

The study of morphology and formation mechanism for tourmaline nodules of aplites from Khaku area (Hamedan) with using fractal and three dimensional analysis

Ali A. Sepahi *, Sedigheh Salami and Mohammad Maanijou
Department of Geology, University of Bu-Ali Sina, Hamedan, Iran

Abstract

In aplites of Khaku area, located in the east of the Alvand body, tourmaline nodules with spherical and dendritic shapes are dispersed. Some of these nodules have light halo that is actually a transition zone between the core of nodules and the host aplites. Geometrically, these nodules are fractal shapes. In these nodules fractal dimension vary from 1.46 in dendritic nodules to 1.92 in spherical nodules. In three-dimensional reconstructions of the studied nodule, the average volume for the core is 34% and 66% for its margin. Based on evidences such as lack of veins between nodules, tourmalines with anhedral forms, presence of a leucocratic halo in the aureole of some nodules, their spherical shape, their linear and flow dispersion in the host rock these nodules have been crystallized in magmatic condition. In the final stages of magma crystallization and the B content increment followed by beginning of unmixing in the melt, distinct spherical bubbles have been developed which gave rise to nodules formation. Magmatic system acts as chaotic systems and the presence of rotational and limited closed areas in the vicinity of areas with disturbed paths has led to the formation of rounded and dendritic nodules beside each other.

Key words: tourmaline nodule, fluid exsolution, fractal analysis, three-dimensional reconstruction, Khaku, Sanandaj-Sirjan zone

* sepahi@basu.ac.ir

بررسی ریخت‌شناسی و سازوکار پیدایش گرهک‌های تورمالین در آپلیت‌های منطقه خاکو (همدان) با به‌کارگیری آنالیز فرکتال و سه‌بعدی

علی اصغر سپاهی*، صدیقه سلامی و محمد معانی جو
گروه زمین‌شناسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

چکیده

در آپلیت‌های منطقه خاکو، در خاور توده الوند همدان، گرهک‌های تورمالین به‌صورت گرد و دندریتی پراکنده هستند. برخی از این گرهک‌ها دارای هاله روشنی هستند که نشان‌دهنده پهنه انتقالی میان هسته گرهک و آپلیت‌های میزبان است. از دیدگاه هندسی، این گرهک‌ها از شکل‌های فرکتال هستند. این گرهک‌ها دارای بعد فرکتال از ۱/۴۶ در گرهک‌های دندریتی تا ۱/۹۲ در گرهک‌های گرد هستند. در بازسازی سه‌بعدی این گرهک‌ها، حجم میانگین برای هسته ۳۴٪ و برای حاشیه گرهک ۶۶٪ به‌دست آمد. برپایه ویژگی‌هایی مانند نبود وابستگی رگجه‌ای میان گرهک‌ها، بی‌شکل بودن بلورهای تورمالین، هاله لوکوکرات گرداگرد برخی گرهک‌ها، شکل کروی آنها و پراکندگی خطی و جریان‌ی آنها در زمینه سنگ میزبان، این گرهک‌ها در شرایط ماگمایی متبلور شده‌اند. در مرحله‌های پایانی تبلور ماگما، در پی افزایش مقدار B و آغاز پدیده ناآمیختگی در مذاب، حباب‌های کروی جداگانه‌ای پدیدار می‌شوند که بعداً گرهک‌ها را می‌سازند. سیستم ماگمایی مانند سیستم‌های آشفته رفتار می‌کند و حضور مناطقی با مسیرهای بسته چرخشی و محدود در کنار مناطقی با مسیرهای آشفته، به‌ترتیب، گرهک‌های گرد و گرهک‌های دندریتی را در کنار یکدیگر پدید آورده است.

واژه‌های کلیدی: گرهک تورمالین، جدایش سیال، آنالیز فرکتال، بازسازی سه‌بعدی، خاکو، پهنه سنندج-سیرجان

مقدمه

گرهک‌های گرد و دندریتی دیده می‌شود. شکل‌های بلوری گوناگون در سنگ‌های آذرین نشان‌دهنده شرایط فیزیکی‌وشیمیایی هستند که بلور در آن متبلور شده است و دارای اطلاعات ارزشمندی درباره روند تکامل سیستم ماگمایی

در سیستم‌های گرانیتی، بیشتر کانی‌های گروه تورمالین، کانی فرعی و یا کمیاب در نظر گرفته می‌شوند. تورمالین در آپلیت‌ها و پگماتیت‌ها به شکل‌های گوناگونی (مانند شکل‌دار، بی‌شکل و

* sepahi@basu.ac.ir

بررسی ریخت‌شناسی و سازوکار پیدایش گرهک‌های تورمالین در آپلیت‌های منطقه خاکو (همدان) با به‌کارگیری آنالیز فرکتال و سه‌بعدی

علی اصغر سپاهی*، صدیقه سلامی و محمد معانی جو
گروه زمین‌شناسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

چکیده

در آپلیت‌های منطقه خاکو، در خاور توده الوند همدان، گرهک‌های تورمالین به‌صورت گرد و دندریتی پراکنده هستند. برخی از این گرهک‌ها دارای هاله روشنی هستند که نشان‌دهنده پهنه انتقالی میان هسته گرهک و آپلیت‌های میزبان است. از دیدگاه هندسی، این گرهک‌ها از شکل‌های فرکتال هستند. این گرهک‌ها دارای بعد فرکتال از ۱/۴۶ در گرهک‌های دندریتی تا ۱/۹۲ در گرهک‌های گرد هستند. در بازسازی سه‌بعدی این گرهک‌ها، حجم میانگین برای هسته ۳۴٪ و برای حاشیه گرهک ۶۶٪ به‌دست آمد. برپایه ویژگی‌هایی مانند نبود وابستگی رگچه‌ای میان گرهک‌ها، بی‌شکل بودن بلورهای تورمالین، هاله لوکوکرات گردگرد برخی گرهک‌ها، شکل کروی آنها و پراکندگی خطی و جریانی آنها در زمینه سنگ میزبان، این گرهک‌ها در شرایط ماگمایی متبلور شده‌اند. در مرحله‌های پایانی تبلور ماگما، در پی افزایش مقدار B و آغاز پدیده ناآمیختگی در مذاب، حباب‌های کروی جداگانه‌ای پدیدار می‌شوند که بعداً گرهک‌ها را می‌سازند. سیستم ماگمایی مانند سیستم‌های آشفته رفتار می‌کند و حضور مناطقی با مسیرهای بسته چرخشی و محدود در کنار مناطقی با مسیرهای آشفته، به‌ترتیب، گرهک‌های گرد و گرهک‌های دندریتی را در کنار یکدیگر پدید آورده است.

واژه‌های کلیدی: گرهک تورمالین، جدایش سیال، آنالیز فرکتال، بازسازی سه‌بعدی، خاکو، پهنه سنندج-سیرجان

مقدمه

گرهک‌های گرد و دندریتی دیده می‌شود. شکل‌های بلوری گوناگون در سنگ‌های آذرین نشان‌دهنده شرایط فیزیکوشیمیایی هستند که بلور در آن متبلور شده است و دارای اطلاعات ارزشمندی درباره روند تکامل سیستم ماگمایی

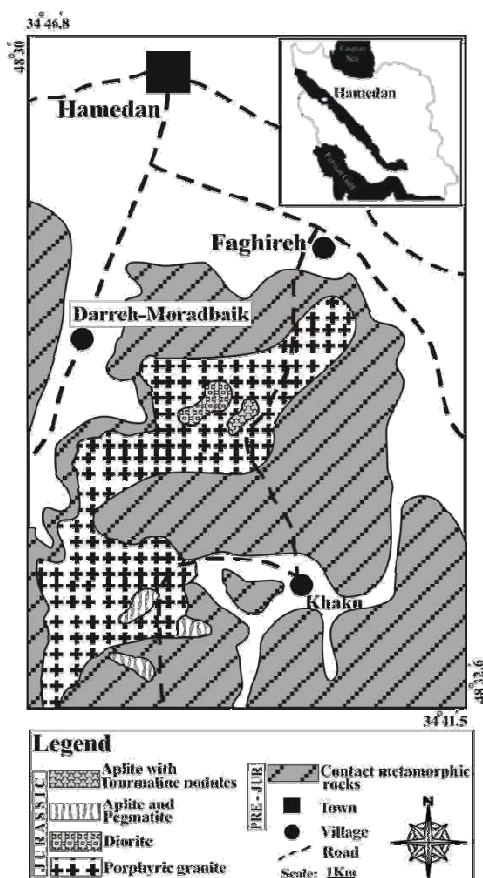
در سیستم‌های گرانیتی، بیشتر کانی‌های گروه تورمالین، کانی فرعی و یا کمیاب در نظر گرفته می‌شوند. تورمالین در آپلیت‌ها و پگماتیت‌ها به شکل‌های گوناگونی (مانند شکل‌دار، بی‌شکل و

* sepahi@basu.ac.ir

بررسی‌های پیشین بیشتر در زمینه سنگ‌نگاری بوده است و در آنها به سازوکار پیدایش و ریخت‌شناسی گرهک‌های تورمالین کمتر پرداخته شده است. از این‌رو، هدف از این پژوهش بررسی گرهک‌های تورمالین در آپلیت‌های منطقه خاکو از دیدگاه هندسی و بررسی شرایط پیدایش آنهاست.

جایگاه زمین‌شناسی

منطقه بررسی شده در جنوب شهرستان همدان و در خاور توده باتولیت الوند جای گرفته است. این منطقه در میان عرض‌های جغرافیایی $34^{\circ} 43'$ و $34^{\circ} 45'$ شمالی و طول‌های جغرافیایی $48^{\circ} 30'$ و $48^{\circ} 33'$ خاوری است (شکل ۱) و در پهنه‌بندی ساختاری ایران بخشی از پهنه سندج- سیرجان به‌شمار می‌آید.



شکل ۱- نقشه زمین‌شناسی منطقه خاکو (همدان)، بر پایه نقشه ۱/۱۰۰۰۰۰ ورقه همدان، سازمان زمین‌شناسی ایران (Eghlimi *et al.*, 2000)

هستند (Cashman, 1993; Faure *et al.*, 2003). برپایه ویژگی‌های بافتی، کنائی‌شناسی و ریخت‌شناسی تورمالین‌ها می‌توان به شرایط پیدایش و تبلور آنها پی برد (Pichavant and Manning, 1984; Sinclair and Richardson, 1992; London and Manning, 1995; London *et al.*, 1996; Broska *et al.*, 1998; London, 1999; Williams *et al.*, 2000; Kubiš and Broska, 2005; Buriánek and Novák, 2007; Dini *et al.*, 2007).

بسیاری از زمین‌شناسان گرهک‌های تورمالین در سراسر زمین را بررسی کرده‌اند. این گرهک‌ها از شکل‌های رایج و بحث برانگیز در بیشتر سنگ‌های گرانیتی لوکوکرات شناخته شده‌اند؛ اما هنوز نظر یکسانی درباره چگونگی پیدایش این گرهک‌ها وجود ندارد (Didier, 1973; Le Fort, 1991; Balen and Broska, 2011). خاستگاه این گرهک‌ها می‌تواند به مرحله‌های گوناگونی از تکامل گرانیت میزبان وابسته باشد؛ مانند: (۱) تبلور زود هنگام از ماگمای گرانیتی سرشار از عنصر B؛ (۲) تبلور در مرحله‌های پایانی انجماد ماگما در پی جدایش سیال‌های سرشار از B از ماگما و به‌دام‌افتادن آنها (Sinclair and Richardson, 1992; Shewfelt *et al.*, 2005)؛ (۳) حاصل جان‌شینی‌های متاسوماتیک- گرمایی (هیدروترمال) توسط سیال‌های سرشار از B در سنگ‌های گرانیتی متبلور شده پیشین (Rozendaal and Bruwer, 1995).

همچنین، از نکته‌های بحث‌برانگیز درباره گرهک‌های تورمالین، شرایط پیدایش گرهک‌های گرد و دندریتی در کنار یکدیگر است که در این پژوهش به آن پرداخته می‌شود. Zareian و همکاران (۱۹۷۲، a، ۱۹۷۲، b، ۱۹۷۲، c، ۱۹۷۳، ۱۹۷۴) پگماتیت‌ها و آپلیت‌های الوند را برپایه کنائی‌های فرعی آنها بررسی کردند. Sepahi (۱۹۹۹ و ۲۰۰۱) و Mani-Kashani (۲۰۰۶) نیز پگماتیت‌ها و آپلیت‌های منطقه را بررسی کرده‌اند.

گرهک‌های تورمالین در آپلیت‌ها، بلوک‌هایی از آپلیت‌های منطقه با سبترای ۵۰ سانتیمتر و برش‌های ۱ سانتیمتر بررسی شدند. برای شناسایی ساختار درونی و ریخت‌شناسی گرهک‌ها، تکه‌های ۲ سانتیمتری گرهک‌ها با برش‌های متوالی ۳ میلیمتری بررسی شدند. سپس این تکه‌ها با نرم‌افزار 3D Max بازسازی شدند تا جزییات موجود در ساختار درونی گرهک‌ها شناسایی شوند. بازسازی سه‌بعدی نمونه‌ها شامل آماده‌سازی نمونه‌ها و گردآوری داده‌ها به روش برش، اسکن کردن و دیجیتالی کردن این داده‌ها است. دسته‌بندی داده‌ها، جداسازی و ساخت تصویر سه‌بعدی با نرم‌افزار 3D Max انجام شد.

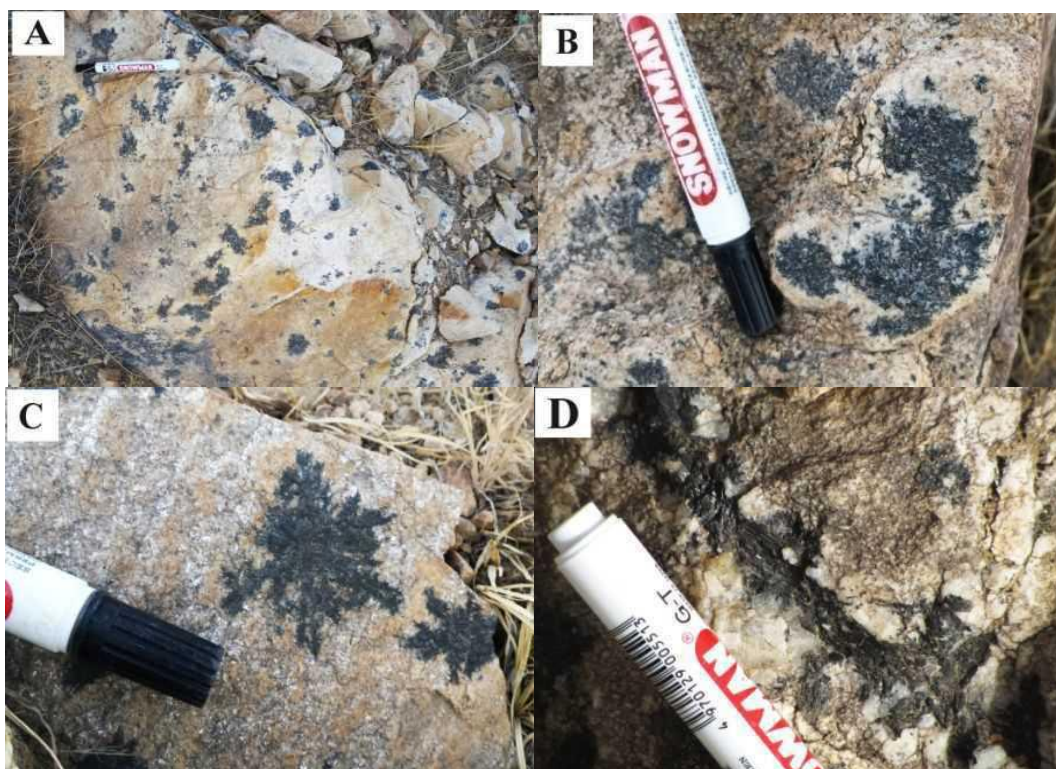
بررسی صحرایی و سنگ‌نگاری

در منطقه بررسی‌شده، گرهک‌های تورمالین در زمینه آپلیت‌های هولولوکوکرات پراکنده شده‌اند و چهره پوست پلنگی در آن پدید آورده‌اند (شکل ۲- A). کوارتز، پتاسیم‌فلدسپار، پلاژیوکلاز، مسکوویت و تورمالین‌کانی‌های از کانی‌های سنگ میزبان تورمالین هستند. پراکندگی گرهک‌های تورمالین در زمینه آپلیت‌ها ناهمگن است و در برخی مناطق به‌صورت منظم و پی‌درپی دیده می‌شوند؛ اما در برخی مناطق دیگر، تمرکز آنها بسیار کم است. برخی گرهک‌ها، در کناره‌ها دارای هاله لوکوکرات هستند (شکل ۲- B) و گروهی دیگر این هاله را ندارند. به‌طور کلی، در این منطقه و از دیدگاه ریخت‌شناسی، تورمالین دارای شکل‌های گوناگونی، مانند گرهک‌های گرد (شکل ۲- B)، گرهک‌های دندردی (شکل ۲- C) و به‌ندرت، تورمالین‌های شکل‌دار (شکل ۲- D) است، که در ادامه بررسی می‌شوند:

آپلیت‌های تورمالین‌دار منطقه در هورنفلس‌های کردیریت‌دار حاشیه نفوذ کرده‌اند. Baharifar (۲۰۰۴) بررسی‌های گسترده‌ای روی سنگ‌های دگرگونی الوند انجام داده و سن برخی سنگ‌های دگرگونی ناحیه‌ای (آمفیبولیت‌ها) منطقه را با روش K-Ar دست‌کم ۱۱۴ میلیون سال پیش برآورد کرده است. گرانیتهای پورفیری، گابرو و دیوریت از برونزدهای دیگر منطقه هستند. گرانیتهای پورفیری ترکیب اصلی توده الوند هستند؛ از این رو، گسترش این سنگ‌ها در منطقه از دیگر سنگ‌ها بیشتر است.

