


تعیین شرایط و عوامل موثر بر رخداد ذوب بخشی در زنولیت‌های میگماتیتهی چاه بازرگان (شمال شرق نیریز) با استفاده از نمودارهای فازی ترمودینامیکی

عبدالناصر فضل‌نیا^۱، میرمحمد میری^{۲*} , عادل ساکی^۲

۱- گروه زمین‌شناسی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

۲- گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

Doi: <https://doi.org/10.48308/esrj.2023.103056> (پژوهشی)

دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۰۴/۱۲ پذیرش نهایی مقاله: ۱۴۰۱/۱۱/۲۲

چکیده


قطعات فرو افتاده گارنت - بیوتیت - کیانیت شیست‌ها از مجموعه دگرگونی‌های ناحیه‌ای قوری نیریز با سن ۱۸۷ میلیون سال پیش (بخش جنوبی زون سنندج - سیرجان) به داخل توده نفوذی لوکودیوریت چاه بازرگان با سن ۱۷۳ میلیون سال پیش، باعث شد تا این قطعات (زنولیت) درجات دگرگونی مجاورتی شدیدی را تحمل و به زنولیت‌های میگماتیتهی تبدیل شوند. بخش‌هایی از مذاب‌های تولید شده، تجمع یافتند و در نتیجه منجر به ایجاد غلاف‌ها و عدسی‌های لوکوگرانیتهی درون این نفوذی‌ها شدند. براساس بررسی‌های سنگ‌نگاری گردهمایی‌های متعادل اسپینل + گارنت + فلدسپار پرتیتی + کردیریت + سیلیمانیت و اسپینل + گارنت + فلدسپار پرتیتی + کردیریت در شرایط اوج دگرگونی شکل گرفته‌اند. نمودارهای فازی محاسبه شده برای نمونه زنولیتی، نشان می‌دهد که در حضور مقادیر آب کافی، ذوب بخشی در دمای ۷۰۰ تا ۷۵۰ درجه سانتیگراد و فشار کمتر از ۵ کیلو بار صورت می‌گیرد. اگرچه، ترکیب شیمیایی کانی‌های گارنت و بیوتیت و ایزوپلت‌های محاسبه شده برای آنها، نشان می‌دهد که ذوب بخشی می‌توانسته در دماهای کمتر نیز آغاز شود. نمودارهای فازی $T-XCO_2$ ، $T-XO_2$ و $T-XMg$ آشکار ساختند که افزایش کربن دی‌اکسید سیال، اکسیژن و نسبت آهن به منیزیم در ترکیب سنگ‌مادر می‌توانسته‌اند سبب رخداد ذوب بخشی در دماهای پائین‌تر گردند.

واژه‌های کلیدی: چاه بازرگان، دگرگونی مجاورتی شدید، میگماتیتهی، نمودار فازی.



Copyright: © 2023 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY). license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Determining the conditions and factors affected partial melting in the Chah-Bazargan migmatitic xenoliths (NE Neyriz) using thermodynamic phase diagrams

Fazlnia¹, A.N., Miri^{*2} , M.M., Saki², A.,

1-Department of Geology, Urmia University, Urmia, Iran

2-Department of Geology, Faculty of Earth Sciences, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran

(Original Article) <https://doi.org/10.48308/esrj.2023.103056>

Received: 03 Jul 2022 Accepted: 11 Febr 2023

Abstract

The fallen pieces of garnet-biotite-kyanite schists from the Qori regional metamorphic complex, Neyriz area, the southern part of the Sanandaj-Sirjan zone, with an age of about 187 Ma, into the Chah-Bazargan leucodiorite intrusions led to the pieces underwent high-grade contact metamorphic conditions and converted into migmatitic xenoliths at 173 Ma. Parts of the produced melts were accumulated, resulting in the creation of granitic pods and patches within the intrusions. Petrographic evidence revealed that equilibrium assemblage spinel + garnet + perthitic feldspar + cordierite + silimanite formed at the peak of metamorphism in the xenoliths. The calculated phase diagram show that anatexis in the xenoliths would occur at 700 to 750 °C and <5 kbar in presence of sufficient H₂O. However, chemical compositions of garnet and biotite grains and calculated isopleths based on the minerals show that anatexis could be onset in some lower temperatures. The T-XCO₂, T-XO₂, and T-XMg diagrams demonstrate that increasing in contents of CO₂ and O₂ and Fe/Mg ratio of the protolith can decrease temperature of partial melting onset.

Keywords: Chah-Bazargan, High-grade contact metamorphism, Migmatite, Phase diagram.



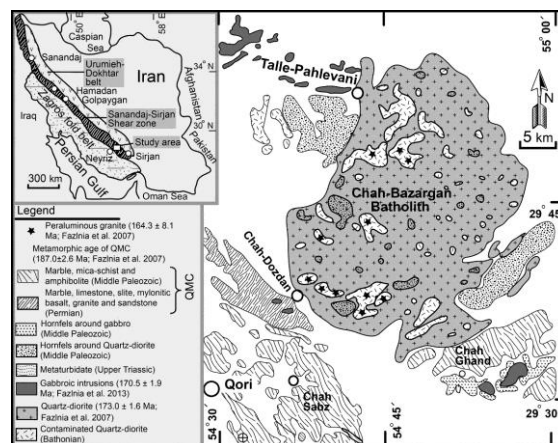
Copyright: © 2023 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY). license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

* Corresponding author E-mail address: m.miri@scu.ac.ir

مقدمه

میگماتیت شده است (Fazlnia et al, 2009). فضل‌نیا (Fazlnia, 2017) به بررسی ژئوشیمی و ترکیب کانی‌شناسی این ماگماتیت‌ها و نحوه تشکیل آنها از طریق مدل‌سازی‌های ژئوشیمیایی پرداخته است. گردهمایی کانیایی متعادل در فرایندهای دگرگونی می‌تواند در تعیین شرایط ترمودینامیکی و شیمیایی واکنش‌های دگرگونی استفاده شود (Spear, 1993). با توسعه نرم‌افزارهای رایانه‌ای در سال‌های اخیر جهت محاسبات ترمودینامیکی پایداری کانی‌های تشکیل‌دهنده سنگ‌های دگرگونی، امکان بررسی موشکافانه‌تر تغییرات گردهمایی‌های کانی‌ها و نحوه تغییرات ترکیب شیمیایی آنها طی رخداد دگرگونی فراهم شده است. در این پژوهش، با استفاده از نرم‌افزار TheriakDomino (de Capitani, 2010) و شواهد سنگ‌نگاری، گردهمایی‌های کانی‌های پایدار و شرایط و عوامل تاثیرگذار در ذوب‌بخشی زنولیت‌های میگماتیتهای چاه بازگان مورد بررسی قرار می‌گیرند. این مطالعه می‌تواند بازگو کننده تغییر درجه دگرگونی با سقوط بیشتر زنولیت‌های رسی (قطعات فرو افتاده گارنت - بیوتیت - کیانیت شست‌ها از دگرگونی‌های ناحیه‌ای قوری نیریز) به اعماق توده باتولیت چاه بازگان باشد.

