مطالعه پدیده هوازدگی در اسلیت‌های آهکی پیریت‌دار مزوزوئیک و مروری بر مشکلات ناشی از هوازدگی پیریت (مطالعه موردی، شهرستان اراک)

پریا بهزادتبار*[1] و محمدحسین قبادی[2]

۱ و ۲- گروه زمین‌شناسی، دانشگاه بوعلی‌سینا، همدان

نویسنده مسئول: p.behzadtabar@yahoo.com *

دریافت: ۹۷/۵/۲ پذیرش: ۹۷/۱۱/۱

چکیده

بررسی هوازدگی به‌منظور پیش‌بینی رفتار سنگ در طی زمان و نیز مناسب بودن آن جهت منابع قرضه مورد اهمیت می‌باشد. در این راستا اولین قدم جهت بررسی، ارائه‌ی روشی مناسب برای رده‌بندی هوازدگی می‌باشد. در این مطالعه تغییرات ظاهری ناشی از هوازدگی اسلیت‌های آهکی در شرایط آزمایشگاهی (سرد و گرم کردن، تر و خشک‌کردن، ذوب و انجماد و تبلور نمک) و نیز در شرایط جوی (به مدت یک سال)، با حدود ۱۰۰۰ نمونه، مورد بررسی قرار گرفت. این آثار عمدتاً به شکل ورقه‌ورقه شدن، تغییر رنگ بلورهای پیریت- مگنتیت، آثار پساب زنگ آهن و خردگی لبه نمونه‌ها قابل‌مشاهده بوده است. شدت این تغییرات در آزمون هوازدگی تبلور نمک بیش‌تر از آزمون‌های دیگر بوده است. اکسیداسیون پیریت علاوه بر تأثیری که بر رفتار مهندسی سنگ می‌گذارد، بر روی شکل ظاهری مصالح سنگی نیز اثر نامطلوبی دارد. بنابراین پیریت- مگنتیت‌های موجود در اسلیت‌های آهکی اراک به‌طور ویژه از نظر شکل و تغییرات ظاهری ناشی از هوازدگی مورد بررسی و رده‌بندی قرار داده شدند. این بلورها عمدتاً به سه تیپ دانه‌ای- مکعبی (I)، توده‌ای (II) و دندریتی (III) رده‌بندی و بر اساس درجه هوازدگی به ۵ رده P_1 تا P_5 (بدون هوازدگی تا کاملاً هوازده) طبقه‌بندی‌شده‌اند. در نهایت مروری بر مشکلات ژئوتکنیکی ناشی از هوازدگی پیریت‌ها داشته‌ایم.

واژه‌های کلیدی: اسلیت آهکی، پیریت، هوازدگی، اراک

مقدمه

مصالح سنگی یکی از مهم‌ترین موضوعات مورد بحث در پروژه‌های مهندسی می‌باشد که به‌طور گسترده‌ای، چه به‌صورت منابع قرضه و چه به‌صورت پی‌سنگ، از دیرباز مورد توجه بوده است. بردی و براون (۲۰۰۵) بیان نمودند که، هوازدگی به‌عنوان تغییرات فیزیکی و شیمیایی در سطح سنگ تعریف می‌گردد که می‌تواند ناشی از واکنش با گازهای جوی و یا محلول‌های آبی باشد. عمدتاً فرآیندهای فیزیکی و شیمیایی در سطح و عمق، با شدت‌های متفاوتی صورت می‌گیرند. این فرآیندها شامل انحلال، هیدراسیون، اکسیداسیون و تبادل یونی می‌باشد. اغلب فرآیندهای هوازدگی که به ساختارها و ساختمان‌ها اثر می‌گذارد، توسط حضور آب کنترل می‌گردد (مانند اکسیداسیون). از طرفی تغییرات دمایی موجب از دست دادن چسبندگی بین دانه‌ها می‌گردد. این پدیده‌ی هوازدگی به هوازدگی تابشی[1] معروف است، اگر منبع اصلی گرما خورشید باشد (بلند و رولز، ۱۹۹۸). هوازدگی مواد سولفیدی هم نتیجه‌ی هوازدگی فیزیکی است و هم شیمیایی. میزان این هوازدگی به نوع هوازدگی، نفوذپذیری سنگ و مقاومت سنگ در برابر سنگ‌های سربار و زیرین در صورت وجود آب زیرزمینی بستگی دارد (هاوکینگز، ۱۹۸۶). کانی‌های حاوی گوگرد بر اساس ترکیب شیمیایی به سه گروه: ۱) گروه اصلی (گوگرد اولیه)، ۲) سولفید و نمک‌های سولفیدی و ۳) سولفات‌ها تقسیم می‌شوند (بورکارت و همکاران، ۱۹۹۹).

سولفیدها (به‌عنوان مثال، پیریت) به‌عنوان گروه اصلی و سولفات‌ها به‌عنوان مواد ثانویه حاصل از اکسیداسیون پیریت در رسوبات یافت می‌گردد. پیریت می‌تواند در خاک‌های نرم، سنگ‌های رسوبی در محیط‌های بی‌هوازی، سنگ‌های دگرگونی و رگه‌ها یافت شود (برایانت، ۲۰۰۳). از نظر تجاری، تغییر رنگ مصالح سنگی یک فاکتور منفی محسوب می‌گردد. در این رابطه بورادیلی و همکاران (۱۹۹۱) پژوهشی بر روی تغییر رنگ ناشی از هوازدگی

[1] Insolation weathering

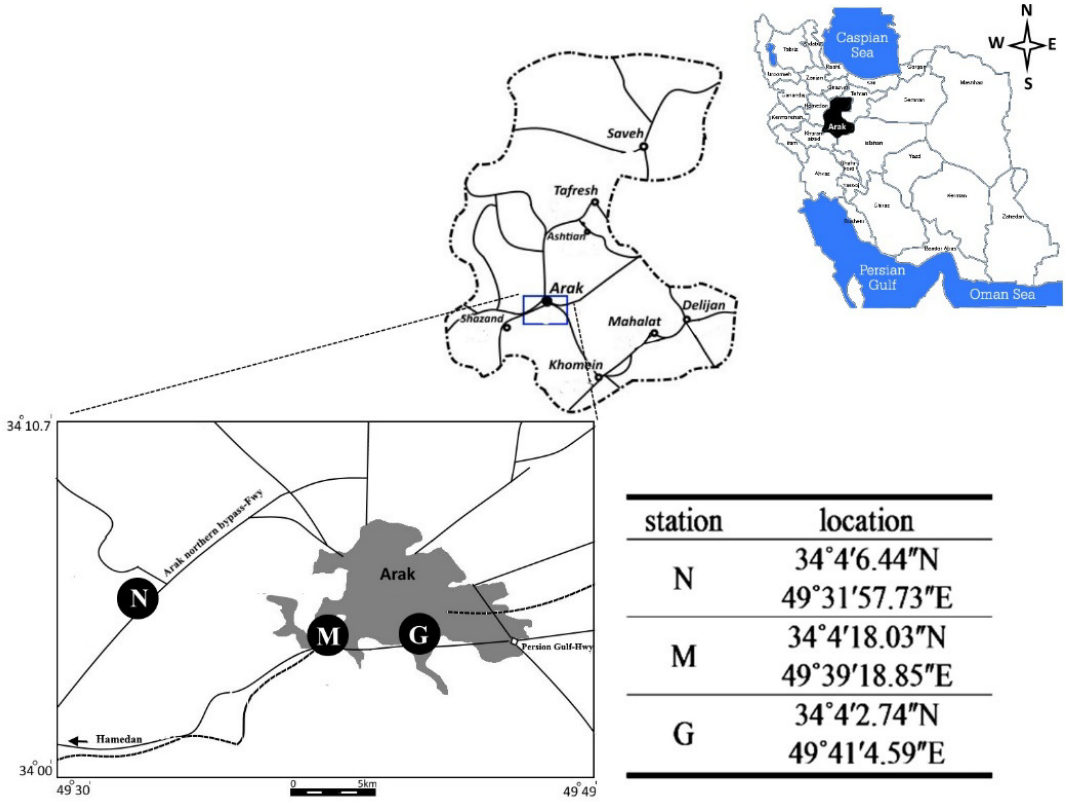
اسلیت‌ها منطقه‌ی ولز انجام دادند. آن‌ها دریافتند که تغییر رنگ موجود در این اسلیت‌ها ناشی از پدیده‌ی احیا[1] آهن می‌باشد. در پژوهشی دیگر، بهزادتبار و همکاران (۱۳۹۶)، تغییرات کانی‌شناسی اسلیت‌های آهکی اراک را طی هوازدگی مورد بررسی قرار دادند و زمینه سنگ (صرف‌نظر از بلورهای پیریت- مگنتیت) را از نظر درجه هوازدگی به ۷ رده (S_1-S_7) تقسیم کرده‌اند.

علاوه بر موارد فوق، هوازدگی سنگ می‌تواند موجب بروز خسارات مالی نیز گردد. در ژاپن حدود ۱۰۰۰ منزل مسکونی تحت تأثیر تورم ناشی از اکسیداسیون پیریت‌های موجود در پی قرار گرفته‌اند. حداکثر مقدار این تورم ۴۸ سانتی‌متر گزارش شده است (یاماناکا و همکاران، ۲۰۰۲).

