



ویژگی‌های ژئوشیمیایی و ایزوتوپی پروتولیت اکلوزیت‌های شمال شهر کرد: شاهدهی بر تکوین حوضه پشت کمان نئوپروتروزوئیک در پهنه سنندج-سیرجان

فروغ ملک محمودی^۱، علیرضا داوودیان دهکردی^{۱*}، ناهید شبانیان بروجنی^۱ و حسین عزیزی^۲

(۱) دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران

(۲) گروه معدن، دانشکده مهندسی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران

دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۰۸/۲۰، پذیرش: ۱۳۹۷/۰۴/۲۵

چکیده

اکلوزیت‌های مورد بررسی بخشی از کمپلکس دگرگونی شمال شهرکرد هستند که به پهنه ساختاری سنندج-سیرجان تعلق دارند. این اکلوزیت‌ها با ترکیب کانی شناسی غالب آمفیبول، گارنت، زئوزیت و پیروکسن (امفاسیت) به صورت عدسی‌هایی همراه پاراگنایس‌های نئوپروتروزوئیک مشاهده می‌شوند. مجموعه کانیایی این سنگ‌ها نشان‌دهنده دگرگونی آنها در فشار بالاست. با در نظر گرفتن سیستم نسبتاً بسته در تعادلات شیمیایی این سنگ‌ها در طی فرایندهای دگرگونی می‌توان محیط تشکیل سنگ مادر این سنگ‌ها را مورد بررسی قرار داد. نمودار عناصر نادر خاکی بهنجار شده به کندریت، غنی‌شدگی جزئی از عناصر نادر خاکی سبک نسبت به عناصر نادر خاکی سنگین را نشان می‌دهد و نسبت $(La/Yb)_{cn}$ در این نمونه‌ها بین ۱/۷ تا ۲/۷ متغیر است. نمودار عناصر نادر بهنجار شده به گوشته اولیه آنومالی منفی Ti، Nb، P و Y را نشان می‌دهد. نمودارهای ژئوشیمیایی نشان‌دهنده تمایل زیاد این سنگ‌ها با بازالت‌های تولیتی است که در محیط‌های کششی پشت کمان شکل گرفته‌اند. بررسی‌های ایزوتوپی Sr-Nd نشان‌دهنده ماگمای اولیه این سنگ‌ها با ترکیب گوشته غنی شده بالای زون فرورانش است. با توجه به الگوی پراگندگی عناصر و نسبت‌های ایزوتوپی اولیه می‌توان تشکیل سنگ مادر اکلوزیت‌های منطقه را ناشی از کشش‌های پشت کمان در پهنه سنندج-سیرجان در اواخر پروتروزوئیک پایانی (ادیاکاران) دانست.

واژه‌های کلیدی: اکلوزیت، گوشته غنی شده، نسبت‌های ایزوتوپی Nd-Sr، شمال شهرکرد، پهنه سنندج-سیرجان

مقدمه

می‌شود، این پهنه‌ها تاریخچه مشابهی را طی دوران پالئوزوئیک پشت سر گذاشته‌اند (Alavi, 2004). پهنه سنندج-سیرجان پرتکاپوترین پهنه ساختاری ایران است. پی سنگ سنندج-سیرجان به سن نئوپروتروزوئیک متعلق به ابرقاره گندواناست (Berberian and King, 1981). پهنه سنندج-سیرجان، با امتداد شمال غربی-جنوب شرقی بخشی از کوه‌زاد آلپ-

فلات ایران از لحاظ ویژگی‌های زمین‌شناختی به پهنه‌های ساختاری مختلفی تقسیم می‌شود که توسط گسل‌های عمیق و کمربندهای افیولیتی از هم تفکیک می‌شوند. همه پهنه‌های ساختاری ایران، به جز کپه‌داغ دارای پی سنگ پن افریکن هستند (Hassanzadeh and Wernicke, 2016). اغلب تصور

ترکیه (Gürsu and Göncüoğlu, 2005) و اروپا (Ilnicki et al., 2013; Linnemann et al., 2014) است. در این پژوهش، تلاش شده است بر اساس شواهد ژئوشیمیایی، ایزوتوپی، مشاهدات صحرایی و میکروسکوپی ترکیب شیمیایی، منشأ و محیط تشکیل سنگ مادر اکلوزیت‌های شمال شهر کرد و همچنین عمق تشکیل ماگما سازنده مشخص شود. همچنین با توجه به وجود نظرهای متفاوت در مورد منشأ این سنگ‌ها، مقایسه این نتایج با پژوهش‌های پیشین و همچنین سایر مناطق مشابه از لحاظ زمانی و محیط زمین‌ساختی در جهان، دیدگاه بهتری را در درک تحول زمین‌ساختی پی‌سنگ ایران زمین فراهم می‌کند.

زمین‌شناسی منطقه

کمپلکس دگرگونی شمال شهر کرد در نزدیکی دریاچه سد زاینده رود و بین استان‌های اصفهان و چهارمحال و بختیاری قرار دارد. این منطقه، بخشی از یک پهنه برشی بزرگ با دگرشکلی شکل‌پذیر است که به تغییر شکل اغلب اکلوزیت‌های مورد بررسی و سنگ‌های همراه آنها منجر شده است. دگرگونه‌های شمال شهر کرد به سه واحد اصلی درجه بالا، درجه پایین و متاگرانیتوئیدها تقسیم می‌شوند (Davoudian et al., 2016; 2017) واحد فشار بالای این مجموعه شامل سه بخش است: ۱- پاراگنایس‌ها، کالک‌شیت‌ها و مررها که قطعاتی از اکلوزیت‌ها و آمفیبولیت‌های کمتر دگرسان‌شده را دربر گرفته‌اند، ۲- شیت‌های کوارتز فلدسپاتیک، آمفیبولیت‌ها، گارنت-آمفیبولیت‌ها و مررها به همراه کالک‌شیت‌ها، گرافیت‌شیت‌ها و میکاشیت‌ها و ۳- بخش سوم شامل ارتوگنایس‌هایی است که عدسی‌هایی از آمفیبولیت‌ها را دربر گرفته‌اند.

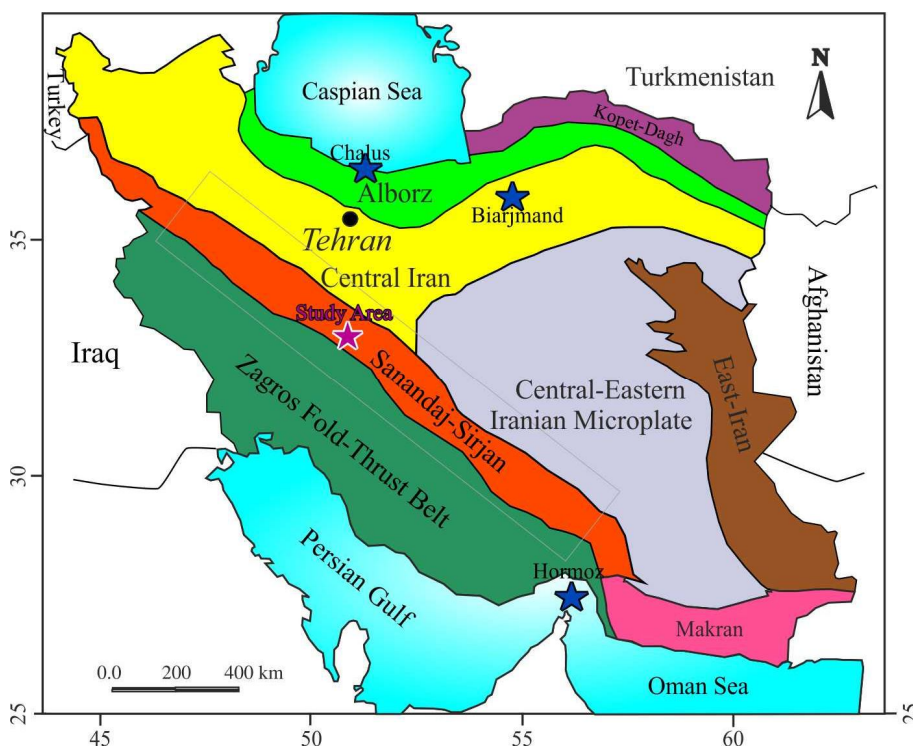
زمان تشکیل سنگ مادر این واحدهای دگرگونی پرکامبرین در نظر گرفته می‌شود (Zahedi et al., 1992; Sahandi and Soheili, 2005; Nutman et al., 2013) و سن دگرگونی آنها مربوط به فرورانش اقیانوس نئوتیس در ژوراسیک آغازین

همیالیاست (Berberian and King, 1981; Şengör, 1990; Alavi, 1994). درازای این پهنه حدود ۱۵۰۰ کیلومتر است که از باختر دریاچه ارومیه آغاز می‌شود و در یک راستای شمال‌غربی-جنوب‌شرقی تا گسل میناب، در شمال بندرعباس ادامه می‌یابد. پهنای آن ۱۵۰ تا ۲۵۰ کیلومتر است که توسط دو نوار مشخص شده است، یکی نوار افیولیتی خارجی (نیریز-کرمانشاه) در جنوب‌غربی و دیگری نوار افیولیتی داخلی (خوی و ناین-بافت) که در شمال‌شرقی (Stöcklin, 1968; Takin, 1972) این زون واقع شده‌اند. در جهت شمال‌غرب، پهنه سندج-سیرجان تا جنوب‌شرقی ترکیه ادامه دارد و پس از آن با تغییری در روند آن تا ماسیف بیتلیس ادامه می‌یابد (Stöcklin, 1968).

تاریخچه تکامل سندج-سیرجان همچون سایر نقاط ایران متأثر از نقش سه اقیانوس پروتوتیس، پالتوتیس و نئوتیس بوده است. فرورانش پروتوتیس در ۶۳۰ میلیون سال قبل به ماگماتیسیم کمان و پشت کمان در حاشیه شمالی گندوانا منجر شد. بیشترین فعالیت ماگمایی در بازه زمانی ۵۴۰ تا ۵۶۰ میلیون سال قبل گزارش شده است (Berberian and King, 1981; Ustaömer et al., 2009; Balaghi Einalou et al., 2014a; Balaghi Einalou et al., 2014b; Balaghi Einalou et al., 2015a; Balaghi Einalou et al., 2015b; Avigad et al., 2015; Homam, 2015; Hosseini et al., 2015; Shafaii Moghadam et al., 2016a; Hosseini et al., 2016a; Hosseini et al., 2016b; Moradi et al., 2016; Shekari et al., 2017; Nafisi et al., 2019). شباهت‌های قابل توجهی بین ماگماتیسیم پرکامبرین سندج-سیرجان با ایران مرکزی، زاگرس و ماسیف بیتلیس و مندرس در ترکیه وجود دارد. فعالیت‌های پشت کمان در ابرقاره گندوانا در حدود ۵۷۰ میلیون سال پیش اتفاق افتاده است (Linnemann et al., 2014; Avigad et al., 2015; Shafaii Moghadam et al., 2016b). رخداد محیط پشت کمان در ایران در پهنه‌های گوناگون البرز، زاگرس و بلوک لوت گزارش شده است (Etemad Saeed et al., 2015; Faramarzi et al., 2015; Hosseini et al., 2015) که از لحاظ سنی در تطابق با موارد گزارش شده از

برخورد صفحه عربی با اوراسیا رخ داده است (Davoudian et al., 2016; Davoudian et al., 2016). شکل ۱، موقعیت منطقه مورد بررسی و دیگر مناطق با سن و ویژگی‌های مشابهی که در ایران گزارش شده‌اند را نشان می‌دهد.