میگماتیت‌ها سنگ‌های با ترکیب سیلیکاته هستند که در سرزمین‌های با درجات دگرگونی متوسط تا قوی با فابریک‌های ناهمگن در داخل پوسته میانی تا زیرین، در طول واکنش‌های پیشرونده آبرآ تشکیل می‌شوند (Brown, 1979; Ashworth, 1985; Makrygina, 1977; Sawyer, 2008a, b). میگماتیت‌هایی که از سنگ مادر شیل (رسی و نیمه‌رسی) به وجود می‌آیند، بسته به ترکیب و مقدار آب محیط می‌توانند از دماهای حدود ۶۲۰ درجه سانتیگراد با آغاز ذوب بخشی سنگ مادر تشکیل گردند، اما با سنگ مادر مافیک (برای مثال بازالت) ایجاد میگماتیت‌های مافیک از دماهای حدود ۸۰۰ درجه شروع می‌شود. همچنین اعماقی که میگماتیت‌ها توسعه می‌یابند بین ۱۰ تا ۳۰ کیلومتر متغیر است (Jones and Brown, 1990; Nyman et al, 1995; Milord et al, 2001; Sawyer, 2014). در منطقه چاه بازگان در شمال شرق نیریز (شکل ۱)، بروزندهایی از میگماتیت وجود دارد (شکل ۲). در نتیجه نفوذ قدرتمند باتولیت چاه بازگان به داخل سنگ‌های دگرگونی ناحیه‌ای نوع باروین قوری نیریز در حدود ۱۷۰ Ma و فروافتادن قطعاتی از این سنگ‌های دگرگونی به درون ماگما، سبب آتاکسی و تشکیل



شکل ۱: نقشه زمین‌شناسی ساده شده محدوده شمال شرق نیریز فارس و محدوده مورد مطالعه (با تغییرات از سبزه‌ای و همکاران، ۱۳۷۲). نقشه ساده شده کوهزایی زاگرس در ایران از اشتوکلین (Stöcklin, 1968) است.

منطقه مورد مطالعه

جایگاه زمین‌شناسی و مشاهدات صحرایی

محدوده مورد مطالعه بخشی از پهنه ماگمایی - دگرگونی سنندج - سیرجان جنوبی است که در شمال‌شرق نیریز استان فارس رخنمون دارد (شکل ۱). پهنه سنندج - سیرجان از سنگ‌های متنوع آذرین نفوذی به خصوص گرانیتوئیدها و دگرگونی‌های با ساختارهای متفاوت تشکیل شده است که به‌طور عمده مرتبط با مزوزوئیک هستند. بسیاری از سنگ‌های ماگمایی این پهنه طبیعت کالک‌آلکان داشته و مرتبط با فرورانش نئوتتیس به زیر ایران مرکزی تشکیل شده‌اند (Alavi, 1994; Berberian and King, 1981). سنگ‌های دگرگونی در این پهنه از نوع فشار متوسط - حرارت متوسط تا بالا (سری رخساره باروین) هستند که مرتبط با زون فرورانشی نئوتتیس به زیر ایران در بازه زمانی بین ژوراسیک و کرتاسه تکامل یافته‌اند (Mohajjel and Fergusson, 2014; Shekholeslam, 2015; Shafaii Moghadam et al, 2016; Fazlnia, 2017; Mahmoudi and Baharifar, 2018; Sepahi et al, 2018; Hassanzadeh and Wernicke, 2016; Shekholeslam et al, 2008; Fazlnia et al, 2009; Saki et al, 2012). این فرآیند به تشکیل انواع سنگ‌های دگرگونی مانند شیبست‌های گارنت - استارولیت - کیانیت‌دار و آمفیبولیت‌های گارنت - هورنبلنددار گشت. همزمان با این دگرگونی‌ها، نفوذ توده‌های آذرین با ترکیب‌ها مختلف نیز سبب ایجاد دگرگونی‌ها مجاورتی و در برخی موارد آناتکسی شده است (Sepahi et al, 2018). از مهم‌ترین این میگماتیت‌ها می‌توان به میگماتیت‌ها به میگماتیت‌های مجموعه آذرین - دگرگونی الوند و بروجرد با سن ژوراسیک میانی (حدود ۱۷۰ Ma) (Sepahi et al, 2018; Saki et al, 2021)، آمفیبولیت‌های میگماتیتی منطقه سه‌قلاتون (شمال - شرق نیریز) و میگماتیت‌های پلیتی منطقه چاه

بازرگان با سن کرتاسه آغازین (حدود ۱۴۷ Ma) (Fazlnia et al, 2009; Fazlnia, 2017) اشاره نمود. در منطقه چاه بازرگان، در طی نفوذ ماگماهای با ترکیب کوارتز دیوریتی به درون توالی سنگ‌ها دگرگونی، قطعاتی از این سنگ‌ها با گردهمایی کانیاپی متعادل کیانیت + گارنت + بیوتیت + پلاژیوکلاز + کوارتز \pm مسکوویت یا کیانیت + استارولیت + گارنت + بیوتیت + مسکوویت + پلاژیوکلاز + کوارتز، به داخل این توده ماگما سقوط نمودند و دچار آناتکسی شده‌اند. این زنولیت‌ها ساختارهای میگماتیتی و گردهمایی کانیاپی مختلفی نشان می‌دهند (شکل‌های ۲ و ۳). محاسبات دما و فشارسنجی با استفاده از ترکیب شیمیایی کانی‌های گارنت، بیوتیت و پلاژیوکلاز نشان داده‌اند که این میگماتیت‌ها در حدود دماهای $350 \pm 760^\circ\text{C}$ و فشارهای $41 \pm 5/0$ kbar تشکیل شده‌اند (Fazlnia, 2017). زنولیت‌های میگماتیتی چاه بازرگان دارای ساختارهای استروماتیک (شکل A۲-E) و نبولیتیک (شکل D۲-F) هستند. دسته اول، که به آنها متاتکسیت (Sawyer, 1996; Bea, 1996; Sheppard et al, 2003) نیز گفته می‌شود، در بخش‌هایی توسعه یافته‌اند که احتمالاً در اعماقی سقوط کرده‌اند که دمای ماگما پایین‌تر بوده و بنابراین درجه دگرگونی ضعیف‌تری را تحمل نموده‌اند. این میگماتیت‌ها تناوبی از لایه‌های مزوسوم (بخش‌هایی که ذوب شده‌اند ولی مذاب‌ها هنوز به هم متصل نشده‌اند) و لوکوسوم (نئوسوم: بخش‌های ذوب شده و به هم متصل شده) دارند و هنوز برخی از ساختارهای اولیه باقی مانده از ذوب بخشی (ملانوسوم) حفظ شده‌اند. ارتباط بین بخش‌های مختلف این نوع از میگماتیت‌ها تدریجی است. انواع میگماتیت‌های نبولیتی (شکل D۲)، که دیاتکسیت‌ها نیز نامیده می‌شود (Brown, 1979; Sawyer, 2008b)، در زنولیت‌هایی دیده می‌شود که

عدسی‌های کوچکی از گرانیت‌های پرآلومینوس نوع S در کنار این نوع از میگماتیت‌ها توسعه یافته‌اند (Fazlnia, 2017)، به طوری که مرز آنها در بسیاری بخش‌ها تدریجی است.