در این پژوهش تلاش بر آن است که با اعمال چرخه‌های هوازدگی در شرایط آزمایشگاهی و طبیعی، تغییرات قابل‌مشاهده ناشی از هوازدگی مورد بررسی قرار گیرد. سپس به ارائه یک رده‌بندی برای معرفی درجه هوازدگی بلورهای پیریت- مگنتیت، بر اساس شکل و درجه هوازدگی، پرداخته و در نهایت به بررسی مشکلات احتمالی حاصل از هوازدگی پیریت نیز پرداخته می‌شود.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش ابتدا با بررسی مقاطع نازک به ارزیابی ویژگی‌های سنگ‌شناسی نمونه‌ها پرداخته شده است. سپس جهت بررسی دقیق تأثیر عوامل هوازدگی بر اسلیت‌های اراک، از آزمون‌های هوازدگی آزمایشگاهی در چرخه‌های مختلف استفاده گردید (جدول ۱). علاوه بر آن تعدادی نمونه در شرایط طبیعی، روی بامی در شهر همدان، به مدت یک سال قرار داده شد تا تغییرات هوازدگی در شرایط جوی (جدول ۲) نیز مورد بررسی قرار گیرد. تعداد نمونه‌های مورد بررسی در این پژوهش ۱۰۰۰ نمونه می‌باشد و بلوک‌های مورد استفاده جهت مغزه‌گیری از سه ایستگاه (شکل ۱) تهیه شده‌اند. در نهایت رده‌بندی جهت معرفی درجه هوازدگی بلورهای پیریت- مگنتیت، بر اساس رنگ و بافت بلورها، ارائه شده است.



station	location
N	34°4′6.44″N 49°31′57.73″E
M	34°4′18.03″N 49°39′18.85″E
G	34°4′2.74″N 49°41′4.59″E

شکل ۱. موقعیت ایستگاه‌های مورد مطالعه

[1] Reduction processes

جدول ۱. روند چرخه‌های هوازدگی

آزمون	فرایند هوازدگی	تعداد چرخه	خروج نمونه (چرخه)
تبلور نمک	۲ ساعت غوطه‌وری در محلول سدیم سولفات ۱۴ درصد/ خشک شدن در دمای ۱۰۵ درجه به مدت ۱۵ ساعت/ سرد شدن در دمای ۲۰ درجه به مدت ۷ ساعت	۳۰	۱۰
ذوب و انجماد	۱۲ ساعت انجماد در دمای ۲۰- درجه/ ۶ ساعت آب شدن در آب ۲۰ درجه	۶۰	۱۵
تر و خشک	۱۲ ساعت تر شدن در آب ۲۰ درجه/ ۱۲ ساعت خشک شدن در دمای ۱۱۰ درجه	۶۰	۱۵
سرد و گرم	۱۲ ساعت گرم شدن در دمای ۱۰۵ درجه/ ۱۲ ساعت خنک شدن در دمای ۲۰ درجه	۶۰	۱۵
طبیعی	شرایط جوی (انجماد و ذوب، سرد و گرم، تر و خشک)	۳۶۰(روز)	۹۰(روز)

جدول ۲. مشخصات چرخه‌های هوازدگی در شرایط طبیعی

شماره چرخه	بازه زمانی	مدت دوره (چرخه/روز)	ذوب و انجماد (چرخه/روز)	تر- خشک (چرخه/روز)	سرد و گرم (چرخه/روز)	متوسط دمای کمینه	متوسط دمای بیشینه
۱	۱۵ فروردین-۱۵ تیر	۹۰	۰	۱۷	۷۳	۹	۲۶/۷
۲	۱۵ فروردین - ۱۵ مهر	۱۸۰	۰	۱۸	۱۶۲	۱۰	۳۰
۳	۱۵ فروردین -۱۵ دی	۲۷۰	۵	۲۸	۲۳۴	۷	۲۵
۴	۱۵ فروردین (۱۳۹۷-۱۳۹۶)	۳۶۰	۲۲	۴۸	۲۹۰	۵	۲۳

زمین‌شناسی

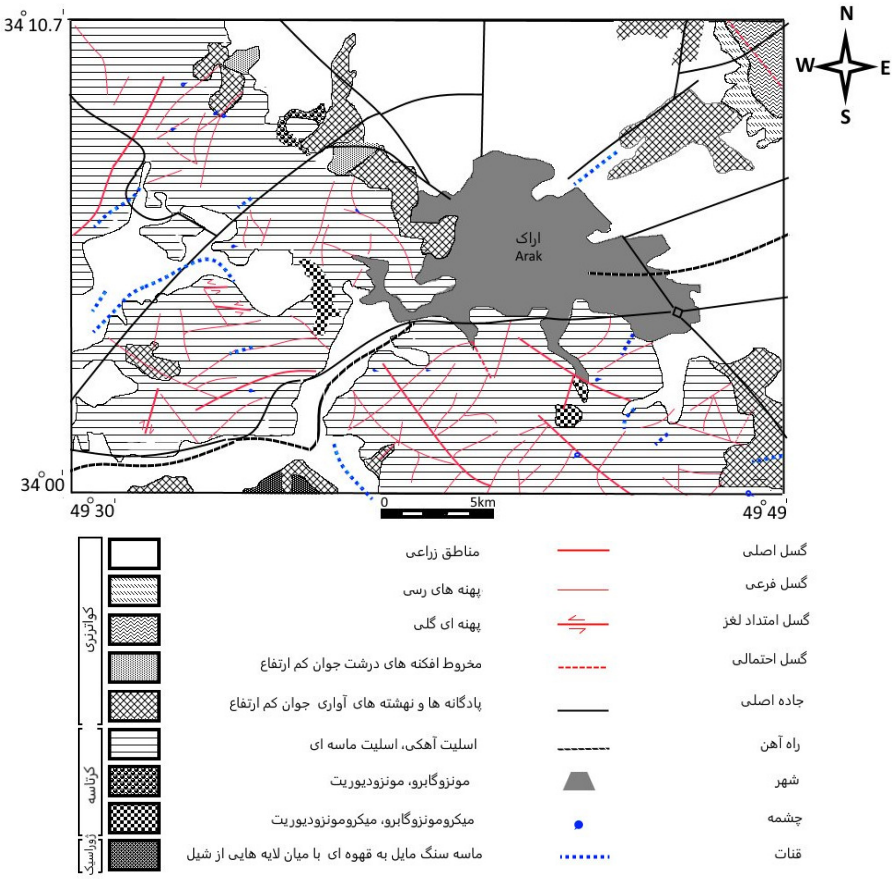
بر اساس تقسیم‌بندی ساختاری، منطقه اراک (شکل ۲) به‌طور عمده در دو پهنه‌ی ایران مرکزی و سنندج- سیرجان جای دارد. رخنمون‌های واحد اسلیت آهکی به‌صورت گستردگی در بخش‌های باختری و جنوبی منطقه دیده می‌شود. شیب ملایم و چین‌خوردگی آرام این واحد موجب توسعه وسیع آن در منطقه شده است و دارای سطوح شیستوزیته آشکاری می‌باشند. مطالعه میکروفسیل‌های ناحیه بیانگر سن کرتاسه پیشین (آپسین-آلبین) می‌باشد. گسله‌های فشاری با روند همگانی شمال باختری- جنوب خاوری بیش‌ترین اثر را بر حالت ریخت‌شناسی منطقه داشته‌اند. محور چین‌های منطقه با روند گسله‌های فشاری تقریباً هم‌خوانی دارد (راهنمای نقشه ۱/۱۰۰۰۰۰ اراک). نقشه زمین‌شناسی منطقه‌ی مورد مطالعه در شکل (۲) نشان داده شده است.

مطالعات سنگ‌شناسی

ترکیب سنگ‌شناسی نقش مهمی در نرخ و نوع هوازدگی بازی می‌کند. به‌نحوی‌که سنگ‌هایی با ترکیبات مختلف، در یک شرایط آب و هوایی مشابه، به مقدار چشم‌گیری دارای هوازدگی‌های مختلفی هستند (حیدری و همکاران، ۲۰۱۷). به‌بیان‌دیگر، اجزای تشکیل‌دهنده‌ی سنگ می‌تواند نوع و شدت هوازدگی فیزیکی یا شیمیایی را تعیین کند (مومنی و همکاران، ۲۰۱۵). بر اساس مطالعه مقاطع نازک، کانی‌های غالب در نمونه‌های بدون هوازدگی، کلریت، کوارتز، کلسیت- سرسیت، گرافیت و پیریت- مگنتیت می‌باشند (شکل ۳). در این راستا بورادیلی و همکاران (۱۹۹۱) یکرنگ قرمز با لکه‌های پراکنده‌ی سبز در اسلیت‌های ولز[1] مشاهده کرده‌اند که را به پدیده‌ی احیا آهن در کانی‌های اسلیتی نسبت داده‌اند. سنگ مادر اسلیت‌های مورد مطالعه به‌احتمال زیاد شیل مارنی بوده است که دگرگونی درجه پایین را متحمل شده و اسلیت نام‌گذاری می‌گردد. بافت آن لپیدوبلاستیک ریزدانه تشخیص داده شد که معمولاً رخ اسلیتی نامیده می‌شود. تورق موجود در این نمونه‌ها بسیار ظریف بوده و ناشی از جهت‌یابی کانی کلریت و سرسیت است (رخ اسلیتی). سایز دانه‌ها و کانی‌های باقی‌مانده به طبیعت آن‌ها وابسته است و احتمالاً مهم‌ترین فاکتور در تورق اسلیت‌هاست (کاردینز و

1 :Wales

همکاران، ۲۰۱۱) برای اسلیت‌های اراک، اندازه دانه‌ها بسیار ریز می‌باشد و با پیشرفت هوازدگی، رخ اسلیتی نیز محو می‌گردد (بهزادتبار و همکاران، ۱۳۹۶). در شکل (۳-ب و ۳-پ) می‌توان ریزبلورهای مکعبی را در زمینه اسلیت ریزدانه مشاهده نمود. معمولاً بلورهای میکروکریستالین پیریت در سایزهای ۴۰-۲ میکرون مشاهده می‌گردد (برایانت، ۲۰۰۳) که در مورد اسلیت‌های منطقه مورد مطالعه بلورهای میکروکریستالین پیریت- مگنتیت بسیار کمتر از بلورهای ماکروکریستالین می‌باشد. عمدتاً سایز بلورها ۰/۳ تا ۴ میلی‌متر می‌باشد.

