

بررسی همیافتی کانی‌های زوئیزیت و کلینوزوئیزیت در سنگ‌های دگرگون؛ مثالی از اپیدوت-آمفیبولیت‌های جنوب سلماس - شمال غرب ایران

معصومه آهانگری*، محسن مؤذن

دانشگاه تبریز، دانشکده علوم طبیعی، گروه زمین‌شناسی

(دریافت مقاله: ۹۱/۱/۱۵، نسخه نهایی: ۹۱/۷/۲۹)

چکیده: زوج کانی‌های زوئیزیت و کلینوزوئیزیت به صورت همزیست در اپیدوت-آمفیبولیت‌های منطقه سلماس حضور دارند. در این سنگ‌ها، زوئیزیت در مقایسه با کلینوزوئیزیت از فراوانی بیشتری برخوردار است. ترکیب این زوج کانی‌ها، با یکدیگر متفاوت بوده و دارای مقادیر مختلفی از X_{Ps} (عضو انتهایی پیستاسیت) هستند. این مقدار در زوئیزیت کم بوده و در حدود ۱۰/۶۵-۶/۴۶ است. مقدار عضو نهایی پیستاسیت برای کلینوزوئیزیت در حدود ۱۶/۷۲-۱۸/۷۳ است. جانشینی $Al-Fe^{3+}$ در این کانی‌ها جانشین مهم و مؤثر در ایجاد تغییرات ترکیب کانی‌شناسیست. بررسی‌های دما-فشار اپیدوت-آمفیبولیت‌های منطقه سلماس، بر اساس مبادلات فازی و واکنش تبدیل زوئیزیت به کلینوزوئیزیت و مقدار عضو انتهایی پیستاسیت در زوج کانی‌ها، حاکی از دگرگونی این سنگ‌ها در شرایط دمای 500 ± 20 درجه‌ی سانتیگراد و فشار ۶/۵-۷ کیلو بار است.

واژه‌های کلیدی: همزیستی زوئیزیت-کلینوزوئیزیت؛ دما-فشار سنجی؛ اپیدوت-آمفیبولیت؛ سلماس.

مقدمه

تعیین موقعیت و چگونگی تبدیل ساختار راستگوشی به تک میل در سیستم $CaO-Al_2O_3-SiO_2-H_2O$ (CASH) با بررسی شدت متأثر از کینتیک پایین این واکنش است [۳]. با بررسی سیستم CASH می‌توان چگونگی تبدیل فازی از کلینوزوئیزیت به زوئیزیت، موقعیت گستره‌ی دو فازی زوئیزیت-کلینوزوئیزیت در نمودارهای $P-T-X_{Ps}$ و احتمال وقفه‌ی ترکیبی و امتزاجی در سری انحلال جامد راستگوشی و تک میل را درک کرد. با این وجود، موارد یاد شده از دیرباز موضوع بحث بسیاری از سنگ‌شناس‌ها بوده است [۱، ۴]. ولی، با وجود بررسی‌های تجربی زیادی که در این زمینه توسط بسیاری از پژوهشگران انجام شد [۵-۱۰]، تا کنون موقعیت و چگونگی چنین مبادلات فازی به خوبی شناخته نشده و همواره سؤال برانگیز بوده است.

زوئیزیت و کلینوزوئیزیت، چندریخت‌های ترکیب $Ca_2Al_3Si_3O_{12}(OH)$ بوده و از کانی‌های سازنده‌ی بسیاری از سنگ‌ها هستند. گرچه مقدار این کانی‌ها در سنگ‌ها کم است، ولی، در بیشتر سنگ‌های دگرگون با ترکیب‌های بسیار متفاوت از یکدیگر؛ شامل سنگ‌های مافیک، حد واسط تا اسید دگرگون شده و نیز در سنگ‌های سیلیکات آهکی در تحت شرایط رخساره شیست سبز، آمفیبولیت و اکلوزیت تشکیل شده و حضور دارند [۱]. در سنگ‌های دگرگون حاوی آهن، زوئیزیت با ساختار راستگوشه در رخساره‌ی اکلوزیت و فشارهای بالا تشکیل می‌شود، در حالیکه کلینوزوئیزیت با ساختار تک میل در فشارهای متوسط تا پایین بوجود می‌آید [۲].

* نویسنده مسئول، تلفن: ۰۹۱۴۳۴۸۴۱۱۵، نمابر: ۳۳۵۶۰۲۷ (۰۴۱۱)، پست الکترونیکی: ahangari@tabrizu.ac.ir

روش کار

اساس کار در این پژوهش بر مبنای بررسی‌های سنگ‌نگاری نمونه‌های اپیدوت‌آمفیبولیتی منطقه‌ی سلماس و تشخیص کانی‌های زوئیزیت و کلینوزوئیزیت از یکدیگر، با توجه به خصوصیات نوری و زاویه‌ی خاموشی آن‌ها، استوار است. با مشخص شدن کانی‌های زوئیزیت و کلینوزوئیزیت از یکدیگر، آنالیزهای نقطه‌ای از کانی‌های یاد شده در مؤسسه‌ی GFZ آلمان به عمل آمد و سپس، با توجه به ترکیب شیمیایی هر یک از این کانی‌ها، دما و فشار تشکیل آن‌ها محاسبه شدند.

