

دو فصلنامه‌ی ژئومورفولوژی کاربردی ایران

سال اول، شماره دوم، پاییز و زمستان ۱۳۹۲

تاریخ دریافت: ۹۲/۲/۲۸ تاریخ پذیرش: ۹۲/۷/۴

صص ۳۶ - ۱۹

معرفی اشکال تافونی و عوامل مؤثر بر تشکیل آنها در سنگ های میگماتیتی منطقه سیمین (جنوب همدان)

سید داود محمدی*، استادیار گروه زمین شناسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران
لقمان کتابی، کارشناس ارشد زمین شناسی مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

چکیده

یکی از اشکال موجود در سنگ های میگماتیتی جنوب همدان، تافونی‌ها هستند؛ که منظره زیبا و قابل توجهی را به این گروه از سنگ‌ها داده‌اند. تافونی‌ها حفرات عمیق و توخالی می باشند؛ که بر اثر سازوکارهای متفاوت هوازدگی به وجود می آیند. بافت سنگ های میگماتیتی به صورت دانه‌ای می باشند. یکی از مهم ترین فرآیندهای تشکیل دهنده اشکال تافونی، تجزیه کانی‌هایی مانند فلدسپات‌ها و میکاها است. ناهمگن بودن سنگ‌های میگماتیتی و اختلاف ترکیب کانی شناسی در دو بخش لوکوسوم و مزوسوم، باعث ایجاد اختلاف مقاومت بخش‌های مختلف این سنگ‌ها در برابر فرآیندهای متعدد هوازدگی شده است. حضور کانی‌های درشت بلور و مقاوم مانند کوارتز، گارنت و آندالوزیت در کنار کانی‌های ورقه‌ای و ضعیف‌تر مانند کلریت، ایلیت و مسکویت، و با مد نظر قرار دادن اختلاف ضریب انبساط این کانی‌ها نسبت به تغییرات دمایی، تشکیل اشکال تافونی و هوازدگی حفره‌ای در سنگ‌های میگماتیتی، به عنوان یک پدیده‌ی بارز در منطقه قابل توجه می‌باشد. به طور کلی در منطقه مورد مطالعه، آب و هوای نیمه خشک متمایل به سرد مرطوب، ویژگی‌های سنگ شناسی و توپوگرافی، عوامل هوازدگی مکانیکی به ویژه پدیده کریوکلاستیسیم (متلاشی شدن سنگ در اثر پدیده یخبندان) از مهم ترین فرآیندهای تشکیل و گسترش تافونی‌ها در میگماتیت‌های منطقه می‌باشند. همچنین، امکان دارد سنگ های حاوی اشکال تافونی بر اثر سدهایی که در منطقه ساخته می شوند به زیر آب فرو رفته و موجب نشت آب گردند. بنابراین، این اشکال را باید از دیدگاه ژئومورفولوژی کاربردی و مهندسی نیز مورد مطالعه قرار داد.

واژگان کلیدی

میگماتیت، هوازدگی، فابریک، تافونی، کریوکلاستیسیم، همدان.

۱- مقدمه

تافونی‌ها حفرات عمیق و تو خالی هستند؛ که در اثر هوازدگی حفره‌ای در رخنمون‌های سنگی و قطعات بزرگ سنگ ایجاد می‌شوند. این حفرات اغلب به صورت گروهی تشکیل می‌شوند. قطر و عمق هر یک از حفرات از چند سانتی‌متر تا چندین متر متغیر است (ویلس، ۲۰۰۱: ۶۳).

پدیده تافونی در بیش‌تر نواحی از جمله استوایی تا مجاور استوایی، مرطوب ساحلی، خشک و نیمه خشک و حتی در مریخ گزارش شده است. مطالعات صورت گرفته بر روی تافونی‌ها بیشتر در کشورهای مصر، استرالیا، شیلی و مربوط به نواحی کویری بوده است (ال شارکاوی، ۲۰۰۹: ۷۱).

فرآیند تشکیل و گسترش تافونی‌ها در ایران از نظر علمی کم‌تر مورد توجه بوده است و اکثراً در معرفی و بررسی یک منطقه به صورت جزئی به وجود حفرات تافونی اشاره شده است. در ناحیه گرم و خشک یزد با زمستان‌های نسبتاً سرد و تابستان‌های طولانی و بسیار گرم (دمای بالای ۴۰ درجه) در انواع سنگ‌های آذرین درونی (گرانیت شیرکوه)، آذرین خروجی (تراکیت ارفان)، توف و لاوا (تپه‌های کلوت)، کنگلومرا (تفت - توران پشت) و ماسه سنگ (کلوت اردکان) تافونی‌ها گزارش شده‌اند (مهرشاهی، ۱۳۷۴: ۲۰). راهنما راد و همکاران (۱۳۸۷: ۲۰۲) در ناحیه بیابانی خشک تا نیمه خشک زاهدان در گرانیتهای منطقه به وجود حفرات تافونی اشاره نموده اند. عوامل کنترل کننده در تشکیل تافونی‌ها در گرانیتهای جنوب مشهد و سازند شمشک (بخش شمالی بینالود) توسط خانه‌باد و همکاران (۱۳۸۷: ۱۹۲) مورد بررسی قرار گرفته است. در شهرستان سروستان (جنوب شرق شیراز) در ماسه سنگ‌های سازند آغاچاری پدیده تافونی توسط خادمی و همکاران (۱۳۸۹: ۵۶) گزارش شده است.

علی‌رغم پراکندگی وسیع تافونی‌ها، فابریک و بافت سنگ و شرایط آب و هوایی دو عامل اصلی در تشکیل تافونی در یک منطقه هستند. اکثر محققین بر این باور می‌باشند که تافونی‌ها اغلب در سنگ‌های سیلیکاته دانه متوسط تا درشت با فابریک دانه‌ای^۱ تشکیل می‌شوند (ماتسوکورا و تاناکا، ۲۰۰۰: ۶۲؛ کونکا و رزمن، ۱۹۸۵: ۶۳؛ اسمیت، ۱۹۷۸: ۲۵).

قبلاً ژئومورفولوژیست‌ها تشکیل تافونی‌ها را به فرسایش بادی^۲ نسبت می‌دادند؛ که بر اثر ضربات ناشی از برخورد ماسه‌ها ایجاد می‌شوند (خانه‌باد و همکاران، ۱۳۸۷: ۱۹۲). پژوهشگرانی مانند بلک ولدر (۱۹۲۹: ۳۹۵) معتقدند که تافونی‌ها در اثر نفوذ رطوبت به داخل رخنمون‌های سنگی حاصل می‌شوند. هوازدگی بدین شکل در فرورفتگی‌های خفیف و در طول شکاف‌های ریز و در زون‌های متخلخل متمرکز می‌شود. رطوبت سطحی، تورق سطحی را ایجاد نموده و در نتیجه ذرات جدا شده، مجدداً توسط باد، باران و غیره منتقل می‌شوند. ال شارکاوی (۲۰۰۹: ۷۱). معتقد است که ترکیب و بافت سنگ‌ها، میزان تغییرات درجه حرارت فصلی و شبانه روزی، شدت و نوع بادهای غالب منطقه و زمین شناسی ساختاری از عوامل اصلی تشکیل و گسترش تافونی‌ها می‌باشند.

برخی از پژوهشگران مانند کوک و اسمالی (۱۹۶۲: ۱۲۲۷) و اسمیت و همکاران (۱۹۹۴: ۱۳۵) معتقد به پیدایش تافونی‌ها در اثر هوازدگی نمکی^۳ می‌باشند. در خلال این فرآیند، تبلور نمک در فضاها خالی سنگ،

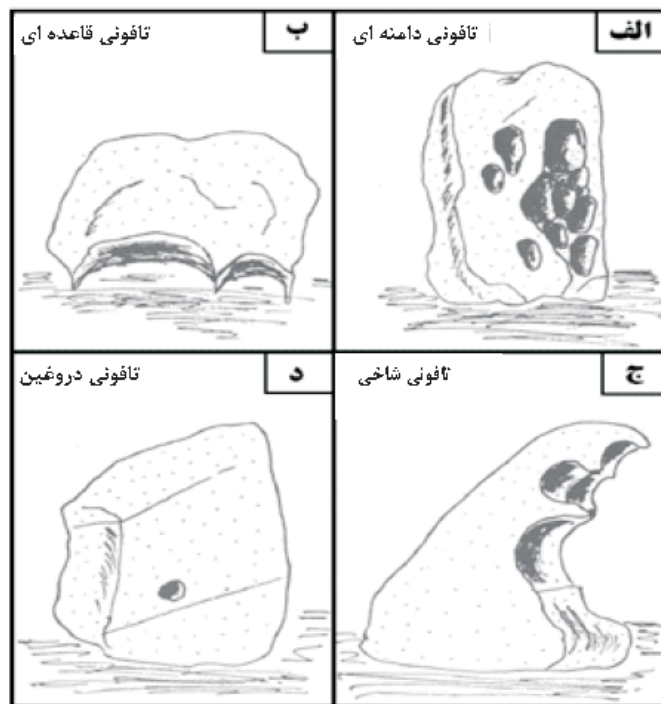
¹ granular fabric

² wind erosion

³ salt weathering

آب‌گیری نمک‌ها و انبساط حرارتی نمک‌ها باعث فروپاشی سنگ می‌شود. متبلور شدن نمک و تغییرات حجم ایجاد شده در اثر آبگیری آنها منجر به تخریب سنگ می‌گردد.
به طور کلی انواع اشکال تافونی که تاکنون مطالعه شده‌اند؛ عبارتند از: (تشانگ، ۱۹۶۶: ۲۲۰؛ خانه‌باد و همکاران، ۱۳۸۷: ۱۹۲):