روش انجام پژوهش

برای بررسی هندسی گرهک‌های گوناگون، با روش تجزیه فراکتال، ۲۰ تصویر از شکل‌های گرهک‌های (nodule) گرد و ۲۰ تصویر از گرهک‌های دندردی برگزیده شدند. سپس این تصاویر با نرم‌افزار Photoshop سیاه-سفید شدند و با نرم‌افزار CorelDraw شبکه‌بندی شدند. در هر کدام از این شبکه‌بندی‌ها، r درازای مربع‌هاست. شمار مربع‌هایی که برای پوشاندن هر شکل نیاز است نیز با $N(r)$ نمایش داده شد. با هر اندازه r ، به‌گونه جداگانه، شمار مربع‌های پوشش‌دهنده تصویر شمرده شد و سپس نقاط روی نمودار رسم شد. در این حالت نقاط به‌صورت منحنی دیده می‌شوند. سپس برای به‌دست‌آوردن بُعد فراکتال، لگاریتم مقدارهای r و $N(r)$ به‌دست آورده می‌شود و نمودار لگاریتمی آن رسم می‌شود. در این نمودار داده‌ها به‌صورت خط مستقیم رسم می‌شوند و با اندازه‌گیری شیب این خط می‌توان بُعد فراکتال و میزان بی‌قاعدگی گرهک‌ها را به‌دست آورد. همچنین، برای بررسی چگونگی پراکندگی



شکل ۲- تصویرهای ماکروسکوپی پراکندگی تورمالین در آپلیت‌های خاکو (همدان). (A) نمای پوست پلنگی پدیدآمده از ردیف‌شدن گرهک‌های تورمالین؛ (B) گرهک‌های کمابیش بیضوی تورمالین با کناره‌های لوکوکرات؛ (C) شکل‌های دندریتی تورمالین در منطقه؛ (D) بلورهای شکل‌دار تورمالین همراه با بلورهای درشت کوارتز که به‌صورت رگه‌ای در آپلیت‌های میزبان نفوذ کرده‌اند.

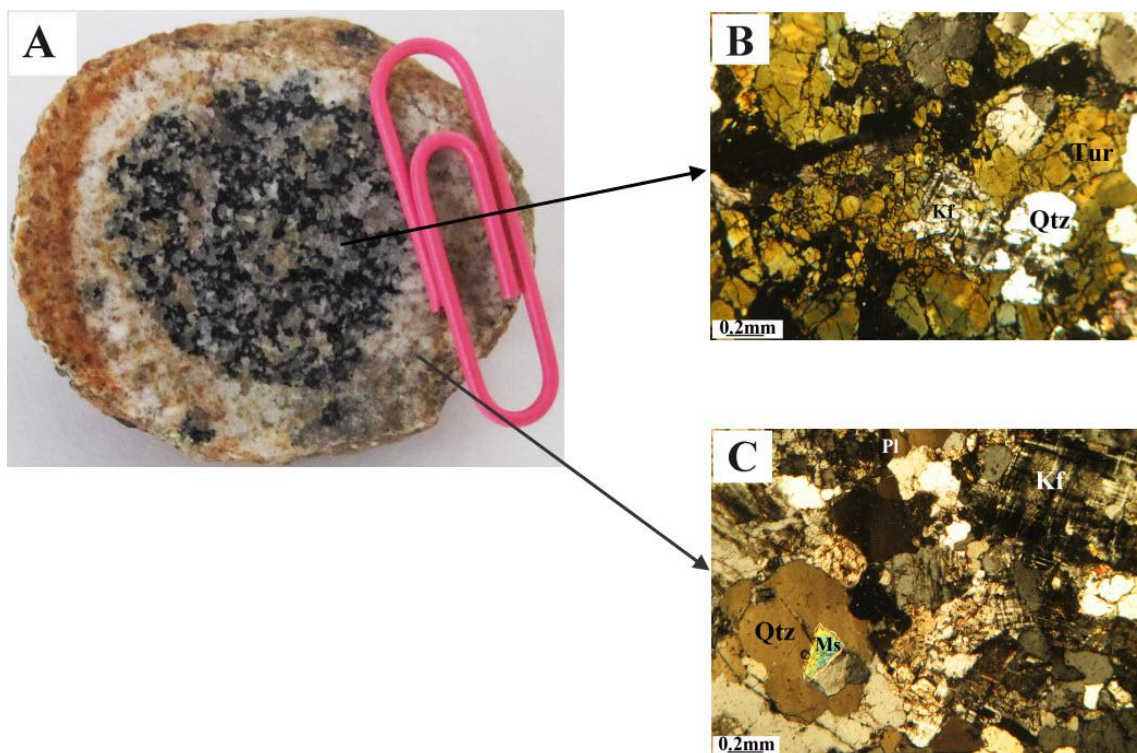
تورمالین پدید آمده‌اند. فضای میان تورمالین‌ها با ریزبلورهای کوارتز و فلدسپار پر شده است؛ (۲) هاله لوکوکرات حاشیه‌ای: این هاله شامل کوارتز، پتاسیم‌فلدسپار، پلاژیوکلاز و مسکوویت است (شکل ۳- C) و بسیار همانند آپلیت زمینه است؛ اما دانه‌بندی آن کمی درشت‌تر و رنگ آن روشن‌تر است و کانی‌های مافیک ندارد. این ویژگی‌ها نشان‌دهنده تمرکز این عنصرها به‌سوی بخش میانی گرهک هستند. (ب) گرهک‌های دندریتی: کانی‌شناسی گرهک‌های دندریتی همانند گرهک‌های گرد است؛ اما شکل آنها متفاوت است. شکل آنها به‌صورت شعاعی از مرکز به‌سوی سنگ میزبان منتشر شده‌اند. گاه گرهک‌های دندریتی و گرد در فاصله‌های نزدیک به‌هم دیده می‌شوند.

الف) گرهک‌های گرد: این گرهک‌ها شامل اجتماع تورمالین، کوارتز و فلدسپار بوده، کاملاً متراکم هستند و هیچ‌گونه فضای تهی و حفره‌ای ندارند. این گرهک‌ها دو بخش جداگانه دارند (شکل ۳- A):

(۱) هسته: این بخش دارای بلورهای بی‌شکل تا نیمه‌شکل‌دار تورمالین، کوارتز و پتاسیم‌فلدسپار، پلاژیوکلاز و مقدار اندکی مسکوویت است. تورمالین‌ها دارای چندرنگی قهوه‌ای تا سبز-قهوه‌ای هستند و زونینگ تکه‌ای دارند (شکل ۳- B). بررسی‌های میکروسکوپی نشان می‌دهند که در هسته یک گرهک، بلورهای تورمالین در نور پلاریزه‌شده همزمان خاموش می‌شوند و مانند یک بلور واحد رفتار می‌کنند. این تورمالین‌ها جهت‌یابی ترجیحی ندارند و از رشد شبکه‌ای یک بلور واحد

دسته از تورمالین‌ها در برابر دو دسته یادشده پیشین بسیار کمتر است. گویا این تورمالین‌ها از گرهک‌های تورمالینی دیگر جوان‌تر هستند و ماگمای سازنده آنها پس از تبلور آپلیت‌ها، در شرایطی نفوذ کرده است که بلورهای درشت فضای لازم (مانند: درز و شکاف‌ها) برای پیدایش را داشته‌اند.

پ) **تورمالین‌های شکل‌دار:** رگه‌های پگماتیستی نفوذ کرده در آپلیت‌ها، دارای تورمالین‌های شکل‌دار با فرم بلوری شناخته‌شده‌ای هستند. این تورمالین‌ها به‌صورت بلورهای تجمعی درشت و منشوری همراه با کوارتز هستند. این تورمالین‌ها به‌صورت رگه‌هایی دیده می‌شوند که در زمینه آپلیت‌ها نفوذ کرده‌اند (شکل ۲- D). فراوانی این



شکل ۳- A) مقطع صیقل داده‌شده از گرهک تورمالینی با هسته و حاشیه لوکوکرات؛ B) مقطع میکروسکوپی از بخش هسته و انباشته‌شدن تورمالین در این بخش؛ C) مقطع میکروسکوپی از بخش حاشیه لوکوکرات گرهک و نبود تورمالین

را بررسی کرد را با هندسه فراکتال می‌توان بررسی کرد. کاربرد هندسه فراکتال در بررسی سیستم‌های ماگمایی نشان می‌دهد که این سیستم‌ها آشفته رفتار می‌کنند (Flinders and Clemens, 1996; Perugini and Poli, 2000).

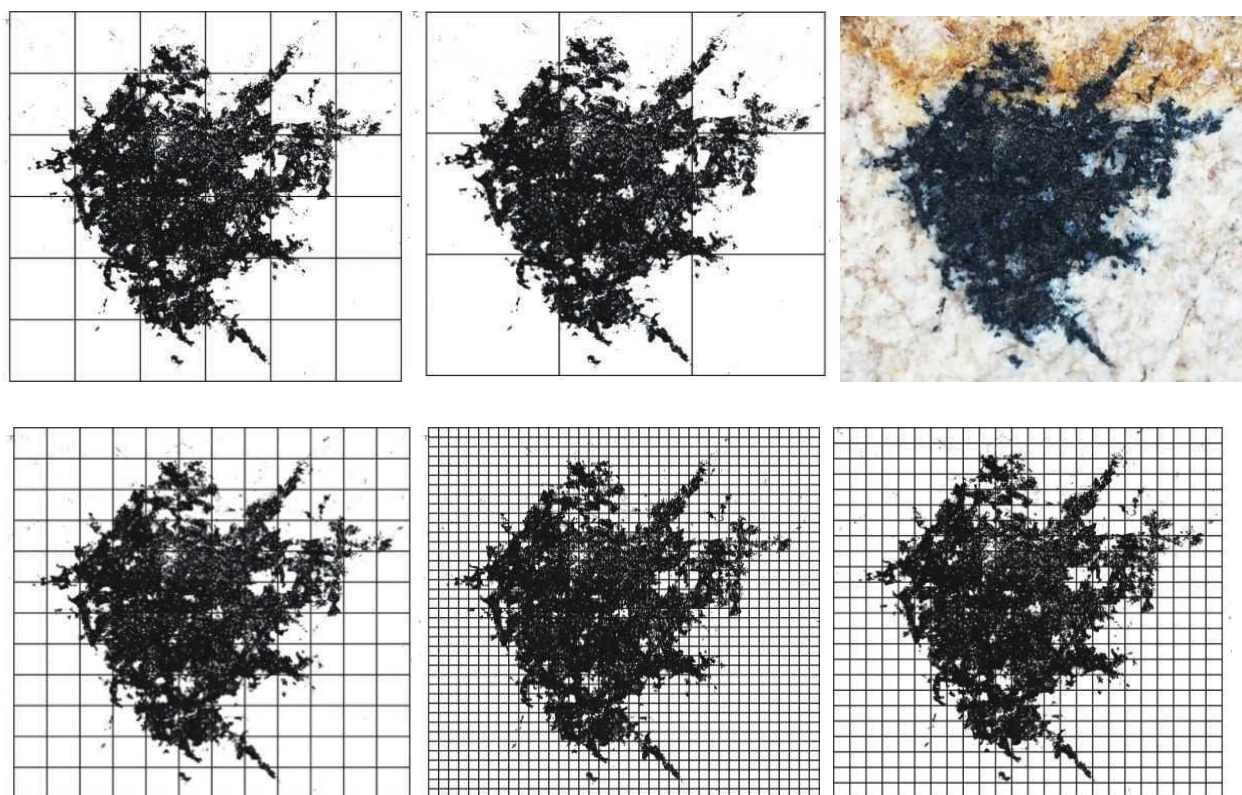
برای اندازه‌گیری بعد فراکتال در گرهک‌های تورمالین ۲۰ نمونه از تصویرهای گرهک‌های تورمالین گرد و ۲۰ نمونه از گرهک‌های دندریتی

بررسی فراکتال گرهک‌های تورمالین منطقه خاکو

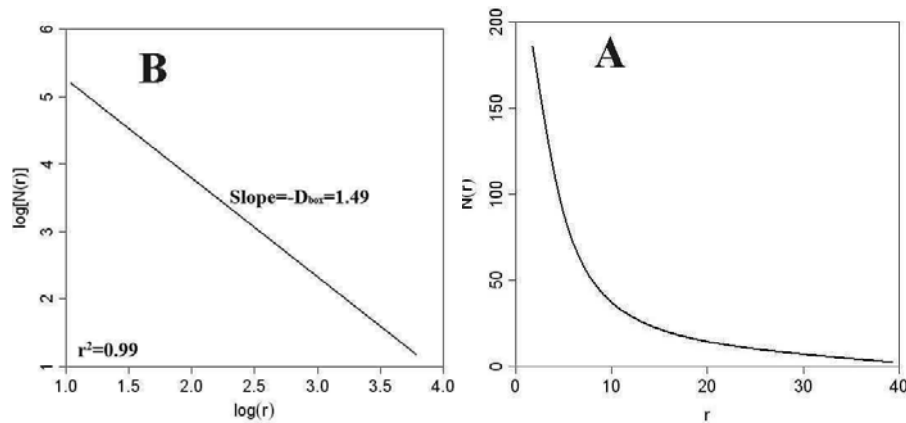
هندسه فراکتال یک مفهوم جدید است که نخستین بار Mandelbrot (۱۹۸۰) آن را پیشنهاد داده است. پایه‌های هندسه فراکتال بر این اصل استوار است که شکل‌های طبیعی از تکرار قانونمند یک بلوک نخستین پدید می‌آیند. برای نمونه، شکلهایی مانند دانه‌های برف، شکل یک کوه و یا شکل سواحل که با هندسه کلاسیک نمی‌توان آنها

بعد فراکتال در واقع بررسی فضای پُر شده با گرهک‌ها در سطح است. از آنجایی که شکل این گرهک‌ها فراکتال است، بعد آنها هرگز عدد صحیح نمی‌شود؛ زیرا این شکل‌های فراکتال، نه خطی (بعد فرکتال یک) و نه صفحه‌ای (بعد فرکتال دو) هستند. هرچه شکل گرهک منظم‌تر و فشرده‌تر باشد بعد فراکتال آن به حالت دو بعدی نزدیک‌تر است و بالعکس، هر چه شکل گرهک نامنظم و دندریتی باشد بعد فراکتال آن مایل به حالت خطی و یک بعدی است. پس، بعد فراکتال با مقدار بی‌نظمی گرهک رابطه وارونه دارد. بعد فراکتال به‌دست‌آمده در نمونه‌های بررسی‌شده از $1/46$ تا $1/92$ متغیر است (شکل ۵)؛ به‌گونه‌ای که نمونه‌های منظم‌تر (گرهک‌های گرد) مقدارهای D_{box} بالاتری دارند.

