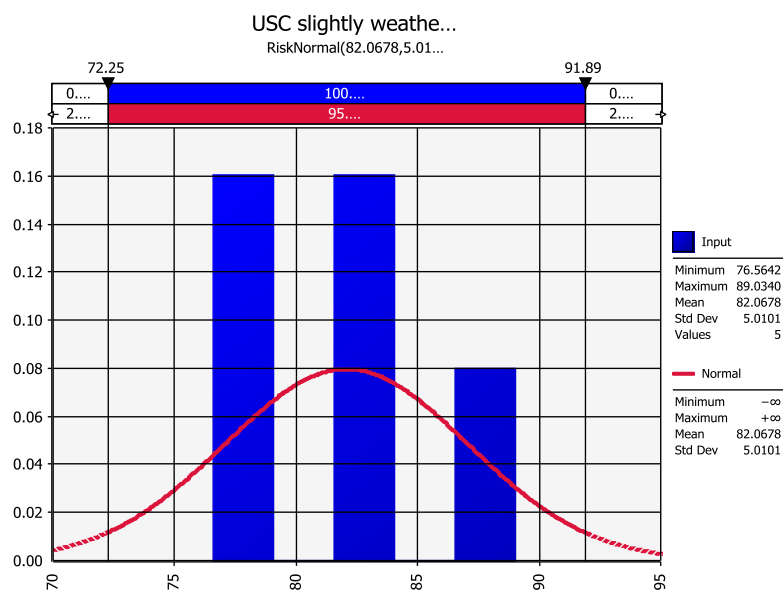
$$WE_{IV} = 0.98 \times 0.97 = 0.96$$

پیوست ۳: مقادیر پیشنهادی فاکتور اغتشاش برای شیب‌های سنگی

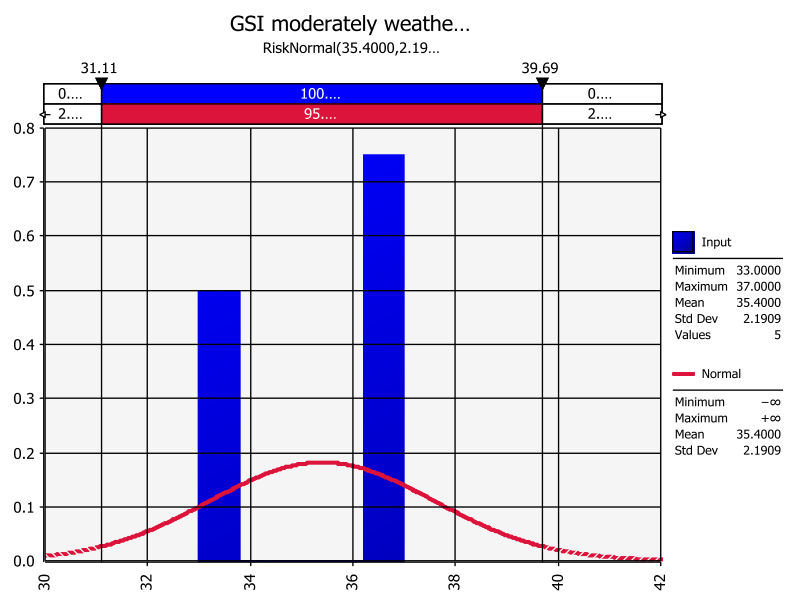
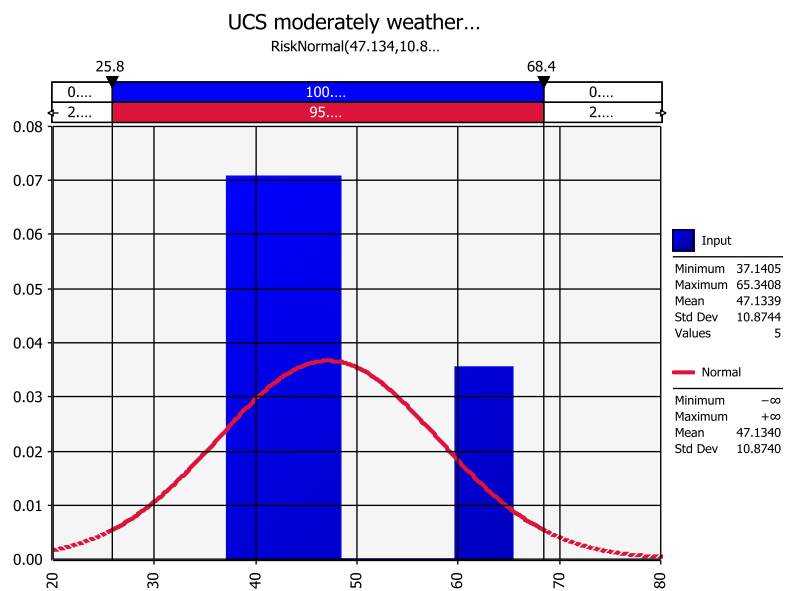
<i>Appearance of rock mass</i>	<i>Description of rock mass</i>	<i>Suggested value of D</i>
	Small-scale blasting in civil engineering slopes results in modest rock mass damage, particularly if controlled blasting is used as shown on the left hand side of the photograph. However, stress relief results in some disturbance.	$D = 0.7$ Good blasting $D = 1.0$ Poor blasting
	Very large open pit mine slopes suffer significant disturbance due to heavy production blasting, and also due to stress relief from overburden removal. In some softer rocks, excavation can be carried out by ripping and dozing, and the degree of damage to the slopes is less.	$D = 1.0$ Production blasting $D = 0.7$ Mechanical excavation