الف) تافونی‌های دامنه‌ای^۱: این اشکال روی دامنه‌ها مشاهده می‌شود و بیشتر گلابی شکل، تخم مرغی شکل، هلالی شکل، شبیه گلبرگ و یا به صورت اشکال نامنظم دیگر دیده می‌شوند (شکل ۱- الف).
ب) تافونی‌های قاعده‌ای^۲: به شکل نیم دایره‌ای هستند. آنها به طور معمول از تافونی‌های دامنه‌ای بزرگتر می‌باشند (شکل ۱- ب).
ج) تافونی‌های شاخی^۳: به طور کلی شاخ مانند بوده و پراکندگی عمومی آنها از اشکال تافونی قاعده‌ای وسیع‌تر است (شکل ۱- ج).
د) تافونی‌های دروغین^۴: این نوع تافونی به صورت نیمه کروی بوده است و اغلب به صورت منفرد دیده می‌شوند. این تافونی‌ها حاصل خروج کانی‌های با مقاومت کم تر نسبت به متن اصلی سنگ، بر اثر فرآیندهای فرسایش و هوازدگی می‌باشند (شکل ۱- د).



شکل ۱- انواع اصلی تافونی‌ها از نظر شکل. الف) تافونی دامنه‌ای؛ ب) تافونی قاعده‌ای؛ ج) تافونی شاخی؛ د) تافونی دروغین (تشانگ، ۱۹۶۶: ۲۲۰؛ خانه‌باد و همکاران، ۱۳۸۷: ۱۹۲).

در این پژوهش، به معرفی اشکال تافونی و عوامل مؤثر بر تشکیل و گسترش آنها در سنگ‌های میگماتیتی منطقه سیمین (جنوب همدان)، با شرایط آب و هوایی نیمه خشک پرداخته شده است. میگماتیت‌های مورد

¹ side tafoni

² basal tafoni

³ horn tafoni

⁴ pseudo tafoni

مطالعه دارای بافت دانه ای یا گرانولار بوده و از کانی های سیلیکاته دانه متوسط تا درشت تشکیل شده اند. بسیاری از این سنگ ها بدون پوشش رسوبات کواترنری، مستقیم در معرض عوامل هوازدگی قرار گرفته اند.

۲- موقعیت جغرافیایی و زمین شناسی عمومی منطقه

منطقه مورد مطالعه در ۱۵ کیلومتری جنوب شرق شهرستان همدان با مختصات جغرافیایی $31^{\circ} 48'$ تا $33^{\circ} 48'$ طول شرقی و $38^{\circ} 34'$ تا $40^{\circ} 34'$ عرض شمالی، به ارتفاع ۲۴۴۵ متر از سطح دریا واقع شده و از شرق به روستاهای سیمین- ابرو- خاکو و از شمال، به دره مراد بیک منتهی می گردد (شکل ۲).

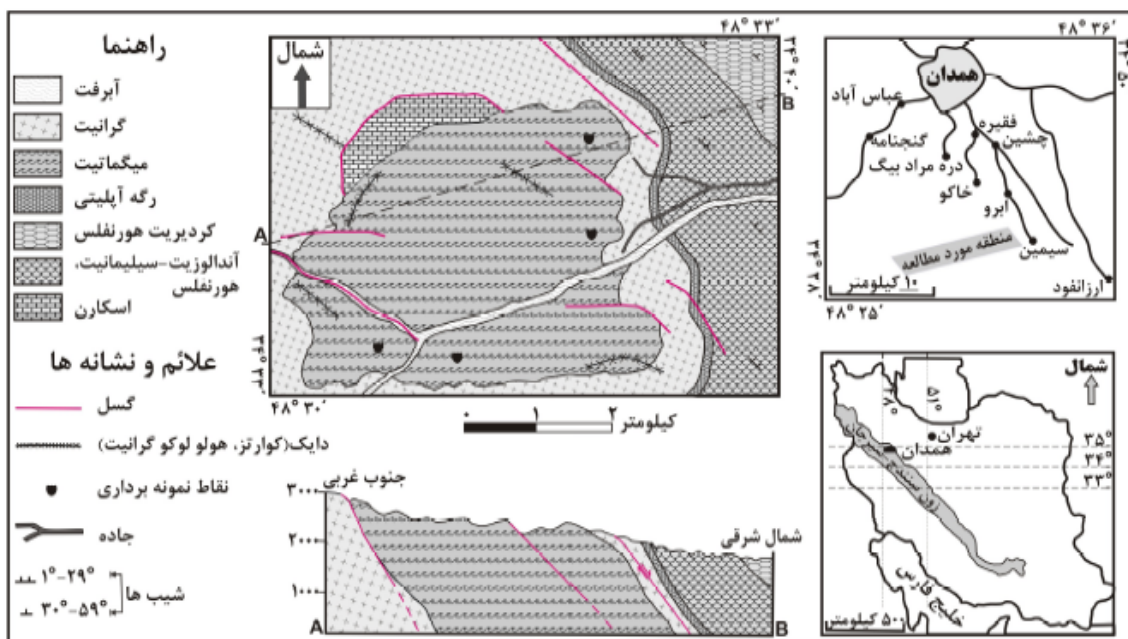


شکل ۲- موقعیت ناحیه مورد مطالعه و راه های دسترسی به آن (کتابی، ۱۳۹۱: ۱۲)

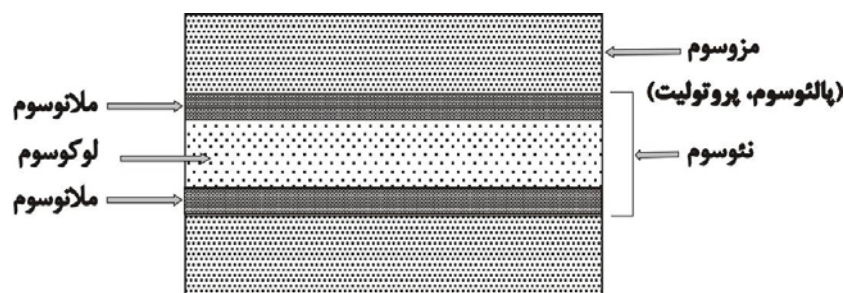
از نظر زمین شناسی، منطقه مورد مطالعه در زون سنندج - سیرجان واقع شده است؛ که جزو ناآرام ترین زون های ساختاری ایران به شمار می رود. در محدوده مورد مطالعه لیتولوژی های غالب شامل شیست ها (آندالوزیت شیست، کردیریت شیست)، هورنفلس ها (آندالوزیت - سیلیمانیت هورنفلس، هورنفلس های کردیریت دار)، میگماتیت ها و گرانیتهای الوند می باشد. میگماتیت های منطقه مورد مطالعه از نوع میگماتیت - های آندالوزیت - سیلیمانیت - فیبرولیت دار با فابریک متنوع می باشند (شهبازی، ۱۳۸۹: ۸۸). میگماتیت های این منطقه، مورفولوژی متنوع متأثر از فرآیندهای تکتونیکی و هوازدگی را نشان می دهند. شکل (۳) نقشه و مقطع زمین شناسی منطقه مورد مطالعه را نشان می دهد.

میگماتیت سنگی است که در نواحی دگرگونی یافت شده و در مقیاس ماکروسکوپی از دو بخش دارای پتروگرافی متفاوت تشکیل شده است. یک بخش تیره که می تواند مزوسوم، ملانوسوم یا هر دو باشد و بخش دیگر با رنگی روشن و ظاهر یک سنگ درونی که به طور عمده دارای ترکیب کوارتز و فلدسپات یا فلدسپات می باشد (مهنرت، ۱۹۶۸: ۲۰۳).

