

کانی‌شناسی، زمین‌شیمی و بافت‌شناسی سنگ‌های پرلیتی - اسفرولیتی گلوکم، جنوب غرب کرمان: شواهدی از فرآیندهای واشیشه‌ای شدن در محیط غیردریایی

سروه زارعی، سارا درگاهی*، محسن آروین، علیرضا شاکر

گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه شهید باهنر کرمان، ایران

(دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۸/۵، نسخه نهایی: ۱۴۰۳/۱۰/۸)

چکیده: سنگ‌های پرلیتی - اسفرولیتی گلوکم با سن میوسن، در بخش جنوبی مجموعه ماگمایی ارومیه - دختر شامل درشت بلورهای پلاژیوکلاز، بیوتیت، کلینوپیروکسن و آمفیبول هستند. آنها انواع بافت‌های ناشی از واشیشه‌ای شدن را متناسب با تغییرات دمایی و حضور سیال‌ها نشان می‌دهند، به طوری که در بالاترین دما، بافت‌های پرلیتی طی فرایند آگیری و انبساط سریع تشکیل شده و در ادامه با کاهش دما، عوارض متعددی شامل بافت حبابی، اسفرولیت‌های منفرد و اسفرولیت‌های خوشه‌ای شکل گرفته‌اند. سرانجام در پایین‌ترین دما، رشد بلورهای رشته‌ای و گسترش بافت جریان نواری رخ داده است. همه این بافت‌ها منجر به گسترش روزافزون نهان - بلورها تا ریزبلورها و حذف تدریجی شیشه شده است. پراش پرتوی ایکس (XRD) وجود کانی‌های پلاژیوکلاز، فلدسپار پتاسیم، کریستوبالیت و دیوپسید را در این سنگ‌ها تأیید می‌کند. بر اساس بررسی‌های زمین‌شیمیایی، این سنگ‌ها دارای ترکیب ریولیتی، نیمه قلیایی و ماهیت متآلومین هستند. به نظر می‌رسد که سنگ‌های مورد بررسی همه دارای خاستگاه یکسان بوده و طی فرایند آگیری و واشیشه‌ای شدن جریان‌های آذرآواری در محیطی غیردریایی رخ داده باشند. ترکیب شیمیایی این سنگ‌ها شبیه سایر پرلیت‌های صنعتی جهان است.

واژه‌های کلیدی: پرلیت؛ اسفرولیت؛ بافت حبابی (لیتوفیزا)؛ پراش اشعه ایکس (XRD)؛ مجموعه ماگمایی ارومیه دختر؛ کرمان.

مقدمه

مرکز) می‌شود [۱، ۲]. به طور معمول، فرآیند آگیری شیشه همزمان با سرد شدن جریان گدازه یا پس از توقف و سرد شدن کامل جریان گدازه رخ می‌دهد. بر اساس مقدار آب (۲ تا ۱۰ درصد وزنی) در ساختار شیشه، سنگ‌های پرلیتی را به انواع سیاه تا خاکستری رنگ تقسیم می‌کنند [۳]. وجود بافت‌های متنوع در پرلیت‌ها چون اسفرولیت‌های با شکل و اندازه متنوع، بافت حبابی و بافت‌های جریان نواری همواره دارای اهمیت ویژه‌ای بوده است، زیرا برپایه این بافت‌ها می‌توان به بینش عمیقی از تغییرات دمایی و شرایط فیزیکی در زمان سرد شدن

به طور کلی، سنگ‌های پرلیتی در گنبد‌های آتشفشانی سیلیکاتی، جریان‌های آتشفشانی، جریان‌های خاکستر، توف‌های جوش خورده، دایک‌ها و لاکولیت‌ها دیده می‌شوند. از مشخصه‌های مهم این سنگ‌ها ریز شکستگی‌های هم مرکز گسترش یافته در آنهاست. تصور بر این است که سنگ‌های پرلیتی ناشی از آبدار شدن ابسیدین و سنگ‌های آتشفشانی ریولیت و آندزیت با بافت شیشه‌ای پورفیری هستند که طی فرآیند آگیری، بافت شیشه‌ای زمینه تبدیل به بافت پرلیتی (ریز شکستگی‌های هم