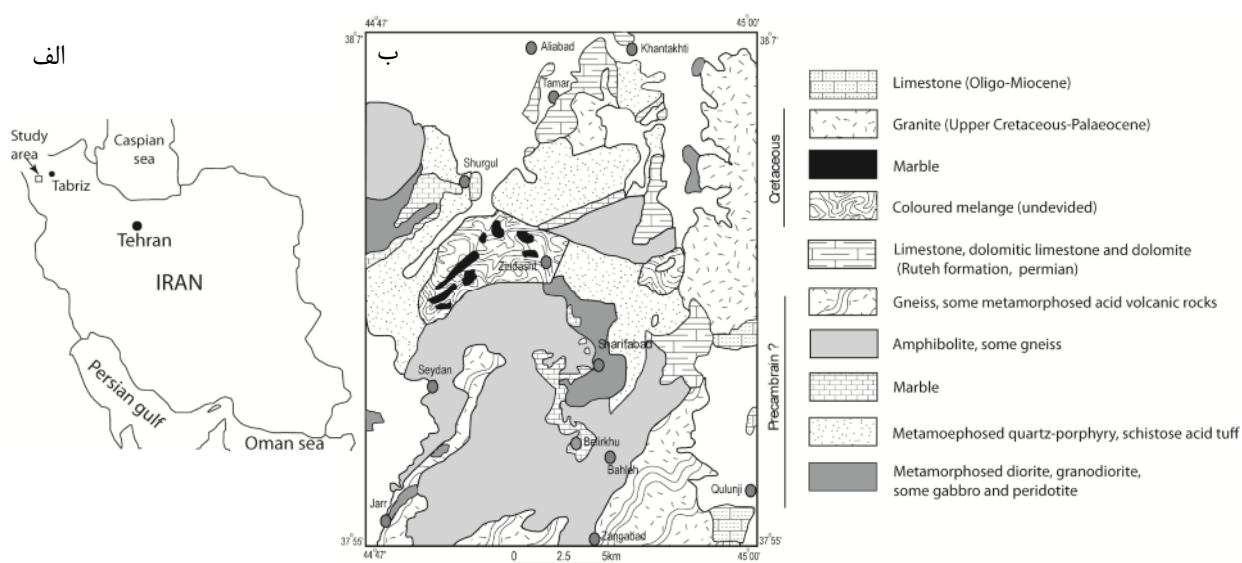
موقعیت زمین‌شناسی منطقه و سنگ‌شناسی

منطقه‌ی مورد بررسی در جنوب شهرستان سلماس در استان آذربایجان غربی و بین مختصات جغرافیایی $47^{\circ} 44'$ تا $45^{\circ} 00'$ طول شرقی و $37^{\circ} 55'$ تا $38^{\circ} 07'$ عرض شمالی واقع شده است (شکل ۱ الف و ب). ترکیب سنگ‌شناسی منطقه بسیار متنوع بوده و انواع سنگ‌های دگرگون، آذرین و رسوبی در این منطقه رخمون دارند. سنگ‌های دگرگون، بخش بزرگ منطقه را به خود اختصاص داده و شامل مجموعه‌ای از آمفیبولیت‌ها (شامل اپیدوت‌آمفیبولیت‌ها و آمفیبولیت‌ها و به مقدار بسیار کم بیوتیت‌اپیدوت آمفیبولیت‌ها) همراه با مقادیر کمی شیست، آهک‌های بلورین و به مقدار بسیار کمتر متاریولیت و متاریوداسیت است. سن این سنگ‌های دگرگون در نقشه‌های زمین‌شناسی ۱:۱۰۰,۰۰۰ سلماس [۱۷] و ۱:۲۵۰,۰۰۰ خوی [۱۸]، پرکامبرین گزارش شده است.

وجود وقفه امتزاجی در بین کانی‌های گروه اپیدوت، اولین بار توسط [۱۱] بین ترکیب پیستاسیت ۱۲ تا ۲۲ درصد گزارش شده است. پس از آن، این وقفه مکرر برای اپیدوت‌های طبیعی موجود در سنگ‌های دگرگون در شرایط رخساره‌ی شیست سبز تا آمفیبولیت شناخته شد [۱۲-۱۴]. [۱۵] بر پایه‌ی بررسی‌های تجربی نشان دادند که بین کانی‌های گروه اپیدوت، محلول جامد پیوسته‌ای بین زوئیزیت و کلینوزوئیزیت وجود ندارد. نتایج بررسی‌های آنها در فشار ۵ کیلوبار، حاکی از وجود وقفه ترکیبی بین ترکیب پیستاسیت ۰/۲۵ تا ۰/۵ است. [۱۶] نیز گستره‌ای مشابه گستره‌ی یاد شده را، برای نمونه‌های طبیعی کانی‌های گروه اپیدوت گزارش کرده‌اند.

بین سری محلول جامد موجود بین کانی‌های گروه اپیدوت، در گستره‌ی ترکیبی بین ۰/۷ تا ۰/۸ نیز وقفه ترکیبی توسط [۱۴، ۱۰] گزارش شد. وقفه‌های ترکیبی گزارش شده توسط پژوهشگران مختلف، می‌تواند دلیلی بر همزیستی زوج کانی زوئیزیت و کلینوزوئیزیت در یک سنگ دگرگون باشد. به طوریکه هر دو بتوانند به صورت تعادلی از نظر ترمودینامیکی در یک نمونه حضور داشته باشند.

در این مقاله به بررسی همیافتی و همزیستی کانی‌های زوئیزیت و کلینوزوئیزیت در اپیدوت-آمفیبولیت‌های منطقه سلماس پرداخته و سعی شده است تا خلاصه‌ای از بررسی‌های پیشین موجود در این زمینه را نیز ارائه دهد.

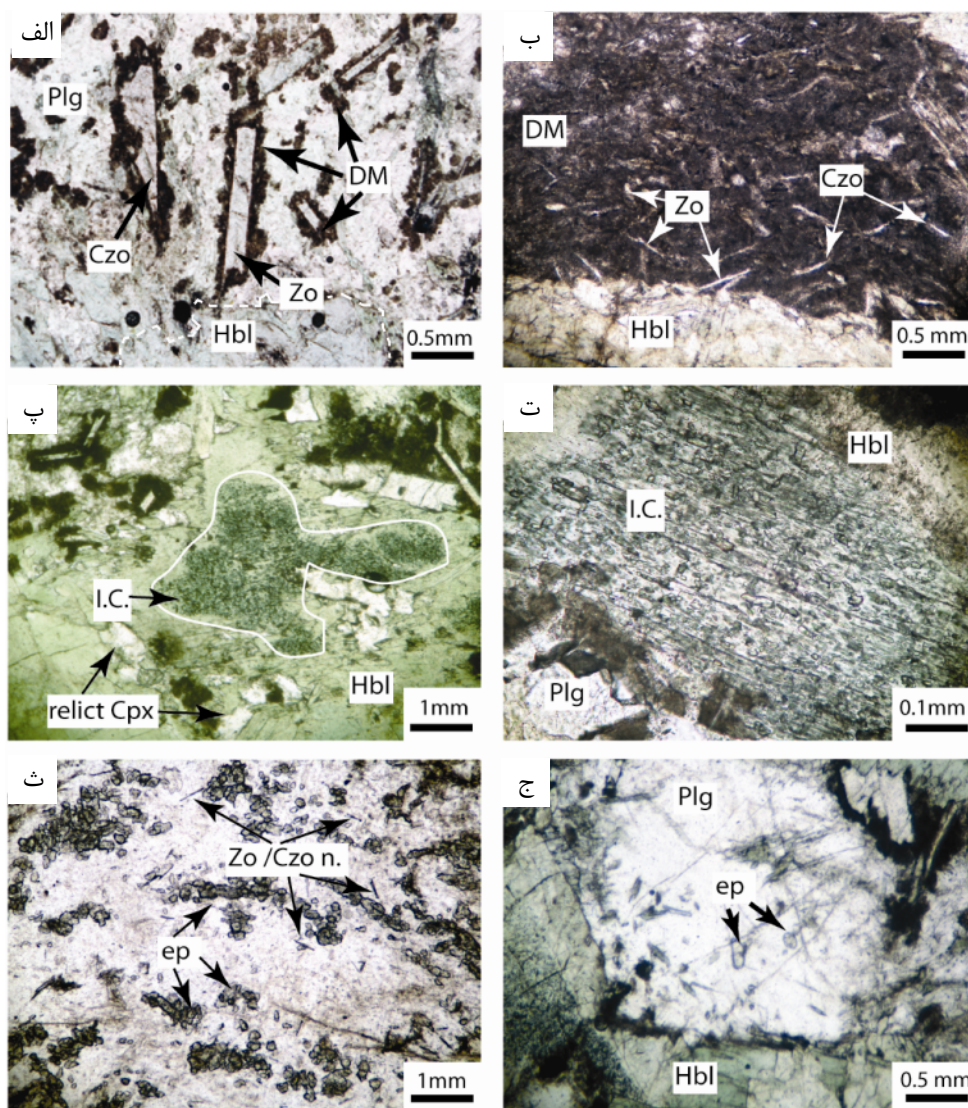


شکل ۱ (الف): موقعیت منطقه‌ی مورد بررسی در نقشه‌ی ایران، (ب): نقشه‌ی زمین‌شناسی منطقه‌ی مورد بررسی، اقتباس از [۱۷، ۱۸].