باید توجه داشت که تعریف میگماتیت، دربرگیرنده سنگ هایی نیست؛ که طی فرآیندهای انحلال مجدد در حرارت های پایین به وجود آمده اند و ظاهری شبیه میگماتیت دارند. میگماتیت از بخش های متفاوتی تشکیل شده است. بخش های آن در شکل (۴) نمایش داده شده است. همچنین تعریف آنها به همراه سایر اصطلاحات وابسته به میگماتیت ها در جدول (۱) آورده شده است.



شکل ۳- نقشه و مقطع زمین شناسی منطقه مورد مطالعه (اقتباس از اقلیمی، ۱۳۷۹ و شهبازی، ۱۳۸۹ با اندکی تصحیحات)



شکل ۴- نمایش بخش‌های مختلف میگماتیت

مجموعه میگماتیتهی منطقه شامل، میگماتیت‌ها، میگماتیت‌های تحول یافته از شایست‌ها و میگماتیت‌های تحول یافته از هورنفلس‌ها بوده که نشانگر حداکثر شدت دگرگونی ناحیه‌ای در حد رخساره آمفیبولیت فوقانی تا گرانولیت تحتانی می‌باشند و تنوع ساختاری و کانی شناسی قابل توجهی دارند (جعفری، ۱۳۸۵: ۵۲). پروتولیت چیره در آنها را سنگ‌های پلیتی تشکیل می‌دهد؛ که طی فرآیند دگرگونی تبدیل به هورنفلس‌های کردیریت، آندالوزیت، سیلیمانیت، کیانیت‌دار و میگماتیت‌ها و هورنفلس‌های میگماتیتهی شده‌اند (شهبازی، ۱۳۸۹: ۷۵). بر اساس تقسیم بندی ۱۲ گانه مهنرت، (۱۹۶۸: ۲۰۳) چهار فابریک استروماتیک^۱، چین خورده^۲، افتالمیتیک^۳ و پتیماتیک^۴ در میگماتیت‌های دره سیمین به صورت غالب و در مقیاس قابل توجهی دیده می‌شوند (شکل ۵).

¹ stromatic

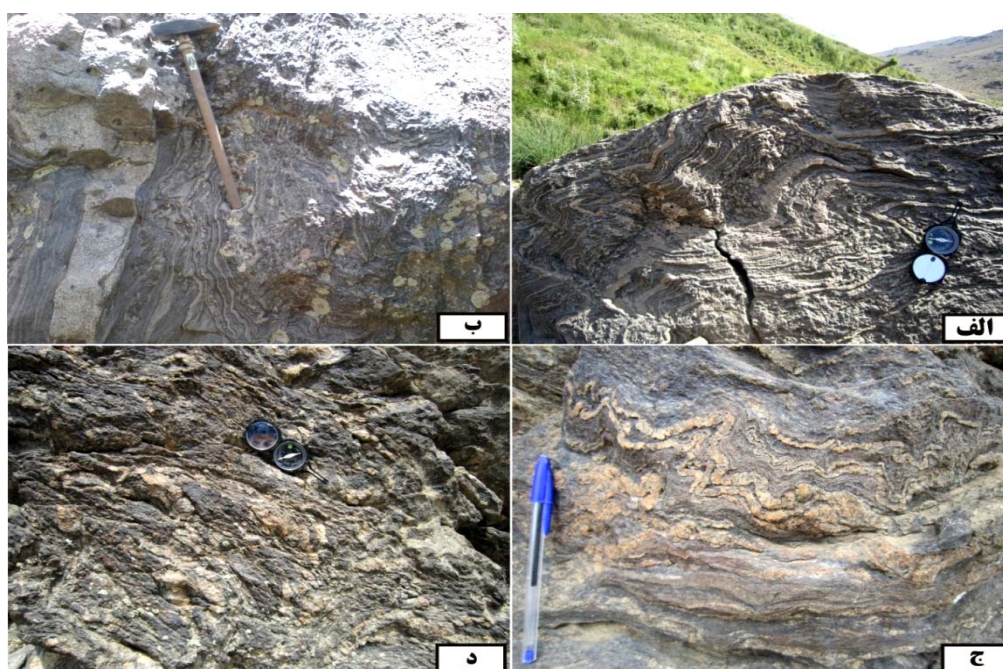
² folded

³ ophtalmitic

⁴ ptycmatic

جدول ۱- اصطلاحات وابسته به میگماتیتهای (اش وورث، ۱۹۸۵: ۱۸۵)

لوکوسوم ^۱	بخش روشن میگماتیته که اغلب دارای ترکیب کانی های کوارتز و فلدسپات و یا فلدسپات است.
ملانوسوم ^۲	قسمت تیره‌ای که در برخی از میگماتیتهای دیده می‌شود و از کانی‌های مافیک غنی است.
نئوسوم ^۳	مجموع لوکوسوم و ملانوسوم
مزوسوم ^۴	بخشی از میگماتیته که متعلق به نئوسوم نیست. ظاهری شبیه یک سنگ دگرگونی معمولی را دارا است و از نظر رنگ بین لوکوسوم و ملانوسوم قرار دارد.
پالتوسوم ^۵	
پروتولیت ^۶	سنگ مادر میگماتیته، که نئوسوم می‌تواند از آن مشتق گردد.
رستیت ^۷	باقی‌مانده بخشی که مواد متحرک از آن خارج شده‌اند.



شکل ۵- نمونه‌هایی از فابریک‌های غالب میگماتیتهای منطقه سیمین. الف) فابریک استروماتیک؛ ب) فابریک چین خورده؛ ج) فابریک پتیگماتیک؛ د) فابریک افتالمیتیک

۳- روش تحقیق

در این پژوهش، تافونی‌های ایجاد شده، در محدوده مورد مطالعه، از جنبه‌های زمین‌شناسی و کانی‌شناسی مورد ارزیابی قرار گرفته است. این بررسی‌ها شامل برداشت‌های صحرایی، نمونه برداری از سنگ‌ها و خاک‌های باقی‌مانده میگماتیته، آزمایش XRD و تهیه مقاطع نازک میکروسکوپی می‌باشد. در ادامه به شرح هر کدام از این موارد پرداخته شده است.

¹ leucosome

² melanosome

³ neosome

⁴ mesosome

⁵ paleosome

⁶ protolite

⁷ restite

۳-۱- برداشت های صحرائی

برای تعیین شکل تافونی‌های موجود در میگماتیت‌های منطقه، پهنا، ارتفاع و عمق تعداد زیادی از حفرات در نمونه‌های بلوکی مختلف اندازه گیری شده‌اند. بر اساس این اندازه‌گیری‌ها به طور میانگین $D > W > H$: عمق، H : ارتفاع، W : پهنا) به دست آمد. حفرات بیشتر به صورت نیم دایره ای می باشند تا بیضوی شکل. درون این حفرات نسبت به قسمت خارجی آنها دارای رنگ روشن‌تری است. با توجه به نقش و اهمیت درزه‌ها در گسترش هوازدگی سنگ‌ها عملیات درزه‌برداری و مطالعه سطح درزه‌ها در منطقه صورت گرفت. نتایج آن در ادامه شرح داده می شود.

۳-۲ - نمونه برداری

نمونه برداری های انجام شده به منظور مطالعه تافونی های منطقه شامل نمونه برداری از سنگ های میگماتیتی محل تافونی ها و نمونه برداری از خاک های باقی مانده از تجزیه میگماتیت ها و تجمع یافته در محل تافونی ها می باشد. نمونه های سنگی به صورت نمونه دستی و نمونه های خاک به صورت تصادفی اخذ شده است.

۳-۳ - تهیه مقاطع نازک

در مطالعات آزمایشگاهی، کانی‌شناسی این سنگ‌ها و ارتباط آنها با پدیده‌ی ژئومورفولوژی تافونی مورد بررسی قرار گرفت. جهت تشخیص خصوصیات کانی‌شناسی سنگ‌های میگماتیتی، تعداد ۱۲ عدد مقطع نازک تهیه شد و مورد بررسی قرار گرفت.

۳-۴ - آزمایش XRD

بعد از نمونه برداری از خاک های برجای حاصل از هوازدگی درون حفرات، آزمایش آنالیز پراش اشعه ایکس یا XRD انجام گردید.

۴- یافته های تحقیق

۴-۱- نتایج برداشت های صحرائی

همان طور که بیان گردید، در بررسی های صحرائی، عملیات درزه برداری و مطالعه سطح درزه ها در منطقه صورت گرفت. نتایج این مطالعات در جدول (۲) به اختصار بیان شده است و با استفاده از نرم افزار Dips.V5 نمودار گل سرخی^۱ و تصویر استریوگرافی این درزه‌ها نیز ترسیم شده است (شکل ۶).