با نرم‌افزار CorelDraw به روش مربع‌شمار بررسی شدند. برای بررسی نمونه‌ها پنج اندازه گوناگون ۳، ۶، ۱۲، ۲۴ و ۳۹ میلی‌متر برای وجه r در نظر گرفته شد. با هر اندازه برای r شمار مربع‌هایی (N_r) که گرهک‌های تورمالین را پوشش می‌دهند شمرده شد (شکل ۴). مقدارهای r و N_r در برابر یکدیگر در یک منحنی رسم شدند. برای به‌دست‌آوردن بعد فراکتال، $\text{Log}(r)$ و $\text{Log}(N_r)$ اندازه‌گیری شده و نمودار آن رسم می‌شود. شیب خط به‌دست‌آمده در این نمودار $-D_{\text{box}}$ بوده و D_{box} بعد فراکتال است. به گفته دیگر، مرحله‌های گفته‌شده از معادله $N_r = r^{-D_{\text{box}}}$ پیروی می‌کند (Mandelbrot, 1982). با لگاریتم‌گرفتن از این معادله، رابطه $\text{Log}(N_r) = -D_{\text{box}} \cdot \text{Log}(r)$ به‌دست می‌آید (در این معادله D بعد فراکتال است).



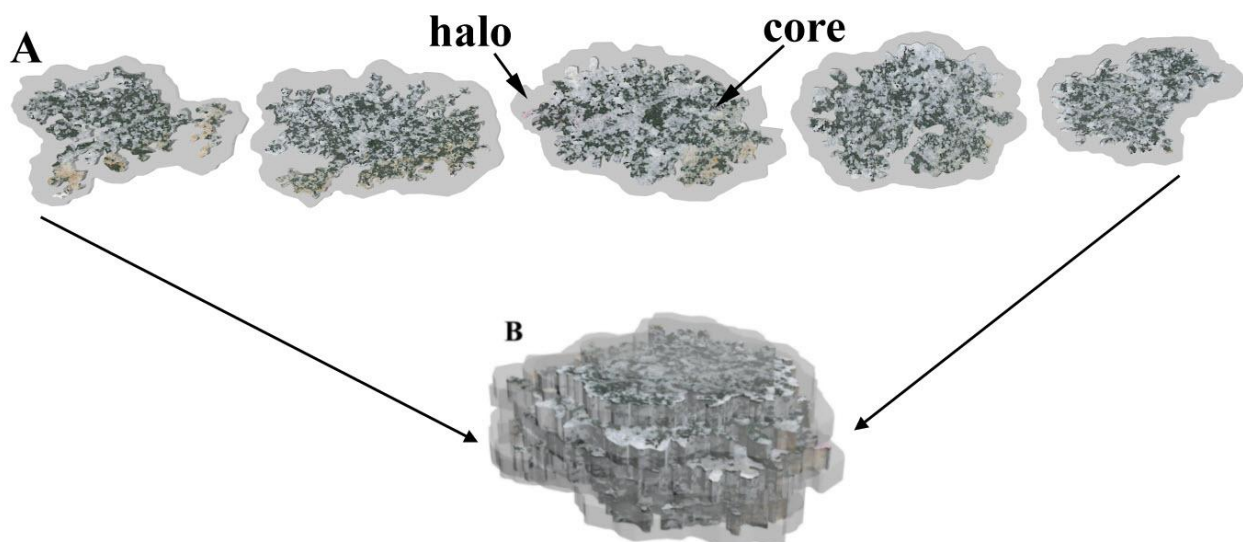
شکل ۴- شبکه‌بندی گرهک‌های تورمالین با استفاده از نرم‌افزار کورل دراو برای محاسبه بعد فراکتال. طول ابعاد مربع‌ها به ترتیب ۳۹، ۲۴، ۱۲ و ۶ میلی‌متر است.



شکل ۵- A) نمایش تغییرات r در برابر $N(r)$ و شکل‌های فرکتال گرهک‌های بررسی شده؛ B) اندازه‌گیری بعد فرکتال (D_{box}) با درونیابی خطی نمودار $\text{Log}(r)$ در برابر $\text{Log}[N(r)]$ ($-D_{box}$ شیب خط به‌دست‌آمده است)

۲ سانتیمتری از گرهک‌ها با برش‌های ۳ میلیمتری بررسی شده و شکل و ساختار درونی گرهک‌ها بازسازی شد. دو بخش سازنده گرهک‌ها (هسته و هاله لوکوکرات) را در تصویرهای سه‌بعدی می‌توان به‌خوبی شناسایی کرد (شکل ۶). در این شکل، این دو بخش مرز بسیار آشکاری با یکدیگر و نیز با آپلیت‌های میزبان نشان می‌دهند. پیدایش این مرز آشکار پیامد داشتن یا نداشتن تورمالین در بخش‌های گوناگون است.

بررسی سه‌بعدی گرهک‌های تورمالین منطقه خاکو
 برای بررسی چگونگی پراکندگی گرهک‌های تورمالین در آپلیت‌های میزبان، روی بلوک‌های ۵۰ سانتیمتری، برش‌های ۱ سانتیمتری زده شد. در آپلیت‌های دارای گرهک‌های تورمالین، این برش‌ها نشان دادند که در زمینه آپلیت‌ها، گرهک‌ها جدای از یکدیگر پراکنده شده‌اند و با یکدیگر رابطه رگه‌ای ندارند. برای شناسایی ساختار درونی گرهک‌ها نیز تکه‌های



شکل ۶- بازسازی سه‌بعدی گرهک‌های تورمالین. A) برش متوالی گرهک‌های تورمالین با قطر ۳ میلیمتر. دو واحد ساختاری در گرهک تورمالین، هسته (بخش‌های تیره) و هاله (بخش‌های لوکوکرات) به‌خوبی در شکل دیده می‌شوند؛ B) شکل سه‌بعدی رسم‌شده با نرم‌افزار 3D Max از توالی برش‌های گرهک تورمالین

این هاله‌ها در شرایط ساب‌سالییدوس پدید آمده بودند، آنگاه هاله یادشده باید در گرداگرد همه گرهک‌ها دیده می‌شد (Perugini and Poli, 2007)؛

(۳) یکی دیگر از ویژگی‌هایی که احتمال خاستگاه پس از ماگمایی برای این گرهک‌ها را نفی می‌کند، شکل کروی و فرکتال آنهاست؛ زیرا بافت‌هایی که در شرایط پس از فرایند ماگمایی ساخته می‌شوند، بیشتر رگه‌ای هستند (Perugini and Poli, 2007). همچنین، بسیاری از گرهک‌های منطقه، شکل‌های دندردی با جهت رشد رو به بیرون دارند. این شکل‌ها اصولاً در پی فرایندهای ساب‌سالییدوس در سیستم‌های مایع ساخته می‌شوند (Vernon, 2004) و به‌سختی می‌توان آنها را با شرایط ساب‌سالییدوس شرح داد؛

(۴) از ویژگی‌های دیگری که احتمال پیدایش این گرهک‌ها پس از فرایند ماگمایی را نفی می‌کند این است که این گرهک‌ها در زمینه سنگ به‌گونه یکنواخت، خطی و جریان‌ی میزبان جای گرفته‌اند. این پدیده نشان می‌دهد که آنها پیش از سردشدن ماگما در سیستم ماگمایی نیز بوده‌اند و همگام با جابجایی ماگما جابجا شده‌اند.

از این‌رو، برپایه ویژگی‌های گفته‌شده، احتمال دارا بودن خاستگاه ساب‌سالییدوس (گرمایی) برای تورمالین‌های بررسی‌شده منتفی است. برپایه بررسی‌های تجربی Wolf و London (۱۹۹۷)، تورمالین‌های متبلور شده از ماگمای سرشار از B شکل‌دار بوده و دارای فرم کریستالوگرافی شناخته‌شده‌ای هستند؛ اما تورمالین‌های میان‌دانه‌ای که درون هسته گرهک‌های تورمالین یافت می‌شوند شکل‌دار نبوده و این گرهک‌ها از ماگمای نخستین و زیر اشباع از عنصر بور متبلور شده‌اند.

نبود آمیزش در مذاب مادر سازوکاری برای تمرکز بور و عنصرهای مورد نیاز دیگر برای ساخت حباب‌های دپلمیریزه (مذاب سرشار از بور و مواد

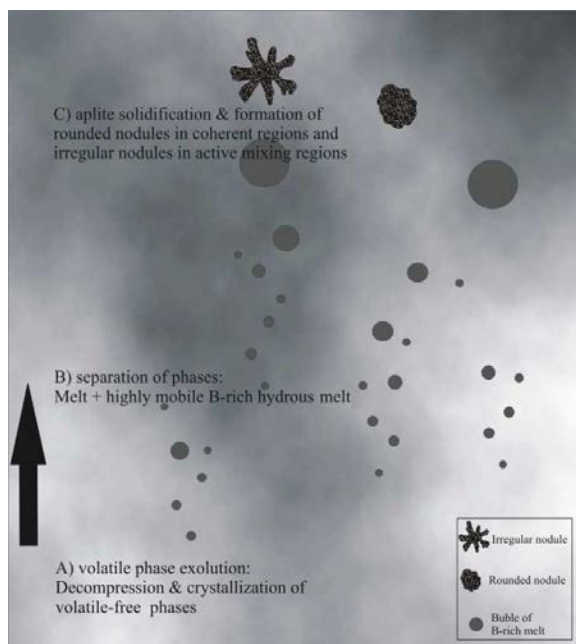
شکل گرهک‌های تورمالین با روی هم گذاشتن برش‌های متوالی ۲ میلی‌متری گرهک‌ها در نرم‌افزار 3D Max بازسازی شد. برپایه این شکل، نسبت حجم هسته به حاشیه در گرهک‌های گوناگون کمابیش ثابت و نزدیک ۱ به ۲ است. همچنین، درصد تورمالین در هسته گرهک‌ها نیز کمابیش ثابت و نزدیک ۳۰ درصد است. حجم هسته از ۲۲ تا ۴۳٪ است؛ اما حاشیه ۵۷ تا ۷۸ درصد حجم گرهک را دربر می‌گیرد. حجم میانگین برای هسته ۳۴ درصد و برای حاشیه گرهک ۶۶ درصد است.

پیشنهاد فرضیه‌های درباره سازوکار پیدایش گرهک‌های تورمالین منطقه خاکو

اصولاً برای پیدایش گرهک‌های تورمالین، سه خاستگاه گوناگون ماگمایی، گرمایی - ماگمایی و گرمایی پیشنهاد می‌شود (Perugini and Poli, 2007). در اینجا، برپایه یافته‌ها و ویژگی‌های زمین‌شناسی و سنگ‌نگاری در منطقه بررسی‌شده، علت پیدایش گرهک‌ها بررسی می‌شود. برخی ویژگی‌ها عبارتند از:

(۱) گرهک‌هایی که پیامد جانشینی‌های پس از فرایند ماگمایی هستند با یکدیگر رابطه دارند و سیستم‌های رگه‌ای و شبکه‌ای را پدید می‌آورند. از دیدگاه زایشی، این گرهک‌ها با رگه‌های تورمالین تغذیه‌کننده وابستگی دارند (Rozendaal and Bruwer, 1995). در منطقه بررسی‌شده، گرهک‌های تورمالین بی‌آن‌که با یکدیگر وابستگی داشته باشند، به‌گونه پراکنده و مستقل در آپلیت‌های میزبان دیده می‌شوند. هیچ گواهی برای اینکه این گرهک‌ها از راه شکستگی‌ها با یکدیگر رابطه داشته باشند، وجود ندارد؛

(۲) هاله‌های لوکوکرات پدیدآمده در حاشیه گرهک‌ها محدود به برخی گرهک‌ها است؛ اما اگر سیستم به‌تازگی دچار سیالی سرشار از B شده بود و



شکل ۷- مرحله‌های تکامل سیستم ماگمایی در منطقه خاکو (همدان) (با تغییراتی پس از Balen و Petrinc، ۲۰۱۱: A) جدایش فاز گازی در پی کاهش فشار؛ B) جدایش ماگمای آبدار سرشار از B از ماگما؛ C) انجماد آپلیت‌ها و پیدایش گرهک‌های تورمالین با شکل‌های گوناگون. شکل‌های نامنظم (دندریتی) در مناطقی روی می‌دهند که جایجایی‌ها بالاست. شکل‌های گردشده و منظم در مناطق چسبیده که انتقال عنصرها در آنها آهسته است روی می‌دهند.

به باور Trumbull و همکاران (۲۰۰۸) نیز علت پیدایش حباب‌های کروی جداگانه، آغاز روی‌ندادن آمیزش در مذاب در حال تکامل است. به‌دنبال کاهش دمای سیستم، حجم بلورها در مذاب گرانیتهی افزایش می‌یابد و در پی افزایش ویسکوزیته، ماگمای گرانیتهی به‌شدت پلیمریزه می‌شود. بخش حباب‌های سیال در چنین خمیره بلورینی به دام می‌افتد. چنین شکل‌های کروی در مناطقی که این حباب‌ها نتوانسته‌اند از ماگمای گرانیتهی میزبان فرار کنند، سپس به‌صورت گرهک‌های تورمالین متبلور می‌شوند. یافته‌های صحرائی و میکروسکوپی نشان می‌دهند که گرهک‌ها پیش از به‌پایان‌رسیدن انجماد گرانیته میزبان متبلور شده‌اند. ظاهر روشن هاله‌ لوکوکرات

فرار) دانسته می‌شود. این سازوکار در پایان پیدایش تورمالین‌های میان‌دانه‌ای (مانند آنچه در هسته نودول‌های تورمالین‌دار منطقه دیده می‌شود) را در پی دارد (Thomas *et al.*, 2003). زونینگ سنگ‌نگاری (در مقاطع میکروسکوپی این تورمالین‌ها) نشان‌دهنده شرایط اکسولوشن سیال (fluid exsolution) و تغییرات فشار سیال در مذاب است (Dini *et al.*, 2007). پی‌برپایه گرهک‌ها منتفی است و گرهک‌های یادشده در یک سیستم ماگمایی زیر اشباع از B در پی فرایند اکسولوشن سیال پدید آمده‌اند.

بحث و بررسی

Thomas و Veksler (۲۰۰۲) و همکاران Veksler، Thomas و همکاران (۲۰۰۳) و Broska و Balen (۲۰۱۱) خاستگاه گرهک‌های تورمالین را مرحله‌های پایانی تبلور مذاب گرانیتهی می‌دانند. بدین‌گونه که در پی تبلور گرانیته و کاهش فشار در هنگام جایگیری ماگما به‌سوی سطوح بالای پوسته، تمرکز مواد فرار افزایش می‌یابد و به آرامی مذاب از مواد فرار فرااشباع شده و باعث جدایش آنها می‌شود. در پایان جدایش فیزیکی دو فاز مختلف را در پی دارد: (۱) مذاب آلومینوسیلیکات که به‌شدت پلیمریزه است؛ (۲) فاز آبدار سرشار از مواد فرار که در پی حضور این سیال‌ها، دپلیمریزه شده است.

کاهش ویسکوزیته و چگالی همراه با کاهش دمای لیکویدوس و سالیدوس، جدایش یک فاز سرشار از B و سیال‌ها به‌صورت حباب‌های جداگانه سرشار از B را در پی دارد. این حباب‌ها در پی کاهش کشش سطحی به‌هم می‌پیوندند (شکل ۷)، چنین حجم‌های جدا از هم دارای تمرکز بور و عنصرهای لازم دیگر برای رشد بلورهای تورمالین در آینده هستند.

