

## کاربرد شیمی گارنت در بررسی‌های ترمودینامیکی تونالیت دهنو (شمال غرب مشهد)

رامین صمدی<sup>۱\*</sup>، حسن میرنژاد<sup>۲</sup>، نرگس شیردشت‌زاده<sup>۳</sup>، هیروشی کاواباتا<sup>۴</sup>

۱- دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران، گروه زمین‌شناسی، تهران، ایران

۲- دانشکده زمین‌شناسی، پردیس علوم، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۳- گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

۴- موسسه مطالعه تحولات کره زمین، بخش علوم و فن آوری زمین - دریا، یوکوسوکا، ژاپن

(دریافت مقاله: ۸۹/۱۰/۳۰، نسخه نهایی: ۹۰/۳/۳۰)

**چکیده:** هورنبلند بیوتیت تونالیت غرب دهنو شامل کانی‌های کوارتز، پلاژیوکلاز کلسیم‌دار (آندزین تا لابرادوریت)، گارنت (عمدتاً آلماندین)، بیوتیت (آنیت تا سیدروفیلیت)، آمفیبول کلسیک (عمدتاً فروهورنبلند) و کانی‌های فرعی کلریت، اپیدوت، کلسیت و ایلمنیت است. با توجه به دما فشارسنجی آمفیبول، پلاژیوکلاز و همچنین شیمی گارنت، که دارای میزان CaO در حدود ۴۹۱-۵۴۸ درصد وزنی و MnO در حدود ۱۸۹-۲۴۰ درصد وزنی است، گارنت‌ها در دما و فشاری به ترتیب در حدود ۶۹۶ تا ۹۵۰ درجه سانتی‌گراد و ۶/۴ تا ۱۲ کیلو بار و در عمق بیشتری نسبت به آمفیبول و پلاژیوکلاز تبلور یافته‌اند.

**واژه‌های کلیدی:** تونالیت؛ دما؛ فشار؛ گارنت؛ دهنو؛ مشهد.

### مقدمه

کانی‌های ارتوسیلیکاتی هستند که در محیط‌های زمین‌شناسی متنوعی یافت می‌شوند [۲]. در حقیقت کانی‌های گروه گارنت مشخص‌کننده سنگ‌های دگرگون هستند، ولی در بعضی از سنگ‌های آذرین به صورت اولیه و نیز به صورت دانه‌های تخریبی، در رسوب‌ها دیده می‌شوند.

در این پژوهش با توجه به اهمیت تعیین شرایط محیطی در بررسی‌های وابسته به پهنه‌های زمین‌شناسی، شرایط دما و فشار حاکم بر و شکل‌گیری سنگ‌های نفوذی بر اساس آنالیز ریزپردازشی کانی‌های مختلف منطقه برآورد شده است. همچنین با توجه به حضور گارنت‌های درشت دانه درون سنگ‌های تونالیتی منطقه دهنو، این کانی در بررسی شرایط ترمودینامیکی حاکم بر منطقه مورد بررسی قرار گرفت تا شرایط دمایی و فشاری حضور آن در این سنگ‌ها مشخص شود.

بررسی‌های زمین‌دماسنجی و زمین‌فشارسنجی برای شناخت شرایط دما و فشار تشکیل سنگ‌ها، در دهه‌های اخیر به عنوان یک روش مفید مطرح شده‌اند. در این زمینه، تجربه‌های آزمایشگاهی دانشمندان، محاسبات و مدل‌سازی ترمودینامیکی، بر اساس تجزیه‌ی شیمیایی کانی‌ها با استفاده از ریزپردازنده‌ی الکترونی، به آگاهی بهتر شرایط دما و فشار حاکم بر سنگ‌ها در خلال فرایندهای زمین‌شناسی، کمک مؤثری کرده است. در واقع، این دما و فشارسنج‌ها بر اساس حساسیت توزیع عناصر در ساختار کانی‌ها و یا طی تبدلات شیمیایی، نسبت به دما و یا فشار طراحی شده‌اند [۱].

استفاده از ترکیب گارنت همواره به عنوان شاخص پتروژنتیک در تعیین شرایط ترمودینامیکی مورد توجه بسیاری از پژوهشگران بوده است. گارنت‌ها یکی از مهم‌ترین گروه‌های

### روش بررسی

برای دستیابی به هدف‌های یاد شده در این پژوهش به جمع‌آوری، بررسی و ارزیابی اطلاعات موجود از منطقه و موارد مشابه در ایران و نقاط دیگر جهان پرداخته شد. سپس شواهد صحرائی مورد بررسی قرار گرفت و از ۸ رخنمون مناسب تونالیت‌های منطقه نمونه‌برداری شد. برای آنالیز شیمیایی نمونه‌ها از میان مقاطع بررسی شده تعدادی مقطع انتخاب شدند و پس از آنکه سطح آنها با لایه‌ای از کربن پوشش داده شد، مورد بررسی ریزپردازشی قرار گرفتند. این آنالیزها با استفاده از ریزپردازنده‌ی JEOL، مدل JXA-8800 (WDS) و JXA-8500F موسسه‌ی مطالعاتی تحولات کره زمین (IFREE) در ژاپن و با ولتاژ ۱۵ kV و ۱۵ nA انجام گرفت. نتایج آنالیز وابسته به کانی‌های آمفیبول، بیوتیت، پلاژیوکلاز و گارنت به ترتیب در جدول‌های ۱، ۲، ۳ و ۴ ارائه شده‌اند.

### بحث و بررسی

#### زمین‌شناسی منطقه

منطقه‌ی مورد بررسی در شمال شرقی ایران و در ۱۵ کیلومتری شمال غربی شهر مشهد واقع شده است. این ناحیه در گستره‌ی

زون ساختاری بینالود و در راستای شرقی البرز، در حد فاصل طول‌های جغرافیایی ۲۲° ۵۹' تا ۲۶° ۵۹' شرقی و عرض‌های جغرافیایی ۲۰° ۳۶' تا ۲۲° ۳۶' شمالی قرار دارد (شکل ۱). در جنوب و جنوب‌غربی مشهد تا شمال دشت تربت‌جام، برونزدهای ناپیوسته‌ای از توده‌های گرانیتوئیدی با گستردگی ۲۶۰ کیلومتر مربع و به‌صورت باریکه‌ی طولی به طول ۴۰ کیلومتر و به عرض ۱۰ کیلومتر گسترش یافته است که اگر با توده‌های نفوذی دیگر جنوب‌غربی مشهد (وکیل‌آباد، گلستان، طرقله) به‌صورت مشترک مورد توجه قرار گیرند، طول آنها به ۷۰ کیلومتر می‌رسد. یقیناً این توده‌های گرانیتوئیدی که در یک راستای تقریبی شمال‌غربی - جنوب‌شرقی آرایش یافته‌اند، بخش‌های مرتفع یک باتولیت بسیار بزرگند که بخش‌هایی از آن هنوز رخنمون نیافته‌اند، بنابراین به‌دلیل ظاهر خطی و راستای آنها، شاید بتوان آن را یک باتولیت کردیلرانی در نظر گرفت که در زمان تزریق از یک خاستگاه در درون یک منطقه زمین چاک (suture zone) و طی برخورد ورقه‌ی توران با شمال شرقی ورقه‌ی ایران و بسته شدن پالئوتتیس در اواخر پالئوزوئیک تزریق شده‌اند [۳-۷].

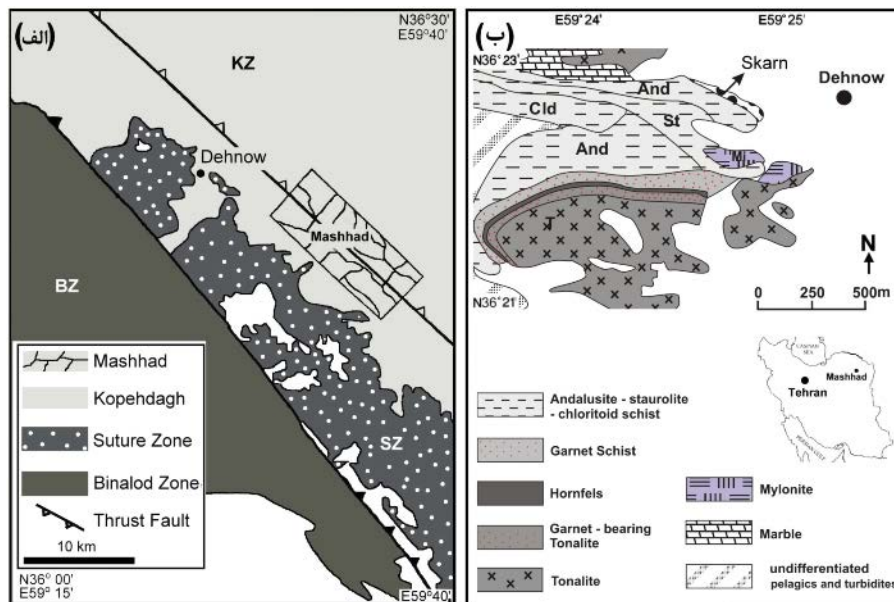
**جدول ۱** نتایج آنالیز ریزپردازشی آمفیبول‌های موجود در تونالیت دهنو (بر حسب wt%)، محاسبه‌ی فرمول ساختاری (بر حسب ۲۳ اتم اکسیژن و به‌صورت a.p.f.u.).