*نویسنده مسئول، تلفن: ۰۳۴۳۱۳۲۲۲۳۰، پست الکترونیکی: s.dargahi@uk.ac.ir

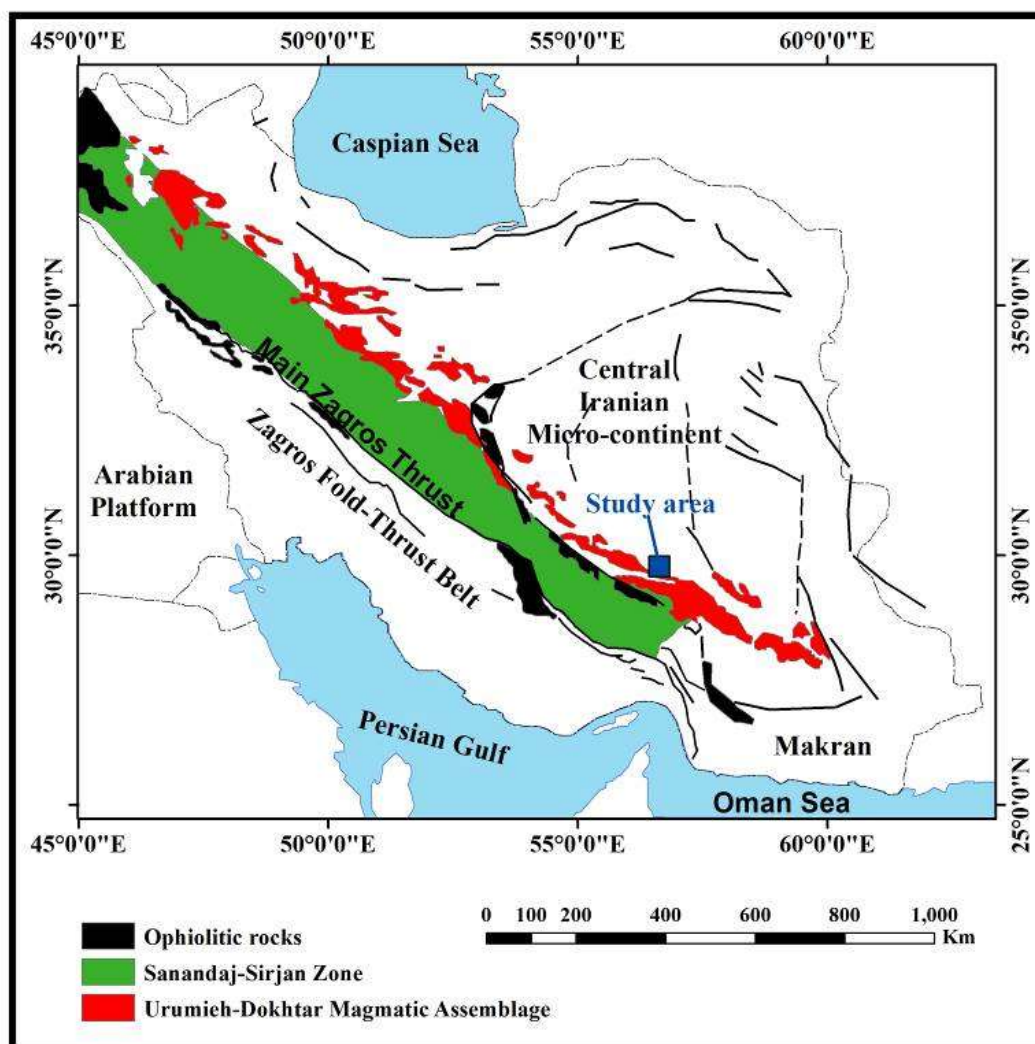


بحث و بررسی

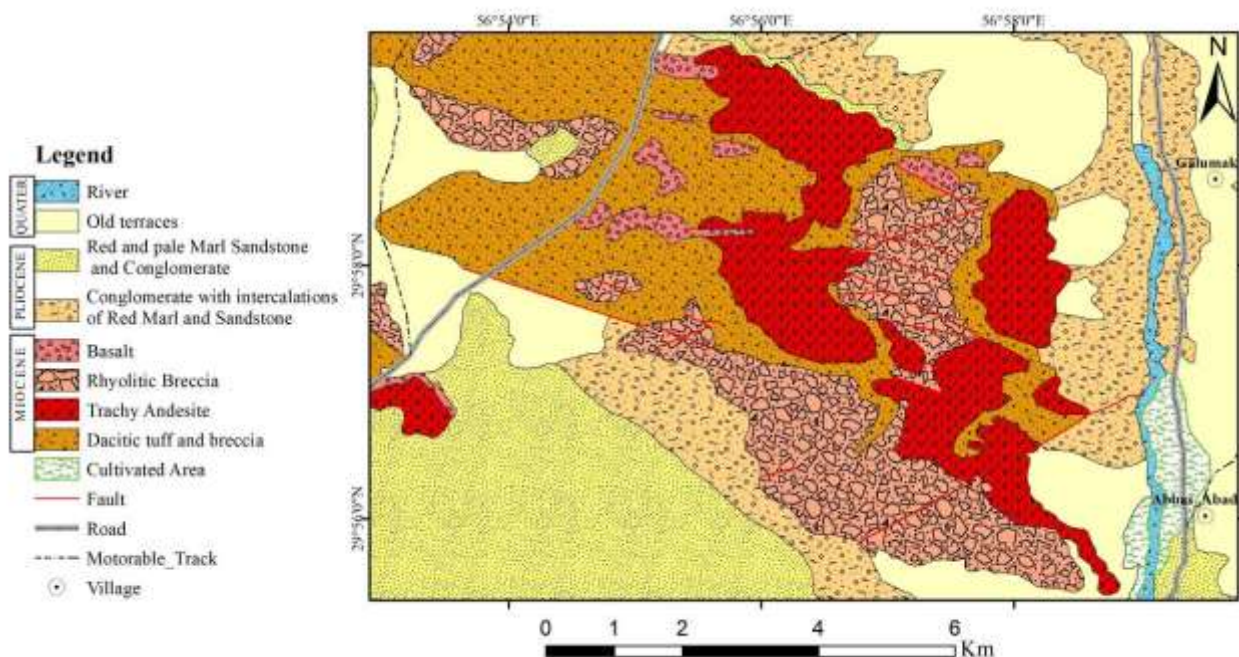
موقعیت زمین‌شناسی و جغرافیایی

سنگ‌های پرلیتی-اسفرولیتی منطقه گلومک در کمربند دهج-ساردوئیه [۶] که منطبق با بخش جنوبی مجموعه ماگمایی ارومیه-دختر است، رخنمون دارند (شکل ۱) [۷]. این سنگ‌ها به عنوان بخشی از مجموعه فوران‌های آتشفشانی نئوژن (میوسن) در منطقه گلومک از توابع شهرستان بردسیر در ناحیه کرمان به حساب می‌آیند (شکل ۲) [۸]. بر اساس پژوهش زارعی [۹]، پیدایش سنگ‌های منطقه مورد بررسی در ارتباط با فروانش سنگ کره اقیانوسی نئوتتیس به زیر صفحه ایران مرکزی است.

جریان‌های گدازه و آذرآواری دست یافت [۴، ۵]. منطقه گلومک در جنوب غرب کرمان، مجموعه‌ای از سنگ‌های پرلیتی تا اسفرولیتی گسترش یافته است که با سنگ‌های آذرآواری و آتشفشانی اسیدی وابسته به میوسن همراهی می‌شوند. در این پژوهش، افزون بر ساخت، بافت و ترکیب شیمیایی سنگ‌های پرلیتی و اسفرولیتی، ارتباط بین سنگ‌های پرلیتی با سنگ‌های اسفرولیتی و همچنین سنگ‌های میزبان آتشفشانی-آذرآواری بررسی شده است. همچنین شرایط محیطی منطقه در زمان فوران نیز مورد توجه قرار گرفته است.



شکل ۱ پهنه‌های کوهزاد زاگرس [۷] و موقعیت منطقه گلومک بر آن. چنان که دیده می‌شود، منطقه مورد بررسی در مجموعه ماگمایی ارومیه دختر واقع است.



شکل ۲ نقشه زمین شناسی منطقه گلومک، برگرفته از مرجع [۸] با تغییرات. سنگ‌های پرلیتی- اسفرولیتی مورد بررسی در واحد برش ریولیتی دیده می‌شوند.

بررسی‌های صحرایی

سنگ‌های اسیدی قرمز رنگ دارای بافت حبابی هستند که در مرز بین سنگ‌های پرلیتی- اسفرولیتی و اسفرولیت‌ها رخمون دارند. سنگ‌های اسیدی افزون بر حفره‌های دربردارنده کانی ثانویه، شکستگی‌هایی دارند که به دلیل هجوم محلول‌های گرمایی با سیلیس تیره رنگ پر شده‌اند (شکل ۳ ج). یانوس سپسی و همکاران [۱۱] بر این باورند که تغییر بافت اسفرولیتی به ریزبلورین یکپارچه در بیشتر جریان‌های ابسیدنی، می‌تواند ناشی از تفاوت در نرخ سردشدگی مذاب ریولیتی باشد و این امر منجر به ثبت تاریخچه گرمایی گدازه میزبان می‌شود. آنها با بررسی پرلیت‌های میوسن منطقه کارپاتین- پانونین در مجارستان پی بردند که پیش از فوران ماگمای سیلیسی، محیط غیر دریایی بوده است. از این رو، تغییر محیط غیر دریایی به محیط دریایی و فوران ماگمای سیلیسی در دریا منجر به تشکیل پرلیت‌های خاکستری رنگ با بافت درشت بلورین شده و این عامل مهم در اقتصادی بودن آنها بوده است [۱۱]. دیویس و مکفی [۱] نیز گزارش کرده‌اند که پرلیت‌های درشت خاکستری که از نظر اقتصادی ارزشمند هستند فقط در محیط دریایی و زیربخچالی تشکیل می‌شوند. فوران‌های شدید زیردریایی در مناطقی چون کارپاتین- پانونین مجارستان [۱۱]، پانزا و پالهازا در ایتالیا [۱۲، ۱۳] و منطقه کابودگاتا در اسپانیا

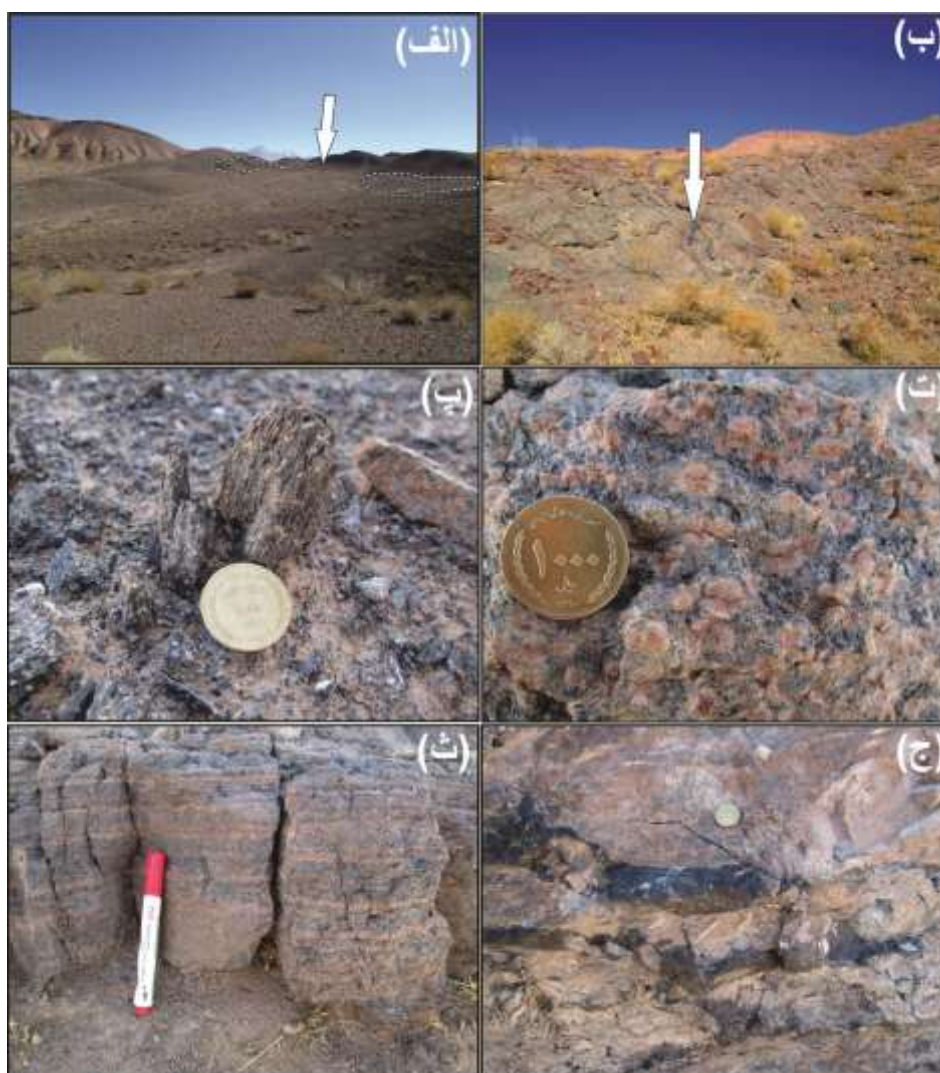
تنوع سنگی در منطقه گلومک از پرلیتی کامل تا اسفرولیتی کامل متغیر است. مرز بین پرلیت خالص تا اسفرولیت خالص به صورت تدریجی است؛ به طوری که بر پایه بازدیدهای صحرایی و شواهد سنگ‌نگاری در گستره بین این دو نوع سنگ، سنگ‌های پرلیتی- اسفرولیتی وجود دارد که از نظر اندازه، مقدار و چگونگی توزیع اسفرولیت‌ها متفاوت هستند و این تفاوت‌ها منجر به ساختارهای دانه‌ای و لایه‌ای در سنگ‌های پرلیتی- اسفرولیتی می‌شود [۱۰] (شکل‌های ۳ ت و ث). سنگ‌های پرلیتی منطقه مورد بررسی به دلیل مقاومت پایین در برابر هوازدگی، دارای مکان‌نگاری هموار و رخمونی تپه ماهوری و خرد شده هستند (شکل ۳ الف). همچنین این سنگ‌ها در نمونه دستی سیاه رنگ و با جلای براق دیده می‌شوند و بافت مرواریدی (پرلیتی) نشان می‌دهند. بررسی‌ها نشان می‌دهد که پرلیت‌ها در اثر آگیری جریان‌های آذرآواری ریولیتی گسترش یافته‌اند [۲] (شکل ۳ ب). خردشدگی سنگ‌های پرلیتی و فرسایش مدادی و ورقه‌ای از جمله عوارض موجود در رخمون سنگ‌های پرلیتی- اسفرولیتی منطقه گلومک هستند (شکل ۳ پ).

