

## زمین دماسنج تیتانیم موجود در بیوتیت: گارنت شیست‌های منطقه دهنو

### (شمال غرب مشهد)

رامین صمدی<sup>۱</sup>، رضا زمانی<sup>۱\*</sup>، نرگس شیردشت‌زاده<sup>۱</sup>، هیروشی کاواباتا<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup>دانشجوی دکتری پترولوژی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران

<sup>۳</sup>عضو هیات علمی دانشگاه آزاد اسلامی واحد مشهدین شهر

<sup>۲</sup>موسسه مطالعه تحولات کره زمین ژاپن

reza\_zamani16@yahoo.com

#### چکیده:

گارنت‌شیست و گارنت‌کلریتوئید شیست‌های منطقه دهنو از نظر کانی‌شناسی شامل کوارتز، بیوتیت، مسکوویت، گارنت، کلریت، کلریتوئید، تورمالین و کانی‌های آپک می‌باشند. بررسی مینرال‌شیمی بیانگر میزان تیتانیم معادل 0.24.f.u. و ترکیب سیدروفیلیت برای بیوتیت‌ها است. نتایج زمین‌دماسنجی به‌وسیله روش تیتانیم موجود در بیوتیت نشان می‌دهد که دمای دگرگونی شیست‌های مورد مطالعه در حدود ۵۴۸ تا ۵۹۶ درجه سانتیگراد می‌باشد.

**واژه‌های کلیدی:** شیست، زمین دماسنجی، بیوتیت، دهنو، مشهد.

## Geothermometry of Ti in Biotite: Garnet schists of Dehnow, (Northwest of Mashhad)

#### Abstract

Garnet schists and garnet chloritoid schists of Dehnow are mineralogically composed of quartz, biotite, muscovite, garnet, chlorite, chloritoid, tourmaline, and opaque minerals. Mineral chemistry show Ti content is up to 0.24 a.p.f.u. and a siderophyllite composition for biotites. Ti in biotite geothermometry indicated that the metamorphic temperature of schists was about 548 to 596 °C.

**Key words:** Schist, geothermometry, biotite, Dehnow, Mashhad.

#### مقدمه:

مطالعات زمین‌دماسنجی برای شناخت شرایط دمای تشکیل سنگ‌ها، در دهه‌های اخیر به عنوان یک روش مفید مطرح شده‌اند. در این زمینه، تجربیات آزمایشگاهی دانشمندان، محاسبات و مدل‌سازی ترمودینامیکی، بر اساس تجزیه شیمیایی کانی‌ها به وسیله الکترون میکروپروب، به فهم بهتر شرایط دما و فشار حاکم بر سنگ‌ها در خلال فرآیندهای زمین‌شناسی، کمک مؤثری نموده است.

با توجه به اهمیت تعیین شرایط محیطی در مطالعات مربوط به پهنه‌های زمین‌شناسی، در این مطالعه به بررسی کاربرد روش دماسنجی تیتانیم موجود در بیوتیت در مورد شیست‌های منطقه دهنو، بر اساس آنالیز میکروپروب کانی‌های مختلف این سنگ‌ها، پرداخته شده است.

### زمین‌شناسی عمومی منطقه:

منطقه دهنو در شمال شرقی ایران و در ۱۵ کیلومتری شمال غربی شهر مشهد واقع گردیده است. این ناحیه در محدوده زون ساختاری بینالود و در امتداد شرقی سلسله جبال البرز، در حد فاصل طول‌های جغرافیایی ۲۲° ۵۹' تا ۲۶° ۵۹' شرقی و عرض‌های جغرافیایی ۲۰° ۳۶' تا ۲۲° ۳۶' شمالی قرار دارد (شکل یک).

