

شرایط تشکیل و پایداری کانی کیانیت در سنگ های دگرگونی

محبوبه جمشیدی بدر*

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

m_jamshidi@pnu.ac.ir

چکیده

کیانیت (دستین) به عنوان یک کانی شاخص فشار بالا در مطالعات دگرگونی شناخته می شود. با این حال، پتانسیل این کانی به عنوان یک ترموبارومتر مستقل و کمی، به ویژه با اندازه گیری ترکیب دقیق شیمیایی آن، کمتر مورد توجه قرار گرفته است. این پژوهش با هدف بررسی قابلیت های ترموبارومتری ترکیب کانی کیانیت، بر روی نمونه های مجموعه دگرگونی سورات در شمال غرب ایران متمرکز شده است. با استفاده از داده های حاصل از آنالیز میکروپروب الکترونی (EPMA)، تغییرات جزئی در محتوای عناصر فرعی مانند Fe در بلورهای کیانیت اندازه گیری شد. ترکیب هسته بلورهای پورفایروبلستی کیانیت که با گارنت، استارولیت، مسکویت و کوارتز هم زیست هستند، برای محاسبه شرایط فشار-دما مورد استفاده قرار گرفت. نتایج حاصل از مدل سازی ترمودینامیکی بر پایه سامانه Fe-Al بین کیانیت و گارنت، فشار اوج دگرگونی را در محدوده ۶ کیلو بار در حدود دمای ۶۳۰ درجه سانتی گراد نشان می دهد. همچنین، پروفایل گذاری از مرکز به حاشیه بلورهای کیانیت، کاهش سیستماتیک در نسبت Fe/(Fe+Al) را آشکار می سازد که این الگو، نه تنها بر وجود یک زونینگ شیمیایی، بلکه بر ثبت یک مسیر دگرگونی پس رونده با کاهش فشار غالب در حین صعود تکتونیکی سنگ دلالت دارد. این مطالعه نشان می دهد که تحلیل کمی ترکیب کیانیت می تواند به عنوان روشی مستقیم در تعیین تاریخچه فشار-دمای سنگ های دگرگونی کاربرد داشته باشد.

کلیدواژه ها: کیانیت، شیمی کانی، آنالیز میکروپروب الکترونی

Formation and Stability Conditions of Kyanite in Metamorphic Rocks

Mahboobeh Jamshidibadr*

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

Abstract

Kyanite (Destine) is recognized as a key high-pressure index mineral in metamorphic studies. However, its potential as an independent and quantitative thermobarometer, particularly through the precise measurement of its chemical composition, has received less attention. This research focuses on investigating the thermobarometric capabilities of Kyanite composition using samples from the Soursat metamorphic complex in northwestern Iran. Based on data obtained from Electron Probe Micro-Analysis (EPMA), minor variations in the content of minor elements such as Fe within Kyanite crystals were measured. The composition of the cores of porphyroblastic Kyanite crystals, coexisting with garnet, staurolite, muscovite, and quartz, was used to calculate pressure-temperature (P-T) conditions. The results of thermodynamic modeling based on the Fe-Al exchange between Kyanite and garnet indicate peak metamorphic pressures around 6 kbar at temperatures of approximately 630 °C. Furthermore, profiling from the core to the rim of the Kyanite crystals reveals a systematic decrease in the Fe/(Fe+Al) ratio. This pattern not only confirms the existence of chemical zoning but also suggests the recording of a retrograde metamorphic path dominated by decreasing pressure during the tectonic uplift of the rock. This study demonstrates that quantitative analysis of Kyanite composition can serve as a direct method for determining the pressure-temperature history of metamorphic rocks.

Keywords: Kyanite, Mineral chemistry, EPMA analyses.

