

شیمی کانی آمفیبول و دما - فشارسنجی عمق جای گیری توده گرانیتوئیدی تویه دروار، جنوب باختر دامغان، سمنان

آذین نادری*، حبیب الله قاسمی؛

دانشگاه صنعتی شاهرود، دانشکده علوم زمین، گروه پترولوژی، ژئوشیمی و زمین شناسی اقتصادی، لمبرینی پاپادوپولو؛ دانشگاه Auth، تسالونیک یونان، گروه کانی شناسی، پترولوژی و زمین شناسی

دریافت ۹۶/۰۸/۰۷

پذیرش ۹۷/۰۲/۲۰

چکیده

توده گرانیتوئیدی تویه دروار در ۵۰ کیلومتری جنوب باختر دامغان، در جنوب زون البرز خاوری قرار گرفته است. این توده در داخل واحدهای سنگی پالئوزوئیک زیرین (سازندهای باروت، زاگون و لالون) نفوذ کرده است. بر اساس شواهد صحرایی و سنگ نگاری، این توده از مونزونیت، کوارتز مونزونیت و مونزودیوریت تشکیل شده است. ترکیب کانیایی توده شامل پلاژیوکلاز، آکالی فلدسپار، کوارتز ± بیوتیت ± آمفیبول است. مگنتیت، زیرکن، آپاتیت، تیتانیت و پیریت کانی‌های فرعی و سریسیت، اپیدوت، کلسیت و کلریت کانی‌های ثانویه هستند. آمفیبول‌های موجود در سنگ‌های این توده از نوع کلسیم‌دار فشار کم با ترکیب فروهورنبلند و با منشأ آذرین هستند. به‌کارگیری روش‌های دما-فشارسنجی به‌ترتیب دمای ۶۵۰-۷۳۰ درجه سانتی‌گراد و فشار کم‌تر از ۲ کیلو بار را برای توقف تبادل و تعادل نهایی آمفیبول در توده نفوذی تویه دروار نشان می‌دهد که با عمق جای‌گیری کم‌تر از ۵ کیلومتر توده سازگار است. وجود بافت‌های ریزبلور واکنشی هیپرسالوس تا ساب‌سالووس (پرتیتی، میرمکیتی، گرافیک، گرانوفیری) در سنگ‌های توده و نبود دگرگونی همبری آشکار در اطراف آن، نشان‌گر بالا آمدن و جای‌گیری دی‌پیری توده در حالت نسبتاً جامد و سرد در اعماق کم پوسته است. رگه‌های معدنی اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن- منگنز، فلوریت، باریت، و سرب و روی در سنگ‌های میزبان توده، نیز از نشانه‌های آشکار برای تأیید این گفته است.

واژه‌های کلیدی: شیمی آمفیبول، دما- فشارسنجی، گرانیتوئید، تویه دروار، دامغان.

مقدمه

به‌کارگیری هنر تجزیه نقطه‌ای تک کانی، یکی از مهم‌ترین عوامل تحول چشم‌گیر در علم پترولوژی بوده است. با توجه به این‌که بررسی تغییرات بسیار جزئی توزیع غلظت عناصر، حتی در لایه‌های متناوب و بسیار ظریف کانی‌ها با تجزیه تک کانی امکان‌پذیر شده است، لذا توانایی قابل‌توجه کانی‌هایی مانند آمفیبول، بیوتیت و فلدسپار در تعیین خصوصیات ماگمایی گرانیتوئیدها مورد توجه قرار گرفته است. هم‌چنین برآورد پارامترهای فیزیکوشیمیایی و عمق جای‌گیری توده‌های نفوذی می‌تواند اطلاعات مفیدی از فرآیندهای زمین‌ساختی ایجاد شده در نوارهای کوهزایی فراهم کند [۱]. خانعلی‌زاده [۲] برای اولین بار در قالب پایان‌نامه کارشناسی ارشد به بررسی پتروگرافی، ژئوشیمی و جای‌گاه

تکتونیک توده تویه دروار پرداخته است. نظر به این که تنها پژوهش انجام شده روی این توده با استفاده از پژوهش‌های صحرایی، پتروگرافی و ژئوشیمی عناصر اصلی و کمیاب است و چون مطمئن‌ترین روش برای تعیین ماهیت گرانیتوئیدها استفاده از روش‌های دقیق شیمی کانی‌ها و پژوهش‌های ژئوشیمی ایزوتوپی است، لذا در این پژوهش، شیمی کانی آمفیبول و دما-فشارسنجی توده گرانیتوئیدی تویه دروار بررسی شده است. از آنجا که آمفیبول‌ها در طیف وسیعی از دما (۴۰۰-۱۱۵۰ درجه سانتی‌گراد) و فشار (۱-۲۳ کیلو بار) پدیدارند، بنابراین مناسب‌ترین کانی در دما-فشارسنجی محسوب می‌شوند [۴]، [۳]. لذا با استفاده از نتایج تجزیه میکروپروب این کانی و بهره‌گیری از نمودارها و روابط ریاضی بیان شده به وسیله پژوهش‌گران مختلف می‌توان به بررسی شرایط فیزیکی شیمیایی تبلور و جای‌گزینی توده پرداخت.

روش پژوهش

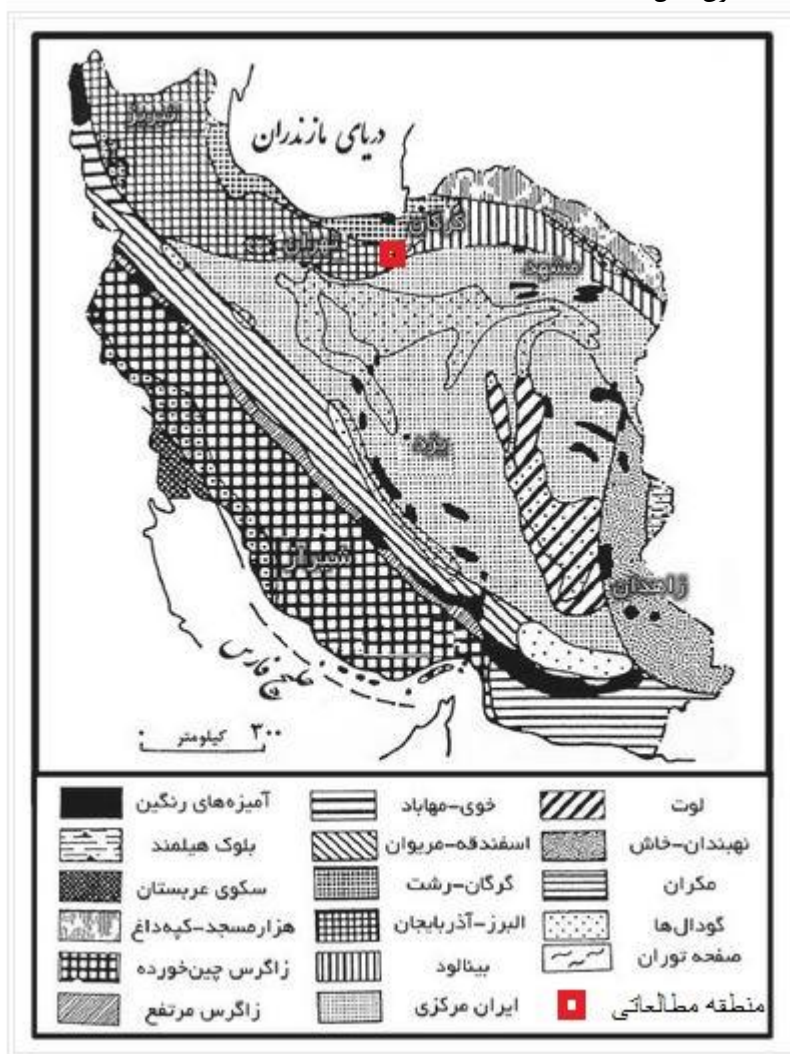
در این پژوهش برای بررسی توده گرانیتوئیدی تویه دروار طی بازدیدهای صحرایی از رخنمون‌های مختلف توده، تعداد ۱۲۰ نمونه سنگی برداشت شد. از این نمونه‌ها، ۸۰ مقطع نازک برای بررسی‌های سنگ‌شناختی و تعداد ۹ مقطع نازک- صیقلی برای تجزیه نقطه‌ای کانی‌آمفیبول با استفاده از میکروسکوپ الکترونی SEM^۱ (JEOL JSM-840A)، ساخت ژاپن مجهز به انرژی اسپکترومتری (INCA 250, Oxford) EDS^۲ با ولتاژ ۲۰ کیلووات و شدت جریان ۰/۴ آمپر در آزمایشگاه پترولوژی- کانی‌شناسی و زمین‌شناسی اقتصادی A.U.Th دانشگاه تسالونیک^۳ کشور یونان انجام شد. برای تجزیه SEM نمونه‌ها پوشش کربن آن‌ها با میانگین ضخامت ۲۰۰ A^۰ با استفاده از محفظه بخار JEOL-4x انجام شد. تصاویر الکترونی از کانی‌ها، به منظور تشخیص مناطقی با ترکیب شیمیایی متفاوت گرفته شد.