در جنوب، غرب و شمال غرب مشهد یک مجموعه شامل رسوبات پالئوزوئیک و سنگ‌های دگرگون شده تریاس با جهت جنوب‌شرق - شمال غرب به صورت یک زون تحت تأثیر وقایع تکتونیکی صعود نموده و رخنمون پیدا نموده است. دگرگونی ناحیه‌ای این سنگ‌ها در تریاس صورت پذیرفته و در ضمن دگرگونی، توده‌های گرانیتوئیدی به این نوار دگرگونی تزریق شده‌اند (علوی، ۱۹۹۱؛ هاتفی، ۱۳۸۲).

اختصاصات زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه از خصوصیات یک شیار قاره‌ای حکایت می‌کند که در پرمین آغاز شده، پس از تشکیل گرابن‌های متعدد، رسوبات داخل آنها در نتیجه فرونشینی و تعادل حرارتی بدون تغییر شکل و به صورت هم‌فشاری، دگرگونی ناحیه‌ای از نوع فشار پائین - دمای بالا را تحمل نموده است. پس از تشکیل پوسته اقیانوسی بین دو ورقه توران و ایران، پوسته اقیانوسی باقیمانده بر روی قاره رانده شده است. در نتیجه برخورد دو ورقه با یکدیگر، سنگ‌های زون برخورد (در محل نوار دگرگونی) متحمل دگرگونی ناحیه‌ای از نوع فشار پائین - دمای بالا شده و به حداکثر دگرگونی تغییر شکل پیدا کرده‌اند، به صورتی که از دگرگونی ضعیف قبلی اثری دیده نمی‌شود. این رسوبات که غالباً پلیتی و کمتر آهکی هستند، به نسبت فشار و دمای وارده به اسلیت، فیلیت، شیست‌های آندالوزیت، استارولیت و ندرتاً سیلیمانیت‌دار تبدیل شده‌اند (علوی، ۱۹۹۱؛ هاتفی، ۱۳۸۲).

بر اساس کلیه مطالعاتی که تاکنون انجام گرفته و مطالعه حاضر، بخشی از سنگ‌های دگرگونی منطقه را اسلیت، فیلیت، گارنت‌شیست، آندالوزیت‌شیست، کلریتوئیدشیست، استارولیت آندالوزیت‌گارنت شیست، استارولیت آندالوزیت شیست، مرمر، کوارتزیت و اسکارن تشکیل می‌دهند.

بررسی شرایط دمای تشکیل شیست‌های منطقه حین دگرگونی ناحیه‌ای، با استفاده از نتایج آنالیز میکروپروب کانی‌ها و روش زمین‌دماسنجی تیتانیم موجود در بیوتیت موضوع این مطالعه می‌باشد.

### روش مطالعه:

برای دستیابی به اهداف این تحقیق پس از بررسی شواهد صحرایی، از رخنمون‌های مناسب نمونه‌برداری انجام و از نمونه‌های سنگی، مقاطع نازک صیقلی و نازک تهیه شد. عکسبرداری میکروسکوپی از مقاطع نازک در دانشگاه کارلتون - آتاوا (کانادا) و دانشگاه تربیت مدرس تهران صورت پذیرفت. جهت آنالیز شیمیایی نمونه‌ها از میان مقاطع مطالعه شده تعدادی مقطع انتخاب شدند و پس از آنکه سطح آنها توسط لایه‌ای از کربن پوشش داده شد، مورد آنالیز میکروپروب قرار گرفتند. این آنالیز با استفاده از دستگاه میکروپروب JEOL، مدل JXA-8800 (WDS) و JXA-8500F موسسه مطالعه تحولات کره زمین (IFREE) در کشور ژاپن و با ولتاژ ۱۵ kV و ۱۵ nA انجام گرفت. تعداد ۴۴ نقطه مربوط به بیوتیت مورد آنالیز قرار گرفتند که در جدول یک نتایج آنالیز آنها به صورت میانگین ارائه شده است. سپس داده‌های حاصل به وسیله روش‌های آماری و نرم‌افزارهای پترولوژی مورد پردازش و تحلیل قرار گرفتند.

