

## تعیین واکنش‌های دگرگونی بخش دما بالای هاله دگرگونی توده گرانیتوئیدی بروجرد بر اساس مدل جبری

شیرین تندکار\*، فریبرز مسعودی؛ دانشگاه شهید بهشتی، دانشکده علوم زمین

شهریار محمودی؛ دانشگاه خوارزمی، دانشکده علوم زمین

پذیرش ۹۷/۰۳/۲۴

دریافت ۹۶/۰۲/۲۷

### چکیده

کاربرد روزافزون ریاضی در سال‌های اخیر در علوم باعث شده است تا مدل‌های ریاضی برای توجیه فرآیندهای زمین‌شناسی ارائه شود. محققان روشی بر پایه محاسبات ریاضی و مدل جبری برای تعیین واکنش‌های دگرگونی معرفی کرده‌اند. هاله دگرگونی پلیتی در شمال توده گرانیتوئیدی بروجرد در شرق شهر بروجرد توسعه یافته است. در این تحقیق برای اولین بار از مدل جبری برای تعیین واکنش‌های دگرگونی منطقه دما بالا حاشیه شمالی این هاله دگرگونی استفاده شده است. بدین منظور پس از بررسی پتروگرافی، در سیستم KFMASH، ماتریس‌های  $6 \times 6$  و  $8 \times 6$  بر اساس پاراژنهای موجود برای تعیین واکنش‌های دگرگونی این منطقه نگارش و اعداد زیر قطر اصلی در یک ماتریس صفر شد. سپس این محاسبات روی ماتریس دوم اعمال و واکنش‌های موازنه شده بر اساس فرمول عمومی کانی‌ها و داده‌های تجزیه شیمیایی نقطه‌ای به دست آمد. با افزایش درجه دگرگونی، مهم‌ترین واکنش‌ها، جانشینی آندالوزیت با سیلیمانیت، واکنش بین آندالوزیت، کوارتز و بیوتیت برای تشکیل کوردیریت، تشکیل آلکالی فلدسپار همراه با سیلیمانیت‌های رشته‌ای و تشکیل فلدسپار پتاسیم و کوردیریت در منطقه نزدیک کنتاکت است. نتایج بررسی پتروگرافی نیز صحت وجود پاراژنهای حاصل از مدل جبری را تأیید کردند.

واژه‌های کلیدی: هاله دگرگونی گرانیتوئید، متاپلیت، واکنش دگرگونی، محاسبات جبری، ماتریس

### مقدمه

امروزه اهمیت کاربرد ریاضیات در علوم زمین در کشورهای توسعه یافته به شکل جدی مورد توجه است. محاسبات ترمودینامیک سنگ‌های دگرگونی در سال‌های اخیر باعث شد تا مدل‌های ریاضی برای توجیه فرآیندها ارائه شود [۱]، [۲]، [۳]، [۴]، [۵]. ریاضیات ابزاری مهمی در بررسی کمی پدیده‌های پیچیده علوم زمین به شمار می‌آید. دانش ریاضیات امکان تحلیل و توصیف روابط پیچیده میان پدیده‌های زمین‌شناسی و کاهش خطا را برای دانشمندان علوم زمین مهیا کرده است [۶]، [۷]. از این رو پژوهش‌گران بر پایه محاسبات ریاضی و مدل جبری برای تعیین واکنش‌های دگرگونی روشی معرفی کرده‌اند که می‌تواند اطلاعات دقیق، کمی و قابل استنادی را ارائه دهد، که این امر با استفاده از علم ریاضی و قوانین دقیق موجود آن امکان‌پذیر است.

معمولاً تعیین واکنش‌های دگرگونی با بررسی دقیق پتروگرافی، تعیین پاراژن‌ها و بررسی‌های تجربی، بر اساس واکنش‌های ممکن در کتاب‌های مرجع معرفی شده‌اند [۸]، [۹]، [۱۰]. اسپیر (۱۹۹۵) روشی متفاوت و بر پایه محاسبات

\* نویسنده مسئول tondkarshirin@gmail.com

ریاضی و مدل جبری برای تعیین واکنش‌های دگرگونی معرفی کرده است که در محاسبات جبری حداکثر واکنش‌هایی که بر اساس پاراژن‌های موجود در سنگ می‌توانند انجام شوند، به دست می‌آید.

در منطقه بروجرد در زون ساختاری سنندج- سیرجان، مجموعه وسیعی از توده‌های نفوذی گرانیتوئیدی رخنمون دارند که درون فیلیت‌های هم‌دانه نفوذ کرده و دگرگونی مجاورتی تا حد رخساره پیروکسن هورنفلس تشکیل شده است [۱۱]، [۱۲]. بخش اعظم توده گرانیتوئیدی بروجرد ترکیب گرانودیوریتی دارد و به صورت توده‌ای نفوذی کشیده با روند شمال غرب نمایان می‌شود (شکل ۱).

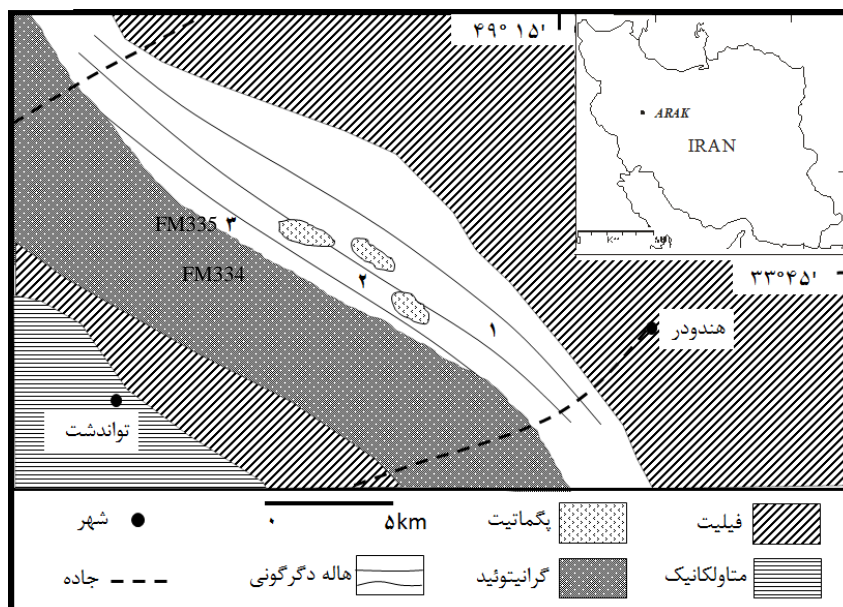
در این پژوهش، بخش‌های بیش‌تر توسعه یافته هاله دگرگونی در شمال شرقی توده نفوذی بروجرد بررسی شد. مطالعه روی هورنفلس‌های نزدیک به توده که تشکیل آکالی فلدسپار از این بخش شروع شده است، انجام گرفت و شیب‌ها در این پژوهش بررسی نشدند. در بخش جنوبی توده، دگرگونی مجاورتی به دلیل گسله بودن ناقص است و یا مشاهده نمی‌شود و نوار باریکی از شیب‌های کردیریت‌دار یا کردیریت هورنفلس که به اسلیت و فیلیت ختم شده وجود دارد، برای اولین بار در ایران با استفاده از روشی متفاوت در محاسبات ریاضی، واکنش‌های دگرگونی زون دما بالای آن بر اساس مدل جبری به دست آمد. بررسی مدل‌های جبری در هاله‌های دگرگونی سنندج-سیرجان و یا سایر هاله‌های دگرگونی در جهت بررسی توالی تشکیل کانی‌ها و تعادل فازی حائز اهمیت است.