زمین‌شناسی

توده گرانیتوئیدی تویه دروار در شمال روستای تویه دروار در ۵۰ کیلومتری جنوب باختر دامغان در استان سمنان واقع شده است. این منطقه بخشی از نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ کیاسر [۵] است. در تقسیم‌بندی واحدهای ساختاری ایران [۶] این منطقه در دامنه جنوبی زون البرز خاوری قرار دارد (شکل ۱). نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰ منطقه تویه دروار به وسیله نویسندگان این پژوهش تهیه شده است (شکل ۲). بر اساس مشاهدات و برداشت‌های صحرایی، توده گرانیتوئیدی تویه دروار به صورت گنبدی شکل با مساحت حدود ۳۰ کیلومتر مربع به درون واحدهای سنگی پالئوزوئیک زیرین شامل آهک و دولومیت‌های استروماتولیتی سازند باروت و هم‌چنین به صورت سیل و دایک در داخل ماسه سنگ‌های سازند لالون نفوذ کرده است (شکل ۳ الف، ب و ث). در قسمت شمالی توده، آهک‌های کرمی شکل سازند الیکا با روند شمال باختر- جنوب‌خاور و شیب به سمت شمال روی توده نفوذی رانده شده‌اند (شکل ۳ الف). این توده اگرچه در ظاهر یک‌نواخت به نظر می‌رسد، اما در بعضی قسمت‌ها، سری‌های تفریق یافته‌تر سینیتی نیز در آن مشاهده می‌شود (شکل ۳ ج). در بعضی از قسمت‌ها، در محل تماس توده گرانیتوئیدی با سازند باروت آثار کانی‌زایی آهن دیده می‌شود (شکل ۳ پ و ت). [۷]، [۸]، [۹]، به بررسی واحدهای سنگی رسوبی پالئوزوئیک زیرین منطقه و [۱۰] به بررسی ژنز کانسار فلورین، روی، سرب و باریت موجود در سازند سلطانیه پرداخته است. پترولوژی و ژئوشیمی سنگ‌های توده نفوذی تویه دروار را [۲] بررسی کرده است. در نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ کیاسر [۵] این توده را به صورت نفوذی

1. Scanning Electron Microscope
2. Energy Dispersive Spectrometer
3. Thessaloniki

در داخل سازند جیروود معرفی کرده‌اند و سن دونین را به آن نسبت داده‌اند، اما بر اساس پژوهش‌های صحرایی و پتروگرافی [۱۱]، [۲] سنگ میزبان توده را سازند جیروود ندانسته‌اند و دولومیت و آهک‌های سازندهای سلطانیه و باروت را به‌عنوان میزبان این توده معرفی کرده‌اند و بنابراین، سن توده را قدیمی‌تر و احتمالاً پالئوزوئیک زیرین در نظر گرفته‌اند. اما بر اساس نتایج سن‌سنجی ایزوتوپی اورانیم- سرب بر روی کانی زیرکن، سن توده، اواخر کربنیفر پیشین (یعنی حدود ۳۲۷ میلیون سال) به‌دست آمده است [۱۲].

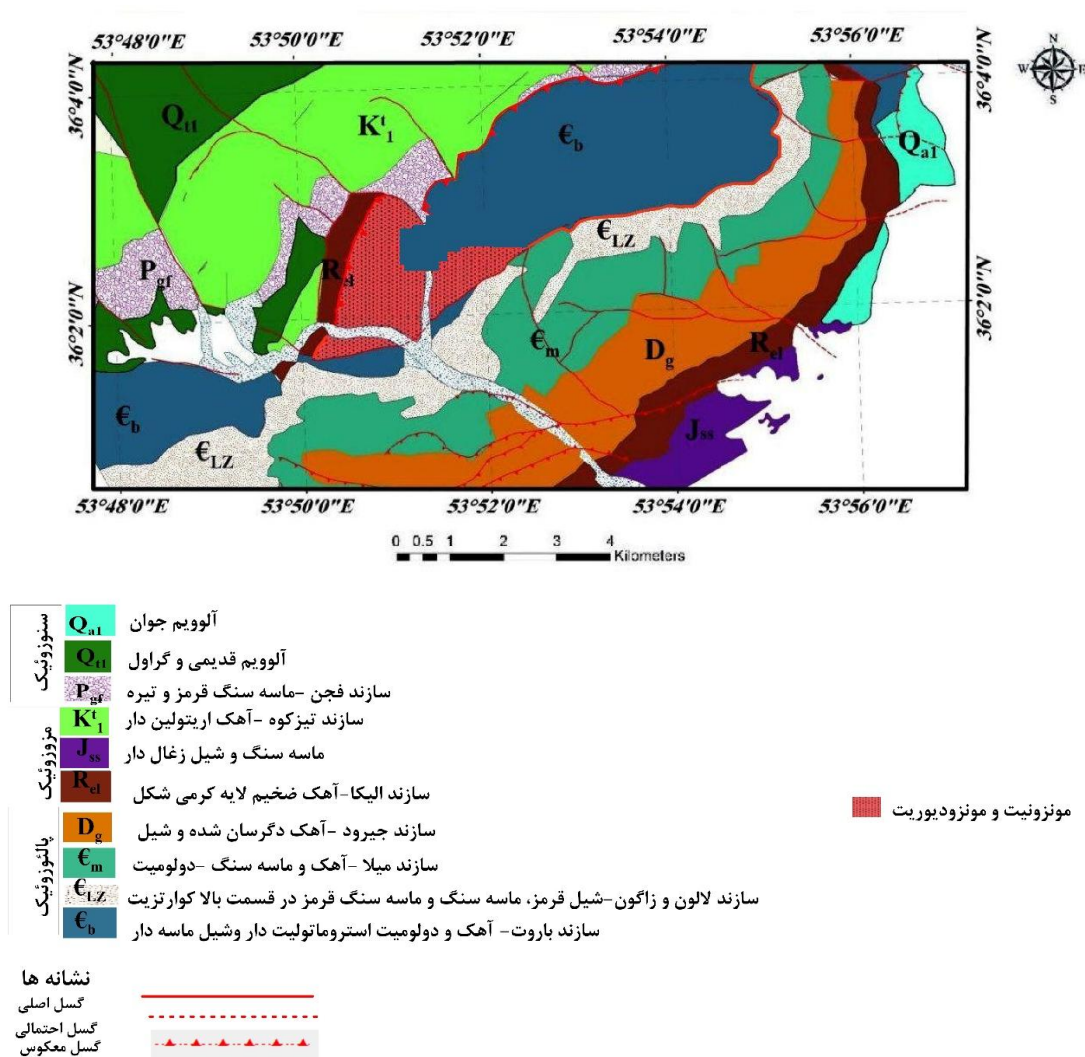


شکل ۱. موقعیت منطقه تویه‌دروار در تقسیم‌بندی واحدهای ساختمانی ایران زمین [۶]