احتمالاً به بخش‌های از مذاب با دمای بالا، سقوط کرده‌اند و درجات شدیدتر دگرگونی را متحمل شده‌اند. نبولیت‌ها مقادیر لوکوسوم (نئوسوم) یا بخش‌های ذوب شده بیشتری دارند که به صورت نامنظم بخش‌های ذوب نشده یا باقیمانده ذوب را در برگرفته‌اند.



شکل ۲: رخنمون متداولی از ساختار میگماتیتهای در زبولیت‌های میگماتیتهی فرو افتاده از دگرگونی ناحیه‌ای باروین قوری. A: تا E: رخنمون‌های از ساختارهای استروماتیک (متاتکسیتی). رخنمون F: میگماتیت نبولیتی (دیاتکسیتی) که بخش‌های دیرگداز (ملانوسوم) درون نئوسوم (لوکوسوم) قرار گرفته‌اند. مخفف‌ها: Leu، لوکوسوم؛ Meso، مزوسوم؛ Mel، ملانوسوم.

مواد و روش‌ها

در این مطالعه، در طی ۳ روز عملیات صحرایی در منطقه چاه بازرگان، در حدود ۳۰ نمونه از زبولیت‌هایی که ساختارهای نبولیتی داشته و ارتباط نزدیک و تدریجی با عدسی‌های گرانیتی

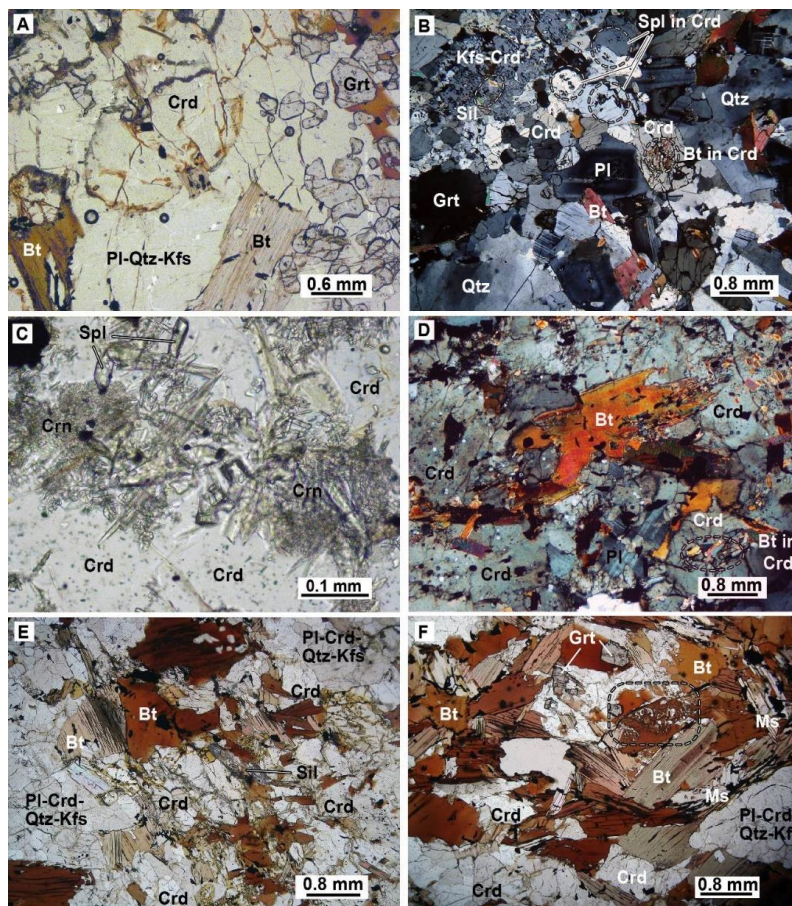
پرآلومینوس در آنها مشاهده می‌گردید، برداشت شدند. این نمونه‌ها نشان‌دهنده شرایط اوج دگرگونی و گردهمایی‌های تعادل فازی می‌باشند. تعداد ۱۵ مقطع نازک جهت بررسی‌های سنگ نگاری و مطالعه فابریک‌های مرتبط با ذوب بخشی

در برخی نقاط به چشم می‌خورد. درشت‌بلورها، شامل کردیریت و به میزان کمتر گارنت و پلاژیوکلاز می‌باشند. فابریک پوئی کیلوبلاستیک نیز در نتیجه حضور میانبراهای فراوان کوارتز، بیوتیت، سیلیمانیت، اسپینل و کوندوم در کانی‌های درشت تر شکل گرفته است. بررسی نمونه‌های زئولیتی نشان می‌دهد که گردهمایی کانیایی متعادل کردیریت + اسپینل + گارنت + فلدسپار پتاسیم + پلاژیوکلاز همراه با میانبراهای تحلیل رفته سیلیمانیت و بیوتیت در کردیریت موجود در این مزوسوم، شاخص شرایط اوج دگرگونی در این نمونه‌هاست (شکل F-A۳).

بررسی شدند. آنالیزهای شیمیایی سنگ‌کل و کانی‌های زئولیت‌ها پیش از این توسط فضل‌نیا (Fazlnia, 2017) انجام شده‌اند که در اینجا از آنها جهت محاسبه نمودارهای فازی استفاده می‌گردد.

سنگ‌نگاری

زئولیت‌های میگماتیتهی چاه بازرگان براساس درجه دمای ماگمای در برگیرنده، تحت‌تاثیر درجات مختلفی از دگرگونی قرار گرفته‌اند (Fazlnia, 2017). این موضوع سبب شده است که گردهمایی‌های کانیایی آنها اندکی تفاوت داشته باشد. بافت‌های کلی نمونه‌های مزوسوم گرانوبلاستیک و پوئی کیلوبلاستیک هستند، اما بافت پورفیروبلاستیک نیز



شکل ۳: تصاویر مقاطع نازک نمونه‌های زئولیتی میگماتیتهی چاه بازرگان. A و B: گردهمایی کانیایی در شرایط اوج دگرگونی، C: میانبراهای اسپینل و کوندوم در کردیریت، D، E و F: بیوتیت‌ها و سیلیمانیت‌های تحلیل رفته در میان هم‌رشدی کردیریت + پلاژیوکلاز - پتاسیم‌فلدسپار. علائم اختصاری کانی‌ها: Bt: بیوتیت، Crd: کردیریت، Grt: گارنت، Kfs: پتاسیم‌فلدسپار، Ms: مسکوویت، Pl: پلاژیوکلاز، Qtz: کوارتز (Kretz, 1983).