پیوست ۴: نمودار توزیع‌های تعیین شده توسط @Risk برای ورودی‌های متغیر UCS و GSI

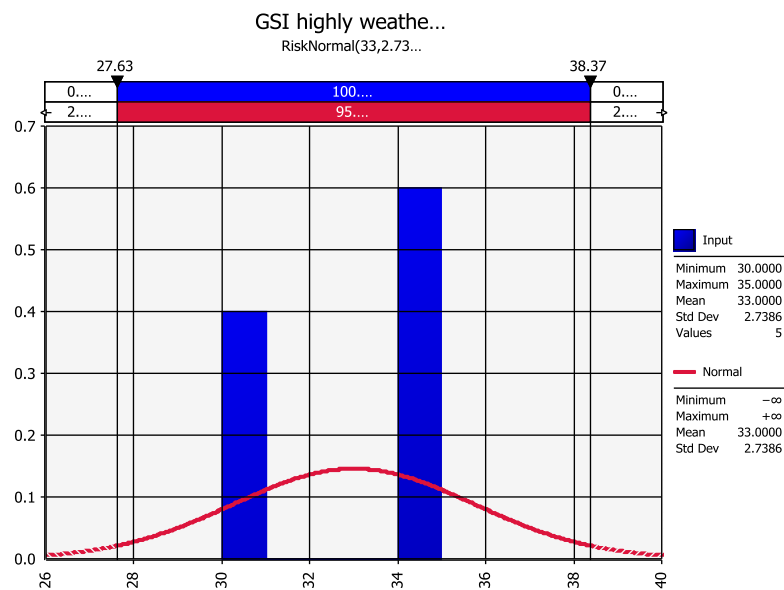
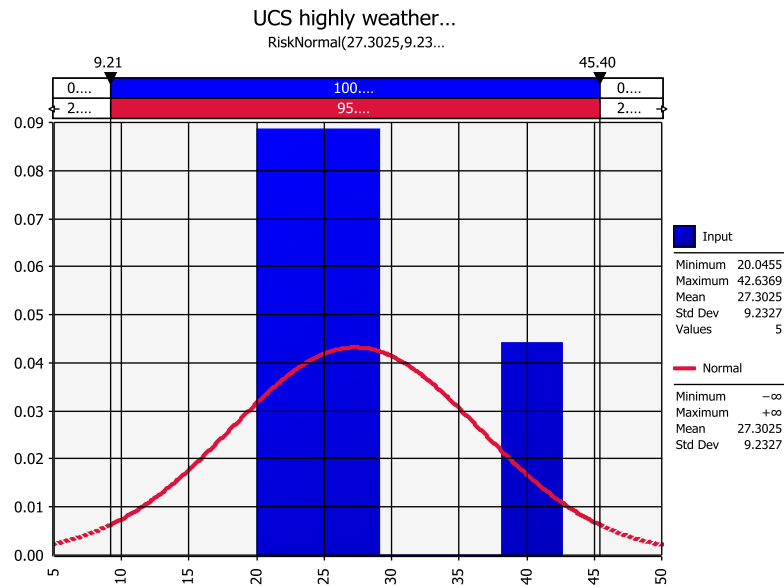
توزیع‌های مربوط به سنگ کمی هوازده:



توزیع‌های مربوط به سنگ با هوازدگی متوسط:



توزیع‌های مربوط به سنگ شدیداً هوازده:

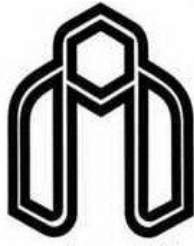


Abstract

All direct and indirect factors should be considered for designing rock or soil slopes either in mines or dams or road trenches. Weathering and alteration as destructive agents strongly influenced rock geomechanical parameters and reduce the stability and strength of rock considerably. Schist of Gol-o-har iron mine were strongly affected by alteration and weathering. Up to now, these parameters have been studied for stability analysis from a qualitative point of view and geology. However, studying the effect of these factors on geomechanical parameters is impossible except through numerical and quantitative methods. In the current thesis, enormous quantitative data were collected for investigating the effect of weathering and alteration on geomechanical parameters of rocks in mine#1 of Gol-Gohar. Various degrees of weathering and alteration of rocks were indicated by desert indices and their physical and mechanical characteristics were studied in laboratory. The amount of weathering and alteration degree of attenuation factor was indicated for each parameter through the slope stability probability classification (SSPC). The results show that most of geomechanical parameters of rocks are dramatically reduced by increment of weathering and alteration degree. Uniaxial compressive strength, tensile strength and static modulus of elasticity are affected by weathering more than other characteristics. The results of experiments uncover that the schist's vulnerability of Gol-Gohar iron ore mine from weathering reaches to its maximal value after grade III. In addition, controlling the inclined surfaces is an issue of geotechnical issues, which has high percentage of uncertainty. The effect of uncertainty on prediction of slopes stability is usually important. In deterministic methods, stability analysis is mostly done based on Safety factor; however, these methods are unable to clarify the effect of uncertainties. Probabilistic stability analysis of inclined surfaces is a suitable tool for considering the effect of uncertainties in design processes. In the current research various uncertainties in studying the geotechnical parameters and fundamentals of common probabilistic methods such as Monte Carlo simulation as a probabilistic method for reduction of uncertainties of geotechnical parameters that recently widely used, were introduced. In addition, through Slide Software program and selecting the Bishop limit balance as performance function, Monte Carlo probabilistic analysis was implemented on walls of Iron mine #1 of Gol-Gohar and effect of weathering and alteration

on amount of Safety factor was studied. After quantifying the effects of weathering and alteration it was clarified that the Safety factor of degree IV reduces up to 0.74 of its primary value.

Keywords: Iron mine of Gol-Gohar, Weathering and Alteration, SSPC, Geomechanical Characteristics, Uncertainty, Safety Factor, Probabilistic Analysis, Monte Carlo.



Shshrood University of Technology

Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics

**Effect of Alteration and Weathering on Rock Geomechanical Parameters
for Probabilistic Slope Stability Analysis
A case study in: Gol-e-gohar Iron Mine**

Mojtaba Salari

Supervisor(s):

Prof. Mohammad Ataei

Dr. Saeed Karimi Nasab

Industrial Advisor:

Hamid Reza Mohammadi

September 2013