۱- مقدمه

کانی کیانیت (Al_2SiO_5) به دلیل محدوده پایداری مشخص در شرایط فشار متوسط تا بالا، همواره به عنوان یک کانی راهنمای کلیدی در پترولوژی دگرگونی مورد استفاده قرار گرفته است. حضور این کانی در سنگ‌های متاپلیتی، به همراه پاراژنهای مشخصی مانند گارنت و استارولیت، نشانگر رخساره‌های شیبست آبی و آمفیبولیت است. با این حال، نقش کیانیت فراتر از یک شاخص کیفی است. ترکیب شیمیایی این کانی، به ویژه میزان جانشینی ایزومورفیک Al^{3+} توسط کاتیون‌هایی مانند Fe^{3+} ، تابعی حساس از شرایط فشار، دما و ترکیب کلی پاراژنز میزبان است (Miyemeck et al., 2025; Yoneguchi et al., 2021). در مجموعه دگرگونی سورسات در شمال غرب ایران، با دارا بودن کیانیت‌های پورفیروبلاستی درشت‌بلور در یک بافت دگرگونی ناحیه‌ای پیچیده، بستری ایده‌آل برای آزمودن و به‌کارگیری این روش‌های نوین فراهم می‌آورد. در شکل ۱ نقشه زمین‌شناسی منطقه سورسات و برونزد انواع کانی‌های دگرگونی در متاشیست‌های منطقه نمایش داده شده است (جمشیدی بدر و همکاران، ۲۰۱۲). منطقه سورسات در شمال غرب ایران بین شهرهای تکاب و شاهین دژ برونزد دارد و در زون ساختاری سنجند - سیرجان قرار گرفته است. هدف از این مطالعه، ارائه یک تحلیل کمی و دقیق بر پایه داده‌های آنالیز میکروپروب الکترونی (EPMA) است تا نشان دهد چگونه ترکیب شیمیایی کیانیت می‌تواند به‌عنوان یک ترموبارومتر مستقل، برای تعیین تاریخچه فشار-دمای سنگ‌های دگرگونی کاربرد داشته باشد.

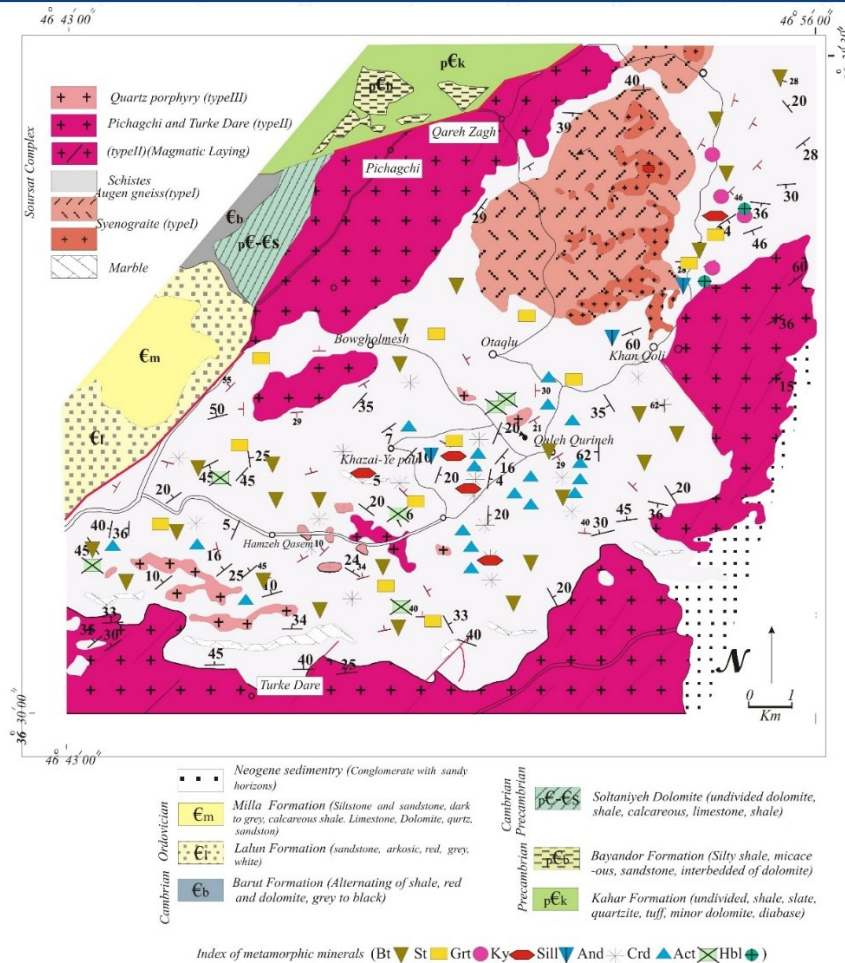
مواد و روش‌ها

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.