Sample	DH <sub>2</sub> -Amp ۶۰۵	DH <sub>2</sub> -Amp ۶۰۶	DH <sub>2</sub> -Amp ۶۰۷	DH <sub>2</sub> -Amp ۶۱۰	DH <sub>2</sub> -Amp ۶۱۱	DH <sub>2</sub> -Amp ۶۱۲	DH <sub>2</sub> -Amp ۶۱۳	DH <sub>2</sub> -Amp ۶۱۴	DH <sub>2</sub> -Amp ۶۱۷
SiO <sub>2</sub>	۴۳.۵۶	۴۳.۰۸	۴۳.۴۳	۴۳.۳۳	۴۲.۸۱	۴۳.۰۵	۴۳.۳۸	۴۲.۸۵	۴۳.۱۷
TiO <sub>2</sub>	۱.۰۸	۱.۱۱	۰.۹۶	۱.۰۷	۱.۰۵	۱.۰۲	۰.۹۹	۱.۰۱	۰.۹۹
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۱۰.۹۱	۱۱.۲۲	۱۱.۳۵	۱۱.۳۰	۱۱.۱۶	۱۰.۹۸	۱۰.۸۸	۱۰.۸۴	۱۰.۹۰
FeO	۱۹.۹۰	۱۹.۸۵	۱۹.۸۴	۱۹.۷۹	۲۰.۱۷	۲۰.۰۱	۱۹.۷۵	۱۹.۷۴	۲۰.۰۱
MnO	۰.۶۴	۰.۶۶	۰.۶۲	۰.۶۶	۰.۶۴	۰.۶۲	۰.۶۲	۰.۶۲	۰.۶۵
MgO	۷.۷۲	۷.۵۹	۷.۶۸	۷.۵۷	۷.۴۳	۷.۶۶	۸.۰۳	۷.۹۷	۷.۷۷
CaO	۱۱.۴۴	۱۱.۴۱	۱۱.۴۴	۱۱.۳۲	۱۱.۲۷	۱۱.۳۱	۱۰.۹۶	۱۱.۵۳	۱۱.۳۷
Na <sub>2</sub> O	۰.۹۷	۱.۱۱	۰.۹۸	۱.۱۲	۱.۰۷	۱.۰۷	۱.۳۴	۱.۰۰	۰.۹۹
K <sub>2</sub> O	۱.۱۱	۱.۱۶	۱.۰۷	۰.۹۶	۱.۰۵	۱.۰۴	۰.۹۴	۰.۹۸	۰.۹۷
Total	۹۷.۳۴	۹۷.۲۰	۹۷.۴۱	۹۷.۱۳	۹۶.۶۵	۹۶.۷۵	۹۶.۹۲	۹۶.۵۵	۹۶.۸۳
Si	۶.۵۹	۶.۵۴	۶.۵۵	۶.۵۶	۶.۵۳	۶.۵۵	۶.۵۶	۶.۵۳	۶.۵۵
Al <sup>iv</sup>	۱.۴۱	۱.۴۶	۱.۴۵	۱.۴۴	۱.۴۷	۱.۴۵	۱.۴۴	۱.۴۷	۱.۴۵
Al <sup>vi</sup>	۰.۵۳	۰.۵۵	۰.۵۷	۰.۵۸	۰.۵۳	۰.۵۲	۰.۵۰	۰.۴۸	۰.۵۰
Ti	۰.۱۲	۰.۱۳	۰.۱۱	۰.۱۲	۰.۱۲	۰.۱۲	۰.۱۱	۰.۱۲	۰.۱۱
Fe <sup>2+</sup>	۲.۱۳	۲.۱۵	۲.۰۹	۲.۱۱	۲.۱۴	۲.۱۰	۲.۰۰	۲.۰۱	۲.۰۵
Fe <sup>3+</sup>	۰.۳۸	۰.۳۷	۰.۴۰	۰.۳۹	۰.۴۲	۰.۴۳	۰.۴۷	۰.۵۱	۰.۴۸
Mn	۰.۰۸	۰.۰۸	۰.۰۸	۰.۰۸	۰.۰۸	۰.۰۸	۰.۰۸	۰.۰۸	۰.۰۸
Mg	۱.۷۴	۱.۷۲	۱.۷۳	۱.۷۱	۱.۶۹	۱.۷۴	۱.۸۱	۱.۸۱	۱.۷۶
Ca	۱.۸۶	۱.۸۶	۱.۸۵	۱.۸۴	۱.۸۴	۱.۸۳	۱.۷۸	۱.۸۹	۱.۸۵
Na	۰.۲۸	۰.۳۳	۰.۲۹	۰.۳۳	۰.۳۲	۰.۳۱	۰.۳۹	۰.۳۰	۰.۲۹
K	۰.۲۱	۰.۲۳	۰.۲۱	۰.۱۹	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۱۸	۰.۱۹	۰.۱۹
Total	۱۵.۳۵	۱۵.۴۰	۱۵.۳۳	۱۵.۳۵	۱۵.۲۵	۱۵.۲۲	۱۵.۳۲	۱۵.۲۷	۱۵.۳۲
Mg(Mg+Fe <sup>2+</sup> )	۰.۴۵	۰.۴۴	۰.۴۵	۰.۴۵	۰.۴۴	۰.۴۵	۰.۴۸	۰.۴۷	۰.۴۶



جدول ۴ نتایج آنالیز ریزپردازشی گارنت‌های موجود در تونالیت دهنو (بر حسب wt%)، محاسبه‌ی فرمول ساختاری (بر حسب ۱۲ اتم اکسیژن و به‌صورت a.p.f.u.) و محاسبه‌ی مقادیر اعضای نهایی آنها.