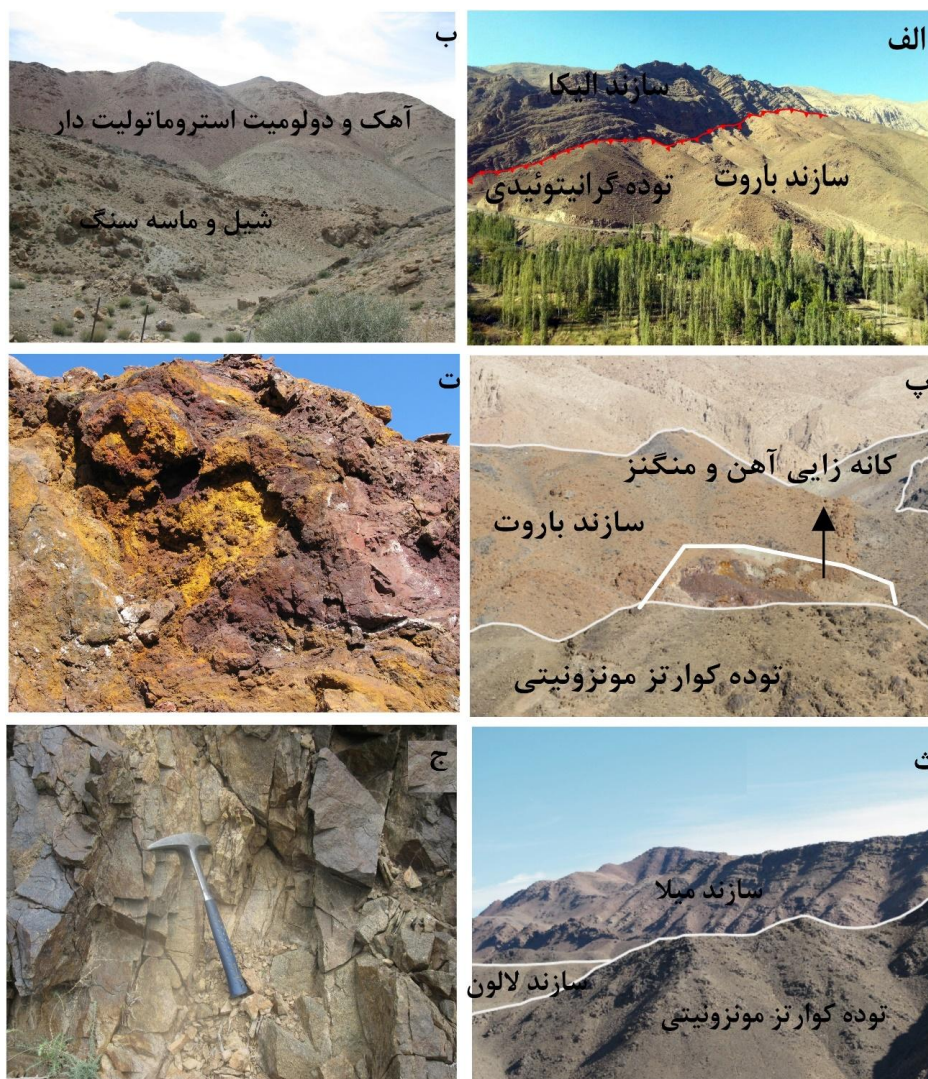
پتروگرافی

بر اساس پژوهش‌های پتروگرافی، سنگ‌های توده گرانیتوئیدی تویه‌دروار شامل مونزونیت، کوارتز مونزونیت و مونزودیوریت هستند. کانی‌های اصلی سازنده توده شامل پلاژیوکلاز، ارتوکلاز، کوارتز \pm آمفیبول \pm بیوتیت هستند. کانی‌های فرعی شامل ایلمنیت، مگنتیت، زیرکن، آپاتیت، تیتانیت و پیریت هستند. سریسیت، اپیدوت، کلسیت و کلریت نیز کانی‌های ثانویه هستند. بافت‌های ریزبلور دانه‌ای و واکنشی هیپرسالوس تا ساب‌سالوس شامل درهم

رشدی‌های میرمکیتی، پرتیتی، گرافیکی و گرانوفیری از بافت‌های غالب سنگ‌های توده هستند. پلاژیوکلاز، فراوان‌ترین کانی موجود در سنگ‌های این توده بوده، میانگین حجمی آن به ۴۰-۶۰ درصد می‌رسد. این کانی به صورت تخته‌ای خودشکل تا نیمه‌خودشکل با اندازه ۱ میلی‌متر تا ۳ سانتی‌متر دیده می‌شود و به سربیسیت و سوسوریت دگرسان شده است. آلکالی فلدسپار، به صورت درشت‌بلور نیمه‌خودشکل و بیش‌تر پرتیتی با درصد حجمی ۳۵-۳۰ و اندازه ۲ تا ۵۰ میلی‌متر در سنگ حضور دارد و به کانی‌های رسی دگرسان شده است. بافت پرتیتی به‌عنوان شاخص گرانیتوئیدهای غیرکوهزایی در این توده به فراوانی دیده می‌شود. فرایند تبلور هیپرسالووس در شرایط فشار آب یا فشار کل پایین (جای‌گیری و تبلور نهایی توده در عمق کم) عامل تشکیل این بافت در گرانیتوئید تویه‌دروار بوده است [۱۱]. کوارتز با ۳-۷ درصد حجمی و به صورت دانه‌ای و غیرخودشکل فضای بین دیگر کانی‌ها را پر کرده است. هم‌چنین، به صورت درهم رشدی‌های هیپرسالووس گرانوفیری و میرمیکتی نیز دیده می‌شود. بافت گرانوفیری حاصل رشد هم‌زمان و سریع تبلور کوارتز و آلکالی فلدسپار از یک ماگمای هیپرسالووس در عمق کم است [۱۳]. بافت میرمکیتی در اثر تبلور



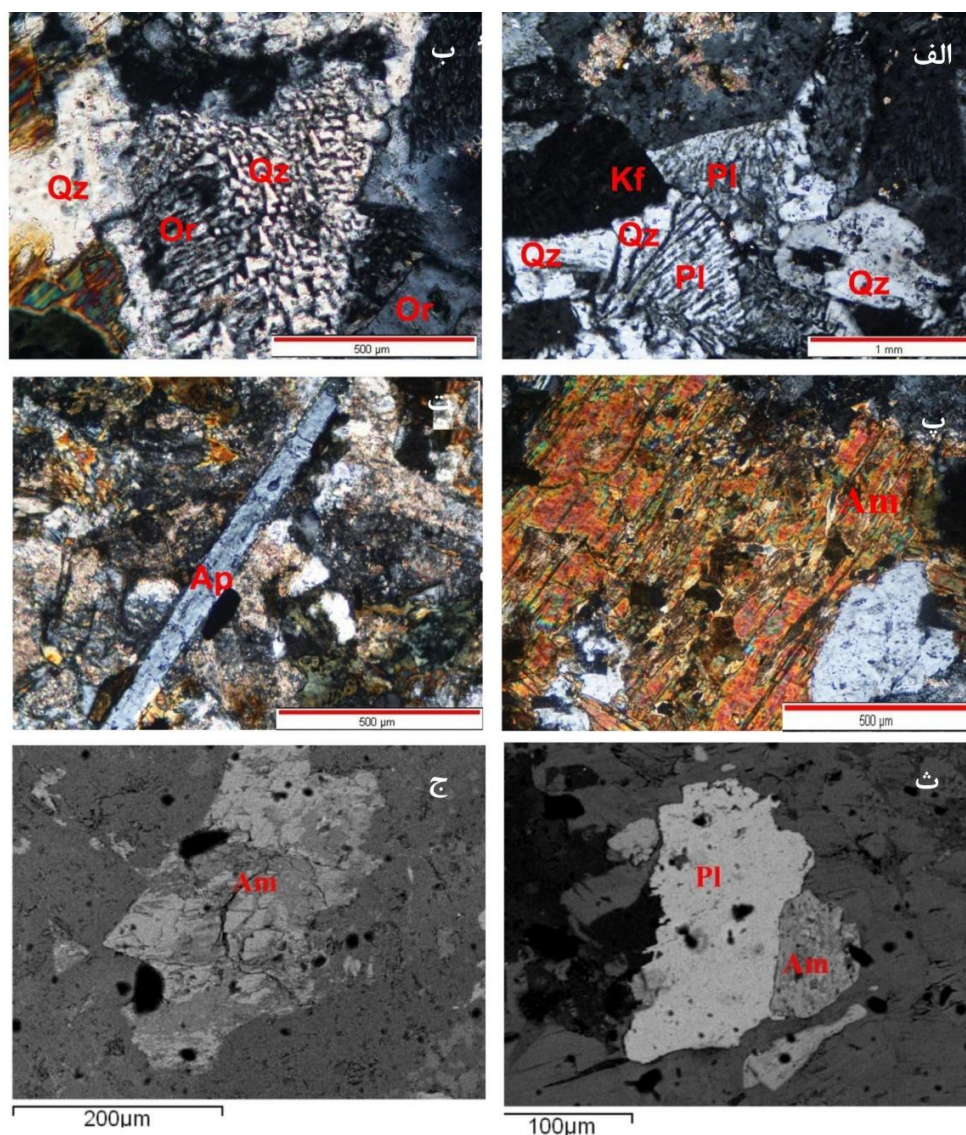
شکل ۲. نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰ منطقه تویه‌دروار که با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای لندست و برداشت‌های صحرائی تهیه شده است.



