

محمدخانه باد (نویسنده اصلی)

دکتر رضا موسوی حرمی

دکتر اسدالله محبوبی

عوامل کنترل کننده هوازده‌گی حفره ای (تافونی) در گرانیتهای جنوب مشهد و سازند شمشک واقع در بخش شمالی بینالود

چکیده

مهمترین سیمای هوازده‌گی در توده‌های گرانیتهای، هوازده‌گی حفره ای است که به آن تافونی می‌گویند. تافونی‌ها حفرات عمیق و توخالی‌اند که توسط سازوکارهای متفاوت هوازده‌گی به وجود می‌آیند. در این نوشتار، چگونگی پیدایش تافونی‌ها و عوامل کنترل کننده آنها در گرانیتهای جنوب مشهد و ماسه سنگ‌های سازند شمشک در یک آب و هوای نیمه خشک بررسی شده است. براساس مطالعات پتروگرافی، این سنگ‌ها متشکل از کوارتز، فلدسپات پتاسیم، پلاژیوکلاز و میکا هستند. در ناحیه‌ی مورد مطالعه، تافونی‌ها بیشتر به وسیله فرایندهای فیزیکی و شیمیایی تشکیل شده‌اند. در این سنگ‌ها، تافونی‌ها به وسیله عوامل کانی شناسی و ساختاری سنگ، تغییرات آب و هوای محلی اطراف تافونی‌ها و میکروکلیمای درون خود حفرات کنترل می‌شوند. به دلیل فابریک (بافت) دانه ای در گرانیتهای، یکی از مهمترین فرایندهای ایجاد کننده هوازده‌گی حفره ای، فروپاشی دانه ای کانی‌های ناپایدار مانند فلدسپات‌ها و میکاهاست. آنالیز خاک‌های تولید شده در زیر گل سنگ‌های روی صخره‌های گرانیتهای توسط XRD وجود کوارتز، اورتوکلاز، آلپیت، کلسیت و کانی‌های رسی (به ترتیب فراوانی شامل کائولینیت، ایلیت و مونتموریونیت) را به اثبات رسانده است. سیستم‌های درزه، رگه‌های پگماتیتهای، تورق سطحی، سست شدن و سخت شدن رویه‌ی رخنمون‌های سنگی از عوامل مهم کنترل کننده شروع تشکیل تافونی‌ها و رشد آنها محسوب می‌شود. بنابراین پیشنهاد می‌شود که لیتولوژی و ساخت سنگ و نیز تغییرات محیطی از عوامل مهم کنترل کننده هوازده‌گی حفره ای

تاریخ دریافت: ۸۷/۸/۱۱ تاریخ تصویب: ۸۷/۱۰/۸

در این سنگ‌ها باشد. در سازند شمشک نیز انحلال سیمان آهکی و هوازگی نمکی نقش بسیار مهمی در تشکیل تافونی‌ها ایفا می‌نماید.

کلید واژه‌ها: تافونی، هوازگی حفره‌ای، مشهد، فروپاشی دانه‌ای، گرانیت، هوازگی نمکی

درآمد:

برای اولین بار ایتالیایی‌ها حفرات بزرگ^۱ در سنگ‌های هوازده شده را، تافونی^۲ نامیدند که مفرد آن تافون^۳ است. تافونی‌ها حفرات عمیق و یا توخالی هستند که در اثر هوازگی حفره‌ای^۴ در رخنمون‌های سنگی و قطعات بزرگ سنگ ایجاد می‌شوند. تافونی‌ها اغلب به صورت گروهی تشکیل می‌شوند و قطر و عمق هر یک از حفرات از چندین سانتی‌متر تا چندین متر در تغییر است (Viles, 2001). تافونی‌ها با اشکال فرسایشی محلی^۵ شکل^۵ در بیشتر نواحی از جمله استوایی تا جنب استوایی، مرطوب ساحلی، خشک و نیمه خشک و حتی در مریخ مشاهده شده است (Cooke et al., 1993). علی‌رغم پراکندگی وسیع تافونی‌ها، پیدایش آنها عمدتاً وابسته به نوع سنگ و آب و هوای می‌باشد. محققین زیادی معتقدند که تافونی‌ها اغلب در سنگ‌های سیلیکاته دانه متوسط تا درشت با فابریک دانه‌ای^۶ و به ویژه در گرانیت‌ها، گرانودیوریت‌ها، گنایس‌ها و ماسه سنگ‌ها تشکیل شده‌اند (Matsukura & Tanaka, 2000, Mellor et al. 1997, Conca and Rossman, 1985, Smith, 1978). علاوه بر این تافونی‌ها در توف‌های ولکانیکی با تخلخل بالا نیز گزارش شده است (McBride and Picard, 2000). در مورد چگونگی تشکیل تافونی‌ها مطالعات زیادی صورت نگرفته است. این پدیده در مصر، استرالیا، شیلی و نواحی کویری گزارش شده که عموماً توصیفی بوده و کمتر به سازوکار تشکیل آنها اشاره کرده‌اند (Mustoe, 1982, 1983).

-
1. large pits.
 2. tafoni.
 3. tafone.
 4. cavernous weathering.
 5. concave erosional features.
 6. granular fabric.