بدین منظور، پس از بررسی شواهد صحرایی، بخش دگرگونی دما بالای هاله شناسایی و به سه زون براساس تفاوت‌های کانی‌شناسی و بافتی تقسیم شد. از رخنمون‌های مناسب نمونه‌برداری انجام و از نمونه‌های معرف هر زون دگرگونی، مقاطع نازک تهیه و پاراژن کانی‌ها شناسایی شدند. کانی‌های اصلی نمونه‌ها به روش نقطه‌ای (EPMA) با استفاده از دستگاه آنالیز Cameca در دانشگاه لیدز انگلستان انجام شد. با شناسایی کانی‌های اصلی تشکیل‌دهنده سنگ در بخش‌های مختلف، تشکیل‌دهنده  $H_2O$ ،  $SiO_2$ ،  $Al_2O_3$ ،  $MgO$ ،  $FeO$ ،  $K_2O$  در سیستم KFMASH، انتخاب شد. سپس ماتریس‌های مربوط بر اساس پاراژن‌های موجود برای تعیین واکنش‌های دگرگونی این منطقه نگارش حداکثر واکنش‌های دگرگونی موازنه شده بر اساس فرمول عمومی کانی‌ها و داده‌های تجزیه شیمیایی نقطه‌ای به روش مدل ریاضی به دست آمد.

### زمین‌شناسی

هاله دگرگونی پلیتی توده گرانیتوئیدی بروجرد در شمال شرقی تراست بزرگ زاگرس، در جنوب غربی اراک، بین دو شهر اراک و بروجرد و بخشی از زون سنندج- سیرجان قرار گرفته است. این منطقه دارای مختصات طول جغرافیایی  $48^{\circ}45'$  شرقی و عرض جغرافیایی  $34^{\circ}$  شمالی است (شکل ۱).

منطقه بروجرد در زون ساختاری سنندج- سیرجان که به صورت یک نوار ماگمایی- دگرگونی با روند شمال‌باختر- جنوب‌خاور بین زاگرس و ایران مرکزی از ارومیه در شمال‌باختر تا سیرجان و اسفندقه در جنوب‌خاور امتداد دارد. ادامه این زون در ترکیه، سوریه و قفقاز نیز دیده می‌شود. در حقیقت مرز شمالی توسط نوار آتشفشانی ارومیه- دختر و فروافتادگی‌های سیرجان، مرودشت، گاوخونی، کویر میقان (شمال اراک)، کفه کبودرآهنگ و دریاچه ارومیه، از ایران مرکزی جدا می‌شود. مرز جنوبی آن نیز گسل راندگی البرز است [۱۳].



شکل ۱. نقشه شماتیک و ساده شده بخش شمالی هاله دگرگونی توده گرانیتوئیدی بروجرد و زون‌های ۱، ۲ و ۳ به ترتیب از حاشیه به سمت توده تفکیک شده است.

کمپلکس گرانیتوئیدی بروجرد ۱۸۰ تا ۲۰۰ کیلومتر مربع وسعت دارد، مشابه اکثر توده‌های نفوذی رخنمون یافته در زون سنندج- سیرجان دارای روند شمال غرب- جنوب شرق است. داده‌های تعیین سن ایزوتوپی بر مبنای روش U-Pb با استفاده از کانی زیرکن، سن بخش اصلی این توده‌های نفوذی ۱۶۵ میلیون سال (ژوراسیک میانی) تعیین شده است [۱۴]، [۱۵]، [۱۶]، [۱۷].

قدیمی‌ترین نهشته‌های موجود در این منطقه متعلق به تریاس است که در جنوب شرقی بروجرد رخنمون دارند و شامل متاولکانیک‌ها با درون لایه‌هایی از مرم‌های نازک تا ضخیم لایه هستند و جدیدترین نهشته‌های آن، آبرفت‌های عهد حاضر است [۱۸].

سنگ‌های دگرگونی موجود در منطقه شامل دو سری دگرگونی ناحیه‌ای درجه پایین و مجاورتی درجه کم تا زیاد است. دگرگونی ناحیه‌ای شامل اسلیت‌ها و فیلیت‌ها است که تغییرات بافتی محسوسی را نشان نمی‌دهند و با طیفی از شرایط رخساره شیبست سبز دیده می‌شوند که در طی نفوذ توده گرانیتوئیدی در امتداد سطح شیبستوزیته آن‌ها، یک مجموعه دگرگونی مجاورتی دمای بالا- فشار پایین حاصل شده است [۱۱].

## مواد و روش‌ها

زون‌های ۱ تا ۳ در بخش دما بالای هاله دگرگونی مجاورتی به ترتیب از حاشیه به سمت توده، در نظر گرفته شده‌است که کانی‌های اصلی سنگ‌های دگرگونی در این زون‌ها فازهای سیستم هستند. مدل سیستم پلیتی KFMASH با سازنده‌های شیمیایی  $K_2O-MgO-FeO-Al_2O_3-SiO_2-H_2O$  برای محاسبات انتخاب شدند. حرارت و فاز سیال متغیرهای سیستم در فشار ثابت (دگرگونی مجاورتی) فرض شده‌اند و  $H_2O$  معرف فاز سیال است. سیستم

بررسی شده نزدیک یک تعادل فرض می‌شود و برای تعیین واکنش‌های دگرگونی بر اساس پاراژنرها بیشترین تعادل فازی بدون کانی‌های برگشتی در نظر گرفته شد [۸].

کانی‌های اصلی دگرگونی که تغییرات معناداری را در هاله دگرگونی نشان دادند، در این سیستم مدل‌سازی شدند. اگرچه تنها کانی‌هایی که شاخص برای تعیین شرایط دگرگونی هستند، در نظر گرفته شدند؛ کانی‌هایی مانند زیرکن، آپاتیت و تورمالین نادیده گرفته شدند [۹]، [۱۹].

در توصیف تعادل فازی به روش ترسیمی سازنده‌های سیستم به صورت مثلث سه‌تایی یا حداکثر تترادر ترسیم می‌شوند. در روش جبری محدودیت برای تعداد سازنده‌های سیستم وجود ندارد. البته در توصیف جبری تعادل فازی یک سیستم، وارد کردن همه‌ی سازنده‌ها غیرممکن و خارج از حد نیاز است. در سیلیکات‌ها تعداد زیادی از ترکیب‌های مختلف وجود دارد، تعدادی از آن‌ها که مورد نیاز نیستند و در نتیجه تأثیری در نتایج ندارند و هم‌چنین از ترکیباتی که به مقدار کم وجود دارند صرف نظر شده است. به‌منظور ساده‌سازی، در محلول‌های جامد، مانند بیوتیت که دارای آهن و منیزیم هستند، تنها محتوای آهن در فرمول اصلی کانی در نظر گرفته شد و منیزیم به‌عنوان فاز دوم در محاسبات اعمال شد [۸].