### بحث

### پتروگرافی و مینرال شیمی:

سنگ‌های دگرگونی ناحیه‌ای منطقه دهنو شامل شیست‌های ریزدانه خاکستری تا سیاه‌رنگ هستند که با حضور میکاهای

بیوتیت، مسکوویت و در برخی نمونه‌ها کلریتوئید، از خود شیبستوزیته نشان می‌دهند و دارای گارنت با اندازه‌های مختلف هستند. بر اساس مجموعه کانی‌ها، گروهی از شیبست‌های موجود در نزدیکی توده تونالیتی دهنو به صورت گارنت-شیبست می‌باشند (شکل ۲).

گارنت شیبست‌ها دارای کوارتز، بیوتیت، گارنت، مسکوویت به همراه زیرکن و کانی‌اپک هستند. بافت غالب آنها پرفیروپلیدوبلاستیک است. مسکوویت و بیوتیت در این سنگ‌ها سازنده شیبستوزیته بوده و در برخی از مقاطع بیوتیت‌ها اطراف کانی گارنت را احاطه کرده‌اند. گارنت موجود در گارنت شیبست‌ها (شکل ۲)، بصورت نیمه شکل‌دار تا بی‌شکل است و ادخال‌هایی از کوارتز، مسکوویت و بیوتیت در آن دیده می‌شود. گارنت‌های آن به رنگ قهوه‌ای با اندازه بزرگتر بوده و دو تا دوونیم میلی‌متر قطر دارند. از ویژگی‌های گارنت‌های موجود در گارنت شیبست‌ها وجود بافت «سایه‌فشاری» است. نتایج آنالیز کانی‌های موجود در این گروه از شیبست‌ها در جدول ۱ و با عنوان DH3 آورده شده است.

بر اساس نتایج آنالیز میکروپروپوب، میانگین میزان  $Al^{IV}$  موجود در ۴۴ نقطه بیوتیت آنالیز شده، ۲/۷۱ a.p.f.u. بوده و  $Fe/Fe+Mg$  آنها ۰/۶۹ می‌باشد، لذا ترکیب آنها به سیدروفیلیت (Siderophyllite) نزدیک‌تر می‌باشد (شکل ۳). وجود کانی‌های آلومینوسیلیکاته سیلیمانیت و آندالوزیت در کنار هم در این سنگ‌ها به خوبی حاکی از دمایی در حدود ۵۰۰ درجه سانتیگراد در فشاری نزدیک به ۴ کیلو بار برای این سنگ‌ها است (شکل ۳).

### زمین دماسنج تیتانیم موجود در بیوتیت:

روش‌های گوناگونی برای این منظور وجود دارند که قدیمی‌ترین آنها استفاده از شبکه‌های پترورژنتیک است. اما به مرور زمان، با پیشرفت روزافزون علم و اختراع دستگاه‌های گوناگون و پیشرفت در اندازه‌گیری عناصر، روش‌های نوین جایگاه خاصی در مطالعات زمین‌شناسی پیدا نموده است. اساس این تحقیقات، بر این فرض مبتنی است که مجموعه کانی‌های هر سنگ، در شرایط تعادلی تشکیل شده باشند. به عقیده Bucher and Frey (2002)، این وضعیت ممکن است برای سنگ‌هایی که به سرعت سرد شده‌اند یا اینکه دمایی پائینی داشته‌اند معتبر باشد. در واقع، این دماسنج‌ها بر اساس حساسیت توزیع عناصر در ساختار کانی‌ها و یا طی تبدلات شیمیایی، نسبت به دما و یا فشار طراحی شده‌اند. اما در مورد هر یک از این روش‌ها، تردیدها و یا محدودیت‌هایی هم وجود دارد که بایستی به آنها توجه نمود.