قبلاً ژئومورفولوژیست‌ها تشکیل تافونی‌ها را به فرسایش بادی^۱ نسبت می‌دادند که بر اثر ضربات برخورد ماسه‌ها^۲ ایجاد می‌شوند. در نواحی سرد قطبی این حفرات در اثر برخورد یخ^۳ تشکیل شده‌اند. بلاک ولدر^۴ (1929) هوازدگی‌های حفره‌ای را نتیجه‌ی واکنش‌های آب‌گیری^۵ می‌داند که منجر به فروپاشی کانی‌هایی نظیر فلدسپات می‌شود. وی معتقد است که هوازدگی حفره‌ای در اثر نفوذ رطوبت به داخل رخنمون‌های سنگی حاصل می‌شود. هوازدگی بدین شکل در فرورفتگی‌های خفیف و در طول شکاف‌های ریز و در زون‌های متخلخل متمرکز می‌شود. رطوبت سطحی، تورق سطحی را ایجاد می‌نماید و در نتیجه ذرات رها شده، مجدداً به وسیله‌ی باد، باران و غیره منتقل می‌شوند. برخی پژوهشگران نیز پیدایش این حفرات را به هوازدگی نمکی^۶ منسوب کرده‌اند (Cooke & Smalley, 1968). در اثر هوازدگی نمکی، تبلور نمک در فضاهای خالی سنگ، آبگیری نمک‌ها و انبساط حرارتی نمک‌ها باعث فروپاشی سنگ می‌شود. عقیده بر این است که تبلور شدن نمک و تغییرات حجم ایجاد شده در اثر آبگیری آنها منجر به انهدام سنگ می‌شود (Smith et al., 1994). بیشتر شروع تشکیل این حفرات در راستای سطوح ضعف سنگ‌ها مانند درزه‌ها، شکستگی‌ها و غیره است (Dragovich, 1969). در این بررسی، چگونگی پیدایش تافونی‌ها و عوامل کنترل کننده آنها در گرانیتهای جنوب مشهد و ماسه سنگ‌های سازند شمشک، واقع در بخش شمالی بینالود، بررسی شده است (شکل ۱).

روش مطالعه

با توجه به اهداف مورد نظر این پژوهش، ابتدا مطالعات صحرایی برای تشخیص تافونی‌ها و شکل آنها و نیز نمونه برداری از این سنگ‌ها جهت تهیه‌ی مقاطع نازک صورت گرفته است. در مطالعات صحرایی سعی شده است که چگونگی شروع و توسعه‌ی این حفرات تا حد امکان بررسی شود. در مطالعات

1. wind erosion.
2. sand blasting.
3. snow blasting.
4. blackwelder.
5. hydration.
6. salt weathering.

آزمایشگاهی، کانی شناسی این سنگ‌ها و ارتباط آنها با این پدیده‌ی ژئومورفولوژی مورد بررسی قرار گرفته است.

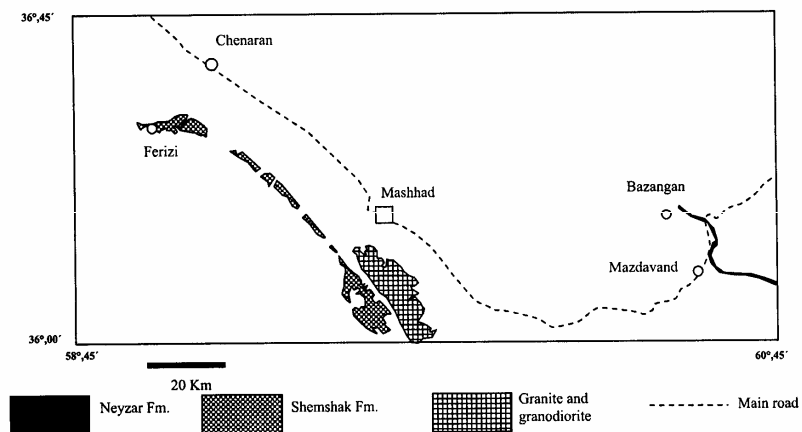
در برخی از سطوح سنگی، گل سنگ‌ها^۱ تشکیل شده اند، که نقش بسیار مهمی در فرسایش سنگ و تشکیل خاک دارند. به همین دلیل برای تشخیص کانی‌ها از روش آنالیز XRD استفاده شده است. در این روش دو نوع آنالیز صورت گرفته است، یکی برای تشخیص ترکیب کلی و دیگری برای تشخیص نوع کانی‌های رسی حاصل از هوازدگی این سنگ‌ها، که برای این منظور شش نمونه از خاک‌های تشکیل شده در زیر گل سنگ‌هایی که روی گرانیت‌ها رشد کرده اند و نیز خاک‌های موجود در حفرات سنگی سازند شمشک پس از عبور از غربال ۴ فی برای آنالیز آماده سازی شده است. برای رسیدن به یک نتیجه‌ی مطلوب، حذف آهک یا کربن توسط استات سدیم با $\text{PH}=5$ ، حذف مواد آلی توسط آب اکسیژنه و حذف آهن توسط بافر سترات با $\text{PH}=7.3$ و نمک طعام اشباع شده طی مراحل خاصی صورت گرفته است. برای اثبات درستی آنالیزها، هر یک از آنها طی مراحل اشباع با $\text{K-T550}^{\circ\text{C}}$ ، اشباع با Mg و Mg اشباع با گلیسرول، تست شده و گراف تهیه شده است. هدف از انجام این تحقیق بررسی تافونی‌ها و عوامل مؤثر در تشکیل آنها واقع در گرانیت‌های جنوب مشهد و ماسه سنگ‌های سازند شمشک (بخش شمالی بینالود) می باشد.

هوازدگی حفره‌ای در گرانیت‌های جنوب مشهد

گرانیت‌های مشهد از جنوب شرق تا شمال غرب رخنمون داشته و در داخل مجموعه دگرگونی ایالت ساختاری بینالود قرار دارند (شکل ۱).

در این ناحیه گرانیت‌های درشت بلور بیشتر توسط درزه‌های اورتوگونال قطع شده و رگه‌های پگماتیوی و زینولیت‌ها در این توده‌های سنگی مشاهده می شوند. مهمترین و زیباترین پدیده‌ی ژئومورفولوژی در این ناحیه تافونی‌هاست که سازوکار و فرایند تشکیل آنها تا کنون مورد بررسی قرار نگرفته است (شکل‌های ۲ و ۳).

1. lichen.



شکل ۱. نقشه خلاصه شده زمین شناسی منطقه مورد مطالعه (اقتباس از علوی، ۱۹۹۱).