جدول ۲- مهم ترین ویژگی‌های فیزیکی درزه‌های منطقه بر اساس استاندارد انجمن جهانی مکانیک سنگ (آی. اس. آر. ام. ۲، ۱۹۸۱)

تعداد دسته درزه‌ها ^۲	دو دسته درزه به علاوه درزه‌های تصادفی
شیب و جهت شیب درزه‌ها ^۴	$140/75^\circ$ به همراه درزه‌های تصادفی با فراوانی کمتر.
بازشدگی درزه‌ها ^۵	بسته تا خیلی عریض (۱۰۰ - ۰/۱ میلیمتر)
زبری سطح درزه‌ها ^۶	صاف، موج دار و پله‌ای

^۱ Rose diagram

^۲ ISRM

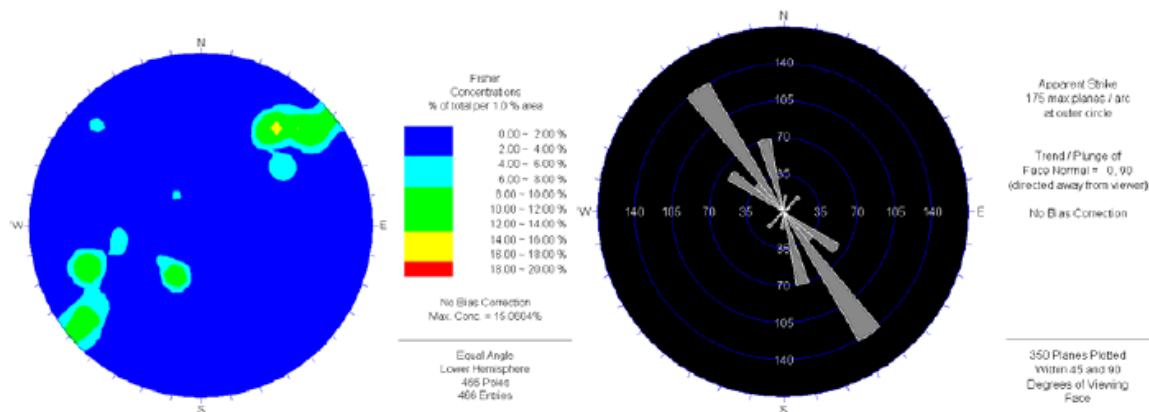
^۳ number of joint set

^۴ dip and dip direction

^۵ opening

^۶ roughness

مواد پر کننده درزه‌ها ^۱	رگه‌های تزریقی کوارتز
فاصله درزه‌ها ^۲	خیلی نزدیک تا نسبتاً نزدیک (۶۰۰ - ۲۰ میلی‌متر)
پیوستگی درزه‌ها ^۳	پیوستگی بسیار کم تا متوسط (۱۰ - ۱ متر)
هوازگی سطح ^۴	هوازگی کم و در بعضی از درزه‌ها به شدت هوازده



شکل ۶- رزداگرام و تصویر استریوگرافی درزه‌های منطقه مورد مطالعه

۲-۴ - نتایج مطالعه مقاطع نازک

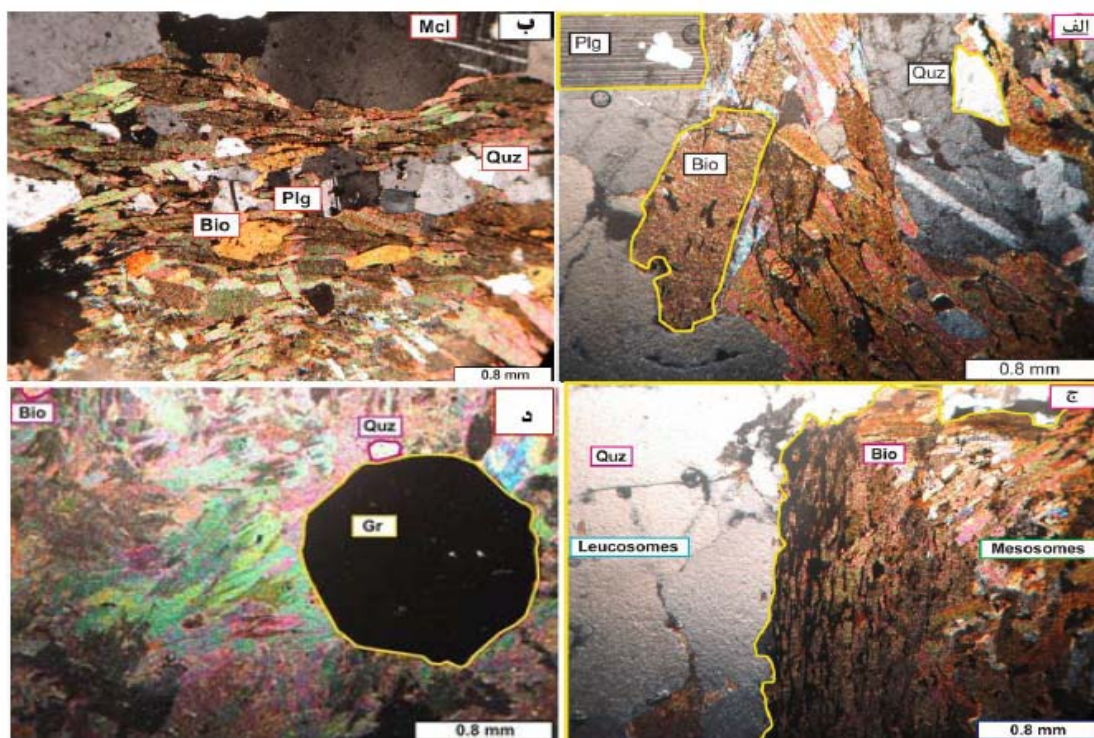
بر اساس مطالعات پتروگرافی، بخش لوکوسوم میگماتیت‌های مورد مطالعه از کانی‌های پلاژیوکلاز، ارتوکلاز، میکروکلین، کوارتز، بیوتیت، مسکوویت، گارنت، آندالوزیت، سلیمانیت، فیبرولیت و کلریت تشکیل شده است. ترکیب لوکوسوم‌ها از جنس ترونجمیت، کوارتز، گرانودیوریت و آلکالی فلدسپات گرانیت می‌باشد. حجم لوکوسوم‌های ترونجمیتی و کوارتزی نسبت به دو نوع دیگر بیش‌تر است (شه‌بازی، ۱۳۸۹: ۷۵). بخش مزوسوم از کانی‌های بیوتیت، مسکوویت، کوارتز، ارتوکلاز، میکروکلین، پلاژیوکلاز، گارنت، آندالوزیت، سلیمانیت، استرولیت، کیانیت، کردیریت و اسپینل تشکیل شده است (شکل ۷). نتایج پتروگرافی حاکی از اختلاف ترکیب کانی‌شناسی در دو بخش لوکوسوم و مزوسوم است. همچنین کانی‌ها از نظر اندازه، بافت و شکل بسیار متنوع می‌باشند. بخش لوکوسوم از کانی‌های درشت دانه و مقاوم تشکیل شده است؛ در حالی که بخش مزوسوم بیشتر حاوی کانی‌های ورقه‌ای و ضعیف‌تر می‌باشد. بسیاری از میگماتیت‌های منطقه بخش ملانوسوم ندارند و در صورت وجود ترکیبی شبیه به بخش مزوسوم دارند.

¹ filling materials

² spacing

³ continuity

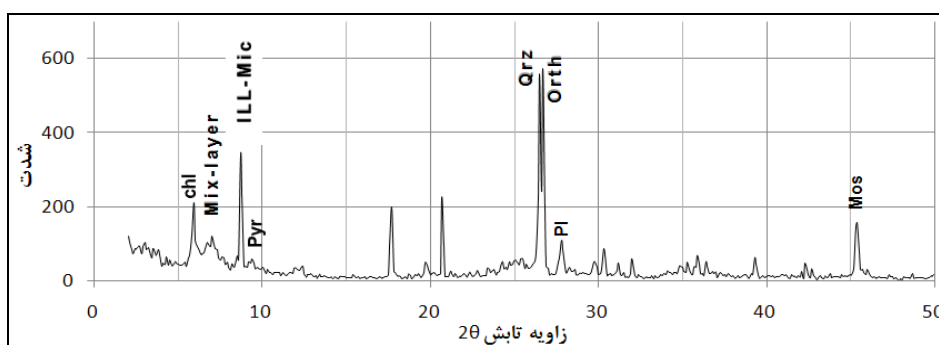
⁴ weathering



شکل ۷- کانی‌های تشکیل دهنده میگماتیت‌ها در الف) فابریک استروماتیک؛ ب) فابریک چین‌خورده؛ ج) فابریک پتینگماتیک؛ د) فابریک افتالمیتیک؛ Bio = بیوتیت، Quz = کوارتز، Plg = پلاژیوکلاز، Gr = گارنت، Ort = ارتوز

۳-۴ - نتایج آزمایش XRD

از خاک برجای حاصل از هوازدگی درون حفرات جهت تشخیص کانی‌های تشکیل دهنده، آنالیز XRD انجام شد. نتایج حاصل از این آنالیز نشان داد که خاک مورد مطالعه حاوی کانی‌های کوارتز، ارتوز، ایلیت، میکا، کلریت، مسکویت، پلاژیوکلاز و پیروفیلیت می‌باشد (شکل ۸). کوارتز یکی از کانی‌های اصلی در میگماتیت‌های منطقه سیمین می‌باشد؛ که در مقابل هوازدگی شیمیایی بسیار پایدار است و به صورت تجزیه نشده باقی می‌ماند.