آهن و پتاسیم مناسب جهت محاسبات برگزیده شد. مدل‌های محلول جامد به کار رفته در محاسبات، شامل Fsp (Baldwin et al, 2005) برای فلدسپارها، GARNET (White et al, 2007) برای گارنت، CHLORITE (Holland et al, 1998) برای کلریت، PHNG (Coggon And Holland, 2002) برای برای مسکوویت، BIO (White et al, 2007) برای بیوتیت، CORD (Holland and Powell, 1998) برای کردیریت و LIQtC (White et al, 2007) برای مذاب هستند. به منظور ساده‌سازی محاسبات و نمودارها، سیال در ابتدا به صورت آب خالص و مازاد، با استفاده از مدل HHP98 (Holland and Powell, 1998) مورد استفاده قرار گرفت. نتایج محاسبات در شکل ۴ ارائه شده‌اند. براساس نمودار فازی محاسبه شده، گردهمایی کانیاپی پلاژیوکلاز + کلریت + بیوتیت + مسکوویت + کوارتز در دماهای کمتر از ۵۵۰ درجه سانتیگراد پایدار بوده و نماینده شرایط زون هورنبلند هورنفلس متاپلیت‌های منطقه است. با افزایش دما، مسکوویت از مجموعه کانیاپی حذف شده و کردیریت جای آن را می‌گیرد. در فشارهای بالاتر نیز گارنت جایگزین مسکوویت می‌شود. اولین رخداد مذاب در دماهای ۷۰۰ تا ۷۵۰ درجه سانتیگراد است که با افزایش فشار این دما کاهش می‌یابد (به دلیل استفاده از آب مازاد در محاسبات که سبب افزایش فشار بخار آب می‌گردد). مجموعه پلاژیوکلاز + گارنت + بیوتیت + کردیریت + مذاب + کوارتز + آب در فشارهای کمتر از ۵ کیلوبار پایدار است که هماهنگی خوبی با نتایج دما و فشارسنجی به دست آمده توسط فضل‌نیا (Fazlnia, 2017) یعنی شرایط ۷۶۰ درجه سانتیگراد و فشار ۴/۵ کیلوبار دارد. لازم به توضیح است که ترکیبات زنولیتی استفاده شده سبب ایجاد سیلیمانیت در گستره دمایی این نمودار نگردید. لذا به منظور مقایسه دقیق‌تر نتایج با مشاهدات

در برخی نمونه‌ها، هم‌رشدی کردوم + اسپینل بر روی کردیریت شکل گرفته (شکل C۳) که در درجات بالای دگرگونی و شرایط ذوب بخشی رخ می‌دهد (Whittington et al, 1998). در این نمونه بلورهای بیوتیت به شدت تحلیل رفته (شکل E۳ و F) هستند و فراوانی آنها مشخصاً کاهش می‌یابد. ناپایداری و تحلیل رفتن بیوتیت‌ها در دماهای بالا در نتیجه رخداد ذوب بخشی از این سنگ‌هاست (Diener, 2014). گارنت‌های درشت‌تر نیمه‌شکل‌دار هستند، اما گارنت‌های کوچک بی‌شکل، در حاشیه کردیریت‌ها به چشم می‌خورند (شکل A). هم‌رشدی بلورهای کردیریت، فلدسپار پتاسیم و پلاژیوکلاز (شکل B۳ و D) نیز از دیگر شواهد بافتی رخداد دگرگونی شدید و میگماتیته شدن در این زنولیت‌هاست (Sepahi et al, 2018) و نشان می‌دهد که این سه کانی احتمالاً به‌طور هم‌زمان رشد نموده‌اند. نمونه‌های زنولیتی با درجه دگرگونی کمتر، از کردیریت + گارنت + بیوتیت + فلدسپار پتاسیم + پلاژیوکلاز + بیوتیت ساخته شده‌اند، اما فاقد فازهای درجه بالای سیلیمانیت و کردوم هستند. مقدار بیوتیت در این نمونه‌ها بیشتر از نمونه‌های قبل بوده اما همچنان تحلیل رفتگی در بیوتیت‌ها به صورت محدودتر به چشم می‌خورد.

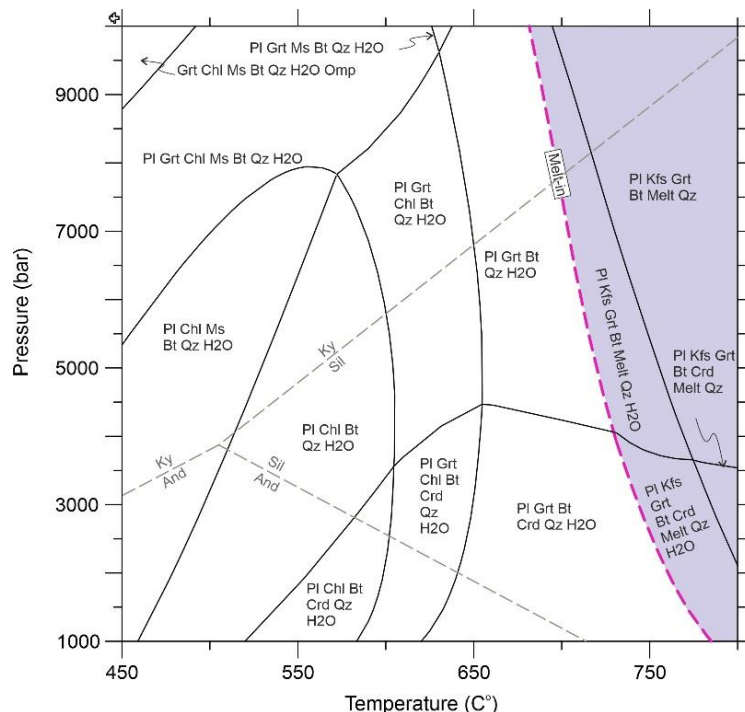
بحث و نتایج

مدل‌سازی نمودارهای فازی

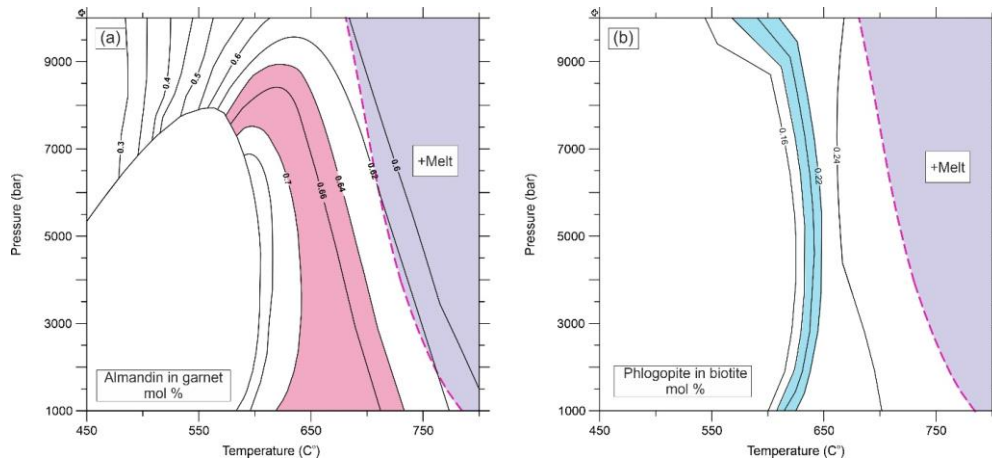
نمودارهای فازی میگماتیته‌های چاه بازرگان توسط نرم‌افزار TheriakDomino (De Capitani, 2010) نسخه 10.0.19044.1526 ارائه شده در سال ۲۰۱۸، پایگاه داده tcd55c2d و سیستم شیمیایی سدیم، کلسیم، پتاسیم، آهن، منیزیم، سیلیسیم و آب (NCKFMASH) محاسبه شدند. ترکیب شیمیایی نمونه زنولیت میگماتیته 190E1 (Fazlnia, 2017)، به دلیل داشتن محتوای منیزیم،