شکل ۲. نمایی کلی از هوازدگی های حفره ای در گرانیت های روستای ده غیبی - جنوب مشهد



شکل ۳- نمایی از تافونی‌های موجود در گرانیت‌های جنب کارخانه کمپوست - جنوب مشهد

مورفولوژی تافونی‌ها در گرانیت‌های جنوب مشهد

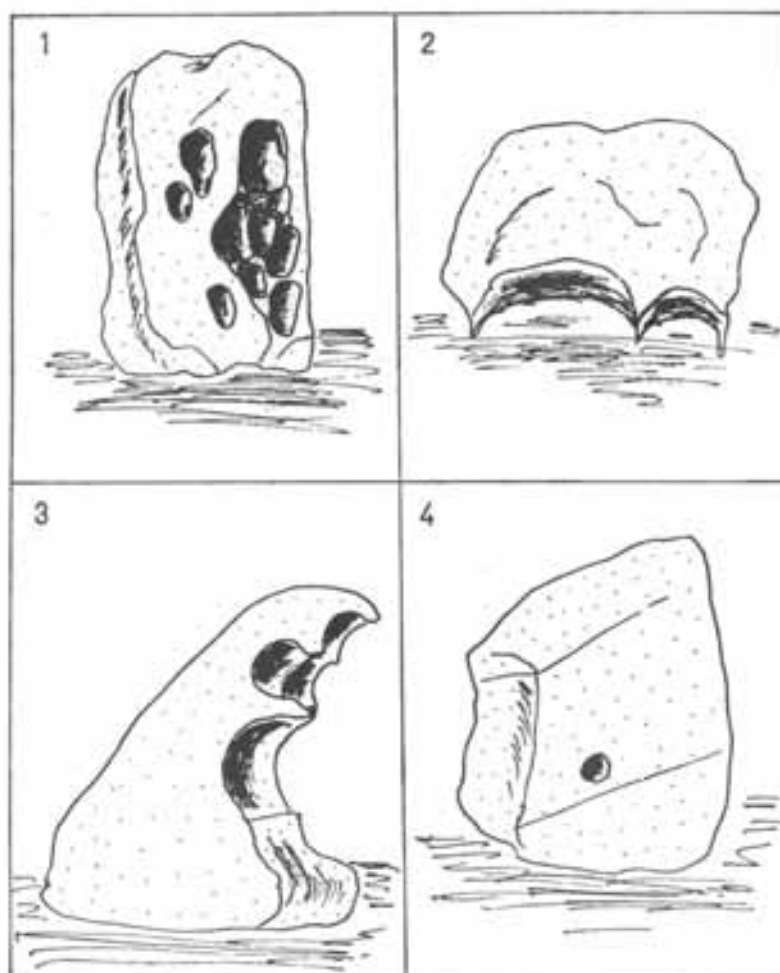
به طور کلی انواع اشکال تافونی در گرانیت‌ها (Tschang, 1966) عبارت‌اند از:

۱. تافونی‌های دامنه‌ای^۱ (شکل ۴).
۲. این اشکال روی دامنه‌های گرانیتی مشاهده می‌شوند. بیشتر گلابی شکل^۲، تخم مرغی شکل^۳، هلالی شکل^۴، شبیه گلبرگ^۵ و یا به صورت اشکال نامنظم دیگر دیده می‌شوند.
۳. تافونی‌های قاعده‌ای^۶ (شکل ۴).

-
1. side tafoni.
 2. pear-shape.
 3. oval-shape.
 4. crescent-shape.
 5. flower-petals.
 6. basal tafoni.

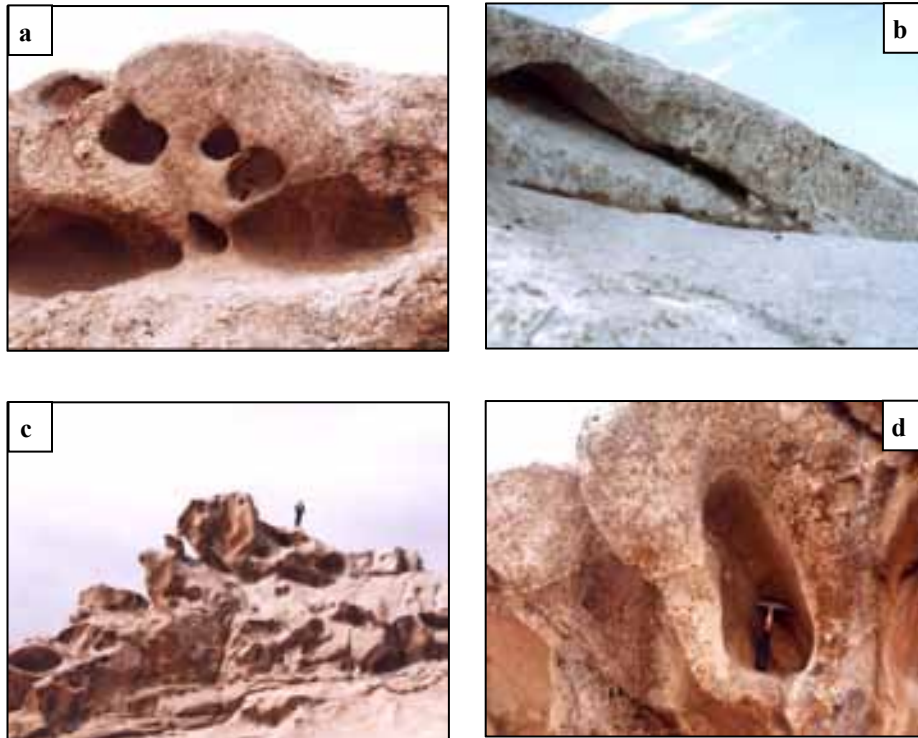
سال هفتم	عوامل کنترل کننده هوازگی حفره ای (تافونی)...	۱۹۳
۴.	بیشتر به صورت محدب ^۱ و به شکل نیمه کروی ^۲ هستند و معمولاً از تافونی های دامنه ای بزرگتراند و در سطوح پایین ^۳ دیده می شوند.	
۵.	تافونی های شاخی ^۴ (شکل ۴).	
۶.	پراکنده گی عمودی آنها از اشکال تافونی قاعده ای وسیع تر است.	
۷.	تافونی های دروغین ^۵ (شکل ۴).	
<p>اشکال دروغین تافونی به صورت نیمه کروی بوده و اغلب به صورت منفرد دیده می شوند، که توسط انحلال و فرسایش زینولیت ها ایجاد می شوند. زینولیت هایی که از لحاظ مقاومت ، ضعیف تر از توده اصلی گرانیتی است به تدریج از توده اصلی بر اثر فرسایش حذف شده و محل خالی شده ، مکانی آغازین برای تشکیل تافونی است. تافونی ها اغلب به صورت گروهی دیده می شوند، اما این نوع از تافونی ها همیشه به صورت تنها یافت می شوند.</p> <p>انواع مختلف این اشکال تافونی در گرانیت های جنوب مشهد در شکل ۵ آورده شده است.</p> <p>برای تعیین شکل تافونی ها ، پهنا^۶ ، ارتفاع^۷ و عمق^۸ تعداد زیادی از حفرات در بلوکی خاصی به صورت منظم اندازه گیری شده اند.</p> <p>بر اساس این اندازه گیری ها به طور میانگین $W \gg H > D$ بوده و حفرات بیشتر به صورت بیضوی شکل^۹ هستند. درون حفره نسبت به خارج آن دارای رنگ روشن تر و از نظر بافتی ، زبرتر است.</p>		

