زمین‌شناسی اقتصادی
جلد ۱۱، شماره ۳ (سال ۱۳۹۸)
صفحات ۴۳۹ تا ۴۵۶

Journal of Economic Geology
Vol. 11, No. 3 (2019)
ISSN 2008-7306

ویژگی‌های ژئوشیمیایی و ایزوتوپی پروتولیت اکلوژیت‌های شمال شهرکرد: شاهدی بر تکوین حوضه پشت‌کمان نئوپروتروزوئیک در پهنه سنندج-سیرجان

فروغ ملک محمودی[۱]، علیرضا داودیان 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

اکلوژیت‌های مورد بررسی بخشی از کمپلکس دگرگونی شمال شهرکرد هستند که به پهنه ساختاری سنندج-سیرجان تعلق دارند. این اکلوژیت‌ها با ترکیب کانی شناسی غالب آمفیبول، گارنت، زوئیزیت و پیروکسن (امفاسیت) به‌صورت عدسی‌هایی همراه پاراگنایس‌های نئوپروتروزوئیک مشاهده می‌شوند. مجموعه کانیایی این سنگ‌ها نشان‌دهنده دگرگونی آنها در فشار بالاست. با درنظرگرفتن 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 بهنجارشده 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 بهنجارشده به گوشته اولیه آنومالی منفی Ti، Nb ، P و Y را نشان می‌دهد. نمودارهای ژئوشیمیایی نشان‌دهنده تمایل زیاد این سنگ‌ها با بازالت‌های تولئیتی است که در محیط‌های کششی پشت‌کمان شکل گرفته‌اند. بررسی‌های ایزوتوپی Sr-Nd نشان‌دهنده ماگمای اولیه این سنگ‌ها با ترکیب گوشته غنی‌شده بالای زون فرورانش است. با توجه به الگوی پراگندگی عناصر و نسبت‌های ایزوتوپی اولیه می‌توان تشکیل سنگ مادر اکلوژیت‌های منطقه را ناشی از کشش‌های پشت‌کمان در پهنه سنندج-سیرجان در اواخر پروتروزوئیک پایانی (ادیاکاران) دانست.

واژه‌های کلیدی: *اکلوژیت، گوشته غنی‌شده، نسبت‌های ایزوتوپی Nd-Sr، شمال شهرکرد، پهنه سنندج-سیرجان*

مقدمه

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، به‌جز کپه‌داغ دارای پی‌سنگ پن افریکن هستند (Hassanzadeh and Wernicke, 2016). اغلب تصور می‌شود، این پهنه‌ها تاریخچه مشابهی را طی دوران پالئوزوئیک پشت سر گذاشته‌اند (Alavi, 2004). پهنه سنندج-سیرجان پرتکاپوترین پهنه ساختاری ایران است. پی‌سنگ سنندج-سیرجان به سن نئوپروتروزوئیک متعلق به ابرقاره گندواناست (Berberian and King, 1981). پهنه سنندج-سیرجان، با امتداد شمال‌غربی-جنوب‌شرقی بخشی از کوه‌زاد آلپ-

*مسئول مکاتبات: alireza.davoudian@gmail.com
DOI: https://doi.org/10.22067/econg.v11i3.68644

هیمالیاست (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 مشخص‌شده است، یکی نوار افیولیتی خارجی (نیریز–کرمانشاه) در جنوب‌غربی و دیگری نوار افیولیتی داخلی (خوی و نایین–بافت) که در شمال‌شرقی (Stöcklin, 1968; Takin, 1972) این زون واقع شده‌اند. در جهت شمال‌غرب، پهنه سنندج–سیرجان تا جنوب‌شرقی ترکیه ادامه دارد و پس از آن با تغییری در روند آن تا ماسیف بیتلیس ادامه می‌یابد (Stöcklin, 1968).