شکل ۸- نتایج آنالیز XRD خاک مورد مطالعه (Qrz = کوارتز، ill = ایلیت، Pyr = پیروفیلیت، Orth = ارتوز، Pl = پلاژیوکلاز، Mos = مسکویت، Chl = کلریت، Mic = میکا، Mix-layer = مخلوط لایه)

۵- بحث

۵-۱- بررسی عوامل مؤثر بر تشکیل تافونی های میگماتیتی منطقه

مهم ترین و زیباترین پدیده ی ژئومورفولوژیکی در میگماتیت ها، تافونی ها هستند؛ که سازوکار و فرآیندهای تشکیل و گسترش آنها تاکنون مورد بررسی قرار نگرفته است. بر اساس مشاهدات صحرایی، هر چهار نوع از اشکال غالب تافونی ها که قبلاً ویژگی های آنها بیان گردید در میگماتیت های منطقه سیمین شناسایی شدند که عبارت اند از:

الف) تافونی های دامنه ای (شکل ۹- الف)؛

ب) تافونی های قاعده ای (شکل ۹- ب)؛

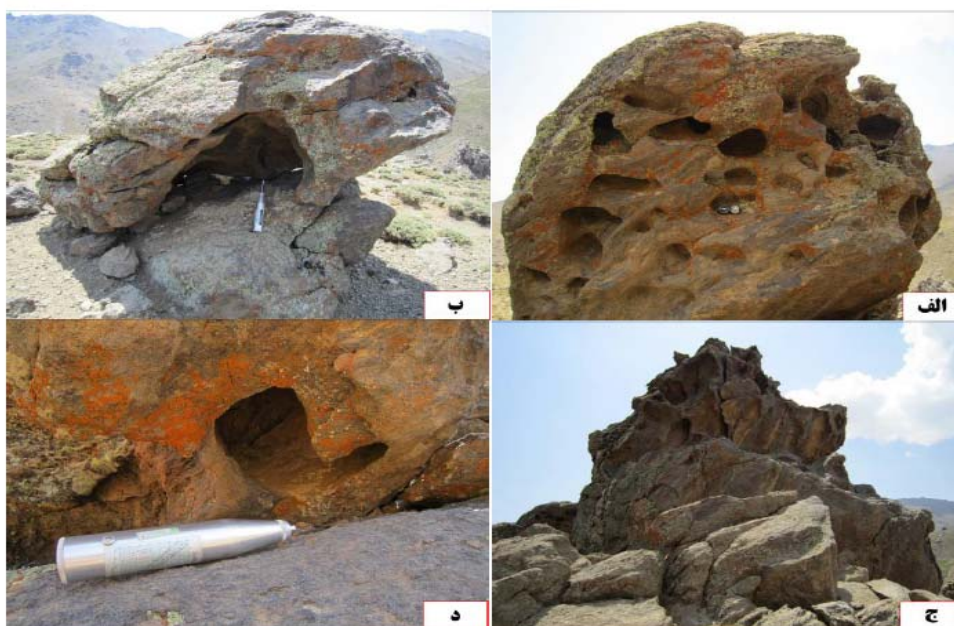
ج) تافونی های شاخی (شکل ۹- ج)؛

د) تافونی های دروغین (شکل ۹- د)؛

فرآیندهای مختلفی در تشکیل و گسترش اشکال تافونی در میگماتیت های جنوب همدان مؤثر هستند. مهم ترین عوامل در تشکیل و گسترش تافونی های منطقه در ادامه شرح داده می شود.

۵-۱-۱- میزان تغییرات درجه حرارت فصلی و شبانه روزی

یکی از عوامل اصلی در تشکیل و گسترش تافونی های منطقه مورد مطالعه، اختلاف دمای زیاد شبانه روزی منطقه و همچنین اختلاف دمای حدود ۴۲ درجه تابستان و زمستان می باشد. هواز دگی مکانیکی صخره ها در اثر تغییرات دمایی می تواند در اثر فرسایش های ناشی از تنش دمایی، به وسیله تناوب گرما و سرما و یا شوک گرمایی یعنی تغییرات شدید و ناگهانی دما ایجاد شود. انبساط حجمی دمایی کوارتز سه برابر فلدسپات است. همچنین کوارتز، فلدسپات و بسیاری از دیگر کانی های معمول تشکیل دهنده سنگ، تحت تاثیر گرما، به طرز بسیار غیر یکنواخت انبساط می یابند. در امتداد یک محور کریستالوگرافی، ۲۰ برابر محور دیگر انبساط رخ می دهد (راهنما راد و همکاران، ۱۳۸۷: ۲۵۲). بنابراین، تغییرات دمایی فشارهایی را داخل و بین دانه های کانی ایجاد می کنند، که باعث جدایش آنها می شود.



شکل ۹- اشکال مختلف تافونی در میگماتیت‌های منطقه سیمین: الف) تافونی دامنه‌ای (دید به سمت جنوب شرق)؛ ب) تافونی قاعده‌ای (دید به سمت جنوب)؛ ج) تافونی شاخی (دید به سمت جنوب شرق)؛ د) تافونی دروغین (دید به سمت شرق). در طول ساعات روز، چند سانتی‌متر بیرونی یک صخره نسبت به قسمت‌های عمیق‌تر انبساط می‌یابند. زیرا، دما با افزایش عمق بسیار سریع کاهش می‌یابد. ولی، وقتی که لایه‌های خارجی‌تر سرد می‌شوند، نسبت به لایه‌های داخلی گرم‌تر، سریع‌تر منقبض می‌شوند. این اثر تأخیری روزانه، تنش‌های کششی و فشاری متناوب در سنگ ایجاد می‌کند، به خصوص در چند میلی‌متر بیرونی صخره، جایی که تغییرات دما بسیار شدید است (وارک و اسمیت، ۱۹۹۴: ۶۲).

با توجه به عدم پوشش گیاهی بر روی سطح میگماتیت‌های منطقه و قرار داشتن سطح این سنگ‌ها در معرض تابش مستقیم خورشید در طول روز و سرمای شب و با لحاظ نمودن ترکیب کانی‌شناسی میگماتیت‌ها (حضور درشت بلورهای مثل آندالوزیت، گارنت، کوارتز در کنار کانی‌های ورقه‌ای و ناپایدار) و اختلاف در میزان انبساط حجمی دمایی این کانی‌ها با هم می‌توان نتیجه گرفت که تغییرات دمایی و اختلاف دمایی شب و روز سهم بسزایی در فرآیند تشکیل و گسترش تافونی‌ها دارد.

۵-۱-۲ - بارندگی و حضور آب

از نظر مطالعات اقلیم‌شناسی، منطقه مورد مطالعه بر اساس روش امبرژه^۱، حد واسط نیمه خشک سرد و نیمه مرطوب می‌باشد (ایلدرمی، ۱۳۸۸: ۳۰). در ناحیه سیمین بارش‌ها در زمستان به صورت برف و در فصل بهار بیشتر باران می‌باشد و در فصل تابستان به ندرت بارندگی صورت می‌گیرد. گزارش‌های سازمان هواشناسی بیانگر مقدار بارش متوسط ۳۱۶/۶ میلی‌متر در سال در ناحیه مورد مطالعه می‌باشد (سایت اداره کل هواشناسی استان همدان).

بر اساس منحنی آمبروترمیک^۲ ماه‌های خشک سال، اردیبهشت تا شهریور می‌باشند (ایلدرمی، ۱۳۸۸: ۳۲). گرم‌ترین ماه‌های سال در این منطقه تیر و مرداد با متوسط دمای ۳۴ درجه و سردترین ماه‌های سال دی و بهمن با متوسط دمای ۸- درجه سانتی‌گراد است (جدول ۳). میانگین دمای سالانه همدان ۱۱/۳ درجه سانتی‌گراد ثبت شده است. تعداد روزهای یخبندان برای شهر همدان در ایستگاه فرودگاه همدان ۱۳۶ روز در سال ثبت گردیده است (سایت اداره کل هواشناسی استان همدان). همچنین داشتن ارتفاع بالا باعث داشتن اقلیم سرد و نیمه خشک در این ناحیه شده است. بنابراین، در این منطقه شدت هوازدگی فیزیکی در اثر پدیده‌هایی همچون یخبندان بالا است.