۱- بحث

۱-۲- پتروگرافی کیانیت شیبست‌ها

در شمال شرق مجموعه دگرگونی سورسات، کیانیت در سنگ‌های شیبست به دو صورت پایدار و ناپایدار مشاهده می‌شود (شکل ۱). در حاشیه شمال شرقی مجموعه، کیانیت به‌صورت پایدار و هم‌راستا با پاراژنهای متعادل نظیر استارولیت و گارنت مشاهده می‌شود. در بخش‌های مرکزی این مجموعه، کیانیت حالتی ناپایدار و در حال دگرگونی پسرونده نشان می‌دهد (شکل ۱). کیانیت‌شیست‌های موجود در حاشیه مجموعه عموماً همراه با دیگر آلومینوسیلیکات‌ها، به ویژه آندالوزیت، برونزد دارند. در صحرا، بلورهای کیانیت با رنگ آبی مشخص و اندازه‌ای معمولاً بیش از ۲ میلی‌متر قابل شناسایی هستند. این بلورها از رخ دو جهته واضح و خاصیت خاموشی مایل در نور پلاریزه قابل شناسایی می‌باشند.

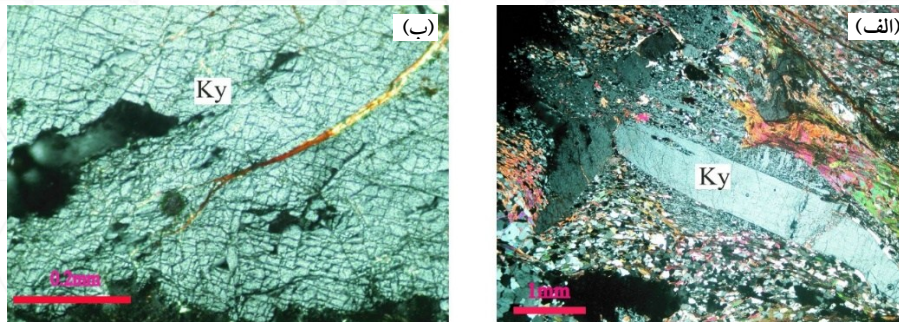


شکل ۱. نقشه توزیع کانی های دگرگونی در مجموعه دگرگونی سورسات (اقتباس از نقشه ۱/۱۰۰۰۰۰ شاهین دژ).

شواهد میکروسکوپی و ماکروسکوپی هر دو گویای ناپایداری کیانیت در شرایط ترمودینامیکی جدید هستند. نمونه‌های جدا شده بلورهای کیانیت در زیر میکروسکوپ بیناکولار، اغلب دارای مرکزی به رنگ آبی (باقی‌مانده کیانیت اولیه) و حاشیه‌ای صورتی‌رنگ (ناشی از تبدیل به آندالوزیت) هستند. این کرونا (هاله واکنشی) نشان‌دهنده واکنش تدریجی کیانیت و تبدیل آن به آندالوزیت در طی فرآیندهای دگرگونی ثانویه است. با توجه به اندازه درشت (ماکروسکوپی) کیانیت‌ها، این پدیده تبدیلی حتی در مقیاس صحرایی نیز قابل مشاهده است.

ناپایداری و تبدیل تدریجی بین فازهای آلومینوسیلیکاتی (کیانیت، آندالوزیت) در مقیاس میکروسکوپی نیز با استفاده از شواهد نوری (نظیر وجود بافت‌های کرونا، رخ‌های واکنشی و تغییرات در خواص نوری) به‌خوبی قابل تشخیص و مطالعه است (شکل ۲). این تغییرات بازتاب‌کننده تغییر در شرایط فشار و دمای محیط دگرگونی، به ویژه کاهش فشار در طی فرآیند بالآمدگی و فرسایش مجموعه سنگی است.

سه کانی کیانیت، آندالوزیت و سیلیمانیت، پلی مورف های آلومینوسیلیکات ها هستند و ترکیب شیمیایی یکسانی (Al_2SiO_5) دارند، ولی ساختار بلوری و شرایط پایدارسازی فشار-دمایی متفاوتی دارند (Holdaway, 1993; Wei et al., 2007). کیانیت در شرایط فشار نسبتاً بالا پایدار است. مشاهده کیانیت در حال تبدیل به آندالوزیت نشان‌دهنده تغییر در شرایط ترمودینامیکی سنگ، عموماً به سمت کاهش فشار و/یا تغییر در ترکیب سیال دگرگونی است.