با شناسایی کانی‌های اصلی دگرگونی، تعیین پاراژنرها در زون‌های مشخص شده، واکنش‌های دگرگونی بر اساس محاسبات جبری مدل‌سازی شد. معادله ماتریسی بر اساس سازنده‌های سیستم و کانی‌های شاخص دگرگونی، تعریف شد؛ ۲ ماتریس که ماتریس سمت راست معادله، فرمول شیمیایی هر کانی (جدول ۱) را بر اساس سازنده‌های سیستم تعیین می‌کند، تنظیم شد. در واکنش رقومی ماتریس سمت راست، پاراژنرها را به نمایش گذاشته است. با حل این ۲ ماتریس واکنش‌ها با ضرایب مولی موازنه شده به‌دست می‌آید.

جدول ۱. فرمول عمومی و علائم اختصار کانی‌ها [۸]، [۲۰]، [۲۱]

فاز	اختصار	فرمول شیمیایی
Andalusite	And	$Al_2SiO_5$
Aluminosilicate	As	$Al_2SiO_5$
Biotite	Bt	$KFe_3AlSi_3O_{10}(OH)_2, FeMg-1$
Cordierite	Crd	$Mg_2Al_4Si_5O_{18}$
K-feldspar	Kfs	$KAlSi_3O_8$
Muscovite	Ms	$KAl_3Si_3O_{10}(OH)_2$
Quartz	Qtz	$SiO_2$
Sillimanite	Sil	$Al_2SiO_5$
Opaque mineral	Op	
Tourmaline	Tur	

## پتروگرافی

پتروگرافی ۳ زون تفکیک شده در بخش دما بالای هاله دگرگونی در ادامه آمده است.

### زون ۱ با کانی شناسی مسکویت، کوردیریت، کوارتز، بیوتیت، آلکالی فلدسپار و آندالوزیت

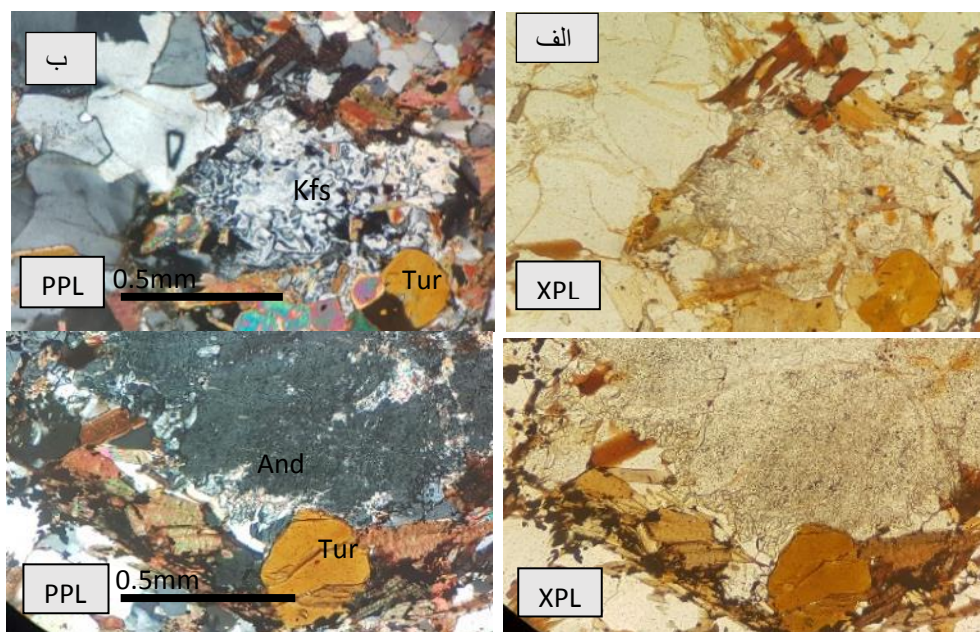
در مقاطع نازک میکروسکوپی، پورفیروبلست‌های کوارتز، بیوتیت، آندالوزیت، کوردیریت و آلکالی فلدسپار به‌ترتیب با قطر ۰/۵، ۱/۲، ۰/۷، ۱ و ۰/۵ میلی‌متر کانی‌های اصلی سنگ را تشکیل می‌دهند. بافت میرمیکیتی آلکالی فلدسپار و

کوارتز و آندالوزیت کیاستولیتی مشاهده شده است (شکل ۲ الف). سیلیمانیت با فراوانی کمتر از ۵ درصد به صورت فیبرولیت در زمینه مشاهده شده است.

مسکویت نیز یکی از کانی‌های اصلی زون ۱ است که تشخیص بین مسکویت اولیه و ثانویه برای تفسیر حائز اهمیت است، زیرا در بخش‌های درجهٔ بیش‌تر مسکویت ثانویه در تمام نمونه‌های این زون دیده شده است و مسکویت اولیه در محاسبات وارد شده است. مسکویت اولیه نیمه‌شکل‌دار، کشیده (تابولار) و ریزدانه است. مسکویت ثانویه با اندازه‌های متنوع (۰/۲-۱ میلی‌متر) در مقاطع نازک میکروسکوپی دیده شد که معمولاً شکل‌دار، جانشین شده با کانی‌های دیگر، به‌خصوص کوردیریت است. مسکویت ثانویه معمولاً هم‌رشد با بیوتیت و کلریت است. تورمالین در بعضی بخش‌ها به‌صورت دانه‌های گرد زرد-سبز با اندازهٔ حداکثر ۰/۵ میلی‌متر اطراف آندالوزیت یا در حاشیه آن رشد کرده است (شکل ۲ ب). زیرکن نیز همانند تورمالین معمولاً در حاشیهٔ بلورهای آندالوزیت مشاهده شد.

### زون ۲ با کانی‌شناسی مسکویت، کوردیریت، کوارتز، بیوتیت، آلکالی فلدسپار، آندالوزیت و سیلیمانیت

دانه‌های آلکالی فلدسپار و کوارتز حداکثر قطر ۱ و ۱/۲ میلی‌متر دارند. این دانه‌ها بزرگ‌تر از دانه‌های توصیف شدهٔ زون قبلی هستند. تفاوت زون ۲ با ۱ به‌طور عمده در اندازه‌ی بلورها و فراوانی آن‌ها است. در این زون اولین ظهور هم‌زمان رشته‌های سیلیمانیت با پیدایش آلکالی فلدسپار است (شکل ۳ الف). تنها تفاوت با زون ۱ تشکیل بلورهای سیلیمانیت و افزایش فراوانی آن است. سیلیمانیت با نزدیک شدن به گرانیت فراوان‌تر (بیش از ۴۰ درصد) و درشت‌تر می‌شود و آندالوزیت توسط سیلیمانیت جانشین شده است (شکل ۳ ب).