1. concave.
2. semispherical.
3. low level.
4. horn tafoni.
5. pseudotafoni.
6. width
7. height.
8. depth.
9. elliptical.



شکل ۴. انواع اصلی تافونی ها از نظر شکل

1. side tafoni 2. basal tafoni 3. horn tafoni 4. pseudotafoni



a) Side tafoni; b) Basal tafoni; c) Horn tafoni; d) Pseudotafoni

شکل ۵. اشکال مختلف تافونی در گرانیت های جنوب مشهد

سازوکار تشکیل تافونی ها در گرانیت های جنوب مشهد

به طور کلی هوازدگی حفره ای در سنگ های آذرین به ویژه گرانیت های جنوب مشهد، بر اثر فرایندهای متعددی تشکیل شده اند که در زیر مورد بحث و بررسی قرار می گیرند.

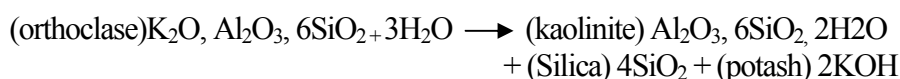
● هوازدهی شیمیایی^۱

گرانیت‌های محدوده‌ی مورد مطالعه در نمونه‌ی دستی دارای رنگ روشن بوده و بافت گرانولار آن به خوبی نمایان است. بر اساس مطالعات پتروگرافی، این سنگ‌ها اغلب از کوارتز، آلکالی فلدسپات، پلاژیوکلاز، مسکویت و بیوتیت تشکیل شده‌اند.

به طور کلی، گرانیت در اثر رطوبت و هوازدهی تشکیل رگولیت^۲ را می‌دهد. مواد تولید شده به وسیله هوازدهی سنگ‌های دانه درشت و به طور خاص گرانیت‌ها، معمولاً به ساپرولیت‌های گرانیت^۳ معروف هستند (Sequeira Braga et al., 2002). میزان هوازدهی در این سنگ‌ها تحت تأثیر ساختار سنگ، شکستگی‌ها، ترکیب کانی شناسی، اندازه بلور و ترکیب آب نفوذ کننده^۴ است (Campbell, 1997). همان گونه که ذکر شد این سنگ‌ها دارای کانی‌های ناپایدار فلدسپات و میکا هستند که تحت تأثیر فرایندهای مختلف شیمیایی به کانی‌های رسی تبدیل می‌شوند (Huang et al., 1996, Wang, 1992, Li, 1987).

1. feldspar → Sericite ----- hydromica ----- kaolinite
2. biotite → vermiculite ----- montmorillonite ----- kaolinite

هوازدهی گرانیت‌ها شامل تجزیه‌ی فلدسپات و میکاها به وسیله‌ی آب است. به طور مثال اورتوکلاز می‌تواند بر اساس واکنش زیر به کائولینیت تبدیل شود (شکل ۶).



پتاس و سیلیکا به وسیله‌ی این واکنش توسط فرایند آب‌شویی^۵ از متن سنگ خارج می‌شوند. در این حالت در نقاطی که رطوبت در آن جمع می‌شود، حفره‌ای در حال تشکیل شدن است.

1. chemical weathering.
2. regolith.
3. granitic saprolite .
4. penetrating water.
5. leaching.

برای بررسی این فرآیندها نمونه های خاک تشکیل شده در سطح گرانیته، که در زیر گل سنگها قرار داشته است، انتخاب و توسط دستگاه پراش اشعه ای ایکس (XRD) آنالیز شده است. کانی های رسی شناسایی شده به ترتیب فراوانی شامل کائولینیت، ایلیت، مونتموریونیت، و مقدار بسیار کمی کلریت است (شکل ۷).

پروفیل های هوازده گرانیته، بیشتر حاوی کائولینیت هستند. همان گونه که در مقاطع میکروسکوپی این سنگها مشاهده می شود، بیشتر کانی های ناپایدار تحت تأثیر دگرسانی شدید قرار گرفته اند. در نتیجه یکی از فرایندهای مؤثر در تشکیل این هواز دگی های حفره ای، فروپاشی کانی های ناپایدار است. کانی های فلدسپات و میکا ابتدا کمی دگرسان شده و با افزایش هواز دگی، ساختار اولیه کانی ها از بین رفته و به مرور زمان، به کانی های رسی تبدیل می شوند. این کانی های رسی خود نیز در تلاشی سنگ کمک می نمایند.