جدول ۳: میانگین دما و بارش برای همدان (سایت اداره کل هواشناسی استان همدان)

دما	ماه	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن
دمای بیشینه (C°)	۲/۹	۵/۱	۱۱/۰	۱۸/۳	۲۳/۴	۳۰/۱	۳۴/۲	۳۴/۱	۲۹/۴	۲۱/۵	۱۳/۳	۶/۳
دمای کمینه (C°)	-۸/۰	-۶/۴	-۱/۳	۴/۴	۷/۳	۱۰/۳	۱۳/۹	۱۲/۷	۷/۵	۳/۷	-۵/۰	-۴/۴
بارش (mm)	۳۶/۹	۴۱/۵	۵۵/۲	۴۲/۰	۲۵/۸	۲/۷	۱/۹	۲/۳	۰/۵	۲۶/۳	۳۴/۷	۴۶/۸

^۱ Embereger method

^۲ embrothermic curve

در منطقه مورد مطالعه به دلیل تسلط آب و هوای نیمه خشک متمایل به سرد مرطوب، ویژگی های سنگ شناسی و توپوگرافی، هوازگی مکانیکی به ویژه پدیده کریوکلستیسسم^۱ در تخریب سنگ ها و تشکیل اشکال تافونی نقش عمده ای دارد. تغییرات درجه حرارت از طریق پدیده های کریوکلستیسسم و ترموکلستیسسم^۲ و رطوبت به وسیله پدیده های هیدروکلستیسسم^۳ و هالوکلستیسسم^۴ اثرات مهمی را بر سنگ ها و تسریع فرآیند هوازگی وارد می کنند (کرمی، ۱۳۸۳: ۶۹).

با توجه به تعداد روزهای یخبندان در منطقه سیمین، ماندگاری توده های برف تا اواخر خرداد ماه و حضور دائمی آب، وقوع هوازگی ناشی از ذوب و انجماد آب در درز و شکاف سنگ ها و تکرار این فرآیند در طولانی مدت، یک پدیده حتمی است. این فرآیند منجر به تضعیف سطوح و طبیعت پیوند بین کانی های تشکیل دهنده سنگ شده و حالت قفل شدگی کانیایی را از بین می برد.

واکنش های شیمیایی که بین آب و فاز جامد سنگ اتفاق می افتد، باعث تغییر ترکیب شیمیایی کانی ها شده (هوازگی شیمیایی) و اکثر این تغییرات در جهت تضعیف مقاومت سنگ عمل می کنند. همچنین نفوذ آب و یخ به داخل توده سنگ از طریق درزه و شکستگی ها باعث افزایش میزان هوازگی فیزیکی توده سنگ خواهد شد (دن و همکاران، ۲۰۰۰: ۱۹۹). آب نافذ در مواد هوازده به سنگ مادر رسیده و با اعمال یخبندان و ذوب یخ موجب تخریب مخفی یا کریپتوآلتراسیون^۵ در آنها می گردد. یخ زدن آب با حدود ۹٪ افزایش حجم همراه است، این افزایش حجم موجب افزایش مدول الاستیسیته یخ و اعمال فشار بیشتر به توده های سنگی می شود (گودبوت و همکاران، ۲۰۰۰: ۶۳).

سطح سنگ پس از هر بارندگی بلافاصله خشک می شود؛ در حالی که رطوبت سطوح داخلی به مدت زیادتری در سنگ باقی می ماند. در این شرایط سطح بیرونی سخت شده، در حالی که قسمت های درونی آن ضعیف تر و سست تر می شود (خانه باد و همکاران، ۱۳۸۷: ۱۹۲). پس از مدتی گودی هایی در سنگ (در قسمت مزوسوم میگماتیت ها که حاوی کانی های ناپایدار می باشد) ایجاد می شود، به گونه ای که شرایط رطوبتی درون این حفرات با اطراف متفاوت می باشد و درون حفرات بیشتر به دلیل فرآیند پوسته پوسته شدن و فروپاشی دانه ای کلاً سست شده و قابلیت پودر شدن را یافته، که این امر خود با گذشت زمان رشد و توسعه بیشتر حفرات تافونی را موجب می شود.

۵-۱-۳- بافت و ترکیب کانی شناسی میگماتیت ها و خاک های باقی مانده

از دیگر عوامل مؤثر بر تشکیل حفرات تافونی، ترکیب و بافت سنگ های میزبان می باشند. میگماتیت های منطقه سیمین دارای بافت گرانولار بوده و از کانی های سیلیکاته دانه متوسط تا درشت تشکیل شده اند. در بررسی های صحرایی مشخص شد، که بخش لوکوسوم میگماتیت ها به صورت برجسته تر از بخش مزوسوم دیده می شود. در بعضی نقاط نیز بخش مزوسوم به صورت فرورفتگی و حفره های کوچک و توخالی قابل مشاهده است. با توجه به ناهمگن بودن میگماتیت ها و این که بخش لوکوسوم در این سنگ ها از کانی های درشت بلور و مقاوم در برابر عوامل هوازگی (مانند کوارتز، گارنت، آندالوزیت) تشکیل شده و بخش مزوسوم حاوی کانی های ورقه ای و با مقاومت کم تر در مقابل فرآیندهای هوازگی (مانند کلریت، ایلیت، مسکوویت) می باشند.

¹ cryoclastism

² thermoclastism

³ hydroclastism

⁴ haloclastism

⁵ cryptoalteration

همچنین با مدّ نظر قرار دادن اختلاف ضریب انبساط این کانی‌ها نسبت به تغییرات دمایی، تشکیل اشکال تافونی و هوازگی حفره‌ای در سنگ‌های میگماتیته، به عنوان یک پدیده‌ی بارز در منطقه قابل توجیه خواهد بود.

تافونی‌های منطقه بیشتر در فابریک افتالمیتیک دیده می‌شوند. عوامل مختلف هوازگی موجب تجزیه و تخریب کانی‌های بخش مزوسوم و در نتیجه ایجاد حفرات کوچک در سنگ می‌شوند و بخش لوکوسوم به صورت برجسته‌تر دیده خواهد شد. این فرآیند خود باعث قرار گرفتن هرچه بیشتر بخش لوکوسوم در مقابل عوامل مختلف هوازگی و سست شدن این بخش می‌شود. ادامه این فرآیند موجب گسترش حفرات شده و مناظر تافونی را در سنگ پدید می‌آورد.

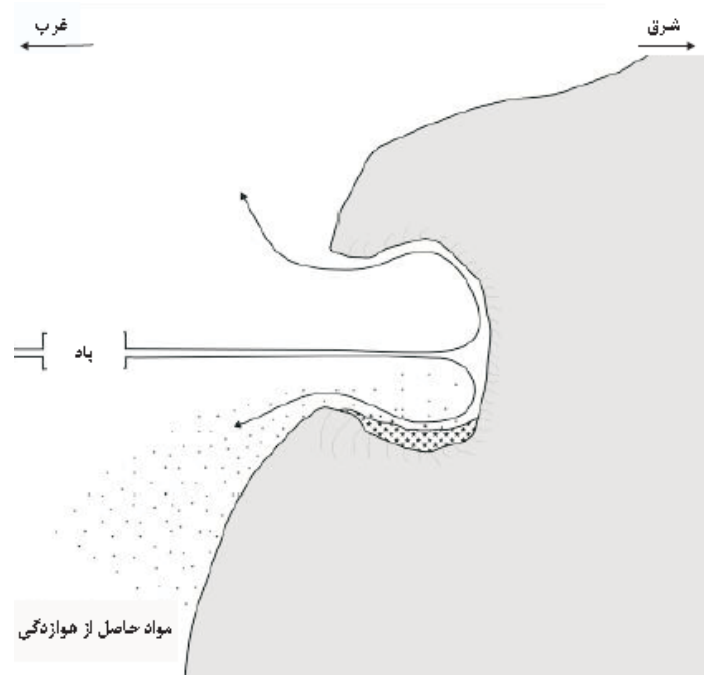
برخی از کانی‌ها، مانند فلدسپات‌ها و میکاها، کانی‌های ناپایداری بوده، که حساسیت زیادی به هوازگی از خود نشان می‌دهند، به طوری که به سربسیت و کائولینیت تبدیل شده است و این کانی‌ها نیز به نوبه خود نقش مهمی در فروپاشی سنگ دارند. رطوبتی که از محل‌های سیستم درزه‌های موجود در میگماتیته‌ها به سنگ وارد می‌گردد، تمایل به هوازگی شیمیایی بیوتیت و فلدسپات را درون سنگ به دنبال خواهد داشت. پروفیل‌های هوازده میگماتیته، بیشتر حاوی کانی‌های کوارتز، ایلیت، میکا و کلریت هستند. کوارتز یکی از کانی‌های اصلی در میگماتیته‌های منطقه سیمین می‌باشد؛ که در مقابل هوازگی شیمیایی بسیار پایدار است و به صورت تجزیه نشده، باقی می‌ماند. بلورهای گارنت با بیش از ۷۰٪ آلماندین (آهن) و مقدار قابل توجهی اسپسارتین (منگنز)، به عنوان یکی از فراوان ترین پورفایروبلست‌ها در میگماتیته‌های منطقه حضور دارند (بهراری فر، ۱۳۷۶: ۵۵). بسیاری از دانه‌های گارنت دارای تغییر ترکیب در درون خود (زونینگ شیمیایی) هستند. آن‌ها به همین علت دچار سست شدگی و تخریب شده‌اند، به گونه‌ای که در خاک حاصل از تخریب و هوازگی سنگ‌های میگماتیته منطقه به وفور دانه‌های گارنت (با رنگ قهوه‌ای سوخته تا تیره) دیده می‌شوند؛ که با فشار انگشتان دست خرد می‌شوند.