مقدار Ti موجود در بیوتیت به‌عنوان تابعی از تغییرات دما در سنگ‌های دگرگونی شناخته شده است (Engel and Engel, 1960; Kwak, 1968; Robert, 1976; Dymek, 1983; Patinao Douce, 1993). به هر حال عواملی که بر مقدار تیتانیم موجود در بیوتیت تأثیر می‌گذارند صرفاً به تغییرات دما محدود نمی‌باشند؛ بلکه عوامل فشار، شیمی بلورهای بیوتیت و مجموعه کانی‌های همراه آنها نیز مهم می‌باشد (Dymek, 1983; Henry and Guidotti, 2002). به هر حال دما بیشترین تأثیر را بر روی کنترل مقدار Ti در بیوتیت دارد و افزایش فشار تأثیر متضادی دارد، بدین معنی که مقدار Ti جایگزین شده با افزایش فشار، کاهش می‌یابد (Forbes and Flower, 1974; Robert, 1976; Arima and Edgar, 1976; Tronnes, 1981; et al, 1985; Henry et al., 2005). کاربرد روش مقدار Ti موجود در بیوتیت به‌عنوان تابعی از تغییرات دما و فشار نشان می‌دهد که افزایش دما موجب افزایش مقدار Ti و افزایش فشار موجب کاهش آن می‌شود (Robert, 1976). همچنین میزان Ti در بیوتیت، به طور کلی با افزایش مقدار Fe افزایش می‌یابد (Arima and Edgar, 1981; Abrecht and Hewitt, 1988).

البته این روش برای بررسی شرایط ترمودینامیکی سنگ‌های متاپلیتی پرآلومین در فشارهای کم تا متوسط و نیز سنگ‌های دگرگونی پرآلومین پیشنهاد شده است (Henry et al., 2005). Henry et al. (2005) فرمول این دماسنج را به صورت  $T(^{\circ}C) = \{[\ln(Ti) + 2.3594 + 1.7283(X_{Mg})^3] / (4.6482 \times 10^{-9})\}^{0.333}$  بیان کرده‌اند و در آن Ti تعداد اتم‌های تیتانیم محاسبه شده در فرمول ساختاری (a.p.f.u.) بیوتیت بر اساس ۲۲ اتم اکسیژن و  $X_{Mg}$  برابر  $Mg/(Mg+Fe)$  می‌باشد. این معادله برای  $X_{Mg} = 0.275 - 1.00$  و  $Ti = 0.04 - 0.60$  apfu و  $T = 480 - 800^{\circ}C$  (با خطای تقریبی  $^{\circ}C$ )

(±۲۴) معتبر می‌باشد (Henry et al., 2005). دمای دگرگونی که با استفاده از این روش برای شیبست‌ها مورد مطالعه به‌دست می‌آید، در حدود ۵۴۸ تا ۵۹۶ درجه سانتیگراد می‌باشد. همچنین دمای حاصل از روش دماسنج Ti در تک کانی بیوتیت، با استفاده از تصویرگری مقادیر (Mg/Mg# و Ti) (=Mg/(Mg Mg# + Fe) بر روی شکل (۳-ج) نیز قابل تخمین است و به این ترتیب دمایی در حدود ۵۵۰ تا نزدیک به ۶۰۰ درجه سانتیگراد بدست می‌آید.

### نتیجه گیری:

بررسی گارنت شیبست‌ها با استفاده از دماسنج تیتانیوم موجود در بیوتیت نشان می‌دهد که دمای متوسط تشکیل مجموعه کانی‌های نمونه‌های گارنت شیبست‌ها در حدود ۵۴۸ تا ۵۹۶ درجه سانتیگراد می‌باشد. با توجه به وجود کانی‌های آلومینوسیلیکاته سیلیمانیت و آندالوزیت در کنار هم در این سنگ‌ها و فشاری نزدیک به ۴ کیلوبار، می‌توان شرایط دگرگونی ناحیه ای که منجر به این دگرگونی گردیده است را مطابق با بخش‌های درجه پایین رخساره دگرگونی ناحیه‌ای شیبست سبز تا آمفیبولیت مطابق دانست.