Sample	DH <sub>2</sub> -Grt ۶۳۶	DH <sub>2</sub> -Grt ۶۳۷	DH <sub>2</sub> -Grt ۶۳۸	DH <sub>2</sub> -Grt ۶۳۹	DH <sub>2</sub> -Grt ۶۴۰	DH <sub>2</sub> -Grt ۶۴۱	DH <sub>2</sub> -Grt ۶۴۲	DH <sub>2</sub> -Grt ۶۴۳	DH <sub>2</sub> -Grt ۶۴۴	DH <sub>2</sub> -Grt ۶۴۵	DH <sub>2</sub> -Grt ۶۴۶	DH <sub>2</sub> -Grt ۶۴۷	DH <sub>2</sub> -Grt ۶۴۸
SiO <sub>2</sub>	۳۸.۳۹	۳۸.۲۶	۳۸.۳۸	۳۸.۳۵	۳۸.۰۹	۳۸.۳۸	۳۸.۴۳	۳۸.۲۲	۳۸.۰۵	۳۸.۳۱	۳۸.۰۸	۳۸.۱۲	
TiO <sub>2</sub>	۰.۱۱	۰.۲۵	۰.۲۷	۰.۲۷	۰.۱۳	۰.۲۶	۰.۰۹	۰.۱۲	۰.۲۶	۰.۳۳	۰.۳۴	۰.۱۶	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۲۱.۶۱	۲۱.۲۵	۲۱.۴۶	۲۱.۴۰	۲۱.۵۲	۲۱.۳۲	۲۱.۵۸	۲۱.۱۲	۲۱.۳۳	۲۱.۲۷	۲۱.۱۷	۲۱.۳۰	
FeO	۲۹.۳۸	۲۸.۷۰	۲۹.۰۷	۲۸.۶۸	۲۸.۶۸	۲۸.۸۷	۲۸.۹۸	۲۸.۶۲	۲۸.۷۵	۲۹.۲۱	۲۸.۹۲	۲۹.۳۸	
MnO	۲.۲۸	۲.۲۵	۲.۳۳	۱.۹۸	۲.۳۴	۱.۸۹	۲.۲۹	۲.۳۷	۲.۴۰	۲.۴۰	۲.۳۱	۲.۳۳	
MgO	۴.۱۵	۴.۳۲	۴.۴۹	۴.۹۸	۴.۸۱	۴.۹۳	۴.۷۹	۴.۵۱	۴.۵۷	۴.۵۶	۴.۳۵	۴.۳۶	
CaO	۴.۹۱	۵.۴۷	۵.۱۱	۵.۲۳	۴.۹۱	۵.۰۴	۵.۱۰	۵.۰۳	۵.۲۰	۵.۰۰	۵.۴۸	۵.۰۷	
Na <sub>2</sub> O	۰.۰۰	۰.۰۴	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۱	۰.۰۲	۰.۰۰	۰.۰۱	۰.۰۲	۰.۰۱	۰.۰۰	۰.۰۱	
K <sub>2</sub> O	۰.۰۱	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۱	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۱	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۱	
Total	۱۰۰.۹۳	۱۰۰.۶۵	۱۰۰.۱۱۲	۱۰۰.۹۱	۱۰۰.۵۰	۱۰۰.۷۲	۱۰۰.۲۷	۱۰۰.۰۲	۱۰۰.۵۹	۱۰۰.۰۹	۱۰۰.۶۵	۱۰۰.۷۴	
Si	۳.۰۱	۳.۰۰	۳.۰۰	۲.۹۹	۲.۹۹	۳.۰۰	۲.۹۹	۳.۰۲	۲.۹۹	۳.۰۰	۲.۹۹	۲.۹۹	
Al <sup>iv</sup>	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۱	۰.۰۱	۰.۰۰	۰.۰۱	۰.۰۰	۰.۰۱	۰.۰۰	۰.۰۱	۰.۰۱	
Al <sup>vi</sup>	۲.۰۰	۱.۹۷	۱.۹۷	۱.۹۶	۱.۹۸	۱.۹۷	۱.۹۸	۱.۹۷	۱.۹۶	۱.۹۶	۱.۹۵	۱.۹۷	
Ti	۰.۰۱	۰.۰۲	۰.۰۲	۰.۰۲	۰.۰۱	۰.۰۲	۰.۰۱	۰.۰۱	۰.۰۲	۰.۰۲	۰.۰۲	۰.۰۱	
Fe <sup>2+</sup>	۱.۹۳	۱.۸۸	۱.۸۹	۱.۸۵	۱.۸۷	۱.۸۷	۱.۸۷	۱.۸۸	۱.۸۷	۱.۸۹	۱.۸۸	۱.۹۱	
Fe <sup>3+</sup>	۰.۰۰	۰.۰۱	۰.۰۱	۰.۰۲	۰.۰۱	۰.۰۱	۰.۰۲	۰.۰۱	۰.۰۲	۰.۰۲	۰.۰۲	۰.۰۲	
Mn	۰.۱۶	۰.۱۵	۰.۱۵	۰.۱۳	۰.۱۶	۰.۱۳	۰.۱۵	۰.۱۶	۰.۱۶	۰.۱۶	۰.۱۵	۰.۱۵	
Mg	۰.۴۸	۰.۵۱	۰.۵۲	۰.۵۸	۰.۵۶	۰.۵۷	۰.۵۶	۰.۵۳	۰.۵۴	۰.۵۳	۰.۵۱	۰.۵۱	
Ca	۰.۴۱	۰.۴۶	۰.۴۳	۰.۴۴	۰.۴۱	۰.۴۲	۰.۴۳	۰.۴۳	۰.۴۴	۰.۴۲	۰.۴۶	۰.۴۳	
Total	۷.۹۹	۷.۹۹	۷.۹۹	۸.۰۰	۸.۰۰	۷.۹۹	۸.۰۰	۷.۹۹	۸.۰۰	۸.۰۰	۸.۰۰	۸.۰۰	
Almandine	۶۴.۷۴	۶۲.۳۶	۶۲.۸۶	۶۱.۵۰	۶۲.۱۶	۶۲.۲۳	۶۲.۱۶	۶۲.۳۹	۶۲.۱۱	۶۲.۶۷	۶۲.۲۰	۶۳.۴۳	
Pyrope	۱۶.۲۱	۱۷.۰۷	۱۷.۵۸	۱۹.۴۳	۱۸.۸۲	۱۹.۳۴	۱۸.۵۸	۱۷.۸۹	۱۷.۹۲	۱۷.۸۸	۱۷.۱۲	۱۷.۱۰	
Grossular	۱۳.۷۸	۱۵.۰۹	۱۳.۹۴	۱۳.۷۳	۱۳.۲۳	۱۳.۴۹	۱۳.۴۱	۱۳.۸۱	۱۳.۷۶	۱۳.۰۷	۱۴.۳۵	۱۳.۲۹	
Spessartine	۵.۲۸	۵.۰۵	۵.۱۸	۴.۴۰	۵.۲۱	۴.۲۱	۵.۰۴	۵.۳۵	۵.۳۳	۵.۴۴	۵.۱۶	۵.۱۸	
Andradite	۰.۰۰	۰.۴۲	۰.۴۳	۰.۹۳	۰.۴۸	۰.۷۲	۰.۷۹	۰.۵۵	۰.۸۸	۱.۰۴	۱.۱۷	۰.۹۷	
Uvarovite	۰.۰۰	۰.۰۱	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۲	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۲	



شکل ۱ نقشه‌ی زمین‌شناسی (الف) گستره‌های ساختاری اصلی در شمال‌شرقی ایران، (ب) موقعیت منطقه‌ی مورد بررسی در نقشه‌ی زمین‌شناسی ایران و نقشه‌ی زمین‌شناسی منطقه‌ی مورد بررسی [SZ = Suture Zone; KZ = Kopehdagh Zone].

نشانی از تأثیر دگرگونی‌های ناحیه‌ای بعدی روی مجموعه‌ی نفوذی منطقه است.

در بررسی میکروسکوپی توده‌ی تونالیتی دهنو، اندازه متوسط دانه‌ها در حدود ۱ میلی‌متر است. بافت موجود در این سنگ‌ها نیمه شکل‌دار دانه‌ای است. کانی‌های اصلی تشکیل دهنده‌ی تونالیت؛ پلاژیوکلاز، کوارتز، بیوتیت، فلدسپار پتاسیم و هورنبلندسبزند (شکل ۲-ب) و به مقدار کم پیروکسن نیز در آنها مشاهده می‌شود. علاوه بر کانی‌های نامبرده، درشت بلورهای گارنت، کانی‌های کدر (ایلمنیت) و زیرکن به‌صورت ادخال در بیوتیت‌ها با هاله‌ی پلئوکروئیک و آپاتیت نیز به‌صورت منفرد و یا ادخال درون بیوتیت‌ها در برخی مقاطع به‌عنوان کانی‌های فرعی وجود دارند. کانی‌های ثانوی موجود در تونالیت شامل مسکوویت، کلریت، اپیدوت و کلسیت‌اند که همه‌ی آنها حاصل دگرسانی کانی‌های آمفیبول، بیوتیت و پلاژیوکلاز هستند (شکل ۲-ب).

**کوارتز:** ۲۰ تا ۲۵ درصد از حجم سنگ را کوارتزهای بی‌شکل با ابعاد متغیر، بافت موزاییکی و با خاموشی موحی همراه با ادخال‌های پلاژیوکلاز تشکیل می‌دهند. کوارتزها ساختار تغییر شکل‌یافته داشته و در برخی از موارد ادخال‌های سیال در آنها توسط [۱۲] گزارش شده است. این کانی‌ها به‌صورت انباشتی از بلورهای ریز دانه نیز دیده می‌شوند (شکل ۲-ب).

**آمفیبول:** بلورهای آمفیبول با اندازه‌ی تقریبی ۳ میلی‌متر، هم اندازه و تقریباً منشوری شکل با فراوانی نسبی ۱ تا ۳ درصد هستند که گاهی ماکل تیغه‌ای و چندرنگی نشان می‌دهند. برخی از آمفیبول‌ها در اثر دگرگونی ضعیفی، در حاشیه به بیوتیت و کلریت تبدیل شده‌اند. تعدادی از بلورهای آمفیبول بافت پویکیلیتیک داشته و دارای ادخال‌هایی از کوارتز، پلاژیوکلاز و بیوتیت هستند (شکل ۲-پ).

نتایج آنالیز ریزپردازشی آمفیبول‌ها همراه با محاسبه‌ی فرمول ساختاری آنها در جدول ۱ آورده شده‌اند. محاسبه‌ی فرمول ساختاری آمفیبول‌ها بر اساس ۲۳ اتم اکسیژن و ۱۳ کاتیون بوده و با استفاده از روش [۲۰] انجام گرفته است. مقدار  $Fe^{3+}$  نیز به روش عنصرسنجی [۲۱] بدست آمد. با توجه به شکل ۳-پ [۲۰]، ترکیب آمفیبول‌های وابسته به تونالیت دهنو از نوع آمفیبول‌های کلسیک و فروهورنبلند تا فروچرماکیت است.