از دیگر سنگ‌های منطقه مورد بررسی کریستال لیتیک توف به رنگ قرمز به عنوان سنگ همبر پرلیت‌ها و همچنین

صورت سطحی و زیرزمینی در زمان فوران و همچنین نبود آب کافی در ماگماست. در بازدهی‌های صحرایی از منطقه گلومک نیز، پرلیت‌های سیاه رنگ با جلای براق، حضور سنگ‌های آتشفشانی با ترکیب آندزیتی، ریوداسیتی و داسیتی و نبود تشکیلات رسوبی در قالب سنگ‌های رسی، گل سنگ و ماسه سنگ و همچنین رخنمونی از جریان گدازه‌ای بیانگر تشکیل آنها در محیطی کاملاً غیردریایی هستند.

[۱۴] و همچنین پرلیت‌های زیربخچالی در مناطقی چون هراتین نیوریکار در ایسلند [۱۵] منجر به تشکیل نهشته‌های آذرآواری و شیشه آواری (از نوع قطعه قطعه) شده که سرانجام با فرآیند آگیری تبدیل به پرلیت‌هایی اقتصادی (پرلیت درشت) شده‌اند.

گفتنی است که رخداد فوران‌های آتشفشانی همراه با گسترش جریان‌های آذرآواری در یک منطقه نشان‌دهنده‌ی به شدت غیرانفجاری بودن فوران است و این گویای نبود آب به

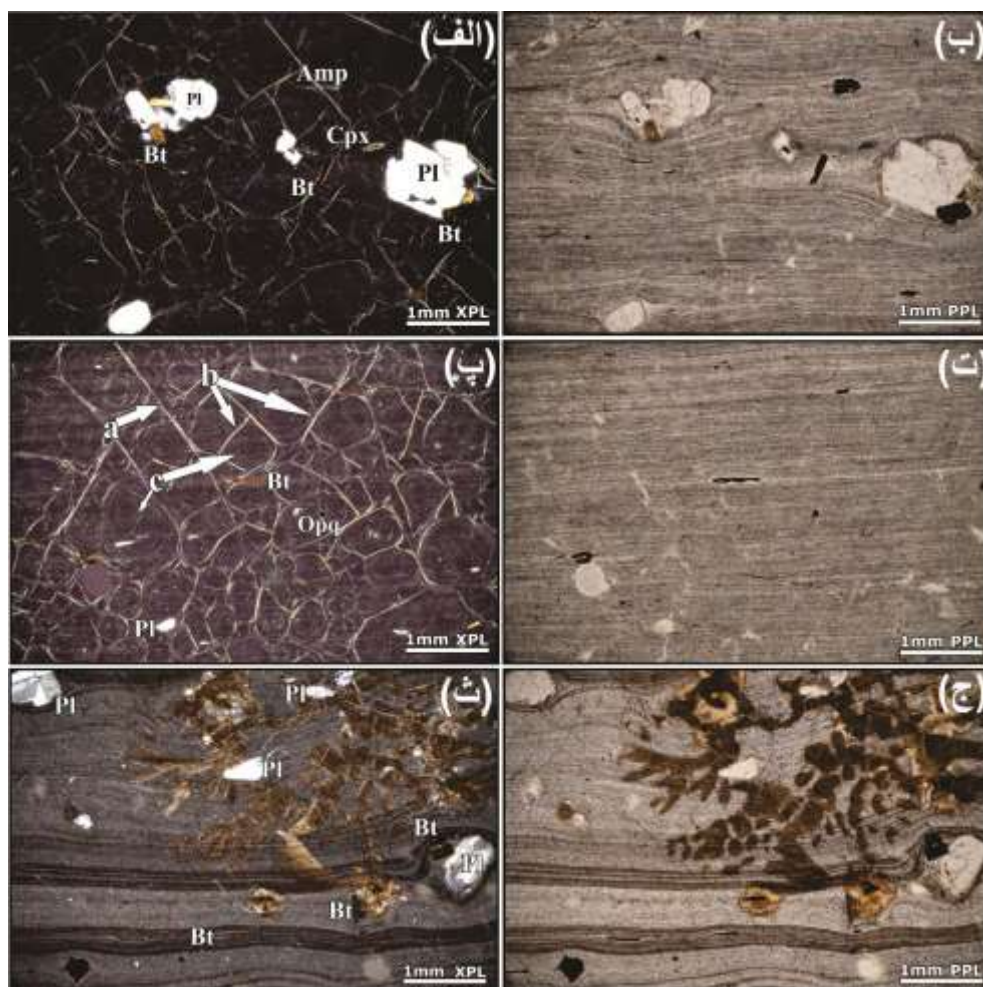


شکل ۳ الف) دورنمایی از موقعیت پرلیت‌های منطقه گلومک که با خط چین مشخص شده است. مکان مقیاس (خودرو) با پیکان سفید رنگ نشان داده شده است؛ **ب)** نمایی از رخنمون جریان‌های آذرآواری اسیدی که پرلیتی و اسفرولیتی شده است. مکان مقیاس (چکش زمین شناسی) با پیکان سفید رنگ نشان داده شده است؛ **پ)** تصویری از فرسایش مدادی سنگ‌های پرلیتی - اسفرولیتی منطقه گلومک؛ **ت)** ساختارهای دانه‌ای و **ث)** لایه‌ای ناشی از توزیع و رشد اسفرولیت‌ها در سنگ‌های پرلیتی - اسفرولیتی منطقه گلومک؛ **ج)** تصویری از رگه‌های متعدد سیلیسی تیره در سنگ دارای بافت حبابی در منطقه گلومک.

بودن از آهن، چندرنگی سبز-قهوه ای تیره نشان می‌دهند و گاهی کدر شده‌اند (شکل‌های ۴ پ و ت). الیس و همکاران [۱۶] و فضل‌نیا و همکاران [۲] وجود کانی‌های سیلیکاتی منفرد در زمینه جریان‌های آذرآواری چون ایگنمبریت‌ها را به متلاشی‌شدن قطعه‌های سنگی مربوط می‌دانند. البته در منطقه گلوومک، با توجه به نبود قطعه‌های سنگی و همچنین نبود شواهد نشانگر خوردگی و نبود تعادل در کانی‌های تیره، چنین دلیلی به نظر منطقی نمی‌رسد.

سنگ‌نگاری سنگ‌های پرلیتی، پرلیتی-اسفرولیتی، اسفرولیتی دارای بافت حبابی و سنگ‌های میزبان منطقه

جریان‌های آذرآواری منطقه گلوومک شامل مقداری درشت بلور-های پلاژیوکلاز دارای منطقه بندی، بیوتیت، کلینوپیروکسن و آمفیبول در زمینه‌ای شامل شیشه هستند. همچنین درشت بلورهای پلاژیوکلاز به عنوان مانعی برای حرکت مستقیم جریان گدازه عمل نموده و دور زدن جریان گدازه پیرامون پلاژیوکلازها آشکار است. درشت بلورهای بیوتیت نیز بیشتر در راستای جریان قرار گرفته‌اند (شکل‌های ۴ الف و ب) و به علت غنی



شکل ۴ الف و ب نمایی از درشت بلورهای پلاژیوکلاز به صورت تک بلوری و انباشتی با بافت گلوومپورفیریک، کلینوپیروکسن، آمفیبول و بیوتیت در زمینه‌ای با بافت جریان نواری (خطوط نازک میکروسکوپی به رنگ تیره و روشن) در سنگ‌های پرلیتی منطقه گلوومک که مذاب طی جریان، درشت بلورها را دور زده است؛ پ و ت مجموعه شکستگی‌ها و ریز شکستگی‌ها در سنگ‌های پرلیتی منطقه گلوومک؛ a: شکستگی‌های کشیده، b: شکستگی‌های متقاطع و c: ریز شکستگی‌های هم مرکز یا بافت پرلیتی که موقعیت آنها با پیکان سفید رنگ مشخص شده است و همچنین نمایانگر راستای جریان و جهت‌یافتگی بلورهای بیوتیت در مسیر جریان است؛ ث و ج بافت جریان نواری در زمینه‌ای پرلیتی-اسفرولیتی در سنگ‌های پرلیتی-اسفرولیتی منطقه مورد بررسی. Amp- آمفیبول، Bt- بیوتیت، Cpx- کلینوپیروکسن، Opq- اپاک، Pl- پلاژیوکلاز.

ویژگی مشترک سنگ‌های آذرآواری منطقه گلومک را می‌توان وجود ساختارها و بافت‌هایی چون جریان، نواری، پرلیتی، اسفرولیتی همراه یا بدون بافت حبابی در زمینه سنگ‌ها دانست. وجود چنین بافت‌هایی اغلب در بخش‌های مرکزی جریان‌های آذرآواری دیده می‌شود و نشان می‌دهد که طی جوش‌خوردگی، یک شیشه به نسبت متراکم در بخش‌های مرکزی روانه‌ها شکل گرفته است [۱۷]. سپس به علت تغییرهای دمایی و همچنین حضور بخارهای طی سرد شدن، بافت‌های متنوع شکل گرفته است [۲]. به طور کلی، جوش خوردگی شدید که منجر به شیشه‌های به نسبت متراکم می‌گردد در جریان‌های آذرآواری زیردریایی بسیار نادر است [۱۷] و از این رو، به نظر می‌رسد که جریان‌های آذرآواری منطقه گلومک باید به صورت جریان‌های به نسبت ضخیم در محیط خشکی رخ داده باشند. گفتنی است که بافت جریان نواری در جریان‌های آذرآواری، به دلیل حرکت‌های آرام و کند جریان‌های در سطح زمین بوده است، به طوری که باعث تشکیل لایه‌های نازک میکروسکوپی با رنگ‌های تیره و روشن در سنگ شده است (شکل‌های ۴ و ۵).