شکل ۳- روابط صحرائی توده نفوذی با سنگ‌های میزبان. الف) نمای کلی از راندگی سازند الیکا بر روی توده نفوذی و نفوذ توده به درون سازند باروت، دید به سمت شمال، ب) نمای کلی از آهک، دولومیت استروماتولیت دار، شیل و ماسه سنگ سازند باروت، دید به سمت خاور، پ) تزریق توده در سازند باروت و ایجاد کانه‌زایی آهن و منگنز در آن، دید به سمت شمال، ت) نمایی نزدیک از کانه‌زایی آهن و منگنز در محل تماس توده با سازند باروت، دید به سمت شمال، ث) نفوذ توده در ماسه‌سنگ‌های لالون، دید به سمت خاور. ج) نمایی نزدیک از بخش تفریق یافته توده گرانودیوریتی، دید به سمت خاور

مستقیم در خلال دگرریختی، متاسوماتیسم یا جدایش تشکیل می‌شود (شکل ۴ الف) [۱۴]. بافت گرافیکی هنگامی شکل می‌گیرد که بلورهای کوارتز با محور بلورشناسی واحد به اشکالی شبیه خطوط میخی همراه با بلورهای فلدسپات پتاسیم رشد و تبلور یابند (شکل ۴ ب). دو دلیل برای تشکیل درهم‌رشدی کانیایی به‌جای کانی‌های جدا از هم وجود دارد که شامل نرخ هسته‌بندی پایین حداقل یکی از کانی‌ها و نرخ انتشار پایین در مقایسه با نرخ رشد است [۱۵]. میرمکیت در دمای ۴۵۰-۵۰۰ درجه سانتی‌گراد [۱۶] و ۶۷۰-۵۰۰ درجه سانتی‌گراد تشکیل می‌شود [۱۷]، [۱۵]. بیوتیت و آمفیبول با ۳-۵ درصد حجمی، فازهای آهن و منیزیم‌دار در سنگ‌های توده گرانیتوئیدی تویه‌دروار هستند. بیوتیت به‌صورت نیمه‌خودشکل و با اندازه ۳-۸ میلی‌متر معمولاً به کلریت دگرسان شده

است. آمفیبول به صورت بلورهای منشوری نیمه خودشکل دیده می‌شود و در بعضی نمونه‌ها به کلریت، کلسیت و اپیدوت دگرسان شده است (شکل ۴ پ). کانی‌های فرعی شامل مگنتیت، زیرکن، آپاتیت، تیتانیت و پیریت به هر دو صورت دانه‌ای و یا ادخال در کانی‌های دیگر دیده می‌شوند. آپاتیت از مذاب بین دانه‌ای در هر مرحله از سرد شدن متبلور می‌شود [۱۵]. آپاتیت‌های سوزنی یکی از شواهد آکالین بودن ماگمای گرانیتوئید تویه‌دروار هستند (شکل ۴ ت) [۱۱]. کانی‌های ثانویه شامل کلریت، کلسیت، سریسیت و اپیدوت، از شواهد دگرسانی گرمابی در گرانیتوئید تویه‌دروار هستند (شکل ۴). تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی برگشتی کانی آمفیبول در شکل ۴ ث و ج نشان داده شده است.



شکل ۴. تصاویر میکروسکوپی در نمونه‌های گرانیتوئید تویه‌دروار. الف) بافت میرمکیتی در نمونه کوارتز مونزونیتی توده گرانیتوئیدی تویه‌دروار، ب) بافت گرافیکی در نمونه مونزودیوریتی توده گرانیتوئیدی تویه‌دروار، پ) تصویر آمفیبول در نمونه مونزودیوریتی توده گرانیتوئیدی تویه‌دروار، ت) آپاتیت سوزنی شکل در نمونه مونزونیتی توده تویه‌دروار، ث) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی برگشتی از کانی آمفیبول در یک نمونه مونزونیتی در توده گرانیتوئیدی تویه‌دروار، ج) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی برگشتی از کانی آمفیبول در تماس با پلاژیوکلاز در یک نمونه مونزودیوریتی در توده گرانیتوئیدی تویه‌دروار. (Am: آمفیبول، Ap: آپاتیت، Kf: پتاسیم فلدسپار، Or: ارتوز، Pl: پلاژیوکلاز، Qz: کوارتز)

شیمی کانی آمفیبول

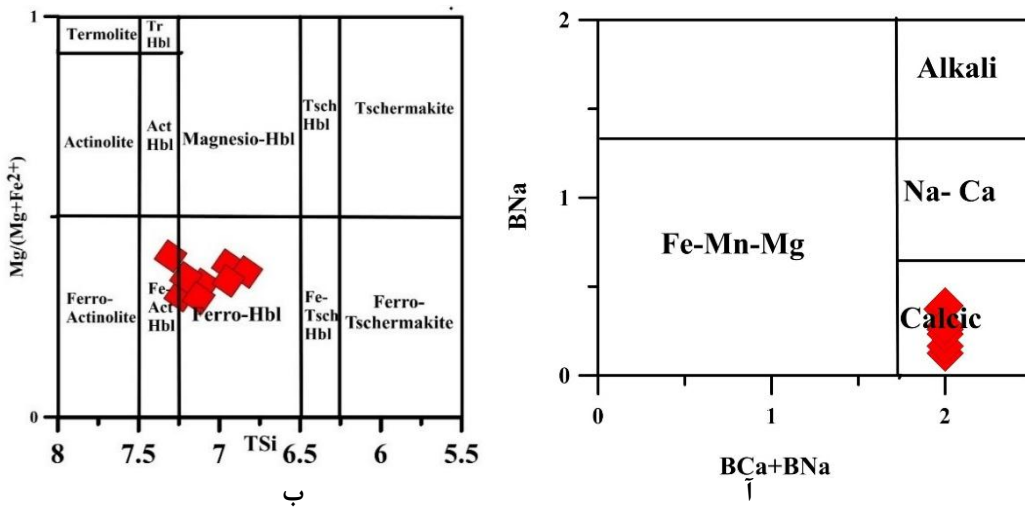
آمفیبول‌ها از گروه اینوسیلیکات‌های دو زنجیره‌ای بوده که ترکیب شیمیایی و ساختار کانی‌شناسی متنوعی دارند. هورنبلند، به دلیل محدوده پایداری گسترده، کاربردی‌ترین کانی برای بررسی‌های زمین دما-فشارسنجی محسوب می‌شود [۱]. میزان سدیم، کلسیم، تیتان و آلومینیم در ترکیب آمفیبول‌ها تابع دما، فشار و فوگاسیته اکسیژن است. همچنین کاتیون‌هایی مانند تیتانیم، آلومینیم کل و آلومینیم موجود در موقعیت چهار وجهی نسبت به دما حساس است، به طوری که افزایش دما سبب افزایش میزان تیتان و در نتیجه افزایش Al^{IV} می‌شود [۱۸]. به طور کلی به ازای ۱۰۰ درجه افزایش دما، ۰/۳ کاتیون به مقدار Al^{IV} اضافه می‌شود. مقدار Al^{VI} بر خلاف Al^{IV} متناسب با افزایش فشار افزایش یافته و دما بر آن بی‌تأثیر است. محاسبه مقدار Al^{IV} و Al^{VI} مبنای سنجش فشار با استفاده از ترکیب آمفیبول است. زیرا مقدار Al در آمفیبول تابع غلظت Al در ماگمای مادر نیست، بلکه تابع فشار حاکم بر تبلور آن است. ولی میزان Si در آمفیبول تابع میزان Si ماگما بوده و دما و فشار بر آن بی‌تأثیر است [۱۹].