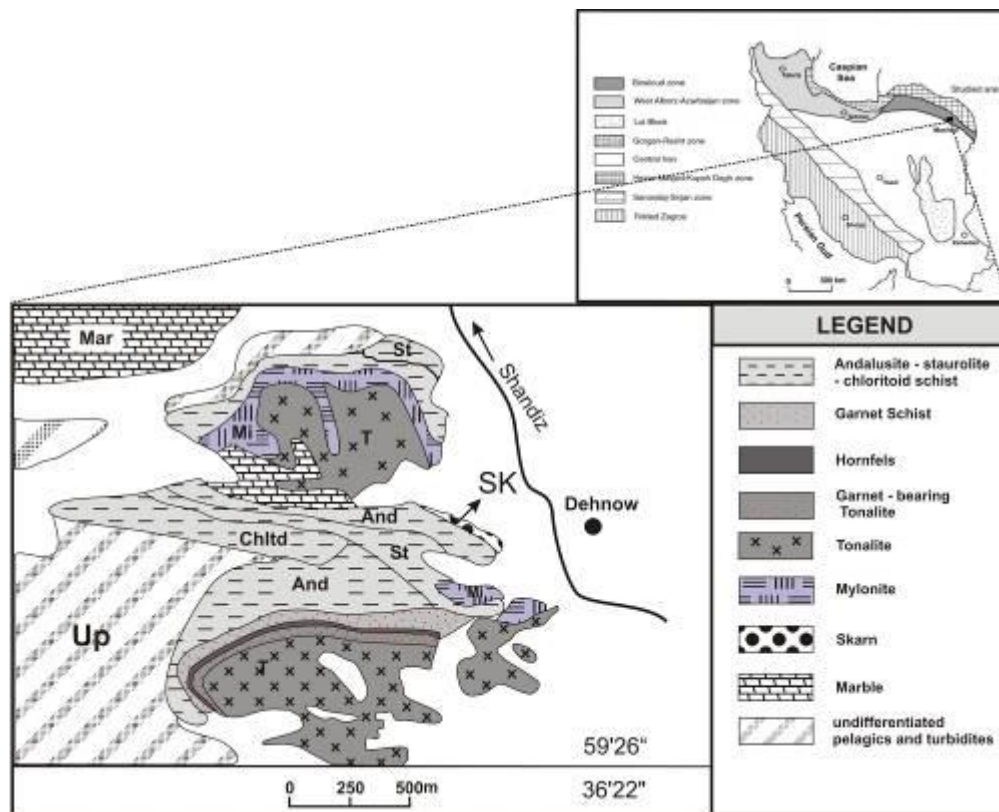
### سپاسگزاری:

از همکاری‌های ارزنده مهندس رضا صمدی سپاسگزاری می‌گردد.