سنگ‌نگاری سنگ‌های پرلیتی منطقه گلومک مجموعه‌ای از شکستگی‌های متنوع را نشان می‌دهد که شامل شکستگی‌های اولیه ناشی از سرد شدن سریع مذاب (شکستگی‌های کشیده و شکستگی‌های متقاطع) و ریز شکستگی‌های هم مرکز ناشی از فرآیند آبگیری شیشه است [۱]. شکستگی‌های کشیده طی سرد شدن جریان پس از طغیان و پس از توقف جریان ایجاد شده‌اند. از این رو، شکستگی‌های کشیده هم‌راستا با جریان نیستند، بلکه به صورت کوتاه و با زاویه مایل نسبت به راستای جریان قرار دارند [۱] و شکستگی‌های متقاطع با طول‌های کوتاه در مرز بین شکستگی‌های کشیده و عمود بر آنها، قرار گرفته‌اند و باعث ایجاد ساختارهای چندوجهی (سه تا پنج وجهی) در اندازه‌های متنوع شده است [۱]. این در حالی است که بافت پرلیتی یا ریزشکستگی‌های هم مرکز ناشی از فرآیند آبگیری شیشه هستند که با شکستگی‌های اولیه دربرگرفته شده‌اند [۱] (شکل‌های ۴ پ و ت).

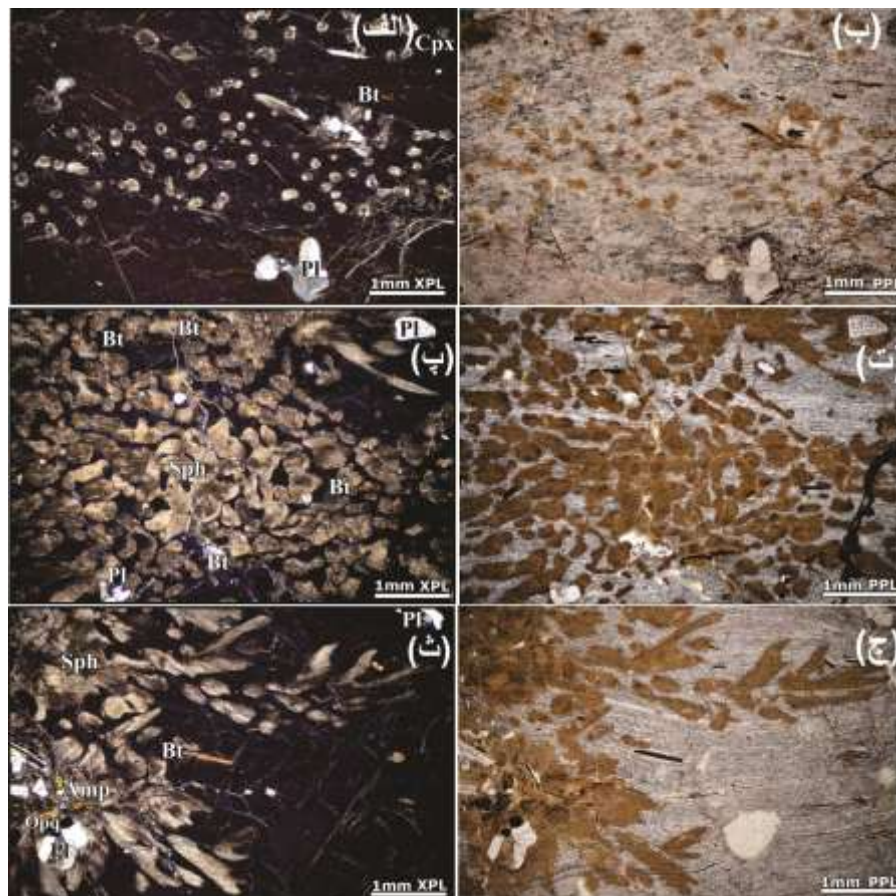
در مورد گسترش سنگ‌های پرلیتی-اسفرولیتی در منطقه گلومک باید گفت که شیشه‌های آتشفشانی ناپایدار هستند و اغلب در اثر دما و حضور بخارها و یا محلول‌های آبگین دچار فرایند واشیشه‌ای شدن گردیده و بسته به شرایط محیطی بیان

شده، انواع بافت‌های متنوع را ایجاد می‌نمایند [۱۰]. ژنگ و همکاران [۴] بر اساس بررسی‌های تجربی، نتیجه گرفته‌اند که اغلب در بالاترین دما به علت آبگیری، نخست پرلیت‌ها گسترش می‌یابند. در ادامه در شرایطی که هنوز دما بالاست، بافت حبابی به علت خروج گازها و بخارها رخ داده و همزمان انواع اسفرولیت‌ها رشد می‌کنند. اسفرولیتی‌شدن نوعی فرآیند واشیشه‌ای شدن در قالب درهم رشدی بلورهای شعاعی و سوزنی چندریخت‌های SiO_2 (کوارتز، تریدیمیت، کریستوبالیت) و فلدسپار قلیایی است که اغلب در سنگ‌های آتشفشانی فلیسک دیده می‌شود [۱، ۱۸، ۱۹] و می‌تواند منجر به اسفرولیت‌های منفرد و سپس اسفرولیت‌های خوشه‌ای گردد. در ادامه در شرایطی که دما به نسبت کاهش یافته است، رشد بلورهای رشته‌ای و گسترش بافت جریان نواری رخ می‌دهد [۴]. گفتنی است که چگالی هسته‌بندی و ریختار بلورهایی که طی واشیشه‌ای شدن به وجود می‌آیند بستگی به درجه فروچالیدگی جریان‌های گدازه و یا آذرآواری دارد [۴].

ریهل [۲۰] بیان می‌دارد که تشکیل بافت حبابی در روانه‌های آذرآواری زمانی رخ می‌دهد که دما بیشتر از ۶۰۰ درجه سانتیگراد باشد. هاوُث [۲۱] نیز تشکیل بافت حبابی را ناشی از سرد شدن و نه در اثر فرایندهای ثانویه دما پایین چون پرشدن‌های بعدی می‌داند. در واقع بافت حبابی در اثر محبوس شدن بخارهای داغ که می‌توانند باعث تبلور در دیواره‌های حفره‌ها شوند ایجاد می‌شود [۲۱]. دیویس و مک فی [۱۱] باور دارند که فرآیند اسفرولیتی شدن در دمای ۳۰۰ تا ۷۰۰ درجه سانتیگراد و در دو حالت رخ می‌دهد؛ حالت اول پیش از سردشدگی کامل مذاب است به طوری که ماگما هنوز حالت خمیری دارد، که در این صورت اسفرولیت‌های اولیه تشکیل می‌شوند و حالت دوم پس از سردشدگی و انجماد کامل مذاب است که در سنگ‌های آتشفشانی شیشه‌ای ایجاد می‌شوند [۲۲]. بقوس و همکاران [۲۳] با بیان این که اسفرولیت‌ها می‌توانند به خوبی تاریخچه دمایی گدازه‌ها و جریان‌های آذرآواری را نشان دهند، تشکیل اسفرولیت‌ها را در دماهای ۵۵۰-۷۰۰ درجه سانتیگراد در نظر می‌گیرند. البته آنها ادامه رشد را تا ۴۰۰ درجه سانتیگراد نیز ممکن می‌دانند. مجموعه سنگ‌های پرلیتی-اسفرولیتی منطقه گلومک، بر اساس سرعت و نرخ رشد اسفرولیت‌ها در پرلیت‌های منطقه به انواع مختلفی تقسیم می‌شوند. اسفرولیت‌های تشکیل شده به صورت مجزا و در اندازه-

سنگ‌ها تشکیل شده است (شکل‌های ۵ پ، ت، ث و ج). تفاوت در دما، ترکیب محلول آبگین و شدت اثر محلول‌های آبگینی که باعث اسفرولیتی شدن پرلیت و حذف بافت پرلیت از سنگ شده‌اند منجر به اختلاف در سرعت و نرخ رشد اسفرولیت‌ها در پرلیت‌های منطقه می‌شوند [۲۴، ۲۵]. محلول‌های آبگین اغلب ترکیب‌های قلیایی و یا آب خالص با دمایی بیش از ۲۵۰ درجه سانتیگراد در نظر گرفته می‌شوند [۲۶]. بر اساس پژوهش‌های ورنون [۱۸]، اندازه اسفرولیت‌ها می‌تواند از بسیار کوچک تا درشت تغییر کند مانند حالتی که در منطقه گلومک دیده می‌شود، به طوری که اسفرولیت‌ها از حد ریزاسفرولیت در نوارهای درون زمینه تا اسفرولیت‌های درشت حدود ۳ سانتی متر گسترش یافته‌اند.