شکل ۲. الف) کیانیت شیبست با پورفیروبلست کیانیت که به صورت ناپایدار بوده و از حاشیه در حال تبدیل شدن به آندالوزیت است، کیانیت خاموشی مایل نشان می دهد. ب) رخ دو جهته پورفیروبلست کیانیت در این تصویر نشان داده شده است.

بررسی این گونه تبدیل‌های کانی‌ایی (بافت‌های واکنشی) کلید مهمی برای بازسازی تاریخچه فشار-دمایی (P-T Path) و تعیین سیر تکاملی مجموعه‌های دگرگونی است. نشان می‌دهد این مجموعه پس از اوج دگرگونی (که احتمالاً در شرایط فشار بالاتر و تشکیل کیانیت بوده) دستخوش فرآیندهای کاهش فشار و افزایش دما شده است.

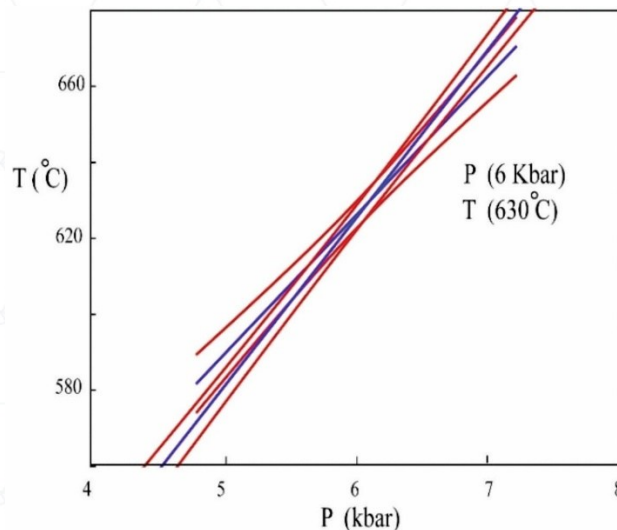
۲-۲- ترکیب شیمیایی کیانیت و شرایط اوج دگرگونی

در طی بررسی بلورهای پورفیروبلست ناپایدار کانی کیانیت مقادیر متوسط به‌دست‌آمده از آنالیز هسته کیانیت‌های پورفیروبلستی، نشان‌دهنده ترکیبی نزدیک به فرمول ایده‌آل با مقادیر جزئی Fe_2O_3 (در محدوده ۰.۷ تا ۱.۲ درصد وزنی) و Cr_2O_3 (کمتر از ۰.۱ درصد وزنی) است. محاسبه نسبت $X_{Fe} = Fe/(Fe+Al)$ در ساختار بلوری، مقداری بین ۰.۰۲۲ تا ۰.۰۲۸ را نشان می‌دهد. با وارد کردن این مقادیر همراه با ترکیب گارنت آلماندین دار هم‌زیست با $(X_{Alm} \approx ۰.۷۵)$ با روش ترمودینامیکی ترموکالک (Powell et al., 1998)، محدوده فشار-دمای شکل‌گیری این پارائنز به‌دست آمد. نتایج، شرایط اوج دگرگونی را در دمای ۶۳۰ درجه سانتی‌گراد و فشاری ۶ کیلوبار تعیین می‌کند.

جدول ۱. نتایج ترمومتری نقاط گارنت آنالیز شده در نمونه از کیانیت گارنت شیبست ها، علائم استفاده شده در جدول شامل: **PL83** کالیبراسیون پرچوک و لاورنتورا (۱۹۸۳)؛ **B92-HW** کالیبراسیون باتاچاریا و همکاران (۱۹۹۲)، **B92-GS** کالیبراسیون باتاچاریا و همکاران (۱۹۹۲).

Sample No.	Sh-68										
Spot Gr	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
B92-HW	659	660	668	665	667	659	661	656	658	668	669
B92-GS	663	665	672	669	672	663	666	662	664	673	673
PL83	651	651	658	656	654	651	653	643	648	659	658

نمودارهای تعیین حرارت و فشار گارنت کیانیت شیست‌ها با استفاده از تقاطع نمودار ترمومتر با نمودار بارومتر در شکل ۳ نمایش داده شده است. خطوط آبی میانگین ترمومتر و بارومتر محاسبه شده با نرم افزار ترموکالک می باشد و خطوط قرمز میزان انحراف معیار برای ترمومتر و بارومتر را نشان می دهد.