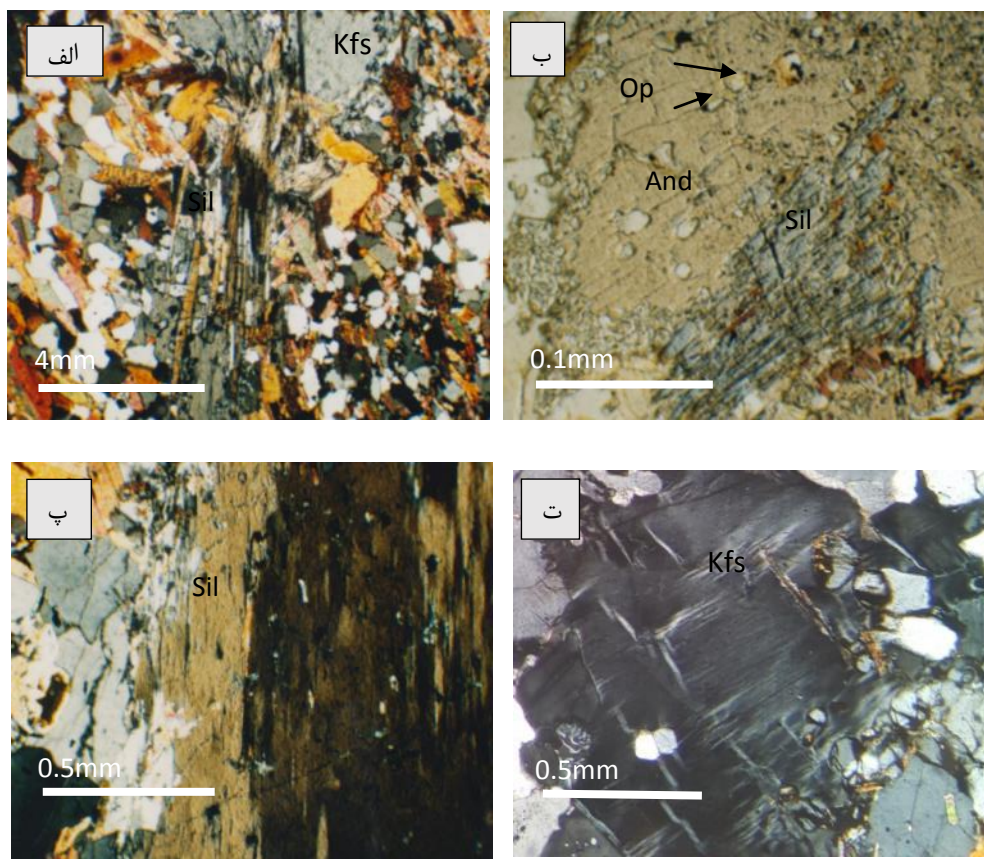
شکل ۲. الف) تورمالین در حاشیهٔ بلور آندالوزیت زون ۱ در حالت نیکل‌های موازی و نیکل‌های عمود، ب) نمایی از آلکالی فلدسپار، کوارتز و بافت میرمیکیتی زون ۱ در حالت نیکل‌های موازی و نیکل‌های عمود

### زون ۳ با کانی‌شناسی کوردیریت، کوارتز، بیوتیت، آلکالی فلدسپار و سیلیمانیت

زون ۳ که در آن سنگ‌های دگرگونی نزدیک و در محل تماس با توده آذرین هستند در محل تماس میگماتیت شکل گرفته است. در این زون موسکویت اولیه وجود نداشته و سیلیمانیت جای‌گزین آندالوزیت شده و اجتماع کوارتز،

بیوتیت، کوردیریت، آلکالی فلدسپار، سیلیمانیت در این زون دیده شد. اثری از شیستوزیته دیده نمی‌شود و سنگ‌ها به صورت توده‌ای هستند.

در سنگ‌های این زون، سیلیمانیت منشوری برجسته شکل‌دار تا نیمه‌شکل‌دار با حداکثر ۷ سانتی‌متر طول و هم‌رشد با کوارتز و گاهی بیوتیت، به وسیله بیوتیت و آلکالی فلدسپار احاطه شده است (شکل ۳ پ). آلکالی فلدسپار با قطری تا ۳ میلی‌متر با بافت پرتیتی مشاهده شد (شکل ۳ ت). کوردیریت معمولاً بافت خود را حفظ کرده، بلورهای منشوری و پوئی‌کیلوبلاستیک بیضوی با انکلوژین‌های کوارتز، بیوتیت و آلکالی فلدسپار، گاهی سیلیمانیت در اندازه میانگین ۸/۰ میلی‌متر مشاهده شد. تورمالین یوهدرال، زیرکن و آپاتیت کانی‌های جزئی این سنگ‌ها هستند. دانه‌های تورمالین (کوچک‌تر از ۰/۳ میلی‌متر) معمولاً اطراف یا داخل لبه بلورهای سیلیمانیت تشکیل شده است.



شکل ۳. الف) جانشینی آندالوزیت با سیلیمانیت زون ۲، ب) تشکیل سیلیمانیت رشته‌ای و فلدسپار پتاسیم در زمینه زون ۲، ج) سیلیمانیت برجسته هم‌رشد با کوارتز زون ۳، د) فلدسپار پرتیتی زون ۳

## نتایج و بحث

### تعیین واکنش‌های دگرگونی با استفاده از فرمول عمومی فازها

بر اساس روش پیشنهادی اسپیر (۱۹۹۵) [۸]، با استفاده از فرمول عمومی کانی‌ها (جدول ۱)، اجتماع کانی‌ها در مقاطع میکروسکوپی، در معادله ماتریسی  $a$  سمت چپ نشان داده شده است. ماتریس سمت راست نیز فرمول شیمیایی هر کانی را بر اساس سازنده‌های تعیین شده، در واکنش رقومی ماتریس سمت راست به نمایش گذاشته است. بیوتیت به صورت محلول جامد آهن و منیزیم در ماتریس محاسبه شده‌اند [۸].

در بخش پتروگرافی زون ۱ و ۲ بدلیل تفاوت بافتی از یک‌دیگر تفکیک شده‌اند، در زون ۱ تشکیل اولین آلکالی فلدسپار همراه با سیلیمانیت‌های رشته‌ای و مقدار بیش‌تری نسبت به زون ۲ آندالوزیت است و در زون ۲ بلورهای سیلیمانیت مشاهده شده است که دلیل تفکیک این دو زون از یک‌دیگر است، ولی در محاسبات حضور آندالوزیت و سیلیمانیت یک نتیجه دارد، به‌همین دلیل این دو زون معادل یک زون در نظر گرفته شد. سیستم متشکل از ۶ فاز مسکویت + کوردیریت + کوارتز + بیوتیت + آلکالی فلدسپار + آلومینوسیلیکات است. ماتریس به‌گونه‌ای نوشته شده است که هر فاز (کانی) در معادله ماتریسی a سمت چپ، به‌وسیله فرمول کانی‌شناسی در ماتریس سمت راست تعریف شود.

$$a) \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \text{Qtz} \\ \text{And} \\ \text{Sil} \\ \text{Ms} \\ \text{Crd} \\ \text{Kfs} \\ \text{Bt} \\ \text{Fe.Mg}^{\text{Bt}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 3 & 3 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 5 & 4 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 \\ 3 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 3 & 1 & 3 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \text{SiO}_2 \\ \text{AlO}_3 \\ \frac{1}{2} \\ \text{FeO} \\ \text{MgO} \\ \text{KO}_1 \\ \frac{1}{2} \\ \text{H}_2\text{O} \end{bmatrix}$$