سنگ‌ها بسیار متغیر است.

ترکیب کانی‌شناسی اپیدوت-آمفیبولیت‌ها شامل کانی‌های آمفیبول (هورنبلند)، پلاژیوکلاز، کوارتز، کانی‌های گروه اپیدوت (اپیدوت، زئوئیزیت و کلینوزئوئیزیت)، تیتانیت و اکسیدهای آهن است. کلینوپروکسن‌های باقی‌مانده از سنگ مادر نیز قابل مشاهده است (شکل ۲ پ).

اپیدوت-آمفیبولیت‌ها یکی از مهمترین گروه سنگ‌های دگرگون منطقه‌ی جنوب سلماس‌اند که به همراه آمفیبولیت‌ها بخش وسیعی از منطقه‌ی مورد بررسی را به خود اختصاص داده است. این سنگ‌ها در نمونه‌ی دستی، به رنگ سبز روشن تا سبز تیره بوده و کانی‌های آمفیبول و پلاژیوکلاز موجود در آن به راحتی قابل تشخیص‌اند. اندازه‌ی کانی‌های موجود در این



شکل ۲ کانی‌های گروه اپیدوت در اپیدوت-آمفیبولیت‌های منطقه‌ی سلماس (در نور PPL) (الف و ب): کانی‌های کشیده و منشوری زئوئیزیت و کلینوزئوئیزیت در متن سنگ با حاشیه‌ای از مواد تیره رنگ، اندازه متفاوت کانی‌های زئوئیزیت و کلینوزئوئیزیت و نیز مقادیر متفاوت مواد تیره در حاشیه‌ی این کانی‌ها در این دو نمونه مشهود است. (پ و ت): ادخال‌های ریز اپیدوت موجود در کانی آمفیبول. ادخال‌های ریز اپیدوت سم‌گیری نشان می‌دهند. کلینوپروکسن‌های باقی‌مانده از سنگ اولیه نیز قابل مشاهده است. (ث): کانی‌های اپیدوت و سوزن‌های ریز زئوئیزیت و کلینوزئوئیزیت در اپیدوت-آمفیبولیت‌ها. (ج): ادخال‌های اپیدوت در کانی پلاژیوکلاز. Zo: زئوئیزیت؛ Czo: کلینوزئوئیزیت؛ DM: مجموعه کانی‌های ریز موجود در حاشیه‌ی کانی‌ها؛ Hbl: هورنبلند؛ I.C.: مجموعه‌ی ادخال‌ها در کانی آمفیبول؛ relict Cpx: کلینوپروکسن باقی‌مانده؛ ep: اپیدوت؛ Zo/Czo n.: سوزنی‌های زئوئیزیت/کلینوزئوئیزیت.

حداقل می‌رساند. بدین معنی که مجموعه‌ی یادشده از دگرگونی برگشتی و یا دگرسانی اپیدوت‌ها حاصل نشده‌اند. نتایج حاصل از آنالیز نقطه‌ای این مواد نشانگر بالا بودن مقادیر اکسیدهای SiO_2 , Al_2O_3 و CaO است. میزان FeO موجود در این ترکیب نزدیک ۴٪ است. میزان اکسیدهای دیگر ناچیز است. ترکیب شیمیایی این مجموعه شباهت بسیار زیادی به ترکیب کانی‌های زوئیزیت و کلینوزوئیزیت آنالیز شده دارد (با این تفاوت که میزان آب موجود در این مجموعه از کانی‌ها بیش از کانی‌های گروه اپیدوت است، جدول ۱). به نظر می‌رسد که این مجموعه جایگاه و مکانی برای تبلور کانی‌های Zn/Czo در اپیدوت‌آمفیبولیت‌های منطقه‌ی سلماس را تشکیل می‌دهد، و با توجه به تشابه بسیار زیاد ترکیب شیمیایی این مواد با کانی‌های Zn/Czo نیز، این احتمال را قوت می‌بخشد.

معمولاً، هر سه عضو از کانی‌های گروه اپیدوت با یکدیگر در اپیدوت‌آمفیبولیت‌ها حضور دارند (شکل ۲). زوئیزیت و کلینوزوئیزیت به صورت شکل‌های کشیده و منشوری در متن سنگ بوده و دارای تعادل بافتی با کانی‌های موجود دیگر در سنگ دیده می‌شوند. در اطراف و حاشیه برخی از این کانی‌ها مجموعه‌ی درهمی از کانی‌های تیره مشاهده می‌شود (شکل ۲ الف و ب). این بافت تنها در دو نمونه از اپیدوت‌آمفیبولیت‌های منطقه سلماس مشاهده شده و نمونه‌های دیگر مطالعه شده فاقد چنین بافتی هستند. این مجموعه درهم از کانی‌ها، ظاهری بی‌شکل داشته و ترکیب آن قابل شناسایی و تشخیص با میکروسکوپ نیست. بررسی‌های میکروسکوپی انجام گرفته روی این نمونه‌ها، نشانگر تند و تیز بودن مرز کانی‌های Zn/Czo با این مجموعه است. لذا وجود این مرز (شواهد بافتی)، اهمیت فرآیندهای دگرگون پسروده را در تشکیل این مجموعه به