های متنوع در متن سنگ هستند که منجر به تشکیل انواعی از سنگ‌های پرلیتی-اسفرولیتی با ساختار دانه دانه شده‌اند [۱۰]. (شکل‌های ۳ ت، ۵ الف و ب). ساختار لایه لایه سنگ‌های پرلیتی-اسفرولیتی ناشی از سرعت گرفتن فرآیند اسفرولیتی-شدن در یک راستا و از به هم پیوستن اسفرولیت‌های مجزای بدون نطفه‌بندی شکل گرفته است [۱۰]. به نظر می‌رسد که این مسیرها همان راستای شکستگی‌های منظم موجود در سنگ باشند که طی انجماد سنگ‌ها به وجود آمده‌اند. ریختار غالب این نوع از سنگ‌ها، شکل‌های کروی و عدسی هستند که به صورت مجزا یا به هم پیوسته در سنگ گسترش یافته‌اند. با توجه به چگونگی به هم پیوستن اسفرولیت‌های در حال رشد، مدل‌های متنوعی از ساختارهای میکروسکوپی اسفرولیت

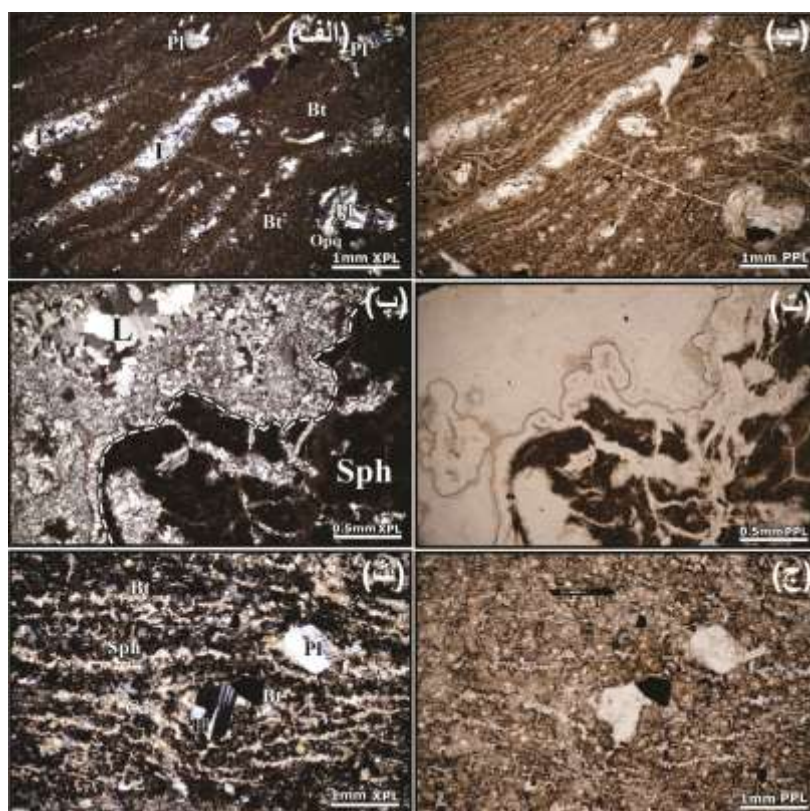


شکل ۵ تصاویری از سرعت و چگونگی رشد که منجر به تشکیل ساختارهای میکروسکوپی متنوع بافت اسفرولیتی در سنگ‌های پرلیتی-اسفرولیتی منطقه گلومک شده است: الف و ب) نمایی از رشد اسفرولیت بدون نطفه‌بندی، با ساختار دانه‌ای و مجزا و خاموشی شبه موجی، پ و ت) افزایش سرعت رشد اسفرولیت‌های مجزا بدون نطفه‌بندی، منجر به تشکیل ساختار بهم پیوسته‌ای از اسفرولیت (Sph) با خاموشی شبه موجی و همچنین رشد آنها در یک راستا باعث تشکیل ساختارهای لایه لایه شده است؛ ث و ج) تشکیل و رشد اسفرولیت‌ها (Sph) پیرامون انبوهه‌ای از کانی‌های پلاژیوکلاز، آمفیبول و کدر با نقش نطفه‌بندی منجر به تشکیل ساختاری شبیه با شاخ گوزنی شده است. Amp- آمفیبول، Bt- بیوتیت، Cpx- کلینوپیروکسن، Opq- اپاک، Pl- پلاژیوکلاز

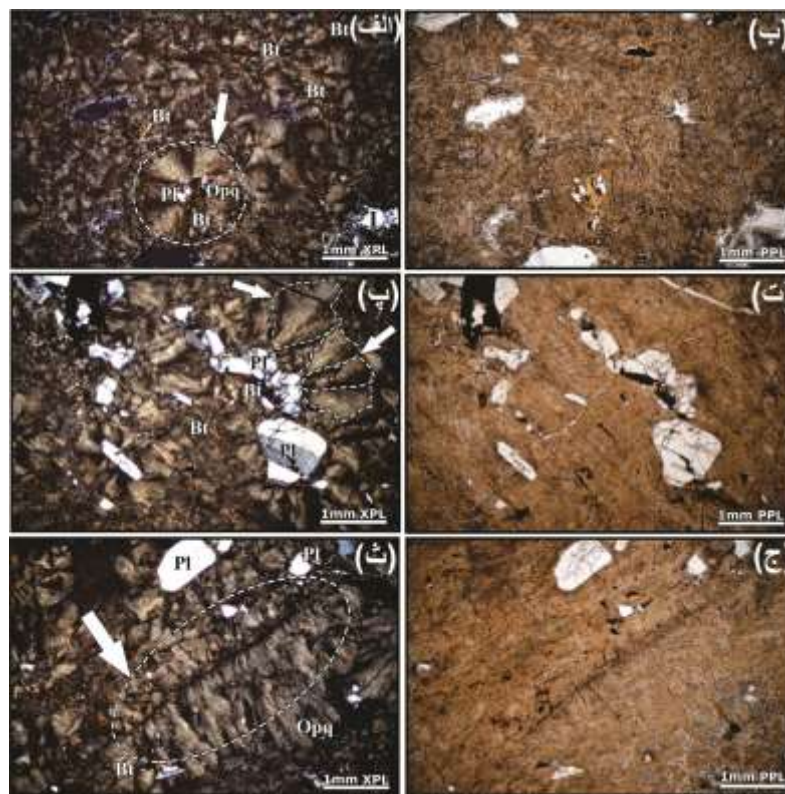
(شکل‌های ۷ پ و ت) و اگزبولیتیک (شکل‌های ۷ ث و ج) شده است. از این رو به نظر می‌رسد که اندازه و ریختار اسفرولیت‌ها در سنگ‌های منطقه گلومک، بیشتر از دما در قیاس با ترکیب محلول قلیایی پیروی کرده‌اند.

از دیگر سنگ‌های منطقه گلومک، نهشته‌های آذرآواری دارای بافت حبایی بوده که دارای زمینه‌ای ریزبلورین تا نهان-بلورین هستند و جریان یافتگی نواری نشان می‌دهد. این سنگ‌ها به علت وجود اکسید آهن به رنگ قرمز هستند و بخش‌های با بافت حبایی به رنگ سفید دیده می‌شوند که با کانی ثانویه کوارتز و کانی کدر دارینه‌ای پر شده است. بافت حبایی، حفره‌های بزرگ در سنگ‌های آذرآواری هستند و چنان که بیان شد، دمای تشکیل آنها تقریباً شبیه فرآیند اسفرولیتی شدن است و گاه طی دو مرحله تشکیل می‌شوند: مرحله اول پس از سرد شدگی کامل جریان است، زمانی که هنوز دما بالا بوده و جریان دربردارنده مقادیر بالایی از گاز و مواد فرار است [۴، ۱۸].

سنگ‌های اسفرولیتی دارای بافت حبایی در منطقه گلومک از دو بخش قهوه‌ای رنگ (اسفرولیتی) و سفید رنگ (بافت حبایی) تشکیل می‌شوند. بررسی‌های سنگ‌نگاری نشان می‌دهد که این سنگ‌ها از تبدیل پرلیت‌های منطقه در اثر محلول‌های آبگین با دما و ترکیب‌های متفاوت ایجاد شده‌اند. در نتیجه اسفرولیت-هایی در اندازه‌های متنوع با ریختارهای متفاوت در اندازه‌های بسیار کوچک در حد ریزاسفرولیت در نوارهای درون زمینه (شکل‌های ۶ الف و ب) تا اسفرولیت‌های درشت در این گروه از سنگ‌ها دیده شده است (شکل‌های ۶ پ و ت). به طور کلی، اسفرولیت‌های ریز در دمای پایین‌تر (۳۰۰ درجه سانتیگراد) و اسفرولیت‌های درشت در دمای بالاتر (تا ۷۰۰ درجه سانتیگراد) تشکیل می‌شوند [۲۷]. این امر نشان می‌دهد که با افزایش دما، گسترش و عرض رشته‌های شعاعی تشکیل شده بیشتر گردیده است [۱۰]. همچنین در سنگ‌های کاملاً اسفرولیتی، دمای متفاوت منجر به تشکیل اسفرولیت با انواع ریختار شامل اسفرولیت‌های کروی مانند (شکل‌های ۷ الف و ب)، بادبزنی



شکل ۶ الف و ب) نمایی از انباشت درشت بلورهای پلاژیوکلاز و کانی بیوتیت در مسیر جریان گدازه و رشد ریزاسفرولیت‌ها در نوارهای درون زمینه سنگ اسفرولیتی دارای بافت حبایی (L)؛ پ و ت) نمایی از بافت حبایی (L) سنگ‌های اسفرولیتی با اسفرولیت‌های درشت (Sph) که با کانی ثانویه کوارتز هم اندازه در مرکز و کوارتز شعاعی و سوزنی در لبه پر شده است؛ (ث و ج) تصویر سنگ آذرآواری بافت حبایی در منطقه گلومک. Bt-بیوتیت، Opq-اپاک، Pl-پلاژیوکلاز



شکل ۷ تصاویر میکروسکوپی از ریختار اسفرولیتی در سنگ‌های اسفرولیتی درشت دارای بافت حبابی در منطقه گلوک: الف و ب) اسفرولیت با ریختار کروی همراه با نطفه بندی دارای خاموشی صلیبی که موقعیت آن با خط چین و پیکان سفید رنگ مشخص شده است، پ و ت) رشد اسفرولیت‌هایی با ریختار بادبزی روی کانی‌ها به عنوان تکیه گاه و نطفه به سمت خارج که موقعیت آن با خط چین و پیکان سفید رنگ مشخص شده است؛ ث و ج) رشد متقارن اسفرولیت بر ترک و شکستگی‌ها به عنوان تکیه گاه به سمت خارج که منجر به تشکیل اسفرولیت با ریختار اگزولیپتیک شده است که موقعیت آن با خط چین و پیکان سفید رنگ مشخص شده است. Bt- بیوتیت، Opq- اپاک، Pl- پلاژیوکلاز

نتایج پراش ایکس سنگ‌های پرلیتی- اسفرولیتی منطقه

پراش پرتوی ایکس (XRD) روشی توانمند برای تعیین مشخصه‌های کانی‌هاست که کاربردهای گسترده‌ای در حوزه های اصلی چون ساختار و شناسایی فاز (نوع و حجم فاز)، اندازه بلوری، راستای بلورنگاری، ثابت‌های شبکه، چگالی، تنش/کرنش‌های باقیمانده فاز، تبدیل فاز و ضریب انبساط گرمایی می‌تواند داشته باشد [۲۸]. الگوی XRD هر کانی بلوری بی‌مانند است که همین امر منجر به شناسایی فازهای کانی شناسی می‌شود [۲۹]. به این منظور برای بلورنگاری با پرتوی ایکس و بررسی‌های کمی، چهار نمونه از سنگ‌های پرلیتی، اسفرولیتی و خاک رس برآمده از دگرسانی و هوازدگی سنگ‌های منطقه گلوک به آزمایشگاه کانی نگاری مجتمع مس سرچشمه ارسال شد و با دستگاه یونیسانتیس مدل XMD300 تجزیه گردیدند.