این تونالیت‌ها تاکنون توسط بسیاری از پژوهشگران مورد بررسی قرار گرفته‌اند. از آن جمله می‌توان به بررسی‌های [۳-۸-۹-۱۱-۱۶] اشاره کرد. این پژوهش‌ها زمینه‌ی مناسبی را برای بررسی‌های سنگ‌شناسی و شیمیایی نوین درباره سنگ‌های گرانیتوئیدی و دگرگونی ناحیه مشهد فراهم آورده است.

در بررسی‌های سن‌سنجی [۱۷] به روش پتاسیم - آرگن روی بلورهای میکا، سن گرانیت‌های منطقه‌ی مشهد ۱۲۰، ۱۳۵، ۱۴۵، ۱۴۶ (±۳) میلیون سال پیش (اواخر ژوراسیک تا کرتاسه زیرین) معرفی شده است. [۹] با توجه به شواهد زمین‌شناسی و سن‌یابی، فازهای اولیه دگرگونی و گرانیت‌زایی را با کوهزایی هرسینین وابسته دانسته، که بعدها در تریاس میانی تحت تأثیر فاز سیمیرین پیشین قرار گرفته است. [۱۰] بر اساس روش سن‌سنجی پتاسیم - آرگن سنی معادل ۲۵۶-۲۴۵ میلیون سال پیش (اواخر پرمین تا تریاس زیرین) را پیشنهاد کرده است. در بررسی اخیر توسط [۱۶] و بر اساس روش اورانیم - سرب زیرکن، سن  $215 \pm 5$  میلیون سال پیش (تریاس بالایی، نورین) به‌دست آمده است. با توجه به نتایج غالب داده‌های سن‌سنجی جدید، جایگیری توده‌ی تونالیتی، به اوایل تا اواخر مزوزوئیک می‌رسد.

بر اساس بررسی‌های صحرایی، سنگ‌نگاری و نیز بنا بر رده‌بندی‌های کانی‌شناسی، توده‌ی نفوذی دهنو از دو واحد تونالیتی و گرانودیوریتی تشکیل شده است که مرز مشخصی بین این واحدها وجود ندارد و در کل آنها را سنگ‌های گرانیتوئیدی دهنو می‌نامیم. این توده دارای ترکیبی متغیر از تونالیت تا گرانودیوریت است [۱۴-۱۸] که می‌تواند به دلیل آرایش ماگمای تونالیتی با مواد فلسیک پوسته‌ی زیرین [۱۹] و نیز تا حدودی مربوط به دگرسانی‌های بعدی باشد. جایگیری این توده در شیست‌های منطقه، منجر به تشکیل باریکه‌ای از هورنفلس در فاصله‌ای در حدود ۲۰۰ متری از مرز توده با شیست‌ها شده است.

### سنگ‌نگاری و شیمی کانی‌های تونالیت

تونالیت‌های بیوتیت‌دار مزوزوئیک دهنو با رنگ خاکستری روشن در زون محوری چین‌های نسل دوم [۱۲]، در سنگ‌هایی با درجه‌ی دگرگونی کم تا نسبتاً بالا و نیز در سنگ‌های کربناتی جایگیری کرده‌اند (شکل ۱). برگ‌وارگی ضعیفی نیز در بخش‌هایی از توده‌ی تونالیتی مشاهده می‌شود (شکل ۲-الف) که





شکل ۲ (الف) نمایی از تونالیت منطقه‌ی دهنو که به رنگ خاکستری و دانه متوسط است؛ (ب) تصویر مقطع میکروسکوپی (XPL) آمفیبول، پلاژیوکلاز، بیوتیت، مسکوویت و کوارتز؛ (پ) تصویر مقطع میکروسکوپی (PPL) آمفیبول و بیوتیت‌ها؛ (ت) تصویر یک گارنت با ابعاد حدود ۱ تا ۲ سانتی‌متر که طی فرسایش به صورت گرد شده درآمده و در سطح تونالیت نمایان شده است؛ (ث) تصویر گارنت موجود در تونالیت که دارای ادخال‌هایی از بیوتیت، کوارتز و پلاژیوکلاز است.

پذیرفت (جدول ۲). بیوتیت‌ها در نمودار رده‌بندی میکاها (برگرفته از [۲۲]) بیشتر در گستره‌ی بین ترکیب آنیت تا سیدروفیلیت قرار می‌گیرند (شکل ۳-ب).  
**فلدسپار:** پلاژیوکلازها ۴۵ تا ۵۰ درصد سنگ را تشکیل می‌دهند و به صورت نیمه خودشکل تا خودشکل و دارای ماکل پریکلین و کارلسیادند (شکل ۲-ب). پلاژیوکلازها سوسوریتی شده‌اند و بیشترین دگرسانی در مرکز آنها صورت گرفته است. پلاژیوکلازها به صورت غالب با منطقه‌بندی نرمال تا نوسانی بوده (An<sub>45-54</sub>) و بیشتر از نوع پلاژیوکلازهای آندزین-لابرادوریت هستند (شکل ۳-الف). نتایج آنالیز این کانی در جدول ۳ آورده

بیوتیت: بیوتیت‌ها با فراوانی نسبی ۱۵ تا ۲۰ درصد، به صورت نیمه خودشکل با اندازه‌ی تقریبی ۲ تا ۳ میلیمتر و به صورت بی‌شکل با اندازه‌ی ۱ میلی‌متر دیده می‌شوند. چندرنگی شدیدی از قهوه‌ای روشن تا قهوه‌ای تیره و بافت پویکیلیتیک نشان داده و به صورت دسته‌هایی از دانه‌های کوچک پیرامون گارنت و آمفیبول با ادخال‌هایی از پلاژیوکلاز و زیرکن مشاهده می‌شوند (شکل ۲-ب). در نمونه‌های مورد بررسی بیوتیت‌های کلریتی شده و در تعدادی از نمونه‌ها هم‌رشدی بیوتیت و آمفیبول را نیز مشاهده می‌کنیم (شکل ۲-پ). محاسبه‌ی فرمول ساختاری بیوتیت‌ها بر اساس ۲۲ اتم اکسیژن صورت

گارنت‌های دارای  $\text{CaO} < 4\text{wt}\%$  دارای خاستگاه متاپلیتی هستند (مانند گارنت موجود در سنگ‌های دگرگون منطقه، جدول‌های ۳، ۴ و ۵ در [۸]). بنابر بررسی‌های جدید توسط [۲۴]، بزرگی دانه‌های گارنت تونالیت (یک تا دو سانتی‌متر، شکل ۲-ت) و ریزدانه بودن گارنت سنگ‌های دگرگون مجاور (در حدود دو میلیمتر، [۸])، و شواهد ترکیبی و شیمیایی آنها (شکل ۲-ت) بیانگر ماهیت متفاوت و ماگمایی فنوکریست‌های گارنت تونالیت دهنو هستند. بنابراین به‌کارگیری شیمی این کانی در بررسی‌های ترمودینامیکی سنگ‌میزبان آن با توجه به استفاده از آنالیز حاشیه‌ی گارنت‌ها ممکن و میسر است.