است (Davoudian et al., 2016). قرارگیری اکلوزیت‌های فشار بالا در کنار واحدهای دگرگونی فشار پایین می‌تواند مربوط به رخداد پهنه‌های برشی عمیق است که طی مرحله کوه‌زایی و سربرآوری در ژوراسیک تا کرتاسه و پیش از



شکل ۱. موقعیت کمپلکس دگرگونی شمال شهرکرد به همراه سایر پهنه‌های پشت‌کمان گزارش شده با سن نئوپروتروزوئیک در نقشه زمین‌شناسی ایران

Fig. 1. The position of the North Shahrekord metamorphic complex and other reported back-arcs with Neoproterozoic age in geologic map of Iran

(۲).

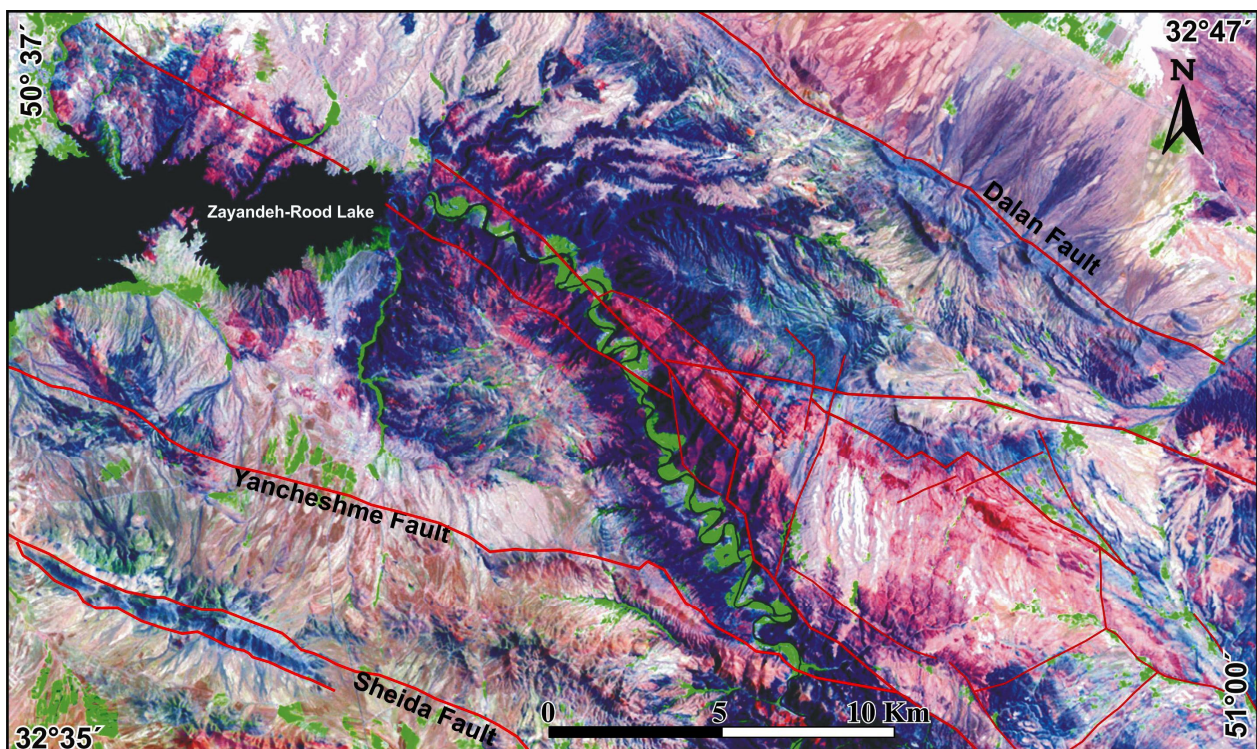
روش مطالعه

پس از بازدیدهای صحرایی از منطقه و نمونه‌برداری و ثبت مختصات و مشخصات ظاهری نمونه‌ها، تعدادی مقطع نازک برای بررسی‌های میکروسکوپی تهیه‌شد. تعداد ۹ عدد از نمونه‌هایی با کمترین میزان هوازدگی و رگه و رگچه برای آنالیزهای سنگ‌کل انتخاب شدند. در این پژوهش، از روش‌های

اکلوزیت‌ها در ابعاد متفاوت از چند ده سانتی‌متر تا چند متر به صورت عدسی در پاراگنایس‌ها دیده می‌شوند. همچنین برخی از این اکلوزیت‌ها شکل بالشی دارند که نشان‌دهنده فوران سنگ‌مادر بازالتی آنها در محیط کف دریاست. سنگ‌های همراه با منشأ رسوبی شامل پاراگنایس‌ها، کواتزیت‌ها، شیست‌ها، مرمرهای آهکی و دولومیتی و متاپسامیت هستند. سنگ‌های کمپلکس دگرگونی شمال شهرکرد در حدفاصل دو گسل اصلی منطقه یعنی گسل دالان و گسل شیدا برونزد دارند (شکل

(Agilent 7700×) در دانشگاه ناگویا و سه نمونه در آزمایشگاه ACME کانادا آزمایش شدند. آنالیز ایزوتوپ‌های Nd-Sr در دانشگاه ناگویای ژاپن انجام شد. برای توضیحات بیشتر در مورد روش کار به مقاله ملک محمودی و همکاران (Malek- 2017) مراجعه شود. (Mahmoudi et al.,

آزمایش سنگ کل شامل XRF و ICP-MS برای تعیین منشأ اولیه اکلوزیت‌های کمپلکس دگرگونی شمال شهرکرد استفاده شده است. شش نمونه برای تعیین عناصر اصلی توسط XRF (Rigaku ZSX PrimusII) در دانشگاه ناگویای ژاپن و سه نمونه در دانشگاه سالزبورگ اتریش آزمایش شد. شش نمونه برای بررسی عناصر نادر و نادر خاکی به روش ICP-MS



شکل ۲. تصویر ماهواره‌ای لندست ۷ (ETM+) از کمپلکس دگرگونی شمال شهرکرد (مابین دو گسل اصلی دالان و شیدا) به طول $50^{\circ}37'$ تا 51° و عرض $32^{\circ}35'$ تا $32^{\circ}47'$

Fig. 2. Satellite image of Landsat 7 (ETM+) form North Shahrekord Metamorphic Complex (NSMC). Latitude $50^{\circ}37'$ - 51° and longitude $32^{\circ}35'$ to $32^{\circ}47'$

کلسیک، کلینوپیروکسن، گارنت، زوئیزیت، کلینوزوئیزیت، فنزیت، روتیل و کوارتز است. اغلب کلینوپیروکسن‌ها در اثر دگرگونی برگشتی به آمفیبول تبدیل شده‌اند؛ درحالی که زاویه رخ‌های آنها بدون تغییر باقی مانده است. بافت‌های دگرشکلی نظیر پورفیروکلاست‌های پوششی و سیمپلکتیت‌ها که بیشتر از کانی‌های آمفیبول و پلاژیوکلاز تشکیل شده است (شکل ۳-A،

پetroگرافی

اکلوزیت‌های کمپلکس دگرگونی شمال شهرکرد طی دگرگونی فشار بالا در ژوراسیک آغازین تشکیل شده‌اند. دمای تشکیل این اکلوزیت‌ها در حدود 560° درجه سانتی‌گراد و فشار 24 کیلوبار برآورد شده است (Davoudian et al., 2008). کانی‌شناسی این اکلوزیت‌ها شامل آمفیبول‌های سدیک-

قرار می‌گیرند (Staudigel et al., 1996). در مورد تعیین منشأ سنگ‌های متابازیت (شامل اکلوزیت‌ها) کمپلکس دگرگونی شمال شهر کرد نظرهای متفاوتی وجود دارد؛ به طوری که محیط زمین‌ساختی تشکیل این اکلوزیت‌ها در پژوهش‌های پیشین به‌عنوان مورب (Davoudian et al., 2006; Akbari et al., 2016) و یا درون ورقه‌ای (Jamali et al., 2016) معرفی شده است. ملک محمودی و همکاران (Malek-mahmoudi et al., 2017) تشکیل اولیه متابازیت‌ها را مربوط به محیط پشت کمان می‌داند. داده‌های مربوط به اکلوزیت‌های شمال شهر کرد به همراه سایر نمونه‌های پشت کمان گزارش شده مربوط به پرکامبرین (Cai et al., 2014; Ilnicki et al., 2013; Gürsu and Göncüoğlu, 2005) برای مقایسه در نمودارها نمایش داده شده است. میانگین نتایج آنالیز عناصر اصلی، نادر و نادر خاکی مورد استفاده در این پژوهش در جدول ۱ آمده است (Davoudian et al., 2006; Akbari et al., 2016; Jamali Ashtiani et al., 2016). ترسیم موقعیت اکلوزیت‌های کمپلکس دگرگونی شمال شهر کرد در نمودار Zr/Ti در برابر Nb/Y نشان می‌دهد، منشأ اولیه این نمونه‌ها ترکیبی بازالتی داشته است و ماگمای سازنده این بازالت‌ها ترکیب تولیتی دارد (شکل ۴-A و B). روند عناصر نادر خاکی بهنجار شده به کندریت غنی شدگی جزئی عناصر نادر خاکی سبک نسبت به عناصر نادر خاکی سنگین را نشان می‌دهد. آنومالی قابل توجه Eu در نمونه‌های مورد بررسی مشاهده نمی‌شود. میزان (La/Yb)_{cn} در نمونه‌های اکلوزیت کمپلکس دگرگونی شمال شهر کرد برابر ۱/۷ تا ۲/۷ است (شکل ۵-A). عناصر بهنجار شده به گوشته اولیه نشان‌دهنده آنومالی منفی عناصر با شدت میدان بالا نظیر تیتانیوم، فسفر، نیوبیوم و زیرکنیوم است (شکل ۵-B)؛ در حالی که روند کلی عناصر نادر خاکی با روند گوشته غنی شده^۱ مشابهت دارد، تهی شدگی از تیتانیوم، نیوبیوم و زیرکنیوم می‌تواند ناشی از تأثیر سیالات فرورانش است (Pearce, 2008).