سنگ‌نگاری، محدوده‌های پایداری کانی‌های آلومینوسیلیکات (سیلیمانیت، آندالوزیت و کیانیت) به نمودار اضافه شدند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، ذوب بخشی در محدوده پایداری سیلیمانیت قرار می‌گیرد که مطابق به گردهمایی کانیایی تعیین شده برای اوج دگرگونی این سنگ‌هاست. محاسبه ایزوپلت‌ها (خطوط هم ترکیب) برای مدل-های محلول جامد کانی، می‌تواند به عنوان معیاری در ارزیابی نتایج دما و فشارسنجی به کار برده شود. ایزوپلت‌های آلماندین در گارنت و فلوگوپیت در بیوتیت برای سودوسکشن نمونه 190E1 محاسبه و رسم شدند (شکل ۵). دلیل این انتخاب این است که در محاسبات دما و فشارسنجی، فضل‌نیا (Fazlania, 2017) از ترکیب‌های گارنت با کمترین آلماندین و بیوتیت‌های با بیشترین محتوای منیزیم (فلوگوپیت) استفاده شده بود. ایزوپلت‌های به دست آمده با مقادیر محاسبه شده از تجزیه‌های

شیمیایی کانی‌ها انطباق دقیق ندارند، اما می‌توان تغییرات آنها را در محدوده‌های ۰/۶۴ تا ۰/۷ برای آلماندین و ۰/۱۸ تا ۰/۲۲ برای فلوگوپیت در نظر گرفت (محدوده‌های سایه زده شده در شکل ۵). محل برخورد این دو محدوده در دماهای کمتر از ۷۰۰ درجه سانتیگراد است. چنانچه بخواهیم دما و فشار دگرگونی زنولیت مورد مطالعه را براساس ایزوپلت‌ها تخمین بزنیم، رخداد ذوب بخشی باید در دماهای کمتر از ۷۰۰ درجه سانتیگراد در نظر گرفته شود. به عبارت دیگر، کانی‌های گارنت و بیوتیت میگماتیت‌ها، در دماهایی بالاتر از دمای پایداری ترکیب شیمیایی خود پابرجا مانده و فوق-پایدار (overstep) شده‌اند. اگرچه می‌توان این فرضیه را نیز در نظر گرفت که ذوب بخشی تحت-تاثیر عواملی در دماهایی کمتر از آنچه قبلاً تخمین زده شده، روی داده باشد. تاثیر این عوامل در ادامه مورد بررسی قرار می‌گیرند.

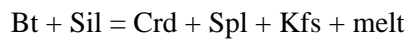


شکل ۴: نمودار فازی محاسبه شده در سیستم NCKFMASH برای نمونه زنولیت میگماتیتی چاه بازرگان. محدوده‌های سایه زده دارای فاز مذاب (Melt) هستند. علائم اختصاری کانی‌ها: Bt: بیوتیت، Chl: کلریت، Crd: کوردیریت، Grt: گارنت، Kfs: پتسیم فلدسپار، Ms: مسکوویت، PI: پلاژیوکلاز، Qz: کوارتز (Kretz, 1983).

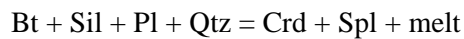


شکل ۵: ایزوپلت‌های (خطوط هم ترکیب) محاسبه شده برای سودوسکشن نمونه زنولیت میگماتیتهی چاه بازرگان در فشار ثابت ۴/۵ کیلوبار. a: تغییرات مقدار آلماندین در گارنت، b: تغییرات مقدار فلوگوپیت در بیوتیت. محدوده‌های سایه زده شده بین ایزوپلت‌ها نزدیکترین مقادیر، به مقادیر حاصل از تجزیه شیمیایی کانی‌های نمونه مورد مطالعه هستند. علائم اختصاری کانی‌ها همانند شکل ۴.

واکنش (۲)



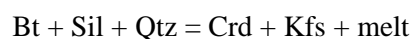
واکنش (۳)

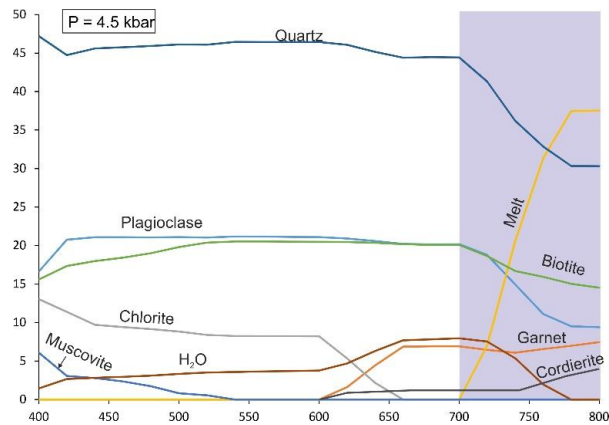


تحلیل رفتن بیوتیت‌ها و سیلیمانیت‌ها و کم شدن آنها در نمونه‌های با درجه دگرگونی بالاتر با نرخ‌های واکنش‌ها سازگاری دارد. از سوی دیگر، گارنت‌های کوچک و بی‌شکل موجود در حاشیه کردیریت‌ها (شکل A۳) و میانبارهای اسپینل در کردیریت (شکل C۳) را نیز می‌توان نشانه رخداد این واکنش‌ها در نظر گرفت. فضل‌نیا (۲۰۱۰) براساس مدل‌سازی‌های ژئوشیمیایی عناصر فرعی و مشاهدات صحرایی، تخمین زده است که حدود ۵۰ تا ۷۰ درصد زنولیت‌های فروافتاده در اتاقک ماگمایی ذوب شده و حدود ۲۵ درصد از این مذاب پیکره زینولیت را ترک کرده است. مقایسه این مقادیر با نمودار شکل ۶، مشخص می‌گردد که درصد حجمی مذاب در دمای حدود ۸۰۰ درجه سانتیگراد، به حدود ۴۰ درصد می‌رسد. این مقدار با نتایج فضل‌نیا (۲۰۱۰) نزدیکی خوبی دارد. هرچند با توجه به شیب منحنی تغییرات درصد حجمی مذاب، می‌توان انتظار داشت که در دماهای بالاتر بر مقدار آن افزوده گردد.

تغییرات کانی‌شناسی و محتوای کانی‌های تشکیل دهنده سنگ در طی دگرگونی و رخداد ذوب بخشی براساس این نمودارها قابل بررسی می‌باشد. بدین منظور درصد فراوانی حجمی کانی‌های شرکت کننده در نمودار فازی شکل ۴ در فشار ثابت ۴/۵ کیلوبار (مطابق با نتایج دما و فشارسنجی) محاسبه شدند (شکل ۶). نمودار به دست آمده نشان می‌دهد که با افزایش دما، از مقادیر کلریت و موسکوویت کاسته می‌گردد. بیوتیت، کوارتز و گارنت در پیش از رخداد ذوب بخشی (بخش سایه زده شده) مقادیر نسبتاً ثابتی داشته و محتوای آب محیط افزایش می‌یابد. با شروع ذوب بخشی، کاهش شدیدی در مقادیر کوارتز، فلدسپار، بیوتیت و آب رخ می‌دهد اما گارنت و کردیریت افزایش می‌یابند. به عبارت دیگر، بیوتیت، کوارتز و پلاژیوکلاز کانی‌های مصرف شونده در واکنش‌های ذوب بخشی بوده اما گارنت محصول این واکنش‌هاست. واکنش‌های زیر می‌توانند رخداد ذوب بخشی را در میگماتیتهای مورد مطالعه نشان دهند (Greenfield et al, 1998; White et al, 2003):