جدول ۱ داده‌های حاصل از آنالیز نقطه‌ای کانی‌های زوئیزیت و کلینوزوئیزیت و مجموعه کانی‌های ریز موجود در اطراف کانی‌های گروه اپیدوت. Zn/Czo : زوئیزیت؛ Czo : کلینوزوئیزیت

	slm1e-11	slm1e-12	slm1e-13	slm1e-32	slm1e-33	slm1e-31	slm1e-30
	Czo	Czo	Czo	Zo	Zo	Zo	مجموعه کانی‌های ریز
SiO_2	۳۸.۵۵	۳۸.۶۷	۳۸.۴۷	۳۹.۲۰	۳۸.۶۵	۴۲.۷۹	۳۷.۳۷
TiO_2	۰.۰۷	۰.۰۹	۰.۰۶	۰.۰۱	۰.۰۱	۰.۰۰	۰.۰۱
Al_2O_3	۲۶.۷۷	۲۷.۳۸	۲۶.۶۵	۲۹.۴۳	۲۹.۱۰	۲۹.۶۹	۲۶.۷۵
Cr_2O_3	۰.۰۰	۰.۰۲	۰.۰۰	۰.۰۳	۰.۰۲	۰.۰۰	۰.۰۱
Fe_2O_3	۸.۵۲	۸.۶۱	۹.۰۶	۴.۵۸	۵.۴۳	۳.۲۱	۳.۷۶
MnO	۰.۰۹	۰.۰۵	۰.۰۳	۰.۰۷	۰.۰۹	۰.۰۱	۰.۰۶
MgO	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۴	۰.۰۰	۰.۰۰	۱.۴۹
CaO	۲۴.۰۱	۲۴.۰۰	۲۴.۰۷	۲۴.۰۹	۲۴.۱۸	۲۱.۳۹	۲۳.۵۲
Na_2O	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۲۰	۰.۰۵	۱.۴۲	۰.۰۶
K_2O	۰.۰۰	۰.۰۱	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۱	۰.۰۱	۰.۰۰
Total	۹۷.۱۵	۹۷.۹۷	۹۷.۴۲	۹۷.۲۱	۹۶.۹۸	۹۸.۱۹	۹۲.۶۵
Formula (12.5 O)							
Si	۳.۰۱۳	۲.۹۹۶	۳.۰۰۲	۳.۰۲۹	۳.۰۰۲	۳.۲۲۲	۳.۰۳۷
Ti	۰.۰۰۴	۰.۰۰۵	۰.۰۰۳	۰.۰۰۱	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۱
Al	۲.۴۶۶	۲.۴۹۹	۲.۴۵۱	۲.۶۸۰	۲.۶۶۴	۲.۶۳۵	۲.۵۶۲
Cr	۰.۰۰۰	۰.۰۰۱	۰.۰۰۰	۰.۰۰۲	۰.۰۰۱	۰.۰۰۰	۰.۰۰۱
Fe^{3+}	۰.۵۰۱	۰.۵۰۲	۰.۵۳۲	۰.۲۶۶	۰.۳۱۸	۰.۱۸۲	۰.۲۳۰
Mn	۰.۰۰۶	۰.۰۰۳	۰.۰۰۲	۰.۰۰۵	۰.۰۰۶	۰.۰۰۱	۰.۰۰۴
Mg	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۵	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۱۸۱
Ca	۲.۰۱۰	۱.۹۹۲	۲.۰۱۲	۱.۹۹۴	۲.۰۱۲	۱.۷۲۶	۲.۰۴۸
Na	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۳۱	۰.۰۰۷	۰.۲۰۷	۰.۰۰۹
K	۰.۰۰۰	۰.۰۰۱	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۱	۰.۰۰۰
Total	۸.۰۰۱	۷.۹۹۹	۸.۰۰۳	۸.۰۱۲	۸.۰۱۰	۷.۹۷۴	۸.۰۷۱
Mole fractions							
XCa (A)	۱.۰۱	۱.۰۰	۱.۰۱	۱.۰۰	۱.۰۱	۰.۸۶	۱.۰۲
XAl (M3)	۰.۴۷	۰.۵۰	۰.۴۵	۰.۶۸	۰.۶۶	۰.۶۴	۰.۵۶
XFe3 (M3)	۰.۵۰	۰.۵۰	۰.۵۳	۰.۲۷	۰.۳۲	۰.۱۸	۰.۲۳

توجه و حاشیه‌ی مشخص‌اند که نشان می‌دهد حاصل دگرسانی، کانی میزبان نیست (شکل ۲ ج).

۴- کانی‌های گروه اپیدوت همواره همراه با کانی‌های اوج دگرگونی بوده و هیچ‌گاه همراه آن‌ها، کانی‌های معمول در دگرسانی و/یا دگرگونی برگشتی (همچون ترمولیت-اکتینولیت، کلریت، گوتیت و ژاروسیت) مشاهده نشده است.

۵- علاوه بر موارد یاد شده در بالا که حاصل مشاهدات مستقیم و بررسی‌های سنگ‌نگاری انجام شده روی نمونه‌های اپیدوت-آمفیبولیت‌های منطقه سلماس‌اند، بررسی‌های بیشماری در خصوص وجود و تشکیل کانی‌های گروه اپیدوت بویژه زئولیت و کلینوزئولیت طی دگرگونی پیشرونده و به صورت متعادل با دیگر کانی‌های اوج دگرگونی، هم در اپیدوت‌آمفیبولیت‌ها [۱۹-۲۱] و هم در اپیدوت‌اکلوژیت‌ها [۲۲-۲۵]، انجام شده است که خود می‌تواند به عنوان شاهده‌ی مبنی بر حضور متعادل کانی-های گروه اپیدوت در آمفیبولیت‌ها و اکلوژیت‌ها باشد.

در مجموع، بررسی‌های سنگ‌نگاری انجام گرفته روی اپیدوت‌آمفیبولیت‌های منطقه‌ی سلماس، و استفاده از شواهد مختلف مبنی بر وجود تعادل بین کانی‌های گروه اپیدوت و دیگر کانی‌های موجود در این سنگ‌هاست.

شیمی کانی

بررسی‌های شیمی کانی‌های گروه اپیدوت، بر مبنای تجزیه‌ی این کانی‌ها با ریزپردازنده‌ی Cameca SX-100 در مؤسسه تحقیقاتی علوم زمین آلمان Geo Forschungs Zentrum (GFZ) پتسدام صورت گرفته است. خلاصه‌ای از نتایج حاصل از آنالیز نقطه‌ای این کانی‌ها در جدول ۱ نشان داده شده است. فرمول ساختاری کانی‌های این گروه بر اساس ۱۲/۵ اتم اکسیژن محاسبه شده است. برای انجام این محاسبات، تمامی آهن موجود در ساختار این کانی، به صورت Fe^{3+} فرض شده است.

معمولاً شناسایی و تشخیص کانی زئولیت از کلینوزئولیت بر مبنای بررسی‌های میکروسکوپی و تعیین زاویه‌ی خاموشی استوار است. زئولیت دارای خاموشی مسقیم بوده ولی زاویه‌ی خاموشی در کلینوزئولیت به صورت مایل است [۱]. لذا برای رده‌بندی و نامگذاری این کانی‌ها از خصوصیات نوری آن‌ها که در شکل ۳ نشان داده شده بهره جسته‌ایم.