نتایج تجزیه نقطه‌ای تعدادی از آمفیبول‌های موجود در مونزونیت‌ها، کوارتز مونزونیت و مونزودیوریت‌های توده گرانیتوئیدی تویه‌دروار در جدول ۱ ارائه شده است. محاسبه کاتیون‌ها و فرمول ساختاری آمفیبول بر اساس ۲۳ اکسیژن انجام گرفته است. همچنین تفکیک مقادیر Fe^{+2} و Fe^{+3} در فرمول ساختاری آمفیبول به روش [۳]، [۲۰]، انجام شده است. برای محاسبه فرمول ساختمانی آمفیبول‌ها، از روش نرمالیز کردن $Si+Ti+Al+Fe+Mn=13$ که بهترین نتیجه را برای محاسبه فرمول ساختاری آن‌ها ارائه می‌دهد، استفاده شده است [۲۱]. بر اساس رده‌بندی [۳]، آمفیبول‌های موجود در توده گرانیتوئیدی تویه‌دروار در گروه آمفیبول‌های کلسیک با ترکیب شیمیایی فروهورنبلند قرار می‌گیرند (شکل ۵ الف و ب). ترکیب آمفیبول کلسیک، انعکاسی از ترکیب سنگ در برگیرنده آن است [۲۲]. بر اساس نمودار Al^{IV} در مقابل Al^{VI} که تفکیک‌کننده آمفیبول‌های آذرین و دگرگونی است [۲۳]، آمفیبول‌های بررسی شده از نوع آمفیبول‌های کلسیک فشار پایین با منشأ آذرین هستند (شکل ۶ الف).

آمفیبول‌های ماگمایی، Si کم‌تر از ۷/۳ دارند در حالی که آمفیبول‌هایی با Si بیش‌تر از ۷/۳ بر اثر فرآیند ساب‌سالیدوس حاصل شده‌اند [۲۵]، [۲۶]، [۲۴]. افزایش دما باعث جای‌گزینی Al به جای Si در موقعیت تتراهدری آمفیبول کلسیک می‌شود، در حالی که افزایش فشار باعث می‌شود Al جانشین Fe+Mg در موقعیت اکتاهدری شود [۲۷]. بنابراین با افزایش فشار یا دما، Al_2O_3 موجود در آمفیبول افزایش می‌یابد [۲۸]. همچنین با افزایش دما Ti وارد موقعیت اکتاهدری می‌شود، اما با افزایش فشار این قانون معتبر نیست، چون شعاع یونی Ti بزرگ‌تر از Al است [۲۹]. بنابراین، میزان Ti در آمفیبول‌های کلسیک رابطه مستقیم با افزایش دما و رابطه معکوس با افزایش فشار دارد. با افزایش دما، جانشینی ادنیت بیش‌تر می‌شود و آمفیبول‌ها، سدیک‌تر و آلومینی‌تر می‌شوند [۳۰]. جانشینی‌های صورت گرفته در آمفیبول‌ها، موجب شده تا با استفاده از مقادیر Al و Ti موجود در آن‌ها، بتوان شرایط تبلور سنگ‌ها را ارزیابی کرد. بر این اساس، پژوهش‌گران زیادی برای محاسبات دما-فشارسنجی از طریق ترکیب شیمیایی آمفیبول‌ها، روابطی را ارائه کرده‌اند که بر پایه معادلات ترمودینامیکی استوارند [۳۲]، [۳۱]، [۱۸].

جدول ۱. میانگین نتایج تجزیه نقطه‌ای آمفیبول‌های موجود در سنگ‌های توده گرانیتوئیدی تویه دروار