B و D)، در برخی از اکلوزیت‌های شمال شهر کرد قابل مشاهده هستند. آمفیبول خودشکل درون گارنت احتمالاً نشان‌دهنده تشکیل این کانی در فاز پیش‌رونده و پیش از اوج رخساره اکلوزیت است (شکل ۳-A و B). بسیاری از اکلوزیت‌های منطقه در اثر دگرگونی پس‌رونده به گارنت آمفیبولیت و آمفیبولیت تبدیل شده‌اند. کلینوپیروکسن‌های دگرگونی فشار بالا که با ترکیب امفاسیت در رخساره اکلوزیت تشکیل شده‌اند (Davoudian et al., 2008)، در فرایند دگرگونی قهقرایی تا حد قابل توجهی تغییر یافته و به آمفیبول تبدیل شده‌اند. تشخیص پیروکسن‌های باقی‌مانده از آمفیبول‌ها با کمک رنگ پریدگی، پلئوکرونیسم ضعیف‌تر و رخ‌های نود درجه امکان‌پذیر است (Deer et al., 1992). با تجزیه پیروکسن به آمفیبول آهن و احتمالاً تیتانیوم اضافه در امتداد رخ‌ها جایگزین می‌شود (شکل ۳-F). گارنت‌ها اغلب خودشکل بوده و ابعاد آنها از چند صد میکرون تا بیش از یک میلی‌متر متغیر است (شکل ۳-D). کاهش فشار به تجزیه گارنت و خروج اکسید تیتانیوم از ساختار گارنت منجر شده است (Zhang et al., 2003) و اکسلوشن‌های روتیل‌های ریزدانه درون پورفیرهای گارنت تشکیل می‌شود. کانی اسفن به دو صورت خودشکل و بی‌شکل در مقطع دیده می‌شود. کانی روتیل در فشار بالا تشکیل می‌شود (شکل ۳-A و B). کانی زوئزیت به صورت کشیده در مقاطع میکروسکوپی اکلوزیت‌های شمال شهر کرد قابل مشاهده است (شکل ۳-C). پورفیرهای کشیده آمفیبول در زمینه پلاژیوکلاز که تحت تأثیر دگرشکلی ایجاد شده‌اند، در شکل ۳-E مشاهده می‌شود.

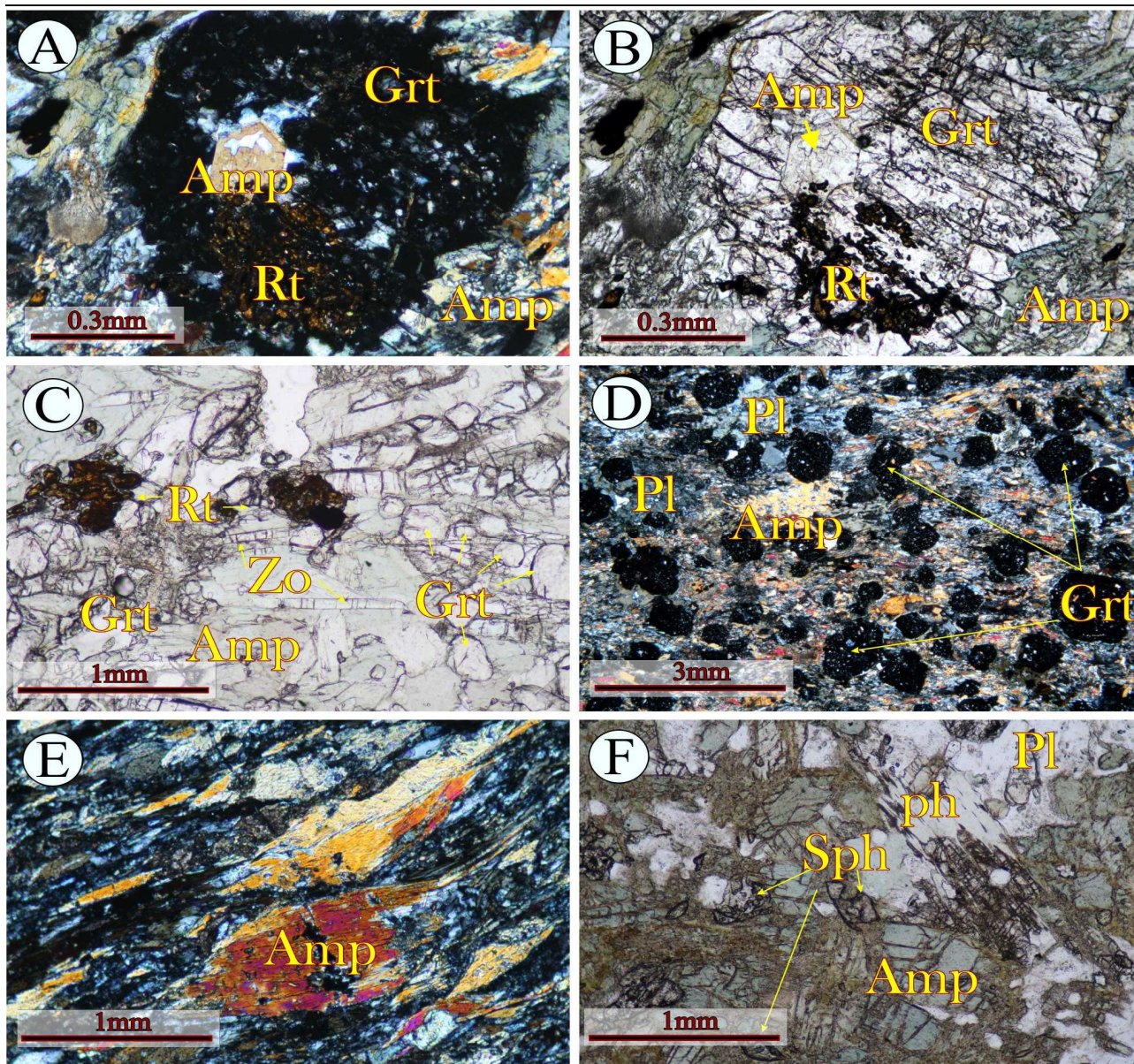
بحث و بررسی

اکلوزیت‌های کمپلکس دگرگونی شمال شهر کرد متحمل چندین فاز دگرگونی و دگرشکلی شده‌اند. عناصر با شدت میدان بالا (Ti, Nb, Y) و عناصر انتقالی (Cr, Ta, HFSE) و V, Ni, Sc در رخداد‌های دگرگونی غیر متحرک قلمداد می‌شوند و به همین علت برای بررسی منشأ اولیه مورد استفاده

جدول ۱. آنالیز سنگ کل نمونه‌های اکلوژیت شمال شهرکرد نتایج میانگین یادشده بر گرفته از داودیان و همکاران (Davoudian et al., 2006)، اکبری و همکاران (Akbari et al., 2016)، جمالی آشتیانی و همکاران (Jamali Ashtiani et al., 2016) و ملک محمودی و همکاران (Malek-Mahmoudi et al., 2017) و داده‌های مربوط به بهنجارسازی به کندریت بر گرفته از سان و مک‌دوناف (Sun and McDonough., 1989) است.

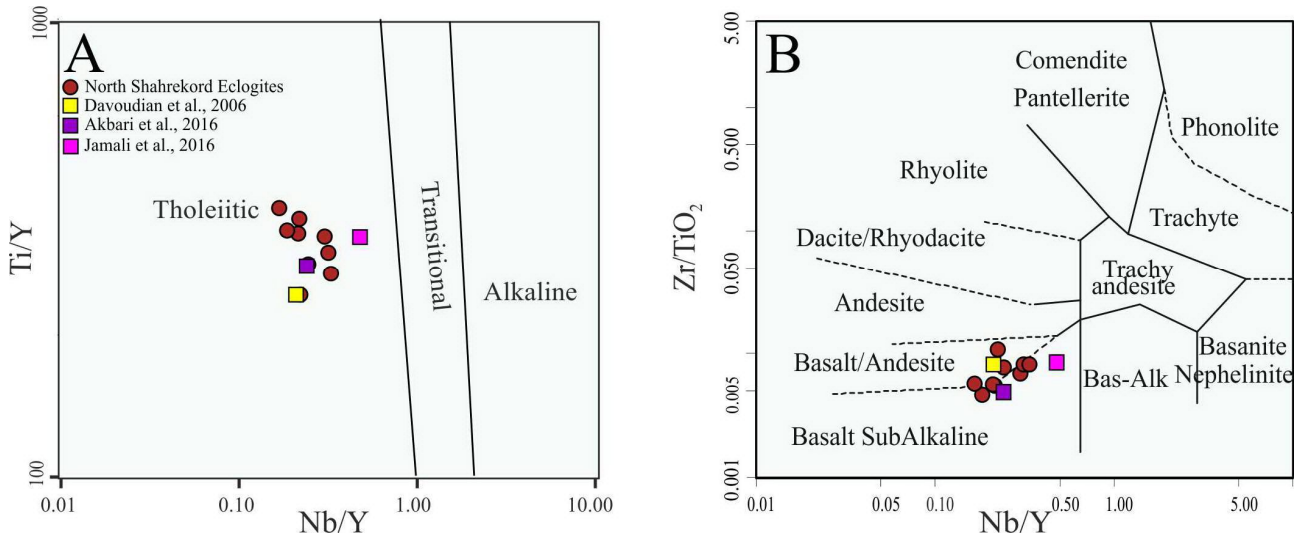
Table 1. Whole rock analyses of North Shahrekord eclogites. The mean data extracted from Davoudian et al., (2006); Akbari et al. (2016); Jamali Ashtiani et al. (2016); Malek-Mahmoudi et al. (2017). Chondrite normalized values after Sun and McDonough (1989)