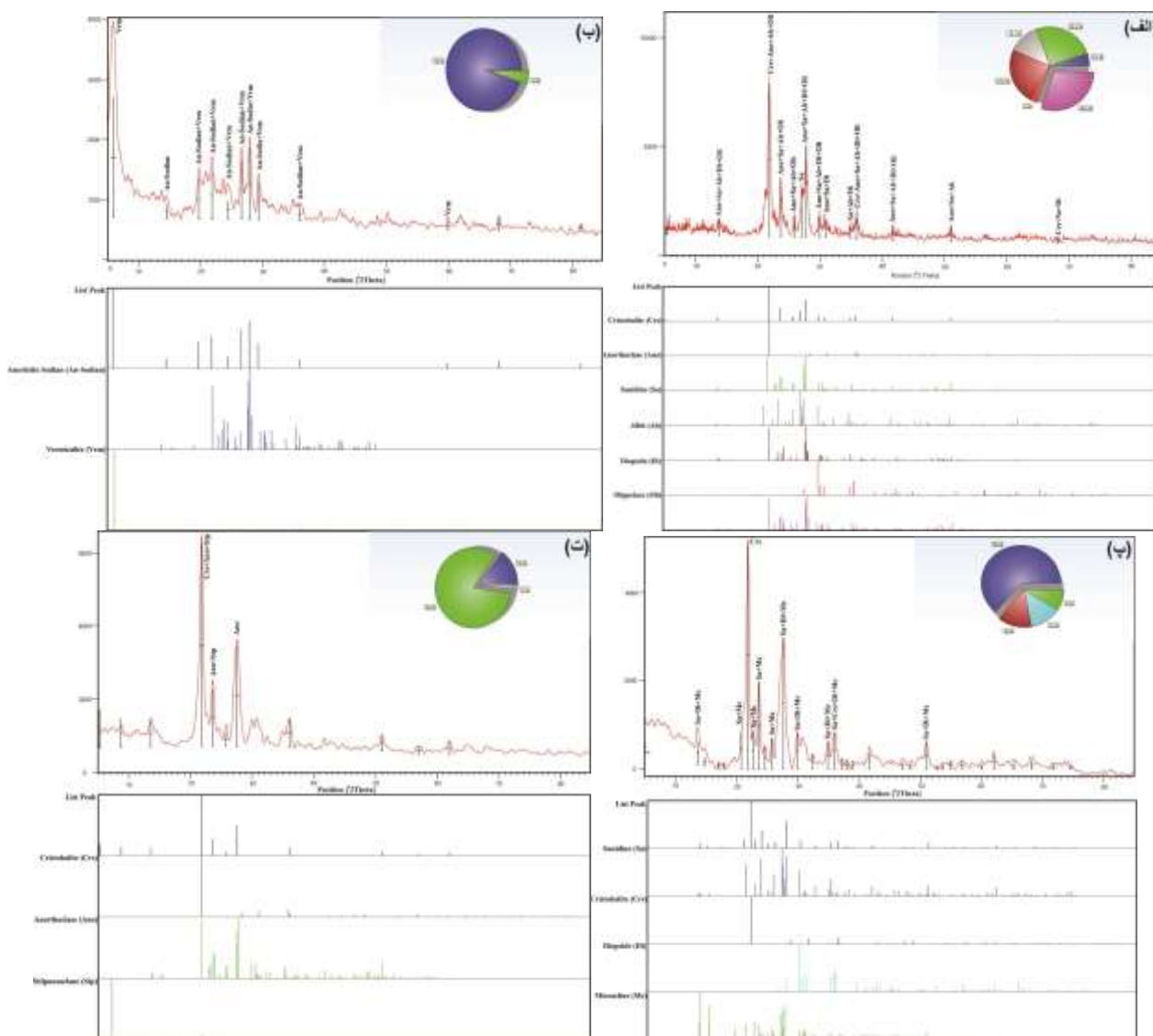
نتایج به دست آمده از XRD نمونه‌های منطقه گلوک در شکل ۸ نشان داده شده است. نمودار XRD سنگ‌های پرلیتی-

در مرحله دوم پس از سردشدگی مذاب و همزمان با ادامه فرایند اسفرولیتی شدن سنگ، بافت‌های حبابی کمی بیشتر رشد می‌کنند، زیرا فرایند اسفرولیتی شدن باعث جمع شدگی و انقباض در ساختار سنگ می‌شود و همین امر موجب بزرگتر شدن حفره‌های بافت حبابی در سنگ اسفرولیتی شده می‌گردد. از این رو افزایش سرعت اسفرولیتی شدن در این گروه از سنگ‌ها ممکن است نقش مهمی در گسترده‌تر شدن حفره‌های بافت‌های حبابی داشته باشد [۲۲] البته گاهی در ادامه رشد اسفرولیت‌ها و کاهش حجم حفره‌ها، ممکن است اسفرولیت‌های با هسته توخالی نیز به صورت تاخیری ایجاد شوند [۴].

کریستال لیتیک ویتربیک توفها به عنوان سنگ همبر منطقه گلوک، دارای خرده سنگ‌های با ترکیبی ریولیتی، بلورهای خرد شده از جنس کانی‌های کوارتز و فلدسپار پتاسیم با ماکل کارلسباد و بیوتیت‌های قرمز غنی از آهن همراه با خرده شیشه‌های هلالی شکل (شاردها) هستند.

رخمون نوع سنگ‌های پرلیتی-اسفرولیتی (شکل ۸ ت) منطقه گلومک از کانی‌های پلاژیوکلاز و ورمیکولیت تشکیل شده است. چنان که در نمودار درصد فراوانی نشان داده شده است، ۹۵ درصد خاک رس منطقه از بلورهای پلاژیوکلاز و ۵ درصد باقی‌مانده ورمیکولیت (کانی فیلسیلیکات آبدار) برآمده از هوازدگی و دگرسانی گرمایی بیوتیت‌های تیغه‌ای سنگ‌های منطقه تشکیل شده است. از این رو نتایج XRD و بررسی‌های سنگ‌نگاری سنگ‌های پرلیتی-اسفرولیتی، اسفرولیتی با بافت حبابی و خاک رسی منطقه از نظر کانی‌شناسی و حجم کانی-های شناسایی شده، هم را تایید می‌کنند.

اسفرولیتی (شکل ۸ الف) دارای قله‌هایی شاخص از کانی‌های کریستوبالیت، سانیدین (پتاسیم و سدیم‌دار)، دیوپسید و میکروکلین است که در برخی از موقعیت‌های 2θ ، همپوشی قله‌ها از بلورهای متفاوت را نشان می‌دهد. در طیف XRD سنگ‌های پرلیتی-اسفرولیتی (شکل ۸ ب)، شدیدترین قله‌ها مربوط به کانی‌های الیگوکلاز، آنورتوکلاز، آلبیت، سانیدین (پتاسیم‌دار)، کریستوبالیت و دیوپسید هستند. در نمودار XRD سنگ اسفرولیتی با بافت حبابی (شکل ۸ پ)، شدیدترین قله‌ها به کانی‌های آنورتوکلاز، کریستوبالیت و استیلپنوملان که یک کانی فیلسیلیکات از گروه اسمکتیت است مربوط هستند. همچنین شدیدترین قله‌های الگوی XRD نمونه خاک رس



شکل ۸ نمودارهای کیفی XRD نمونه‌های مختلف منطقه گلومک: الف و ب) سنگ‌های پرلیتی-اسفرولیتی، پ) سنگ اسفرولیتی با بافت حبابی و ت) خاک رسی برآمده از هوازدگی رخمون سنگ پرلیتی-اسفرولیتی.