فرمول عمومی کانی‌های این گروه به صورت $[Ca_2Al_2(Al,Fe^{3+})Si_3O_{12}(OH)]Al$ به جای Fe^{3+} به وجود آورنده‌ی کانی‌های مختلف موجود در سری محلول جامد کانی‌های گروه اپیدوت است. این جانشینی

بررسی‌های بافتی حاکی از این امرند که کانی‌های گروه اپیدوت طی دگرگونی پیشرونده در این سنگ‌ها تشکیل شده و بخشی از مجموعه کانی‌های اوج دگرگونی به حساب می‌آیند. علاوه بر کانی‌های گروه اپیدوت موجود در متن سنگ، اپیدوت به صورت نفوذی در کانی‌های آمفیبول (شکل ۲ پ و ۲ ت) و پلاژیوکلاز (شکل ۲ ج) نیز مشاهده شده است.

بررسی‌های سنگ‌نگاری انجام شده روی نمونه‌های اپیدوت-آمفیبولیتی بدست آمده از منطقه‌ی جنوب سلماس، بیانگر این واقعیت است که به لحاظ آماری میزان کانی‌های زئولیت و کلینوزئولیت با یکدیگر متفاوتند. این بررسی‌ها نشان می‌دهد که بیشتر کانی‌های گروه اپیدوت موجود در زمینه‌ی سنگ دارای ترکیب زئولیت با زاویه‌ی خاموشی مستقیم‌اند. رنگ دوشکستی این کانی‌ها در نور قطبیده بسیار متغیر بوده و آبی غیر عادی، سبز و زرد از جمله رنگ‌های دوشکستی متداول این کانی‌ها هستند. هیچ نوع منطقه‌بندی شیمیایی در این کانی‌ها مشاهده نشده است.

روابط بافتی کانی‌های Zo/Czo

حضور کانی‌های گروه اپیدوت بویژه چندریختی‌های زئولیت و کلینوزئولیت به صورت متعادل و تشکیل آن‌ها حین دگرگونی پیشرونده، از جمله مسایل بحث‌برانگیز در سنگ‌شناسی دگرگونی است. با این وجود، با استفاده از روابط بافتی تا حدی می‌توان به وجود و یا عدم وجود تعادل دگرگونی در این سنگ-ها پی برد. در زیر به بخشی از روابط بافتی موجود در اپیدوت-آمفیبولیت‌های منطقه سلماس اشاره شده است:

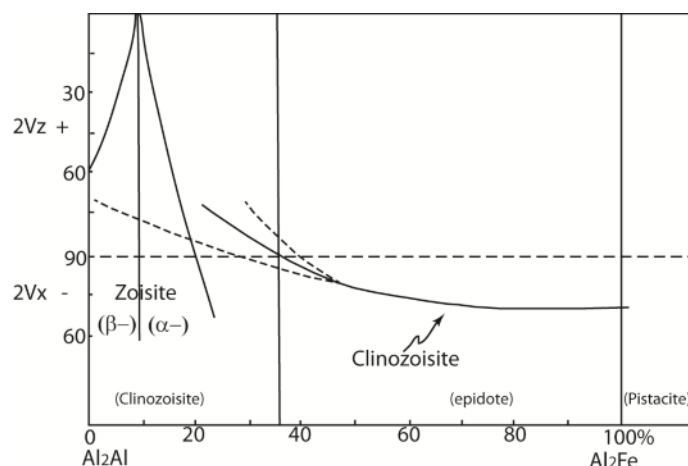
۱- در بیشتر نمونه‌های اپیدوت‌آمفیبولیت بررسی شده در منطقه‌ی سلماس، کانی‌های گروه اپیدوت در تماس مستقیم با دیگر کانی‌های تشکیل شده در اوج دگرگونی همچون پلاژیوکلاز و آمفیبول بوده و مرز بین آن‌ها مستقیم و مشخص است. بدین معنی که حاشیه واکنشی بین اپیدوت و دیگر کانی‌ها دیده نمی‌شود.

۲- اندازه‌ی کانی‌های گروه اپیدوت در اپیدوت‌آمفیبولیت‌ها درشت بوده و معمولاً دارای اندازه‌ای مشابه با کانی‌های دیگر موجود در این مجموعه هستند.

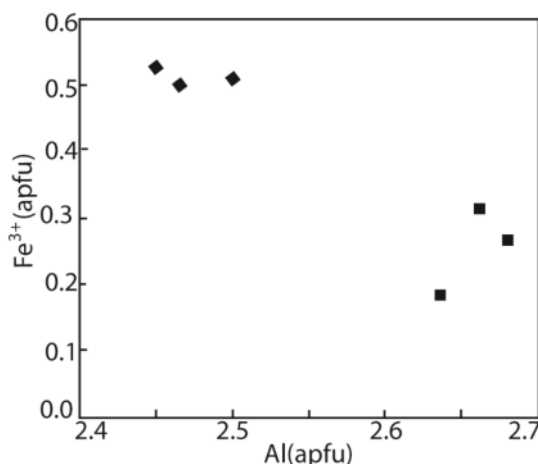
۳- اپیدوت‌ها همواره در متن سنگ و در تماس مستقیم با کانی‌های تشکیل دهنده‌ی سنگ بوده و هیچ‌گاه روی دیگر کانی‌ها و یا حاشیه‌ی آن‌ها، بر اثر دگرسانی و یا دگرگونی برگشتی، رشد نکرده‌اند. در مواردی که اپیدوت داخل کانی‌های دیگر به صورت دربرداری هستند و است دارای اندازه‌ی قابل

(Mg + Mn) با فرض اینکه تمامی آهن موجود در ساختار این کانی‌ها، آهن سه ظرفیتی است، برای زوئیزیت و کلینوزوئیزیت متغیر است. این مقدار برای زوئیزیت 0.1 ± 0.18 است. میزان 0.06 بوده و برای کلینوزوئیزیت 0.1 است. میزان عناصر دیگر موجود در ساختار این کانی‌ها تفاوت چشمگیری با یکدیگر نداشته و مشابه یکدیگرند. مقدار اکسید MnO در ساختار این کانی‌ها کم بوده و معمولاً کمتر از 0.09 درصد وزنی اکسیدهای موجود در ساختار این کانی‌ها را به خود اختصاص داده است. همچنین میزان MgO نیز ناچیز بوده و کمتر از 0.04 درصد است. مقدار عضو نهایی پیستاسیت $(Fe^{3+}/(Al + Fe^{3+}))$ ، $16.72-18.73\%$ برای کلینوزوئیزیت و $6.46-10.65\%$ برای زوئیزیت است.