تاریخچه تکامل سنندج–سیرجان همچون سایر نقاط ایران متأثر از نقش سه اقیانوس پروتوتتیس، پالئوتتیس و نئوتتیس بوده است. فرورانش پروتوتتیس در ۶۳۰ میلیون سال قبل به ماگماتیسم کمان و پشت‌کمان در حاشیه شمالی گندوانا منجر شد. بیشترین فعالیت ماگمایی در بازه زمانی ۵۴۰ تا ۵۶۰ میلیون سال قبل گزارش‌شده 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 قابل‌توجهی بین ماگماتیسم پرکامبرین سنندج–سیرجان با ایران مرکزی، زاگرس و ماسیف بیتلیس و مندرس در ترکیه وجود دارد. فعالیت‌های پشت‌کمان در ابرقاره گندوانا در حدود ۵۷۰ میلیون سال پیش اتفاق‌افتاده است (Linnemann et al., 2014; Avigad et al., 2015; Shafaii Moghadam et al., 2016b). رخداد محیط پشت‌کمان در ایران در پهنه‌های گوناگون البرز، زاگرس و بلوک لوت گزارش‌شده است (Etemad Saeed et al., 2015; Faramarzi et al., 2015; Hosseini et al., 2015) که از لحاظ سنی در تطابق با موارد گزارش‌شده از ترکیه (Gürsu and Göncüoglu, 2005) و اروپا (Ilnicki et al., 2013; Linnemann et al., 2014) است.

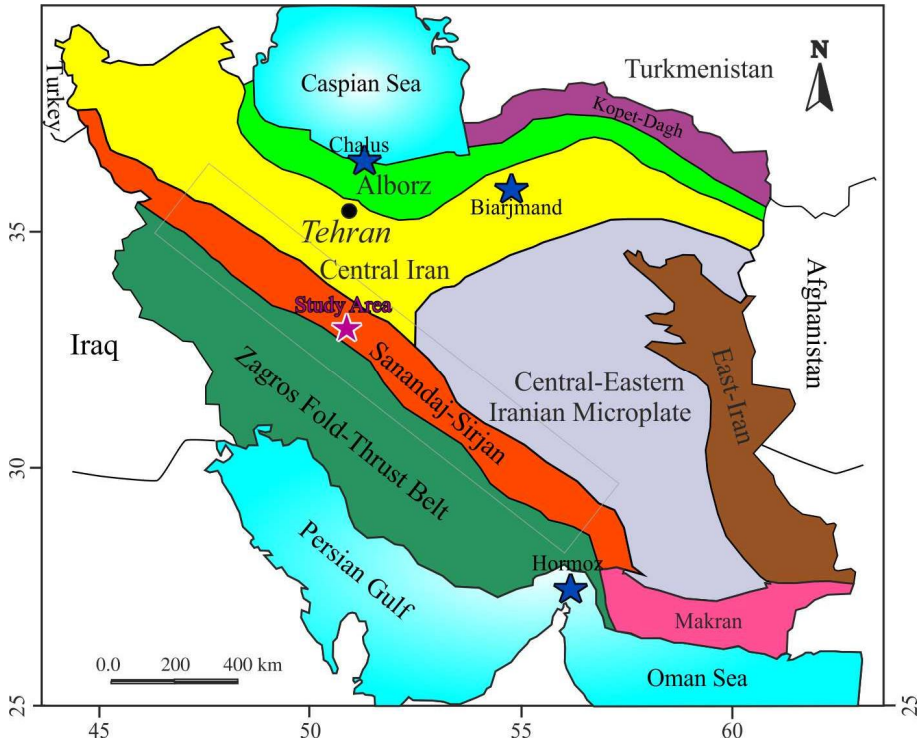
در این پژوهش، تلاش‌شده است بر اساس شواهد ژئوشیمیایی، ایزوتوپی، مشاهدات صحرایی و میکروسکوپی ترکیب شیمیایی، منشأ و محیط تشکیل سنگ مادر اکلوژیت‌های شمال شهرکرد و همچنین عمق تشکیل ماگما سازنده مشخص‌شود. همچنین با توجه به وجود نظرهای متفاوت در مورد منشأ این سنگ‌ها، مقایسه این نتایج با پژوهش‌های پیشین و همچنین سایر مناطق مشابه از لحاظ زمانی و محیط زمین‌ساختی در جهان، دیدگاه بهتری را در درک تحول زمین‌ساختی پی‌سنگ ایران‌زمین فراهم می‌کند.