در مرحله بعدی برای حل ماتریس، در معادله ماتریسی a، اعداد زیر قطر اصلی در واکنش رقومی ماتریس سمت راست باید صفر باشند. سپس این محاسبات بر روی ماتریس سمت چپ اعمال می‌شود، معادله ماتریسی b به‌دست می‌آید.

$$b) \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ -7/3 & -8/3 & 0 & 2/3 & 1 & 0 & -2/3 & 2 \\ -5/2 & -1/2 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1/3 & -1/3 & 0 & 1/3 & 0 & 0 & -1/3 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \text{Qtz} \\ \text{And} \\ \text{Sil} \\ \text{Ms} \\ \text{Crd} \\ \text{Kfs} \\ \text{Bt} \\ \text{Fe.Mg}^{\text{Bt}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \text{SiO}_2 \\ \text{AlO}_3 \\ \frac{1}{2} \\ \text{FeO} \\ \text{MgO} \\ \text{KO}_1 \\ \frac{1}{2} \\ \text{H}_2\text{O} \end{bmatrix}$$

سطرهایی که در معادله ماتریسی b، واکنش رقومی ماتریس سمت راست تماماً صفر هستند یا ستون آخر سطر غیر از صفر (نشان‌دهنده فاز آب) است، سطر معادل در ماتریس سمت چپ به‌صورت خطی نگارش شد. سطرهای ۳، ۴ و ۵ به‌صورت واکنش‌های خطی ۱، ۲ و ۳ است.

$$-\text{And} + \text{Sil} = 0 \quad (1)$$

$$Q - \text{And} + \text{Ms} - \text{Kfs} = \text{H}_2\text{O} \quad (2)$$

$$-7/3Q - 8/3\text{And} + 2/3\text{Ms} + \text{Crd} - 2/3\text{Bt} + 2\text{Fe.Mg}^{\text{Bt}} = 0 \quad (3)$$

عبارت  $\text{Fe.Mg}^{\text{Bt}}$  برای ساده‌سازی محاسبه بیوتیت به‌عنوان محلول جامد در نظر گرفته شده است، موازنه آهن و منیزیم در بیوتیت و کوردیریت صورت گرفت. در ادامه این عبارت در واکنش‌ها حذف و تنها واکنش‌هایی مشخص شده است. تساوی ۱، ۲ و ۳ به‌صورت واکنش‌های اصلی ۴، ۵ و ۶ از معادله ماتریسی b به‌دست آمد.

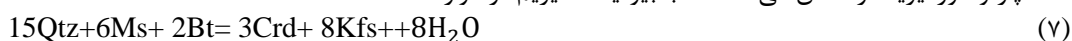
$$\text{And} = \text{Sil} \quad (4)$$

$$\text{Qtz} + \text{Ms} = \text{As} + \text{Kfs} + \text{H}_2\text{O} \quad (5)$$

$$7\text{Qtz} + 8\text{As} + 2\text{Bt} = 2\text{Ms} + 3\text{Crd} \quad (6)$$

واکنش ۴ جانشینی آندالوزیت با سیلیمانیت زون ۲ را نشان می‌دهد. در واکنش ۵، اولین آلکالی فلدسپار همراه با سیلیمانیت‌های رشته‌ای تشکیل می‌شود. واکنش ۶، تشکیل کوردیریت بدون حضور فاز سیال از آندالوزیت، کوارتز و بیوتیت صورت می‌گیرد، تشکیل مسکویت ثانویه نیز در این واکنش مشخص شده است.

با حذف آندالوزیت (یا سیلیمانیت) و مسکویت از واکنش‌های ۵ و ۶، واکنش ۷ و ۸ به دست آمده، تشکیل آلکالی فلدسپار و کوردیریت را نشان می‌دهد که با بیوتیت منیزیم‌دار موازنه شده است.



تشکیل فلدسپار پتاسیم و کوردیریت تا منطقه نزدیک کنتاکت ادامه دارد و واکنش کوارتز، آلومینوسیلیکات و بیوتیت برای تشکیل فلدسپار پتاسیم در زون ۳ نیز ادامه دارد.

در زون ۳، نزدیک کنتاکت، بیش‌تر میگماتیت است و مسکویت اولیه وجود ندارد. سیلیمانیت جای‌گزین آندالوزیت شده، اجتماع کوارتز+ مسکویت+ بیوتیت+ کوردیریت+ آلکالی فلدسپار+سیلیمانیت در زون ۳ دیده شد. مراحل حل ماتریس ابتدا در معادله ماتریسی c، سپس در معادله ماتریسی d انجام شد:

$$c) \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Qtz \\ Sil \\ Crd \\ Kfs \\ Bt \\ Fe, Mg \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 5 & 4 & 0 & 2 & 0 & 0 \\ 3 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 3 & 1 & 3 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} SiO_2 \\ AlO_{\frac{3}{2}} \\ FeO \\ MgO \\ KO_{\frac{1}{2}} \\ H_2O \end{bmatrix}$$

$$d) \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -3 & -2 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ -5/2 & -1/2 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 9/2 & 3 & -3/2 & -1 & 1 & -3 \\ -3/2 & -1 & 1/2 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Qtz \\ Sil \\ Crd \\ Kfs \\ Bt \\ Fe, Mg \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} SiO_2 \\ AlO_{\frac{3}{2}} \\ FeO \\ MgO \\ KO_{\frac{1}{2}} \\ H_2O \end{bmatrix}$$

$$9Qtz+ 6Sil+ 2Bt= 3Crd+ 2Kfs+ 2H_2O \quad (9)$$

واکنش ۹ مشابه واکنش ۸ به دست آمده از زون قبلی است که نشان می‌دهد تشکیل فلدسپار پتاسیم و کوردیریت تا منطقه نزدیک کنتاکت ادامه دارد ولی در زون ۳ تنها آلومینوسیلیکات، سیلیمانیت است.

### تعیین واکنش‌ها با استفاده از داده‌های آنالیز نقطه‌ای

با توجه به داده‌های موجود و همچنین قوانین مطرح شده، پس از محاسبه واکنش‌ها بر اساس فرمول عمومی کانی‌ها، آنالیز نقطه‌ای کانی‌های زون ۲ (FM335) و زون ۳ (FM334) در جدول ۲ جای‌گزین فرمول عمومی آن‌ها شد.

### تعیین واکنش‌ها با داده‌های آنالیز نقطه‌ای زون ۲

پس از تعیین واکنش‌ها براساس فرمول عمومی کانی‌ها، تجزیه شیمیایی‌های آنالیز نقطه‌ای جای‌گزین فرمول عمومی کانی‌ها شد و مراحل حل ماتریس دوباره انجام شد. زمانی که فرمول شیمیایی کانی بر اساس داده‌های آنالیز نقطه‌ای به دست آمد، نیازی به محاسبه محلول جامد در بیوتیت نیست زیرا مقدار بیوتیت و آهن در فرمول بیوتیت وارد شده است.