است. در چنین شرایطی جریان همرفت مانند عامل ناپایدارکننده رفتار می‌کند و میزان بی‌نظمی را در سطح در حال رشد افزایش می‌دهد و شکل‌های بی‌نظم‌تر (دندریتی) رشد می‌کنند. از این‌رو، سرعت رشد گرهک می‌تواند نوع ریخت‌شناسی آن را توجیه کند؛ اما نمی‌تواند بگوید چرا در یک توده ماگمایی شکل‌های گرهک‌مانند گوناگونی (کروی و دندریتی) در کنار یکدیگر یافت می‌شوند. برای رویداد گرهک‌هایی با شکل‌های گوناگون به سرعت‌های رشد گوناگون نیاز است. Liu و همکاران (۱۹۹۴) و Clifford (۱۹۹۸ و ۱۹۹۹) گسترش مناطق بی‌نظم و منظم در سیال‌های متحرک را پدیدآورنده شکل‌های گوناگون بلوری دانستند. کاربرد این جریان‌های جابجایی در سیستم‌های ماگمایی نیز به اثبات رسیده است (Perugini *et al.*, 2003; Perugini *et al.*, 2004). این الگو با نام الگوی جریان سینوسی شناخته می‌شود و در حالت دوبعدی، نوسان ذرات در جهت‌های x و y از فرمول‌های زیر پیروی می‌کند:

$$x_{n+1} = x_n + \frac{k}{2} \cdot \sin(2\pi \cdot y_n)$$

و

$$y_{n+1} = y_n + \frac{k}{2} \cdot \sin(2\pi \cdot x_{n+1})$$

دامنه حرکت سیستم‌های آشفته در بازه $0 \leq (x, y) \leq 1$ متغیر است. k نیز ثابت الگوی سینوسی است. از دیدگاه جنبشی، این جریان شامل دو حرکت قائم است که هر کدام نیمرخ سرعت سینوسی دارند. این حرکت‌ها که با پدیدآوردن کشیدگی و فشردگی سیال را جابجا می‌کنند، عبارتند از: (۱) مناطق با جابجایی بالا؛ (۲) مناطق چسبنده. از این‌رو، در سیستم ماگمایی مناطقی که مسیرهای بسته چرخشی و اندکی دارند، همزیست با مناطقی هستند که مسیرهای آشفته دارند (شکل ۸). از دیدگاه Ottino (۱۹۸۹) و Liu و همکاران (۱۹۹۴)، انتقال کافی مواد در سیستم باعث

در حاشیه هسته گرهک‌های تیره نشان می‌دهد که این پهنه، پهنه‌ای انتقالی میان آپلیت‌های میزبان و هسته گرهک است. این نکته نشان‌دهنده انتشار عنصرهای مافیک (مانند: Mg و Fe) به درون و انتشار عنصرهای فلسیک (نظیر K و Na) به سوی مذاب است. تورمالین‌های میان‌دانه‌ای که درون هسته گرهک‌های تورمالین یافت می‌شوند پیامد تبلور از ماگمای نخستین زیراشباع از بور هستند. نبود آمیزش در مذاب مادر سازوکاری برای تمرکز بور و عنصرهای مورد نیاز دیگر برای ساخت حباب‌های دپلمیریزه (مذاب سرشار از بور و مواد فرار) دانسته می‌شود. این فرایند در پایان، تورمالین‌های میان‌دانه‌ای را پدید می‌آورند.

مهم‌ترین پرسش این است که چه شرایط فیزیکی-شیمیایی پدیدآورنده شکل‌های گوناگون گرهک‌ها (گرد و دندریتی) بوده است. از دیدگاه Vicsek (۱۹۸۵)، پیدایش شکل‌های گوناگون گرهک‌ها از نسبت γ/H (کشش سطحی بر گرمان نهان تبلور) پیروی می‌کند. در هنگام رشد بلور، کشش سطحی بازدارنده فرایند رشد است و سطوح با کشش سطحی بالا به‌علت دارا بودن انرژی بیشتر، کمتر رشد می‌کنند. از این‌رو، اگر سطح، فرایند رشد را کنترل کند رشد بلورها تنها در امتداد سطوح کمی روی می‌دهد؛ اما گرهک‌های دیده‌شده در منطقه، یا کروی و یا دندریتی هستند و انشعاب‌های بسیاری از مرکز به‌سوی حاشیه دارند. از این‌رو، نقش کشش سطحی در رشد بلورها بسیار کم است.

عامل موثر دیگر در رشد بلورها، انرژی آزادشده در پی تبلور (گرمای نهان تبلور)، در شرایط ساب‌سالیدوس است. این انرژی در فاصله میان بلور و مایع مذاب آزاد می‌شود و جریان‌های همرفتی میان مناطق گرم‌شده و مایع حاشیه را پدید می‌آورد (Nagatani, 1988). برپایه پیشنهاد Nagatani (۱۹۸۸)، در مناطقی که سرعت رشد بیشتر باشد، گرمای نهان تبلور آزادشده بیشتر

مناطق چسبنده ← انتقال ضعیف عناصر ← رشد آهسته ← گرمای نهان
تبلور پایین ← جریان همرفت پایین ← ایجاد شکل‌های گرد شده



مناطق با جابجایی بالا ← انتقال سریع عناصر مورد نیاز برای رشد ← رشد
سریع ← گرمای نهان تبلور بالا ← جریان همرفت بالا ← ایجاد شکل‌های نامنظم



شکل ۸- چکیده‌ای از مرحله‌های پیشنهادشده در سیستم ماگمایی برای پیدایش شکل‌های گوناگون گرهک در آپلیت‌های منطقه خاکو (همدان)

نتیجه‌گیری

از دیدگاه هندسی، گرهک‌های تورمالین بررسی‌شده از شکل‌های فرکتال هستند. بعد فرکتال به‌دست‌آمده در گرهک‌های بررسی‌شده از ۱/۴۶ در گرهک‌های دندریتی تا ۱/۹۲ در گرهک‌های گرد متغیر است. ریخت‌شناسی و چگونگی پراکنندگی گرهک‌های تورمالین در آپلیت‌های بررسی‌شده می‌تواند برپایه سازوکار جایگیری و محیط تبلور آپلیت‌های میزبان (پوسته بالایی)، توضیح داده شود. در هنگام جایگیری ماگما، در پی کاهش فشار، نبود آمیزش و پیدایش دو فاز گوناگون در ماگما روی می‌دهد: (۱) آپلیت معمولی؛ (۲) فاز سرشار از B. دپلمیریزاسیون چشمگیر مذاب سرشار از B و پس از آن، کاهش ویسکوزیته و چگالی، همراه با کاهش دمای لیکوییدوس و سالییدوس، جدایی فیزیکی فازی سرشار از B و سیال‌ها را در پی دارد. سیال‌ها به‌صورت حباب‌های جداگانه سرشار از B هستند و در پی کاهش کشش سطحی به‌هم می‌پیوندند. بررسی سه‌بعدی گرهک‌ها نشان می‌دهد که این گرهک‌ها به‌صورت جداگانه از یکدیگر هستند و ارتباط رگچه‌ای ندارد. نبود ارتباط میان آنها، هاله لوکوکرات در گرداگرد برخی گرهک‌ها، شکل

می‌شود که مواد سازنده بتوانند در سیستم پخش شوند و به بی‌نظمی برسند و رشد شکل‌های نامنظم مانند گرهک‌های دندریتی را در پی داشته باشند. از این‌رو، در مناطقی که جابجایی‌ها در مسیرهای بسته و محدود دایره‌ای روی می‌دهد، دارای کشیدگی و فشردگی ضعیف هستند و نقاطی که جابجایی‌های نامنظم دارند کشیدگی و فشردگی بیشتری دارند. سیستم‌های دینامیکی آشفته، مانند جریان‌های سینوسی، ساختارهای فراکتال پدید می‌آورند و این شکل‌های در مناطق با ترکیب‌شدگی بالا و مناطق چسبنده‌ای دیده می‌شوند که با هم همزیست هستند. از این‌رو، عامل موثر در گوناگونی گرهک‌های تورمالین، حضور همزمان مناطق با جابجایی بالا و مناطق چسبنده در کنار یکدیگر است. اگر رشد گرهک‌ها در مناطق با جابجایی بالا رخ دهد، سرعت رشد، به‌علت آشفته‌گی میدان‌های جریان، بالا خواهد بود؛ زیرا مواد کافی مورد نیاز برای رشد را می‌رساند. برپایه پیشنهاد Nagatani (۱۹۸۸)، این پدیده پیامد جریان گرمای نهان تبلور بالاست. از این‌رو، جریان‌های همرفت حاصل قوی هستند و پیدایش شکل‌های نامنظم افزایش می‌یابد. برعکس، اگر رشد گرهک‌ها در مناطق چسبنده رخ دهد، انتقال عنصرها به‌دست ساختار بسته میدان‌های جریانی کم می‌شود، و رشد آهسته می‌شود. در این شرایط، جریان گرمای نهان تبلور کم است و جنبش‌های همرفت ضعیف هستند؛ از این‌رو، شکل‌های گرد شده پدید می‌آیند (شکل ۸). نبود هاله لوکوکرات در گرداگرد همه گرهک‌های تورمالین نیز می‌تواند با توجه به میدان‌های جریانی آشفته در ماگما توجیه شود که عامل جابجایی توده ماگما هستند. گرهک‌های تورمالینی که در مناطق چسبنده به‌دام افتاده‌اند دچار جابجایی بسیاری نمی‌شوند و هاله گرداگرد آنها به‌جای می‌ماند؛ اما گرهک‌هایی که در مناطق با جابجایی بالا هستند دچار کشیدگی و فشردگی بسیاری شده و از این‌رو، هاله گرداگرد آنها تخریب می‌شود.

است، کشیدگی و فشردگی ضعیفی دارند و بیشتر شکل‌های گرهک‌مانندِ گرد ساخته شده‌اند؛ اما در نقاطی که جابجایی‌های نامنظم دارند کشیدگی و فشردگی بیشتر بوده و گرهک‌های دندریتی پدید آمده‌اند.

سپاس‌گزاری

نگارندگان از راهنمایی‌های دکتر نصیرالاسلامی، استاد آمار دانشگاه بوعلی سینا، دکتر عابدی، استاد هندسه دانشگاه بوعلی سینا و مهندس هوشنگی، کارشناس کامپیوتر، بسیار سپاس‌گزارند.

کروی و دندریتی گرهک‌ها و پراکنندگی جریانی آنها در زمینهٔ آپلیت‌ها احتمال خاستگاه گرمابی آنها را نفی می‌کند. تورمالین‌های این نودول‌ها شکل‌دار نیستند؛ از این‌رو، خاستگاه آنها ماگمای سرشار از B نیست. این تورمالین‌ها در مرحله‌های پایانی تبلور در پی پیدایش اکسولوشن سیال میان حباب‌های سرشار از B و مذاب گرانیتی ساخته شده‌اند. سرعت‌های رشد گوناگون در مناطق گوناگون ماگما، پیدایش شکل‌های گوناگون بلوری را در پی داشته است. در مناطقی که جابجایی‌ها در مسیرهای بسته و محدود دایره‌ای رخ داده

منابع

- Baharifar, A. A. (2004) Petrology of metamorphic rocks of Hamedan region. PhD thesis, Tarbiat Moallem University, Tehran, Iran (in Persian).
- Balen, D. and Broska, I. (2011) Tourmaline nodules – products of devolatilization within the final evolutionary stage of granitic melt? In: Granite-Related Ore Deposits (Eds. Sial, A. N., Bettancourt, J. S., De Campos, C. P. and Ferreira, V. P.) Special Publications 350:53–68. Geological Society, London.
- Balen, D. and Petrinec, Z. (2011) Contrasting tourmaline types from peraluminous granites: a case study from Moslavačka Gora (Croatia). *Mineralogy and Petrology* 102:117–134.
- Broska, I., Uher, P. and Lipka, J. (1998) Brown and blue schorl from the Spiš- Gemer granite, Slovakia: composition and genetic relations. *Journal of the Czech Geological Society* 43: 9-16.
- Buriánek, D. and Novák, M. (2007) Compositional evolution and substitutions in disseminated and nodular tourmaline from leucocratic granites: Examples from the Bohemian Massif, Czech Republic. *Lithos* 95:148–164.
- Cashman, K. V. (1993) Relationship between crystallization and cooling rate: insight from textural studies of dikes. *Contribution to Mineralogy and Petrology* 113: 126–142.
- Clifford, M. J., Cox, S. M. and Roberts, E. P. L. (1998) Lamellar modeling of reaction, diffusion and mixing in a two-dimensional flow. *Chemical Engineering Journal* 71: 49–56.
- Clifford, M. J., Cox, S. M. and Roberts, E. P. L. (1999) Measuring striation widths. *Physics Letters A* 260: 209–217.
- Didier, J. (1973) Mineral nodules. In: *Granites and their enclaves* (Ed. Didier, J.) 357–368. The bearing of enclaves on the origin of granites. *Developments in Petrology*. Elsevier, New York.
- Dini, A., Corretti, A., Innocenti, F., Rocchi, S. and Westerman, D. S. (2007) Sooty sweat stains or tourmaline spots? The Argonauts at Elba Island (Tuscany) and the spread of Greek trading in the Mediterranean Sea. In: *Myth and geology* (Eds. Piccardi, L. and Masse, W. B.). Special Publications 273:227–243. Geological Society, London.

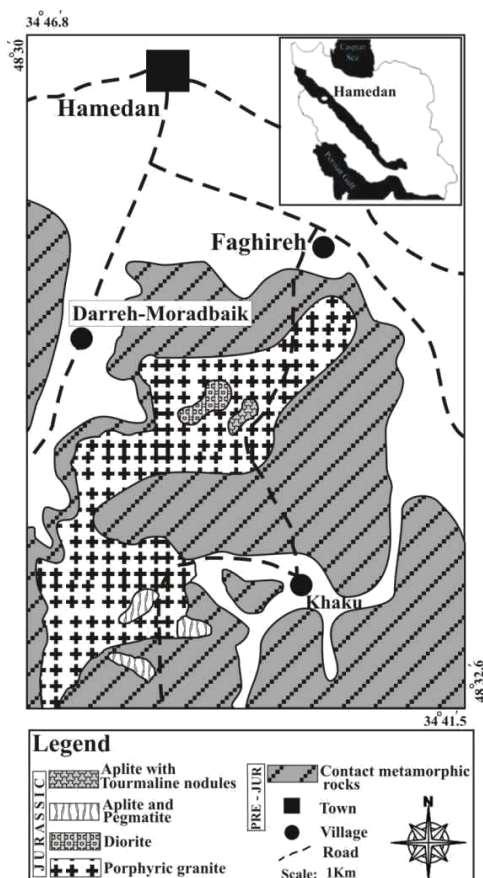
- Eghlimi, B., Sabzehi, M. and Sohaili, M. (2000) 1/100000 map of Hamedan and its margin report. Geological Survey of Iran, Tehran (in Persian).
- Faure, F., Trolliard, G., Nicollet, C. and Montel J. M. (2003) A developmental model of olivine morphology as a function of the cooling rate and the degree of undercooling. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 145: 251–263.
- Flinders, J. and Clemens, J. D. (1996) Non-linear dynamics, chaos, complexity and enclaves in granitoid magmas. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh Earth Sciences* 87: 225–232.
- Kubiš, M. and Broska, I. (2005) The role of boron and fluorine in evolved granitic rock systems (on the example of the Hnilec area, Western Carpathians). *Geologica Carpathica* 56: 193–204.
- Le Fort, P. (1991) Enclaves of the Miocene Himalayan leucogranites. In: *Enclaves and Granite Petrology* (Eds. Didier, J. and Barbarin, B.) 13: 35–47. *Developments in Petrology*, Elsevier.
- Liu, M., Muzzio, F. J. and Peskin, R. L. (1994) Quantification of mixing in aperiodic chaotic flows. *Chaos Solitons Fractals* 4: 869–893.
- London, D. (1999) Stability of tourmaline in peraluminous granite systems: the boron cycle from anatexis to hydrothermal aureoles. *European Journal of Mineralogy* 11: 253–262.
- London, D. and Manning, D. A. C. (1995) Chemical variation and significance of tourmaline from Southwest England. *Economic Geology* 90: 495–519.
- London, D., Morgan, G. B. V. I. and Wolf, M. B. (1996) Boron in granitic rocks and their contact aureoles. In: *Mineralogy, Petrology, and Geochemistry in the Earth's Crust* (Eds. Grew, E. S. and Anovitz, L.). 33:299–330. *Mineralogical Society of America, Reviews in Mineralogy*.
- Mandelbrot, B. B. (1980) Fractal aspects of the iteration of $z\lambda(1-z)$ for complex λ , z . *Annals of the New York Academy of Sciences* 357: 249–259.
- Mandelbrot, B. B. (1982) *The fractal geometry of nature*. W. H Freeman, New York.
- Mani-Kashani, S. (2006) The study of plutonic rocks and their metamorphic aureole in Khakou area (Hamedan). MSc thesis, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran (in Persian).
- Nagatani, T. (1988) Convection effect on the diffusion-limited-aggregation fractal: Renormalization-group approach. *Physical Review A* 37: 4461–4468.
- Ottino, J. M. (1989) *The kinematics of mixing: stretching, chaos and transport*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Perugini, D. and Poli, G. (2000) Chaotic dynamics and fractal magmatic interaction processes: a different approach to the interpretation of mafic microgranular enclaves. *Earth and Planetary Science Letters* 175: 93–103.
- Perugini, D. and Poli, G. (2007) Tourmaline nodules from Capo Bianco aplite (Elba Island, Italy): an example of diffusion limited aggregation growth in a magmatic system. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 153: 493–494.
- Perugini, D., Poli, G., Mazzuoli, R. (2003) Chaotic advection, fractals and diffusion during mixing of magmas: evidence from lava flows. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 124: 255–279.
- Perugini, D., Ventura, G., Petrelli, M. and Poli, G. (2004) Kinematic significance of morphological structures generated by mixing of magmas: a case study from Salina Island (Southern Italy). *Earth and Planetary Science Letters* 222: 1051–1066.
- Pichavant, M. and Manning, D. A. C. (1984) Petrogenesis of tourmaline granites and topaz granites: the contribution of experimental data. *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 35: 31–50.