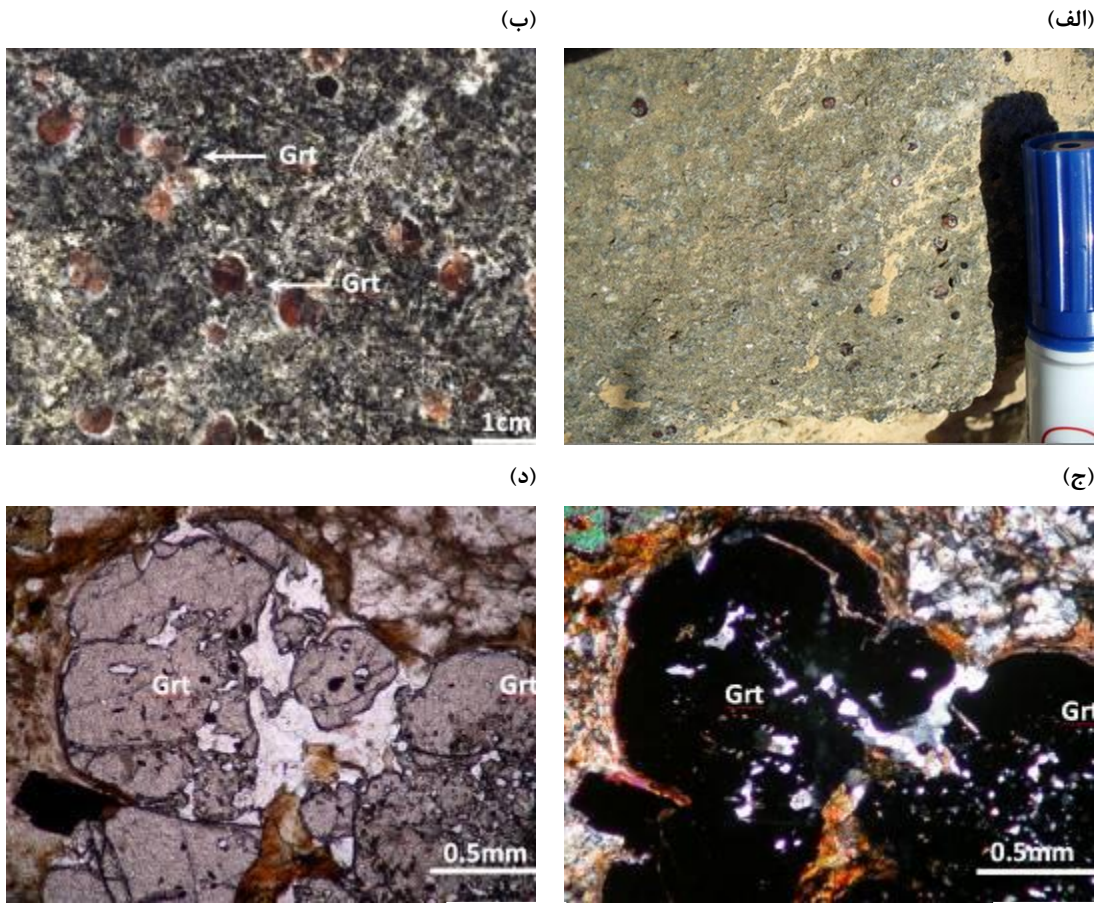
### مراجع:

۱. صمدی، ر.، (۱۳۸۷). بررسی منشأ مگاکریست‌های گارنت موجود در تونالیت دهنو (شمال غرب مشهد)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران، ۱۷۹ ص.
۲. هاتفی، ر.، ۱۳۸۲، مطالعه سنگ‌های دگرگونی ناحیه‌ای و توده‌های نفوذی منطقه دهنو (شمال غرب مشهد)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت معلم تهران، ۱۱۲ ص.
۳. هاتفی، ر.، بهاری‌فر، ع.، ۱۳۸۱، تغییرات ناگهانی پاراژنز در سیستم‌های کلریتوئیددار یا استرولیت‌دار ناحیه دهنو (مشهد). ششمین همایش انجمن زمین شناسی ایران.
4. Abrecht, J. and D.A., Hewitt, 1988, Experimental evidence on the substitution of Ti in biotite: American Mineralogist, v. 73, p. 1275 - 1284.
5. Alavi M. (1991). Sedimentary and structural characteristics of the Paleo-Tethys remnants in northeastern Iran. Geological Society of America Bulltin. 103: 983-992.
6. Alavi M., Majidi. B. (1972). Petrology and geology of metamorphic and intrusive rocks of the Mashhad area. Geological Survey of Iran. 30 p.
7. Alberti A., Moazez-Lesco Z. (1974). Plutonic and metamorphic rocks of the Mashhad area (Khorasan, North-Eastern Iran). Bull. Soc. Geol. 93: 1157-1196.
8. Alberti A., Nicoletti M., Petrucciani C. (1973). K/Ar ages of micas of Mashhad granites (Khorasan, North-Eastern Iran). Period. Miner. 42: 483-493.
9. Arima, M. and A.D., Edgar, 1981, Substitution mechanisms and solubility of titanium in phlogopites from rocks of probable mantle origin: Contributions to Mineralogy and Petrology. 77: 288 - 295.
10. Bucher, K., M., Frey, 2002, Petrogenesis of Metamorphic Rocks, Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 7th ed. 341 p.
11. Deer W. A., Howie R. A, Zussman J. (1992). An Introduction to the Rock forming Minerals, Second Editions, Longman, London. 696 p.
12. Dymek, R. F. (1983). Titanium, aluminum and interlayer cation substitutions in biotite from high-grade gneisses, West Green land. American Mineralogist. 68: 880-899.
13. Engel A. E. J., Engel C. G. (1960). Progressive metamorphism and granitization of the major paragneiss, northwest Adirondack Mountains, New York, Part 2. Mineralogy. Bulletin of the Geological Society of America. 71: 1-58.
14. Forbes, W.C. and M.F.J., Flower, 1974, Phase relations of titan-phlogopite,  $K_2Mg_4TiAl_2Si_6O_{20}(OH)_4$ : A refractory phase in the upper mantle: Earth and Planetary Science Letters. 22: 60 - 66.
15. Henry D. J., Guidotti C. V. (2002) Ti in biotite from metapelitic rocks: Temperature effects, crystallochemical controls and petrologic applications. American Mineralogist. 87: 375-382.
16. Henry, D. J., C. V., Guidiotti, and J. A., Thomson, 2005. The Ti-saturation surface for low to medium pressure metapelitic biotite: Implications for Geothermometry and Ti-substitution Mechanisms: American Mineralogist. 90: 316 - 328.

