

ترموبارومتري سنگ های دگرگونی با کاربرد کانی شاخص استرولیت

محبوبه جمشیدی بدر*

* گروه زمین شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

m_jamshidi@pnu.ac.ir

چکیده

مجموعه دگرگونی سورسات در شمال غرب زون سنندج-سیرجان واقع شده و حاوی سنگ‌های پلیتی با کانی‌های شاخص دگرگونی از جمله استرولیت است. این مطالعه با هدف تعیین شرایط فشار-دمایی (P-T) تشکیل کانی استرولیت و تعیین تاریخچه دگرگونی ناحیه‌ای انجام شده است. پتروگرافی و آنالیز میکروپروب الکترونی بر روی نمونه‌های شاخصی از متاپلیت‌ها که پاراژنز کیانیت-گارت-استارولیت است، انجام گرفته است. ترمومتري مبتنی بر تعادل توزیع Fe-Mg بین جفت کانی گارت-بیوتیت با استفاده از سه کالیبراسیون مختلف، دمای اوج دگرگونی را بین ۶۷۰ تا ۶۷۳ درجه سانتی‌گراد نشان داد. بارومتري غیروابسته به سیال با روش Grt-Ms-Als-Qtz و همچنین مدلسازی ترمودینامیکی پیشرفته با نرم‌افزار THERMOCALC، فشار اوج را در محدوده ۶/۳ تا ۶/۴ کیلو بار تعیین نمود. ترکیب شیمیایی استرولیت‌ها مقدار (X_{Fe}) نیز تغییراتی منطبق با شرایط فیزیکوشیمیایی محیط تشکیل را نشان می‌دهد. نتایج همگرا حاکی از وقوع یک رویداد دگرگونی ناحیه‌ای فشار-بالا و دمای-بالا (رخساره آمفیبولیت بالا) در عمق حدود ۲۳ کیلومتري است. حضور همزمان کیانیت و استرولیت و عدم حضور کوردیریت در این پاراژنز اولیه (M1)، مؤید شرایط فشار بالا می‌باشد. این داده‌ها یک مسیر تکتونوترمال ساعت‌گرد را برای این بخش از زون سنندج-سیرجان پیشنهاد می‌کنند که با مدل فروانش و برخورد قاره‌ای سازگار است.

کلیدواژه‌ها: استرولیت، ترموبارومتري، رخساره آمفیبولیت بالا، سنندج-سیرجان.

Thermo-barometry of Metamorphic Rocks Using Staurolite as an Index Mineral

Mahboobeh Jamshidibadr*

* Department of Geology, Payame Noor University, Tehran, Iran

Abstract

The Soursat metamorphic complex, situated in the northwestern part of the Sanandaj-Sirjan Zone, contains pelitic rocks bearing key index metamorphic minerals such as staurolite. This study aims to determine the pressure-temperature (P-T) conditions of staurolite formation and to reconstruct the regional metamorphic history. Petrographic and electron microprobe analyses were conducted on characteristic metapelite samples exhibiting a kyanite-garnet-staurolite paragenesis. Thermometry based on Fe-Mg exchange equilibrium between garnet-biotite mineral pairs, using three independent calibrations, yielded peak metamorphic temperatures between 670 and 673 °C. Fluid-independent barometry (Grt-Ms-Als-Qtz method), coupled with advanced thermodynamic modeling using THERMOCALC software, constrained the peak pressure to 6.3–6.4 kbar. The chemical composition of staurolites, particularly their X_{Fe} values, also shows systematic variations consistent with the physicochemical conditions of formation. The convergent results indicate the occurrence of a regional high-pressure, high-temperature metamorphic event (upper amphibolite facies) at depths of approximately 23 km. The coexistence of kyanite and staurolite, and the absence of cordierite in this primary paragenesis (M1), corroborate high-pressure conditions. These data collectively suggest a clockwise P-T path for this segment of the Sanandaj-Sirjan Zone, which is compatible with a tectonic model involving subduction and continental collision.

Keywords: Staurolite, Thermobarometry, Amphibolite Facies, Sanandaj-Sirjan Zone.