- Rozendaal, A. and Bruwer, L. (1995) Tourmaline nodules: indicators of hydrothermal alteration and Sn-Zn-(W) mineralization in the Cape Granite Suite, South Africa. *Journal of African Earth Sciences* 21(1): 141-155.
- Sepahi, A. A. (1999) Petrology of Alvand plutonic complex with special reference on granitoids. PhD thesis, Tarbiat Moallem University, Tehran, Iran (in Persian).
- Sepahi, A. A. (2001) study of tourmalinization and resulted textures in granites, aplites and pegmatites of Faghireh-Khaku area (south of Hamedan). Abstract of articles from 20th Conference of Earth Sciences, Iran (in Persian).
- Shewfelt, D., Ansdell, K. and Sheppard, S. (2005) The origin of tourmaline nodules in granites; preliminary findings from the Paleoproterozoic Scrubber Granite. *Geological Survey of Western Australia Annual Review* 59-63.
- Sinclair, D. W. and Richardson, J. M. (1992) Quartz-tourmaline orbicles in the Seagull Batholith, Yukon Territory. *The Canadian Mineralogist* 30: 923-935.
- Thomas, R., Förster, H. J. and Heinrich, W. (2003) The behavior of boron in a peraluminous granite-pegmatite system and associated hydro-thermal solutions: a melt and fluid inclusion study. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 144: 457-472.
- Trumbull, R. B, Krienitz, M. S., Gottesmann, B., Wiedenbeck, M. (2008) Chemical and boron-isotope variations in tourmalines from an S- type granite and its source rocks: The Erongo granite and tourmalinites in the Damara Belt, Namibia. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 155: 1-18.
- Veksler, I. V. (2004) Liquid immiscibility and its role at the magmatic hydrothermal transition: a summary of experimental studies. *Chemical Geology* 210: 7-31.
- Veksler, I. V. and Thomas, R. (2002) An experimental study of B-, P- and F- rich synthetic granite pegmatite at 0.1 and 0.2 GPa. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 143: 673-683.
- Veksler, I. V. and Thomas, R. and Schmidt, C. (2002) Experimental evidence of three coexisting immiscible fluids in synthetic granite pegmatite. *American Mineralogist* 87: 775-779.
- Vernon, R. H. (2004) A practical guide to rock forming microstructure, Cambridge University Press.
- Williamson, B. J., Spratt, J., Adams, J. T., Tindle, A. G. and Stanley, C. J. (2000) Geochemical constraints from zoned hydrothermal tourmalines on fluid evolution and Sn mineralization: an example from fault breccias at Roche, SW England. *Journal of Petrology* 41: 1439-1453.
- Wolf, M. B. and London, D. (1997) Boron in granitic magmas: stability of tourmaline in equilibrium with biotite and cordierite. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 130: 12-30.
- Zareian, S. and Darvishzadeh, A. (1975) A brief about regional metamorphism in the Hamedan. *Journal of Science, University of Tehran* 7: 55-62 (in Persian).
- Zareian, S., Forghani, A. and Fayyaz, H. (1972a) Alvand granitic complex and its metamorphic aureole. *Journal of Science, University of Tehran* 4: 23-28 (in Persian).
- Zareian, S., Forghani, A. and Fayyaz, H. (1972b) Alvand granitic complex and its metamorphic aureole. *Journal of Science, University of Tehran* 4: 83-90 (in Persian).
- Zareian, S., Forghani, A. and Fayyaz, H. (1972c) Alvand granitic complex and its metamorphic aureole. *Journal of Science, University of Tehran* 4: 97-106 (in Persian).
- Zareian, S., Forghani, A. and Fayyaz, H. (1973) Alvand granitic complex and its metamorphic aureole. *Journal of Science, University of Tehran* 5: 49-54 (in Persian).
- Zareian, S., Forghani, A. and Fayyaz, H. (1974) Alvand granitic complex and its metamorphic aureole. *Journal of Science, University of Tehran* 6: 4-33 (in Persian).

بررسی‌های پیشین بیشتر در زمینه سنگ‌نگاری بوده است و در آنها به سازوکار پیدایش و ریخت‌شناسی گرهک‌های تورمالین کمتر پرداخته شده است. از این‌رو، هدف از این پژوهش بررسی گرهک‌های تورمالین در آپلیت‌های منطقه خاکو از دیدگاه هندسی و بررسی شرایط پیدایش آنهاست.

جایگاه زمین‌شناسی

منطقه بررسی شده در جنوب شهرستان همدان و در خاور توده باتولیت الوند جای گرفته است. این منطقه در میان عرض‌های جغرافیایی $34^{\circ}43'$ و $34^{\circ}45'$ شمالی و طول‌های جغرافیایی $48^{\circ}30'$ و $48^{\circ}33'$ خاوری است (شکل ۱) و در پهنه‌بندی ساختاری ایران بخشی از پهنه سندج- سیرجان به‌شمار می‌آید.



شکل ۱- نقشه زمین‌شناسی منطقه خاکو (همدان)، برپایه نقشه ۱/۱۰۰۰۰۰ ورقه همدان، سازمان زمین‌شناسی ایران (Eghlimi *et al.*, 2000)

هستند (Cashman, 1993; Faure *et al.*, 2003). برپایه ویژگی‌های بافتی، کانی‌شناسی و ریخت‌شناسی تورمالین‌ها می‌توان به شرایط پیدایش و تبلور آنها پی برد (Pichavant and Manning, 1984; Sinclair and Richardson, 1992; London and Manning, 1995; London *et al.*, 1996; Broska *et al.*, 1998; London, 1999; Williams *et al.*, 2000; Kubiš and Broska, 2005; Buriánek and Novák, 2007; Dini *et al.*, 2007).

بسیاری از زمین‌شناسان گرهک‌های تورمالین در سراسر زمین را بررسی کرده‌اند. این گرهک‌ها از شکل‌های رایج و بحث برانگیز در بیشتر سنگ‌های گرانیتی لوکوکرات شناخته شده‌اند؛ اما هنوز نظر یکسانی درباره چگونگی پیدایش این گرهک‌ها وجود ندارد (Didier, 1973; Le Fort, 1991; Balen and Broska, 2011). خاستگاه این گرهک‌ها می‌تواند به مرحله‌های گوناگونی از تکامل گرانیت میزبان وابسته باشد؛ مانند: (۱) تبلور زود هنگام از ماگمای گرانیتی سرشار از عنصر B؛ (۲) تبلور در مرحله‌های پایانی انجماد ماگما در پی جدایش سیال‌های سرشار از B از ماگما و به‌دام‌افتادن آنها (Sinclair and Richardson, 1992; Shewfelt *et al.*, 2005)؛ (۳) حاصل جانمایی‌های متاسوماتیک- گرمایی (هیدروترمال) توسط سیال‌های سرشار از B در سنگ‌های گرانیتی متبلور شده پیشین (Rozendaal and Bruwer, 1995).

همچنین، از نکته‌های بحث‌برانگیز درباره گرهک‌های تورمالین، شرایط پیدایش گرهک‌های گرد و دندریتی در کنار یکدیگر است که در این پژوهش به آن پرداخته می‌شود. Zareian و همکاران (۱۹۷۲، a، ۱۹۷۲، b، ۱۹۷۲، c، ۱۹۷۳، ۱۹۷۴) پگماتیت‌ها و آپلیت‌های الوند را برپایه کانی‌های فرعی آنها بررسی کردند. Sepahi (۱۹۹۹ و ۲۰۰۱) و Mani-Kashani (۲۰۰۶) نیز پگماتیت‌ها و آپلیت‌های منطقه را بررسی کرده‌اند.

گرهک‌های تورمالین در آپلیت‌ها، بلوک‌هایی از آپلیت‌های منطقه با سبب برای ۵۰ سانتیمتر و برش‌های ۱ سانتیمتر بررسی شدند. برای شناسایی ساختار درونی و ریخت‌شناسی گرهک‌ها، تکه‌های ۲ سانتیمتری گرهک‌ها با برش‌های متوالی ۳ میلیمتری بررسی شدند. سپس این تکه‌ها با نرم‌افزار 3D Max بازسازی شدند تا جزییات موجود در ساختار درونی گرهک‌ها شناسایی شوند. بازسازی سه‌بعدی نمونه‌ها شامل آماده‌سازی نمونه‌ها و گردآوری داده‌ها به روش برش، اسکن کردن و دیجیتالی کردن این داده‌ها است. دسته‌بندی داده‌ها، جداسازی و ساخت تصویر سه‌بعدی با نرم‌افزار 3D Max انجام شد.

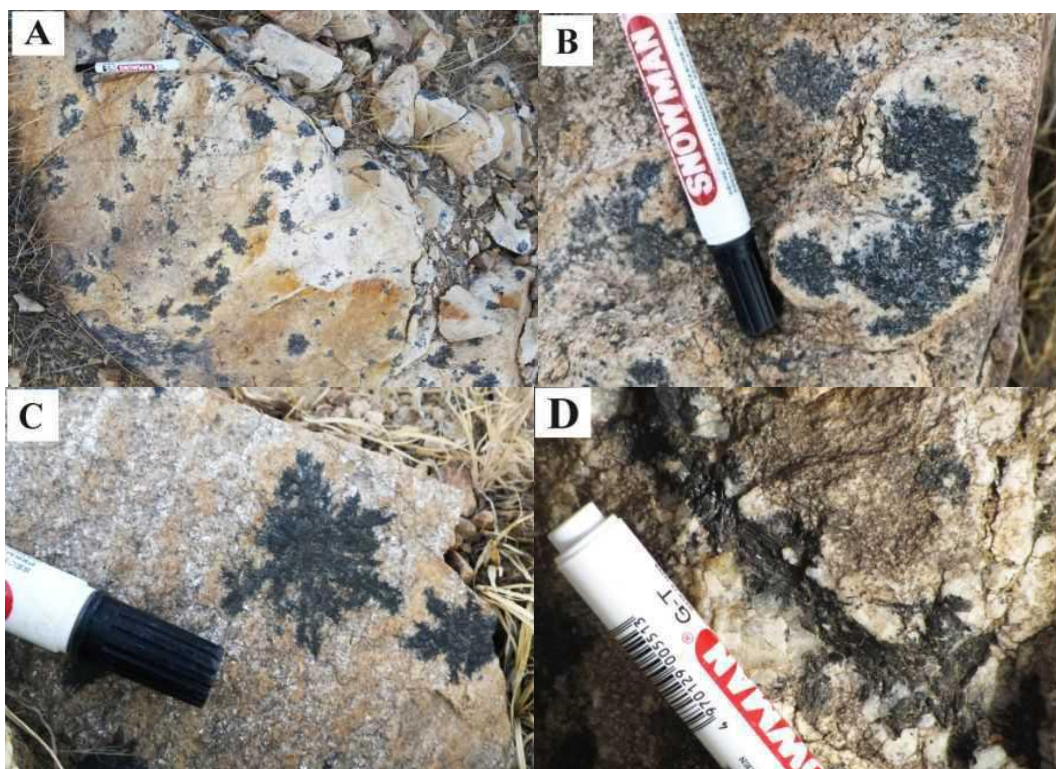
بررسی صحرایی و سنگ‌نگاری

در منطقه بررسی شده، گرهک‌های تورمالین در زمینه آپلیت‌های هولولوکوکرات پراکنده شده‌اند و چهره پوست پلنگی در آن پدید آورده‌اند (شکل ۲- A). کوارتز، پتاسیم‌فلدسپار، پلاژیوکلاز، مسکوویت و تورمالین‌کانی‌های از کانی‌های سنگ میزبان تورمالین هستند. پراکندگی گرهک‌های تورمالین در زمینه آپلیت‌ها ناهمگن است و در برخی مناطق به صورت منظم و پی‌درپی دیده می‌شوند؛ اما در برخی مناطق دیگر، تمرکز آنها بسیار کم است. برخی گرهک‌ها، در کناره‌ها دارای هاله لوکوکرات هستند (شکل ۲- B) و گروهی دیگر این هاله را ندارند. به‌طور کلی، در این منطقه و از دیدگاه ریخت‌شناسی، تورمالین دارای شکل‌های گوناگونی، مانند گرهک‌های گرد (شکل ۲- B)، گرهک‌های دندریتی (شکل ۲- C) و به‌ندرت، تورمالین‌های شکل‌دار (شکل ۲- D) است، که در ادامه بررسی می‌شوند:

آپلیت‌های تورمالین‌دار منطقه در هورنفلس‌های کردیریت‌دار حاشیه نفوذ کرده‌اند. Baharifar (۲۰۰۴) بررسی‌های گسترده‌ای روی سنگ‌های دگرگونی الوند انجام داده و سن برخی سنگ‌های دگرگونی ناحیه‌ای (آمفیبولیت‌ها) منطقه را با روش K-Ar دست‌کم ۱۱۴ میلیون سال پیش برآورد کرده است. گرانیتهای پورفیری، گابرو و دیوریت از برونزدهای دیگر منطقه هستند. گرانیتهای پورفیری ترکیب اصلی توده الوند هستند؛ از این رو، گسترش این سنگ‌ها در منطقه از دیگر سنگ‌ها بیشتر است.

روش انجام پژوهش

برای بررسی هندسی گرهک‌های گوناگون، با روش تجزیه فراکتال، ۲۰ تصویر از شکل‌های گرهک‌های (nodule) گرد و ۲۰ تصویر از گرهک‌های دندریتی برگزیده شدند. سپس این تصویرها با نرم‌افزار Photoshop سیاه-سفید شدند و با نرم‌افزار CorelDraw شبکه‌بندی شدند. در هر کدام از این شبکه‌بندی‌ها، r درازای مربع‌هاست. شمار مربع‌هایی که برای پوشاندن هر شکل نیاز است نیز با $N(r)$ نمایش داده شد. با هر اندازه r ، به‌گونه جداگانه، شمار مربع‌های پوشش‌دهنده تصویر شمرده شد و سپس نقاط روی نمودار رسم شد. در این حالت نقاط به صورت منحنی دیده می‌شوند. سپس برای به‌دست آوردن بُعد فراکتال، لگاریتم مقادیرهای r و $N(r)$ به‌دست آورده می‌شود و نمودار لگاریتمی آن رسم می‌شود. در این نمودار داده‌ها به صورت خط مستقیم رسم می‌شوند و با اندازه‌گیری شیب این خط می‌توان بُعد فراکتال و میزان بی‌قاعدگی گرهک‌ها را به‌دست آورد. همچنین، برای بررسی چگونگی پراکندگی



شکل ۲- تصویرهای ماکروسکوپی پراکندگی تورمالین در آپلیت‌های خاکو (همدان). (A) نمای پوست پلنگی پدیدآمده از ردیف‌شدن گرهک‌های تورمالین؛ (B) گرهک‌های کمابیش بیضوی تورمالین با کناره‌های لوکوکرات؛ (C) شکل‌های دندریتی تورمالین در منطقه؛ (D) بلورهای شکل‌دار تورمالین همراه با بلورهای درشت کوارتز که به‌صورت رگه‌ای در آپلیت‌های میزبان نفوذ کرده‌اند.