17. Kwak T. A. P. (1968). Ti in biotite and muscovite as an indication of metamorphic grade in almandine amphibolite facies rocks from Sudbury, Ontario. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. **32**: 1222-1229 .
18. Lammerer B., Langheinrch G., Danai M. (1983). The tectonic evolution of Binaloud mountains. Geodynamic project (Geotraverse) in Iran. Report no. **51**, Geological Survey of Iran. 519 p.
19. Majidi B. (1978). Etude Petrostructurale de la ergion de Mashhad(Iran). These docteur. Ingeniever, Univ. Sci. ct. Med. de Grenoble, France. 277 p.
20. Patiño Douce A. E. (1993). Titanium substitution in biotite: an empirical model with applications to thermometry, O2 and H2O barometries, and consequences form biotite stability. *Chemical Geology*. **108**: 133-162.
21. Robert J. L. (1976). Titanium solubility in synthetic phlogopite solid solutions. *Chemical Geology*. **17**: 213-227.
22. Winter C. (2001). *An Introduction to Igneous and Metamorphic Petrology*. Prentice Hall. 697 p.



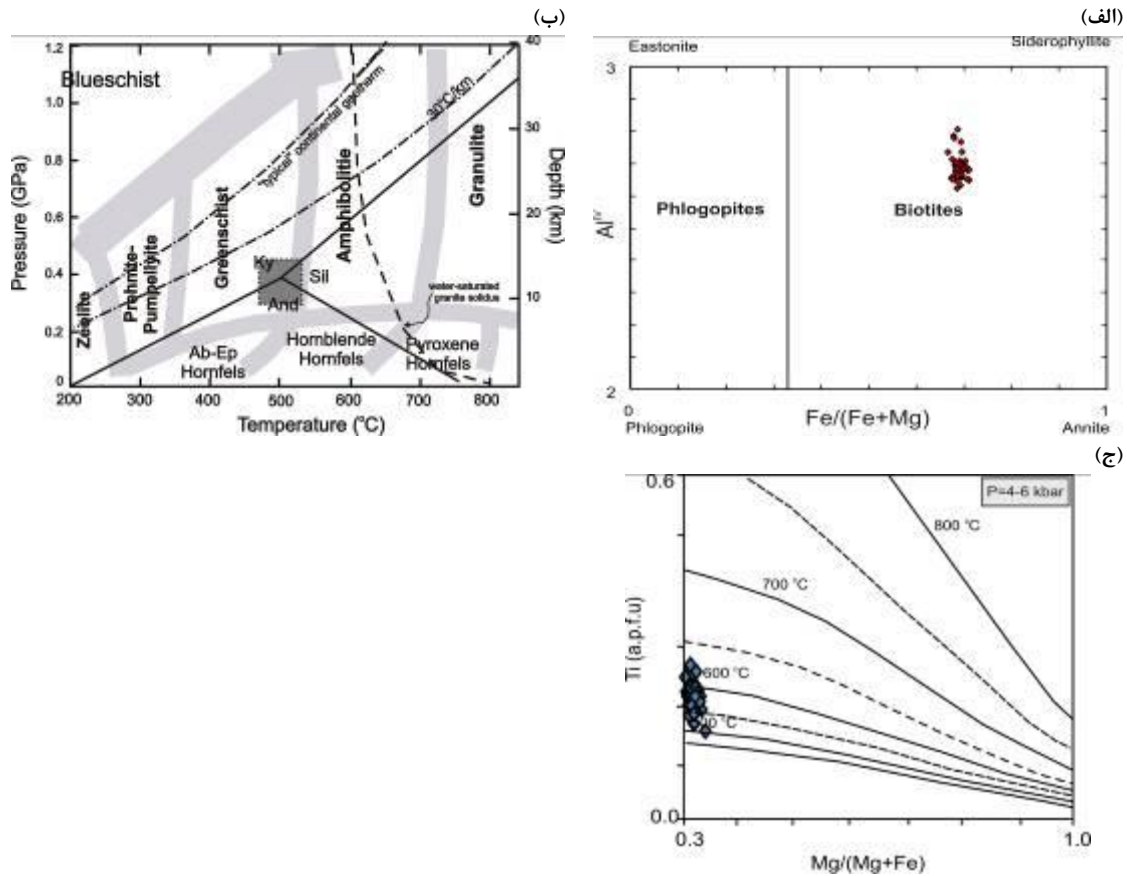
شکل ۱: موقعیت منطقه مورد مطالعه در میان سایر بخش‌های مختلف زمین‌شناسی ایران و نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه (اقتباس از نقشه زمین‌شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰، طبقه، تهیه شده توسط سازمان زمین‌شناسی ایران، ۱۳۸۰).