Wt. %	Davoudian et al.	Akbari et al.	Jamali et al.	Malek- Mahmoudi et al.
SiO ₂	48.95	49.53	48.55	48.18
TiO ₂	1.50	1.46	1.59	1.56
Al ₂ O ₃	14.14	14.10	15.91	14.14
Fe ₂ O ₃	12.27	13.41	12.67	12.30
MnO	0.19	0.17	0.17	0.19
MgO	6.70	6.32	7.30	6.96
CaO	10.20	9.06	9.03	10.58
Na ₂ O	3.18	2.91	2.49	2.90
K ₂ O	0.51	1.03	0.40	0.49
P ₂ O ₅	0.29	0.22	0.18	0.19
LOI	1.60	1.79	2.63	1.90
Traces(ppm)				
Ba	124.33	208.40	119.50	395.44
Rb	20.27	39.00	18.75	18.53
Sr	194.40	196.04	168.75	217.53
Nb	7.47	7.34	13.20	7.88
Ni	36.90	116.40	68.13	69.70
Cr	217.23	278.50	217.25	256.88
La	8.67	13.60	13.60	9.49
Ce	22.30	29.00	29.27	23.63
Pr	2.99	4.85	3.53	3.20
Nd	15.33	21.18	17.29	15.40
Sm	4.20	5.56	4.43	4.22
Eu	1.45	1.84	1.69	1.52
Gd	5.16	5.98	5.24	5.17
Tb	0.97	1.07	1.06	0.91
Dy	5.94	6.29	5.48	5.81
Ho	1.27		1.11	1.21
Er	3.47	5.08	3.19	3.55
Tm	0.54	0.77	0.53	0.50
Yb	3.26	3.94	2.95	3.21
Lu	0.53	0.44	0.44	0.49
Y	35.27	29.71	28.09	31.01
Cs	0.80	1.41		0.75
Ta	0.43	0.47		0.56
Hf	3.50	1.85		2.96
Th	1.23	3.09		1.22
U	0.23	0.88		0.36
V	303	271	253	317.89
La/Yb	2.66	3.54	4.61	2.92
Nb/La	0.86	0.54	0.97	0.81
Sm/Nd	0.27	0.26	0.26	0.28
(La/Yb) _{cn}	1.91	2.47	3.31	2.09
(Sm/Nd) _{cn}	0.82	0.79	0.79	0.85



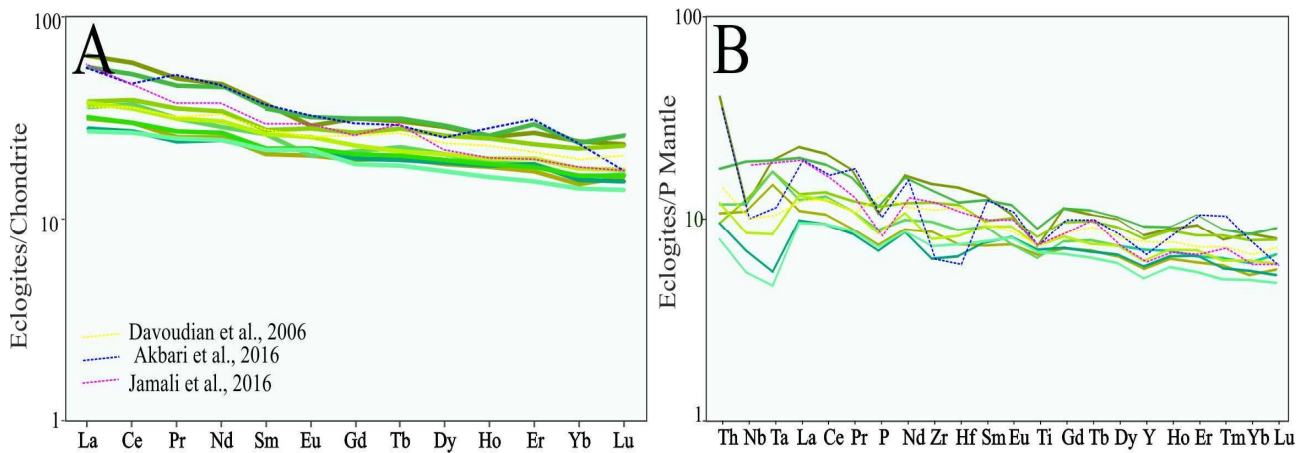
شکل ۳. تصاویر میکروسکوپی اکلوژیت‌های نسبتاً سالم کمپلکس دگرگونی شمال شهرکرد (به‌غیر از تصویر E). A و B: کانی آمفیبول خودشکل به همراه بلورهای روتیل درون گارنت در نور XPL و PPL پهنای میدان دید ۱/۲ mm، C: درشت‌بلورهای خودشکل گارنت در کنار آمفیبول، روتیل و کلینوزوئیزیت در نور PPL پهنای میدان دید ۳mm، D: گارنت‌های اغلب خودشکل در زمینه سیمپلکتیت از آمفیبول و پلاژیوکلاز (به صورت ثانویه) در زمینه اکلوژیت تبدیل شده به گارنت آمفیبولیت در نور XPL پهنای میدان دید ۹/۵mm، E: بلورهای جهت‌یافته آمفیبول در زمینه پلاژیوکلاز در نور XPL، پهنای میدان دید ۳mm و F: بلورهای اسفن خودشکل، تجزیه کلینوپیروکسن به آمفیبول و کانی فنژیت در زمینه سنگ PPL، پهنای میدان دید ۳mm. علائم اختصاری از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Amp: آمفیبول، Grt: گارنت، Rt: روتیل، Pl: پلاژیوکلاز، Zo: زوئزیت، Sph: اسفن، Ph: فنژیت).

Fig. 3. Microscopic photos of NSMC A and B: Euhedral amphibole with rutile as inclusions in garnet in XPL and PPL, width of view 1.2mm, C: Euhedral garnet porphyroclast, amphibole, rutile and clinozoisite in PPL, width of view 3mm, D: Numerous euhedral garnets with symplectites of amphibole and plagioclase (as secondary) in matrix of eclogite retrogressed to garnet amphibolites, XPL width of view 9.5mm, E: Foliated amphiboles porphyroclasts in plagioclase background, XPL, 3mm, and F: Euhedral sphenes and clinopyroxene, which was altered to amphibole and phengite, in matrix rocks PPL. Abbreviations after Whitney and Evans (2010) (Amp: Amphibole, Grt: Garnet, Rt: Rutile, Pl: Plagioclase Zo: Zoisite, Sph: Sphene, Ph: Phengite).



شکل ۴. A: موقعیت نمونه‌های اکلوزیت کمپلکس دگرگونی شمال شهرکرد در نمودار تعیین نوع ماگما Ti/Y در برابر Nb/Y (Pearce 1996) و B: ترسیم نمونه‌های اکلوزیت شمال شهرکرد نمودار Zr/Ti در برابر Nb/Y (Winchester and Floyd, 1977)

Fig. 4. A: Position of NSMC eclogite samples in Magma type classification diagram Nb/Y vs. Ti/Y (Pearce, 1996), and B: Plot of eclogites from North Shahrekord in Nb/Y vs. Zr/Ti diagram (Winchester and Floyd, 1977)



شکل ۵. A: نمودار عنكبوتی عناصر نادر خاکی نمونه‌های مربوط به اکلوزیت‌های شمال شهرکرد خاکی بهنجار شده به کندریت و B: نمودار عناصر نادر بهنجار شده به گوشته اولیه. داده‌های مربوط به گوشته اولیه و کندریت برگرفته از سان و مک‌دوناف (Sun and McDonough, 1989)

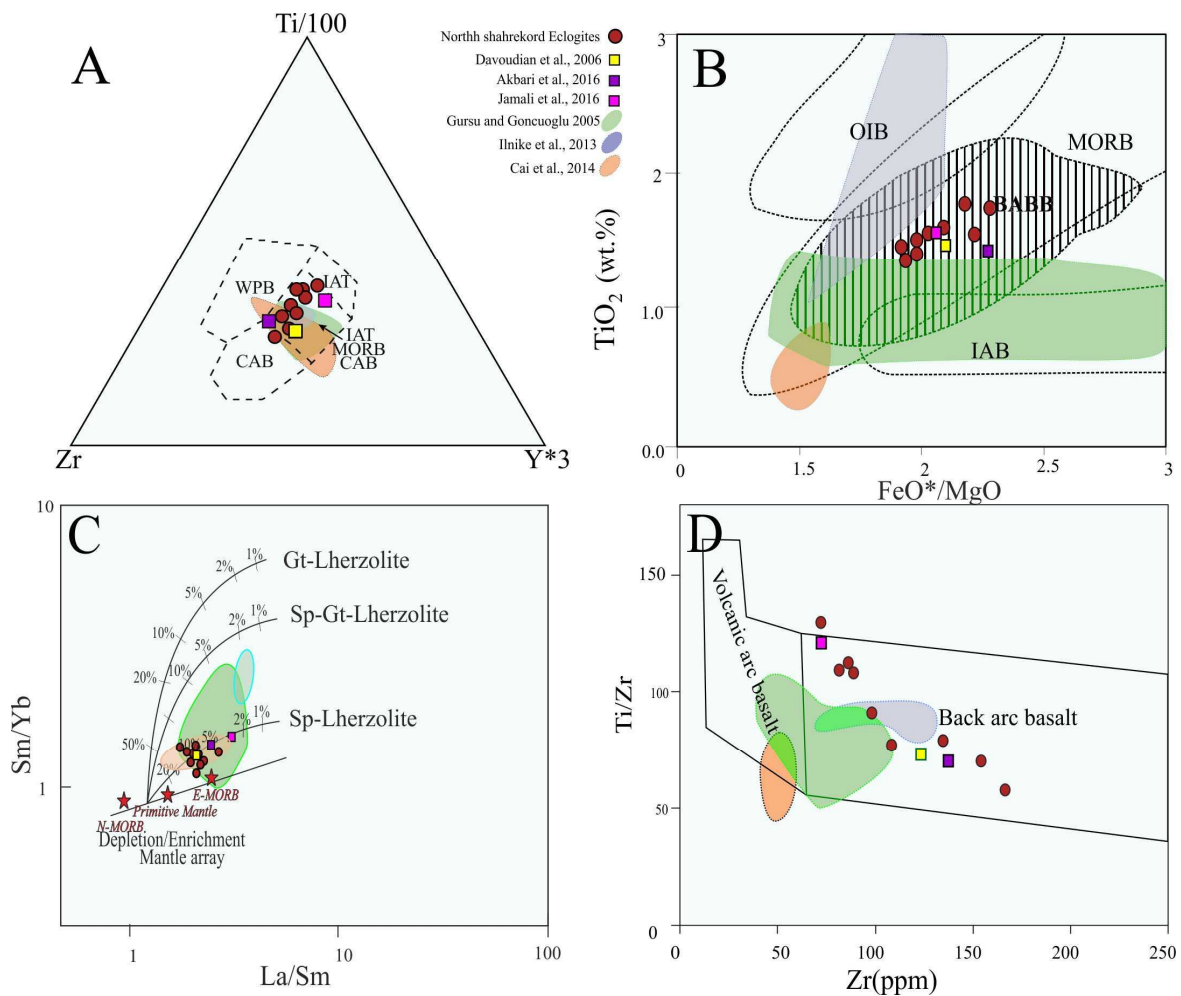
Fig. 5. A: Chondrite-normalized REE patterns, and B: primitive mantle-normalized incompatible element spider diagrams for the eclogites from North Shahrekord. Normalized data of primitive mantle and chondrite after Sun and McDonough (1989)

نمونه‌های اکلوزیت شمال شهرکرد در نمودار پیرس و کان (Pearce and Cann, 1973) که بدون محدوده خاصی برای پشت کمان است، در مرز مشترک MORB، IAT، CAB و WPB قرار می‌گیرند (شکل ۶-۱). به‌طور کلی، یکی از

آنومالی منفی عناصر با شدت میدان بالا در محیط‌های پشت کمان معمول است (Jiang et al., 2017). آنومالی منفی عناصر Zr، Nb و همچنین Ti در سنگ‌های مورد بررسی، ماهیت پشت کمان آنها را تأیید می‌کند (Pearce, 2014).