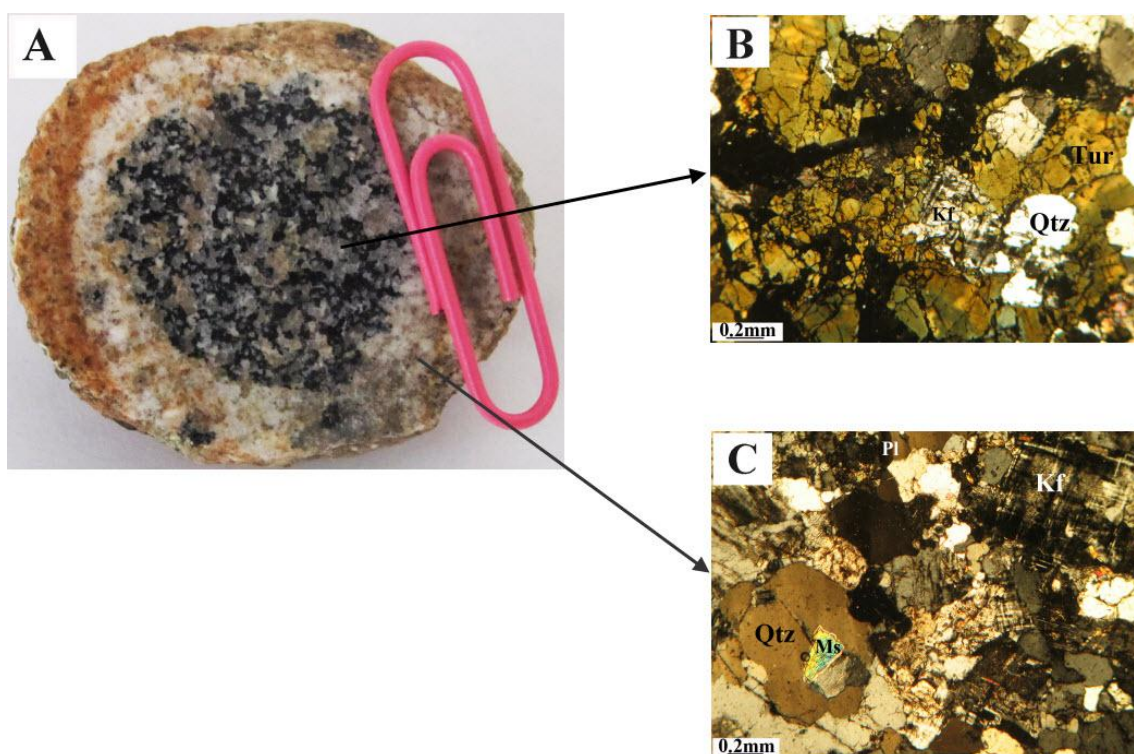
تورمالین پدید آمده‌اند. فضای میان تورمالین‌ها با ریزبلورهای کوارتز و فلدسپار پر شده است؛ (۲) هاله لوکوکرات حاشیه‌ای: این هاله شامل کوارتز، پتاسیم‌فلدسپار، پلاژیوکلاز و مسکوویت است (شکل ۳- C) و بسیار همانند آپلیت زمینه است؛ اما دانه‌بندی آن کمی درشت‌تر و رنگ آن روشن‌تر است و کانی‌های مافیک ندارد. این ویژگی‌ها نشان‌دهنده تمرکز این عنصرها به‌سوی بخش میانی گرهک هستند. (ب) گرهک‌های دندریتی: کانی‌شناسی گرهک‌های دندریتی همانند گرهک‌های گرد است؛ اما شکل آنها متفاوت است. شکل آنها به‌صورت شعاعی از مرکز به‌سوی سنگ میزبان منتشر شده‌اند. گاه گرهک‌های دندریتی و گرد در فاصله‌های نزدیک به‌هم دیده می‌شوند.

الف) گرهک‌های گرد: این گرهک‌ها شامل اجتماع تورمالین، کوارتز و فلدسپار بوده، کاملاً متراکم هستند و هیچ‌گونه فضای تهی و حفره‌ای ندارند. این گرهک‌ها دو بخش جداگانه دارند (شکل ۳- A):

(۱) هسته: این بخش دارای بلورهای بی‌شکل تا نیمه‌شکل‌دار تورمالین، کوارتز و پتاسیم‌فلدسپار، پلاژیوکلاز و مقدار اندکی مسکوویت است. تورمالین‌ها دارای چندرنگی قهوه‌ای تا سبز-قهوه‌ای هستند و زونینگ تکه‌ای دارند (شکل ۳- B). بررسی‌های میکروسکوپی نشان می‌دهند که در هسته یک گرهک، بلورهای تورمالین در نور پلاریزه‌شده همزمان خاموش می‌شوند و مانند یک بلور واحد رفتار می‌کنند. این تورمالین‌ها جهت‌یابی ترجیحی ندارند و از رشد شبکه‌ای یک بلور واحد

دسته از تورمالین‌ها در برابر دو دسته یادشده پیشین بسیار کمتر است. گویا این تورمالین‌ها از گرهک‌های تورمالینی دیگر جوان‌تر هستند و ماگمای سازنده آنها پس از تبلور آپلیت‌ها، در شرایطی نفوذ کرده است که بلورهای درشت فضای لازم (مانند: درز و شکاف‌ها) برای پیدایش را داشته‌اند.

پ) تورمالین‌های شکل‌دار: رگه‌های پگماتیستی نفوذ کرده در آپلیت‌ها، دارای تورمالین‌های شکل‌دار با فرم بلوری شناخته‌شده‌ای هستند. این تورمالین‌ها به‌صورت بلورهای تجمعی درشت و منشوری همراه با کوارتز هستند. این تورمالین‌ها به‌صورت رگه‌هایی دیده می‌شوند که در زمینه آپلیت‌ها نفوذ کرده‌اند (شکل ۲- D). فراوانی این



شکل ۳- A) مقطع صیقل داده‌شده از گرهک تورمالینی با هسته و حاشیه لوکوکرات؛ B) مقطع میکروسکوپی از بخش هسته و انباشته‌شدن تورمالین در این بخش؛ C) مقطع میکروسکوپی از بخش حاشیه لوکوکرات گرهک و نبود تورمالین

را بررسی کرد را با هندسه فراکتال می‌توان بررسی کرد. کاربرد هندسه فراکتال در بررسی سیستم‌های ماگمایی نشان می‌دهد که این سیستم‌ها آشفته رفتار می‌کنند (Flinders and Clemens, 1996; Perugini and Poli, 2000).

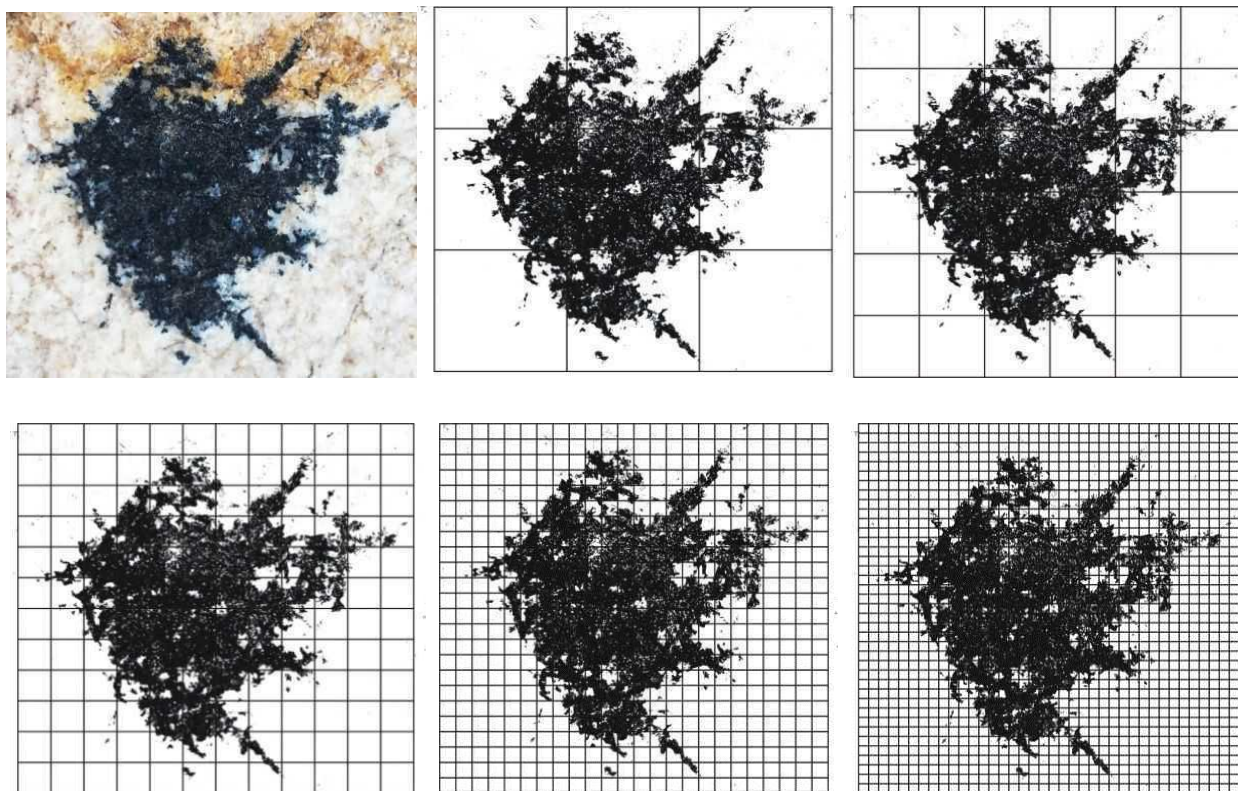
برای اندازه‌گیری بعد فراکتال در گرهک‌های تورمالین ۲۰ نمونه از تصویرهای گرهک‌های تورمالین گرد و ۲۰ نمونه از گرهک‌های دندریتی

بررسی فراکتال گرهک‌های تورمالین منطقه خاکو

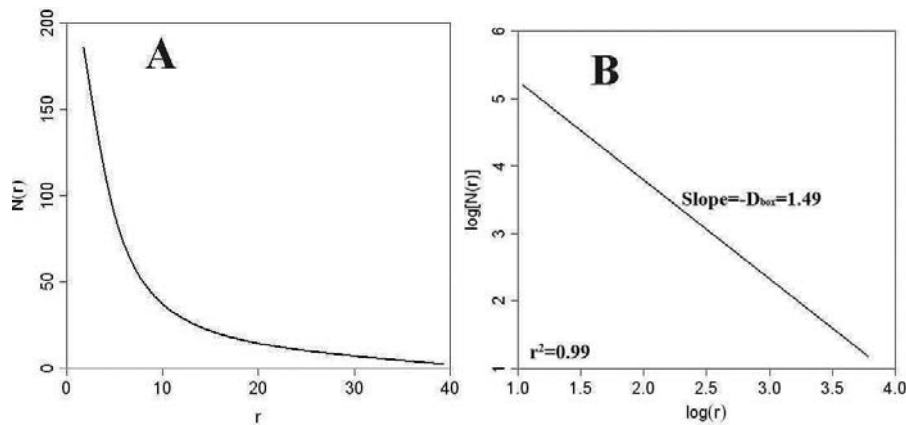
هندسه فراکتال یک مفهوم جدید است که نخستین‌بار Mandelbrot (۱۹۸۰) آن را پیشنهاد داده است. پایه‌های هندسه فراکتال بر این اصل استوار است که شکل‌های طبیعی از تکرار قانونمند یک بلوک نخستین پدید می‌آیند. برای نمونه، شکلهایی مانند دانه‌های برف، شکل یک کوه و یا شکل سواحل که با هندسه کلاسیک نمی‌توان آنها

بعد فراکتال در واقع بررسی فضای پُر شده با گرهک‌ها در سطح است. از آنجایی که شکل این گرهک‌ها فراکتال است، بعد آنها هرگز عدد صحیح نمی‌شود؛ زیرا این شکل‌های فراکتال، نه خطی (بعد فرکتال یک) و نه صفحه‌ای (بعد فرکتال دو) هستند. هرچه شکل گرهک منظم‌تر و فشرده‌تر باشد بعد فراکتال آن به حالت دو بعدی نزدیک‌تر است و بالعکس، هر چه شکل گرهک نامنظم و دندردیتی باشد بعد فراکتال آن مایل به حالت خطی و یک بعدی است. پس، بعد فراکتال با مقدار بی‌نظمی گرهک رابطه وارونه دارد. بعد فراکتال به‌دست‌آمده در نمونه‌های بررسی‌شده از ۱/۴۶ تا ۱/۹۲ متغیر است (شکل ۵)؛ به‌گونه‌ای که نمونه‌های منظم‌تر (گرهک‌های گرد) مقدارهای D_{box} بالاتری دارند.

با نرم‌افزار CorelDraw به روش مربع‌شمار بررسی شدند. برای بررسی نمونه‌ها پنج اندازه گوناگون ۳، ۶، ۱۲، ۲۴ و ۳۹ میلی‌متر برای وجه r در نظر گرفته شد. با هر اندازه برای r شمار مربع‌هایی (N_r) که گرهک‌های تورمالین را پوشش می‌دهند شمرده شد (شکل ۴). مقدارهای r و N_r در برابر یکدیگر در یک منحنی رسم شدند. برای به‌دست‌آوردن بعد فراکتال، $\text{Log}(r)$ و $\text{Log}(N_r)$ اندازه‌گیری شده و نمودار آن رسم می‌شود. شیب خط به‌دست‌آمده در این نمودار $-D_{box}$ بوده و D_{box} بعد فراکتال است. به گفته دیگر، مرحله‌های گفته‌شده از معادله $N_r = r^{-D_{box}}$ پیروی می‌کند (Mandelbrot, 1982). با لگاریتم‌گرفتن از این معادله، رابطه $\text{Log}(N_r) = -D_{box} \cdot \text{Log}(r)$ به‌دست می‌آید (در این معادله D بعد فراکتال است).



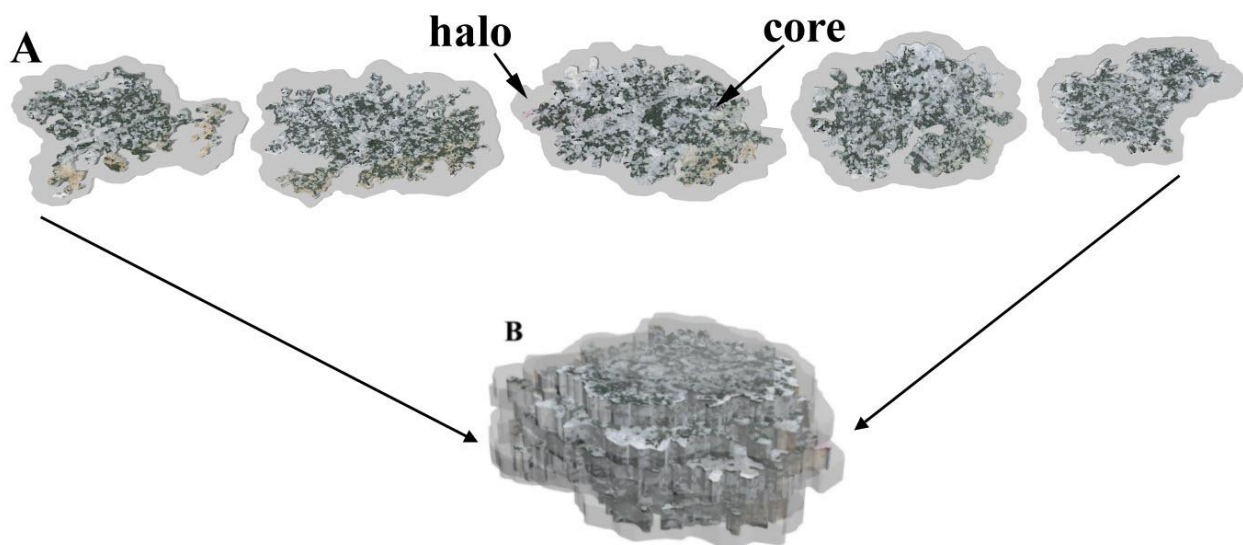
شکل ۴- شبکه‌بندی گرهک‌های تورمالین با استفاده از نرم افزار کورل درو برای محاسبه بعد فراکتال. طول ابعاد مربع‌ها به ترتیب ۳، ۶، ۱۲، ۲۴، ۳۹ و ۶۳ میلی‌متر است.