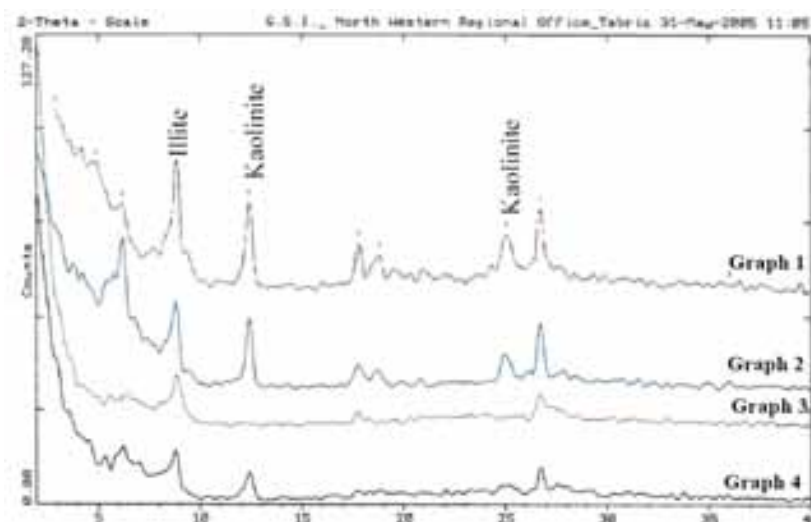
سست شدن هسته و سخت شدن رویه^۱

این پدیده ها شامل یک فرایند زمین شناسی است که در اثر آن قسمت خارجی سنگ نسبت به قسمت درونی آن سخت می شود، در نتیجه هواز دگی قسمت خارجی آن کاهش می یابد. فرایند سست شدن هسته و سخت شدن رویه ی سنگ اغلب در بیشتر نواحی دنیا و به طور خاص در نواحی خشک و نیمه خشک گزارش شده اند (Conca & Rossman, 1982).



شکل ۶. دگرسانی فلدسپاتها به سرسیت و کائولینیت - XPL

1. core softening & case hardening.



شکل ۷. گراف XRD نمونه خاک ایجاد شده از هوازدگی گرانیت های جنوب مشهد

Graph 1: Ion exchange (Mg saturation with glycerol), Graph 2: Ion exchange (with Mg saturation), Graph 3: Heat treatment on 550°C, Graph 4: Ion exchange (with K saturation)

این سخت شدن رویه ی سنگ گاهی اوقات induration نامیده می شود و مترادف پوسته سخت^۱ نیز به کار می رود (Dorn, 2004). اغلب تافونی ها از مناطقی در سطح سنگ شروع می شوند که هوازدگی متفاوتی را نشان داده و این مناطق شامل تغییرات در لیتولوژی، ساختار، ترکیب و بافت است. مراحل مختلف توسعه و تکامل تافونی ها در مطالعات صحرایی به صورت آشکار دیده می شوند. تحت شرایط خاص آب و هوایی، سطح سنگ پس از هر بارندگی بلافاصله خشک می شود، در حالی که رطوبت سطوح داخلی به مامت زیادتری در سنگ باقی می ماند. در این شرایط سطح بیرونی سخت شده^۲، در حالی که قسمت های درونی آن ضعیف تر و سست تر^۳ می شود. پس از مدتی گودی هایی در سنگ

1. duricrust.
2. case hardening.
3. core softening.

ایجاد می شود، به گونه ای که شرایط رطوبتی درون این حفرات^۱ با اطراف^۲ متفاوت بوده و درون حفرات غالباً به دلیل فرایند پوسته پوسته شدن^۳ و فروپاشی دانه ای^۴ کلاً سست شده و قابلیت پودر شدن^۵ را یافته که این خود با گذشت زمان باعث توسعه و رشد این حفرات می شود (شکل ۸).



شکل ۸. هوازدگی حفره ای توسعه یافته در گرانیت های روستای ده غیبی - جنوب مشهد

● فرایند هوازدگی کروی و تورق سطحی (ورقه ورقه شدن)^۶

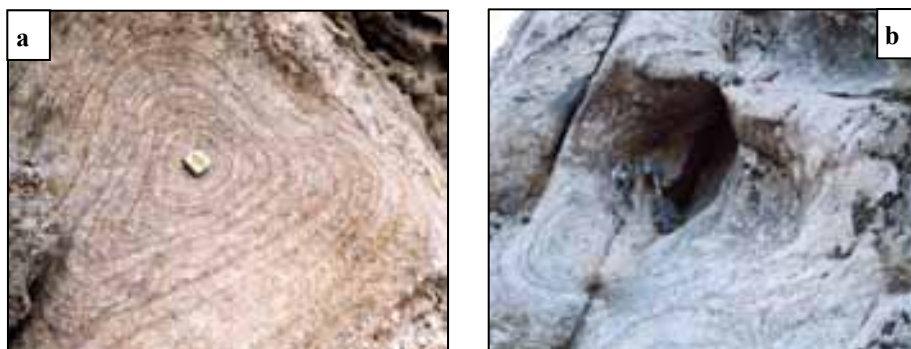
این دو فرایند قابل مقایسه با یکدیگراند. در فرایند هوازدگی کروی که شکلی از هوازدگی شیمیایی محسوب می شود، پوسته هایی با یک مرکز^۷ از سنگ متلاشی شده ایجاد می شود که قطر آنها از دوسانتی متر تا دو متر در تغییر است و بیشتر در اثر نفوذ آب^۸ در مرز درزه ها و دیگر سطوح ضعف سنگ ایجاد می شوند.