فرمول کانی‌ها براساس درصد اکسیدهای آنالیز شده (جدول ۲) عناصری که قابلیت جانشینی دارند، در سیستم KFMASH ساده شده است. مقدار منگنز در بیوتیت و کوردیریت به منیزیم، تیتانیوم در مسکویت، بیوتیت، آلومینوسیلیکات و آهن فرو در مسکویت و آلومینوسیلیکات به آلومینوم اضافه شده است. کلسیم و باریم در آلکالی



فلدسپار به ترتیب جای‌گزین منیزیم و پتاسیم می‌شوند. مقدار جزئی سدیم، فلئور و کلر جانشین پتاسیم و هیدرواکسید آب می‌شود (جدول ۳).

جدول ۲. آنالیز نقطه‌ای کانی‌های بیوتیت، کوردیریت، مسکویت، آلکالی فلدسپار و آلومینوسیلیکات در محدوده بررسی شده [۱۱]

FM355		FM 355	FM 334	FM355		FM 334	FM355		FM 334	FM355		FM334	
Ms		Bt	Bt	Kfs		Kfs	Crd		Crd	As		As	
SiO <sub>2</sub>	۴۶/۰۱	SiO <sub>2</sub>	۳۴/۴۳	۳۴/۴	SiO <sub>2</sub>	۶۴/۰۵	۶۶/۷۳	SiO <sub>2</sub>	۴۷/۸۸	۴۸/۴	SiO <sub>2</sub>	۳۷/۳۳	۳۷/۶۲
TiO <sub>2</sub>	۰/۴۸	TiO <sub>2</sub>	۳/۱۴	۳/۶۳	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۱۸/۶۷	۱۹/۳۸	TiO <sub>2</sub>	۰	۰/۰۲	TiO <sub>2</sub>	۰/۰۵	۰
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۳۷/۲۹	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۱۹/۸۶	۱۹/۰۹	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۰	۰	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۳۲/۳	۳۲/۰۷	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۶۱/۶۵	۶۲/۴۴
FeO	۰/۷۷	FeO	۲۲/۴۴	۲۲/۴۲	MnO	۰	۰/۰۱	FeO	۱۰/۸۴	۱۱/۴۲	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۰/۳۱	۰/۰۴
MnO	۰	MnO	۰/۴۱	۰/۳۳	CaO	۰/۰۵	۰	MnO	۱/۰۷	۰/۶۷	MnO	۰/۰۷	۰
MgO	۰/۳۷	MgO	۶/۱۵	۶/۳۸	Na <sub>2</sub> O	۱/۱۷	۱/۳۵	MgO	۵/۹۹	۶/۰۵	MgO	۰/۰۳	۰
Na <sub>2</sub> O	۰/۶	CaO	۰	۰	K <sub>2</sub> O	۱۴/۶۸	۱۴/۰۲	CaO	۰	۰	CaO	۰	۰
K <sub>2</sub> O	۱۰/۴۵	Na <sub>2</sub> O	۰/۱۴	۰/۰۸	BaO	۰	۰/۳۴	Na <sub>2</sub> O	۰/۲۹	۰/۱۷	Na <sub>2</sub> O	۰/۰۳	۰
H <sub>2</sub> O	۴/۴۸	K <sub>2</sub> O	۹	۹/۴۴	Total	۹۸/۶۳	۱۰۱/۸۴	K <sub>2</sub> O	۰	۰/۰۲	K <sub>2</sub> O	۰	۰
F	۰/۱۴	H <sub>2</sub> O	۳/۸	۳/۷۷	Si	۲/۹۸۵	۲/۹۹۷	Total	۹۸/۳۶	۹۸/۸۲	Total	۹۹/۳۶	۱۰۰/۱
Cl	۰/۰۲	F	۰/۱۸	۰/۲۴	Al	۱/۰۲۵	۰	Si	۵/۰۱	۵/۰۴	Fe num	۸۸/۳۳	۷۴/۱۴
Total	۱۰۰/۵۳	Cl	۰/۰۴	۰/۰۳	Fe <sub>3+</sub>	۰	۱/۰۲۶	Ti	۰	۰	Si	۱/۰۱۲	۱/۰۱۳
O = F	۰/۰۶	Total	۹۹/۵۸	۹۹/۹۷	Mn	۰	۰	Al	۳/۹۸	۳/۹۴	Ti	۰/۰۰۱	۰
O = Cl	۰	F=O	۰/۰۸	۰/۱	Ca	۰/۰۰۱	۰	Fe <sub>2+</sub>	۰/۹۵	۱/۰۰	Al	۱/۹۷۴	۱/۹۵۲
Total	۱۰۰/۴۷	Cl=O	۰	۰	Na	۰/۰۰۳	۰	Mn	۰/۰۹	۰/۰۶	Fe <sub>3+</sub>	۰/۰۰۶	۰/۰۰۱
Si	۶/۰۶	Total	۹۹/۴۹	۹۹/۸۶	K	۰/۸۷۳	۰/۱۱۸	Mg	۰/۹۳	۰/۹۴	Mn	۰/۰۰۲	۰
Ti	۰/۰۵	Si	۵/۳۰	۵/۳۰	Ba	۰	۰	Ca	۰	۰	Mg	۰/۰۰۱	۰
Al	۵/۷۸	Ti	۰/۳۶	۰/۴۲	Total	۴/۹۹۳	۴/۹۵	Na	۰/۰۶	۰/۰۳	Ca	۰	۰
Fe <sub>2+</sub>	۰/۰۸	Al	۳/۶۱	۳/۴۷	Ab	۷	۱۲/۶۹	K	۰	۰	Na	۰/۰۰۲	۰
Mn	۰	Fe <sub>2+</sub>	۲/۸۹	۲/۹۰	Or	۱۲۰/۷۸	۸۶/۸۲	Total	۱۱/۰۳	۱۱/۰۱	K	۰	۰
Mg	۰/۰۵	Mn	۰/۰۵	۰/۰۴	An	۸۸/۹۸	۰/۰۴				Total	۲/۹۹۸	۲/۹۹۸
Na	۰/۱۵	Mg	۱/۴۱	۱/۴۷									
K	۱/۷۶	Ca	۰	۰									
OH	۳/۹۳	Na	۰/۰۴	۰/۰۲									
F	۰/۰۶	K	۱/۷۷	۱/۸۶									
Cl	۰/۰۱	OH	۳/۹	۳/۸۷									
Total	۱۷/۹۲	F	۰/۰۹	۰/۱۲									
		Cl	۰/۰۱	۰/۰۱									
		Total	۱۹/۴۴	۱۹/۴۹									

جدول ۳. عناصر که قابلیت جانشینی دارند

Crd	Si, Al (Fe, Mg, Mn) (K, Na) O
Kfs	Si, Al (Fe, Mg, Ca) (K, Na, Ba) O
Ms	Si, (Al, Ti, F <sup>3+</sup> ) (Fe, Mg) (K, Na) (F, OH)
Bt	Si, (Al, Ti) (Fe, Mg, Mn) (K, Na) (F, OH, Cl)
As	Si, (Al, Ti, F <sup>3+</sup> ) (Mn, Mg) (K, Na) O

پس از جانشینی اکسیدهای فرعی با سازنده‌های سیستم (KFMASH)، فرمول شیمیایی کانی‌ها از داده‌های

آنالیز نقطه‌ای، در جدول ۴ به دست آمد.