۱- مقدمه

کمپلکس سورات در شمال غرب ایران واقع شده و از نظر ساختاری در بخش شمال غربی زون ساختاری-رسوبی سنجند-سیرجان قرار می‌گیرد. موقعیت دقیق این مجموعه در نقشه زمین‌شناسی ۱/۱۰۰۰ شاهین‌دژ (مربوط به سال ۱۳۷۳ و توسط خلقی خسروی و علوی نائینی) ترسیم و معرفی شده است.

این کمپلکس از طیف گسترده‌ای از سنگ‌های آذرین و دگرگونی تشکیل شده است. واحدهای آذرین در بخش‌های شمالی، جنوبی، شمال شرقی و مرکزی مجموعه رخمون دارند که از نظر کانی‌شناسی و ویژگی‌های بافتی تفاوت‌های قابل ملاحظه‌ای را نشان می‌دهند (Jamshidibadr et al., 2012) و واحدهای دگرگونی عمدتاً در مرکز این کمپلکس و در میان توده‌های آذرین برونزد یافته‌اند.

بر پایه مطالعات کانی‌شناختی، ژئوشیمیایی و تعیین سن مطلق، سنگ‌های آذرین این مجموعه توسط جمشیدی‌بدر و همکاران (۲۰۱۳) در سه گروه اصلی دسته‌بندی شده‌اند:

-گرانیتوئیدهای گروه I: این سنگ‌ها در شمال شرق کمپلکس رخمون دارند و از نظر بافت به دو گونه دیده می‌شوند: گونه‌ای با ساختار دگرشکل یافته (به صورت گنیس چشمی) و گونه‌ای بدون نشانه‌های تغییرشکل آشکار. بر اساس تاریخ‌گذاری انجام‌شده بر کانی زیرکُن به روش اورانیوم-سرب، سن این گروه حدود ۴۵۰ میلیون سال تعیین شده است.

-گرانیتوئیدهای گروه II: این گروه شامل دو توده نفوذی مجزا است: توده ترکه‌دره در جنوب و توده پیچ‌آچی در شمال مجموعه سورات. سن این گرانیتوئیدها نیز با روش اورانیوم-سرب بر روی زیرکُن حدود ۶۰ میلیون سال برآورد شده است.

-گرانیتوئیدهای گروه III: این گروه شامل گرانیت‌های کوارتزپورفیری است که تنها در بخش مرکزی کمپلکس مشاهده می‌شوند و از نظر زمان تشکیل، جوان‌ترین فاز گرانیتی مجموعه را تشکیل می‌دهند.

سنگ‌های دگرگونی این مجموعه دارای پروتولیت‌های متنوعی هستند. در میان آن‌ها، شیبست‌های حاصل از دگرگونی سنگ‌های پلیتی، شاهد شکل‌گیری کانی‌های شاخص دگرگونی مانند گارنت، استرولیت، کیانیت، کوردیریت و آندالوزیت می‌باشند. بخش‌های مرکزی و شمال غربی کمپلکس سورات، محل اصلی رخمون این استرولیت‌شیست‌ها هستند. تمرکز اصلی این تحقیق، بررسی و تحلیل شرایط تشکیل و محدوده پایداری کانی استرولیت در شیبست‌های مجموعه است.

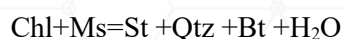
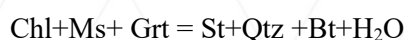
مواد و روش‌ها

آنالیز میکروپروب برای تعیین شیمی کانی‌های دگرگونی با کاربرد دستگاه میکروپروب Cameca SX 51 Electron Microprobe در آزمایشگاه میکروسکوپ آدلاید در دانشگاه آدلاید استرالیا با ولتاژ ۱۵ keV و جریان اشعه الکترونی با اندازه ۱۰ nA انجام شده است که استانداردهای طبیعی و مصنوعی برای مقایسه استفاده شده و اصلاح RAF بکار رفته است.