شکل ۳. نمودارهای تعیین حرارت و فشار سنگ های دگرگونی مجموعه سورات با استفاده از تقاطع نمودار ترمومتر با نمودار بارومتر کیانیت گارنت شیست‌ها. خطوط آبی میانگین ترمومتر و بارومتر محاسبه شده با نرم افزار ترموکالک می باشد و خطوط قرمز میزان انحراف معیار برای ترمومتر و بارومتر را نشان می دهد.

۲-۲- زونینگ ترکیبی

پروفایل‌های ترسیم‌شده از مرکز به حاشیه بلورهای کیانیت ناپایدار، یک روند کاهشی واضح و سیستماتیک در مقدار X_{Fe} را آشکار می‌سازد. به‌عنوان مثال، مقدار X_{Fe} از حدود ۰.۰۲۷ در مرکز بلور، به تدریج به حدود ۰.۰۲۰ در نزدیکی حاشیه می‌رسد. این الگوی زونینگ، شاهی بر تغییر شرایط فیزیکوشیمیایی در حین رشد بلور است. کاهش تدریجی X_{Fe} به سمت حاشیه، یک مسیر دگرگونی همراه با کاهش فشار در حین صعود تکتونیکی سنگ سازگار است. در چنین سناریویی، سنگ پس از رسیدن به حداکثر عمق (فشار اوج)، شروع به بازگشت به سمت سطح می‌کند. در حین این صعود، فشار کاهش می‌یابد و اگر دما نیز کاهش سریعی نداشته باشد (مسیر ساعت‌گرد)، ترکیب کیانیت در حال تبلور یا در حال بازتعادل، با شرایط فشار پایین‌تر تطبیق یافته و میزان کمتری از Fe^{3+} را در ساختار خود جای می‌دهد. این تفسیر، توضیح جایگزین و پویاتری برای تشکیل پاراژنهای کم‌فشار بعدی (مانند ظهور آندالوزیت در حاشیه کیانیت) ارائه می‌دهد.

این مطالعه نشان می‌دهد که ترمو بارومتری مبتنی بر ترکیب کیانیت، با مزایایی چون مستقیم بودن (تمرکز بر خود کانی شاخص)، حساسیت مناسب به تغییرات فشار و قابلیت ثبت تاریخچه درون یک بلور، می‌تواند مکمل ارزشمندی برای روش‌های مرسوم مبتنی بر جفت‌کانی‌ها باشد. با این حال، موفقیت این روش وابسته به دقت آنالیز شیمیایی، وجود تعادل موضعی بین کیانیت و فازهای هم‌زیست (به ویژه گارنت)، و انتخاب مدل ترمودینامیکی مناسب است.

۲- نتیجه‌گیری

ترکیب شیمیایی دقیق کانی کیانیت، به ویژه محتوای Fe آن، می‌تواند به عنوان یک ترموبارومتر کمی و مستقیم برای تخمین فشار در سنگ‌های دگرگونی به کار رود. الگوی زونینگ کاهشی در نسبت $Fe/(Fe+Al)$ از مرکز به حاشیه بلورهای کیانیت، ثبت یک مسیر دگرگونی با کاهش فشار غالب را در تاریخچه تکتونیکی این مجموعه تأیید می‌کند. مدل‌سازی ترمودینامیکی داده‌های میکروپروب از کیانیت‌های مجموعه سورات، فشار اوج دگرگونی را در محدوده ۶ کیلوبار در دمای ۶۵۰ درجه سانتی‌گراد نشان می‌دهد.

۳- 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.

۴- مراجع

خلقی خسرقی، م.ح.، 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.

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

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.

Miyemeck, T. V. N., Bayamack, J. F. N., Venyite, P., Tchouatcha, M. S., Nyemb, S. P., Kamseu, E., Bayiga, E. C., & Etame, J. (2025). Characterization of the Dibang kyanite minerals from the southern domain of the Central African Fold Belt in Cameroon for refractory applications. *Discover Geoscience*, 3, 252.

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.

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.

Yoneguchi, Y., Tsunogae, T., Takahashi, K., Sakuwaha, K. G., & Ikehata, K. (2021). Pressure-temperature evolution of andalusite-kyanite-sillimanite-bearing pelitic schists from Nishidohira, southern Abukuma Mountains, Northeast Japan: Implications for Cretaceous rapid burial and exhumation in the Northeast Asian continental margin. *Lithos*, 406–407, 106522.