زمین‌شناسی منطقه

کمپلکس دگرگونی شمال شهرکرد 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 اکلوژیت‌های مورد بررسی و سنگ‌های همراه آنها منجرشده است. دگرگونه‌های شمال شهرکرد 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، کالک‌شیست‌ها و مرمرها که قطعاتی از اکلوژیت‌ها و آمفیبولیت‌های کمتر دگرسان‌شده را دربرگرفته اند، ۲- شیست‌های کوارتز فلدسپاتیک، آمفیبولیت‌ها، گارنت-آمفیبولیت‌ها و مرمرها به همراه کالک‌شیست‌ها، گرافیت‌شیست‌ها و میکاشیست‌ها و ۳- بخش سوم شامل ارتوگنایس‌هایی است که عدسی‌هایی از آمفیبولیت‌ها را دربرگرفته‌اند.

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 نئوتتیس در ژوراسیک آغازین

است (Davoudian et al., 2016). قرارگیری اکلوژیت‌های 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 برخورد صفحه عربی با اوراسیا رخداده است (Davoudian et al., 2008; 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.



شکل ۱. موقعیت کمپلکس دگرگونی شمال شهرکرد به همراه سایر پهنه‌های پشت‌کمان گزارش‌شده با سن نئوپروتروزوئیک درنقشه زمین‌شناسی ایران

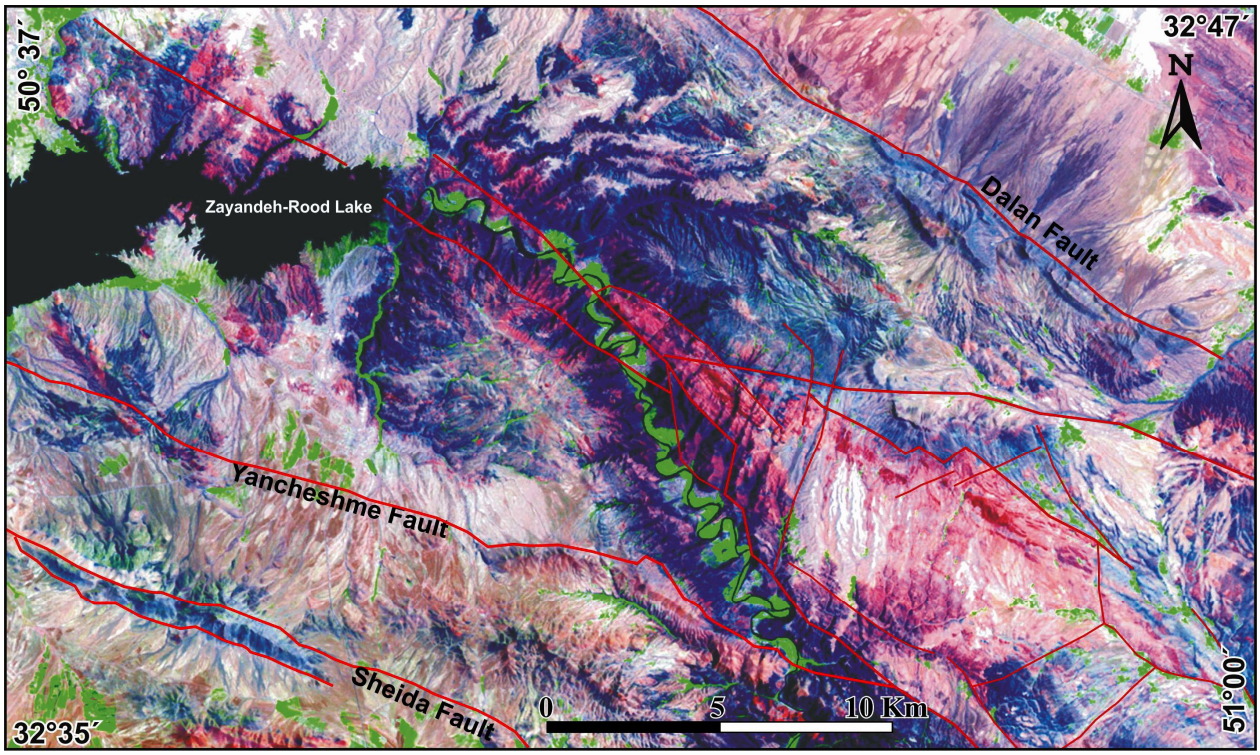
Fig. 1. The position of the North Shahrekord metamorphic complex and other reported back-arcs with Neoproterozoic age in geologic map of Iran