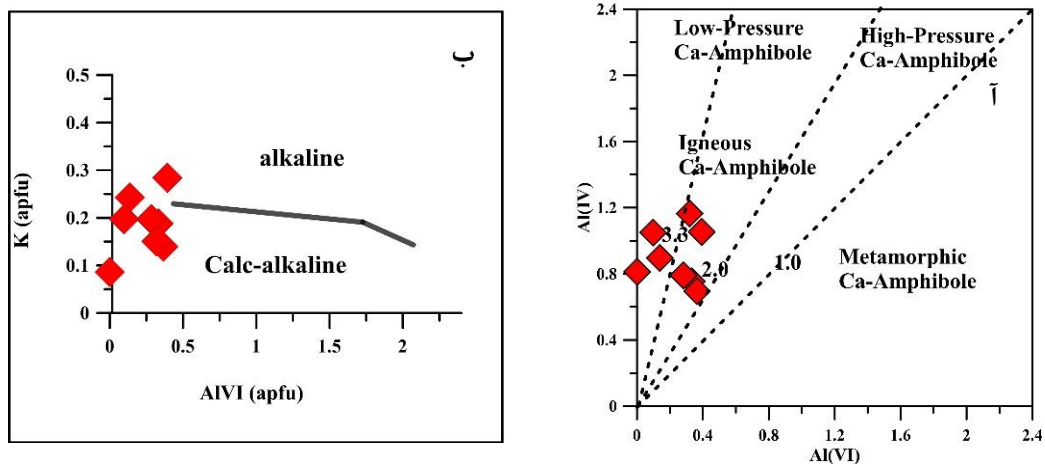
Sample	مونزونیت (AT12)	مونزونیت (AT21)	مونزونیت (AT38)	کوارتز مونزونیت (AT14)	کوارتز مونزونیت (AT52)	مونزودیوریت (AT111)	مونزودیوریت (AT56)	مونزودیوریت (AT59)
SiO ₂	۴۷/۱	۴۸/۸	۴۶/۲	۴۷/۶	۴۶/۴	۴۴/۹	۴۴/۵	۴۴/۹
TiO ₂	۰/۴	۱/۳	۰/۹	۰/۸	۱/۲	۱/۱	۱/۷	۱/۴
Al ₂ O ₃	۶/۰۱	۶/۰۱	۵/۷	۶/۰	۴/۵	۶/۳	۸/۲	۷/۹
FeO	۲۴/۹	۲۲	۲۴/۸	۲۴/۹	۱۰/۴	۲۴/۰	۲۳/۱	۲۳/۰
MnO	۰/۱	۰/۳	۰/۰	۰/۰	۱/۶	۰/۴	۰/۰	۰/۰
MgO	۶/۱	۷/۵	۷/۶	۶/۴	۲/۵	۷/۰۱	۶/۶	۶/۳
CaO	۱۱/۴	۱۰	۱۱/۱	۹/۹	۳/۱	۱۰/۵	۱۰/۷	۱۰/۴
Na ₂ O	۱/۳	۱/۳	۱/۷	۱/۵	۰/۰	۱/۸	۱/۵	۱/۵
K ₂ O	۱/۰	۰/۷	۱/۲	۱/۰	۰/۴	۱/۰	۰/۸	۱/۴
Cl	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۲	۱/۱	۱/۲	۱/۱
Cr ₂ O ₃	۰/۰	۰/۳	۰/۳	۰/۲	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۱
H ₂ O	۱/۹	۲/۰۱	۱/۹	۲/۰۲	۱/۹	۱/۷	۱/۶	۱/۷
O=F,Cl	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۱	۰/۲	۰/۳	۰/۲
Total	۱۰۰/۲	۱۰۰/۵	۱۰۰/۶	۱۰۰/۸	۱۰۰	۹۹/۹	۹۹/۹	۹۹/۶
Si	۷/۲	۷/۳	۷/۱	۷/۲	۷/۱	۷/۰۱	۶/۸	۶/۹
Al ^{IV}	۰/۷۵	۰/۷	۰/۹	۰/۷۸	۰/۸	۱/۰۱	۱/۲	۱/۱
Al ^{VI}	۰/۳	۰/۴	۰/۱	۰/۳	۰/۰	۰/۱	۰/۳	۰/۴
Ti	۰/۰۴	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۲	۰/۲
Cr	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰
Fe ³⁺	۰/۰	۰/۳	۰/۱	۰/۴	۰/۰	۰/۵	۰/۳	۰/۲
Fe ²⁺	۳/۲	۲/۵	۳/۱	۲/۷	۱/۳	۲/۶	۲/۷	۲/۸
Mn	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۲	۰/۱	۰/۰	۰/۰
Mg	۱/۴	۱/۷	۱/۵	۱/۴	۰/۶	۱/۶	۱/۵	۱/۵
Ca	۱/۹	۱/۶	۱/۸	۱/۶	۵/۱	۱/۷	۱/۸	۱/۷
Na	۰/۴	۰/۴	۰/۵	۰/۴	۰/۰	۰/۵	۰/۴	۰/۴
K	۰/۲	۰/۱	۰/۲	۰/۲	۰/۱	۰/۲	۰/۱	۰/۳
Cl	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۱	۰/۳	۰/۳	۰/۳
OH	۲/۰	۲/۰	۲/۰	۲/۰	۱/۹	۱/۷	۱/۷	۱/۷
Total	۱۷/۵	۱۷/۱	۱۷/۶	۱۷/۳	۱۷/۴	۱۷/۵	۱۷/۴	۱۷/۵
(Ca+Na) (B)	۲/۰	۲/۰	۲/۰	۲/۰	۲/۰	۲/۰	۲/۰	۲/۰
Na (B)	۰/۱	۰/۴	۰/۲	۰/۴	۰	۰/۳	۰/۲	۰/۳
(Na+K) (A)	۰/۵	۰/۱	۰/۶	۰/۳	۰/۱	۰/۵	۰/۴	۰/۵
Mg/(Mg+Fe ²⁺)	۰/۳	۰/۳	۰/۳	۰/۳	۰/۳	۰/۴	۰/۴	۰/۳
Fe/(Fe+Mg)	۰/۷	۰/۶	۰/۷	۰/۷	۰/۷	۰/۶	۰/۶	۰/۶
Fe ³⁺ /(Fe ³⁺ +Al _v)	۰/۰	۰/۴	۰/۴	۰/۶	۰/۰	۰/۸	۰/۵	۰/۳
Sum of S ₂	۱۳/۰	۱۳/۰	۱۳/۰	۱۳/۰	۱۰/۱	۱۳/۰	۱۳/۰	۱۳/۰



شکل ۵. موقعیت آمفیبول‌های توده گرانیتوئیدی تویه دروار در نمودارهای طبقه‌بندی آمفیبول‌ها بر پایه ترکیب شیمیایی آن‌ها [۳]

تعیین سری ماگمایی براساس شیمی آمفیبول

از ترکیب شیمیایی کانی‌های سازنده سنگ می‌توان در تعیین سری ماگمایی آن استفاده کرد. در این پژوهش از ترکیب شیمیایی آمفیبول برای بررسی ماهیت ماگمای سازنده سنگ‌های توده گرانیتوئیدی تویه دروار استفاده شده است. در نمودار پیشنهادی [۳۳] از نسبت Al^{VI} در مقابل K در آمفیبول‌ها برای تشخیص ماگمای آلکالن یا کالکوالکالن سازنده آن‌ها استفاده شده است. براساس این نمودار، ماهیت ماگمای سازنده آمفیبول‌های توده گرانیتوئیدی تویه دروار، کالکوالکالن بوده است (شکل ۶ ب). علت موقعیت کالکوالکالن در این نمودار، دگرسانی آمفیبول‌ها و متحرک بودن پتاسیم و خروج آن از کانی بوده که سبب کاهش مقدار آن و جابجایی نمونه‌ها در این قلمرو شده است. بررسی بر اساس شیمی کانی بیوتیت و بررسی‌های ژئوشیمیایی سنگ کل، ماهیت آلکالن نمونه‌ها را تأیید می‌کنند.



شکل ۶. موقعیت آمفیبول‌های توده گرانیتوئیدی تویه دروار در نمودارهای (آ) میزان Al^{IV} در مقابل Al^{VI} که تفکیک‌کننده آمفیبول‌های آذرین و دگرگونی است [۲۳]، (ب) تغییرات Al^{VI} در مقابل K بر واحد فرمول [۳۳]

بحث و بررسی

برآورد شرایط دما- فشار (عمق) جایگزینی توده

- برای برآورد دما و فشار بر اساس ترکیب آمفیبول، نمونه‌های مورد بررسی باید دارای ویژگی‌های ذیل باشند:
۱. حاوی مجموعه‌ای هم‌زیست از کانی‌های پلاژیوکلاز، فلدسپار آلکالن، کوارتز، آمفیبول، بیوتیت، ایلمنیت و مگنتیت باشند [۴].
 ۲. فوگاسیته اکسیژن نسبتاً بالا بوده باشد و رابطه $Fe_{total}/Mg+Fe_{total} < 6/6$ در آمفیبول‌ها برقرار باشد. برای تشخیص فوگاسیته اکسیژن می‌توان از پارائنز کانی‌ها استفاده کرد [۴]. به طوری که حضور هم‌زمان کوارتز، تیتانیت، مگنتیت و آمفیبول در گرانیوتوئید مورد بررسی نشانگر بالا بودن فوگاسیته اکسیژن ماگمای سازنده آن است [۳۴].
 ۳. در محاسبات باید از آمفیبول‌هایی که ترکیب اکتینولیتی و یا حاشیه اکتینولیتی دارند، صرف نظر کرد، زیرا این احتمال وجود دارد که این اکتینولیت بر اثر دگرسانی پیروکسن و هورنبلند ایجاد شده باشد [۳۵].
 ۴. در فرمول ساختاری آمفیبول باید تعداد کاتیون‌ها $Ca \geq 1/5$ و $Si \leq 7/5$ باشد [۱۸].
 ۵. آمفیبول نباید منطقه‌بندی و دگرسانی داشته باشد [۴]، [۳۵].
- بر اساس معیارهای یادشده، آمفیبول‌های اکتینولیتی حذف شدند. و تعدادی از آمفیبول‌ها که دارای این ویژگی‌ها بودند برای محاسبات دما- فشارسنجی انتخاب شدند و در محاسبات مورد استفاده قرار گرفتند.
- تاکنون روش‌های متعددی برای ارزیابی فشار از روی ترکیب آمفیبول ارائه شده است [۴]، [۱۸] تمامی این روش‌ها به غیر از روش [۲۷] بر مبنای محتوای آلومینیم کل موجود در آمفیبول و بدون توجه به پارامتر دما محاسبه می‌شوند. محتوای آلومینیم کل موجود در آمفیبول در ارتباط مستقیم با عمق جای‌گیری توده نفوذی است و با فشار متناسب است [۱۸]. بنابراین، می‌توان برای تعیین عمق جای‌گیری توده نفوذی از آن استفاده کرد. [۳۲] با استفاده از فرمول زیر از طریق محتوای آلومینیم کل، فشار محاسبه شده است.