در ایجاد تغییرات ترکیبی کانی‌های گروه اپیدوت موجود در اپیدوت-آمفیبولیت‌های منطقه سلماس نیز مؤثر است (شکل ۴). زوئیزیت و کلینوزوئیزیت موجود در سنگ‌های آمفیبولیتی منطقه سلماس دارای ترکیب‌های متفاوتی نسبت به یکدیگرند. مقدار اکسیدهای Al_2O_3 و Fe_2O_3 در این کانی‌ها نسبت به یکدیگر متفاوت است. معمولاً میزان اکسید Al_2O_3 در کانی زوئیزیت ($29.69-29.91$) بیشتر از کلینوزوئیزیت ($27.38-26.65$) بوده و در مقابل میزان اکسید Fe_2O_3 آن ($5.43-3.21$) در مقایسه با میزان این اکسید در ساختار کانی کلینوزوئیزیت ($9.06-8.52$) کمتر است. مقادیر $X_{Fe} = (Fe^{3+} + Fe^{2+})/(Al + Fe^{3+} + Fe^{2+})$



شکل ۳ رده‌بندی کانی‌های گروه اپیدوت در سیستم $Ca_2Al_3Si_3O_{12}(OH)-Ca_2Al_2FeSi_3O_{12}(OH)$. زوئیزیت با ساختار راست‌گوشه شامل دو نوع زوئیزیت فقیر از آهن (زوئیزیت β) و زوئیزیت غنی از آهن (زوئیزیت α). کلینوزوئیزیت با ساختار تک‌میل (و علامت نوری مثبت). در این شکل موقعیت پیستاسیت $Ca_2Fe_3Si_3O_{12}(OH)$ ، نشان داده نشده است. برگرفته از [۴].



شکل ۴ نمودار Al نسبت به Fe^{3+} . همخوانی منفی این دو عنصر بیانگر وقوع جانشینی Fe^{3+} به جای Al است. در این نمودار مقادیر متفاوت Fe^{3+} و Al در ترکیب این کانی‌ها قابل مشاهده می‌باشد. ■: زوئیزیت؛ ♦: کلینوزوئیزیت است.

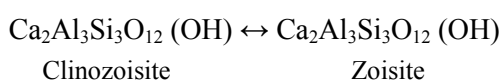
مروری بر همزیستی زوئیزیت و کلینوزوئیزیت

گرچه هم‌بستگی ژوئیزیت و کلینوزوئیزیت از دیرباز به خوبی شناخته شده [۲۶] و توجه بسیاری از زمین‌شناسان را به خود جلب کرده است، ولی تاکنون بررسی‌های چندان زیادی انجام نشده و ماهیت تبدیل این دو کانی به یکدیگر و یا علت هم‌بستگی آن‌ها در یک سنگ به خوبی شناخته نشده است.

بررسی همزیستی زوئیت و کلینوزوئیت و نیز تبدیل این دو کانی به یکدیگر معمولاً بر پایه‌ی نتایج حاصل از دو نوع بررسی استوار است: (۱) بررسی روی نمونه‌های طبیعی بدست آمده از سنگ‌های دگرگون مختلف موجود در طبیعت (برای مثال [۲۷-۲۹])؛ و (۲) بررسی نمونه‌های ساخته شده در آزمایشگاه در شرایط فیزیکی (فشار و دما) متفاوت و کنترل شده [۵، ۱۵، ۳۰].

نتایج حاصل از این بررسی‌ها بسیار متنوع بوده و بر پایه‌ی این بررسی‌ها، تاکنون نظره‌های متفاوتی در خصوص همزیستی و یا همیافتگی این دو کانال ارائه شده است.

واکنش چندریختی تبدیل زوئیزیت به کلینوزوئیزیت به صورت زیر بیان می‌شود (واکنش ۱):



تعیین ماهیت همزیستی و یا همیافتی دو کانی زوئیزیت و کلینوزوئیزیت، نیازمند محاسبه پارامترهای مختلف ترمودینامیکی در واکنش (۱) است. بررسی‌های مختلفی برای محاسبه ΔG° (انرژی آزاد گیبس) واکنش (۱) [۵، ۱۵، ۳۰]، فعالیت کانی‌های زوئیزیت و کلینوزوئیزیت [۳۱] و دیگر داده‌های ترمودینامیکی همچون ΔV ، ΔH°_f و ΔS°_f [۳۲، ۳۳] صورت گرفته است. در شکل ۵ شماتیکی از انرژی آزاد گیبس برای کانی‌های زوئیزیت و کلینوزوئیزیت در مقابل نسبت‌های متفاوتی از X_{Fe} نشان داده شده است. با توجه به این نمودار، می‌توان حضور کانی‌های Zo/Czo را با توجه به مقادیر انرژی آزاد گیبس و ترکیب این کانی‌ها توضیح داد. در واقع اهمیت ترکیب شیمیایی در سنگ‌های دگرگون در این نمودار بیشتر آشکار می‌شود.

بحث

حضور زوج کانی‌های ژوئیزیت و کلینوزوئیزیت در اپیدوت-آمفیبولیت‌های منطقه‌ی سلماس می‌تواند به عنوان راهنمایی

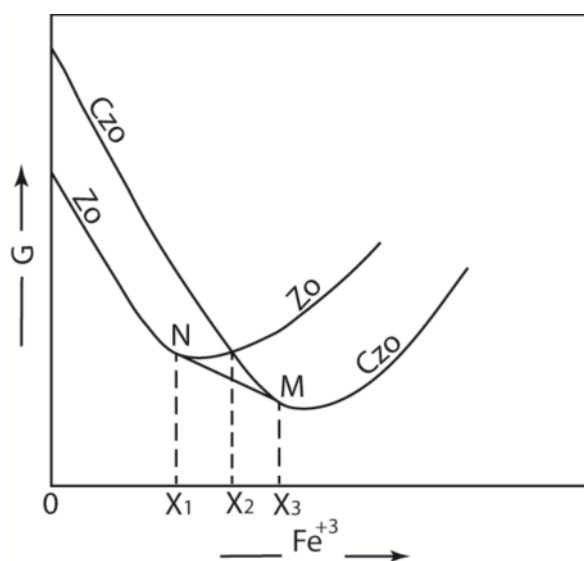
برای تعیین شرایط دما و فشار دگرگونی تشکیل باشد. در واقع تبدلات فازی کلاینوزوئیزیت به زوئیزیت و وقعه ترکیبی موجود در محلول جامد کلاینوزوئیزیت، تابع شرایط $P-T-X_{P_8}$ است. هر چند، استفاده از همزیستی این دوکانی علیرغم داشتن پتانسیل خوب به عنوان زمین-دما-فشارسنج (دما- فشارسنجی)، در سنگ‌های دگرگون کمتر مورد استفاده قرار گرفته است [۱۵].