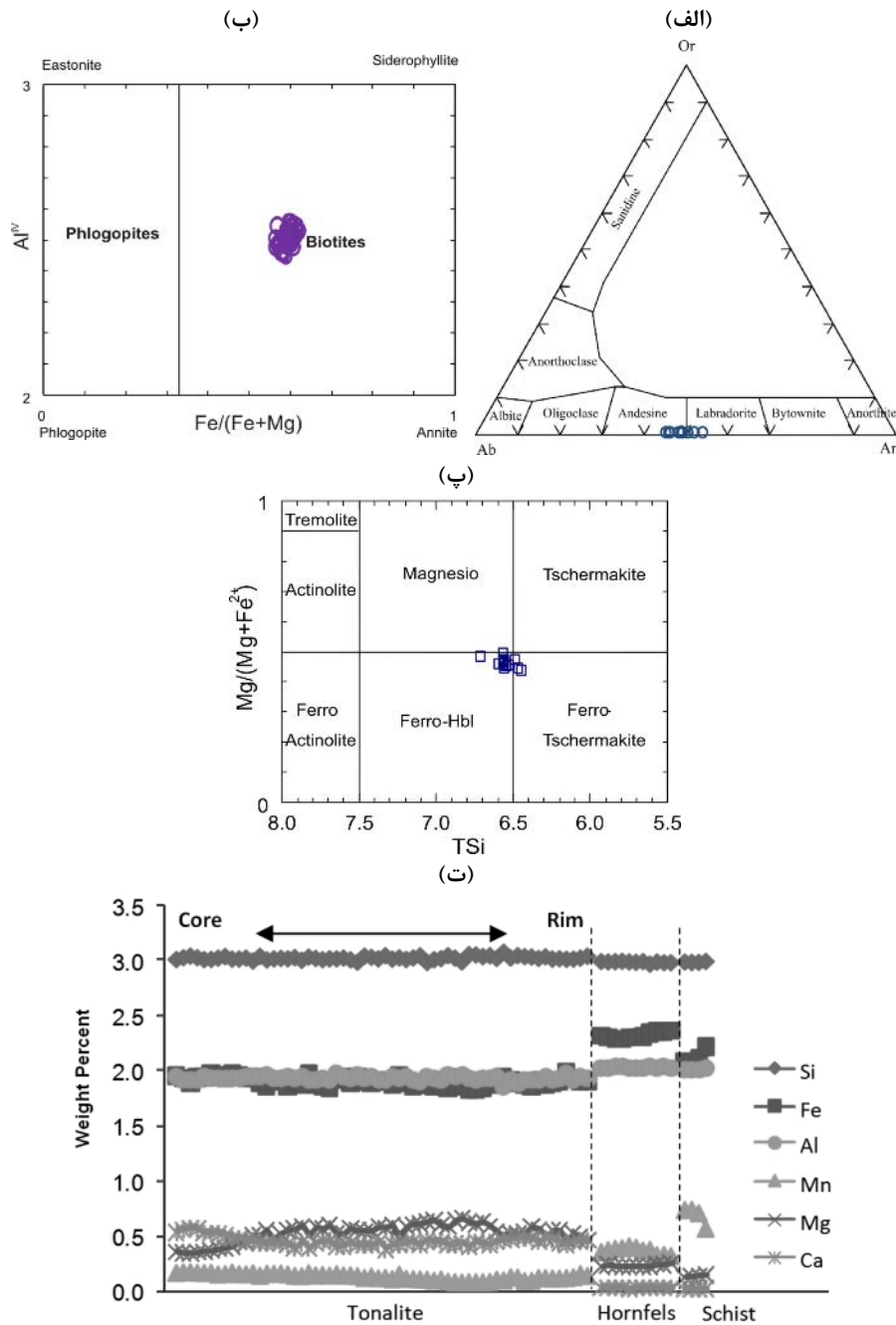
#### زمین‌دما-فشارسنجی تونالیت

به‌طور کلی بنابر بررسی‌های [۲۶] تونالیت‌ها سنگ‌هایی هستند که در شرایط فشار حدود ۶ تا ۹ کیلوبار و دمای ۷۰۰ الی ۹۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد تشکیل می‌شوند. با توجه به این‌که روش فشارسنجی آلومینیم در آمفیبول [۲۷] جدیدتر بوده و برای تونالیت مقادیر دقیق‌تری را ارائه می‌کند، در اینجا از نتایج این روش استفاده شد، و به این ترتیب میانگین گستره‌ی فشار برای تشکیل آمفیبول موجود در تونالیت ۶/۴ کیلوبار، با عمق میانگینی در حدود ۲۲/۴ کیلومتر پیشنهاد می‌شود [۲۳]. بر اساس این مقدار فشار، گستره‌ی دمایی به روش دماسنجی پلاژیوکلاز - هورنبلند [۲۱] و بر اساس واکنش  $\text{edenite} + 4 \text{quartz} = \text{tremolite} + \text{albite}$ ، بیانگر دمایی در حدود ۶۹۶ درجه‌ی سانتی‌گراد است. در جدول ۵، مقادیر فشار و دمای محاسبه شده برای ۹ زوج کانی پلاژیوکلاز - آمفیبول (داده‌ها از جدول‌های ۱ و ۳) آورده شده‌اند. لازم به یادآوری است که پلاژیوکلاز در سنگ‌های مورد بررسی، به‌ندرت دارای منطقه‌بندی ترکیبی بوده و اغلب آنها فاقد این منطقه‌بندی هستند (شکل ۲-ب). در اینجا به‌منظور بهره‌گیری از روش دماسنجی پلاژیوکلاز - آمفیبول، از نتایج آنالیز پلاژیوکلازهای فاقد منطقه‌بندی که از نظر بافتی در تعادل با آمفیبول‌ها تشکیل شده‌اند، بهره گرفته شد.

با توجه به این‌که گارنت موجود در تونالیت از نوع فنوکریستی و حاصل تبلور از گدازه‌ی تونالیتی است [۲۳]، لذا استفاده از آن در تعیین مقادیر دما و فشار بیانگر شرایط ترمودینامیکی تبلور گدازه‌ی تونالیتی است. اکنون با توجه به این گستره‌ی دمایی و فشاری، به بررسی کاربرد گارنت به‌عنوان یک کانی مهم در بررسی‌های ترمودینامیکی تبلور سنگ‌های آذرین منطقه دهنو می‌پردازیم، و با ماهیت حضور آن از نظر شرایط دما و فشار در این سنگ‌ها آشنا می‌شویم.

شده‌اند و محاسبه‌ی فرمول ساختاری آن بر اساس ۸ اتم اکسیژن و با استفاده از روش [۲۲] انجام گرفت. درجات گوناگون سردشدن یا کاهش درجه‌ی اشباع گدازه، همراه با نرخ آهسته انتشار Al و Si، در گدازه و بلورهای پلاژیوکلاز می‌تواند عامل منطقه‌بندی پیچیده برخی پلاژیوکلازها در نظر گرفته شود.

**گارنت:** گارنت یکی از مهم‌ترین کانی‌های ارتوسیلیکاته در سنگ‌های نفوذی و دگرگونی منطقه‌ی دهنو است، که به‌صورت درشت‌بلور در سنگ‌های نفوذی منطقه یافت می‌شود. قطر گارنت‌ها در نمونه‌ی دستی در حدود ۲ سانتی‌متر است (شکل ۲-ت) و در مقطع میکروسکوپی شکل ۲-ت، گارنت مورد بررسی با قطر ۳ تا ۵ میلیمتر و به رنگ قهوه‌ای تا قهوه‌ای تیره، خود شکل تا نیمه‌شکل‌دار دیده می‌شود که مرز خارجی آن بی‌شکل و نامنظم است. از آنجاکه برخی از گارنت‌ها طی فرآیندهای زمین‌ساختی و دگرگونی بعدی دستخوش خردشدگی شده‌اند، این پدیده در نمونه‌هایی که میلونیتی شده‌اند به‌خوبی قابل مشاهده است (شکل ۲-ت). بر اساس بررسی‌های شیمیایی و آنالیز ریزپردازشی، گارنت‌های موجود در تونالیت بیشتر از نوع آلماندین (-پیروپ-گروسولار) بوده (جدول ۴) و دارای ادخال‌هایی از بیوتیت، مسکوویت، کوارتز و پلاژیوکلاز ریزدانه هستند (شکل ۲-ت). کانی‌های کدر (ایلمنیت) نیز به مقدار اندک در گارنت مشاهده می‌شوند. برخلاف بررسی‌های پیشین (همانند [۱۲]) که خاستگاه گارنت‌ها را زنونکریستی معرفی کرده بودند، بررسی‌های اخیر [۲۳] روی گارنت‌های موجود در تونالیت دهنو، نشان می‌دهد که این گارنت‌ها کاملاً ماهیت غیردگرگونی، غیررسوبی و غیرمتاپلیتی دارند و خاستگاه آنها از نوع ماگمایی است و به‌عبارت دیگر این گارنت‌ها دارای خاستگاه فنوکریستی هستند. در شکل ۳-ت، ترکیب گارنت درشت‌دانه تونالیت با گارنت‌های ریزدانه موجود در سنگ‌های دگرگون مجاور توده مقایسه شده است. چنانکه در این تصویر به‌خوبی مشاهده می‌شود، هیچ ارتباط شیمیایی از مرکز تا حاشیه فنوکریست‌های گارنت تونالیت با گارنت سنگ‌های دگرگون مشاهده نمی‌شود، و به‌عبارت بهتر ترکیب شیمیایی گارنت موجود در تونالیت به‌طور یکنواخت (از مرکز تا حاشیه) با گارنت سنگ‌های دگرگون کاملاً تفاوت دارد. علاوه بر این، بر اساس بررسی‌های [۲۴] گارنت‌های دارای  $\text{MnO} < 4\text{wt}\%$  و  $\text{CaO} > 4\text{wt}\%$  ماهیت ماگمایی (ماگمای نوع I یا M) دارند (مانند گارنت موجود در تونالیت، جدول ۴ و [۲۵]) و



شکل ۳ الف) رده‌بندی پلاژیوکلازها (برگرفته از [۲۲])؛ ب) ترکیب بیوتیت‌های موجود در تونالیت دهنو در نمودار تقسیم‌بندی میکاها (برگرفته از [۲۲])؛ پ) رده‌بندی آمفیبول تونالیت دهنو (برگرفته از روش [۲۰]) [Ab=Albite, An=Anorthite, Or=Orthose, Hbl= Hornblende]؛ ت) مقایسه روند تغییرات عناصر از هسته تا حاشیه گارنت موجود در تونالیت با گارنت موجود در هورنفلس و شیست (داده‌های مربوط به گارنت شیست و هورنفلس بر گرفته از [۸]).