۲- بحث

۲-۱- پتروگرافی استرولیت شیبست‌ها

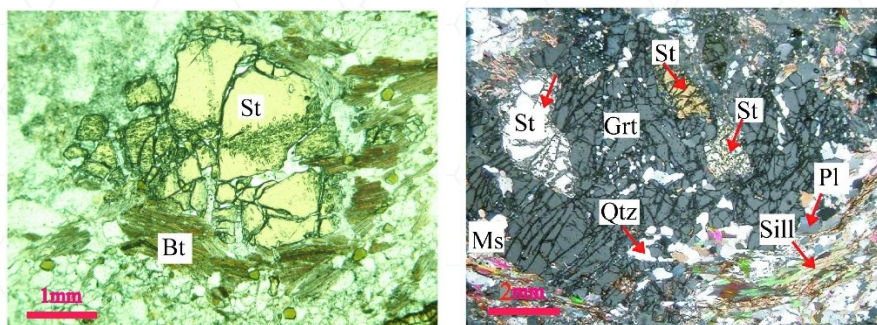
کانی استرولیت گسترش زیادی در مجموعه دگرگونی سورات دارد و همراه زون گارنت از شمال غرب منطقه شروع می‌شود و تا مرکز و جنوب منطقه توسعه دارد. واکنش تشکیل استرولیت با توجه به همراه بودن آن با گارنت در شمال غرب منطقه از طریق واکنش زیر تولید شده است:



در جنوب و مرکز منطقه استرولیت بدون حضور گارنت و همراه با آلومینوسیلیکات‌ها حضور دارد که بدلیل عدم ظهور گارنت به نظر می‌رسد با مصرف کامل گارنت و بدلیل حضور آلومینوسیلیکات‌ها از طریق واکنش زیر استرولیت تشکیل شده است (شکل ۱).



برونزد استارولیت شپیست‌ها در اکثر نقاط مجموعه دگرگونی سورات بوده و دارای رنگ خاکستری و با جلای واضح شپیستی می‌باشند. کانی استارولیت به صورت نیمه شکل دار تا بی شکل و با بافت پورفایروبلاستیک و اسکلتی بوده و بیوتیت دارای بافت لپیدوبلاستیک و به صورت شکل دار مشخص می‌شود (شکل ۱).



شکل ۱. الف) گارنت- استرولیت شپیست که در این تصویر گارنت دارای اذخال‌های از استرولیت است. کانی‌های کوارتز، بیوتیت، مسکویت و فیبرولیت نیز در این سنگ حضور دارند (نور XPI). ب) استرولیت شپیست که کانی‌های کوارتز، بیوتیت، مسکویت، فیبرولیت و تورمالین نیز در سنگ حضور دارند (نور XPI).

۲-۲- شیمی کانی استرولیت و ترموبارومتري استرولیت شپیست‌ها

استرولیت در سه نمونه آنالیز شده است.

۱) استرولیت‌های که کاملاً شکل دار هستند.

۲) استرولیت‌هایی که به صورت اذخال داخل گارنت تشکیل شده‌اند.

۳) استرولیت‌هایی که همراه کوردیریت یا به صورت اذخال داخل کوردیریت هستند.

تغییرات ترکیب شیمیایی استرولیت‌ها به صورت بلور منفرد (نمونه Sh-123) و یا به صورت اذخال داخل گارنت (نمونه Sh-123) محسوس نمی‌باشد $(X_{Fe} = Fe/(Fe+Mg+Mn+Zn)) = 0.79-0.84$ ولی استرولیت‌هایی که همراه با کوردیریت (نمونه Sh-161) هستند دارای کسر مولی آهن کمتری می‌باشد. $X_{Fe} = 0.76$ و نسبت عناصر روی، منگنز و تا حدودی منیزیم افزایش یافته است، تهی شدگی آهن در این استرولیت‌ها می‌تواند مربوط به کاهش فشار باشد (وی، ۲۰۰۷). مقدار اکسید روی در استرولیت‌های منطقه کم می‌باشد $(ZnO = 0.03-0.24)$.