$$(1) P(\pm 0.6Kb) = -3.01 + 4.76 Al_{total}$$

فشارسنجی به روش [۳۲]، دارای کم‌ترین خطا نسبت به روش‌های دیگر است و در فشارهای کم‌تر از ۲ کیلوبار نیز قابل کاربرد است. بر این اساس، فشار جای‌گیری توده گرانیوتوئیدی تویه‌دروار برابر با $2/5 - 0/9$ کیلوبار تعیین شد. لازم به ذکر است که محاسبه فشار با این روش، بیش‌ترین میزان فشار را نسبت به دیگر روش‌ها نشان می‌دهد. هم‌چنین با توجه به نمودار $Fe/(Fe+Mg)$ در مقابل Al_{total} [۳۲]، محدوده فشار $0/9 - 1/9$ کیلوبار برای توده نفوذی تویه‌دروار برآورد شده است (شکل ۷ الف). روش [۱۸]، مفیدترین روش فشارسنجی برای سنگ‌های گرانیوتوئیدی است. این روش، اولین روشی است که نشان داد Al_{total} موجود در آمفیبول ماگمایی با فشار تبلور به شکل ذیل، رابطه خطی دارد:

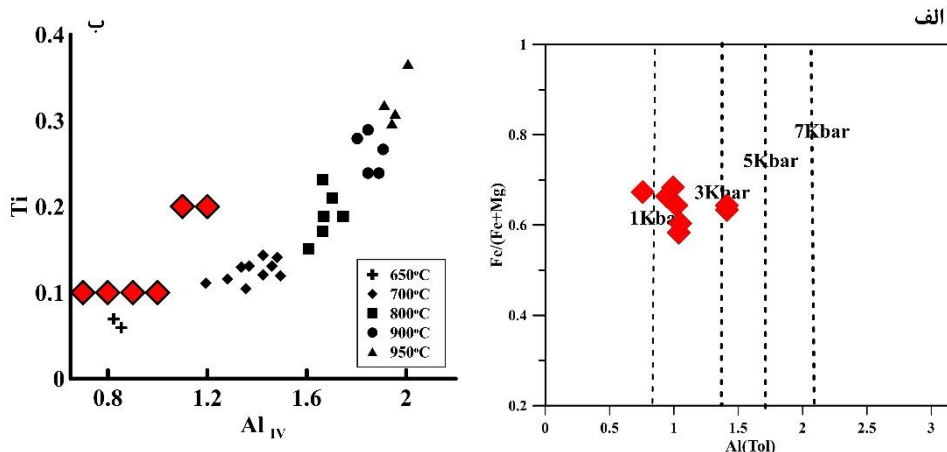
$$(2) P = (\pm 3Kb) = -3.92 + 5.03 Al_{total}$$

بر اساس محاسبات انجام شده، فشار به‌دست آمده برای عمق جای‌گیری سنگ‌های توده گرانیوتوئیدی تویه‌دروار حدود $0/1 - 2/9$ کیلوبار (عمق کم‌تر از ۵ کیلومتر) است. وجود شواهدی نظیر حاشیه دانه‌ریز در اطراف توده، بافت دانه‌ای ریزبلور، بافت‌های واکنشی هیپرسالوس تا ساب‌سالوس (پرتیتی، میرمکیتی، گرافیک، گرانوفیری) در سنگ‌های

توده و نبود دگرگونی همبری آشکار در اطراف آن، نشان‌گر بالآمدن و جای‌گیری نهایی دیپایر گونه توده در حالت نسبتاً جامد و سرد در اعماق کم پوسته است. وجود رگه‌های معدنی از اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن- منگنز، فلوریت، باریت، سرب و روی در سنگ‌های میزبان توده، نیز از نشانه‌های آشکار برای تأیید این گفته‌هاست.

دماسنجی

مقدار Ti در کانی‌های سیلیکاتی به‌ویژه آمفیبول‌ها، میکاها و پیروکسن‌ها تابع دماست [۳۶]. عواملی مانند دما، فشار، فوگاسیته اکسیژن، ترکیب سنگ کل و فازهای هم‌زیست بر میزان Al موجود در آمفیبول تأثیر می‌گذارد [۴]. در نمودار دماسنجی بر مبنای تغییرات مقدار Al^{IV} در برابر Ti آمفیبول [۳۱]، آمفیبول‌های توده گرانیتوئیدی تویه‌ دروار دمای ۶۵۰-۷۰۰ درجه سانتی‌گراد را نشان می‌دهند که دمای تبلور نیست، بلکه دمای توقف تبادل و تعادل نهایی (دمای بسته شدن) توده است (شکل ۷ ب).



شکل ۷. موقعیت آمفیبول‌های توده گرانیتوئیدی تویه‌ دروار در نمودارهای الف) $Fe/(Fe+Mg)$ در مقابل Al_{total} [۳۲]، که محدوده فشار تشکیل آمفیبول‌ها را در فشار کم‌تر از ۳ کیلو بار نشان می‌دهد، ب) نمودار تغییرات Al^{IV} در برابر Ti آمفیبول‌های کلسیک [۳۱]. در نمودارها و اشکال، لوزی قرمز نمونه‌های بررسی شده را نشان می‌دهند

نتیجه‌گیری

توده گرانیتوئیدی تویه‌- دروار در استان سمنان و جنوب زون البرز خاوری واقع شده است. این توده در واحدهای سنگی پالئوزویک پیشین شامل سازندهای باروت و لالون نفوذ کرده است. بر اساس شواهد صحرایی و سنگ‌نگاری ترکیب توده، مونزونیت، کوارتز مونزونیت و مونزودیوریت است و دارای کانی‌های اصلی پلاژیوکلاز، آلکالی فلدسپار، کوارتز، بیوتیت و آمفیبول و هم‌چنین کانی‌های فرعی مگنتیت، زیرکن، آپاتیت، تیتانیت و پیریت است. سربیسیت، اپیدوت، کلسیت و کلریت، کانی‌های ثانویه این توده هستند. بافت شاخص سنگ‌های توده شامل گرانوفیری، گرافیک و میرمیکیتی است. داده‌های حاصل از تجزیه نقطه‌ای آمفیبول‌های موجود در نمونه‌های مونزونیتی، کوارتز مونزونیتی و مونزودیوریتی منطقه تویه‌ دروار نشان‌گر گونه کلسیک فشار پایین با منشأ آذرین و ترکیب فروهورنبلندی آن‌ها است. شیمی آمفیبول در این توده بیان‌گر ترکیب آهن‌دار، ناکوهزایی و محیط کششی برای آن است. محاسبات دما-

فشارسنجی، دماهای ۷۳۰-۶۵۰ درجه سانتی‌گراد و فشارهای کم‌تر از ۲ کیلوبار (عمق کم‌تر از ۵ کیلومتر) را برای جای‌گیری و توقف تبادل و تعادل نهایی توده (دما بستن سیستم کانی) به‌دست داده‌اند. وجود رگه‌های معدنی از اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن و منگنز، فلوریت، باریت، سرب و روی و هم‌چنین غالب بودن بافت‌های دانه‌ای ریز بلور واکنشی هیپر سالووس تا ساب سالووس (پرتیتی، میرمیکیتی و گرافیک و گرانوفیری) تأیید کننده جای‌گیری توده در عمق کم است.