محیط پشت کمان است (Shuto et al., 2006). شکل (۶-۱) بر اساس نسبت نمودار La/Sm در برابر Sm/Yb (Kinzler, 1997; Walter, 1998) و شکل (۶-۲) بر اساس Zr در برابر Ti/Zr (Wang et al., 2015) نیز تأیید کننده تشکیل ماگما در محیط پشت کمان بوده و میزان ذوب بخشی بین ۵ تا ۱۵ درصد است (شکل ۶-۱).

ویژگی‌های ژئوشیمیایی سنگ‌های ایجاد شده در محیط پشت کمان این است که در نمودارهایی نظیر نمودار بالا، از یک نمودار به نمودار دیگر، محیط زمین ساختی متفاوتی (نظیر درون صفحه‌ای، ریفیت و یا پهنه فرورانش) را نشان می‌دهند (Schmincke, 2004). نمودار MgO در برابر TiO₂ (شکل ۶-۲) نشان‌دهنده تشکیل ماگمای سنگ مادر اکلوزیت‌ها در

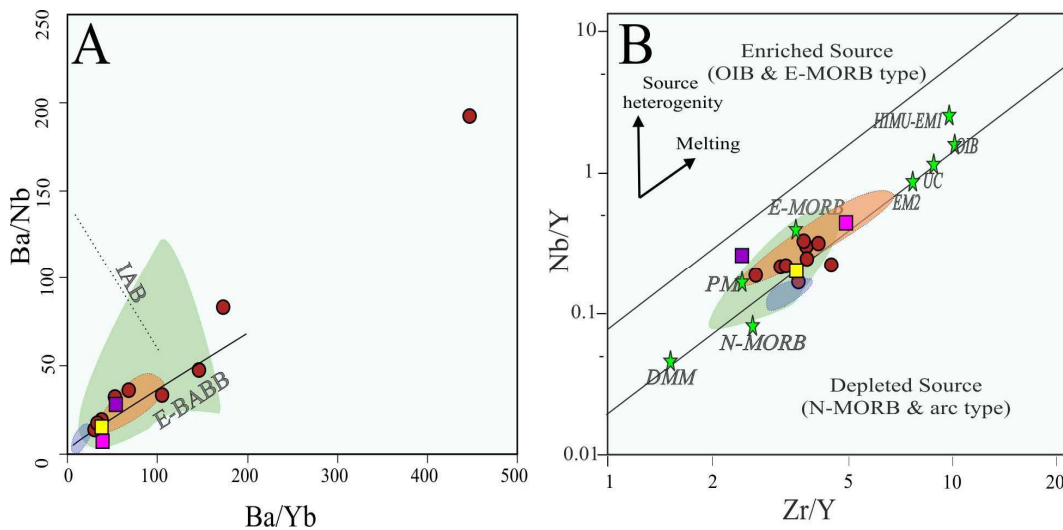


شکل ۶. موقعیت نمونه‌های کمپلکس دگرگونی شمال شهرکرد در A: نمودار مثلثی Ti/100، Zr، Y*3 (Pearce and Cann, 1973)، B: نمودار تعیین محیط زمین‌ساختی FeO*/MgO در برابر TiO₂ (Shuto et al., 2006)، C: نمودار La/Sm در برابر Sm/Yb درصد بیان شده برگرفته از کینزler (Kinzler, 1997) و والتر (Walter, 1998) و نسبت توزیع کانی-مذاب برگرفته از رولینسون (Rollinson 1993) است. مقادیر مربوط به گوشته اولیه، مورب نرمال و مورب غنی‌شده (Sun and McDonough, 1989) و D: نمودار Zr در برابر Ti/Zr (Wang et al., 2015)

Fig. 6. Location of the eclogites of the North Shahrekord metamorphic complex A: Triangle diagram of Ti/100, Zr, Y*3 (Pearce and Cann, 1973), B: Tectonic setting diagram FeO*/MgO vs. TiO₂ (Shuto et al., 2006), C: Diagram of La/Sm vs. Sm/Yb percentage after (Kinzler, 1997; Walter, 1998) magma-melt percent after Rollinson (1993), P-mantle, N-MORB, E-MORB value after sun and Mc Dounough (1989), and D: Diagram of Ti/Zr vs. Zr (Wang et al., 2015)

عوامل مختلفی در شکل‌گیری ماگمای پشت‌کمان نقش دارند. اجزای صفحه فرورونده شامل سیالات و یا رسوبات ذوب‌شده، آرایش پوسته‌ای و منشأ گوشته غنی‌شده است (Pearce and Stern, 2006). ماگماهای منتج از محیط‌های پشت‌کمان از تنوع بالایی در ترکیب شیمیایی خود برخوردارند. به‌طور کلی، محیط‌های پشت‌کمان‌های درون اقیانوسی از لحاظ ترکیب شیمیایی، شباهت فراوانی به مورب نرمال داشته و تشخیص آن بسیار دشوار است (Cai et al., 2014). در مقابل محیط‌های پشت‌کمان قاره‌ای که در اثر کشش حاصل از فرورانش پوسته اقیانوسی به زیر پوسته قاره‌ای تشکیل می‌شوند، ماگما ترکیبی مشابه با E-MORB از خود نشان می‌دهد (Shinjo et al., 1999) و نسبت $Nb/La > 0.6$ و $Sm/Nd < 0.3$ است (Cai et al., 2014; Shinjo et al., 1999).

این نسبت‌ها در نمونه‌های مورد بررسی به طور میانگین برابر $Nb/La = 0.8$ و $Sm/Nd = 0.27$ است که در تطابق با ماگمای بازالتی ایجادشده در محیط پشت‌کمان قاره‌ای است. نسبت Ba/Yb در مقابل Ba/Nb در بازالت‌های جزایر کمائی، روند منفی دارد (Pearce et al., 1995)؛ در حالی که این نسبت در بازالت‌های پشت‌کمان مثبت است (Leat et al., 2000). ترسیم نمونه‌های اکلوزیت شمال شهرکرد در نمودارهای تعیین منشأ نشان می‌دهد که سنگ مادر این اکلوزیت‌ها از ذوب‌بخشی گوشته غنی‌شده منشأ گرفته است و تأثیر اجزای فرورانش در آنها مشاهده می‌شود (شکل ۷-A و B). این ویژگی‌ها در محیط‌های پشت‌کمان قاره‌ای مشاهده می‌شود (Cai et al., 2014; Shinjo et al., 1999).

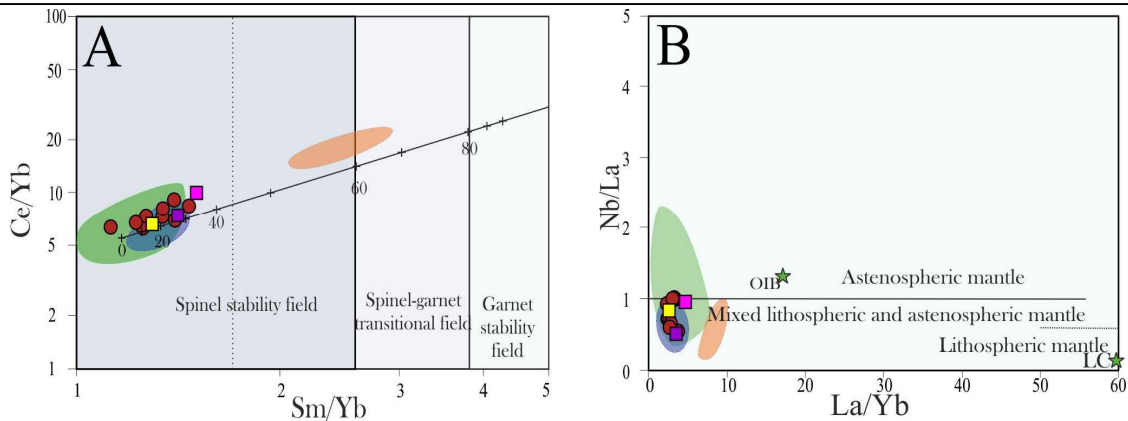


شکل ۷. A: ترسیم نمونه‌های اکلوزیت شمال شهرکرد در نمودار Ba/Nb در برابر Ba/Yb (Li et al., 2013) و B: نمودار تقسیم‌بندی زمین‌ساختی Nb/Y (Fitton, 2007) در برابر Zr/Y

Fig. 7. A: Plot of NSMC eclogites in Ba/Nb vs. Ba/Yb (Li et al., 2013), and B: Tectonic classification diagram (Fitton, 2007) Nb/Y vs. Zr/Y

پروتولیت اکلوزیت‌هاست (Ellam, 1992). همچنین نمونه‌های مورد بررسی از ترکیب گوشته لیتوسفری و استنوسفری تشکیل شده‌اند (شکل ۸-B).

ترسیم نمونه‌های اکلوزیت شمال شهرکرد در نمودار La/Yb برابر Nb/La (Abdel-rahman, 2002) در شکل (۸-A) نشان‌دهنده عمق جدایش ماگما در لیتوسفر با عمق بین ۱۰ تا ۳۰ کیلومتر و حضور فاز آلومینیم‌دار اسپینل در ماگمای سازنده



شکل ۸. A: نمودار Sm/Yb در برابر Ce/Yb و تعیین ضخامت لیتوسفر و نوع فاز کانی آلومینیم‌دار (Ellam, 1992) و B: نمودار La/Yb در برابر Nb/La (Abdel-rahman, 2002) برای تعیین نوع گوشته مؤثر در تشکیل ماگمای اولیه نمونه‌های اکلوزیت شمال شهرکرد