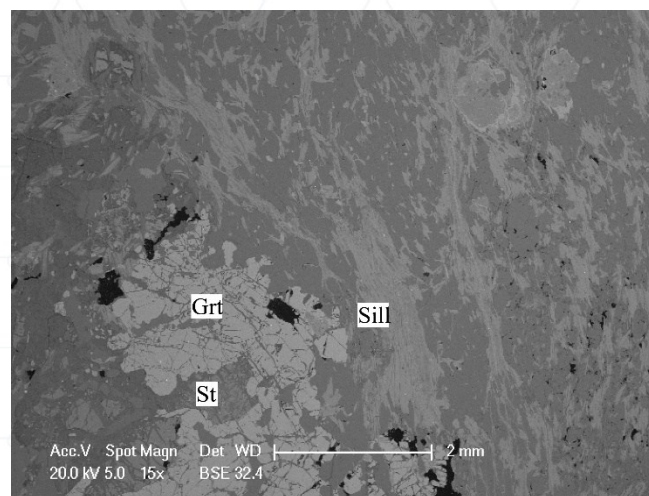
نمونه Sh-123 یک متاپلیت کیانیت-گارنت-استارولیت است که به‌عنوان شاهدهی کلیدی برای بازسازی شرایط اوج دگرگونی ناحیه‌ای (فاز M1) در مجموعه دگرگونی سورات است (جمشیدی بدر و همکاران، ۲۰۱۲). وجود این پارائنز خاص، محدوده بسیار دقیقی از دما و فشار را تعریف می‌کند (شکل ۲).

مجموعه کانی‌ای $Grt + St + Ky + Bt + Ms + Pl + Qtz \pm Fib$ (گارنت + استارولیت + کیانیت + بیوتیت + مسکویت + پلاژیوکلاز + کوارتز \pm فیبرولیت) یک پارائنز تشخیصی رخساره‌ای است:

حضور همزمان کیانیت (Ky) و استارولیت (St) در کنار گارنت (Grt) و مسکویت (Ms)، این سنگ را در محدوده رخساره آمفیبولیت بالا (High-Pressure Amphibolite Facies) و در شرایط فشار نسبتاً بالا قرار می‌دهد.

عدم حضور کوردیریت (Crd) یا آندالوزیت (And) در این نمونه، نشان‌دهنده آن است که فشار به اندازه‌ای بالا بوده که کیانیت، فاز آلومینوسیلیکات پایدار است.

وجود مسکویت (و نه فلدسپات پتاسیم) به همراه کیانیت و کوارتز، نشان می‌دهد که سنگ هنوز به شرایط ذوب بخشی نرسیده یا در آستانه آن قرار داشته است، زیرا واکنش مسکویت + کیانیت + کوارتز = فلدسپات پتاسیم + سیال + گرانیت یک واکنش درجه‌اول و مهم در شروع ذوب است.



شکل ۲. تصویر BSC استرولیت به صورت ادخال داخل بلور گارنت (نمونه Sh-123).

ترمومتری گارنت-بیوتیت (Fe-Mg Exchange Thermometry):

انتخاب کالبراسیون‌های گانگولی و ساکسنا (۱۹۸۴)، پرچوک و لاورنتورا (۱۹۸۳) و باتاچاریا و همکاران (۱۹۹۲) بر اساس سازگاری ترکیب شیمیایی کانی‌های نمونه با پیش‌فرض‌های هر مدل بود. این مدل‌ها برای گارنت‌های غنی از آلماندین-پیروپ (با Fe/Mg بالا و کلسیم کم) مناسب‌تر هستند.