جدول ۵ نتایج محاسبه‌ی فشار (بر اساس روش آلومینیم موجود در آمفیبول [۲۷]) و دما (بر اساس روش هورنبلند - پلاژیوکلاز [۲۱]) و واکنش  $edenite + 4 quartz = tremolite + albite$  برای ۹ نمونه از آمفیبول‌ها (جدول ۱) و پلاژیوکلازهای (جدول ۳) موجود در تونالیت دهنو.

Sample No.	Plagioclase	۶۲۰	۶۲۴	۶۲۵	۶۲۹	۶۵۲	۶۵۶	۶۵۷	۶۵۹	۶۶۵	
	Amphibole	۶۰۵	۶۰۶	۶۰۷	۶۱۰	۶۱۱	۶۱۲	۶۱۳	۶۱۴	۶۱۷	Mean
Pressure (kbar)		۶.۳	۶.۶	۶.۶	۶.۶	۶.۶	۶.۴	۶.۲	۶.۳	۶.۳	۶.۴
Temperature (°C)		۶۷۱	۷۰۲	۶۸۶	۶۹۰	۷۱۶	۷۰۰	۷۰۲	۷۱۷	۶۸۶	۶۹۶



**فشار حاکم بر تبلور درشت بلورهای گارنت در تونالیت دهنو**

آزمایش‌های انجام گرفته روی سنگ‌های آتشفشانی مانند آندزیت، داسیت و ریوداسیت [۲۸-۲۹-۳۰] نشان می‌دهند که گارنت‌ها در ماگماهای با فشار ۵ تا ۷ کیلو بار ناپایدار می‌شوند. نتایج مشابهی نیز از ذوب سنگ‌های گری‌وک، پلینت و گنایس تونالیتی به دست آمدند [۳۱-۳۲-۳۳]. همچنین بنا بر [۳۴]، افزایش مقدار MnO گارنت (محتوای اسپسارتین) می‌تواند موجب افزایش گستره‌ی پایداری گارنت تا فشارهای پایین‌تر شود. در حقیقت، بر اساس پیشنهاد [۳۴]، میزان گروسولار و اسپسارتین موجود در گارنت نسبت به شرایط فشار و دما حساس است، به طوری که گروسولار موجود در گارنت با افزایش فشار افزایش یافته، در حالی که محتوای بالاتر Mn می‌تواند موجب پایداری گارنت در عمق‌های کم‌تر شود. لذا گارنت غنی از Mn ( $MnO > 4 \text{ wt}\%$ ) می‌تواند از گدازه‌های سیلیسی و در فشار  $\geq 5$  کیلو بار متبلور شود. با توجه به اینکه کاهش مقدار MnO گارنت (محتوای اسپسارتین) می‌تواند موجب افزایش گستره‌ی پایداری گارنت تا فشارهای بالاتر (بیشتر از ۵ کیلو بار) شود [۳۴]، با بررسی ترکیب گارنت موجود در تونالیت (جدول ۴) مشاهده می‌شود که گارنت موجود در آنها دارای مقدار بالای Mg و Ca و میزان  $Fe^{2+}$  و Mn کم‌تر بوده [۲۳]، و با استناد به یافته‌های مرجع یاد شده، تشکیل گارنت موجود در تونالیت، در فشارهای بالاتر از ۵ کیلو بار به خوبی تأیید می‌شود.

بر اساس بررسی‌های [۳۵] بر روی گارنت‌های نوع I داسیت‌های ستوچی و نیز دستاوردهای این کار پژوهشی روی گارنت‌های درون تونالیت دهنو، مشاهده می‌شود که آنها از اسپسارتین فقیر بوده (کم‌تر از ۷ درصد در ستوچی و کم‌تر از ۳ درصد در دهنو) و با کردیریت هم‌زیستی ندارند؛ بنابراین بنا بر پیشنهاد [۳۵]، فنوکریست‌های گارنت حاصل از ماگما در فشار ۵ تا ۷ کیلو بار تنه‌نشین شده‌اند. این مقدار فشار با مقادیر فشاری که از طریق فشارسنجی آمفیبول‌های ماگمایی موجود در تونالیت منطقه دهنو به دست آمده‌اند (فشار میانگین ۶٫۴ کیلو بار، [۲۳]) همخوانی دارد. از سوی دیگر، [۲۵] معتقد است که گارنت اولیه با CaO بالا، MnO پایین که همراه با پلاژیوکلاز غنی از Ca، هورنبلند و بیوتیت دیده می‌شود، می‌تواند در فشار بالا (۷ تا ۱۲ کیلو بار) تشکیل شود. این مسئله به خوبی حاکی از عمق نسبتاً بیشتر تشکیل گارنت نسبت به آمفیبول‌هاست.

**دمای حاکم بر تبلور درشت بلورهای گارنت در تونالیت دهنو**

از توزیع عناصر بین زوج کانی‌هایی که تعادل کانی‌شناسی و ترمودینامیکی دارند، می‌توان به‌عنوان ابزاری برای دماسنجی و نیز معیاری برای اندازه‌گیری میزان تعادل شیمیایی هنگام تشکیل سنگ استفاده کرد. بسیاری از جنبه‌های توزیع عناصر بین گارنت و زوج کانی دیگر توسط [۳۶] مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در همه‌ی این سیستم‌ها، اساس دماسنجی نسبت توزیع کاتیون‌ها، مخصوصاً Mg و Fe در زوج کانی‌هایی است که تعادل کانی‌شناسی و ترمودینامیکی دارند. چون نسبت توزیع تابعی از دماست، لذا با اندازه‌گیری مقدار کاتیون‌ها در زوج کانی‌ها و با استفاده از منحنی‌های وابسته می‌توان دمای تشکیل سنگ را شناخت. ترکیب شیمیایی گارنت و کانی‌های همراه موجود در سنگ می‌تواند بیانگر فشار و دماهای بالا باشد. هم‌رشدی این کانی‌ها نشان می‌دهد که یک تعادل ماگمایی بین کانی‌ها وجود دارد که از آن می‌توان برای بررسی شرایط دما و فشار تشکیل گارنت استفاده کرد.

گارنت‌های آذرین اولیه دارای مفاهیم خاستگاهی متفاوتی هستند، زیرا ترکیب آنها وابسته به نوع ماگما و فشار و دمایی است که بر اثر آن‌ها متبلور شده‌اند [۲۹-۳۷]. مثلاً مجموعه کانی‌های گارنت + پلاژیوکلاز + آمفیبول در فشار ۸-۱۳ کیلو بار و دمای ۸۲۰-۹۲۰ درجه‌ی سانتی‌گراد در یک گدازه‌ی داسیتی با ۵٪ آب پایدار است [۲۹].

بنا بر ادعای [۳۰] آلمان‌دینی که در دمای گدازه‌ی سنگ‌های آندزیتی یا داسیتی دیده می‌شود، حاصل ذوب‌بخشی رسوب‌های پلیتی در فشار بیشتر از ۹ کیلو بار (در اعماق بیشتر از ۲۵ کیلومتری) است، در حالی که اسپسارتین با درصد مولی کم‌تر از ۱۰٪، نشان‌دهنده‌ی تشکیل گارنت در اعماق بیشتر از ۱۸ کیلومتری است [۳۰-۳۴]. این بررسی‌های تجربی به خوبی وابستگی بین شرایط P-T بالا (غنی از آلمان‌دین) و شرایط P-T پایین (غنی از اسپسارتین) را در گارنت موجود در سنگ‌های گرانیتیویدی تأیید می‌کند.

به گفته‌ی [۳۸]، گارنت‌های با نسبت  $X_{Mn} = [Mn/(Mn + Fe + Mg)]$  برابر ۰٫۱ تا دمای ۴۷۰ درجه‌ی سانتی‌گراد تشکیل نمی‌شوند که این نسبت در گارنت‌های موجود در تونالیت دهنو در حدود ۰٫۳ تا ۰٫۱ است که مؤید تشکیل این گارنت‌ها در دمایی بالاتر از ۴۷۰°C است.