اکلوژیت‌ها در ابعاد متفاوت از چند ده سانتی‌متر تا چند متر به‌صورت عدسی در پاراگنایس‌ها دیده می‌شوند. همچنین برخی از این اکلوژیت‌ها شکل بالشی دارند که نشان‌دهنده فوران سنگ مادر بازالتی آنها در محیط کف دریاست. سنگ‌های همراه با منشأ رسوبی شامل پاراگنایس‌ها، کوارتزیت‌ها، 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 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

آزمایش سنگ‌کل شامل XRF و ICP-MS برای تعیین منشأ اولیه اکلوژیت‌های 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 آزمایش‌شد. شش نمونه برای بررسی عناصر نادر و نادر خاکی به‌روش ICP-MS (Agilent 7700×) در دانشگاه ناگویا و سه نمونه در آزمایشگاه ACME کانادا آزمایش شدند. آنالیز ایزوتوپ‌های Nd-Sr در دانشگاه ناگویای ژاپن انجام‌شد. برای توضیحات بیشتر در مورد روش کار به مقاله ملک محمودی و همکاران (Malek- 2017 Mahmoudi et al.,) مراجعه‌شود.



شکل ۲. تصویر ماهواره‌ای لندست ۷ (ETM+) از کمپلکس دگرگونی شمال شهرکرد (مابین دو گسل اصلی دالان و شیدا) به طول '۵۰°۳۷ تا °۵۱ و عرض '۳۲°۳۵ تا '۳۲°۴۷

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

پتروگرافی

اکلوژیت‌های کمپلکس دگرگونی شمال شهرکرد طی دگرگونی فشار بالا در ژوراسیک آغازین تشکیل شده‌اند. دمای تشکیل این اکلوژیت‌ها در حدود ۵۶۰ درجه سانتی‌گراد و فشار ۲۴ کیلوبار برآورد شده است (Davoudian et al., 2008). کانی‌شناسی این اکلوژیت‌ها شامل آمفیبول‌های سدیک- کلسیک، کلینوپیروکسن، گارنت، زوئیزیت، کلینوزوئیزیت، فنژیت، روتیل و کوارتز است. اغلب کلینوپیروکسن‌ها در اثر دگرگونی برگشتی به آمفیبول تبدیل شده‌اند؛ درحالی‌که زاویه رخ‌های آنها بدون تغییر باقی‌مانده است. بافت‌های دگرشکلی نظیر پورفیروکلاست‌های پوششی و سیمپلکتیت‌ها که بیشتر از کانی‌های آمفیبول و پلاژیوکلاز تشکیل‌شده است (شکل ۳-A،

B و D)، در برخی از اکلوژیت‌های شمال شهرکرد قابل مشاهده هستند. آمفیبول خودشکل درون گارنت احتمالاً نشان‌دهنده تشکیل این کانی در فاز پیش‌رونده و پیش از اوج رخساره اکلوژیت است (شکل ۳-A و B). بسیاری از اکلوژیت‌های منطقه در اثر دگرگونی پس‌رونده به گارنت آمفیبولیت و آمفیبولیت تبدیل شده‌اند.

کلینوپیروکسن‌های دگرگونی فشار بالا که با ترکیب امفاسیت در رخساره اکلوژیت تشکیل شده‌اند (Davoudian et al., 2008)، در فرایند دگرگونی قهقرایی تا حد قابل‌توجهی تغییریافته و به آمفیبول تبدیل شده‌اند. تشخیص پیروکسن‌های باقی‌مانده از آمفیبول‌ها با کمک رنگ پریدگی، پلئوکروئیسم ضعیف‌تر و رخ‌های نود درجه امکان‌پذیر است (Deer et al., 1992). با تجزیه پیروکسن به آمفیبول آهن و احتمالاً تیتانیم 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 منجرشده 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 به‌صورت کشیده در مقاطع میکروسکوپی اکلوژیت‌های شمال شهرکرد قابل‌مشاهده است (شکل ۳-C). پورفیرهای کشیده آمفیبول در زمینه پلاژیوکلاز که تحت‌تأثیر دگرشکلی ایجاد شده‌اند، در شکل ۳-E مشاهده می‌شود.