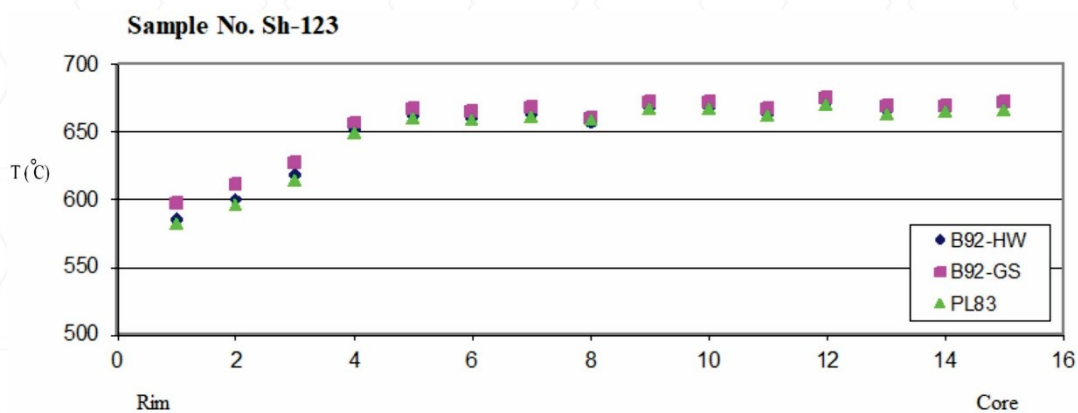
گارنت: انتخاب نقطه با بیشترین XMg (مقدار $Mg/(Mg+Fe)$) برای ترمومتری، یک رویکرد استاندارد است. زیرا هسته گارنت‌های دگرگونی معمولاً در دمای بالاتر و فشار بیشتری متبلور شده و با افزایش دما، مقدار Mg در گارنت افزایش می‌یابد. بنابراین، هسته‌های غنی از Mg، دمای اوج دگرگونی را بهتر ثبت می‌کنند.

بیوتیت: استفاده از بیوتیت‌های مجاور گارنت (در تماس) به شرطی که واکنش‌های برگشتی رخ نداده باشد، ایده‌آل است. گزارش اشاره می‌کند از بیوتیت‌های نزدیک (ولی نه در تماس مستقیم) استفاده شده که ممکن است برای جلوگیری از اثرات واکنش‌های رترگرا باشد، اما این خود می‌تواند منبع خطای جزئی باشد.

نتایج و تفسیر: دمای ۶۷۳-۶۷۰ درجه سانتی‌گراد حاصل از این روش، دمای اوج را نشان می‌دهد. تطابق خوب نتایج سه کالبراسیون مختلف، قابلیت اطمینان این برآورد را افزایش می‌دهد (جدول ۱) و (شکل ۳).

جدول ۱. نتایج ترمومتری نقاط بیوتیت آنالیز شده در نمونه Sh-123 از گارنت- استرولیت شلیست های مجموعه سورات. علائم استفاده شده در جدول شامل: **PL83** کالیراسیون پرچوک و لاورنتورا (۱۹۸۳)؛ **B92-HW** کالیراسیون باتاچاریا و همکاران (۱۹۹۲)، **B92-GS** کالیراسیون باتاچاریا و همکاران (۱۹۹۲).

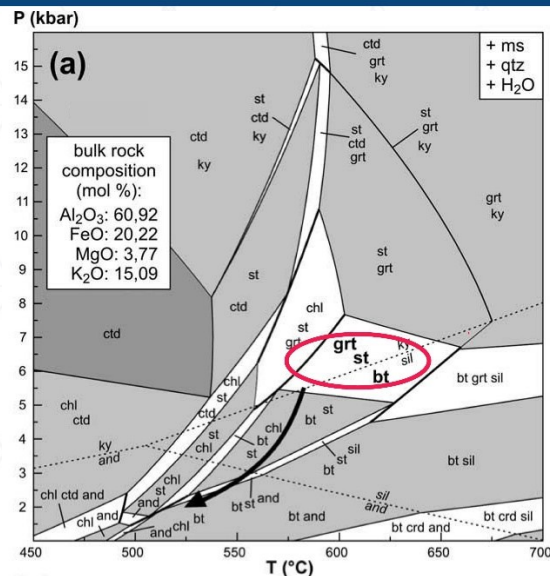
Sample No.	Sh-123														
Spot Gr	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
B92-HW	585	600	618	652	663	661	664	657	668	668	664	672	666	666	666
B92-GS	597	611	627	657	667	665	668	661	672	672	667	675	669	669	669
PL83	582	596	614	649	661	659	662	659	667	667	663	670	664	664	664



شکل ۳. الف) تغییرات حرارت در نقاط مختلف آنالیز شده از گارنت نمونه Sh-68، ب) تغییرات حرارت در نقاط مختلف آنالیز شده از گارنت نمونه Sh-123. علائم استفاده شده در شکل شامل: **PL83** کالیراسیون پرچوک و لاورنتورا (۱۹۸۳)؛ **B92-HW** کالیراسیون باتاچاریا و همکاران (۱۹۹۲)، **B92-GS** کالیراسیون باتاچاریا و همکاران (۱۹۹۲).