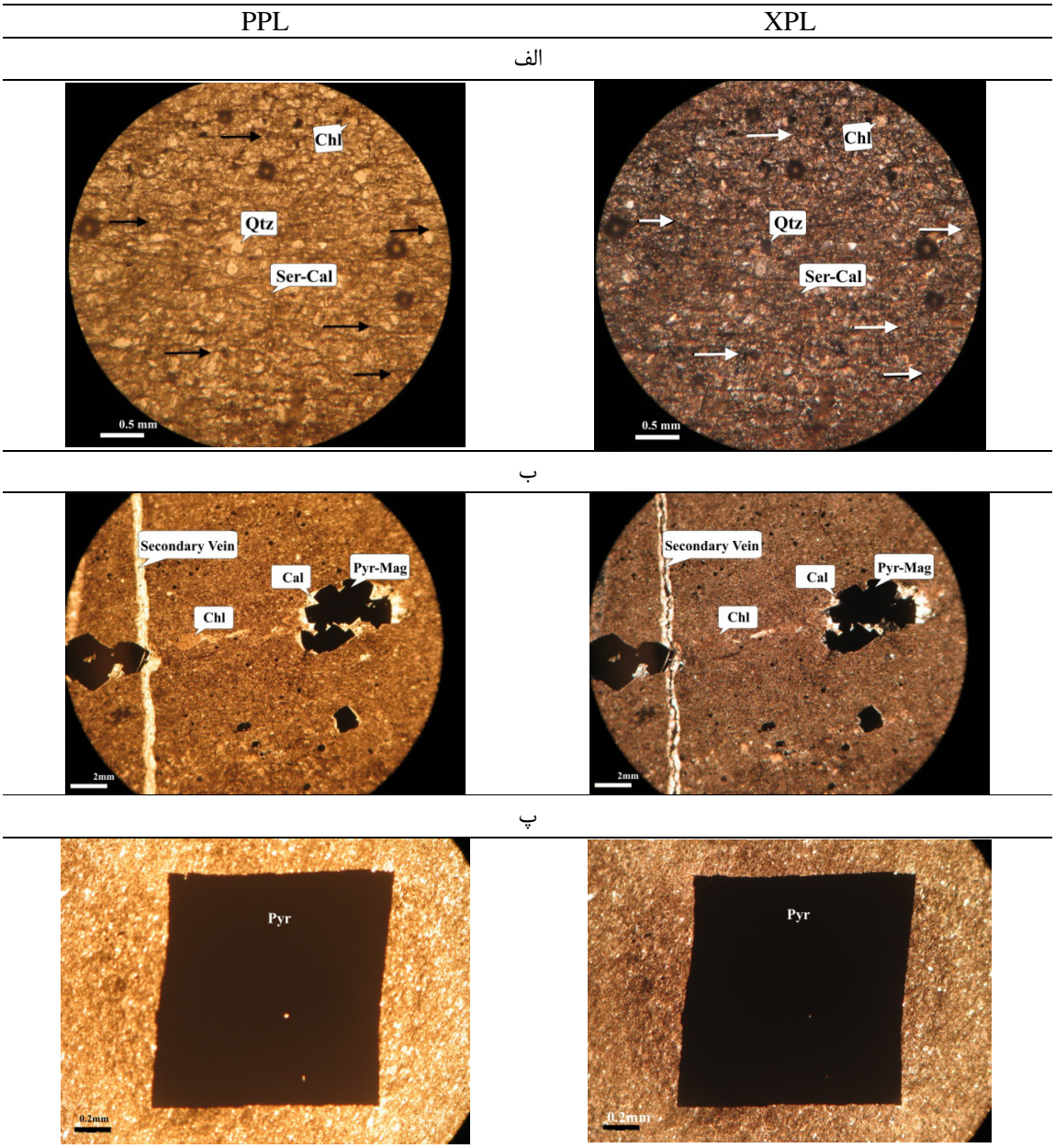


شکل ۲. نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه (برگرفته از نقشه ۱/۱۰۰۰۰۰ اراک)

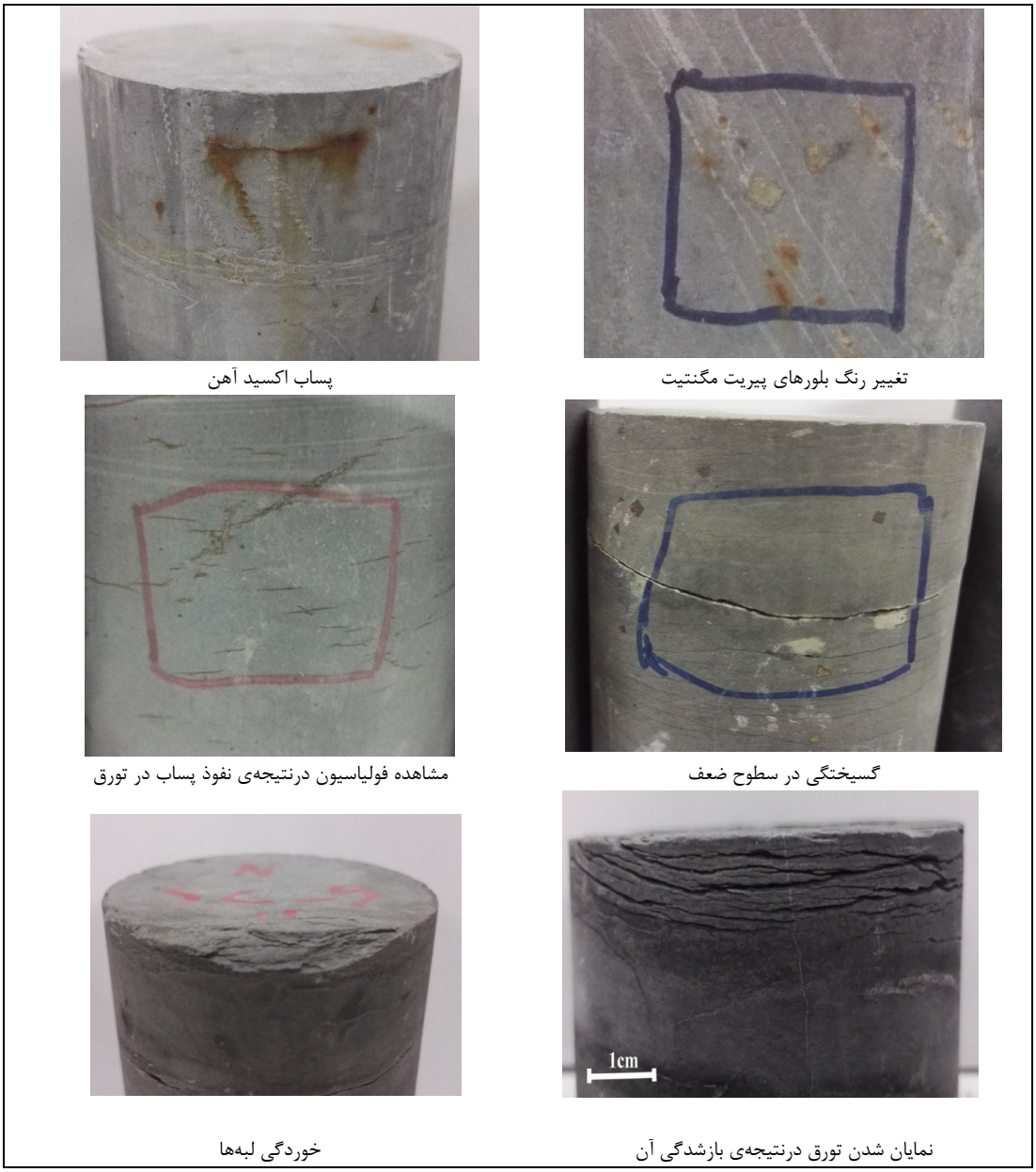
بررسی تغییرات ظاهری ناشی از هوازدگی اسلیت‌های مورد مطالعه در شرایط جوی و آزمایشگاهی