واکنش (۱)





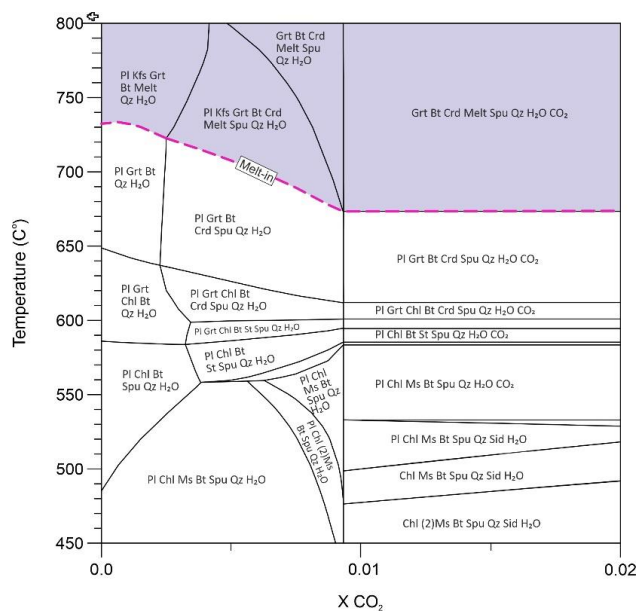
شکل ۶: تغییرات مقادیر درصد حجمی کانی‌های شرکت کننده در نمودار فازی شکل ۴ در فشار ثابت ۴/۵ کیلوبار.

بررسی عوامل موثر بر ذوب بخشی

محتوای کربن دی‌اکسید

تغییرات ترکیب سیال در طی دگرگونی می‌تواند در دمای رخداد ذوب بخشی تاثیرگذار باشد (Bucher and Grapes, 2011). به منظور بررسی این موضوع در مورد میگماتیت‌های چاه بازرگان، نمودار T- X_{CO_2} محاسبه گردید (شکل ۷). لازم به توضیح است که برای ساده‌سازی نمودار، تغییرات CO_2 در محدوده ۰ تا ۰/۲ درصد مولی در نظر گرفته شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در X_{CO_2} برابر با صفر (یعنی سیال به صورت آب خالص)، ذوب

بخشی در دمای ۷۳۰ درجه سانتیگراد آغاز می‌شود. در حالی که با افزایش محتوای CO_2 ، منحنی ذوب بخشی به درجات دمایی پایین‌تر منتقل شده و در نهایت در دمای ۶۸۰ درجه سانتیگراد ثابت می‌شود (تاثیر CO_2 بر دمای ذوب بخشی از بین می‌رود). حضور مقادیر نسبتاً بالای CaO (تا ۲/۵ درصد وزنی) در ترکیب شیمیایی برخی متاپلیت‌ها و زنولیت‌های میگماتیتهای (Fazlnia, 2017) نشان دهنده امکان فعالیت کربن دی‌اکسید در محیط تشکیل این میگماتیت می‌باشد.

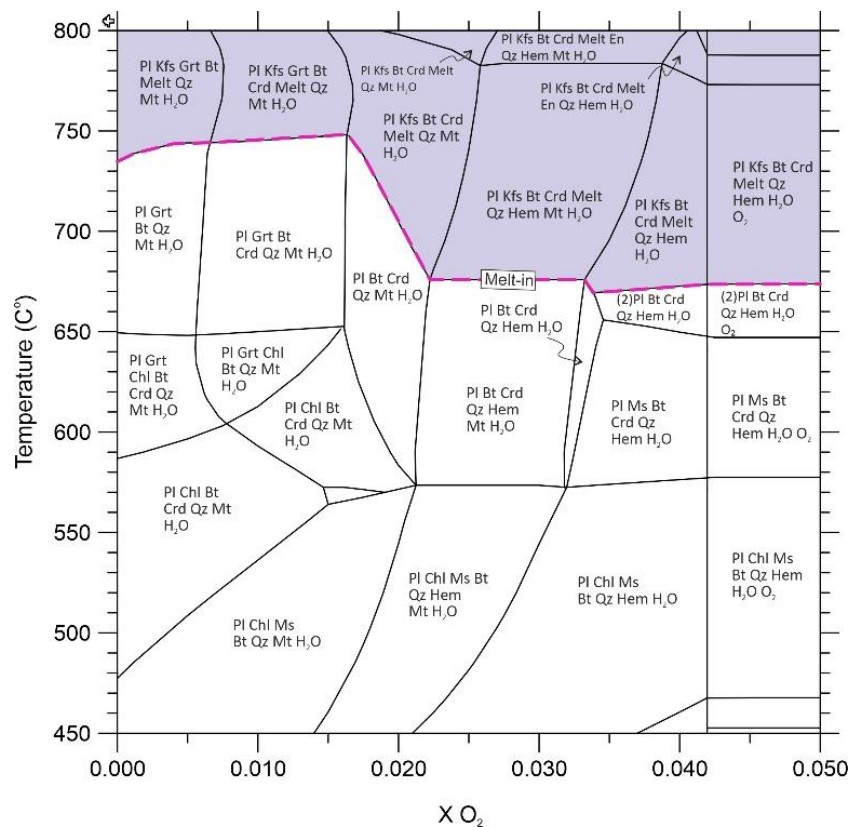


شکل ۷: نمودار فازی دما-کربن دی‌اکسید ($T-X_{CO_2}$) برای زنولیت میگماتیتهای چاه بازرگان در فشار ثابت ۴/۵ کیلوبار. علائم اختصاری کانی‌ها همانند شکل ۴.

فعالیت اکسیژن

تغییرات محتوای اکسیژن محیط نیز بر شرایط رخداد ذوب بخشی تاثیرگذار است (Patino Douce and Beard, 1996). نمودار تغییرات اکسیژن در برابر دما برای میگماتیت‌های مورد مطالعه در شکل ۸ ارائه شده است. نمودار نشان می‌دهد که افزایش محتوای اکسیژن در ابتدا سبب افزایش اندک در دمای ذوب بخشی شده و سپس آن را به سرعت کاهش داده و به مقادیر حدود ۶۶۰ درجه سانتیگراد می‌کشد. به عبارت دیگر، حضور مقادیر کافی اکسیژن در محیط می‌توانسته سبب

رخداد ذوب بخشی در دماهای کمتر از ۷۰۰ درجه سانتیگراد گردد. اکسیژن ممکن است از مذاب در برگزیده زنولیت‌ها و در نتیجه هضم متاپلیت‌های میزبان تامین شده باشد (Qiu and Qui, 2016). وجود بلورهای مگنتیت در سنگ‌های ماگمایی در برگزیده زنولیت‌ها (Fazlnia, 2017) نشانگر بالا بودن محتوای اکسیژن ماگمای مادر آنهاست (Bucholz et al, 2018) که می‌تواند سبب تغییر در شرایط اکسیداسیون - احیای زنولیت شود (Whitley et al, 2020).



شکل ۸: نمودار فازی دما - اکسیژن (T-XO₂) برای زنولیت میگماتیتی چاه بازرگان در فشار ثابت ۴/۵ کیلوبار. علائم اختصاری کانی‌ها: Mt: مگنتیت، Hem: هماتیت، سایر علائم اختصاری کانی‌ها همانند شکل ۴.