آندزیتی در ۹۰۰ تا ۹۵۰ درجه سانتی‌گراد و فشار بیشتر از ۷ کیلوبار تشکیل می‌شود [۲۵، ۲۹، ۴۰، ۴۲، ۴۳]، ولی در تونالیت منطقه‌ی دهنو تشکیل گارنت‌ها (با توجه به ترکیب شیمیایی مشابه گارنت‌ها در هر دو بررسی) که در یک گدازه‌ی سیلیسی‌تر و اسیدی‌تر شکل گرفته‌اند در دمای کمتر (۸۰۰ الی ۹۵۰ درجه سانتی‌گراد) و فشار کمتری (۷ الی ۱۲ کیلوبار) امکان‌پذیر بوده است.

#### برداشت

هورنبلند بیوتیت تونالیت مزوزوئیک رخنمون یافته در غرب دهنو با بافت دانه‌ای و شامل کانی‌های کوارتز، پلاژیوکلاز کلسیم‌دار (آندزین تا لابرادوریت)، گارنت (بیشتر آلماندین)، بیوتیت (آنیت تا سیدروفیلیت)، آمفیبول کلسیک (بیشتر فروهورنبلند) و کانی‌های فرعی کلریت، اپیدوت، کلسیت و ایلمنیت است.

با توجه به روش فشارسنجی آلومینیم در آمفیبول [۲۷] و روش دماسنجی هورنبلند-پلاژیوکلاز [۲۱]، گستره‌ی میانگین فشار و دمای تشکیل آمفیبول موجود در تونالیت ۶/۴ کیلوبار و ۶۹۶ درجه سانتی‌گراد به دست آمد. با توجه به اینکه گارنت موجود در تونالیت از نوع فنوکریستی و حاصل تبلور از خود گدازه تونالیتی است [۲۳]، لذا مقادیر دما و فشار تبلور آن باید با مقادیر دما و فشار تبلور گدازه‌ی تونالیتی همخوانی داشته باشد. بر اساس بررسی‌های شیمیایی و بررسی شیمی کانی‌ها، گارنت موجود در تونالیت منطقه‌ی دهنو غالباً از نوع آلماندین است. میزان CaO موجود در این گارنت‌ها در حدود ۴/۹۱ تا ۵/۴۸ درصد وزنی و میزان MnO آنها در حدود ۱/۸۹ تا ۲/۴۰ درصد وزنی است، به این ترتیب مشاهده شد که گارنت موجود در تونالیت دارای مقدار بالای Mg و Ca و مقدار پایین  $Fe^{2+}$  و Mn بوده و با استناد به نتایج بررسی‌های پیشین [۲۸، ۲۹، ۳۰، ۳۲، ۳۴، ۳۷]، (یعنی آلماندین با  $CaO > 4 \text{ wt}\%$  و  $MnO < 4 \text{ wt}\%$ )، تشکیل گارنت موجود در تونالیت، در فشارهای بالاتر از ۶/۴ و حتی ۷ تا ۱۲ کیلوبار به خوبی تأیید می‌شود. همچنین با توجه به یافته‌های پژوهشگران در مورد شرایط دمایی حاکم بر تشکیل گارنت [۲۵، ۲۹، ۳۰، ۳۴، ۳۵، ۳۹، ۴۳]، گارنت‌های موجود در تونالیت منطقه دهنو را که دارای CaO بالا، MnO پایین و پلاژیوکلاز Ca هستند، می‌توان به شرایط بالاتر از دمای محاسبه شده‌ی ۶۹۶ درجه سانتی‌گراد (بر اساس زمین‌دماسنج هورنبلند-

در واقع، گارنت اولیه با CaO بالا، MnO پایین و همراه با پلاژیوکلاز غنی از Ca، در فشار بالا (۷ تا ۱۲ کیلوبار)، دمای بالا (۸۰۰ الی ۹۴۰ درجه سانتی‌گراد) و همراه با هورنبلند و بیوتیت دیده می‌شود [۲۵]؛ بنابراین گارنت‌های موجود در تونالیت منطقه‌ی دهنو که خاستگاه فنوکریستی دارد [۲۳] و دارای CaO بالا، MnO پایین (جدول ۴) و همراه با پلاژیوکلاز Ca دار (جدول ۳) هستند نیز در چنین شرایط مشابه فشار و دما تشکیل شده‌اند. به عبارت دیگر این مسئله با توجه به میزان میانگین فشار محاسبه شده بر اساس فشار تشکیل آمفیبول‌ها که در حدود ۶/۴ کیلوبار است، و عمق تشکیل کم‌تر آنها نسبت به گارنت و نیز متوسط دمای محاسبه شده برای تبلور آمفیبول و پلاژیوکلاز (جدول ۵) که تقریباً معادل ۶۹۶ درجه سانتی‌گراد به دست آمده تأیید می‌شود و نشان می‌دهد که گارنت‌هایی که در عمق بیشتری نسبت به آمفیبول‌ها تشکیل شده‌اند، می‌توانسته‌اند دارای دمای تبلوری از ۸۰۰ تا ۹۴۰ درجه سانتی‌گراد باشند.

بنابر [۳۰] گارنت غنی از آلماندین موجود در ماگماهای سیلیسی، یک فاز میعان یا نزدیک به شرایط میعان است که در شرایط فشار بالا (۹ تا ۱۸ کیلوبار) پایدار می‌ماند. بررسی‌های بعدی [۲۹، ۳۴، ۳۹، ۴۳] نشان داد که آلماندین غنی از کلسیم ( $CaO > 4 \text{ wt}\%$ ) و فقیر از منگنز ( $MnO < 4 \text{ wt}\%$ ) می‌تواند از ماگماهای آندزیتی آبدار و در فشارهای نسبتاً بالا (بیش از ۷ کیلوبار) و دماهای ۹۰۰ تا ۹۵۰ درجه سانتی‌گراد متبلور شود.

بر اساس بررسی‌های شیمی کانی‌ها، گارنت موجود در تونالیت منطقه دهنو غالباً از نوع آلماندین است. میزان CaO موجود در این گارنت‌ها در حدود ۴/۹۱ تا ۵/۴۸ درصد وزنی و میزان MnO آنها در حدود ۱/۸۹ تا ۲/۴۰ درصد است (جدول ۴). این مقادیر نشان می‌دهند که گارنت‌های مورد بررسی با معیارهای یاد شده همخوانی دارند، یعنی دمای تشکیل آنها بیشتر از ۴۷۰ درجه سانتی‌گراد پیشنهادی [۳۸] و کمتر از ۹۰۰-۹۵۰ درجه سانتی‌گراد پیشنهاد شده توسط [۲۹، ۳۴، ۳۹، ۴۳] است. با توجه به آنچه گفته شد، و نیز نتایج کاربرد روش دماسنجی آمفیبول-پلاژیوکلاز برای تونالیت مورد بررسی (که در آن دمایی در حدود ۶۹۶ درجه سانتی‌گراد، در فشار متوسط ۶/۴ کیلوبار به دست آمده)، و نیز [۲۵] این مسئله به خوبی تأیید می‌شود که گارنت در یک گدازه‌ی حدواسط و