قدردانی

نویسندگان مقاله مراتب سپاس خود را از حوزه معاونت پژوهشی دانشگاه صنعتی شاهرود برای حمایت از انجام این پژوهش ابراز می‌دارند. هم‌چنین از نقطه نظرات بسیار ارزشمند داوران مقاله که سبب بهبود کیفیت این نوشتار شده‌اند، کمال تشکر را داریم.

منابع

1. Zhang S., Zhao Y., Song B., "Hornblende thermobarometry of the Carboniferous granitoids from the Inner Mongolia Paleo-uplift: implications for the tectonic evolution of the northern margin of North China block", *Mineralogy and Petrology* 87 (2006), 123-141.
2. خانعلی‌زاده علی‌رضا، "پتروژنوزو ژئوشیمی توده کوارتز مونزونیتی تویه‌دروار"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده علوم، دانشگاه صنعتی شاهرود (۱۳۸۴) ۱۰۲.
3. Leake B. E., Woolley A. R., Arps C. E., Birch W. D., Gilbert M. C., Grice J. D., Hawthorne F. 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 L., Whittaker E. W. J., Youzhi G., "Report Nomenclature of amphiboles: report of the subcommittee on amphiboles of the international mineralogical association commission on new minerals and mineral names", *The Canadian Mineralogist*, 35 (1997) 219-246.
4. Stein E., Dietl C., "Hornblende thermobarometry of granitoids from the Central Odenwald (Germany) and their implications for the geotectonic development of the Odenwald", *Mineralogy and Petrology*, 72 (2001) 185-207.
5. سعیدی علی، اکبری‌پور محمدرضا، "نقشه زمین‌شناسی ورقه ۱:۱۰۰۰۰۰ کیاسر"، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی ایران (۱۳۷۱).
6. نبوی محمد حسن، "دیباچه ای بر زمین‌شناسی ایران"، انتشارات سازمان زمین‌شناسی (۱۳۵۵) ۱۰۹.
7. امیرسرداری داود، "بررسی میکروفاسیس‌ها و محیط رسوبی عضوهای ۳، ۴ و ۵ میلا در البرز شرقی"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت معلم تهران (۱۳۷۷) ۱۰۷.
8. امین‌رسولی هادی، "سازند لالون و عضو ۱ و ۲ سازند میلا در البرز شرقی"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت معلم (۱۳۷۸) ۱۱۱.
9. قوچی‌اصل الهام، "رخساره محیط رسوبی سازند دروار، جنوب‌باختر دامغان"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران، (۱۳۸۳) ۱۲۵.

۱۰. رستمی پایدار قدرت‌الله، "آنالیز رخساره، ژئوشیمی و ژنز کانسار فلوتورین میلا کوه-تویه در سازند سلطانیه، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس (۱۳۸۰) ۱۱۴.
۱۱. قاسمی حبیب‌الله، خانعلی‌زاده علیرضا، "گرانیتوئید نوع A تویه دروار، جنوب باختر دامغان: نشانه‌ای از ماگماتیسم حوضه کششی پالئوتتیس در پالئوزوئیک زیرین البرز"، مجلهٔ بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران، سال بیستم، شماره ۱ (۱۳۹۱) ۳-۲۴.
12. Naderi A., Ghasemi H., Santos J. F., Rocha F., Griffin W. L., Shafaii Moghadam H., Papadopoulou L., "Petrogenesis and tectonic setting of the TuyehDarvar Granitoids (NE Iran): constraints from zircon U-Pb geochronology and Sr-Nd isotope geochemistry", *Lithos*, under printing.
13. Clarke B. D., "Granitoid Rocks", Chapman and Hall Publisher, London, (impress) (1992) 238.
14. Pitcher W. S., "The Nature and Origin of Granite," Blackie Academic and Professional, (impress) (1997) 386.
15. Vernon R. H., "A practical guide to rock microstructure", Cambridge university, (impress) (2004) 416.
16. Tribe I. R., D'lemos R. S., "Significance of a hiatus in down-temperature fabric development within syn-tectonic quartz diorite complexes, Channel Islands", UK. *Journal of the Geological Society*, 153 (1966) 127-138
17. Wirth R., Voll G., "Cellular intergrowth between quartz and sodium-rich plagioclase (myrmekite)—an analogue of discontinuous precipitation in metal alloys", *Journal of Materials Science*, 22 (1978) 1913-1918.
18. Hammarstrom J. M., Zen E.-a., "Aluminum in hornblende: an empirical igneous geobarometer", *American Mineralogist*, 719 (1968) 1297-1313.
۱۹. مرتضوی مجتبی، شیخ ذکریایی جلال، غفاری فاخر مرتضی، "تعیین شیمی کانی، دما- فشارسنجی و عمق جای‌گیری ماگمایی گرانیتوئیدی در منطقهٔ نوچون، رفسنجان، کرمان"، مجلهٔ علوم پایه دانشگاه آزاد اسلامی (ISIAU)، سال ۲۱، شماره ۸۱ (۱۳۹۰) ۷۹-۱۰۳.
20. Droop G., "A general equation for estimating Fe³⁺ concentrations in ferromagnesian silicates and oxides from microprobe analyses, using stoichiometric criteria", *Mineralogical Magazine*, 51 (1978) 431-435.
21. Cosca M. A., Essene E. J., Bowman J. R., "Complete chemical analyses of metamorphic hornblendes: implications for normalizations, calculated H₂O activities, and thermobarometry", *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 108 (1982) 472-484.
22. Leake B. E., "Nomenclature of amphiboles", *American Mineralogist.*, 63 (1978) 1023-1052.

23. Fleet M. E., Barnett R. L., "Al IV/Al VI partitioning in calciferous amphiboles from the Froid Mine, Sudbury, Ontario", *The Canadian Mineralogist*, 16 (1978) 527-532.
24. Agemar T., Wörner G., Heumann A., "Stable isotopes and amphibole chemistry on hydrothermally altered granitoids in the North Chilean Precordillera: a limited role for meteoric water?" *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 136 (1999) 331-344.
25. Chivas A. R., "Geochemical evidence for magmatic fluids in porphyry copper mineralization", *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 78 (1982) 389-403.
26. Hendry D., Chivas A., Long J., Reed S., "Chemical differences between minerals from mineralizing and barren intrusions from some North American porphyry copper deposits", *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 89 (1985) 317-329.
27. Anderson J. L., Smith D. R., "The effects of temperature and fO_2 on the Al-in-hornblende barometer", *American Mineralogist* 80 (1995) 549-559.
28. Moody J. B., Meyer D., Jenkins J. E., "Experimental characterization of the greenschist/amphibolite boundary in mafic systems", *American Journal of Science*, 283 (1983) 48-92.
29. Thompson J. B., "An introduction to the mineralogy and petrology of the biopyriboles", *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 9 (1981) 141-188.
30. Pal N., Pal D., Mishra B., Meyer F., "The evolution of the Palim granite in the Bastar tin province, Central India", *Mineralogy and Petrology*, 72 (2001) 281-304.
31. Ernst W., Liu J., "Experimental phase-equilibrium study of Al-and Ti-contents of calcic amphibole in MORB-a semiquantitative thermobarometer", *American Mineralogist*, 83 (1998) 952-969.
32. Schmidt M. W., "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.
33. Ridolfi F., Renzulli A., "Calcic amphiboles in calc-alkaline and alkaline magmas: thermobarometric and chemometric empirical equations valid up to 1,130° C and 2.2 GPa", *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 163 (2012) 877-895.
34. Wones D. R., "Stability of biotite-a reply", *American Mineralogist* 57 (1972) 316.
35. Helmy H., Ahmed A., El Mahallawi M., Ali S., " Pressure, temperature and oxygen fugacity conditions of calc-alkaline granitoids, Eastern Desert of Egypt, and tectonic implications", *Journal of African Earth Sciences*, 38 (2004) 255-268.
36. Johnson M. C., Rutherford M. J., "Experimental calibration of the aluminum-in-hornblende geobarometer with application to Long Valley caldera (California) volcanic rocks", *Geology* 17 (1989) 837-841.