بحث و بررسی

اکلوژیت‌های کمپلکس دگرگونی شمال شهرکرد متحمل چندین فاز دگرگونی و دگرشکلی شده‌اند. عناصر با شدت میدان بالا (Y، Nb، Ti و Ta HFSE) و عناصر انتقالی (Cr، Ni، V و Sc) در رخدادهای دگرگونی غیر متحرک قلمداد می‌شوند و به همین علت برای بررسی منشاء اولیه مورد استفاده قرار می‌گیرند (Staudigel et al., 1996).

در مورد تعیین منشأ سنگ‌های متابازیت (شامل اکلوژیت‌ها) کمپلکس دگرگونی شمال شهرکرد نظرهای متفاوتی وجود دارد؛ به‌طوری‌که محیط زمین‌ساختی تشکیل این اکلوژیت‌ها در پژوهش‌های پیشین به‌عنوان مورب (Davoudian et al., 2006; Akbari et al., 2016) و یا درون ورقه‌ای (Jamali Ashtiani et al., 2016) معرفی‌شده است. ملک محمودی و همکاران (Malek-mahmoudi et al., 2017) تشکیل اولیه متابازیت‌ها را مربوط به محیط پشت‌کمان می‌دانند. داده‌های مربوط به اکلوژیت‌های شمال شهرکرد به همراه سایر نمونه‌های پشت‌کمان گزارش‌شده مربوط به پرکامبرین (Cai et al., 2014; Ilnicki et al., 2013; Gürsu and Göncüoglu, 2005) برای مقایسه در نمودارها نمایش‌داده 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 اکلوژیت‌های کمپلکس دگرگونی شمال شهرکرد در نمودار Zr/Ti در برابر Nb/Y نشان می‌دهد، منشأ اولیه این نمونه‌ها ترکیبی بازالتی داشته است و ماگمای سازنده این بازالت‌ها ترکیب تولئیتی دارد (شکل ۴-A و B).

روند عناصر نادر خاکی بهنجارشده به کندریت غنی‌شدگی جزئی عناصر نادر خاکی سبک نسبت به عناصر نادر خاکی سنگین را نشان می‌دهد. آنومالی قابل‌توجه Eu در نمونه‌های مورد بررسی مشاهده نمی‌شود.