جدول ۴. فرمول شیمیایی کانی‌های زون ۲ براساس داده‌های آنالیز نقطه‌ای

Crd	Si <sub>3.059</sub> Al <sub>2.432</sub> Fe <sub>0.579</sub> Mg <sub>0.672</sub> K <sub>0.024</sub> O <sub>11.028</sub>
Kfs	Si <sub>1.867</sub> Al <sub>0.642</sub> K <sub>0.59</sub> Fe <sub>0.01</sub> O <sub>4.993</sub>
Ms	Si <sub>4.504</sub> Al <sub>4.446</sub> K <sub>1.38</sub> Mg <sub>0.039</sub> OH <sub>3.03</sub> O <sub>17.92</sub>
Bt	Si <sub>4.254</sub> Al <sub>3.349</sub> K <sub>1.441</sub> Fe <sub>2.319</sub> Mg <sub>1.208</sub> OH <sub>3.313</sub> O <sub>19.437</sub>
As	Si <sub>0.606</sub> Al <sub>1.189</sub> Mg <sub>0.002</sub> K <sub>0.001</sub>

استفاده از داده‌های آنالیز نقطه‌ای فرمول شیمیایی حقیقی هر کانی را در محدوده مورد نظر به ما می‌دهد که در

معادله ماتریسی e جای‌گزین شده و مراحل حل معادله ماتریسی f مشابه با معادلات ماتریسی قبلی انجام شد.

$$e) \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \text{Qtz} \\ \text{As} \\ \text{Kfs} \\ \text{Crd} \\ \text{Bt} \\ \text{Ms} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.606 & 1.189 & 0 & 0.002 & 0.001 & 0 \\ 1.867 & 0.642 & 0.01 & 0 & 0.59 & 0 \\ 3.059 & 2.432 & 0.579 & 0.672 & 0.024 & 0 \\ 4.254 & 3.349 & 2.319 & 1.208 & 1.441 & 3.313 \\ 4.504 & 4.446 & 0 & 0.039 & 1.38 & 3.03 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \text{SiO}_2 \\ \text{AlO}_{\frac{3}{2}} \\ \text{FeO} \\ \text{MgO} \\ \text{KO}_{\frac{1}{2}} \\ \text{H}_2\text{O} \end{bmatrix}$$

$$d) \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -0.59 & 1.01 & -0.001 & -0.005 & 0.001 & -0.001 \\ -1.32 & -0.99 & 1 & 0.016 & -0.008 & 0.009 \\ 1.26 & 2.07 & 0.0788 & -0.77 & 0.44 & -0.48 \\ 1.076 & -1.35 & -2.54 & -0.13 & 0.44 & 1.045 \\ -6.25 & -8.42 & -0.24 & 3.66 & -0.91 & 0.99 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \text{Qtz} \\ \text{As} \\ \text{Kfs} \\ \text{Crd} \\ \text{Bt} \\ \text{Ms} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1.189 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.59 & 0 \\ 0 & 0 & 0.579 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 3.13 \\ 0 & 0 & 0 & 1.378 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \text{SiO}_2 \\ \text{AlO}_{\frac{3}{2}} \\ \text{FeO} \\ \text{MgO} \\ \text{KO}_{\frac{1}{2}} \\ \text{H}_2\text{O} \end{bmatrix}$$

$$1.076\text{Qtz} + 0.44\text{Bt} + 1.045\text{Ms} = 1.35\text{As} + 2.54\text{Kfs} + 0.13\text{Crd} + 3.13\text{H}_2\text{O} \quad (10)$$

واکنش ۱۰ تشکیل فلدسپار پتاسیم از کوارتز و میکا را نشان می‌دهد. واکنش‌های ۱۱ و ۱۲، واکنش تشکیل کروندوم و اکسید آهن است.

$$1.26\text{Qtz} + 2.07\text{As} + 0.0788\text{Kfs} + 0.44\text{Bt} = 0.77\text{Crd} + 0.48\text{Ms} + 0.579\text{FeO} \quad (11)$$

$$1.01\text{As} + 0.001\text{Bt} = 0.59\text{Qtz} + 0.001\text{Kfs} + 0.005\text{Crd} + 0.001\text{Ms} + 0.59\text{Al}_2\text{O}_3 \quad (12)$$

کروندوم در حاشیه بلورهای فلدسپات پتاسیم در زون دوم و کانی‌های اپک در مقاطع مشاهده شده است.

تعیین واکنش‌ها با داده‌های آنالیز نقطه‌ای زون ۳

جاننشینی عناصری که قابلیت جاننشینی دارند در فرمول شیمیایی کانی‌ها صورت گرفت و جدول ۵ برای کانی‌های

کوردیریت، آلکالی فلدسپار، بیوتیت و سیلیمانیت زون ۳ به‌دست آمد.

جدول ۵. فرمول شیمیایی کانی‌های زون ۳ براساس داده‌های آنالیز نقطه‌ای

Crd	Si <sub>3.076</sub> Al <sub>2.403</sub> Fe <sub>0.607</sub> Mg <sub>0.637</sub> K <sub>0.015</sub> O <sub>11.008</sub>
Kfs	Si <sub>1.861</sub> Al <sub>0.637</sub> K <sub>0.547</sub> O <sub>4.95</sub>
Bt	Si <sub>4.262</sub> Al <sub>3.318</sub> K <sub>1.505</sub> Fe <sub>2.323</sub> Mg <sub>1.239</sub> OH <sub>3.339</sub> O <sub>19.486</sub>
As	Si <sub>0.607</sub> Al <sub>1.188</sub>

فرمول شیمیایی حقیقی هر کانی در معادله ماتریسی g جای‌گزین شده و مراحل حل معادله ماتریسی h مشابه با

معادلات ماتریسی قبلی انجام گرفت.

$$g) \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \text{Qtz} \\ \text{Sil} \\ \text{Kfs} \\ \text{Crd} \\ \text{Bt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.607 & 1.188 & 0 & 0 & 0 \\ 1.867 & 0.637 & 0 & 0 & 0.547 \\ 3.076 & 2.403 & 0.607 & 0.637 & 0.015 \\ 4.262 & 3.318 & 2.323 & 1.239 & 1.505 & 3.339 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \text{SiO}_2 \\ \text{AlO}_{\frac{3}{2}} \\ \text{FeO} \\ \text{MgO} \\ \text{KO}_{\frac{1}{2}} \\ \text{H}_2\text{O} \end{bmatrix}$$

$$h) \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -0.607 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ -1.53 & 0.536 & 1 & 0 & 0 \\ -1.806 & -2.008 & -0.028 & 1 & 0 \\ 5.171 & 2.588 & -2.698 & -1.945 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Qtz \\ Sil \\ Kfs \\ Crd \\ Bt \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1.188 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.547 & 0 \\ 0 & 0 & 0.607 & 0.637 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1.1423 & 0 & 0 & 3.339 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} SiO_2 \\ AlO_{\frac{3}{2}} \\ FeO \\ MgO \\ KO_{\frac{1}{2}} \\ H_2O \end{bmatrix}$$

$$5.171Qtz + 2.588Sil + Bt = 2.698Kfs + 1.945Crd + 3.339 H_2O + 1.1423FeO \quad (۱۳)$$

واکنش ۱۳ مشابه واکنش ۸ علاوه بر این که تشکیل فلدسپار پتاسیم و کوردیریت از کوارتز، سیلیمانیت و بیوتیت را نشان می‌دهد، هم‌چنین اکسید آهن به صورت فاز آزاد در مقاطع به صورت کانی‌های اپک مشاهده شده بود نیز در این واکنش به دست آمده است.