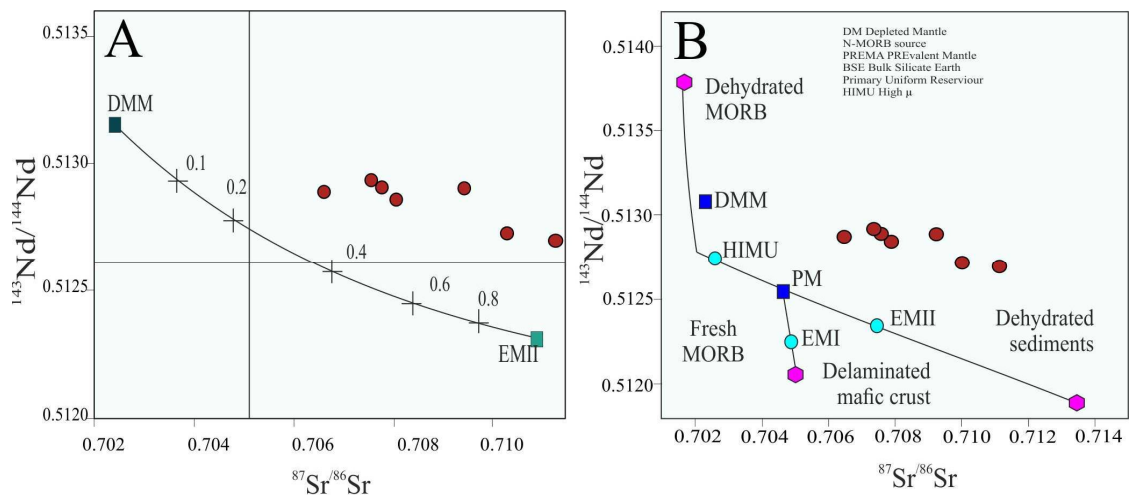
شکل ۹-A تأثیر اجزای مرتبط با فرورانش را در تشکیل سنگ منشأ اکلوزیت‌های شمال شهرکرد نشان می‌دهد. افزایش این اجزاء موجب غنی‌تر شدن ترکیب گوشته از مؤلفه گوشته غنی شده نوع دوم می‌شود. این نسبت در نمونه‌های مورد بررسی به صورت میانگین برابر ۰/۶ است. شکل ۹-B نشان می‌دهد منشأ اکلوزیت‌های شهرکرد گوشته‌ای بوده و ترکیب آن حدواصل بین گوشته غنی شده نوع ۲ و مورب است (Tatsumi, 2005). داده‌های برگرفته از پژوهش‌های پیشین بر روی اکلوزیت‌های کمپلکس دگرگونی شمال شهرکرد، هم‌پوشانی کاملی با داده‌های مورد استفاده در این پژوهش و همچنین سایر نمونه‌های پشت کمان در نئوپروتروزوئیک دارد. اکبری و همکاران (2016, Akbari et al.,) نمونه‌های اکلوزیت منطقه را متعلق به ژوراسیک دانسته و آنها را از نوع مورب تقسیم‌بندی می‌کند؛ درحالی‌که ژوراسیک سن دگرگونی نمونه‌ها بوده و تشکیل پروتولیت اولیه اکلوزیت‌ها بر مبنای سن‌های زیرکن به روش U-Pb در گنایس‌های همیافت به انتهای پرکامبرین باز می‌گردد (Davoudian et al., 2016). به علت شباهت‌های ژئوشیمیایی محیط‌های مورب و پشت کمان اقیانوسی، بسیاری از نمودارهای

شواهد ایزوتوپی

نتایج آنالیز ایزوتوپ‌های Rb-Sr و Nd-Sm مربوط به هفت نمونه از اکلوزیت‌های کمپلکس دگرگونی شمال شهرکرد، مورد بررسی قرار گرفته است (Malek-Mahmoudi et al., 2017). بررسی‌های ایزوتوپی انجام شده نشان می‌دهد نسبت $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ بین ۰/۷۰۷ تا ۰/۷۱۱ متغیر است و بر مبنای سن سنگ منشأ که انتهای نئوپروتروزوئیک است، نسبت‌های آغازین نیز بین ۰/۷۰۶ تا ۰/۷۰۹ بوده که این نسبت نشان‌دهنده منشأ گوشته‌ای است و گستره آن آرایش پوسته زیرین را نشان می‌دهد (Zindler and Hart, 1986). همچنین نسبت $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ به‌طور میانگین برابر ۰/۵۱۲ و ϵNd_t بین ۲/۵ تا ۷ متغیر است که نشان‌دهنده نقش گوشته در تشکیل نمونه‌های مورد بررسی است (Zindler and Hart, 1986). بر مبنای نسبت‌های ایزوتوپی Nd, Sr و Pb مخازن گوشته‌ای به گروه‌های EMI, DMM, HIMU و EMII تقسیم می‌شوند (Zindler and Hart, 1986). گوشته غنی شده شده نوع ۲ در واقع ترکیبی از گوشته غنی شده و رسوبات بازیافت شده است که در زمان فرورانش عمیق تشکیل می‌شود (Dickin, 2005). این حالت اغلب با تشکیل حوضه پشت کمان همراه است (Uyeda,

است که در منبع یادشده نتیجه دقیقی حاصل نشده است. غنی‌شدگی در نمونه‌های مورد بررسی کمتر از انواع درون صفحه‌ای است (شکل‌های ۶ و ۷). به‌علاوه وجود آنومالی منفی نیوبوم در مقایسه با توریم (شکل B-۵) و نقش عوامل مربوط به فرورانش در این نمونه‌ها مشخص است (شکل A-۹ و B). مقایسه داده‌ها با نواحی دیگر دنیا که به‌عنوان پشت‌کمان نئوپروتوزوئیک معرفی شده‌اند (Ilnicki et al., 2013; Cai et al., 2014; Gürsu et al., 2015)، شباهت اکلوزیت‌های شمال شهرکرد با این مناطق را تأیید می‌کند. در مجموع استفاده از آنالیزهای ناکافی و نبود برخی عناصر کلیدی نظیر Th و Nb در آنالیز ICP-MS و استفاده از نمودارهای نامناسب ژئوشیمیایی موجب نتیجه‌گیری ناصحیح (Jamali Ashtiani et al., 2016) شده است.

ژئوشیمیایی امکان تفکیک این دو محیط را ندارند. باید توجه داشت که ماگماهای مورب از نوع تهی‌شده هستند؛ درحالی‌که نمونه‌های اکلوزیت شمال شهرکرد از نوع غنی‌شده هستند (شکل ۷). روند عناصر نادر و نادر خاکی نیز نشان‌دهنده ماگمای تهی‌شده مورب نرمال نیست. به نظر می‌رسد عواملی نظیر عدم استفاده از نمودارهای مناسب و برآورد نادرست سن منطقه به نتیجه‌گیری‌های اشتباه در نتیجه‌گیری اکبری و همکاران (Akbari et al., 2016) منجر شده است. جمالی آشتیانی و همکاران (Jamali Ashtiani et al., 2016) نیز ضمن مقایسه این منطقه با ترکیه، محیط زمین‌ساختی تشکیل را از نوع درون قاره‌ای می‌دانند. از آنجا که سنگ‌های محیط پشت‌کمان قاره‌ای ترکیبی مشابه با E-MORB از خود نشان می‌دهند (Shinjo et al., 1999; Cai et al., 2014)، لذا اگر با دقت بررسی نشود، می‌تواند با محیط درون صفحه‌ای اشتباه گرفته شوند و این دلیلی



شکل ۹. A: میزان تأثیر اجزای مرتبط با فرورانش در نمونه‌های اکلوزیت مورد بررسی (Zhao et al., 2016) و B: نمودار تعیین منشأ اکلوزیت‌های شمال شهرکرد بر اساس نسبت‌های ایزوتوپی (Tatsumi, 2005)

Fig. 9. A: Effect of subduction component in studied eclogite (Zhao et al., 2016), and B: Diagram of source of the North Shahrekord eclogites base on isotopic ratios (Tatsumi, 2005)

کمان و پشت‌کمان در حاشیه شمالی این قاره را در پی داشته است (Shafaii Moghadam et al., 2016b). این فعالیت‌ها

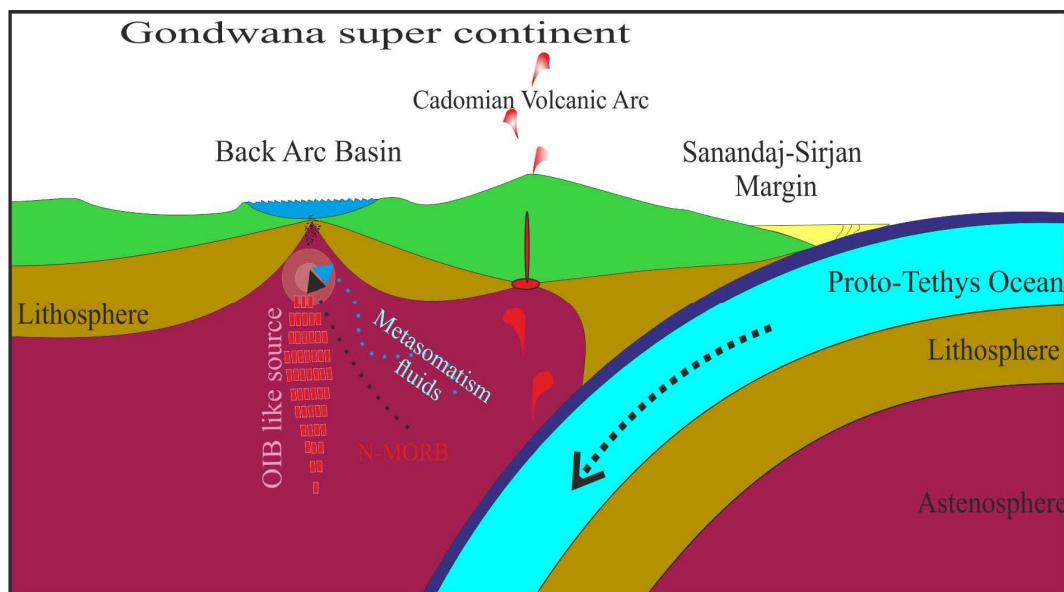
شواهد منطقه‌ای و مدل زمین‌ساختی

فرورانش اقیانوس پروتوتتیس به زیر ابرقاره گندوانا، ماگماتیسم

دارد. سن سنگ مادر بازالتی این اکلوزیت‌ها در تطابق با سایر فوران‌های پشت کمان در ایران بوده که حدود ۵۷۰ میلیون سال در نظر گرفته شده است (Shafaii Moghadam et al., 2016).

اکلوزیت‌های کمپلکس دگرگونی شمال شهرکرد در کنار سنگ‌های رسوبی دگرگون‌شده نظیر شیست، کوارتزیت، مرمر و متاسامیت دیده می‌شود که شاهدی بر وجود محیطی رسوبی کم‌عمق در زمان ماگماتیسیم اولیه است. حضور این شواهد صحرایی در کنار بررسی‌های ژئوشیمیایی نشان‌دهنده وجود حوضه‌ای پشت کمان در پهنه سندج-سیرجان است. پروتولیت اکلوزیت‌های کمپلکس دگرگونی شمال شهرکرد از تلفیق ماگمای منتج از گوشته غنی شده به همراه گوشته نرمال به دست آمده که تأثیر سیالات فرورانش نیز در آنها قابل مشاهده است. شکل ۱۰ مدل حوادث زمین‌ساختی رخ داده در این بازه زمانی را نمایان می‌کند. در نهایت، فاز دگرگونی فشار بالا در ژوراسیک زیرین به تشکیل اکلوزیت‌های کمپلکس دگرگونی شمال شهرکرد و سرانجام سربرآوری آن منجر شده است (Davoudian et al., 2016).