ترموبارومتری THERMOCALC

این روش به جای یک واکنش، همزمان چندین واکنش تعادلی بین تمام فازهای موجود (گارنت، استارولیت، کیانیت، بیوتیت، مسکویت، پلاژیوکلاز، کوارتز، سیال) را در نظر می‌گیرد. بنابراین، نتایج آن نسبت به خطاهای آنالیز نقطه‌ای یا اثرات محلی مقاوم‌تر است (شکل ۴).
دمای متوسط: 665 ± 42 درجه سانتی‌گراد
فشار متوسط: 6.4 ± 1.2 کیلوبار
محدوده خطای گزارش شده (مثلاً ± 42 درجه برای دما) عمدتاً ناشی از عدم قطعیت ذاتی در داده‌های ترمودینامیکی مدل‌های محلول جامد کانی‌ها و نیز خطای آنالیز میکروپروب است. با این حال، مقدار متوسط به دست آمده به طور قابل توجهی با نتایج روش ترمومتری گارنت-بیوتیت همپوشانی دارد.



شکل ۴. پسودوسکشن مربوط به دگرگونی استرولیت شیت ها در مجموعه دگرگونی سورسات (اقتباس از مزکر و همکاران، ۲۰۰۴). نتایج حاصل از ترموبارومتري ترموکالک (THERMOCALC 3.26) هولند و پاول (۱۹۹۸) بر روی نمودار پایداری آلومینوسیلیکات ها از هولداوی (۱۹۹۳) برای استرولیت شیت های نشان داده شده است.

۳- نتیجه‌گیری

ترموبارومتري سنگ‌های استرولیت‌دار مجموعه دگرگونی سورسات منجر به بازسازی دقیق شرایط فیزیکی‌شیمیایی حاکم بر دگرگونی ناحیه‌ای در این بخش از زون سنندج-سیرجان گردید. آنالیزهای پتروگرافی و شیمی کانی‌ها نشان می‌دهد که کانی استرولیت در این مجموعه هم در پاراژنز فشار-بالای فاز اصلی (M1) و هم در ارتباط با کانی‌های فشار-پایین در فاز متأخر (M2) حضور دارد. ترکیب شیمیایی استرولیت‌ها شاخص (X_{Fe}) به خوبی انعکاس‌دهنده تغییرات فشار است، به طوری که استرولیت‌های همراه با کوردیریت دارای مقادیر کمتری از آهن می‌باشند.

تعیین شرایط اوج دگرگونی با استفاده از روش‌های مکمل ترمومتري گارنت-بیوتیت و مدلسازی ترمودینامیکی تعادل چندگانه، هم‌خوانی بسیار خوبی را نشان می‌دهد. بر این اساس، شرایط تشکیل پاراژنز شاخص کانییت-گارنت-استرولیت در محدوده دمایی ۶۶۵ تا ۶۷۵ درجه سانتی‌گراد و فشاری بین ۶/۳ تا ۶/۵ کیلوپار تعیین شد. این شرایط منطبق بر رخساره آمفیبولیت بالا است.

مجموعه داده‌های به‌دست‌آمده، گواه یک رویداد دگرگونی ناحیه‌ای همراه با دفن عمیق و گرمایش قابل توجه پوسته است. تطابق این شرایط با یک مسیر فشار-دمای ساعت‌گرد، مؤید یک تاریخچه تکتونیکی فعال مرتبط با فرآیندهای برخوردی در کمربند سنندج-سیرجان می‌باشد. بالا آمدن سریع تکتونیکی پس از اوج دگرگونی، منجر به کاهش فشار و ایجاد پاراژن‌های ثانویه فشار-پایین (شامل کوردیریت) گردیده است. بنابراین، کانی استرولیت در این مجموعه نه تنها به عنوان یک بارومتر دقیق فشار و دما عمل کرده، بلکه به عنوان یک شاخص کلیدی در بازشناسی توالی رویدادهای دگرگونی و استنباط مسیر تکتونوترمال منطقه محسوب می‌شود.