برای تعیین دمای دگرگونی اپیدوت- آمفیبولیت‌های منطقه مورد بررسی، از نمودار تقریبی دما نسبت به درصد مولی عضو بیستاسیت در زوج کانی زونیزیت و کلینوزونیزیت [۳۰]، استفاده شد (شکل ۶). با ترسیم محتوای X_{Ps} کانی‌های زونیزیت و کلینوزونیزیت بدست آمده از منطقه‌ی سلماس روی این نمودار، دمای تشکیل اپیدوت- آمفیبولیت‌های منطقه‌ی سلماس در حدود ۶۸۰-۵۰۰ درجه‌ی سانتیگراد است. با توجه به اینکه گستره دمایی بدست آمده در این روش زیاد و نیز با توجه به اینکه این روش تقریبی بوده و احتمال بروز خطا در آن زیاد است، لذا به منظور محدود کردن گستره‌ی دمایی به دست آمده، از ترکیب آمفیبول و پلاژیوکلاز موجود در این سنگ‌ها استفاده شده (دماسنج تجربی آمفیبول- پلاژیوکلاز) [۳۴] و دمای دگرگونی محاسبه شد. با بکارگیری این روش، دمای 500 ± 20 درجه‌ی سانتیگراد برای اپیدوت-آمفیبولیت‌ها بدست آمد. برای محاسبه‌ی فشار همزیستی زوج کانی‌های گروه اپیدوت، از معادلات و روابط ارائه شده توسط [۱۵]، استفاده شده است:

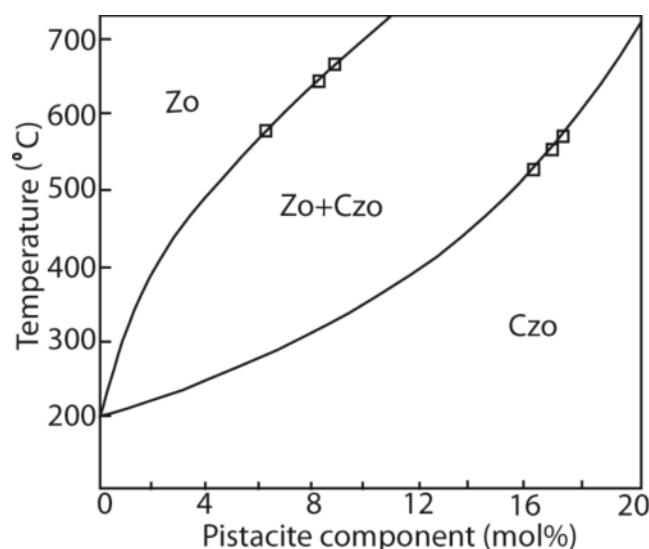
$$X_{\text{Ps}}^{\text{Zn}}(\text{max}) = 1.9 \times 10^{-4} T + 3.1 \times 10^{-2} P - 5.63 \times 10^{-2} \quad (1)$$

$$X_{\text{Ps}}^{\text{Czo}}(\text{min}) = (4.6 \times 10^{-4} - 4 \times 10^{-5} \text{P})T + 3.82 \times 10^{-2} \text{P} - 8.76 \times 10^{-2} \quad (2)$$

این روابط تجربی بوده و بر اساس بررسی‌های آزمایشگاهی بدست آمده است (دما برحسب درجه سانتیگراد و فشار بر حسب گیگاپاسکال). در این معادلات ترکیب زوج کانی‌های زئولیت و کلینوزئولیت به عنوان تابعی از دما و فشار در نظر گرفته شد. با حل معادلات بالا برای مقادیر $X_{Ps}^{Zeo}(\min) = 0.18$ و $X_{Ps}^{Zeo}(\max) = 0.06$ دمای ۵۰۰ درجه-ی سانتیگراد (که با استفاده از ترکیب آمفیبول و پلاژیوکلاز محاسبه شد)، فشار به دست آمده برای نمونه‌های اپیدوت-آمفیبولیت، منطقه‌ی سلماس، ۷-۶.۵ کیلو بار به دست آمد.



شکل ۵. نمایی از نمودار انرژی آزاد گیبس- ترکیب برای وقفه ترکیبی موجود بین زوئیزیت-کلینوزوئیزیت. بر گرفته از [۲۳].



شکل ۶. نمودار ترکیب زوج کانی‌های همزیست زوئیزیت و کلینوزوئیزیت‌های منطقه‌ی سلماس نسبت به دما. محدوده دو فازی زوئیزیت و کلینوزوئیزیت برگرفته از [۲۳] ($X_{Ps} = Fe^{3+}/Al + Fe^{3+}$).

برداشت

مهمترین جانشینی مؤثر در ایجاد تغییرات ترکیبی مشاهده شده در کانی‌های زوئیزیت و کلینوزوئیزیت Al-Fe است. با توجه به حضور همزمان کانی‌های زوئیزیت و کلینوزوئیزیت در سنگ‌های دگرگون و با در نظر گرفتن ترکیب شیمیایی این کانی‌ها، می‌توان به شرایط دما و فشار تبلور آن‌ها پی برد. بر مبنای بررسی‌های دما-فشارسنجی که بر اساس مبادلات فازی و واکنش تبدیل زوئیزیت به کلینوزوئیزیت و مقدار عضو انتهایی پیستاسیت در زوج کانی‌ها انجام گرفته است، این کانی‌ها در دمای 500 ± 20 درجه‌ی سانتیگراد و فشار

کانی‌های گروه اپیدوت (اپیدوت، زوئیزیت و کلینوزوئیزیت) از جمله کانی‌های شاخص در اپیدوت‌آمفیبولیت‌های منطقه‌ی سلماس بوده و جزیی از مجموعه کانی‌های اوج دگرگونی در این سنگ‌ها بشمار می‌روند. ترکیب شیمیایی کانی‌های زوئیزیت و کلینوزوئیزیت با یکدیگر متفاوت بوده و مقدار X_{Ps} در این کانی‌ها با توجه به ترکیب آن‌ها متفاوت است. X_{Ps} در کانی زوئیزیت (۱۰/۶۵-۶/۴۶) در مقایسه با این مقدار در کانی کلینوزوئیزیت (۱۸/۷۳-۱۶/۷۲) کمتر است. نتیجه اینکه

- [8] Holland T.J.B., "Stability relations of clino- and ortho-epidote". In: Henderson CMB (ed) Progress in experimental petrology. The Natural Environment Research Council. Publication Series D. 25 (1984) 185-186.
- [9] Fehr K.T., Heuss-Aßbichler S., "Intracrystalline equilibria and immiscibility along the join clinozoisite-epidote: an experimental and 57Fe Mossbauer study", N Jahrb Mineral Abh, 172 (1997) 43-67.
- [10] Heuss-Aßbichler S., Fehr K.T., "Intercrystalline exchange of Al and Fe³⁺ between grossular-andradite and clinozoisite-epidote solid solutions", N Jahrb Mineral Abh 172 (1997) 69-100.
- [11] Strens R.G.J., "Stability relations of the Al-Fe epidotes", Mineral. Mag. 35 (1965) 464-475.
- [12] Holdaway M.J., "Basic regional metamorphic rocks in part of the Klamath Mountains, Northern California", American Mineralogist 50 (1965) 953-977.
- [13] Hietnan A., "Amphibole pairs, epidote minerals, chlorite, and plagioclase in metamorphic rocks, northern Sierra Nevada, California", American Mineralogist, 59 (1974) 22-40.
- [14] Raith M., "The Al-Fe (III) epidote miscibility gap in a metamorphic profile through the Penninic series of the Tauern Window, Austria", Contributions to Mineralogy and Petrology, 57 (1976) 99-117.
- [15] Brunsmann A., Franz G., Heinrich W., "Experimental investigation of zoisite-clinozoisite phase equilibria in the system CaO-Fe₂O₃-Al₂O₃-SiO₂-H₂O", Contributions to Mineralogy and Petrology, 143 (2002) 115-130.
- [16] Selverstone J., Spear F.S., "Metamorphic P-T paths from pelitic schists and greenstones from the south-west Tauern Window, Eastern Alps", Journal of metamorphic Geology 3 (1985) 439-465.
- [۱۷] سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ سلماس.
- [۱۸] سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، نقشه زمین‌شناسی ۱:۲۵۰۰۰۰ خوی.
- [19] Kapp P., Manning C.E., and Tropper P., "Phase-equilibrium constraints on titanite and rutile activities in mafic epidote amphibolites and geobarometry using titanite-rutile equilibria",