1. microclimate.
2. outside climate.
3. flaking.
4. granular disintegration.
5. friability.
6. spheroid and exfoliation weathering.
7. concentric shells.
8. water penetrating.

هوازدگی کروی شبیه به تورق سطحی با مقیاس بزرگتر^۱ می‌باشد (Bates & Jackson, 1980). اما فرایند تورق سطحی در اثر ورقه ورقه شدن متحدالمرکز سنگ ایجاد می‌شود که در اثر فرایندهای فیزیکی یا شیمیایی، در اثر فشارهای متفاوت درون سنگ نظیر انبساط کانی‌ها در اثر هوازدگی حرارتی نزدیک سطح زمین یا بر اثر برداشته شدن فشار رویه‌ی سنگ^۲ در اثر فرسایش ایجاد می‌شوند. در این حالت در اثر انبساط حرارتی کانی‌ها^۳، درزه‌هایی موازی سطح زمین^۴ ایجاد می‌شوند که در امتداد آنها فرسایش رخ می‌دهد. این درزه‌های با زاویه کم، گاهی اوقات حاصل افت فشار ناشی از فرسایش بار روی توده نفوذی هستند (Marre, 1986). به طور کلی به این پدیده، ورقه ورقه شدن^۵ گفته می‌شود.

به هر حال فرایند هوازدگی کروی، می‌تواند سازوکاری برای شروع تشکیل هوازدگی حفره‌ای در گرانبته‌های جنوب مشهد باشد (شکل ۹a). این فرایند در این ناحیه به دلیل تغییرات درجه حرارت و بیشتر در اثر تناوب یخ زدن و ذوب شدن طی روزهای زمستان رخ می‌دهد. به گونه‌ای که در امتداد این درزه‌های موازی سطح زمین، بر اثر هوازدگی شیمیایی کانی‌هایی مانند میکاها، اکسیدهای قهوه‌ای رنگ آهن دیده می‌شوند. این پدیده پس از تشکیل در اثر تناوب دوره‌های خشک و مرطوب تشدید شده و پس از مدتی، حفرات عمیق‌تر شده و تافونی‌ها را ایجاد می‌کنند (شکل ۹b).

-
- 1 . larger-scale exfoliation.
 2. confining pressure.
 3. expansion.
 4. sheet joints.
 - 5 . exfoliation.



شکل ۹.

a: هوازدگی کروی (spheroidal weathering) در گرانیت های جنوب مشهد
 b: توسعه ی تافونی ها پس از تشکیل هوازدگی کروی در گرانیت های جنوب مشهد

● تشکیل تافونی ها در امتداد شکستگی ها^۱

درزه های متعددی در گرانیت های جنوب مشهد قابل مشاهده است، برخی از آنها در مراحل پایانی انجماد ماگما حاصل شده اند، که با مواد مذاب تأخیری (دایک های آپلیتی و پگماتیت ها) پر شده اند. در هر حال، درزه ها نیز در این سنگ ها سطوح ضعف محسوب می شوند که در امتداد این سطوح فرسایش رخ داده است. در نتیجه سطح درزه ها نیز شروعی برای تشکیل و تکوین تافونی ها در نظر گرفته می شوند.

هوازدگی حفره ای در سازند شمشک واقع در بخش شمالی بینالود

هوازدگی حفره ای در سازند شمشک در محدوده ی روستای فریزی با موقعیت عرض جغرافیای ۲۸/۱ و ۲۹ و ۳۶ شمالی و طول جغرافیایی ۳۰/۴ و ۵۸ و ۵۸ شرقی مشاهده می شود که برای دسترسی به آن، با طی چهل کیلومتر مسیر جاده مشهد - قوچان به تقاطع فرعی روستای فریزی رسیده و سپس با طی دوازده کیلومتر در جاده ی فرعی به روستای فریزی می رسیم (شکل ۱).

1. cracks.

سازند شمشک در این محدوده روی فیلیت های جنوب مشهد و در زیر سازند دلیچای قرار گرفته است. از نظر لیتولوژی، کاملاً ترکیب هتروژنی داشته و عمدتاً از لایه های ماسه سنگی، شیل های حاوی زغال و فسیل گیاهی و کنگلومرا تشکیل شده است.

کنگلومراهای این سازند اغلب چند منشایی^۱ بوده، یعنی پیل هایی با ترکیب متفاوت داشته که در سیمان کربناته و هماتیته پراکنده شده اند. جنس پیل های آن اغلب کوارتز و خرده سنگ های رسوبی و دگرگونی است. ماسه سنگ ها اغلب دانه ریز تا خیلی دانه درشت بوده و دارای ساختارهای رسوبی از قبیل طبقه بندی های افقی و مورب هستند. اجزای اصلی تشکیل دهنده این ماسه سنگ ها کوارتز، خرده سنگ های دگرگونی (اسلیت و فیلیت) و رسوبی (شیل و ماسه سنگ دانه ریز) و فلدسپات (میکروکلین، اورتوکلاز و پلاژیو کلاز) است. این اجزا همراه با عناصر فرعی دیگر مثل میکاها، کانی های سنگین و اپیک در یک سیمان آهکی - هماتیته - رسی پراکنده شده اند. تافونی های موجود در این سازند، در بخش ماسه سنگی و کنگلومرای به خوبی مشاهده می شوند (شکل ۱۰).



شکل ۱۰. تافونی های موجود در ماسه سنگ های سازند شمشک - قیل از روستای فریزی

1. polymictic.

فرایندهای مؤثر در توسعه‌ی تافونی ها در سازند شمشک

۱. انحلال سیمان آهکی

یکی از عوامل مؤثر در تشکیل هوازگی حفره ای در این سنگ‌ها، وجود سیمان آهکی در آنهاست. به طور کلی انحلال سیمان آهکی در برگیرنده ذرات تشکیل دهنده‌ی آنها در اثر نفوذ آب‌های اسیدی صورت می‌گیرد.