### نتیجه‌گیری

در این پژوهش با استفاده از محاسبات ریاضی، واکنش‌های دگرگونی بر اساس مدل جبری به دست آمد. روشی متفاوت و بر پایه محاسبات ریاضی و مدل جبری برای تعیین حداکثر واکنش‌های دگرگونی بر اساس پاراژنزهای موجود در سنگ است.

مهم‌ترین واکنش‌های دگرگونی هاله دگرگونی پلیتی توده گرانیتوئیدی بروجرد، در زون ۱ و ۲، تشکیل آلکالی فلدسپار همراه با سیلیمانیت‌های رشته‌ای و تشکیل کوردیریت و مسکویت ثانویه بدون حضور فاز سیال است. تشکیل آلکالی فلدسپار و کوردیریت از زون ۱ شروع شده و تا منطقه نزدیک کنتاکت، زون ۳ نیز ادامه دارد. با این تفاوت که در زون ۳ سیلیمانیت جای‌گزین آندالوزیت شده و تنها آلومینوسیلیکات و سیلیمانیت است.

نتایج نشان می‌دهد که واکنش‌های به دست آمده بر اساس فرمول عمومی کانی‌ها مشابه با واکنش‌هایی است که بر اساس آنالیزهای نقطه‌ای به دست آمده است. واکنش ۱۳ مشابه با واکنش ۹، با دقت بالا محاسبه شده و تشکیل اکسید آهن در محدوده‌ی نزدیک به توده را نشان می‌دهد. هم‌چنین براساس واکنش‌های ۱۱ و ۱۲ امکان پیش‌بینی تشکیل کروندوم و کانی‌های اپک نیز وجود دارد.

### قدردانی و تشکر

از همکاری معاونت پژوهشی دانشگاه شهیدبهبشتی و گروه زمین‌شناسی که در بخش‌های مختلف این پژوهش یاری کردند سپاسگزاریم.

### منابع

- Holland T. J. B., Powell R., "An internally consistent thermodynamic data set for phases of petrological interest", *Journal of Metamorphic Geology* (1998) 309-343.
- Holland T. J. B., Powell R., "An enlarged and updated internally consistent thermodynamic dataset with uncertainties and correlations: the system  $K_2O-Na_2O-CaO-MgO-MnO-FeO-Fe_2O_3-SiO_2-CO_2-H_2O$ ". *J. Met. Geo.* 8 (1990) 89-124.
- White R. W., Powell R., Holland T. J. B., Johnson T. E., Green E. C. R., "New mineral activity-composition relations for thermodynamic calculations in metapelitic systems", *Journal of Metamorphic Geology*, 32 (2014) 261-286.
- Iacono-Marziano G., Ferraina C., Gaillard F., Carlo I., Arndt N. T., "Assimilation of sulfate and carbonaceous rocks: Experimental study, thermodynamic modeling and application to the Noril'sk-Talnakh region (Russia)", *Ore Geology Reviews*, 90 (2017) 399-413.

5. Hobbs B. E., Ord A., "Regenauer-Lieb, K. The thermodynamics of deformed metamorphic rocks: a review", *Journal of Structural Geology* (2011).
6. Lanari p., Engi M., "Local bulk composition effects on metamorphic mineral assemblages", *Mineralogical society of America*, 83 (2017) 55-102.
7. Duesterhoeft E., Quinteros J., Oberhänsli R., Bousquet R., Capitani C., "Relative impact of mantle densification and eclogitization of slabs on subduction dynamics: A numerical thermodynamic/thermokinematic investigation of metamorphic density evolution", *Tectonophysics*, 637 (2014) 20-29.
8. Spear F. S., "Metamorphic phase equilibria and pressure-temperature-time-paths", *mineralogical society of America* (1995).
9. Yardley B.W.D., "An introduction to metamorphic petrology", *Longman Earth Science series*, (1989) 248.
10. Winter J. D., "Principles of igneous and metamorphic petrology", *Prentice Hall, New York*, (2001) 635-662.
11. Masoudi F., "Contact metamorphism and pegmatite development in the region SW, of Arak, Iran", *PhD Theseis, Leeds University, UK. Dept. of Earth Sciences*, (1997) 127.
۱۲. احمدی خلجی احمد، درویش زاده علی، "بررسی پتروژنز سنگ های دگرگونی منطقه شرق و شمال شرق بروجرد"، مجموعه مقالات هجدهمین گردهمایی علوم زمین، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران (۱۳۷۸).
۱۳. قربانی منصور، "ماگماتیسم- متامورفیسم ایران"، نشر آریزن زمین (۱۳۹۴) ۳۱۰.
۱۴. احمدی خلجی احمد، "پترولوژی کمپلکس گرانیتوئیدی بروجرد"، رساله دکتری، پردیس علوم، دانشگاه تهران (۱۳۸۵).
۱۵. احمدی خلجی احمد، اسماعیلی داریوش، ولی زاده محمد، "خاستگاه و ویژگی های تکتونیکی توده گرانیتوئیدی بروجرد غرب ایران"، فصل نامه علوم زمین ۶۰، (۱۳۸۵) ۳۲-۴۷.
۱۶. مسعودی فریبرز، محمودی شهریار، محجل محمد، مهرابی بهزاد، "سن سنجی توده های گرانیتوئیدی اراک - بروجرد در زون سنندج سیرجان به روش اورانیوم سرب"، نشریه علوم دانشگاه خوارزمی ۹ (۱۳۹۰) ۴۳۷-۴۴۶.
۱۷. محمودی شهریار، مسعودی فریبرز، مهرابی بهزاد، "سن سنجی توده های نفوذی در بخش شمالی پهنه سنندج-سیرجان به روش اورانیوم سرب"، علوم زمین سازمان زمین شناسی کشور ۲۳ (۱۳۹۲) ۶۸-۸۱.
۱۸. سهندی محمدرضا، رادفر جواد، حسینی دوست جعفر، محجل محمد، "نقشه ۱/۱۰۰۰۰۰ شازند"، سازمان زمین شناسی کشور (۱۳۸۵).
19. Will T. M., "phase equilibria in metamorphic rocks thermodynamic background and petrological aApplications", *Springer* (1998) 324.
20. Kretz R., "Symbols for rock-forming minerals", *American Mineralogy*, 68 (1983) 277-279.
21. Deer W. A., Howie R. A., Zussman J., "An introduction to the rock forming minerals", *John Wiley & Sones, New York* (1989).