شکل ۵- A) نمایش تغییرات r در برابر $N(r)$ و شکل‌های فرکتال گرهک‌های بررسی شده؛ B) اندازه‌گیری بعد فرکتال (D_{box}) با درون‌یابی خطی نمودار $\text{Log}(r)$ در برابر $\text{Log}[N(r)]$ ($-D_{\text{box}}$ شیب خط به‌دست‌آمده است)

۲ سانتیمتری از گرهک‌ها با برش‌های ۳ میلیمتری بررسی شده و شکل و ساختار درونی گرهک‌ها بازسازی شد. دو بخش سازنده گرهک‌ها (هسته و هاله لوکوکرات) را در تصویرهای سه‌بعدی می‌توان به‌خوبی شناسایی کرد (شکل ۶). در این شکل، این دو بخش مرز بسیار آشکاری با یکدیگر و نیز با آپلیت‌های میزبان نشان می‌دهند. پیدایش این مرز آشکار پیامد داشتن یا نداشتن تورمالین در بخش‌های گوناگون است.

بررسی سه‌بعدی گرهک‌های تورمالین منطقه خاکو
 برای بررسی چگونگی پراکنندگی گرهک‌های تورمالین در آپلیت‌های میزبان، روی بلوک‌های ۵۰ سانتیمتری، برش‌های ۱ سانتیمتری زده شد. در آپلیت‌های دارای گرهک‌های تورمالین، این برش‌ها نشان دادند که در زمینه آپلیت‌ها، گرهک‌ها جدای از یکدیگر پراکنده شده‌اند و با یکدیگر رابطه رگه‌ای ندارند. برای شناسایی ساختار درونی گرهک‌ها نیز تکه‌های



شکل ۶- بازسازی سه‌بعدی گرهک‌های تورمالین. A) برش متوالی گرهک‌های تورمالین با قطر ۳ میلیمتر. دو واحد ساختاری در گرهک تورمالین، هسته (بخش‌های تیره) و هاله (بخش‌های لوکوکرات) به‌خوبی در شکل دیده می‌شوند؛ B) شکل سه‌بعدی رسم‌شده با نرم‌افزار 3D Max از توالی برش‌های گرهک تورمالین

این هاله‌ها در شرایط ساب‌سالییدوس پدید آمده بودند، آنگاه هاله یادشده باید در گرداگرد همه گرهک‌ها دیده می‌شد (Perugini and Poli, 2007)؛

(۳) یکی دیگر از ویژگی‌هایی که احتمال خاستگاه پس از ماگمایی برای این گرهک‌ها را نفی می‌کند، شکل کروی و فرکتال آنهاست؛ زیرا بافت‌هایی که در شرایط پس از فرایند ماگمایی ساخته می‌شوند، بیشتر رگه‌ای هستند (Perugini and Poli, 2007). همچنین، بسیاری از گرهک‌های منطقه، شکل‌های دندردی با جهت رشد رو به بیرون دارند. این شکل‌ها اصولاً در پی فرایندهای ساب‌سالییدوس در سیستم‌های مایع ساخته می‌شوند (Vernon, 2004) و به‌سختی می‌توان آنها را با شرایط ساب‌سالییدوس شرح داد؛

(۴) از ویژگی‌های دیگری که احتمال پیدایش این گرهک‌ها پس از فرایند ماگمایی را نفی می‌کند این است که این گرهک‌ها در زمینه سنگ به‌گونه یکنواخت، خطی و جریانی میزبان جای گرفته‌اند. این پدیده نشان می‌دهد که آنها پیش از سردشدن ماگما در سیستم ماگمایی نیز بوده‌اند و همگام با جابجایی ماگما جابجا شده‌اند.

از این‌رو، برپایه ویژگی‌های گفته‌شده، احتمال دارا بودن خاستگاه ساب‌سالییدوس (گرمایی) برای تورمالین‌های بررسی‌شده منتفی است. برپایه بررسی‌های تجربی Wolf و London (۱۹۹۷)، تورمالین‌های متبلور شده از ماگمای سرشار از B شکل‌دار بوده و دارای فرم کریستالوگرافی شناخته‌شده‌ای هستند؛ اما تورمالین‌های میان‌دانه‌ای که درون هسته گرهک‌های تورمالین یافت می‌شوند شکل‌دار نبوده و این گرهک‌ها از ماگمای نخستین و زیر اشباع از عنصر بور متبلور شده‌اند.

نبود آمیزش در مذاب مادر سازوکاری برای تمرکز بور و عنصرهای مورد نیاز دیگر برای ساخت حباب‌های دپلیمریزه (مذاب سرشار از بور و مواد

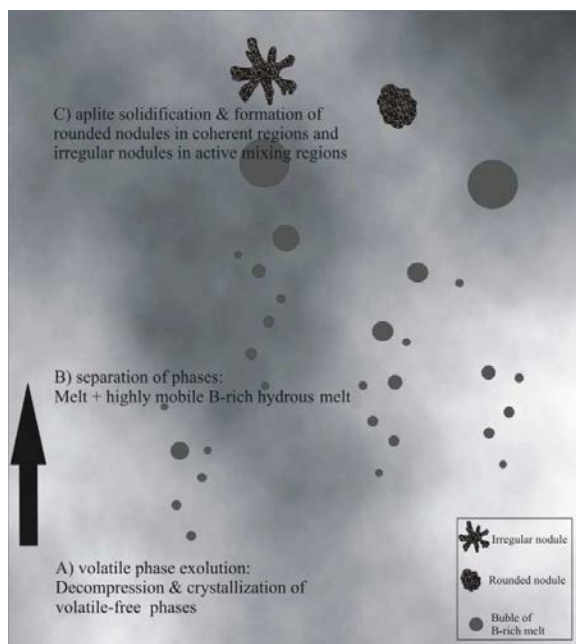
شکل گرهک‌های تورمالین با روی هم گذاشتن برش‌های متوالی ۲ میلیمتری گرهک‌ها در نرم‌افزار 3D Max بازسازی شد. برپایه این شکل، نسبت حجم هسته به حاشیه در گرهک‌های گوناگون کمابیش ثابت و نزدیک ۱ به ۲ است. همچنین، درصد تورمالین در هسته گرهک‌ها نیز کمابیش ثابت و نزدیک ۳۰ درصد است. حجم هسته از ۲۲ تا ۴۳٪ است؛ اما حاشیه ۵۷ تا ۷۸ درصد حجم گرهک را دربر می‌گیرد. حجم میانگین برای هسته ۳۴ درصد و برای حاشیه گرهک ۶۶ درصد است.

پیشنهاد فرضیه‌های درباره سازوکار پیدایش گرهک‌های تورمالین منطقه خاکو

اصولاً برای پیدایش گرهک‌های تورمالین، سه خاستگاه گوناگون ماگمایی، گرمایی - ماگمایی و گرمایی پیشنهاد می‌شود (Perugini and Poli, 2007). در اینجا، برپایه یافته‌ها و ویژگی‌های زمین‌شناسی و سنگ‌نگاری در منطقه بررسی‌شده، علت پیدایش گرهک‌ها بررسی می‌شود. برخی ویژگی‌ها عبارتند از:

(۱) گرهک‌هایی که پیامد جانشینی‌های پس از فرایند ماگمایی هستند با یکدیگر رابطه دارند و سیستم‌های رگه‌ای و شبکه‌ای را پدید می‌آورند. از دیدگاه زایشی، این گرهک‌ها با رگه‌های تورمالین تغذیه‌کننده وابستگی دارند (Rozendaal and Bruwer, 1995). در منطقه بررسی‌شده، گرهک‌های تورمالین بی‌آن‌که با یکدیگر وابستگی داشته باشند، به‌گونه پراکنده و مستقل در آپلیت‌های میزبان دیده می‌شوند. هیچ گواهی برای اینکه این گرهک‌ها از راه شکستگی‌ها با یکدیگر رابطه داشته باشند، وجود ندارد؛

(۲) هاله‌های لوکوکرات پدیدآمده در حاشیه گرهک‌ها محدود به برخی گرهک‌ها است؛ اما اگر سیستم به‌تازگی دچار سیالی سرشار از B شده بود و



شکل ۷- مرحله‌های تکامل سیستم ماگمایی در منطقه خاکو (همدان) (با تغییراتی پس از Balen و Petrinc، ۲۰۱۱: A) جدایش فاز گازی در پی کاهش فشار؛ B) جدایش ماگمای آبدار سرشار از B از ماگما؛ C) انجماد آپلیت‌ها و پیدایش گرهک‌های تورمالین با شکل‌های گوناگون. شکل‌های نامنظم (دندریتی) در مناطقی روی می‌دهند که جایجایی‌ها بالاست. شکل‌های گردشده و منظم در مناطق چسبیده که انتقال عنصرها در آنها آهسته است روی می‌دهند.

به باور Trumbull و همکاران (۲۰۰۸) نیز علت پیدایش حباب‌های کروی جداگانه، آغاز روی‌ندادن آمیزش در مذاب در حال تکامل است. به‌دنبال کاهش دمای سیستم، حجم بلورها در مذاب گرانیتهی افزایش می‌یابد و در پی افزایش ویسکوزیته، ماگمای گرانیتهی به‌شدت پلیمریزه می‌شود. بخش حباب‌های سیال در چنین خمیره بلورینی به دام می‌افتد. چنین شکل‌های کروی در مناطقی که این حباب‌ها نتوانسته‌اند از ماگمای گرانیتهی میزبان فرار کنند، سپس به‌صورت گرهک‌های تورمالین متبلور می‌شوند. یافته‌های صحرائی و میکروسکوپی نشان می‌دهند که گرهک‌ها پیش از به‌پایان‌رسیدن انجماد گرانیته میزبان متبلور شده‌اند. ظاهر روشن هاله‌ لوکوکرات

فرار) دانسته می‌شود. این سازوکار در پایان پیدایش تورمالین‌های میان‌دانه‌ای (مانند آنچه در هسته نودول‌های تورمالین‌دار منطقه دیده می‌شود) را در پی دارد (Thomas *et al.*, 2003). زونینگ سنگ‌نگاری (در مقاطع میکروسکوپی این تورمالین‌ها) نشان‌دهنده شرایط اکسولوشن سیال (fluid exsolution) و تغییرات فشار سیال در مذاب است (Dini *et al.*, 2007). پی‌برپایه گرهک‌ها منتفی است و گرهک‌های یادشده در یک سیستم ماگمایی زیر اشباع از B در پی فرایند اکسولوشن سیال پدید آمده‌اند.

بحث و بررسی

Thomas و Veksler (۲۰۰۲) و همکاران Veksler، Thomas و همکاران (۲۰۰۳) و Thomas و همکاران (۲۰۰۴) و Broska و Balen (۲۰۱۱) خاستگاه گرهک‌های تورمالین را مرحله‌های پایانی تبلور مذاب گرانیتهی می‌دانند. بدین‌گونه که در پی تبلور گرانیته و کاهش فشار در هنگام جایگیری ماگما به‌سوی سطوح بالای پوسته، تمرکز مواد فرار افزایش می‌یابد و به آرامی مذاب از مواد فرار فرااشباع شده و باعث جدایش آنها می‌شود. در پایان جدایش فیزیکی دو فاز مختلف را در پی دارد: (۱) مذاب آلومینوسیلیکات که به‌شدت پلیمریزه است؛ (۲) فاز آبدار سرشار از مواد فرار که در پی حضور این سیال‌ها، دپلیمریزه شده است.

کاهش ویسکوزیته و چگالی همراه با کاهش دمای لیکویدوس و سالیدوس، جدایش یک فاز سرشار از B و سیال‌ها به‌صورت حباب‌های جداگانه سرشار از B را در پی دارد. این حباب‌ها در پی کاهش کشش سطحی به‌هم می‌پیوندند (شکل ۷)، چنین حجم‌های جدا از هم دارای تمرکز بور و عنصرهای لازم دیگر برای رشد بلورهای تورمالین در آینده هستند.

است. در چنین شرایطی جریان همرفت مانند عامل ناپایدارکننده رفتار می‌کند و میزان بی‌نظمی را در سطح در حال رشد افزایش می‌دهد و شکل‌های بی‌نظم‌تر (دندریتی) رشد می‌کنند. از این‌رو، سرعت رشد گرهک می‌تواند نوع ریخت‌شناسی آن را توجیه کند؛ اما نمی‌تواند بگوید چرا در یک توده ماگمایی شکل‌های گرهک‌مانند گوناگونی (کروی و دندریتی) در کنار یکدیگر یافت می‌شوند. برای رویداد گرهک‌هایی با شکل‌های گوناگون به سرعت‌های رشد گوناگون نیاز است. Liu و همکاران (۱۹۹۴) و Clifford (۱۹۹۸ و ۱۹۹۹) گسترش مناطق بی‌نظم و منظم در سیال‌های متحرک را پدیدآورنده شکل‌های گوناگون بلوری دانستند. کاربرد این جریان‌های جابجایی در سیستم‌های ماگمایی نیز به اثبات رسیده است (Perugini *et al.*, 2003; Perugini *et al.*, 2004). این الگو با نام الگوی جریان سینوسی شناخته می‌شود و در حالت دوبعدی، نوسان ذرات در جهت‌های x و y از فرمول‌های زیر پیروی می‌کند:

$$x_{n+1} = x_n + \frac{k}{2} \cdot \sin(2\pi \cdot y_n)$$

و

$$y_{n+1} = y_n + \frac{k}{2} \cdot \sin(2\pi \cdot x_{n+1})$$

دامنه حرکت سیستم‌های آشفته در بازه $0 \leq (x, y) \leq 1$ متغیر است. k نیز ثابت الگوی سینوسی است. از دیدگاه جنبشی، این جریان شامل دو حرکت قائم است که هر کدام نیمرخ سرعت سینوسی دارند. این حرکت‌ها که با پدیدآوردن کشیدگی و فشردگی سیال را جابجا می‌کنند، عبارتند از: (۱) مناطق با جابجایی بالا؛ (۲) مناطق چسبنده. از این‌رو، در سیستم ماگمایی مناطقی که مسیرهای بسته چرخشی و اندکی دارند، همزیست با مناطقی هستند که مسیرهای آشفته دارند (شکل ۸). از دیدگاه Ottino (۱۹۸۹) و Liu و همکاران (۱۹۹۴)، انتقال کافی مواد در سیستم باعث

در حاشیه هسته گرهک‌های تیره نشان می‌دهد که این پهنه، پهنه‌ای انتقالی میان آپلیت‌های میزبان و هسته گرهک است. این نکته نشان‌دهنده انتشار عنصرهای مافیک (مانند: Mg و Fe) به درون و انتشار عنصرهای فلسیک (نظیر K و Na) به سوی مذاب است. تورمالین‌های میان‌دانه‌ای که درون هسته گرهک‌های تورمالین یافت می‌شوند پیامد تبلور از ماگمای نخستین زیراشباع از بور هستند. نبود آمیزش در مذاب مادر سازوکاری برای تمرکز بور و عنصرهای مورد نیاز دیگر برای ساخت حباب‌های دپلمریزه (مذاب سرشار از بور و مواد فرار) دانسته می‌شود. این فرایند در پایان، تورمالین‌های میان‌دانه‌ای را پدید می‌آورند.

مهم‌ترین پرسش این است که چه شرایط فیزیکی-شیمیایی پدیدآورنده شکل‌های گوناگون گرهک‌ها (گرد و دندریتی) بوده است. از دیدگاه Vicsek (۱۹۸۵)، پیدایش شکل‌های گوناگون گرهک‌ها از نسبت γ/H (کشش سطحی بر گرمان نهان تبلور) پیروی می‌کند. در هنگام رشد بلور، کشش سطحی بازدارنده فرایند رشد است و سطوح با کشش سطحی بالا به‌علت دارا بودن انرژی بیشتر، کمتر رشد می‌کنند. از این‌رو، اگر سطح، فرایند رشد را کنترل کند رشد بلورها تنها در امتداد سطوح کمی روی می‌دهد؛ اما گرهک‌های دیده‌شده در منطقه، یا کروی و یا دندریتی هستند و انشعاب‌های بسیاری از مرکز به‌سوی حاشیه دارند. از این‌رو، نقش کشش سطحی در رشد بلورها بسیار کم است.