بررسی آثار قابل مشاهده هوازدگی زمانی اهمیت پیدا می‌کند که سنگ جهت مصالح ساختمانی مانند سنگ‌فرش‌ها یا دیوار پوش‌ها مورد استفاده قرار گیرند. کاردینز و همکاران (۲۰۱۴) اشاره نموده‌اند، اسلیت‌ها از لحاظ زیبایی به درخواست و سلیقه مشتری وابسته است و در این راستا باید حداقل درجه ناهمگنی در ظاهر سنگ، باوجود ناهمسانگردی آن، مشاهده گردد. تغییرات فیزیکی و شیمیایی ناشی از نوسانات دما، رطوبت و... هستند که تأثیر چشم‌گیری بر افت خصوصیات ژئوتکنیکی (ویژگی‌های فیزیکی و مقاومتی) و شکل ظاهری اسلیت‌ها دارند. در تمامی آزمون‌های مورد استفاده در این پژوهش، شش گروه تغییر ظاهری، صرف‌نظر از نوع آزمون هوازدگی، مشاهده گردید. این تغییرات همان‌طور که در شکل (۴) نیز قابل مشاهده است شامل تغییر رنگ بلورهای پیریت- مگنتیت، ایجاد پساب‌های ناشی از اکسیداسیون آهن، گسیختگی در سطوح ضعف، نمایان شدن تورق در اثر نفوذ پساب آهن، نمایان شدن تورق در اثر جداشدگی صفحات و خوردگی لبه‌ها می‌باشند. شدت این تغییرات بسته به اینکه تحت کدام آزمون هوازدگی قرار گیرند، متفاوت خواهد بود (در جدول، با تغییر شدت رنگ مشخص شده است). برای

مثال، شدت تغییرات در آزمون تبلور نمک، نسبت به آزمون‌های دیگر، بسیار بیش‌تر و با روند سریع‌تری اتفاق می‌افتد. به‌طور مثال در پایان چرخه ۲۰ آزمون تبلور نمک، نمونه‌ها حالت پوک شدگی (حالت سبکی نمونه و ایجاد صدای خاص) پیدا می‌کنند. این در حالی است که در آزمون ذوب و انجماد، این تغییر در چرخه ۶۰ مشاهده و در دیگر آزمون‌ها اصلاً مشاهده نگردیده است. میزان تغییرات ناشی از اعمال چرخه‌های هوازدگی، به تفکیک آزمون‌ها، در جدول ۳ آورده شده است. تغییر رنگ بلورهای پیریت - مگنتیت اولین و تنها پارامتر ظاهری است که از چرخه‌های ابتدایی، در تمامی شرایط هوازدگی تا انتهای آزمون دیده می‌شود. این در حالی است که بازشدگی تورق از حساسیت کمتری برخوردار بوده است. عمدتاً ساختمان‌های قدیمی که توسط سنگ‌های آهکی ساخته شده‌اند، تغییرات ناشی از هوازدگی را به‌خوبی نمایان می‌سازند (اوچا و همکاران، ۲۰۱۳).



شکل ۳. تصاویر مقاطع نازک نمونه‌ها، Qtz:کوارتز، Chl :کلریت، Cal: کلسیت، Ser: سرسیت، Pyr-Mag : پیریت-مگنتیت (در شکل الف پیکان‌ها جهت فولیاسیون را نشان می‌دهند)



شکل ۴. انواع تغییرات قابل مشاهده ناشی از هوازدگی (مشاهده شده در تمام انواع هوازدگی آزمایشگاهی و جوی)

هوازدگی پیریت‌ها

واکنش‌های فیزیکی

درک اولیه از فرآیندهای شیمیایی درگیر در تغییر پیریت به کاهش مشکلات ناشی از اکسیداسیون آن کمک خواهد کرد. هوازدگی فیزیکی اولین گام در گسترش تخریب در توده سنگ و بلورها می‌باشد. هوازدگی فیزیکی به دلیل افزایش سطح آزاد و افزایش تخلخل، میزان هوازدگی شیمیایی را کنترل می‌کند و بر ساختار دانه‌ها و توزیع اندازه ذرات پیریت تأثیر می‌گذارد. سیجسموند و اسنتلیج (۲۰۱۱) یکی از فرآیندهای مهم هوازدگی فیزیکی را تغییرات دوره‌ای یا فصلی اقلیمی بیان نموده‌اند. بررسی آن‌ها نشان داده است که نور خورشید، از طریق تکامل سیستم تخلخل و هیدروکسیل شدن[1]، تأثیر به سزایی بر گسترش سیستم حفرات دارد.

1 :dehydroxylation

جدول ۳. مقایسه تغییرات قابل مشاهده در نمونه‌ها در انتهای هر چرخه از آزمون‌های هوازدگی (تن رنگی میزان شدت آن پدیده را مشخص می‌کند)

تبلور نمک				
پدیده‌ی قابل روئیت	چرخه			
	۱۰	۲۰	۳۰	
تغییر رنگ بلورهای پیریت-مگنتیت				
پساب اکسید آهن				
مشاهده تورق درنتیجه‌ی نفوذ پساب در تورق				
نمایان شدن تورق درنتیجه‌ی بازشدگی آن				
خوردگی لبه‌ها				
گسیختگی در سطوح ضعف				
پوک شدگی نمونه (حالت سبک شدگی و صدای خاص آن)				

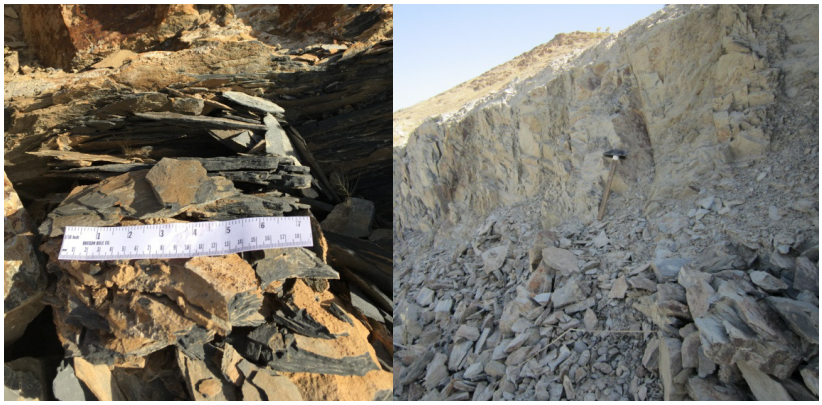
ذوب و انجماد				
پدیده‌ی قابل روئیت	چرخه			
	۱۵	۳۰	۴۵	۶۰
تغییر رنگ بلورهای پیریت-مگنتیت				
پساب اکسید آهن				
مشاهده تورق درنتیجه‌ی نفوذ پساب در تورق				
نمایان شدن تورق درنتیجه‌ی بازشدگی آن				
خوردگی لبه‌ها				
گسیختگی در سطوح ضعف				
پوک شدگی نمونه (حالت سبک شدگی و صدای خاص آن)				

تر و خشک شدن				
پدیده‌ی قابل روئیت	چرخه			
	۱۵	۳۰	۴۵	۶۰
تغییر رنگ بلورهای پیریت-مگنتیت				
پساب اکسید آهن				
مشاهده تورق درنتیجه‌ی نفوذ پساب در تورق				
نمایان شدن تورق درنتیجه‌ی بازشدگی آن				
خوردگی لبه‌ها				
گسیختگی در سطوح ضعف				
پوک شدگی نمونه (حالت سبک شدگی و صدای خاص آن)				

سرد و گرم شدن				
پدیده‌ی قابل روئیت	چرخه			
	۱۵	۳۰	۴۵	۶۰
تغییر رنگ بلورهای پیریت-مگنتیت				
پساب اکسید آهن				
مشاهده تورق درنتیجه‌ی نفوذ پساب در تورق				
نمایان شدن تورق درنتیجه‌ی بازشدگی آن				
خوردگی لبه‌ها				
گسیختگی در سطوح ضعف				
پوک شدگی نمونه (حالت سبک شدگی و صدای خاص آن)				

شرایط طبیعی				
پدیده‌ی قابل روئیت	ماه			
	۳	۶	۹	۱۲
تغییر رنگ بلورهای پیریت-مگنتیت				
پساب اکسید آهن				
مشاهده تورق درنتیجه‌ی نفوذ پساب در تورق				
نمایان شدن تورق درنتیجه‌ی بازشدگی آن				
خوردگی لبه‌ها				
گسیختگی در سطوح ضعف				
پوک شدگی نمونه (حالت سبک شدگی و صدای خاص آن)				

طبق گزارش اداره هواشناسی استان مرکزی، اقلیم شهر اراک بر پایه طبقه‌بندی دمارتن، نیمه‌خشک و بر پایه طبقه‌بندی آمبرژه، نیمه‌خشک و سرد می‌باشد. مدت روزهای یخبندان از ۶۵ تا ۱۲۰ روز در سال‌های مختلف متغیر است. میزان بارندگی در سال‌های مختلف میان ۲۳۰ تا ۶۳۸ میلی‌متر متغیر است که متوسط آن حدود ۳۴۱/۷ میلی‌متر برآورد شده است. بنابراین فرآیند سرد و گرم شدن یکی از مهم‌ترین عوامل هوازدگی فیزیکی در منطقه محسوب می‌گردد. این فرآیند موجب گردیده است که اسلیت‌های منطقه (بسته به موقعیت ناهمسانگردی و ناپیوستگی) ورقه ورقه و یا به شکل قطعات بی‌شکل و بلوک آزاد در محل هوازدگی دیده شوند (شکل ۵).