- تهران، (۱۳۷۰) ۲۵۰ ص.
- [۱۴] هاتفی، ر.، "مطالعه سنگ‌های دگرگونی ناحیه‌ای و توده‌های نفوذی منطقه دهنو (شمال غرب مشهد)". پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت معلم تهران، (۱۳۸۲) ۱۱۲ ص.
- [15] Karimpour M.H., Farmer L., Ashouri C., Saadat S., "Major, Trace and REE geochemistry of Paleo-Tethys Collision-Related Granitoids from Mashhad, Iran", *Journal of Sciences, Islamic Republic of Iran* 17(2) (2006) 127-145.
- [16] Karimpour M.H., Stern C.R., Farmer L., "Zircon U-Pb geochronology, Sr-Nd isotope analyses, and petrogenetic study of the Dehnow diorite and Kuhsangi granodiorite (Paleo-Tethys), NE Iran", *Journal of Asian Earth Sciences* 37 (2010) 384-393
- [17] Alberti A., Nicoletti M., Petrucciani C., "K-Ar ages of micas of Mashhad granites (Khorasan, North-Eastern Iran)", *Period, Mineralogy* 42 (1973) 483-493.
- [18] Homam S.M., "The occurrence and origin of atoll garnet in hornblende schists from the contact aureole of the Mashhad granite, NE Iran", *Iranian Journal of Science and Technology* 30 A1 (2006) 127-132.
- [19] Yuan C., Sun M., Xiao W., Wilde S., Li X., Liu X., Long X., Xia X., Ye K., Li J., "Garnet-bearing tonalitic porphyry from East Kunlun, Northeast Tibetan Plateau: implications for adakite and magmas from the MASH Zone", *International Journal of Earth Sciences* (2008) DOI 10.1007/s00531-008-0335-y.
- [20] Leake B.E., Woolley A.R., Arps C.E.S., Birch W.D., Gilbert M.C., Grice J.D.F., Hawthorne C., Kato A., Kisch H.J., Krivovichev V.G., Linthout K., Laird J., Mandarino J., Maresch W.V., Nickel E.H., Rock N.M.S., Schumacher J.C., Smith D.C., Stephenson N.C.N., Ungaretti E.J.W., "Nomenclature of amphiboles, Report of the Subcommittee on Amphiboles of the International Mineralogical Association Commission on New Minerals and Mineral Names", *European Journal of Mineralogy* 9 (1997) 623-651.
- [21] Holland T., Blundy J., "Nonideal interactions in clastic amphiboles and their bearing on amphibole-plagioclase thermometry", *Contributions to Mineralogy and Petrology* 116 (1994) 433-447.
- [22] Deer W.A., Howie R.A., Zussman J., "An Introduction to the Rock forming Minerals", Longmans (1992) 696 p.
- پلاژیوکلاز) تا ۸۰۰ الی ۹۵۰ درجه سانتی‌گراد و عمق تبلور بیشتر آنها نسبت به آمفیبول‌ها و پلاژیوکلازها نسبت داد.
- مراجع**
- [۱] شیردشت‌زاده ن.، صمدی ر.، "آشنایی با روش‌های زمین‌دماسنجی و زمین‌فشارسنجی"، اصفهان، (۱۳۸۹) ۹۹ ص.
- [2] Deer W.A., Howie R.A., Zussman J., "Rock Forming Minerals, Double Chain Silicates", 2<sup>nd</sup> Edition, London, Bath, Geological Society of London 2B (1997) 764 p.
- [3] Razavi M.H., Masoudi, F., Alaminia, Z., "Garnet-Biotite Chemistry for Thermometry of Staurolite Schist from South of Mashhad, NE Iran", *Journal of Sciences, Islamic Republic of Iran* 19(3) (2008) 237-245.
- [4] Alavi M., Majidi B., "Petrology and geology of metamorphic and intrusive rocks of the Mashhad area", Geological Survey of Iran (1972).
- [5] Alavi M., "Sedimentary and structural characteristics of the Paleo-Tethys remnants in northeastern Iran", *Geological Society of America Bulletin* 103 (1991) 983-992.
- [6] Alavi M., "Thrust tectonics of the Binaloud region, NE Iran", *Tectonics* 11(2) (1992) 360-370.
- [7] Lammerer B., Langheinrch G., Danai M., "The tectonic evolution of Binaloud mountains. Geodynamic project (Geotraverse) in Iran", Geological Survey of Iran 51 (1983) 519 P.
- [۸] صمدی ر.، ولی‌زاده م. و.، میرنژاد ح.، کلاوآباتا ه.، "زمین‌دماسنجی و زمین‌فشارسنجی سنگ‌های دگرگونی منطقه دهنو (شمال غرب مشهد)". فصلنامه علوم زمین، (۱۳۸۹) (در حال چاپ).
- [9] Majidi B., "Etude Petrostructurale de la ergion de Mashhad (Iran)", These docteur, Ingeniever, University Science, de Grenoble, France (1978) 277 p.
- [10] Majidi B., "The geochemistry of ultrabasic and basic lava flows occurrences in northeastern Iran. In: Geodynamic Project in Iran", Geological Survey of Iran report 51 (1983) 463-477.
- [11] Moazez Lesco Z., Plimer I.R., "Intrusive and Polymeta morphic Rocks of the Darakht-Bid Area, near Mashhad, Iran", Band 68(1) (1978) 318-383.
- [12] Plimer I.R., Moazez Lesco Z., "Garnet Xenocrysts in the Mashhad Granite, NE Iran", *Geologische Rundschau* 69(3) (1980) 801-810.
- [۱۳] میرنژاد ح.، ژئوشیمی و پتروگرافی گرانیت‌ها و پگماتیت‌های مشهد، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه

- [33] Patinao Douce A.E., Johnston A.D., "Phase equilibria and melt productivity in the pelitic system: implications for the origin of peraluminous granitoids and aluminous granulites", Contributions to Mineralogy and Petrology 107 (1991) 202-218.
- [34] Green T.H., "Garnet in Silicic liquids and its possible use as a P-T indicator", Contributions to Mineralogy and Petrology 65 (1977) 59-67.
- [35] Kawabata H., Takafuji N., "Origin of garnet crystals in calcalkaline volcanic rocks from the Setouchi volcanic belt, Japan", Mineralogical Magazine 69 (2005) 951-971.
- [36] Kretz R., "Chemical study of garnet, biotite and hornblende from gneisses of Southwestern Quebec, with emphasis on the distribution of elements in co-existing minerals", Journal of Geology 67 (1959) 371-402.
- [37] Green T.H., "Garnet in Silicic liquids and its possible use as a P-T indicator", Contributions to Mineralogy and Petrology 65 (1977) 59-67.
- [38] Spear F.S., Cheney J.T., "A petrogenetic grid for pelitic schists in the system  $\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{FeO} - \text{MgO} - \text{K}_2\text{O} - \text{H}_2\text{O}$ ", Contributions to Mineralogy and Petrology 101 (1989) 149-164.
- [39] Hensen D.J., Green D.H., "Experimental study of the stability of cordierite and garnet in pelitic compositions at high pressures and temperatures", Contributions to Mineralogy and Petrology 38 (1973) 151-166.
- [40] Green T.H., Hellman P.L., "Fe-Mg partitioning between coexisting garnet and phengite at high pressure, and comments on a garnet-phengite geothermometer", Lithos 15 (1982) 253-266.
- [41] Green T.H., "Experimental generation of cordierite or garnet-bearing granitic liquids from a pelitic composition", Geology 4 (1976) 85-88.
- [42] Clemens J.D., Wall V.J., "Origin and crystallization of some peraluminous (S-type) granitic magmas", The Canadian Mineralogist 19 (1981) 111-131.
- [43] Conrad W.K., Nicholls I.A., Wall V.J., "Water saturated and undersaturated melting of metaluminous and peraluminous crustal compositions at 10 kb: Evidence for the origin of silicic magmas in the Taupo Volcanic Zone, New Zealand, and other occurrences", Journal of Petrology 29 (1988) 765-803.
- [۲۳] صمدی ر.، شیردشت‌زاده ن.، "گارت: مفاهیم کانی‌شناسی، خاستگاه و زمین‌دما فشارسنجی"، مشهد (۱۳۸۹)، صفحه ۲۱-۵۰.
- [24] Harangi S.Z., Downes H., Ko'sa L., Szabo' C.S., Thirlwall M.F., Mason P.R.D., "Almandine garnet in calc-alkaline volcanic rocks of the Northern Pannonian Basin (Eastern-Central Europe): geochemistry, petrogenesis and geodynamic implications", Journal of Petrology 42 (2001) 1813-1843.
- [25] Samadi R., Mirnejad H., Shirdashtzadeh N., Kawabata H., "Petrology of tonalitic rocks of Dehnow (Northwest of Mashhad, Iran)", Proceeding 1<sup>st</sup> International Applied Geological Congress (2010) 1265.
- [26] Kenah C., Hollister L.S., "Anatexis in the Central Gneiss Complex, British Columbia, in Migmatites, Melting and Metamorphism", edited by Atherton M.P., Gribble C.D., Nantwich, England (1983) 142-162.
- [27] Schmidt M.V., "Amphibole composition in tonalite as a function of pressure: an experimental calibration of the Al in hornblende barometer", Contributions to Mineralogy and Petrology 110 (1992) 304-310.
- [28] Green T.H., "Crystallization of calc-alkaline andesite under controlled high-pressure hydrous conditions", Contributions to Mineralogy and Petrology 34 (1972) 150-166.
- [29] Green T.H., "Experimental phase equilibrium studies of garnet-bearing I-type volcanics and high-level intrusives from Northland, New Zealand", Trans R Soc Edinb Earth Science 83 (1992) 429-438.
- [30] Green T.H., Ringwood A.E., "Origin of Garnet Phenocrysts in Calc-Alkaline Rocks", Contributions to Mineralogy and Petrology 18 (1968) 163-174.
- [31] Skjerlie K.P., Johnston A.D., "Fluid-absent melting behavior of an F-rich tonalitic gneiss at mid-crustal pressures; implications for the generation of anorogenic granites", Journal of Petrology 34 (1993) 785-815.
- [32] Vielzeuf D., Montel J.M., "Partial melting of metagreywackes, Part I. Fluid-absent experiments and phase relationships", Contributions to Mineralogy and Petrology 117 (1994) 375-393.