عامل موثر دیگر در رشد بلورها، انرژی آزادشده در پی تبلور (گرمای نهان تبلور)، در شرایط ساب‌سالیدوس است. این انرژی در فاصله میان بلور و مایع مذاب آزاد می‌شود و جریان‌های همرفتی میان مناطق گرم‌شده و مایع حاشیه را پدید می‌آورد (Nagatani, 1988). برپایه پیشنهاد Nagatani (۱۹۸۸)، در مناطقی که سرعت رشد بیشتر باشد، گرمای نهان تبلور آزادشده بیشتر

مناطق چسبنده ← انتقال ضعیف عناصر ← رشد آهسته ← گرمای نهان
تبلور پایین ← جریان همرفت پایین ← ایجاد شکل‌های گرد شده



مناطق با جابجایی بالا ← انتقال سریع عناصر مورد نیاز برای رشد ← رشد سریع ← گرمای نهان تبلور بالا ← جریان همرفت بالا ← ایجاد شکل‌های نامنظم



شکل ۸- چکیده‌ای از مرحله‌های پیشنهاد شده در سیستم ماگمایی برای پیدایش شکل‌های گوناگون گرهک در آپلیت‌های منطقه خاکو (همدان)

نتیجه‌گیری

از دیدگاه هندسی، گرهک‌های تورمالین بررسی شده از شکل‌های فرکتال هستند. بعد فرکتال به دست آمده در گرهک‌های بررسی شده از ۱/۴۶ در گرهک‌های دندریتی تا ۱/۹۲ در گرهک‌های گرد متغیر است. ریخت‌شناسی و چگونگی پراکنندگی گرهک‌های تورمالین در آپلیت‌های بررسی شده می‌تواند بر پایه سازوکار جایگیری و محیط تبلور آپلیت‌های میزبان (پوسته بالایی)، توضیح داده شود. در هنگام جایگیری ماگما، در پی کاهش فشار، نبود آمیزش و پیدایش دو فاز گوناگون در ماگما روی می‌دهد: (۱) آپلیت معمولی؛ (۲) فاز سرشار از B. دپلمیریزاسیون چشمگیر مذاب سرشار از B و پس از آن، کاهش ویسکوزیته و چگالی، همراه با کاهش دمای لیکوییدوس و سالییدوس، جدایی فیزیکی فازی سرشار از B و سیال‌ها را در پی دارد. سیال‌ها به صورت حباب‌های جداگانه سرشار از B هستند و در پی کاهش کشش سطحی به هم می‌پیوندند. بررسی سه‌بعدی گرهک‌ها نشان می‌دهد که این گرهک‌ها به صورت جداگانه از یکدیگر هستند و ارتباط رگچه‌ای ندارد. نبود ارتباط میان آنها، هاله لوکوکرات در گرداگرد برخی گرهک‌ها، شکل

می‌شود که مواد سازنده بتوانند در سیستم پخش شوند و به بی‌نظمی برسند و رشد شکل‌های نامنظم مانند گرهک‌های دندریتی را در پی داشته باشند. از این‌رو، در مناطقی که جابجایی‌ها در مسیرهای بسته و محدود دایره‌ای روی می‌دهد، دارای کشیدگی و فشردگی ضعیف هستند و نقاطی که جابجایی‌های نامنظم دارند کشیدگی و فشردگی بیشتری دارند. سیستم‌های دینامیکی آشفته، مانند جریان‌های سینوسی، ساختارهای فراکتال پدید می‌آورند و این شکل‌های در مناطق با ترکیب‌شدگی بالا و مناطق چسبنده‌ای دیده می‌شوند که با هم همزیست هستند. از این‌رو، عامل موثر در گوناگونی گرهک‌های تورمالین، حضور همزمان مناطق با جابجایی بالا و مناطق چسبنده در کنار یکدیگر است. اگر رشد گرهک‌ها در مناطق با جابجایی بالا رخ دهد، سرعت رشد، به علت آشفته‌گی میدان‌های جریان، بالا خواهد بود؛ زیرا مواد کافی مورد نیاز برای رشد را می‌رساند. بر پایه پیشنهاد Nagatani (۱۹۸۸)، این پدیده پیامد جریان گرمای نهان تبلور بالاست. از این‌رو، جریان‌های همرفت حاصل قوی هستند و پیدایش شکل‌های نامنظم افزایش می‌یابد. برعکس، اگر رشد گرهک‌ها در مناطق چسبنده رخ دهد، انتقال عنصرها به دست ساختار بسته میدان‌های جریانی کم می‌شود، و رشد آهسته می‌شود. در این شرایط، جریان گرمای نهان تبلور کم است و جنبش‌های همرفت ضعیف هستند؛ از این‌رو، شکل‌های گرد شده پدید می‌آیند (شکل ۸). نبود هاله لوکوکرات در گرداگرد همه گرهک‌های تورمالین نیز می‌تواند با توجه به میدان‌های جریانی آشفته در ماگما توجیه شود که عامل جابجایی توده ماگما هستند. گرهک‌های تورمالینی که در مناطق چسبنده به دام افتاده‌اند دچار جابجایی بسیاری نمی‌شوند و هاله گرداگرد آنها به جای می‌ماند؛ اما گرهک‌هایی که در مناطق با جابجایی بالا هستند دچار کشیدگی و فشردگی بسیاری شده و از این‌رو، هاله گرداگرد آنها تخریب می‌شود.

است، کشیدگی و فشردگی ضعیفی دارند و بیشتر شکل‌های گرهک‌مانندِ گرد ساخته شده‌اند؛ اما در نقاطی که جابجایی‌های نامنظم دارند کشیدگی و فشردگی بیشتر بوده و گرهک‌های دندریتی پدید آمده‌اند.

سپاس‌گزاری

نگارندگان از راهنمایی‌های دکتر نصیرالاسلامی، استاد آمار دانشگاه بوعلی سینا، دکتر عابدی، استاد هندسه دانشگاه بوعلی سینا و مهندس هوشنگی، کارشناس کامپیوتر، بسیار سپاس‌گزارند.

کروی و دندریتی گرهک‌ها و پراکندگی جریان‌های آنها در زمینهٔ آپلیت‌ها احتمال خاستگاه گرمابی آنها را نفی می‌کند. تورمالین‌های این نودول‌ها شکل‌دار نیستند؛ از این‌رو، خاستگاه آنها ماگمای سرشار از B نیست. این تورمالین‌ها در مرحله‌های پایانی تبلور در پی پیدایش اکسولوشن سیال میان حباب‌های سرشار از B و مذاب گرانیتهی ساخته شده‌اند. سرعت‌های رشد گوناگون در مناطق گوناگون ماگما، پیدایش شکل‌های گوناگون بلوری را در پی داشته است. در مناطقی که جابجایی‌ها در مسیرهای بسته و محدود دایره‌ای رخ داده

منابع

- Baharifar, A. A. (2004) Petrology of metamorphic rocks of Hamedan region. PhD thesis, Tarbiat Moallem University, Tehran, Iran (in Persian).
- Balen, D. and Broska, I. (2011) Tourmaline nodules – products of devolatilization within the final evolutionary stage of granitic melt? In: Granite-Related Ore Deposits (Eds. Sial, A. N., Bettancourt, J. S., De Campos, C. P. and Ferreira, V. P.) Special Publications 350:53–68. Geological Society, London.
- Balen, D. and Petrinec, Z. (2011) Contrasting tourmaline types from peraluminous granites: a case study from Moslavačka Gora (Croatia). *Mineralogy and Petrology* 102:117–134.
- Broska, I., Uher, P. and Lipka, J. (1998) Brown and blue schorl from the Spiš- Gemer granite, Slovakia: composition and genetic relations. *Journal of the Czech Geological Society* 43: 9-16.
- Buriánek, D. and Novák, M. (2007) Compositional evolution and substitutions in disseminated and nodular tourmaline from leucocratic granites: Examples from the Bohemian Massif, Czech Republic. *Lithos* 95:148–164.
- Cashman, K. V. (1993) Relationship between crystallization and cooling rate: insight from textural studies of dikes. *Contribution to Mineralogy and Petrology* 113: 126–142.
- Clifford, M. J., Cox, S. M. and Roberts, E. P. L. (1998) Lamellar modeling of reaction, diffusion and mixing in a two-dimensional flow. *Chemical Engineering Journal* 71: 49–56.
- Clifford, M. J., Cox, S. M. and Roberts, E. P. L. (1999) Measuring striation widths. *Physics Letters A* 260: 209–217.
- Didier, J. (1973) Mineral nodules. In: *Granites and their enclaves* (Ed. Didier, J.) 357–368. The bearing of enclaves on the origin of granites. *Developments in Petrology*. Elsevier, New York.
- Dini, A., Corretti, A., Innocenti, F., Rocchi, S. and Westerman, D. S. (2007) Sooty sweat stains or tourmaline spots? The Argonauts at Elba Island (Tuscany) and the spread of Greek trading in the Mediterranean Sea. In: *Myth and geology* (Eds. Piccardi, L. and Masse, W. B.). Special Publications 273:227–243. Geological Society, London.

- Eghlimi, B., Sabzehi, M. and Sohaili, M. (2000) 1/100000 map of Hamedan and its margin report. Geological Survey of Iran, Tehran (in Persian).
- Faure, F., Trolliard, G., Nicollet, C. and Montel J. M. (2003) A developmental model of olivine morphology as a function of the cooling rate and the degree of undercooling. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 145: 251–263.
- Flinders, J. and Clemens, J. D. (1996) Non-linear dynamics, chaos, complexity and enclaves in granitoid magmas. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh Earth Sciences* 87: 225–232.
- Kubiš, M. and Broska, I. (2005) The role of boron and fluorine in evolved granitic rock systems (on the example of the Hnilec area, Western Carpathians). *Geologica Carpathica* 56: 193–204.
- Le Fort, P. (1991) Enclaves of the Miocene Himalayan leucogranites. In: *Enclaves and Granite Petrology* (Eds. Didier, J. and Barbarin, B.) 13: 35–47. *Developments in Petrology*, Elsevier.
- Liu, M., Muzzio, F. J. and Peskin, R. L. (1994) Quantification of mixing in aperiodic chaotic flows. *Chaos Solitons Fractals* 4: 869–893.
- London, D. (1999) Stability of tourmaline in peraluminous granite systems: the boron cycle from anatexis to hydrothermal aureoles. *European Journal of Mineralogy* 11: 253–262.
- London, D. and Manning, D. A. C. (1995) Chemical variation and significance of tourmaline from Southwest England. *Economic Geology* 90: 495–519.
- London, D., Morgan, G. B. V. I. and Wolf, M. B. (1996) Boron in granitic rocks and their contact aureoles. In: *Mineralogy, Petrology, and Geochemistry in the Earth's Crust* (Eds. Grew, E. S. and Anovitz, L.). 33:299–330. *Mineralogical Society of America, Reviews in Mineralogy*.
- Mandelbrot, B. B. (1980) Fractal aspects of the iteration of $z\lambda(1-z)$ for complex λ , z . *Annals of the New York Academy of Sciences* 357: 249–259.
- Mandelbrot, B. B. (1982) *The fractal geometry of nature*. W. H Freeman, New York.
- Mani-Kashani, S. (2006) The study of plutonic rocks and their metamorphic aureole in Khakou area (Hamedan). MSc thesis, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran (in Persian).
- Nagatani, T. (1988) Convection effect on the diffusion-limited-aggregation fractal: Renormalization-group approach. *Physical Review A* 37: 4461–4468.
- Ottino, J. M. (1989) *The kinematics of mixing: stretching, chaos and transport*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Perugini, D. and Poli, G. (2000) Chaotic dynamics and fractal magmatic interaction processes: a different approach to the interpretation of mafic microgranular enclaves. *Earth and Planetary Science Letters* 175: 93–103.
- Perugini, D. and Poli, G. (2007) Tourmaline nodules from Capo Bianco aplite (Elba Island, Italy): an example of diffusion limited aggregation growth in a magmatic system. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 153: 493–494.
- Perugini, D., Poli, G., Mazzuoli, R. (2003) Chaotic advection, fractals and diffusion during mixing of magmas: evidence from lava flows. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 124: 255–279.
- Perugini, D., Ventura, G., Petrelli, M. and Poli, G. (2004) Kinematic significance of morphological structures generated by mixing of magmas: a case study from Salina Island (Southern Italy). *Earth and Planetary Science Letters* 222: 1051–1066.
- Pichavant, M. and Manning, D. A. C. (1984) Petrogenesis of tourmaline granites and topaz granites: the contribution of experimental data. *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 35: 31–50.

- Rozendaal, A. and Bruwer, L. (1995) Tourmaline nodules: indicators of hydrothermal alteration and Sn-Zn-(W) mineralization in the Cape Granite Suite, South Africa. *Journal of African Earth Sciences* 21(1): 141-155.
- Sepahi, A. A. (1999) Petrology of Alvand plutonic complex with special reference on granitoids. PhD thesis, Tarbiat Moallem University, Tehran, Iran (in Persian).
- Sepahi, A. A. (2001) study of tourmalinization and resulted textures in granites, aplites and pegmatites of Faghireh-Khaku area (south of Hamedan). Abstract of articles from 20th Conference of Earth Sciences, Iran (in Persian).
- Shewfelt, D., Ansdell, K. and Sheppard, S. (2005) The origin of tourmaline nodules in granites; preliminary findings from the Paleoproterozoic Scrubber Granite. *Geological Survey of Western Australia Annual Review* 59-63.
- Sinclair, D. W. and Richardson, J. M. (1992) Quartz-tourmaline orbicles in the Seagull Batholith, Yukon Territory. *The Canadian Mineralogist* 30: 923-935.
- Thomas, R., Förster, H. J. and Heinrich, W. (2003) The behavior of boron in a peraluminous granite-pegmatite system and associated hydro-thermal solutions: a melt and fluid inclusion study. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 144: 457-472.
- Trumbull, R. B., Krienitz, M. S., Gottesmann, B., Wiedenbeck, M. (2008) Chemical and boron-isotope variations in tourmalines from an S- type granite and its source rocks: The Erongo granite and tourmalinites in the Damara Belt, Namibia. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 155: 1-18.
- Veksler, I. V. (2004) Liquid immiscibility and its role at the magmatic hydrothermal transition: a summary of experimental studies. *Chemical Geology* 210: 7-31.
- Veksler, I. V. and Thomas, R. (2002) An experimental study of B-, P- and F- rich synthetic granite pegmatite at 0.1 and 0.2 GPa. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 143: 673-683.
- Veksler, I. V. and Thomas, R. and Schmidt, C. (2002) Experimental evidence of three coexisting immiscible fluids in synthetic granite pegmatite. *American Mineralogist* 87: 775-779.
- Vernon, R. H. (2004) A practical guide to rock forming microstructure, Cambridge University Press.
- Williamson, B. J., Spratt, J., Adams, J. T., Tindle, A. G. and Stanley, C. J. (2000) Geochemical constraints from zoned hydrothermal tourmalines on fluid evolution and Sn mineralization: an example from fault breccias at Roche, SW England. *Journal of Petrology* 41: 1439-1453.
- Wolf, M. B. and London, D. (1997) Boron in granitic magmas: stability of tourmaline in equilibrium with biotite and cordierite. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 130: 12-30.
- Zareian, S. and Darvishzadeh, A. (1975) A brief about regional metamorphism in the Hamedan. *Journal of Science, University of Tehran* 7: 55-62 (in Persian).
- Zareian, S., Forghani, A. and Fayyaz, H. (1972a) Alvand granitic complex and its metamorphic aureole. *Journal of Science, University of Tehran* 4: 23-28 (in Persian).
- Zareian, S., Forghani, A. and Fayyaz, H. (1972b) Alvand granitic complex and its metamorphic aureole. *Journal of Science, University of Tehran* 4: 83-90 (in Persian).
- Zareian, S., Forghani, A. and Fayyaz, H. (1972c) Alvand granitic complex and its metamorphic aureole. *Journal of Science, University of Tehran* 4: 97-106 (in Persian).
- Zareian, S., Forghani, A. and Fayyaz, H. (1973) Alvand granitic complex and its metamorphic aureole. *Journal of Science, University of Tehran* 5: 49-54 (in Persian).
- Zareian, S., Forghani, A. and Fayyaz, H. (1974) Alvand granitic complex and its metamorphic aureole. *Journal of Science, University of Tehran* 6: 4-33 (in Persian).