در مواقع بارندگی، مقدار کمی آب اسیدی به درون سنگ نفوذ نموده و مقداری از سیمان کلسیتی را حل نموده و از بین می‌برد و در مواقع خشکسالی، آب به وسیله‌ی تبخیر به سطح سنگ کشانده می‌شود و در این حالت آهک در سطح خارجی سنگ، پوسته‌سختی را تشکیل می‌دهد که مشابه پدیده^۱ در گرانیت هاست. پس از مدتی، این سطح سخت که درون آن خالی است. به دلایلی شکسته شده و قسمت درونی که سست تر بوده^۲ در برابر فرسایش قرلر گرفته و حفراتی تشکیل می‌شوند که به مرور زمان، ابعاد آنها بزرگتر شده و تافونی‌ها را تشکیل می‌دهند.

۲. هوازگی نمکی^۳

به طور کلی این هوازگی به دلیل پیدایش گسیختگی‌های کششی به خاطر نهشته شدن نمک در قسمت‌هایی از سطح ماسه سنگ‌هاست. در این حالت بر اثر تبلور نمک‌ها و آبگیری مجدد آنها و به دلیل انبساط حرارتی بالای آنها، سنگ دچار فروپاشی می‌شود. برای اثبات این پدیده، نمونه‌هایی از رگولیت‌ها و خاک‌های تشکیل شده در حفرات موجود پس از آماده‌سازی، توسط XRD آنالیز شده‌اند.

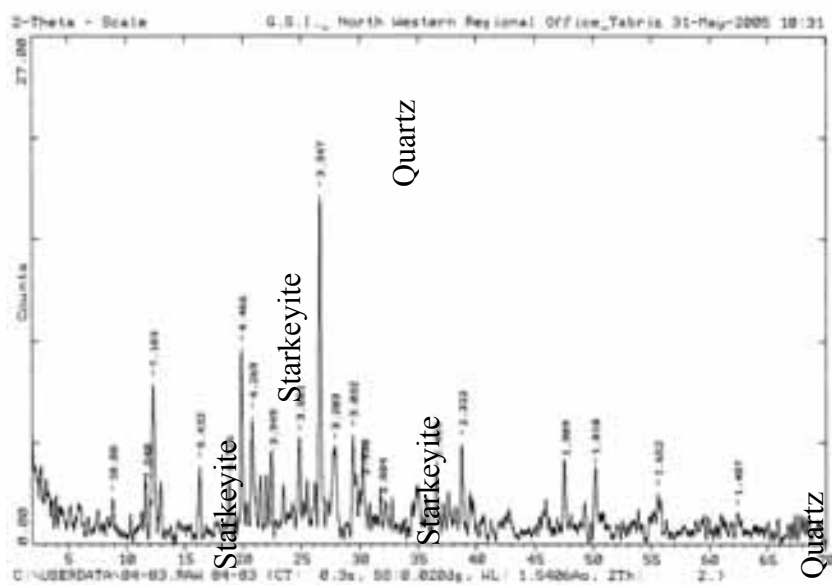
-
1. case hardening.
 2. softenin.
 3. salt weathering.

بیشترین کانی موجود در این نمونه‌ها که توسط XRD مشخص شده، کانی استارکیت^۱ است که سولفات منیزیم آبدار بوده و کانی کمیابی محسوب می‌شود (شکل ۱۱). کانی استارکیت به رنگ سفید تا متمایل به زرد دارای سختی ۲ تا ۳ است که برای اولین بار در سال ۱۹۵۶ از معدن استارکی^۲ در Madison County، میسوری ایالات متحده آمریکا گزارش شده است.

این کانی جز کانی‌های کمیاب^۳ بوده و کمتر گزارش شده است. از نظر پیدایش زمین‌شناسی^۴ این کانی، کانی ثانویه‌ای است که در زون‌های اکسیدان نهشته‌های سولفیدی منتج می‌شوند. این کانی اغلب به صورت شوره زنی پودر مانند^۵ در سطح سنگ‌های منطقه مشاهده می‌شود (شکل ۱۰).

خرده سنگ‌های شیلی موجود در این سنگ‌ها و نیز لایه‌ها و لامینه‌های شیلی که بیشتر حاوی پیریت نیز هستند می‌توانند در اثر هوازدگی، شوره‌های نمکی را در سطح سنگ‌ها ایجاد نمایند. تکوین و توسعه این شوره‌ها از هوازدگی خرده سنگ‌های ناپایدار طی دوره‌های خشکسالی^۶ صورت می‌گیرد. در هر حال در ماسه سنگ‌های سازند شمشک، هوازدگی بر اثر رشد نمک، وزش باد مسلح به ماسه^۷ و تجزیه‌ی شیمیایی باعث پیدایش پوسته نسبتاً سخت^۸ و تقریباً ناپایدار در سطح سنگ شده که این عوامل در توسعه تافونی‌ها، نقش بسیار مهمی ایفا می‌کنند.

-
1. starkeyite.
 2. starkey.
 - 3 . rare mineral.
 4. geological setting.
 5. powdery efflorescence's.
 6. dry periods.
 - 7 . sandblasting.
 - 8 . duricrust.



شکل ۱۱. گراف XRD خاک های موجود در تافونی های سازند شمشک

نتیجه گیری

تافونی ها در انواع سنگ ها رخ می دهند. شرایط متفاوتی، تشکیل و تکوین تافونی های جنوب مشهد را تحت کنترل خود دارند، که از همه مهمتر خصوصیات کانی شناسی و ساختاری سنگ های گرانیتی، شرایط آب هوایی محل مزبور و شرایط آب و هوایی درون خود تافونی هاست.