در فاصله زمانی ۶۳۰ تا ۵۱۴ میلیون سال پیش در بخش‌های مختلف ایران گزارش شده است (Hassanzadeh and Wernicke, 2016). گسترش محیط پشت کمان قاره‌ای از ۵۷۰ میلیون سال پیش آغاز شد (Linnemann et al., 2014). این فعالیت در بخش‌های مختلفی از ایران (Etemad Saeed et al., 2015; Faramarzi et al., 2015; Hosseini et al., 2015) ترکیه (Gürsu and Göncüoğlu, 2005; Abbo et al., 2015) و همچنین اروپا (Ilnicki et al., 2013; Linnemann et al., 2014) گزارش شده است. این ماگماها ترکیبی مشابه مورب غنی شده دارند (Gürsu and Göncüoğlu, 2005; Ilnicki et al., 2013; Linnemann et al., 2014; Hosseini et al., 2015). با توجه به مشابهت زمانی و ترکیب ماگما به نظر می‌رسد محیط پشت کمان گسترده‌ای در انتهای نئوپروتروزویک در ابرقاره گندوانا گسترش داشته است (Abbo et al., 2015). تشکیل پروتولیت اکلوزیت‌های کمپلکس دگرگونی شمال شهرکرد از نظر زمانی بین دو واحد لیتولوژی منطقه یعنی ارتوگنایس‌ها به سن ۵۷۰ میلیون سال (Davoudian et al., 2016) و توده‌های متاگرایتی با سن ۵۱۲ میلیون سال (Badr et al., 2018) قرار



شکل ۱۰. مدل شماتیک از شکل‌گیری پروتولیت اکلوزیت‌های کمپلکس دگرگونی شمال شهرکرد در انتهای نئوپروتروزویک

Fig. 10. A schematic model for formation of Protolith of the eclogites from North Shahrekord Metamorphic Complex during Late Neoproterozoic

نتیجه گیری

فرورانش اقیانوس پروتوتتیس به زیر ابرقاره گندوانا در انتهای نئوپروتروزوئیک به شکل گیری حوضه پشت کمان در پهنه سندج-سیرجان منجر شده است. پروتولیت سنگ‌های متابازیک اکلوزیتی مرتبط با فعالیت پشت کمان در منطقه سد زاینده رود از نوع بازالتی بوده و ماگمای سازنده آنها تمایلات تولییتی نشان می‌دهد. غنی‌شدگی جزئی از عناصر نادر خاکی سبک در مقایسه با عناصر نادر خاکی سنگین و همچنین آنومالی منفی نیویوم، تیتانیوم و زیرکنیوم در عناصر نادر قابل مشاهده است. شواهد ژئوشیمیایی، رخداد محیط زمین‌ساختی پشت کمان و وجود ماگمای غنی شده را در نمونه های اکلوزیت کمپلکس

دگرگونی شمال شهر کرد تأیید می‌کند. بررسی ایزوتوپ‌های Nd-Sr نشان‌دهنده نقش گوشته غنی شده نوع دو (مرتبط با فرورانش) در شکل‌گیری سنگ‌های مافیک اولیه است. به نظر می‌رسد نمونه‌های مورد بررسی حاصل ترکیب گوشته غنی شده نوع دو با گوشته تهی شده است.

قدردانی

نویسنده گان مقاله از حمایت دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین دانشگاه شهرکرد در به ثمر رساندن این پژوهش قدردانی می‌نمایند.

References

- Abbo, A., Avigad, D., Gerdes, A. and Gungör, T., 2015. Cadomian basement and Paleozoic to Triassic siliciclastics of the Taurides (Karacahisar dome, south-central Turkey): paleogeographic constraints from U-Pb-Hf in zircons. *Lithos*, 227(1): 122–139.
- Abdel-rahman, A.F.M., 2002. Mesozoic volcanism in the Middle East: geochemical, isotopic and petrogenetic evolution of extension-related alkali basalts from central Lebanon. *Geological Magazine*, 139(6): 621–640.
- Akbari, K., Manesh, S.T. and Safaei, H., 2016. Tectonic setting and petrological evidence for the emplacement of mylonitic granites within the middle part of Sanandaj-Sirjan shear zone from East and South East of Chadegan, Iran. *Geotectonics*, 50(3): 313–326.
- Alavi, M., 1994. Tectonics of the Zagros orogenic belt of Iran: new data and interpretations. *Tectonophysics*, 229(3): 211–238.
- Alavi, M., 2004. Regional stratigraphy of the Zagros Fold-Thrust Belt of Iran and its proforeland evolution. *American Journal of Science*, 304(1): 1–120.
- Avigad, D., Weissbrod, T., Gerdes, A., Zlatkin, O., Ireland, T. and Morag, N., 2015. The detrital zircon U-Pb-Hf fingerprint of the northern Arabian-Nubian Shield as reflected by a Late Ediacaran arkosic wedge (Zenifim Formation; subsurface Israel). *Precambrian Research*, 266: 1–11.
- Badr, A., Davoudian, A., Shabanian, N., Azizi, H., Asahara, Y., Neubauer, F., Dong, Y. and Yamamoto, K., 2018. A- and I-type metagranites from the North Shahrekord Metamorphic Complex, Iran: Evidence for Early Paleozoic post-collisional magmatism. *Lithos*, 300(1): 86–104.
- Balaghi Einalou, M., Sadeghian, M. and Ghasemi, H., 2015a. Mineralogy, geochemistry, thermobarometry of gernet amphibolites in Delbar Metamorphic-Igneous Complex, SE of Shahrood (Iran). *Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy*, 23(3): 479–494. (in Persian with English abstract)
- Balaghi Einalou, M., Sadeghian, M., Ghasemi, H., Mohajjel, M. and Omrani, M., 2015b. Petrology, thermobarometry and U-Pb dating of metapelitic rocks in Delbar Metamorphic Complex, SE of shahrood (Iran). *Petrology*, 6(21): 55–82. (in Persian with English abstract)
- Balaghi Einalou, M., Sadeghian, M., Ghasemi, H., Mohajjel, M. and Zhai, M., 2014a. Mineralogy, geochemistry, Zircon U-Pb ages of mafic dykes in Delbar Metamorphic-

- Igneous Complex, SE of shahrood (Iran), *Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy*, 22(3): 471–484. (in Persian with English abstract)
- Balaghi Einalou, M., Sadeghian, M., Zhai, M., Ghasemi, H. and Mohajjel, M., 2014b. Zircon U–Pb ages, Hf isotopes and geochemistry of the schists, gneisses and granites in Delbar Metamorphic-Igneous Complex, SE of Shahrood (Iran): implications for Neoproterozoic geodynamic evolutions of Central Iran. *Journal of Asian Earth Sciences*, 92(1): 92–124.
- Berberian, M. and King, G., 1981. Towards a paleogeography and tectonic evolution of Iran. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 18(2): 210–265.
- Cai, Y., Wang, Y., Cawood, P.A., Fan, W., Liu, H., Xing, X. and Zhang, Y., 2014. Neoproterozoic subduction along the Ailaoshan zone, South China: Geochronological and geochemical evidence from amphibolite. *Precambrian Research*, 245(1): 13–28.
- Davoudian, A., Genser, J., Dachs, E. and Shabanian, N., 2008. Petrology of eclogites from north of Shahrekord, Sanandaj-Sirjan Zone, Iran. *Mineralogy and Petrology*, 92(3–4): 393–413.
- Davoudian, A., Genser, J., Neubauer, F. and Shabanian, N., 2016. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ mineral ages of eclogites from North Shahrekord in the Sanandaj–Sirjan Zone, Iran: Implications for the tectonic evolution of Zagros orogen. *Gondwana Research*, 37(1): 216–240.
- Davoudian, A., Heidari, A., Shabanian, N. and Moradi, A. 2017. Mineralogy and distinguishing protolith of gneisses from Northern part of Zayandeh-Rud dam lake in North Shahrekord (Sanandaj-Sirjan Zone). *Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy*, 25(1): 139–152. (in Persian with English abstract)
- Davoudian, A., Khalili, M., Noorbehsh, I., Dachs, E., Genser, J. and Shabanian, N., 2006. Geochemistry of metabasites in the north of the Shahrekord, Sanandaj-Sirjan Zone, Iran. *Journal of Mineralogy and Geochemistry*, 182(3): 291–298.
- Deer, W.A., Howie, R.A. and Zussman, J., 1992. An introduction to the rock-forming minerals. Longman, London, 696 pp.
- Dickin, A.P., 2005. Radiogenic isotope geology. Cambridge University Press, Cambridge, 471 pp.
- Ellam, R., 1992. Lithospheric thickness as a control on basalt geochemistry. *Geology*, 20(2): 153–156.
- Etemad Saeed, N., Hosseini-Barzi, M., Adabi, M.H., Sadeghi, A. and Houshmandzadeh, A., 2015. Provenance of Neoproterozoic sedimentary basement of northern Iran, Kahar Formation. *Journal of African Earth Sciences*, 111(1): 54–75.
- Faramarzi, N.S., Amini, S., Schmitt, A.K., Hassanzadeh, J., Borg, G., McKeegan, K., Razavi, S.M.H. and Mortazavi, S.M., 2015. Geochronology and geochemistry of rhyolites from Hormuz Island, southern Iran: A new record of Cadomian arc magmatism in the Hormuz Formation. *Lithos*, 236(1): 203–211.
- Fitton, J. G., 2007. The OIB paradox. In: G.R. Foulger and D.M. Joudy (Editors), Plates, plumes and planetary processes. Geological Society of America, Special Papers 430, Boulder- Colorado, pp. 387–412.
- Gürsu, S. and Göncüoğlu, M.C., 2005. Early Cambrian back-arc volcanism in the western Taurides, Turkey: implications for rifting along the northern Gondwanan margin. *Geological Magazine*, 142(05): 617–631.
- Gürsu, S., Möller, A., Göncüoğlu, M.C., Köksal, S., Demircan, H., Köksal, F.T., Kozlu, H. and Sunal, G., 2015. Neoproterozoic continental arc volcanism at the northern edge of the Arabian Plate, SE Turkey. *Precambrian Research*, 258(1): 208–233.
- Hassanzadeh, J. and Wernicke, B.P., 2016. The Neotethyan Sanandaj-Sirjan zone of Iran as an archetype for passive margin-arc transitions. *Tectonics*, 35(1): 586–621.
- Homam, M., 2015. Petrology and geochemistry of Late Proterozoic hornblende gabbros from southeast of Fariman, Khorasan Razavi province, Iran. *Journal of Economic Geology*, 7(1): 91–109. (in Persian with English abstract).
- Hosseini, S.H., Sadeghian, M., Zhai, M. and Ghasemi, H., 2015. Petrology, geochemistry and zircon U–Pb dating of Band-e-Hezarchah metabasites (NE Iran): An evidence for back-arc magmatism along the northern active