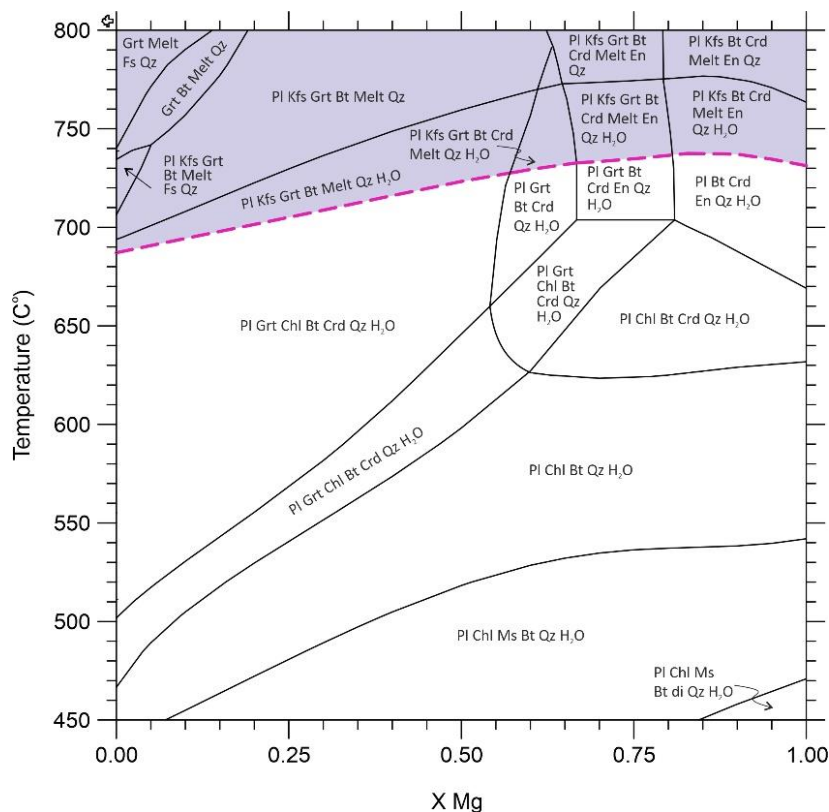
ترکیب سنگ‌مادر

تغییرات در مقدار آهن و منیزیم از دیگر عوامل تاثیرگذار در ذوب بخشی متاپلیت‌ها هستند و به طور کلی ترکیبات با منیزیم بالاتر در درجات دمای بالاتری دچار ذوب بخشی می‌شوند (Patino

Douce and Beard, 1996; Bucher and Grapes, 2011). نمودار تغییرات (MgO/MgO+FeO) Mg# در برابر دما در طی ذوب بخشی میگماتیت‌های چاه بازرگان در شکل ۹ نشان داده شده است. براساس این نمودار، در مقادیر Mg# برابر با صفر، ذوب

متغیر است که مقداری اندک تا متوسط محسوب می‌شود. بالا بودن مقدار آهن در مقایسه با منیزیم در این سنگ‌ها می‌توانسته امکان ذوب بخشی در درجات دمایی پایین‌تر را فراهم نموده باشد.

بخشی در دماهای حدود ۶۸۰ درجه سانتیگراد آغاز می‌گردد و با بالاتر رفتن مقدار Mg#، دمای منحنی لیکوئیدوس نیز بیشتر شده و به حدود ۷۴۰ درجه سانتیگراد می‌رسد. مقدار Mg# در زنولیت‌های میگماتیسی و متاپلیت‌های منطقه بین ۰/۲ تا ۰/۳



شکل ۹: نمودار فازی تغییرات XMg (MgO/MgO+FeO) در برابر دما برای نمونه زنولیت میگماتیسی چاه بازرگان، علائم اختصاری کانی‌ها: En: انستاتیت، Fs: فروسیلیت، Di: دیوپسید. سایر علائم اختصاری کانی‌ها همانند شکل ۴.

نتیجه واکنش‌های مصرف کننده بیوتیت و سیلیمانیت به وقوع پیوسته است. -نمودارهای فازی محاسبه شده براساس ترکیب یکی از زنولیت‌ها، نشان می‌دهد که ذوب بخشی در دماهای ۷۰۰ تا ۷۵۰ درجه سانتیگراد و فشارهای کمتر از ۵ کیلو بار رخ داده است. اگرچه، مقایسه ترکیب شیمیایی گارنت و بیوتیت‌های زنولیت‌ها با نتایج حاصل از این نمودار آشکار می‌سازد که احتمال رخداد ذوب بخشی در دماهای کمتر نیز وجود داشته است.

نتیجه‌گیری

-زنولیت‌های متاپلیتی فروافتاده در ماگمای سازنده توده باتولیتی چاه بازرگان دچار دگرگونی مجاورتی شدید و ذوب بخشی شده‌اند. این قطعات زنولیتی براساس میزان دما و مدت زمان حرارت‌دهی در داخل این باتولیت، درجات مختلفی از دگرگونی مجاورتی را تحمل نمودند. -گردهمایی کانیایی کردیریت + اسپینل + گارنت + فلدسپار پتاسیم پرتیتی + پلاژیوکلاز شاخص بالاترین درجه دگرگونی بوده و ذوب بخشی در

آهن سنگ‌مادر می‌توانسته سبب رخداد ذوب بخشی در دماهای پائین‌تر شود.

-بررسی‌های صورت گرفته بر روی نمودارهای فازی-تغییرات ترکیب سیال و سنگ‌مادر نشان می‌دهند که افزایش کربن دی‌اکسید، اکسیژن و محتوای