شکل ۵. برگوارگی و خردشدگی اسلیت‌های آهکی پیریت-مگنتیت‌دار در نتیجه‌ی هوازدگی درازمدت (مقیاس ۱۸ سانتی‌متر می‌باشد)

واکنش‌های شیمیایی

میزان تخریب پیریت به چند عامل: دما، رطوبت، اسیدیته پایین و حضور باکتری‌ها (برایانت، ۲۰۰۳) وابسته است محصولات اکسیداسیون پیریت، علاوه بر اسیدسولفوریک (H_2SO_4)، شامل کانی‌های سولفاته و اکسیدهای آهن مختلف مانند گوتیت (FeOOH) و هماتیت (Fe_2O_3) می‌باشد. همان‌طور که اسیدسولفوریک تولید شده ناشی از اکسیداسیون پیریت (واکنش ۱) توسط کانی‌های رسی و کربناته سنگ مصرف می‌گردد، دانسیته نیز به کاهش خود ادامه می‌دهد.

$$FeS_2 + 7/2\ O_2 + H_2O \rightarrow Fe^{+2} + 2SO_4^{-2} + 2H^+$$

واکنش (۱)

پیریت توسط فرآیند اکسیداسیون آهن دو ظرفیتی (Fe^{+2}) و سولفات ($SO4^{-2}$)، اسید (H+) تولید می‌کند. سپس در واکنشی که آهن دو ظرفیتی (Fe^{+2}) با اکسیژن و اسید دارد، تولید آهن سه‌ظرفیتی (Fe^{+3}) می‌کند (واکنش ۲). بنابراین آهن سه‌ظرفیتی (Fe^{+3}) می‌تواند به‌عنوان یک کاتالیزور عمل کند (واکنش ۳).

$$Fe^{+2} + ¼\ O_2 + H+ \rightarrow Fe^{+3} + ½\ H_2O$$

واکنش (۲)

$$FeS_2 + 14Fe^{+3} + 8H_2O \rightarrow 15Fe^{+2} + 2SO_4^{-2} + 16H^+$$

واکنش (۳)

یون سولفات تولید شده با کلسیم موجود در محیط واکنش داده و تولید ژیپس می‌کند (واکنش ۴). از طرفی وجود کلسیت در محیط نیز با اسیدسولفوریک، ژیپس تولید می‌کند (برایانت، ۲۰۰۳).

$$Ca^{+2} + SO_4^{-2} + 2H_2O \rightarrow CaSO_4 \cdot 2H_2O$$

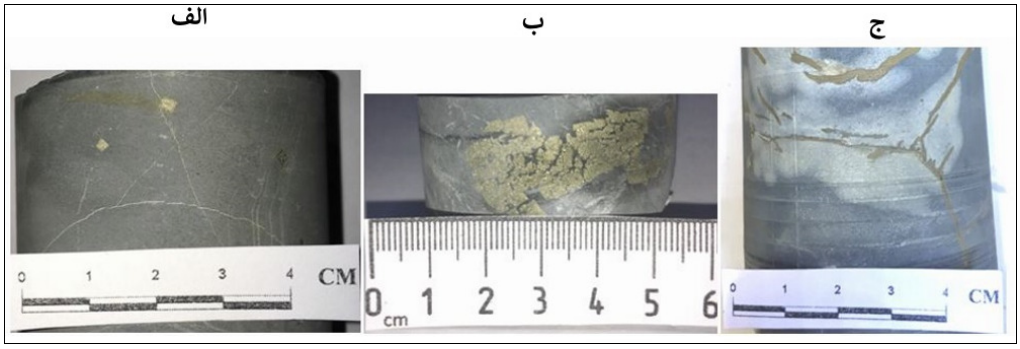
واکنش (۴)

هوازدگی در منطقه‌ی مورد مطالعه، هم در مقیاس ماکروسکوپی و هم میکروسکوپی، تغییرات چشم‌گیری ایجاد کرده است. تغییر رنگ و بافت مهم‌ترین شاهد بر واکنش‌های موجود است. پیریت – مگنتیت‌های موجود در منطقه، در مقیاس ماکروسکوپی، به سه شکل مشاهده شده است: دانه‌ای- مکعبی (I)، توده‌ای (II) و دندریتی (III) (شکل ۶). قابل‌ذکر است که فراوانی پیریت-مگنتیت تیپ I در تمامی نمونه‌ها غالب می‌باشد و تیپ II و III از فراوانی بسیار کمتری برخوردارند.

ایوانژلو و ژانگ (۱۹۹۵) پیریت‌ها را به‌صورت بلورهای سطحی بی‌شکل (اکتاهدرال[1])، مکعبی (پیریتوهدرال[2])، یا به‌صورت ذرات بی‌شکل در سیمان (پیریت فرامبوئیدال[3]) معرفی نموده‌اند. تمام این اشکال می‌توانند با چشم غیرمسلح دیده شوند.

[1] octahedral
[2] pyritohedral
[3] Framboidal pyrite

ارائه‌ی رده‌بندی هوازدگی در کارهای مهندسی، از دیدگاه‌های مختلف، جهت مشاهده تغییرات نمونه‌ها حین سیکل‌های هوازدگی آزمایشگاهی یا طبیعی می‌تواند مفید باشد. بنابراین اولین قدم در بررسی هوازدگی پیریت‌ها، ارائه‌ی یک رده‌بندی می‌باشد. در این رده‌بندی صرف‌نظر از شکل آن‌ها، از پارامتر رنگ بلورها (شکل ۶)، استفاده شده است. در این راستا بر اساس مطالعه صورت گرفته در این پژوهش، ۵ گروه هوازدگی (از بدون هوازدگی (P_1) تا کاملاً هوازده (P_5)، معرفی گردیده است (جدول ۴).



شکل ۶. اشکال مختلف پیریت- مگنتیت مشاهده شده در منطقه‌ی موردمطالعه (الف:دانه‌ای- مکعبی (I)، ب: توده‌ای (II)،دندریتی (III)

جدول ۴. رده‌بندی هوازدگی پیریت-مگنتیت

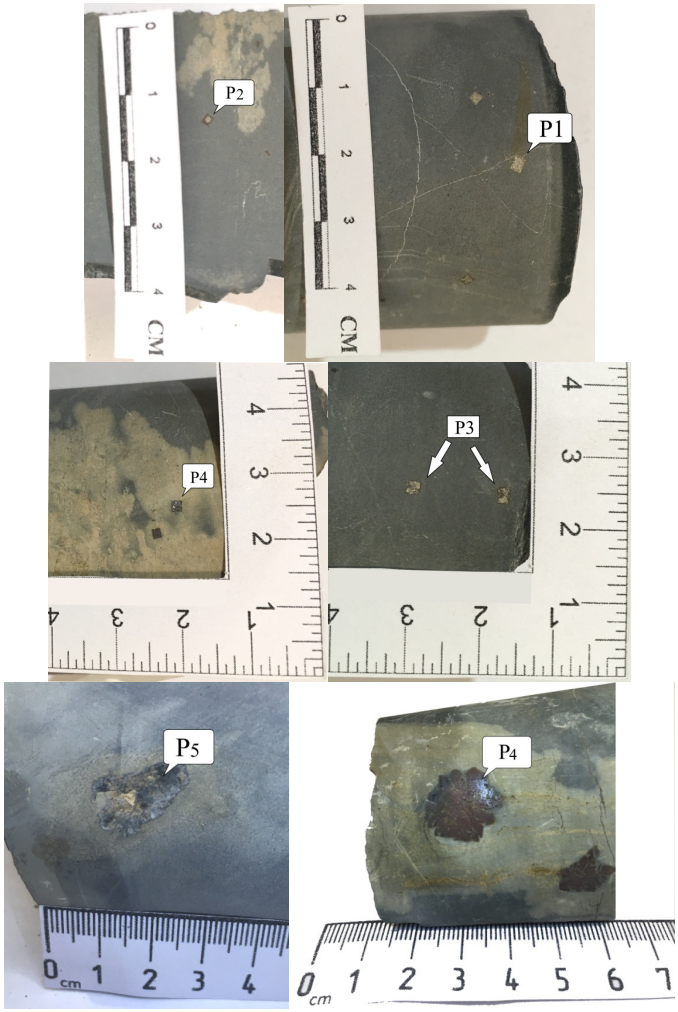
توصیف	ویژگی	رده هوازدگی
بدون هوازدگی	بلورهای براق بدون هیچ آثار هوازدگی	P_1
کمی هوازده	بلورهای براق با حاشیه قهوه‌ای سوخته	P_2
نیمه هوازده	بلورهایی که به‌صورت شبکه‌ای هوازده شده‌اند و قهوه‌ای سوخته شده‌اند	P_3
هوازده	بلورهای کاملاً هوازده و به رنگ قهوه‌ای سوخته	P_4
کاملاً هوازده	آثار بلور هوازده که به‌صورت یک قالب باقی‌مانده است	P_5

همان‌طور که مشاهده می‌شود، پیریت‌ها را می‌توان از لحاظ تغییرات رنگی در ۵ فرم مشاهده نمود. لازم به ذکر است که اکسیداسیون پیریت بر زمینه‌ی سنگ نیز اثر گذاشته است و رنگ آن را از خاکستری تیره به کرم روشن تغییر داده است (شکل ۷).

همان‌طور که کریپس و همکاران (۱۹۹۳) بیان نمودند، اکسیداسیون پیریت در درجه اول توسط سطح تماس کنترل می‌گردد. واکنش‌پذیری پیریت با کاهش اندازه دانه و افزایش سطح نسبی، افزایش می‌یابد، بنابراین انتظار می‌رود هوازدگی پیریت‌ها از خارجی‌ترین سطح شروع گردد. به‌علاوه هرچه خردشدگی پیریت بیش‌تر باشد، به دلیل افزایش سطح نسبی، سرعت هوازدگی نیز بیش‌تر خواهد شد. همان‌طور که در نمونه‌ها نیز مشاهده شد، اکسیداسیون از حاشیه‌ی بلورها، جایی که سطح نسبی بیش‌تری دارد، شروع می‌گردد و با پیشرفت هوازدگی، به علت تغییرات حجمی، بلور خرد می‌گردد و تنها قالب آن در سنگ باقی می‌ماند (شکل ۷، رده P_5).