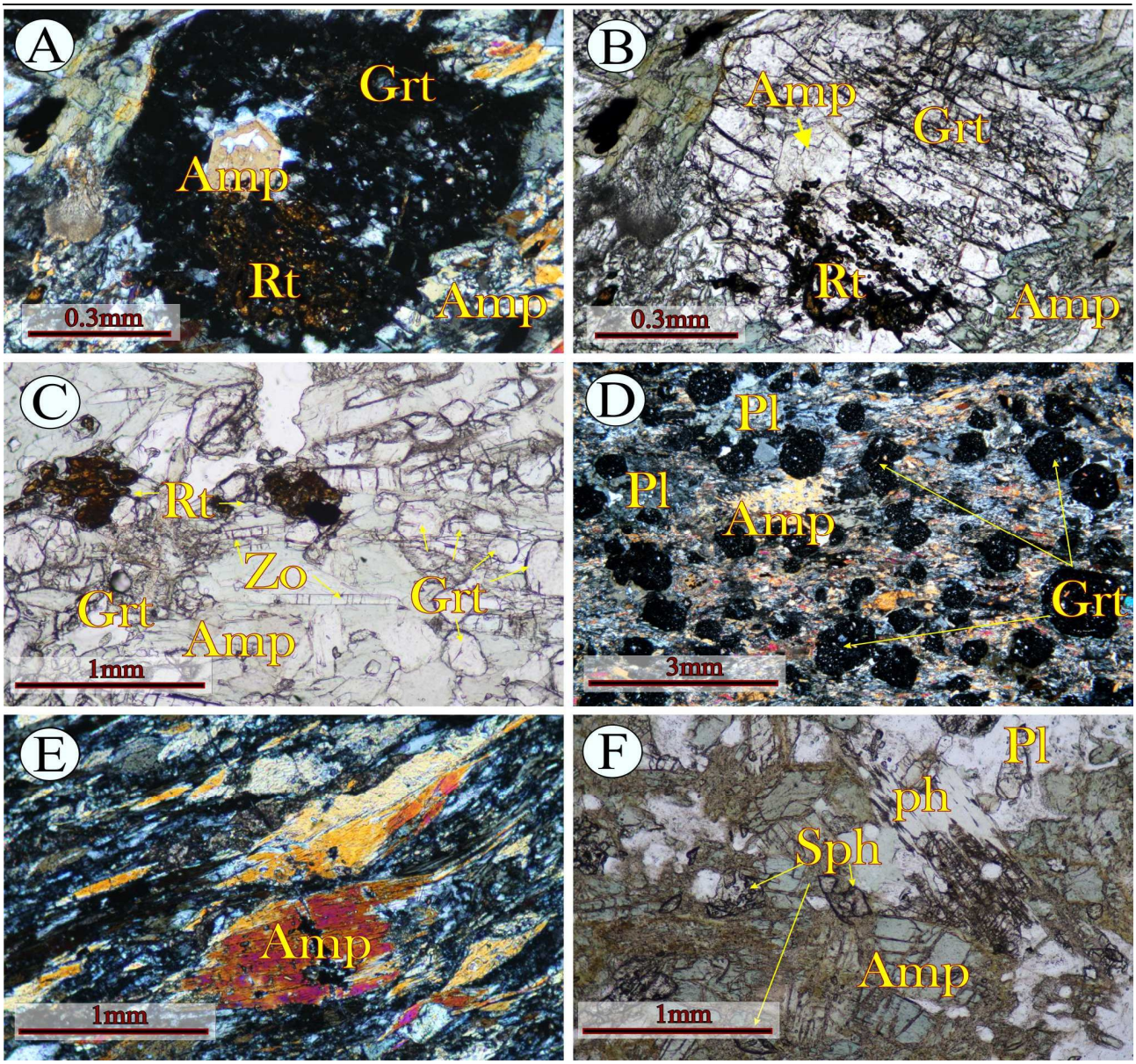
میزان $(La/Yb)_{cn}$ در نمونه‌های اکلوژیت کمپلکس دگرگونی شمال شهرکرد برابر ۱/۷ تا ۲/۷ است (شکل ۵-A). عناصر بهنجارشده به گوشته اولیه نشان‌دهنده آنومالی منفی عناصر با شدت میدان بالا نظیر تیتانیوم، فسفر، نیوبیوم و زیرکنیوم است (شکل ۵-B)؛ درحالی‌که روند کلی عناصر نادر خاکی با روند گوشته غنی‌شده[1] مشابهت دارد، تهی‌شدگی از تیتانیم، نیوبیوم و زیرکنیوم می‌تواند ناشی از تأثیر سیالات فرورانش است (Pearce, 2008).

1. E-MORB

جدول ۱. آنالیز سنگ‌کل نمونه‌های اکلوژیت شمال شهرکرد نتایج میانگین یادشده برگرفته 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 برگرفته از سان و مک‌دوناف (Sun and McDonough., 1989) است.

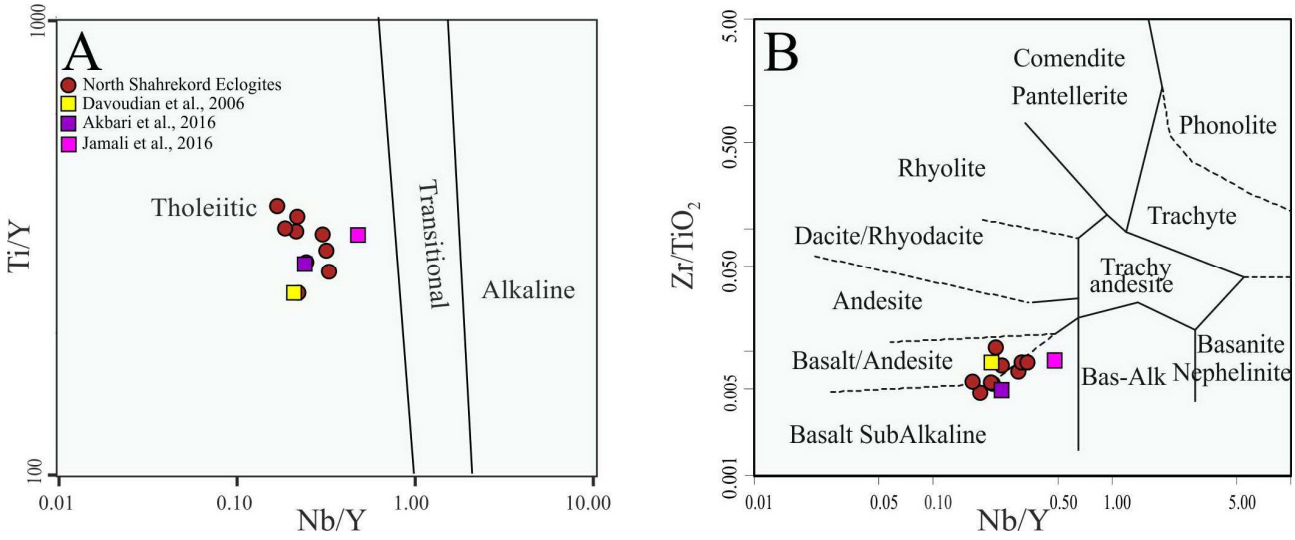
Table 1. Whole rock analyses of North Shahrekord eclogites. The mean data extracted from Davoudian et al., (2006); Akbari et al. (2016); Jamali Ashtiani et al. (2016); Malek-Mahmoudi et al. (2017). Chondrite normalized values after Sun and McDonough (1989)