۴- تقدیر و تشکر

از پشتیبانی‌های ارزشمند معاونت پژوهشی دانشگاه پیام نور که انجام این پژوهش را میسر ساخت، قدردانی می‌نمایم. همچنین، از پرفسور Alan Collins به دلیل مساعدت و همراهی ایشان در انجام آنالیزهای EPMA در دانشگاه آدلاید استرالیا قدردانی ویژه‌ای دارم. افزون بر این، قدردانی صمیمانه خود را از برگزارکنندگان محترم همایش بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران اعلام می‌دارم که فرصت ارائه‌ی دستاوردهای این تحقیق را فراهم آوردند.

۵- مراجع

خلقی خسرقی، م.ج.، علوی نائینی، م.، ۱۳۷۳. نقشه زمین‌شناسی شاهین‌دژ با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.

Bhattacharya, A., Mohanty, L., Maji, A., Sen, S.K., Raith, M., 1992. Non-ideal mixing in the phlogopite-annite binary: constraints from experimental data on Mg-Fe partitioning and a reformulation of the biotite-garnet geothermometer. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 111, 87–93.

Ganguly, J., Saxena, S.K., 1984. Mixing properties of aluminosilicate garnets: constraints from natural and experimental data, and applications to geothermobarometry. *American Mineralogist* 69, 88–97.

Hodges, K.V., Spear, F.S., 1982. Geothermometry, geobarometry and the Al_2SiO_5 triple point at Mt. Moosilauke, New Hampshire. *American Mineralogist* 67, 1118–1134.

Holdaway, M.J., 1993. The Al-silicate phase diagram is that of Holdaway and Mukhopadhyay. *American Mineralogist* 78, 298–315.

Holdaway, M.J., 2001. Recalibration of the GASP geobarometer in light of recent garnet and plagioclase activity models and versions of the garnet-biotite geothermometer. *American Mineralogist* 86, 1117–1129.

Holland, T.J.B., Powell, R., 1998. An internally consistent thermodynamic dataset for phases of petrological interest. *Journal of Metamorphic Geology* 16, 309–343.

Jamshidi Badr, M., Collins, A.S., Masoudi, F., Cox, G., Mohajjel, M., 2013. The U-Pb Age, Geochemistry and Tectonic Significance of Granitoids In The Soursat Complex, Northwest Iran. *Turkish Journal of Earth Sciences* 22, 1-31.

Jamshidi Badr, M., Masoudi, F., Collins, A.S., Sorbi, A., 2012. Mineralogical Evidence for Regional Metamorphism Overprinted by Contact Metamorphism. *Acta Geologica Sinica (English Edition)* 86(1), 48–64.

Mezger, M., Passchier, C.W., Régnier, J.L., 2004. Metastable staurolite-cordierite assemblage of the Bossost dome: Late Variscan decompression and polyphase metamorphism in the Axial Zone of the central Pyrenees. *Comptes Rendus Geoscience* 336, 827–837.

Perchuk, L.L., Lavrent'eva, I.V., 1983. Experimental Investigation of Exchange Equilibria in the System Cordierite-Garnet-Biotite. In: Saxena, S.K. (Ed.), *Kinetics and Equilibrium in Mineral Reactions*, Springer-Verlag, Berlin, pp. 199–239.

Powell, R., Holland, T., Worley, B., 1998. Calculating phase diagrams involving solid solutions via non-linear equations, with examples using THERMOCALC. *Journal of Metamorphic Geology* 16, 577–588.

Spear, F.S., 1982. Phase equilibria of amphibolites from the Post Pond volcanics, Mt. Cube quadrangle, Vermont. *Journal of Petrology* 23, 383–426.

Wei, C.J., Clarke, G., Tian, W., Qiu, L., 2007. Transition of metamorphic series from the Kyanite- to andalusite-types in the Altai orogen, Xinjiang, China: Evidence from petrography and calculated KMnFMASH and KFMASH phase relations. *Lithos* 96, 353–374.