- margin of Gondwana. *Chemie der Erde-Geochemistry*, 75(2): 207–218.
- Hosseini, S.H., Sadeghian, M., Zhai, M. and Ghasemi, H., 2016a. Mineral chemistry, thermobarometry and petrogenesis of Band-e-Hezarchah dike swarms (southeast of Shahrood). *Petrology*, 7(25): 81–96. (in Persian with English abstract)
- Hosseini, S.H., Sadeghian, M., Zhai, M. and Ghasemi, H., 2016b. Mineral chemistry, tectonic setting and diagenesis of of granitic body Band-e-Hezarchah (southeast of Shahrood). *Petrology*, 24(2): 259–272. (in Persian with English abstract)
- Ilnicki, S., Szczepański, J. and Pin, C., 2013. From back-arc to rifted margin: Geochemical and Nd isotopic records in Neoproterozoic?–Cambrian metabasites of the Bystrzyckie and Orlickie Mountains (Sudetes, SW Poland). *Gondwana Research*, 23(3): 1104–1121.
- Jamali Ashtiani, R., Hassanzadeh, J., Rahgoshay, M. and Sharifi, A., 2016. Zayanderoud area high pressure metamorphic rocks: correlation with the Menderes massif eclogite-gneiss and implication for the late Gondwana reconstruction. *Scientific Quarterly Journal, Geosciences*, 101(1):183–196. (in Persian with English abstract)
- Jiang, H., Han, J., Chen, H., Zheng, Y., Lu, W., Deng, G. and Tan, Z., 2017. Intra-continental back-arc basin inversion and Late Carboniferous magmatism in Eastern Tianshan, NW China: Constraints from the Shaquanzi magmatic suite. *Geoscience Frontiers*, 8(6): 1447–1467.
- Kinzler, R.J., 1997. Melting of mantle peridotite at pressures approaching the spinel to garnet transition: Application to mid-ocean ridge basalt petrogenesis. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 102(B1): 853–874.
- Leat, P.T., Livermore, R.A., Millar, I.L. and Pearce, J.A., 2000. Magma supply in back-arc spreading centre segment E2, East Scotia Ridge. *Journal of Petrology*, 41(6): 845–866.
- Li, B., Bagas, L., Gallardo, L.A., Said, N., Diwu, C. and McCuaig, T.C., 2013. Back-arc and post-collisional volcanism in the Palaeoproterozoic Granites-Tanami Orogen, Australia. *Precambrian Research*, 224(1): 570–587.
- Linnemann, U., Gerdes, A., Hofmann, M. and Marko, L., 2014. The Cadomian Orogen: Neoproterozoic to Early Cambrian crustal growth and orogenic zoning along the periphery of the West African Craton—Constraints from U–Pb zircon ages and Hf isotopes (Schwarzburg Antiform, Germany). *Precambrian Research*, 244(1): 236–278.
- Malek-Mahmoudi, F., Davoudian, A., Shabanian, N., Azizi, H., Asahara, Y., Neubauer, F. and Dong, Y., 2017. Geochemistry of metabasites from the North Shahrekord metamorphic complex, Sanandaj-Sirjan Zone: Geodynamic implications for the Pan-African basement in Iran. *Precambrian Research*, 293(1): 56–72.
- Moradi, A., Shabanian, N. and Davoudian A., 2016. Evaluating the controls on Tourmaline Crystallization in the mylonitic granitegneiss pluton in the Northeastern of Jan mine (Lorestan province). *Journal of Economic Geology*, 8(2): 343–358. (in Persian with English abstract)
- Nafisi, R., Kouhestani, H., Mokhtari, M.A.A., and Sadeghi, M., 2019. Geochemistry and tectonomagmatic setting of protolite rocks of meta-volcanics in the Halab metamorphic complex (SW Dandy, Zanjan Province). *Journal of Economic Geology*, 11(2): 211–235.
- Nutman, A.P., Mohajjel, M., Bennett, V.C. and Fergusson, C.L., 2013. Gondwanan Eoarchean–Neoproterozoic ancient crustal material in Iran and Turkey: zircon U–Pb–Hf isotopic evidence 1. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 51(3): 272–285.
- Pearce, J.A., 1996. A User's Guide to Basalt Discrimination Diagrams. In: D.A. Wyman (Editor), *Trace Element Geochemistry of Volcanic Rocks: Applications for Massive Sulphide Exploration*. Geological Association of Canada, Short Course Notes, Manitoba, pp. 79–113.
- Pearce, J.A., 2008. Geochemical fingerprinting of oceanic basalts with applications to ophiolite classification and the search for Archean oceanic crust. *Lithos*, 100(1): 14–48.
- Pearce, J.A., 2014. Immobile element fingerprinting of ophiolites. *Elements*, 10(2): 101–108.
- Pearce, J.A. and Cann, J., 1973. Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace element analyses. *Earth and Planetary Science Letters*, 19(2): 290–300.

- Pearce, J.A., Baker, P.E., Harvey, P.K. and Luff, I.W., 1995. Geochemical evidence for subduction fluxes, mantle melting and fractional crystallization beneath the South Sandwich island arc. *Journal of Petrology*, 36(4): 1073–1109.
- Pearce, J.A. and Stern, R.J., 2006. Origin of back-arc basin magmas: Trace element and isotope perspectives. In: C.M. David, C.R. Fisher, S.M. Lee and S. Gives (Editors), *Back-Arc Spreading Systems: Geological, Geological, Biological, Chemical, and Physical Interactions*. American Geophysical Union, Washington DC, pp. 63–86.
- Rollinson, H.R., 1993. *Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation*. Longman Scientific and Technical, London, 348 pp.
- Sahandi, M.R. and Soheili, M., 2005. Geological map of Iran: scale 1:100000 sheet. Geological Survey of Iran, Tehran.
- Schmincke, H.U., 2004. *Volcanism*. Berlin Heidelberg, Springer-Verlag, New York, 324 pp.
- Şengör, A., 1990. A new model for the late Palaeozoic—Mesozoic tectonic evolution of Iran and implications for Oman. In: A.H.F. Robertson, M.P. Searle and A.C. Ries (Editors), *The Geology and Tectonics of the Oman Region*. Geological Society of London, Special Publications 49, London, pp. 797–831.
- Shafaii Moghadam, H., Li, X.H., Stern, R.J., Ghorbani, G. and Bakhshizad, F., 2016a. Zircon U–Pb ages and Hf–O isotopic composition of migmatites from the Zanjān–Takab complex, NW Iran: Constraints on partial melting of metasediments. *Lithos*, 240(1): 34–48.
- Shafaii Moghadam, H., Li, X.H., Stern, R.J., Santos, J.F., Ghorbani, G. and Pourmohsen, M., 2016b. Age and nature of 560–520 Ma calc-alkaline granitoids of Biarjmand, northeast Iran: insights into Cadomian arc magmatism in northern Gondwana. *International Geology Review*, 58(12): 1492–1509.
- Shekari, S. Sadeghian, M., Zhai, M., Ghasemi, H. and Zou, Y., 2017. Mineral chemistry and petrogenesis of metabasites of metamorphic - igneous Shotor-Kuh complex (SE Shahrood) an indicator for evolution of intracontinental extensional basins of late Neoproterozoic. *Scientific Quarterly Journal, Geosciences*, 27(105): 167–182.
- Shinjo, R., Chung, S.L., Kato, Y. and Kimura, M., 1999. Geochemical and Sr–Nd isotopic characteristics of volcanic rocks from the Okinawa Trough and Ryukyu Arc: Implications for the evolution of a young, intracontinental back arc basin. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 104 (B5): 10591–10608.
- Shuto, K., Ishimoto, H., Hirahara, Y., Sato, M., Matsui, K., Fujibayashi, N., 2006. Geochemical secular variation of magma source during Early to Middle Miocene time in the Niigata area, NE Japan: Asthenospheric mantle upwelling during back-arc basin opening. *Lithos*, 86(1): 1–33.
- Staudigel, H., Plank, T., White, B. and Schmincke, H.U., 1996. Geochemical fluxes during seafloor alteration of the basaltic upper oceanic crust: DSDP Sites 417 and 418. In: G.E. Bebout, D.W. Scholl, S.H. Kirby and J.P. Platt (Editors), *Subduction top to bottom*. Geophysical Monograph Series 96, Washington DC., pp. 19–38.
- Stöcklin, J., 1968. Structural history and tectonics of Iran: a review. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 52(7): 1229–1258.
- Sun, S.S. and McDonough, W.S., 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. In: A.D. Saunders and M.J. Norry, (Editors), *Magmatism in the ocean basins*. Geological Society of London, Special Publications, 42(1), London, pp. 313–345.
- Takin, M., 1972. Iranian geology and continental drift in the Middle East. *Nature*, 235(1): 147–150.
- Tatsumi, Y., 2005. The subduction factory: how it operates in the evolving Earth. *Geological Society of America today*, 15(7): 4–10.
- Ustaömer, P.A., Ustaömer, T., Collins, A.S. and Robertson, A.H., 2009. Cadomian (Ediacaran–Cambrian) arc magmatism in the Bitlis Massif, SE Turkey: magmatism along the developing northern margin of Gondwana. *Tectonophysics*, 473(1): 99–112.
- Uyeda, S., 1982. Subduction zones: an introduction to comparative subductology.

- Tectonophysics, 81(3): 133–159.
- Walter, M.J., 1998. Melting of garnet peridotite and the origin of komatiite and depleted lithosphere. *Journal of Petrology*, 39(1): 29–60.
- Wang, Y.H., Xue, C.J., Liu, J.J., Wang, J.P., Yang, J.T., Zhang, F.F., Zhao, Z.N., Zhao, Y.J. and Liu, B., 2015. Early Carboniferous adakitic rocks in the area of the Tuwu deposit, eastern Tianshan, NW China: Slab melting and implications for porphyry copper mineralization. *Journal of Asian Earth Sciences*, 103(1): 332–349.
- Winchester, J. and Floyd, P., 1977. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements. *Chemical Geology*, 20(1): 325–343.
- Whitney, D.L. and Evans, B.W., 2010. Abbreviations for names of rockforming minerals. *American Mineralogist*, 95(1): 185–187.
- Zahedi, M., Rahmati-Ilkhchi, M. and Vaezipour, J., 1992. Geological map of the Shahrekord Quadrangle E8. 1: 250000. Geological Survey of Iran, Tehran, Iran.
- Zhang, R., Zhai, S., Fei, Y. and Liou, J., 2003. Titanium solubility in coexisting garnet and clinopyroxene at very high pressure: the significance of exsolved rutile in garnet. *Earth and Planetary Science Letters*, 216(4): 591–601.
- Zhao, G., Luo, W., Lai, Z., Tian, L. and Xu, C., 2016. Influence of subduction components on magma composition in back-arc basins: a comparison between the Mariana and Okinawa troughs. *Geological Journal*, 51(S1): 357–367.
- Zindler, A. and Hart, S., 1986. Chemical geodynamics. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 14(1): 493–571.