به دلیل این که این سنگ ها دارای فابریک گرانولار بوده و از کانی های سیلیکاته دانه درشتی تشکیل شده اند، برخی از کانی ها، مانند فلدسپات ها و میکاها، کانی های ناپایداری بوده که حساسیت زیادی به آلتراسیون از خود نشان می دهند، به طوری که به سرسیت و کائولینیت تبدیل شده و این کانی ها نیز به نوبه ی خود نقش مهمی در فروپاشی سنگ دارند. رطوبت زیاد که از محل های سیستم درزه های موجود در این گرانیت ها ایجاد می شود، در هنگامی که سنگ ها اشباع از رطوبت می شوند، تمایل به هواز دگی شیمیایی بیوتیت و فلدسپات را درون سنگ به دنبال خواهند داشت. درزه ها، رگه های پگماتیستی،

1. joints.

زینولیت‌ها^۱ نیز در تکوین تافونی مؤثر هستند. به طور مشخص پدیده‌ی تورق سطحی^۲ در این گرانیت‌ها شروعی برای تشکیل تافونی‌ها محسوب می‌شوند. در نتیجه در تشکیل این حفرات، تغییرات آب و هوایی، ترکیب سنگ، ساخت و بافت سنگ دارای اهمیت هستند. اما هوازدگی حفره‌ای در سازند شمشک واقع در بخش شمالی بینالود بیشتر به دلیل انحلال سیمان آهکی لیتولوژی‌های آن بوده و هوازدگی نمکی نیز نقش بسیار مهمی در فروپاشی سنگ‌ها و تشکیل این حفرات دارند.

1 . xenoliths.
2 . exfoliation.

منابع و مأخذ

1. Alavi, M., (1991) *Sedimentary and structural characteristics of the Paleotethys remnants in northeastern Iran*, *Geol. Soc. Am. Bull.*, 103, 983-992.
2. Bates, R.L., and Jackson, J., (1980) *Glossary of Geology*, American Geological Institute Falls Church, Virginia, 751p.
3. Blackwelder, E., (1929) *Cavernous rock surface of the desert*, *American Journal of Science*, 17, 393-399.
4. Campbell, E.M., (1997) *Granite landforms*, *Journal of the Royal Society of Western Australia*, 80, 101-112.
5. Conca, J.L., and Rossman, G.R., (1985) *Core softening in cavernously weathered tonalite*, *Journal of Geology*, 93(1), 59-73.
6. Conca, J.L., and Rossman, G.R., (1982) *Case – Hardening of sandstone*, *Geology*, 10, 520-523.
7. Cooke, R., and Smalley, I.J., (1968) *Salt weathering in desert*, *Nature* 220, 1226-1227.
8. Cooke, R., Warren, A., and Goudie, A., (1993) *Desert geomorphology*, London, UCL press, 526.
9. Dorn, R.I., Case hardening, in *Encyclopedia of Geomorphology*, Ed, A.S. Goudie, Routledge: London, 118-119.
10. Dragovich, D., (1969) The origin of cavernous surface (tafoni) in granitic rocks of southern South Australia: *Zeitschrift fuer Geomorphologie*, 13(2), 163-181.
11. Huang, Z.G., Chen, W.Q., Chen, J.H., (1996) *Red Weathered Crust in South China*. Chinese Ocean Press, Beijing in Chinese.
12. Li, F.L., (1987) *Distribution characters and grade classification of weathering rocks in the area along the coast of China*. *Harbor Reconnaissance* 3, 9-14 in Chinese.
13. Marre, J., (1986) *The Structural Analysis of Granitic Rocks*, Elsevier, Amsterdam.
14. Matsukura, Y. and Tanaka, Y., (2000) *Effect of rock hardness and moisture content on tafoni weathering in granite of Mount Doeg-Sung, Korea*, *Geografiska Annaler* 82A, 59-67.
15. McBride, E.F., and Picard, M.D., (2000) *Origin and development of tafoni in Tunnel Spring tuff*, *Crystal Peak, Utah, USA*, *Earth surface processes and landforms*, 25, 509-518.
16. Mellor, A., Short, J. and Kirkby, S.J., (1997) *Tafoni in the El Chorro area, Andalucia, Southern Spain*, *Earth Surface Processes and Landform*, 22, 817-833.

17. Mustoe, G.E., (1982) *The origin of honeycomb weathering*, Geological Society of America Bulletin, 93, 108-115.
18. Mustoe, G.E., (1983) *Cavernous weathering in the Capital Reef Desert, Utah*, Earth surface processes and landforms, 8, 517-526.
19. Sequeira Braga, M.A., Paquet, H., and Begonha, A., (2002) *Weathering of granites a temperature climate (NW Portugal): granitic saprolites and arenization*, Catena, 49, 41-56.
20. Smith, B.J., (1978) *The origin and geomorphic implications of cliff foot recesses and tafoni on limestone hamadas in the Northwest Sahara: Zeitschrift fuer Geomorphologie*, 22(1), 21-43.
21. Smith, B., Magee, R.W., and Whally, W.B., (1994) *Breakdown patterns of quartz sandstone in a polluted urban environment, Belfast, Northern Ireland*, In: Robinson, D.A., & Williams, R.B.G. (eds) *Rock weathering and landform Evolution*, Wiley, Chichester, 132-150.
22. Tshang, His-Lin, (1966), *Geomorphological observations on weathering forms in Hong Kong and some other humid regions of Southeast Asia*, Chung Chi Journal, 5(2), 206-226.
23. Viles, H.A., (2001) *Scale issues in weathering studies*, Geomorphology, 41, 63-71.
24. Wang, Y.L., (1992) *Micro-study on Bedrock Weathering Crust of Three Gorges and its Classification*. Proceedings of the Fourth Conference of Engineering Geology. Chinese Ocean Press, Beijing in Chinese.

مشخصات نویسندگان:

محمدخانه باد، مربی گروه زمین شناسی دانشگاه فردوسی مشهد

دکتر رضا موسوی حرمی، استاد گروه زمین شناسی دانشگاه فردوسی مشهد

دکتر اسدالله محبوبی، دانشیار گروه زمین شناسی دانشگاه فردوسی مشهد