همان‌طور که در شکل ۷ نیز مشاهده می‌گردد، در اطراف پیریت- مگنتیت‌های درشت که درجه هوازدگی بالایی دارند می‌توان به‌خوبی تغییر رنگ زمینه سنگ از تیره به روشن را تشخیص داد. این به این معناست که اسیدسولفوریک تولید شده در اثر اکسیداسیون پیریت، بر زمینه سنگ اثر گذاشته و کلسیت را به ژیپس تبدیل کرده است. علاوه بر آن گرافیت موجود در نمونه نیز از بین می‌رود.

با توجه به موارد ذکر شده در بالا می‌توان برای معرفی درجه هوازدگی پیریت- مگنتیت موجود در نمونه‌ها از دو علامت اختصاری استفاده نمود. بدین ترتیب که نام اول معرف تیپ بلور (نوع I،II یا III) و نام دوم معرف درجه‌ی هوازدگی (P_1 تا P_5) آن می‌باشد. برای مثال، علامت اختصاری II -P_3 معرف بلورهای توده‌ای پیریت- مگنتیت هستند که به‌صورت شبکه‌ای هوازده شده‌اند.



شکل ۷. نمونه‌هایی از پیریت- مگنتیت‌های هوازده موجود در متن و سطح اسلیت‌های آهکی اراک

در این راستا بر اساس پژوهشی که بهزادتبار و همکاران (۱۳۹۶) بر روی هوازدگی اسلیت‌های اراک (زمینه سنگ بدون در نظر گرفتن بلورهای پیریت- مگنتیت)، در مقیاس ماکروسکوپی و میکروسکوپی، انجام داده‌اند، ۷ رده هوازدگی ارائه شده است (شکل ۸). بر این اساس می‌توان با مشاهده‌ی نوع پیریت موجود در هر رده، این دو رده‌بندی را به هم ادغام نمود (جدول ۵).

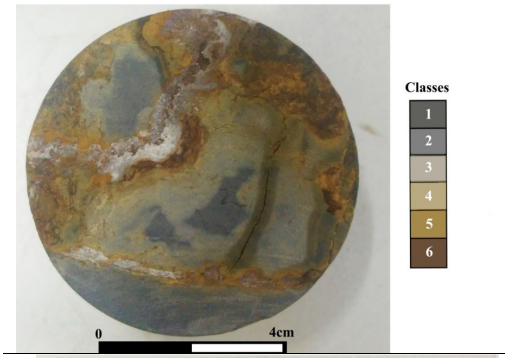
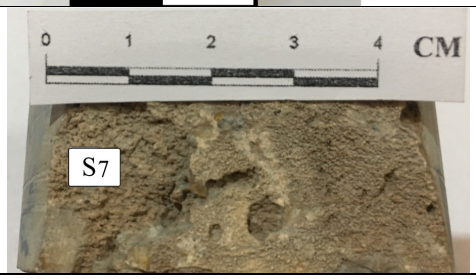
بنابراین می‌توان با استفاده از رده‌بندی ارائه شده در این پژوهش و رده‌بندی توصیه شده توسط بهزادتبار و همکاران (۱۳۹۶)، اسلیت‌های آهکی پیریت- مگنتیت‌دار مزوزوئیک را ازنظر درجه هوازدگی به‌صورت حروف اختصاری نام‌گذاری نمود. به‌طور مثال، اسلیت آهکی که زمینه‌ی آن کرمی رنگ شده است و دارای بلورهای مکعبی پیریت- مگنتیت کاملاً هوازده و به رنگ قهوه‌ای سوخته می‌باشد، به شکل S_3-I-P_4 معرفی می‌گردد.

مشکلات ژئوتکنیکی در خصوص هوازدگی پیریت‌ها

تغییرات مواد سولفوردار یکی از مسائل مهم در مطالعات زمین‌شناسی مهندسی محل پروژه‌های عمرانی محسوب می‌شوند. وجود مواد مذکور در خاک و سنگ مشکل‌آفرین می‌باشند. برایانت (۲۰۰۳) عنوان کرده است که پیامدهای ناشی از اکسیداسیون پیریت عبارت‌اند از: تورم، تخریب بتن، خوردگی فولاد، خطرات زیست‌محیطی، پساب‌های معدنی اسیدی و تأثیر بر مقاومت سنگ (جدول ۶). در این راستا عمده‌ترین مشکل زیست‌محیطی ناشی از اکسیداسیون پیریت، تأثیر بر کیفیت آب‌های سطحی و زیرزمینی است. از سوی دیگر، تأثیری که هوازدگی پیریت بر سنگ می‌گذارد بستگی به مقدار و نوع کانی‌های اولیه، مقدار نفوذپذیری سنگ و مقدار اسید حاصل از هوازدگی پیریت دارد. اسلیت‌های آهکی اراک دارای ریزبلورهای اندکی از پیریت می‌باشند و به دلیل

نفوذپذیری کم سنگ در طولانی مدت مشکل‌آفرین هستند و وجودشان روی کاهش کیفیت سنگ جهت منابع قرضه و ساختمانی تأثیر خواهد داشت. مواد پیریت‌دار به دلیل انحلال مواد با اسید در شیب‌های سنگی و خاکی توده‌های سنگی یا خاکی پیریت‌دار، می‌توانند ناپایداری ایجاد کنند. همان‌طور که شیل‌های منطقه‌ی تور در انگلستان این پدیده را نشان داده است (بورکارت و همکاران، ۱۹۹۹) آن‌ها دریافتند که این ناپایداری‌ها عمدتاً در داخل توده، به دلیل انحلال مواد با اسید و تشکیل ژیپس، گوتیت و ژاروسیت می‌باشد.

میزان نرخ تورم ناشی از برخی از کانی‌های مشکل‌ساز را در جدول (۷) می‌توان مشاهده نمود. در صورت حضور پیریت‌های توده‌ای اسلیت‌های اراک در پی، علیرغم خصوصیات ناهمسانگردی آن، هوازدگی می‌تواند تورم غیریکنواخت و کاهش ظرفیت باربری را به همراه داشته باشد. در صورت ادامه‌ی هوازدگی، پیریت متورم شده و اگر فضای کافی برای تورم نداشته یا فشار ناشی از تورم آن کمتر از مقاومت کششی سنگ باشد، پیریت خرد می‌گردد و یک فضای خالی در سنگ ایجاد می‌کند. این حفرات می‌توانند تخلخل ثانویه در توده ایجاد نمایند. میزان نرخ تورم کانی پیریت را در جدول ۷ می‌توان مشاهده نمود. این جدول بر مبنای بلور خالص کانی مورد نظر ارائه شده است.

توصیف رنگی زمینه اسلیت	رده هوازدگی زمینه اسلیت	شکل ظاهری
خاکستری تیره	S_1	
خاکستری روشن	S_2	
کرمی	S_3	
نارنجی روشن	S_4	
نارنجی تیره	S_5	
قهوه‌ای سوخته	S_6	
مرجانی شده (رسوب کربنات کلسیم)	S_7	

شکل ۸. هفت رده‌ی هوازدگی سنگ بر اساس مشاهدات ماکروسکوپی (بهزادتبار و همکاران، ۱۳۹۶)

جدول ۵. تطابق رده‌بندی زمینه اسلیت‌های آهکی با رده‌بندی هوازدگی بلورهای پیریت- مگنتیت

رده هوازدگی اسلیت‌های آهکی (بهزادتبار و همکاران، ۱۳۹۶)	پیریت- مگنتیت‌های موجود در این رده
S_1	P_1, P_2, P_3
S_2	P_3, P_4
S_3	P_4
S_4	P_4, P_5
S_5	P_4, P_5
S_6	P_4, P_5
S_7	-

جدول ۶. تأثیر اکسیداسیون پیریت بر پروژه‌های ژئوتکنیکی و سیستم‌ها (برایانت، ۲۰۰۳)

پروژه‌های ژئوتکنیکی/ سیستم	فرآیندهای فیزیکی شیمیایی				
	بالاآمدگی	فشار تورم	تخریب بتن	خوردگی فلزات	نشت اسید
فونداسیون کم‌عمق	دارد	دارد	دارد	ندارد	ندارد
کف‌پوش و سنگفرش	دارد	دارد	دارد	دارد	ندارد
زیراساس جاده	دارد	ندارد	ندارد	ندارد	دارد
سایر ساختارهایی با بارگذاری کم	دارد	درد	دارد	ندارد	ندارد
دیواره‌ها	دارد	دارد	دارد	دارد	ندارد
مجراهای بتنی	دارد	ندارد	دارد	ندارد	دارد
شمع‌های سیمانی / شفت‌های حفاری‌شده	دارد	ندارد	دارد	ندارد	ندارد
شفت‌های حفاری‌شده	دارد	ندارد	ندارد	دارد	دارد
مجراهای فولادی	دارد	ندارد	ندارد	دارد	دارد
ساختارهای فولاد دار (بولت‌ها، شمع‌ها ...)	دارد	ندارد	ندارد	دارد	دارد
روش‌های پایدارسازی شیب	دارد	ندارد	ندارد	دارد	دارد
شمع‌های سنگی	دارد	ندارد	ندارد	ندارد	دارد
تونل‌ها	دارد	دارد	ندارد	ندارد	دارد
حفاری‌های سنگی	ندارد	ندارد	ندارد	ندارد	دارد
ترانشه‌های سنگی	دارد	ندارد	ندارد	ندارد	دارد
خاکریز	دارد	ندارد	ندارد	ندارد	دارد

جدول ۷. میزان تورم ناشی از هوازدگی برخی از کانی‌های مشکل‌آفرین (برایانت، ۲۰۰۳)

تبدیل کانی‌ها		مقدار افزایش حجم بلور (٪)
کانی اولیه	کانی جدید سولفاته	
ایلیت	آلونیت	۸
ایلیت	ژاروسیت	۱۰
کلسیت	ژیپس	۱۰۳
پیریت	ژاروسیت	۱۱۵
پیریت	سولفات آهن بدون آب	۳۵۰
پیریت	ملانتریت	۵۳۶

در جدول ۷ میزان تورم ناشی از هوازدگی برخی از کانی‌های مشکل‌آفرین نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌گردد، بسته به اینکه کانی ثانویه حاصل از پیریت چه کانی باشد (Jarosite, Anhydrous ferrous sulfate, Melanterite) میزان تورم نیز از ۱۱۵ درصد تا ۵۳۶ درصد متفاوت خواهد بود.