۶/۵-۷ کیلوپار تشکیل شده‌اند. شرایط دما- فشاری به دست آمده برای این نمونه‌ها، در گستره‌ی اپیدوت آمفیبولیت در نمودارهای تعیین رخساره‌های دگرگونی قرار می‌گیرد.

این بررسی‌ها، اهمیت توجه به حضور و ترکیب شیمیایی این دو کانی در سنگ‌های دگرگون و کاربرد آن به عنوان فشارسنج و دماسنج بالقوه در بررسی سنگ‌های دگرگونی را نشان می‌دهد.

قدردانی

بدینوسیله از دکتر Rhede و خانم Appelt که ما را در انجام تجزیه‌های میکروپروب یاری دادند، تشکر می‌نماییم. همچنین از داوران محترم مجله که با پیشنهادات ارزنده خود موجب بهتر شدن مقاله شدند و از دکتر ناصر تجبر سردبیر مجله تشکر می‌کنیم.

مراجع

- [1] Deer W.A., Howie R.A., Zussman, J., "Epidote group. In: Deer, W.A., Howie, R.A. and Zussman, J. Disilicates and ring silicates", Longman, Harlow, (1986) 2-179.
- [2] Poli S., Schmidt M.W., "The high-pressure stability of zoisite and phase relationships of zoisite-bearing assemblages", Contributions to Mineralogy and Petrology, 130 (1998) 162-175.
- [3] Chatterjee N.D., Johannes W., Leistner H., "The system CaO-Al₂O₃-SiO₂-H₂O: new phase equilibria data, some calculated phase relations, and their petrological applications", Contributions to Mineralogy and Petrology, 88 (1984) 1-13.
- [4] Franz G., Selverstone J., "An empirical phase diagram for the clinozoisite-zoisite transformation in the system Ca₂Al₃Si₃O₁₂(OH)-Ca₂Al₂Fe³⁺Si₃O₁₂(OH)", American Mineralogist, 77 (1992) 631-642.
- [5] Jenkins D. M., Newton R. C., Goldsmith J. R., "Fe-free clinozoisite stability relative to zoisite", Nature, 304 (1983) 622-623.
- [6] Holdaway M.J., "Thermal stability of Al-Fe epidote as a function of f_{O2} and Fe content", Contributions to Mineralogy and Petrology, 37 (1972) 307-340.
- [7] Jenkins D. M., Newton R. C., Goldsmith J.R., "Relative Stability of Fe-Free Zoisite and Clinozoisite", Journal of Geology, 93 (1985) 663-672.

- Austria) as evidence for high-pressure fluid-rock interaction*", Journal of metamorphic Geology, 18 (2000) 1-21.
- [28] Ackermann D., Raase P., "Coexisting zoisite and clinozoisite in biotite schists from the Hohe Tauern, Austria", Contributions to Mineralogy and Petrology, 42 (1973) 333-341.
- [29] Enami M., Banno S., "Zoisite-clinozoisite relations in low- to medium-grade high-pressure metamorphic rocks and their implications", Mineralogical Magazine, 43 (1980) 1005-1013.
- [30] Prunier A.R., Hewitt D.A., "Experimental observations on coexisting zoisite-clinozoisite". American Mineralogist, 70 (1985) 375-378.
- [31] Dollase W.A., "Refinement of the crystal structures of epidote, allanite and hancockite", American Mineralogist, 56 (1971) 447-464.
- [32] Berman R.G., Brown T.H., "Heat capacity of minerals in the system $\text{Na}_2\text{O}-\text{K}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{MgO}-\text{FeO}-\text{Fe}_2\text{O}_3-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{TiO}_2-\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$: representation, estimation, and high temperature extrapolation", Contribution to Mineralogy and Petrology, 89 (1985) 168-183.
- [33] Hemingway B.S., Haas J.L., Robinson G.R., "Thermodynamical properties of selected minerals in the system $\text{Al}_2\text{O}_3-\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$ at 298.15 K and 1 bar (105 Pascal) pressure and at higher temperatures", Geol Surv Bull 1544 (1982) 1-70.
- [34] Spear F. S., "NaSi = CaAl exchange equilibrium between plagioclase and amphibole: An empirical model", Contrib. Mineral. Petrol., 72 (1980), 33-41.
- Journal of metamorphic Geology, 27 (2009) 509-521.
- [20] El-Shazley A.K., Worthing M.A., and Liou J.G., "Interlayered Eclogites, Blueschists and Epidote Amphibolites from NE Oman: a Record of Protolith Compositional Control and Limited Fluid Infiltration", Journal of Petrology, 38 (1997) 1461-1487.
- [21] Tsujimori T., Liou J.G., Ernst W.G., Itaya T., "Triassic paragonite- and garnet-bearing epidote-amphibolite from the Hida Mountains, Japan", Gondwana Research, 9 (2006) 167-175.
- [22] Castelli D., Rolfo F., Compagnoni R. and Xu S., "Metamorphic veins with kyanite, zoisite and quartz in the Zhu-Jia-Chong eclogite, Dabie Shan, China", The Island Arc, 7 (1998) 159-173.
- [23] Zack T., Foley S.F., Rivers T., "Equilibrium and disequilibrium trace element partitioning in hydrous eclogites (Trescolen, Central Alps)", Journal of Petrology, 43 (2002) 1947-1974.
- [24] Hacker B.R., A. G.A., Peacock S.M., "Subduction factory 1. Theoretical mineralogy, densities, seismic wave speeds, and H_2O contents", Journal of Geophysical Research, 108 (2003) 1-26.
- [25] Davis P.B., Whitney D.L., "Petrogenesis of lawsonite and epidote eclogite and blueschist, Sivrihisar Massif, Turkey", Journal of metamorphic Geology, 24 (2006) 823-849.
- [26] Rodgers A. F., "Clinozoisite from Lower California", American Mineralogist, 9 (1924) 221-224.
- [27] Brunsmann A., Franz G., Erzinger J. and Landwehr D., "Zoisite- and clinozoisite-segregations in metabasites (Tauern Window,