مطالعه مقاطع میکروسکوپی میگماتیته‌ها نشان می‌دهد که بیشتر کانی‌های ناپایدار تحت تأثیر دگرسانی شدید قرار گرفته‌اند. بنابراین، یکی از فرآیندهای مؤثر در تشکیل و گسترش تافونی‌ها در میگماتیته‌های منطقه مورد مطالعه، فروپاشی کانی‌های ناپایدار می‌باشد.

همان طور که بیان گردید، از خاک برجای حاصل از هوازگی درون حفرات جهت تشخیص کانی‌های تشکیل دهنده، آنالیز XRD انجام شده است. نتایج حاصل از این آنالیز نشان داد که خاک مورد مطالعه حاوی کانی‌های کوارتز، ارتوز، ایلیت، میکا، کلریت، مسکویت، پلاژیوکلاز و پیروفیلیت می‌باشد.

۵-۱-۴- شدت و نوع بادهای غالب منطقه

میگماتیته‌های مورد مطالعه در یک منطقه کوهستانی با ارتفاع ۲۴۴۵ متر از سطح دریا قرار گرفته‌اند. در این منطقه، وزش بادهای با شدت متوسط تا زیاد در اکثر روزهای سال یک پدیده معمول می‌باشد. جهت وزش بادهای غالب در منطقه، غرب و شمال غرب می‌باشد. بررسی‌های صحرایی نشان داد که جهت تشکیل غالب حفرات تافونی به سمت غرب و شمال غربی می‌باشد. وزش این بادهای موجب انتقال مواد سست حاصل از هوازگی درون حفرات تافونی به بیرون می‌شود و سطح درونی حفرات در معرض مستقیم دیگر عوامل مؤثر بر تشکیل تافونی‌ها قرار می‌گیرد. این مکانیسم در طولانی مدت موجب گسترش حفرات تافونی می‌گردد (شکل ۱۰).



شکل ۱۰- سازوکار باد در فرآیند تشکیل و گسترش حفرات تافونی

۵-۱-۵- زمین شناسی ساختاری

زمین شناسی ساختاری نیز یکی از عوامل مهم در تشکیل و توسعه حفرات تافونی به شمار می رود. منطقه مورد مطالعه در یک دره گسلی واقع شده است و منطقه به صورت یک پهنه برشی می باشد. آثار پهنه برشی در میگماتیت ها به صورت تشکیل برگواره و خطوط میلونیتی^۱، پرفیروکلاست های پوششی^۲، چین های نامتقارن^۳ و چین های غلافی^۴ دیده می شود. این آثار به دلیل درشت بودن کانی ها، بیشتر در نمونه دستی خود را نشان می دهند (ایزدی کیان و همکاران، ۱۳۸۹: ۱۲۲). اختلاف مقاومت مکانیکی لایه ها در میگماتیت ها باعث می شود که لایه های مقاوم در اثر کشش موازی با لایه بندی، شکسته شده و در بین آنها سنگ های نامقاوم اطراف یا توده های نئوسومی جدا شده از جریان پیدا کنند و موجب ایجاد اشکال بودیناژ مانند می شوند. همچنین به دلیل شرایط خاص منطقه، انواع درزه های تکتونیکی و غیر تکتونیکی قابل مشاهده می باشد. ویژگی های این درزه ها متنوع است و بسیاری از آنها با مواد ثانویه از جمله خاک های حاصل از هوازدگی خود سنگ های میگماتیته و یا کوارتز تزریقی پر شده اند (شکل ۱۱). همه موارد ذکر شده موجب هوازدگی میگماتیت ها می شود و یا سرعت هوازدگی ناشی از دیگر عوامل را تسریع می کند.

¹ mylonitic lines

² mantle porphyroclast

³ asymmetric folds

⁴ sheath folds



شکل ۱۱- نمونه‌هایی از تأثیر تنش‌های تکتونیکی و مکانیکی بر روی میگماتیت‌های منطقه سیمین. الف) جهت یافتگی گسل‌ها و درزه‌ها و پرشدگی آنها با بلورهای کوارتز (لوکوسوم‌ها) (دید به سمت شمال غرب)؛ ب) درزه‌های حاصل از اختلاف تنش‌های تکتونیکی در منطقه (دید به سمت شمال).

۵-۱-۶- هوازدگی بیولوژیکی

هوازدگی بیولوژیکی^۱ یا بیومکانیکی^۲ نوع دیگری از هوازدگی است؛ که توسط موجودات زنده (گیاهان، ریشه‌ی درختان، باکتری‌ها) در سنگ‌ها اتفاق می‌افتد. این نوع هوازدگی به صورت رشد ریشه‌های گیاهان در درون درزه‌ها و ترک‌های ایجاد شده، در میگماتیت‌های منطقه سیمین دیده می‌شود (شکل ۱۱). با توجه به شیب زیاد و عدم پوشش گیاهی مناسب بر روی دامنه‌های منطقه، خاک حاصل از هوازدگی میگماتیت‌ها بر اثر فرآیندهایی مانند بارش باران، ذوب برف‌ها و تشکیل مسیرهای زهکشی فصلی، سست شدن توسط عبور احشام و ورزش باد به سمت پایین دره‌ها جابه‌جا می‌شود. بدون وجود خاک‌های توده‌ای، ریشه درختان برای به دست آوردن آب و مواد معدنی به درون درز و شکاف‌ها (جایی که لایه‌ای از هیدروکسید آهن و دیگر کانی‌های رسی و آب وجود دارند) نفوذ می‌کند و باعث رشد درختان و تخریب سنگ می‌شوند.

مواد هوازده درون حفرات تافونی، منبع مناسبی برای رشد گیاهان محسوب می‌شود. با توجه به این که درون این حفرات غالباً نسبت به محیط بیرونی دارای رطوبت بیشتری می‌باشد، محیط رشد مناسبی برای گیاهان فراهم می‌شود. ریشه‌ها مسیرهای کم مقاومت و سست موجود در سنگ‌ها را طی می‌کنند و خود را با هر گونه بی‌نظمی حاصل از رشد ترک‌ها تطبیق می‌دهند. این ریشه‌ها موجب می‌شوند که سطوح ضعف میگماتیت‌ها (درزه‌ها) همیشه مرطوب باشند و از نظر فعل و انفعالات شیمیایی فعال نگه داشته شوند. مرطوب بودن دایمی سطوح درزه‌های درون حفرات، فعالیت باکتری‌ها را تشدید می‌کند. پژوهش‌های صورت گرفته روی سنگ‌های با ترکیب مشابه میگماتیت‌ها، نشان داده است که پلاژیوکلازها و بیوتیت‌ها به شدت نسبت به فعالیت باکتری باسیلوس سابتیلیس^۳ واکنش نشان می‌دهند و تجزیه می‌گردند (سونگ و همکاران، ۲۰۰۷: ۲۷۷).

^۱ biological weathering

^۲ biomechanical weathering

^۳ *Bacillus subtilis*



شکل ۱۲- نمونه‌هایی از رشد و نفوذ ریشه درختان در میگماتیتهای منطقه سیمین به عنوان هوازدگی بیومکانیکی (دید به سمت جنوب شرق).