منابع

- Alavi, M., 1994. Tectonic of the Zagros orogenic belt of Iran: new data and interpretations: *Tectonophysics*, v. 229, p. 211-238.
- Ashworth, J.R., 1985. *Migmatites*. First edition, Blackie, Glasgow, 302 p.
- Bea, F., 1996. Controls on the trace element composition of crustal melts: *Transactions of the Royal Society of Edinburg, Earth Sciences* v. 87, p. 133-141.
- Berberian, M. and King, G.C.P., 1981. Towards a paleogeography and tectonic evolution of Iran: *Canadian Journal of Earth Sciences*, v. 18(2), p. 210-265.
- Bucholz, C.E., Stolper, E.M., Eiler, J.M. and Breaks, F.W., 2018. A Comparison of Oxygen Fugacities of Strongly Peraluminous Granites across the Archean-Proterozoic Boundary, *Journal of Petrology*, v. 59 (11), p. 2123-2156.
- Brown, M., 1979. The petrogenesis of the St. Malo migmatite belt, *American Massif, France: Neues Jahrbuch fur Mineralogie Abhandlungen*, v. 135, p. 48-74.
- Bucher, K. and Grapes, R., 2011. *Petrogenesis of Metamorphic Rocks*. Springer-Verlag, Heidelberg, 428 p.
- Coggon, R. and Holland T.J.B., 2002. Mixing properties of phengitic micas and revised garnet-phengite thermobarometers: *Journal of metamorphic Geology*, v. 20, p. 683-696.
- De Capitani, C. and Petrakakis, K., 2010. The computation of equilibrium assemblage diagrams with Theriak/Domino software: *American Mineralogist*, v. 95, p. 1006-1016.
- Diener, J., 2014. Low-P-high-T metamorphism of the Aggeneys terrane, Namaqua Metamorphic Complex, South Africa: *South African Journal of Geology*, v. 117(1), p. 31-48.
- Fazlnia, A.N., 2010. Geochemical modeling of partial melting on the Tall-e-Pahlevani migmatitic xenoliths, Shahr-e-Babak: *Petrology* v. 1, p. 11-26 (in Persian).
- Fazlnia, A.N., 2017. Geochemical characteristics and conditions of formation of the Chah-Bazargan peraluminous granitic patches, ShahrBabak, Iran: *Geologica Carpathica*, v. 68, p. 445-463.
- Fazlnia, A.N., Schenk, V., van der Straaten, F. and Mirmohammadi, M.S., 2009. Petrology, geochemistry, and geochronology of Trondhjemites from the Qori complex, Neyriz, Iran: *Lithos*, v. 112, p. 413-433.
- Greenfield, J.E., Clarke, G.L. and White, R.W., 1998. A sequence of partial melting reactions at Mt Stafford, Central Australia. *Journal of Metamorphic Geology*, v. 16, p. 363-378.
- Hassanzadeh, J. and Wernicke, B.P., 2016. The Neotethyan Sanandaj-Sirjan zone of Iran as an archetype for passive margin-arc transitions: *Tectonics*, v. 35, p. 586-621.
- Holland, T.J.B., Baker, J.M. and Powell, R., 1998. Mixing properties and activity-composition relationships of chlorites in the system MgO-FeO-Al₂O₃-SiO₂-H₂O: *European Journal of Mineralogy*, v. 10, p. 395-406.
- Jones, K.A. and Brown, M., 1990. High-temperature 'clockwise' P-T paths and melting in the development of regional migmatites: an example from southern Brittany, France: *Journal of Metamorphic Geology*, v. 8, p. 551-578.

- Kretz, R., 1983. Symbols for rock-forming minerals: *American Mineralogist*, v. 68, p. 277-279.
- Mahmoudi, S. and Baharifar, A.A., 2018. Phase equilibria and P-T-t path of metapelitic rocks in SE-Hamedan, Sanandaj-Sirjan Zone, Iran: *Mineralogy and Petrology*, v. 113, p. 135-154.
- Makrygina, V.A., 1977. Role of metamorphic zonation in distribution of pegmatites and migmatites of different composition: *International Geology Reviews*, v. 19, p. 1133-1141.
- Milord, I., Sawyer, E.W. and Brown, M., 2001. Formation of diatexite migmatite and granite magma during anatexis of semi-pelitic metasedimentary rocks: an example from St. Malo, France: *Journal of Petrology*, v. 42, p. 487-505.
- Mohajjel, M. and Fergusson, C.L., 2014. Jurassic to Cenozoic tectonics of the Zagros Orogen in northwestern Iran: *International Geology Review*, v. 56, p. 263-287.
- Nyman, M.W., Pattinson, D.R.M. and Ghent, E.D., 1995. Melt extraction during formation of K-feldspar sillimanite migmatites, west of Revelstoke, British Columbia: *Journal of Petrology*, v. 36, p. 351-372.
- Patino Douce, A. and Bread, J.S., 1996. Effects of P, fO_2 and Mg/Fe ratio on dehydration melting of model metagreywackes: *Journal of Petrology*, v. 37, p. 999-1024.
- Powell, R. and Holland, T.J.B., 1985. An internally consistent dataset with uncertainties and correlations: 1. Methods and a worked example: *Journal of Metamorphic Geology*, v. 3, p. 327-342.
- Qiu, J. and Qiu, L., 2016. Geochronology and magma oxygen fugacity of Ehu S-type granitic pluton in Zhe-Gan-Wan region, SE China, *Chemie der Erde*, v. 76, p. 441-448.
- Saki, A., Moazzen, M. and Baharifar, A.A., 2012. Migmatite microstructures and partial melting of Hamadan metapelitic rocks, Alvand contact aureole, western Iran: *International Geology Review*, v. 54, p. 1229-1240.
- Sawyer, E.W., 1991. Disequilibrium melting and the rate of meltresiduum separation during migmatitization of mafic rocks from the Grenville Front, Quebec: *Journal of Petrology*, v. 32, p. 701-738.
- Sawyer, E.W., 1996. Melt segregation and magma flow in migmatites: implications for the generation of granite magmas: *Transactions of the Royal Society of Edinburgh, Earth Sciences*, v. 87, p. 85-94.
- Sawyer, E.W., 2008a. Atlas of migmatites. Special publication, NRC Research Press, the Canadian Mineralogist, 389 p.
- Sawyer, E.W., 2008b. Working with Migmatites: Nomenclature for the Constituent Parts. In Sawyer E.W. (Ed.). *Working with Migmatites: Mineralogical Association of Canada, Short Course Series*, v. 38, p. 1-28.
- Sawyer, E.W., 2014. The inception and growth of leucosomes: microstructure at the start of melt segregation in migmatites: *Journal of Metamorphic Geology*, v. 32, p. 695-712.
- Sepahi, A.A., Jafari, S.R., Osanai, Y., Shahbazi, H. and Moazzen, M., 2018. Age, petrologic significance and provenance analysis of the Hamedan low-pressure migmatites; Sanandaj-Sirjan Zone, west Iran: *International Geology Review*, v. 61, p. 1446-1461.
- Shafaii Moghadam, H., Li, X.H., Stern, R.J., Ghorbani, G. and Bakhshizad, F., 2016. Zircon U-Pb ages and Hf-O isotopic composition of migmatites from the Zanzan-Takab complex, NW Iran: Constraints on partial melting of metasediments: *Lithos*, v. 240-243, p. 34-48.
- Sheppard, S., Occhipinti, S.A. and Tyler, I.M., 2003. The relationship between tectonism and composition of granitoid magmas, Yarlalweelor Gneiss Complex, Western Australia: *Lithos*, v. 66, p. 133-

154.

-Spear, F.S., 1993. Metamorphic phase equilibria and pressure-temperature-time paths. Mineralogical Society of America, Washington DC, 799 p.

-Stöcklin, J., 1968. Structural history and tectonics of Iran: a review: The American Association of Petroleum Geologists Bulletin, v. 52, p. 1229-1258.

-White, R.W., Powell, R. and Clarke, G.L., 2003. Prograde metamorphic assemblage evolution during partial melting of metasedimentary rocks at low pressures: migmatites from Mt. Stafford, central Australia: Journal of Petrology, v. 44, p. 1937-1960.

-White, R.W., Powell, R. and Holland, T.J.B., 2007. Progress relating to

calculation of partial melting equilibria for metapelites: Journal of Metamorphic Geology, v. 25, p. 511-527.

-Whitley, S., Halama, R., Gertisser, R., Preece, K., Deegan, F.M. and Troll, V.R., 2020. Magmatic and metasomatic effects of magma-carbonate interaction recorded in calc-silicate xenoliths from Merapi volcano (Indonesia), Journal of Petrology, v. 61(4), p. 1-38.

-Whittington, A., Harris, N. and Baker, J., 1998. Low-pressure crustal anatexis: the significance of spinel and cordierite from metapelitic assemblages at Nanga Parbat, northern Pakistan: Geological Society, London, Special Publications, v. 138, p. 183-198.