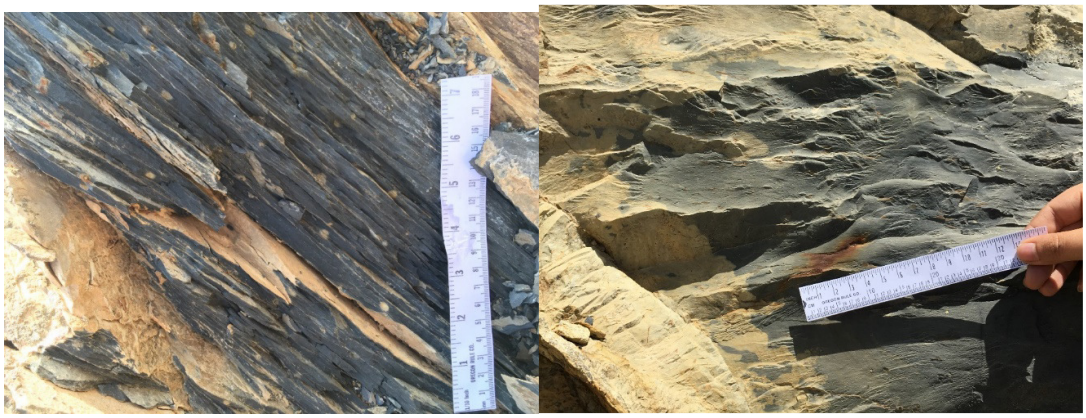
شایان‌ذکر است که اسلیت‌های اراک، آهکی می‌باشند، بنابراین تورم ناشی از تبدیل کلسیت به ژیپس را نیز باید در نظر گرفت (۱۰۳ درصد)؛ بنابراین انتظار می‌رود در اثر هوازدگی اسلیت‌های منطقه، پوسته‌پوسته شدن صفحات در نتیجه اعمال فشار داخلی، تغییر رنگ از تیره به روشن، ایجاد لکه‌های زنگ‌زدگی در سطح سنگ و خردشدگی قابل مشاهده باشد (شکل ۹). تغییر رنگ اسلیت‌ها در مقیاس میکروسکوپی نیز به‌خوبی قابل‌تشخیص می‌باشد. با افزایش درجه هوازدگی کانی‌ها ریزتر، گرافیت کمتر و تورق محوتر می‌گردد (شکل ۱۰). این موضوع در زمان استفاده از سنگ‌های مذکور در نمای ساختمان اهمیت بیش‌تری پیدا خواهد کرد.

اسپیرز و تیلور (۱۹۷۲) بیان نمودند که از جمله تغییراتی که بر روی کانی‌های رسی نسبت به عمق صورت می‌گیرد این است که در هرچه به سطح زمین نزدیک‌تر باشند، مقدار بیش‌تری پتاسیم از دست می‌دهند و این موضوع تا عمق ۴ فوتی (۱۲۲ سانتی‌متر) ادامه دارد و پس از آن عمدتاً هوازدگی سنگ (سنگ‌های رسی) شامل تغییر در ساختار آن می‌باشد. این در حالی است که عمق هوازدگی پیریت را تا ۶ تا ۱۰ فوت (۱۸۳ الی ۳۰۵ سانتی‌متری) از

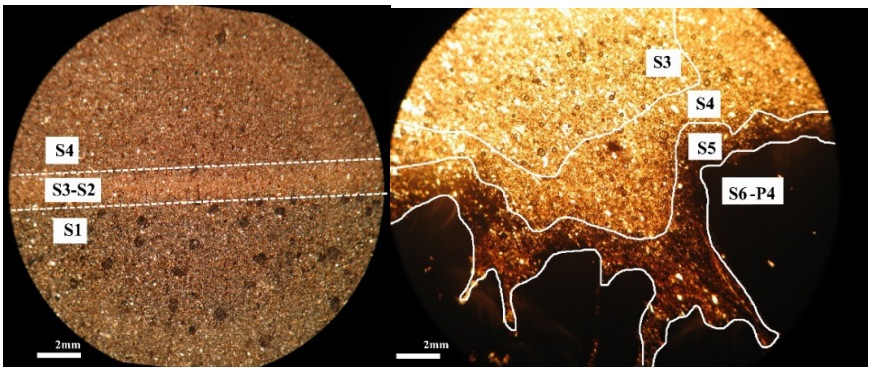
سطح تخمین زده‌اند. اگرچه پیریت درصد کوچکی از سنگ‌های رسی را به خود اختصاص داده‌اند اما تأثیرات آن‌ها می‌تواند چشم‌گیر باشد. این عمق درباره اسلیت‌های اراک نیز مصداق دارد.

بیش‌ترین زون اکسیداسیون پیریت‌ها به زون موبینگی محدود می‌گردد، زیرا در این بخش استرس کمتر و فضا برای تورم بلور وجود دارد (برایانت، ۲۰۰۳). این همان عاملی است که نشان می‌دهد چرا تورم عمودی پیریت در صفحات ناپیوستگی بیش‌تر است. وجود ناهمسانگردی در اسلیت‌های پیریت‌دار اراک می‌توان عامل انتقال و تشدید فرآیند هوازدگی پیریت- مگنتیت و زمینه سنگ باشد.

مشکل تورم قائم ناشی از اکسیداسیون پیریت در رابطه با شیل‌هایی که دارای لایه‌بندی افقی هستند مشکل‌آفرین می‌باشد (هاوکینگز و پیچز، ۱۹۹۷). همان‌طور که سیجسموند و استنلیج (۲۰۱۱) نیز بیان نمودند، در شرایطی با پتانسیل هوازدگی بالا، مانند مناطق ساحلی (محیط‌های نمکی) و شهری (محیط اسیدی)، کربنات‌ها و اکسیدها به‌راحتی هوازده می‌گردند. شهر اراک یکی از شهرهای صنعتی می‌باشد که بارش باران اسیدی در آن متداول است. روشن است ایجاد یک محیط اسیدی، علاوه بر اسیدسولفوریک تولید شده توسط هوازدگی پیریت‌ها، به تشدید فرآیند اکسیداسیون و ژیپسی شدن در منطقه کمک می‌کند. ایوانژلو و ژانگ (۱۹۹۵) بیان کرده‌اند که بیش‌ترین مشکل در رابطه هوازدگی در خصوص پیریت فرامبوئیدال (ریزبلورهای سیمان) می‌باشد که با افزایش تخلخل سطح تماس با آب‌وهوا را افزایش می‌دهد. همان‌طور که در مقاطع اسلیت‌های اراک نیز مشاهده شد، پیریت‌های ریزبلور در زمینه‌ی سنگ نیز حضور دارند. این موضوع فرآیند هوازدگی شیمیایی را در سنگ‌های مشکل‌آفرین یعنی اسلیت‌های اراک تشدید می‌کند. نقش این فرآیند در واردکردن صدمه به پی‌های کم‌عمق مشهود است.



شکل ۹. آثار هوازدگی پیریت- مگنتیت و تغییر رنگ توده سنگ در نتیجه‌ی تولید ژیپس و خروج گرافیت (ایستگاه M)



شکل ۱۰. تصویر میکروسکوپی تغییر رنگ و درجه هوازدگی اسلیت‌ها (بهزادتبار و همکاران، ۱۳۹۶)

نتیجه‌گیری

علاوه بر طبیعت سنگ، شرایط آب و هوایی نیز نقش به سزایی در فرآیند هوازدگی ایفا می‌کند. اگرچه شرایط مرطوب، به جهت حضور همیشگی آب، محیط هوازدگی شیمیایی وسیع‌تری را ایجاد می‌کند اما در مناطق خشک نیز تابش‌های مکرر آفتاب و چرخه‌های سرد و گرم شدن عوامل اصلی در هوازدگی فیزیکی می‌باشند. بنابراین چنین می‌توان گفت که هوازدگی فیزیکی شرایط را برای اثر هوازدگی شیمیایی در منطقه مهیا کرده است. بارزترین تغییرات قابل روئیت ناشی از هوازدگی (آزمایشگاهی و طبیعی) این تیپ سنگ شامل: تغییر رنگ بلورهای پیریت- مگنتیت، روان شدن پساب اکسید آهن، نمایان شدن تورق در اثر ته‌نشست اکسید آهن، ورقه ورقه شدن، خردگی نمونه‌ها، گسیختگی در سطوح ضعف و نهایتاً پوک‌شدگی نمونه‌ها می‌باشد. شدت این تغییرات بستگی به شرایط هوازدگی دارد. با توجه به شواهد می‌توان چنین اذعان داشت که بلورهای پیریت– مگنتیت به تغییرات دمایی نسبت به تورق اسلیت‌ها حساس‌تر باشند و نقش حضور آب در فرآیند هوازدگی در هر دو مورد بسیار چشم‌گیر می‌باشد. در این راستا بیش‌ترین تغییرات در آزمون تبلور نمک و کمترین تغییرات در هوازدگی طبیعی (به مدت یک سال) مشاهده شده است. عامل چنین تمایزی را در شرایط اغراق و تسریع شده آزمایشگاهی می‌توان یافت.