۶- نتیجه گیری

ناهمگن بودن سنگ‌های میگماتیتهی و اختلاف ترکیب کانی شناسی در دو بخش لوکوسوم و مزوسوم، باعث ایجاد اختلاف مقاومت بخش‌های مختلف این سنگ‌ها در برابر فرآیندهای متعدّد هوازدگی شده است. حضور کانی‌های درشت بلور و مقاوم مانند کوارتز، گارنت، آندالوزیت در کنار کانی‌های ورقه‌ای و ضعیف‌تر مانند کلریت، ایلیت و مسکوویت، و با مد نظر قرار دادن اختلاف ضریب انبساط این کانی‌ها نسبت به تغییرات دمایی، تشکیل اشکال تافونی و هوازدگی حفره‌ای در سنگ‌های میگماتیتهی، به عنوان یک پدیده‌ی بارز در منطقه قابل توجیه خواهد بود. تافونی دامنه‌ای، قاعده‌ای، شاخی و دروغین چهار نوع از اشکال غالب تافونی در میگماتیتهای منطقه سیمین می‌باشند که منظره جالب توجهی به منطقه داده‌اند. به طور کلی میزان تغییرات درجه حرارت فصلی و شبانه‌روزی، بارندگی و حضور آب، بافت و ترکیب کانی‌شناسی، شدت و نوع بادهای غالب منطقه، زمین شناسی ساختاری و هوازدگی بیولوژیکی از مهم ترین فرآیندهای تشکیل و گسترش تافونی‌ها در میگماتیتهای منطقه می‌باشند. همچنین، از دیدگاه ژئومورفولوژی کاربردی این اشکال می‌تواند جزو پدیده‌های خطرناک باشند. زیرا، با توسعه احداث سد در محدوده مورد مطالعه، امکان غوطه‌ور شدن سنگ‌های حاوی این اشکال وجود داشته و می‌تواند باعث فرار آب از مخزن سد گردد. بنابراین، تافونی‌ها را باید از منظر این شاخه از ژئومورفولوژی مورد مطالعه قرار داد.

منابع و مآخذ

- ۱- اقلیمی. بهروز؛ (۱۳۷۹). نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ همدان. سازمان زمین شناسی اکتشافات معدنی کشور.
- ۲- ایلدرمی. علیرضا؛ (۱۳۸۸). بررسی مورفولوژی پرتگاه‌ها و تحول پسروری جبهه شمالی توده کوهستانی الوند. نشریه جغرافیا و برنامه ریزی (دانشگاه تبریز)، دوره ۱۴، شماره ۳۰. صص ۵۲-۲۷.
- ۳- ایزدی کیان. لیلی؛ علوی. احمد؛ محجل. محمد؛ (۱۳۸۹). تحلیل ساختاری پهنه برشی سیمین - دره مراد بیک (جنوب همدان). فصلنامه علوم زمین، دوره ۱۹، شماره ۷۵. صص ۴۶-۳۹.
- ۴- بهاری فر. علی اکبر؛ (۱۳۷۶). نگرشی نو بر پتروژنز سنگ‌های دگرگونی ناحیه‌ای منطقه همدان. پایان نامه کارشناسی ارشد (گرایش پترولوژی)، دانشگاه تربیت معلّم.
- ۵- جعفری. سیده راضیه؛ (۱۳۸۵). پترولوژی میگماتیت‌ها و سنگ‌های پلوتونیک منطقه جنوب سیمین. پایان نامه کارشناسی ارشد (گرایش پترولوژی)، دانشگاه بوعلی سینا همدان.
- ۶- خانه‌باد. محمد؛ موسوی حرمی. رضا؛ محبوبی. اسدالله؛ (۱۳۸۷). عوامل کنترل کننده هوازدگی حفره‌ای (تافونی) در گرانیتهای جنوب مشهد و سازند شمشک واقع در بخش شمالی بینالود. مجله‌ی جغرافیا و توسعه‌ی ناحیه‌ای، شماره ۱۱. صص ۲۰۸ - ۱۸۷.
- ۷- خادمی. ابراهیم؛ کرمی. محسن؛ صداقت. محمد اسماعیل؛ هاشمی نسب. محمودرضا؛ (۱۳۸۹). معرفی ژئوتوریسم، ساخت لانه زنبوری، شرق سروستان (استان فارس). بیست و نهمین گردهمایی علوم زمین، صص ۵۵-۶۲.
- ۸- راهنما راد. جعفر؛ صاحب زاده. بهروز؛ میرحاجی زاده. علی اصغر؛ (۱۳۸۷). توصیف هوازدگی و سست شدگی در گرانیتهای زاهدان از دیدگاه مهندسی سنگ. فصلنامه زمین شناسی کاربردی، دوره چهارم، شماره ۴. صص ۲۵۷-۲۴۷.
- ۹- سایت اداره کل هواشناسی استان همدان. www.hamadanmet.ir.
- ۱۰- شهبازی. حسین؛ (۱۳۸۹). پترولوژی مجموعه سنگ‌های آذرین و میگماتیت‌های کمپلکس الوند و توده نفوذی آلموقلاغ همدان و ارتباط ژنتیکی بین آنها. رساله دکتری زمین شناسی، گرایش پترولوژی، دانشگاه شهید بهشتی.
- ۱۱- کتابی. لقمان؛ (۱۳۹۱). مطالعه زمین شناسی مهندسی میگماتیت های منطقه سیمین (جنوب همدان). پایان نامه کارشناسی ارشد زمین شناسی مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا همدان.
- ۱۲- کرمی. فریبا؛ (۱۳۸۳). فرآیندهای هوازدگی و تأثیر آنها در نواحی شهری و روستایی مطالعه‌ی موردی؛ مناطق کوهستانی آذربایجان. مجله جغرافیا و توسعه، دوره ۲، شماره ۴. صص ۸۰-۶۱.
- ۱۳- مهرشاهی. داریوش؛ (۱۳۷۴). آشنایی با پدیده‌های ژئومورفولوژی: تافونی. مجله رشد آموزش جغرافیا، شماره ۳۹. صص ۲۲-۲۰.

14- Ashworth, J. R., (1985). *Migmatites*, Blackie, Glasgow, 302pp.

15- Blackwelder, E., (1929). *Cavernous rock surface of the desert*, American Journal of Science, Vol. 17: 393-399.

16- Conca, J. L. & Rossman, G. R., (1985). *Core softening in cavernously weathered tonalite*, Journal of Geology., Vol. 93(1): 59-73.

17- Cooke, R., and Smalley, I.J., (1968). *Salt weathering in desert*, Nature 220, 1226 - 1227.

- 18- Dehn, M., Burge, G., Buma, J. & Gasparetto, P., (2000). **Impact of climate change on slope stability using expanded downscaling**, Engineering Geology., Vol. 55: 193-204.
- 19- El Sharkawy, M., (2009). **Geomorphology of Tafoni caves in Dahab area south to Sinai peninsula**, Egyptian Journal Of Environmental Change., Vol. 1: 72-80.
- 20- Godbout, S., Chenard, L., & Marquis, A., (2000). **Instantaneous Young's modulus of ice from liquid manur**, Canadian Agricultural Engineering, Vol. 42, No. 2, 6.1-6.14.
- 21- ISRM, (1981). **Basic geotechnical description of rock masses**, International Society of rock mechanics Commision on the classification of rock and masses, Int Rock Mech Min Sci Geomech., Vol. 18: 85-110.
- 22- Matsukura, Y. & Tanaka, Y., (2000). **Effect of rock hardness and moisture content on tafoni weathering in granite of Mount Doeg-Sung, Korea**, Geografiska Annaler., Vol.82: 59-67.
- 23- Matthess, G., (1964). **Zur Vergrussung der Magmatischen Tiefengesteine des Odenwaldes**, Notizbl. Hess. LA f. Bodenfor-schung., Vol. 92: 160-178, Wiesbaden.
- 24- Mehnert, K. R., (1968). **Migmatites and the origin of granitic rocks**, Elsevier. Amsterdam., 400 pp.
- 25- 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.
- 26- 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., Vol. 22(1): 21-43.
- 27- Song, W., Ogawa, N., Oguchi, C. T., Hatta, T. & Matsukura, Y., (2007). **Effect of bacillus subtilis on granite weatheing: A laboratory experiment**, Catena (Cremlingen)., Vol. 70(3): 275-281.
- 28-Tshang, H.L., (1966). **Geomorphological observations on weathering forms in Hong Kong and some other humid regions of Southeast Asia**, Chung Chi Journal, 5(2), 206-226.
- 29- Viles, H.A., (2001). **Scale issues in weathering studies**, Geomorphology., Vol. 41: 63-71.
- 30- Warcke, P. A. & Smith, B. J., (1994). **Short-term rock temperature fluctuations under simulated hot desert conditions: some preliminary results**, In: Robinson, D. A. & Williams, R. B. G. (Eds.), Rock weathering and landform evolution, John Wiley & Sons Ltd., Chichester, UK: 57-70.