ترکیب زمین‌شیمیایی سنگ‌های پرلیتی، پرلیتی-اسفرولیتی و اسفرولیتی به همراه سنگ‌های میزبان منطقه

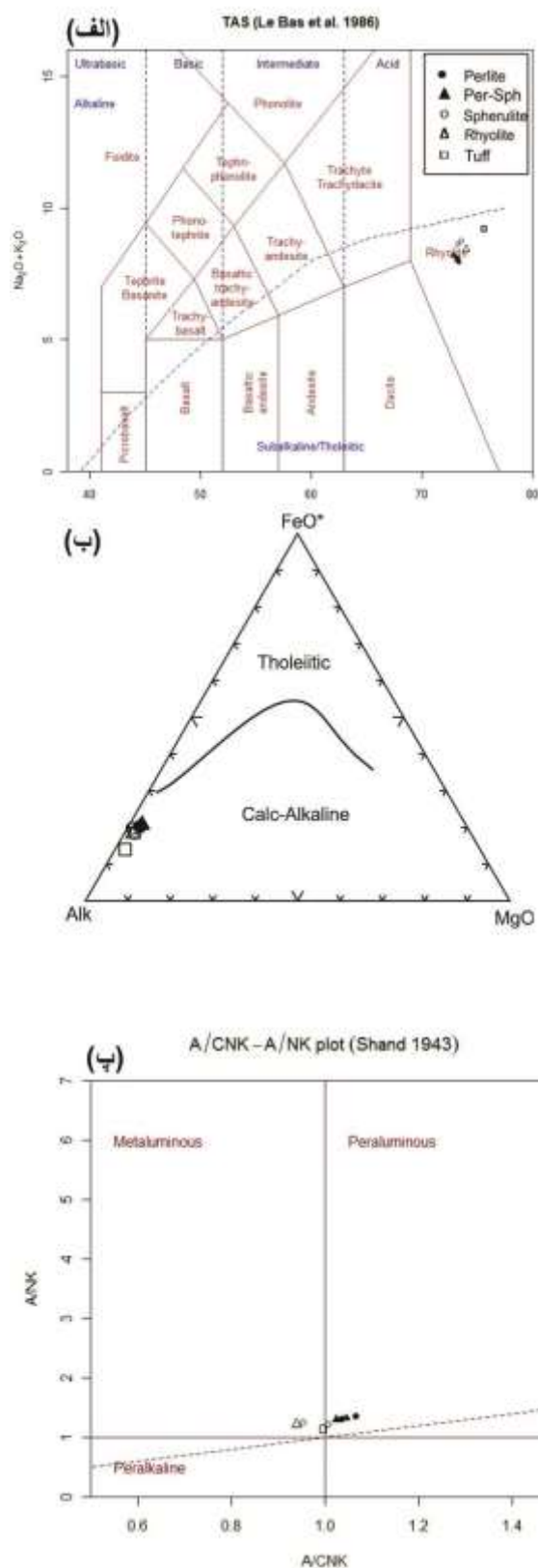
به منظور تعیین ترکیب شیمیایی سنگ‌های پرلیتی-اسفرولیتی منطقه گلومک، تعداد ۸ نمونه برای تجزیه شیمیایی اکسیدهای اصلی (بر حسب درصد وزنی) به روش طیف‌سنجی نشر اتمی پلاسما جفت شده القایی (ICP-AES) به آزمایشگاه ALS-Chemex کانادا ارسال شد. نتایج به دست آمده از تجزیه شیمیایی در جدول ۱ آمده است. نتایج تجزیه شیمیایی نمونه‌های سنگی منطقه گلومک نشان می‌دهد که مقدار مواد فرار (LOI) در این سنگ‌ها از ۱/۰۲ تا ۶/۴۵ درصد وزنی متغیر بوده و کمترین مقدار آب مربوط به نمونه‌های ریولیتی و اسفرولیتی (۱/۰۲ تا ۲/۴۹ درصد وزنی) و بیشترین مقدار آن مربوط به نمونه‌های پرلیتی (۵ تا ۶/۴۵ درصد وزنی) است. این مقدار بالای آب نمونه‌های پرلیتی به خوبی با طبیعت آنها که در اثر آگیری به وجود آمده‌اند همخوانی دارد [۳۰، ۳۱]. همچنین مقدار سیلیس نمونه‌های پرلیتی از ۶۹/۶ تا ۷۰/۳ درصد وزنی متغیر بوده و مقدار Al_2O_3 نمونه‌ها نیز حدود ۱۳/۶۵ - ۱۳/۵۵ درصد وزنی است که این

امر نشانگر طبیعت اسیدی و غنی از سیلیس زمینه شیشه‌ای این سنگ‌ها و در نتیجه کیفیت بالای تجاری آنهاست، زیرا بر اساس بررسی‌های انجام شده، پرلیت تجاری مرغوب بیش از ۶۵ درصد سیلیس دارد [۳۱، ۳۲] و مقدار Al_2O_3 آن نیز بالاتر از ۱۰ درصد وزنی است [۳۳]. مقدار FeO و CaO نمونه‌ها نیز به علت وجود کانی‌های تیره کلینوپیروکسن، بیوتیت و آمفیبول است، در حالی که وجود Na_2O ، K_2O و Al_2O_3 به دلیل وجود فلدسپار قلیایی در سنگ‌هاست.

برای نامگذاری زمین‌شیمیایی و تعیین سری ماگمایی سنگ‌های منطقه گلومک از نمودار مجموع قلیایی‌ها نسبت به SiO_2 استفاده شد که بر پایه آن همه نمونه‌های بررسی شده در رده سنگ‌های ریولیتی [۳۴] (شکل ۹ الف) و در گستره سری ماگمایی نیمه قلیایی قرار دارند [۳۵] (شکل ۹ ب) و ترکیب شبیه پرلیت‌های صنعتی جهان نشان می‌دهند [۳۳، ۳۶]. همچنین بر اساس نمودار تشخیصی [۳۷]، نمونه‌های مورد بررسی از نظر درجه اشباع‌شدگی از آلومین، مت‌آلومین تا کمی پرآلومین هستند (شکل ۹ پ).

جدول ۱ نتایج تجزیه شیمیایی اکسیدهای عناصر اصلی (بر حسب درصد وزنی) سنگ‌های منطقه گلومک. سنگ‌های پرلیتی، پرلیتی-اسفرولیتی، اسفرولیتی و ریولیت به ترتیب با نشانه‌های اختصاری Sph، Per- Sph، Rhy و مشخص شده‌اند.

نمونه	ZG-22	ZG-32	ZG-11	ZG-21-1	ZG-12	DZG-23	DZG-18	DZG-14
نوع سنگ	Per	Per	Per-Sph	Per-Sph	Sph	Sph	Rhy	Tuff
Symbol	●	●	▲	▲	○	○	Δ	□
SiO_2	۶۹/۶	۷۰/۳	۷۰/۱	۷۰/۱	۷۲/۹	۷۴/۳	۷۴/۱	۷۴/۹
Al_2O_3	۱۳/۵۵	۱۳/۶۵	۱۳/۸	۱۳/۷	۱۳/۴۵	۱۳/۷۵	۱۳/۱۵	۱۲
TiO_2	۰/۱۴	۰/۱۴	۰/۱۵	۰/۱۵	۰/۱۴	۰/۱۵	۰/۱۴	۰/۲۱
Fe_2O_3	۱/۹۱	۱/۹۳	۲	۱/۹۶	۱/۹۱	۲/۰۲	۱/۸۸	۱/۷
MnO	۰/۰۶	۰/۰۶	۰/۰۶	۰/۰۶	۰/۰۹	۰/۰۳	۰/۰۸	۰/۰۳
MgO	۰/۲۷	۰/۲۷	۰/۳	۰/۳۱	۰/۲۶	۰/۱۳	۰/۲۳	۰/۲۶
CaO	۱/۴۷	۱/۴۹	۱/۵۴	۱/۴۹	۱/۸۱	۱/۲۹	۱/۷۴	۰/۸۳
Na_2O	۳/۳۷	۳/۶۹	۳/۸۴	۳/۶۲	۲/۸۱	۳/۱۴	۲/۹۷	۱/۲۱
K_2O	۴/۱۶	۴/۰۶	۴/۰۲	۴/۱	۵/۷۴	۵/۶۷	۵/۵	۷/۹۱
P_2O_5	۰/۰۴	۰/۰۳	۰/۰۴	۰/۰۵	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۰۵	۰/۰۳
LOI	۶/۴۵	۵/۶۶	۵/۱۹	۵	۲/۴۹	۱/۰۲	۱/۴۹	۲/۴۹



شکل ۹ تعیین ویژگی‌های زمین‌شیمیایی سنگ‌های منطقه گلوک: (الف) رده‌بندی زمین‌شیمیایی بر اساس له باس و همکاران [۳۴]، (ب) تعیین سری ماگمایی بر اساس ریکوود [۳۵] و (پ) تعیین درجه اشباع شدگی از آلومین بر اساس شند [۳۷].

برداشت

بر اساس آنچه تاکنون بیان شد، سنگ‌های منطقه گلومک را می‌توان بر اساس نوع بافت و شدت و دمای فرایندهای واشیشه‌ای شدن به انواع زیر تقسیم کرد: گروه اول سنگ‌های پرلیتی بدون هر گونه بافت اسفرولیتی و یا بافت حبابی هستند که به ظاهر در بالاترین دما به علت آبیگری شیشه گسترش یافته‌اند. گروه دوم سنگ‌های پرلیتی دارای بافت‌های اسفرولیتی و حبابی هستند که باید در ادامه فرایند واشیشه‌ای شدن در شرایطی که هنوز دما بالا بوده است طی خروج گازها و بخارها شکل گرفته باشند. در این سنگ‌ها اسفرولیت‌ها اغلب منفرد هستند. گروه سوم سنگ‌های پرلیتی دارای اسفرولیت‌های منفرد و خوشه‌ای هستند که در این سنگ‌ها اسفرولیت‌ها طی رشد درشت‌تر شده و همچنین از بهم پیوستگی چند اسفرولیت، اسفرولیت‌های خوشه‌ای شکل گرفته‌اند. این گروه در قیاس با گروه پیشین دارای شرایط دمایی پایین‌تر است. گروه چهارم سنگ‌های دارای بافت جریان نواری هستند که اغلب در شرایط پایانی و در دمای کم، در آخرین مرحله از فرایند واشیشه‌ای شدن به صورت بلورهای رشته‌ای ریز گسترش می‌یابند. گفتنی است که ممکن است طی فرایند اسفرولیتی شدن، انقباض و جمع‌شدگی رخ داده باشد و باعث بزرگ شدن فضای بافت‌های حبابی در سنگ شده باشد.