با توجه به شکل ظاهری پیریت‌ها، می‌توان آن‌ها را دریکی از سه گروه دانه‌ای- مکعبی (I)، توده‌ای ((II و دندریتی (III) جای داد. بیش‌ترین فراوانی شکل پیریت در اسلیت‌های مزوزوئیک اراک، شکل مکعبی می‌باشد. از بین عوامل هوازدگی شیمیایی سنگ که عبارت‌اند، عامل اکسیداسیون فرآیند شاخص هوازدگی شیمیایی پیریت‌های موجود در اسلیت‌های آهکی منطقه می‌باشند. این تغییرات، در مقیاس ماکروسکوپی، به شکل تغییر رنگ، از بژ به سمت قهوه‌ای تیره، قابل‌تشخیص می‌باشد. لازم به ذکر است که هرچه بلورهای پیریت حجم بیش‌تری داشته باشند، تأثیر ناشی از هوازدگی آن‌ها، به دلیل تولید اسیدسولفوریک بیش‌تر و گسترده‌تر خواهد بود. بر اساس رده‌بندی ارائه‌شده در این پژوهش، بهتر است جهت توصیف هوازدگی پیریت‌ها در یک توده از علائم اختصاری استفاده گردد تا توصیف دقیق‌تری از شواهد هوازدگی موجود باشد، به‌عنوان‌مثال اگر نمونه دارای پیریت‌های مکعبی بدون هوازدگی باشد از علامت $I\text{-}P_1$ استفاده گردد. با ادغام نام‌گذاری یاد شده و رده‌بندی ارائه شده توسط بهزادتبار و همکاران (۱۳۹۶)، می‌توان یک نام‌گذاری کامل جهت معرفی درجه هوازدگی اسلیت‌های آهکی مزوزوئیک ارائه نمود. به‌طور مثال، $S_1\text{-}\ II\text{-}P_2$ که نشان‌دهنده‌ی اسلیتی با زمینه‌ی بدون هوازدگی و دارای بلورهای پیریت توده‌ای با هوازدگی حاشیه‌ای می‌باشد.

لازم به ذکر است که اسلیت‌های اراک دارای بلورهای کوچک و پراکنده‌ای از پیریت- مگنتیت می‌باشند (گاهی دارای بلورهای توده‌ای یا دندریتی) که در مقیاس بزرگ و مقیاس کوچک (مانند استفاده جهت منابع قرضه) از لحاظ تجاری و زیبایی‌شناختی مشکل‌آفرین می‌گردند. این بلورها بعد از هوازدگی، پساب‌های زنگ آهنی از خود آزاد می‌نمایند که ظاهر سنگ را تحت تأثیر قرار می‌دهد. تورم، تخریب بتن، خوردگی فولاد، خطرات زیست‌محیطی، پساب‌های معدنی اسیدی و تغییر مقاومت سنگ از جمله پیامدهای اکسیداسیون پیریت‌ها می‌باشد. علاوه بر موارد فوق با پیشرفت هوازدگی، به دلیل تورم پیریت‌ها و خورد شدن آن‌ها، گاهی حفرات خالی از خود برجای می‌گذارد که می‌تواند تخلخل ثانویه در توده سنگ ایجاد کرده و مشکل‌آفرین باشند، برای مثال نفوذپذیری توده سنگ را افزایش دهد.

منابع

اصغری‌کلجاهی، ا.، شکری‌زیناب، س.، جهانگیری، ا (۱۳۹۶) بررسی تاثیر ویژگی‌های سنگ‌شناسی در مقاومت و دوام سنگ‌های آتشفشانی مورد استفاده در پوشش محافظ میانگذر دریاچه ارومیه. مجله یافته‌های نوین زمین‌شناسی کاربردی. پاییز و زمستان ۱۳۹۶. دوره ۱۱. شماره ۲۲. ۱۹-۳۱.

بهزادتبار، پ.، قبادی، م. ح.، سپاهی‌گرو، ع. ا (۱۳۹۶) بررسی تغییرات کانی‌شناسی ناشی از هوازدگی اسلیت‌های آهکی اراک و رده‌بندی آن. چهارمین همایش ملی گوهرشناسی و بلورشناسی انجمن بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران، دانشگاه بوعلی‌سینا همدان.

قبادی، م. ح.، امیری، م.، آلیانی، ف (۱۳۹۸) مطالعه رابطه هوازدگی، کانی‌شناسی و بافت سنگ‌های پریدوتیتی با خصوصیات زمین‌شناسی مهندسی (مطالعه موردی:

پریدوتیت‌های هرسین کرمانشاه). مجله یافته‌های نوین زمین‌شناسی کاربردی. (زیر چاپ)

Bland, W., Rolls, D (1998) Weathering. Arnold, London, 281p.

Borradaile, G. J., MacKenzie, A., Jensen, E (1991) A study of colour changes in purple-greenslate by petrological and rock-magnetic methods. Tectonophysics, 200: 157–172.

Brady, B. H. G., Brown, E. T (2005) Rock Mechanics for underground mining. Springer Science and Business Media, 645p.

Bryant, L. D (2003) Geotechnical Problems with Pyritic Rock and Soil. thesis in Master of Science, Virginia Polytechnic Institute and State University, 242p.

Cárdenes, V., Mateos, F., Rubio Ordoñez, A., Monterroso, C (2012) Standard tests for the characterization of roofing slate pathologies. Materiales de Construcción, 62: 251–268.

Cárdenes V., Rubio-Ordóñez, Á., Wichert, J., Pierre Cnudde, J., Cnudde, V (2014) Petrography of roofing slates. Earth-Science Reviews, 138: 435–453.

Cripps, J. C., Hawkins, A. B., and et al. (1993) Engineering Problems with Pyritic Mudrocks. Geoscientist, 3: 16-19.

Evangelou, V. P., and Zhang, Y. L (1995) A Review - Pyrite Oxidation Mechanisms and Acid-MineDrainage Prevention. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 25(2): 141- 199.

Hawkins, A. B (1986a) Rock Descriptions. Site Investigation Practice. Geological Society, London, Engineering Geology Special Publications, 423p.

Hawkins, A. B., Pinches, G. M (1987b) Sulphate Analysis on Black Mudstones. Geotechnique, 37: 191-196.

Heidari, M., Torabi-Kaveh, M., Chastre, C., Ludovico-Marques, M., Mohseni, H., Akefi, H (2017) Determination of weathering degree of the Persepolis stone under laboratory and natural conditions using fuzzy inference system. Construction and Building Materials, 145: 28–41.

Momeni, A. A., Khanlari, G. R., Heidari, M., Sepahi, A. A., Bazvand E (2015) New engineering geological weathering classifications for granitoid rocks. Engineering Geology, 185: 43–51

Ouacha H., Ben Moussa A., Simao, J (2013) The salt crystallization weathering of building rocks of the archaeological sites calcarenites of north-western Morocco (lixus, Banasa and Thausida). European Scientific Journal June edition, 9: 1857- 7431

Siegesmund, S., Snethlage, R, (2011) Stone in Architecture(4th ed.). DOI 10.1007/978-3-642-14475-2_3, C _ Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

Spears, D. A., Taylor, R. K (1972) the influence of weathering on the composition and engineering properties of in situ coal measures rocks. Int. J. Rock mech. min. Sci, 9: 729-756.

Yamanaka, T., Shoji, K., et al. (2002) Involvement of sulfur- and iron-transforming bacteria in heaving of house foundations. Geomicrobiology Journal, 19: 519-528.

Study of the weathering phenomenon in Mesozoic's pyritic Calcareous Slate and a review of the problems caused by pyrite weathering (case study, Arak)

P. Behzadtabar[1*] and M. H. Ghobadi[2]

1, 2- Dept., of Geology, Bu-Ali Sina University, Hamedan

* p.behzadtabar@yahoo.com

Recieved: 2018/7/24 Accepted: 2019/1/21

Abstract

The study of weathering is important in terms of predicting rock behavior against weathering factors and its suitability for borrow material. The first step to surveying weathering is, to provide a appropriate method for classification. In this study, the changes caused by weathering calcareous slate in laboratory condition(salt crystallization, freezing-melting, wetting-drying, cooling-heating), and also atmospheric conditions (for one year) were analyzed (about 1000 samples). These traces are mostly exfoliate,decoloration of pyrite-magnetite, the effects of iron rust, and edges corrosion. The intensity of these changes in the weathering test has resulted in more tolerance than other tests. In addition to the effect on the engineering behavior of stones, pyrite oxidation also has an adverse effect on the appearance of stone materials. Hence, pyrite-magnetite in calcareous slate, particularly in terms of shape and appearance changes caused by weathering were evaluated and classified. These crystals are categorized mainly into three gravel-cubic, mass and dendritic types, and classified according to the weathering grade to P1 to P5 (without weathering to fully weathered). Finally, we have reviewed geotechnical problems caused by weathering of pyrites.

Keywords: Calcareous Slate, Pyrite, Weathering, Arak