شکل ۲: (الف) نمایی از گارنت شیبست در نمونه دستی؛ (ب) گارنت با اذخال کوارتز (ج) تصویر XPL و (د) تصویر PPL.

  
**کنفرانس ملی**  
**بررسی دستاوردهای نوین علوم زمین**

۱۴ آبان ماه ۱۳۸۸ / دانشگاه آزاد اسلامی واحد بهبهان



شکل ۳: (الف) ترکیب بیوتیت‌های موجود در گارنت شیست‌های منطقه دهنو بر روی نمودار طبقه‌بندی بیوتیت‌ها (Deer et al., 1992); (ب) نمودار رخساره‌های دگرگونی (Winter, 2001) و موقعیت ترمودینامیکی تشکیل شیست‌های منطقه دهنو و مرزهای دما و فشار انواع آلومینوسیلیکات‌ها؛ (ج) تعیین دمای بیوتیت‌ها با استفاده از دماسنج Ti در بیوتیت (برگرفته از Henry et al., 2005).

جدول ۱: میانگین نتایج آنالیز میکروپروب کانی‌های موجود در گارنت شیست‌ها (DH3) دهنو (بر حسب wt%)، محاسبه فرمول ساختاری (بر حسب تعداد اتم اکسیژن و به صورت a.p.f.u.) و محاسبه درصد اعضای نهایی آنها.

Sample	DH3	Structural Formula	
<b>Mineral Type</b>	44 Biotites	Oxy. No.	22
		Si	5.29
SiO <sub>2</sub>	34.02	Ti	0.24
TiO <sub>2</sub>	2.06	Al	3.72
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	20.34	Al <sup>iv</sup>	2.71
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.03	Al <sup>vi</sup>	1.01
FeO	23.40	Cr	0.00
MnO	0.07	Fe	3.04
MgO	6.00	Mn	0.01
CaO	0.08	Mg	1.39
Na <sub>2</sub> O	0.31	Ca	0.01
K <sub>2</sub> O	7.76	Na	0.09
Total	94.08	K	1.54
		OH*	4.00
		Total	19.50
		Fe/Fe+Mg	0.69