نتایج بازدیدهای صحرایی شامل روند تدریجی تبدیل رخنمون سنگ‌های پرلیتی به انواع بافت‌های حبابی و اسفرولیتی و تشابه بافتی سنگ‌ها از جمله حضور بافت‌های جریان زمین، سنگ‌نگاری و الگوهای XRD و همچنین تجزیه‌های شیمیایی انجام شده همه نشان می‌دهند که سنگ‌های مورد بررسی از نظر زایشی با هم ارتباط دارند و فقط شرایط دمایی و همچنین حضور بخارها و محلول‌های آبگین باعث تنوع بافتی آنها شده است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که فرایند آبیگری و واشیشه‌ای شدن سنگ‌های منطقه پس از سردشدگی جریان‌های گدازه‌ای و در محیطی غیردریایی رخ داده است. طیف‌های XRD سنگ‌های پرلیتی-اسفرولیتی منطقه گلومک وجود کانی‌های پلاژیوکلاز، فلدسپار پتاسیم، کریستوبالیت و دیوپسید را نشان می‌دهد. برپایه نتایج زمین‌شیمیایی، این سنگ‌ها دارای ترکیب ریولیت و از سری ماگمایی نیمه قلیایی و با ماهیت متآلومین هستند. ترکیب شیمیایی این سنگ‌ها شبیه سایر پرلیت‌های صنعتی جهان است.

قدردانی

نگارندگان از معاونت پژوهشی دانشگاه شهید باهنر کرمان به خاطر حمایت‌های مالی ارزشمند از این پژوهش قدردانی به عمل می‌آورند. همچنین، از سردبیر محترم و داوران گرانقدر

مجله بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران که با راهنمایی‌های ارزنده خود به ارتقاء کیفیت مقاله کمک نمودند، صمیمانه سپاسگزاری می‌نمایند.

مراجع

- [1] Davis B., Mcphie J., "Spherulite, quench fractures, and relict perlite in a late Devonian rhyolite dyke", *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 71 (1996) 1-11.
- [2] Fazlnia A., Pang K., Ji W., Pirouei M., "Geochemical constraints on Eocene ignimbrite flare-up in the Urumieh-Dokhtar magmatic arc, northwestern Iran", *Lithos* 450-451 (2023) 107189.
- [3] Saraby F., "Igneous petrology (in Persian)", University of Tehran (2006) 317 p.
- [4] Zheng H., Sun X., Wang J., Zhu D., Zhang X., "Devitrification pores and their contribution to volcanic reservoirs: A case study in the Hailar Basin, NE China", *Marine and Petroleum Geology* 98 (2018) 718-732.
- [5] Hanson S. L., "Word to the Wise: Spherulites and Lithophysae", *Rocks & Minerals* 95 (2020) 183-187.
- [6] Dimitrijevic M.D., "Geology of Kerman Region", *Geology Survey of Iran, Report No. 52* (1973) 334 p.
- [7] Mohajjel M., Sahandi R., "The tectonic evolution of the Sanandaj-Sirjan zone in the north-western half and the introduction of a new sub-zone in it (in Persian)", *Journal of Earth Sciences* 8 (1993) No. 31-32.
- [8] Srdic A., Dimitrijevic M.N., Cvetic S., "Dimitrijevic M.D., Geological map of Iran, Scale 1:100000 Series Bardsir", Tehran Naqsheh (1992).
- [9] Zarei S., "Petrography, Geochemistry, and Petrogenesis of Galumak Upper Oligocene Perlitic rocks, Southwest of Kerman (in Persian)", M.Sc. Thesis, Shahid Bahonar University of Kerman (2015) 131 p.
- [10] William H., Turner F., Gilbert C.H., "Petrography", W.H. Freeman, (1982) 552 p.
- [11] Szepesi J., Lukács R., Soós I., Benkó Z., Pécskay Z., Ésik Z., Kozák M., Di Capua A., Groppelli G., Norin G., Sulpizio R., Harangi S., "Telkibánya lava domes: Lithofacies architecture of a Miocene rhyolite field (Tokaj Mountains, Carpathian-Pannonian region, Hungary)", *MTA-ELTE Volcanology Research Group, Budapest, Hungary* 385 (2019) 179-197. (doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2019.07.002)
- [12] De Rita D., Giordano G., Cecili A., "A model for sub-marine rhyolite dome growth: Ponza Island (central Italy)", *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 107 (2001) 221-239.
- [13] Németh K., Pécskay Z., Martin U., Gméling K., Molnár F., Cronin S.J., "Hyaloclastites,

- [25] Lofgren G., "Experimental devitrification rate of rhyolite glass", Journal of Geological Society of America Bulletin 81 (1970) 553-560.
- [26] Lofgren G., "Experimentally produced devitrification rate texture in natural rhyolitic glass", Journal of Geological Society of America Bulletin 82 (1971) 111-124. (doi: 10.1130/0016-7606)
- [27] Lofgren G., "Experimentally produced devitrification textures in natural Rhyolitic glass", Geological Society of American Bulletin 82 (1974) 111-124.
- [28] Ali A., Chiang Y.W., Santos R.M., "X-ray Diffraction Techniques for Mineral Characterization: A Review for Engineers of the Fundamentals, Applications, and Research Directions", Minerals 12 (2022) 205. (doi.org/10.3390/min12020205).
- [29] Sharma R., Bisen D.P., Shukla U., Sharma B.G., "X-ray diffraction: A powerful method of characterizing nanomaterials", Journal of The Recent Research in Science and Technology 4 (2012) 77-79.
- [30] Al-Mashaikie S.Z.A.K., Al-Hawbanie A.M., "Petrography and Geochemical Study of the Perlite Rocks from Bait Al-Qeyarie, Kawlan Area, Yemen", Journal of King Abdulaziz University- Earth Sciences 21(2) (2010) 195-217.
- [31] Mathers S.J., Harrison D.J., Mitchell C.J., Evans E.J., "Exploration, Evaluation and Testing of Volcanic Raw Materials for Use in Construction", British Geological Survey (2000) 116 p.
- [32] Elzea Kogel J., Trivedi N.C., Barker J.M., Krukowski S.T., "Industrial Minerals and Rocks, Commodities, Markets and Uses", Society for Mining, Metallurgy and Exploration Inc (SEM), Littleton, Colorado, USA (2006) 685-702.
- [33] Angelopoulos P.M., "Insights in the Physicochemical and Mechanical Properties and Characterization Methodology of Perlites", Minerals 14 (2024) 113. (https://doi.org/10.3390/min14010113).
- [34] Le Bas M.J., Le Maitre R.W., Strekeisen A., Zanettin B., "A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram", Journal of Petrology 27 (1986) 745-750.
- [35] Rickwood P.C., "Boundary lines within petrologic diagrams which use oxides of major and minor elements", Lithos 22 (1989) 247-263.
- [36] Chatterjee K.K., "Uses of Industrial Minerals, Rocks and Freshwater" Nova Science: New York, NY, USA 53 (2013).
- [37] Shand S.J., "Eruptive rock", Thomas Murby and Company, London (1947) 236 p.
- peperites and soft-sediment deformation textures of a shallowsubaqueous Miocene rhyolitic dome cryptodome complex, Pálháza, Hungary", Geological Society special publication 302 (2008) 63-86. (doi.org/10.1144/sp302.5)
- [14] Porreca M., Cifelli F., Soriano C., Giordano G., Romano C., Conticelli S., Mattei M., "Hyaloclastite fragmentation below the glass transition: An example from El Barronal submarine volcanic complex (Spain)", Geology 42 (2014) 87-90. (doi.org/10.1130/G34744.1.)
- [15] Tuffen H., Castro J., "The emplacement of an obsidian dyke through thin ice: Hrafninnuhryggur, Krafla Iceland", Journal of Volcanology and Geothermal Research 185 (2009) 352-366. (doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.12527-8).
- [16] Ellis B.S., Bachmann O., Wolff J.A., "Cumulate fragments in silicic ignimbrites: the case of the Snaken River Plain", Geology 42 (2014) 431-434.
- [17] Allen R.L., Schofield M., Sparkes G.W., "Volcanic-facies mapping and related hydrothermal alteration studies of the Buchans Camp, Southern Buchans-Roberts Arm Belt, Central Newfoundland", Newfoundland and Labrador Department of Industry, Energy and Technology, Geological Survey, Report 24-1 (2024) 1-30 pp.
- [18] Vernon R.H., "A practical guide to rock microstructure", Cambridge University (2004) 594 p. (doi.org/10.1017/CBO9780511807206).
- [19] Öztürk Y.Y., Akal C., "The First Petrographic Textural Data of Spherulitic Rhyolites Observed in the west of İdrisyayla (Kırka-Eskişehir)", Geological Bulletin of Turkey 66 (2023) 59-74.
- [20] Riehle J.R., "Relations between thermal history and secondary structures of ignimbrites exclusive of rheomorphism", Geosphere 11 (2015) 572-605.
- [21] Howoeth H.H., "The Recent Elevation of the Himalayas", Geological Magazine 9 (1892) 276-278.
- [22] Breitreuz C., "Spherulites and lithophysae—200 years of investigation on high-temperature crystallization domains in silica-rich volcanic rock", Bulletin of Volcanology 75 (2013) 705 p. (doi:10.1007/s00445-013-0705-6).
- [23] Befus K.S., Watkins J., Gardner J.E., Richard D., Befus, K.M., Miller N.R., Dingwell D.B., "Spherulites as in-situ recorders of thermal history in lava flows", Geology 43 (2015) 647-650.
- [24] Marshall R.R., "Devitrification of natural glass", Journal of Geological Society of America Bulletin 72 (1961) 1493-1520.