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_2O_3	14.14	14.10	15.91	14.14
Fe_2O_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_2O	3.18	2.91	2.49	2.90
K_2O	0.51	1.03	0.40	0.49
P_2O_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



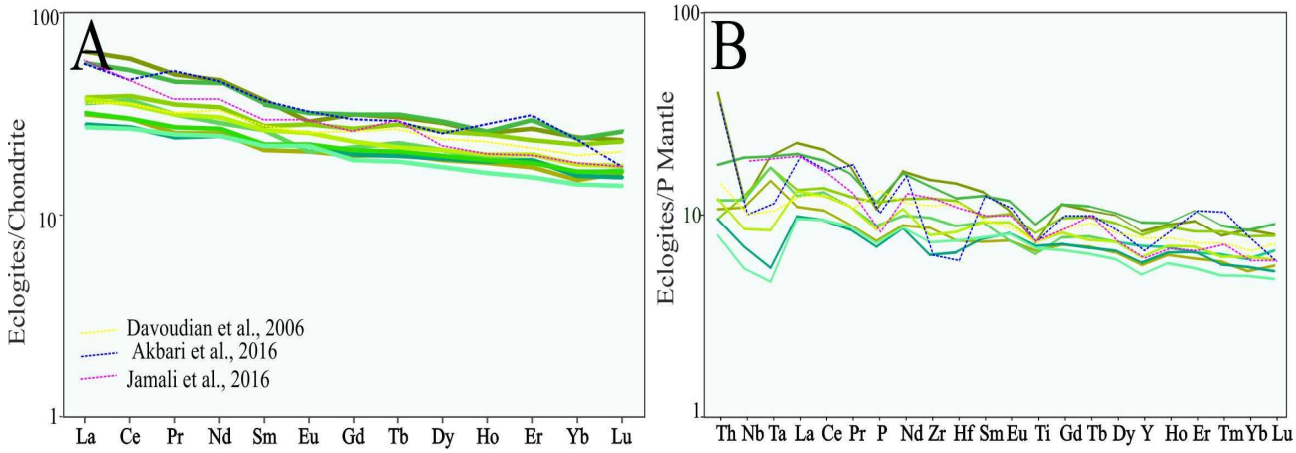
شکل ۳. تصاویر میکروسکپی اکلوژیت‌های نسبتاً سالم کمپلکس دگرگونی شمال شهرکرد (به‌غیر از تصویر E). A و B: کانی آمفیبول خودشکل به همراه بلورهای روتیل درون گارنت در نور XPL و PPL پهنای میدان دید ۱/۲ mm، C: درشت‌بلورهای خودشکل گارنت در کنار آمفیبول، روتیل و کلینوزوئیزیت در نور PPl پهنای میدان دید ۳mm، D: گارنت‌های اغلب خودشکل در زمینه سیمپلکتیت از آمفیبول و پلاژیوکلاز (به صورت ثانویه) در زمینه اکلوژیت تبدیل‌شده 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. علایم 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 اکلوژیت کمپلکس دگرگونی شمال شهرکرد در نمودار تعیین نوع ماگما Ti/Y در برابر Nb/Y (Pearce 1996) و B: ترسیم نمونه‌های اکلوژیت 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)



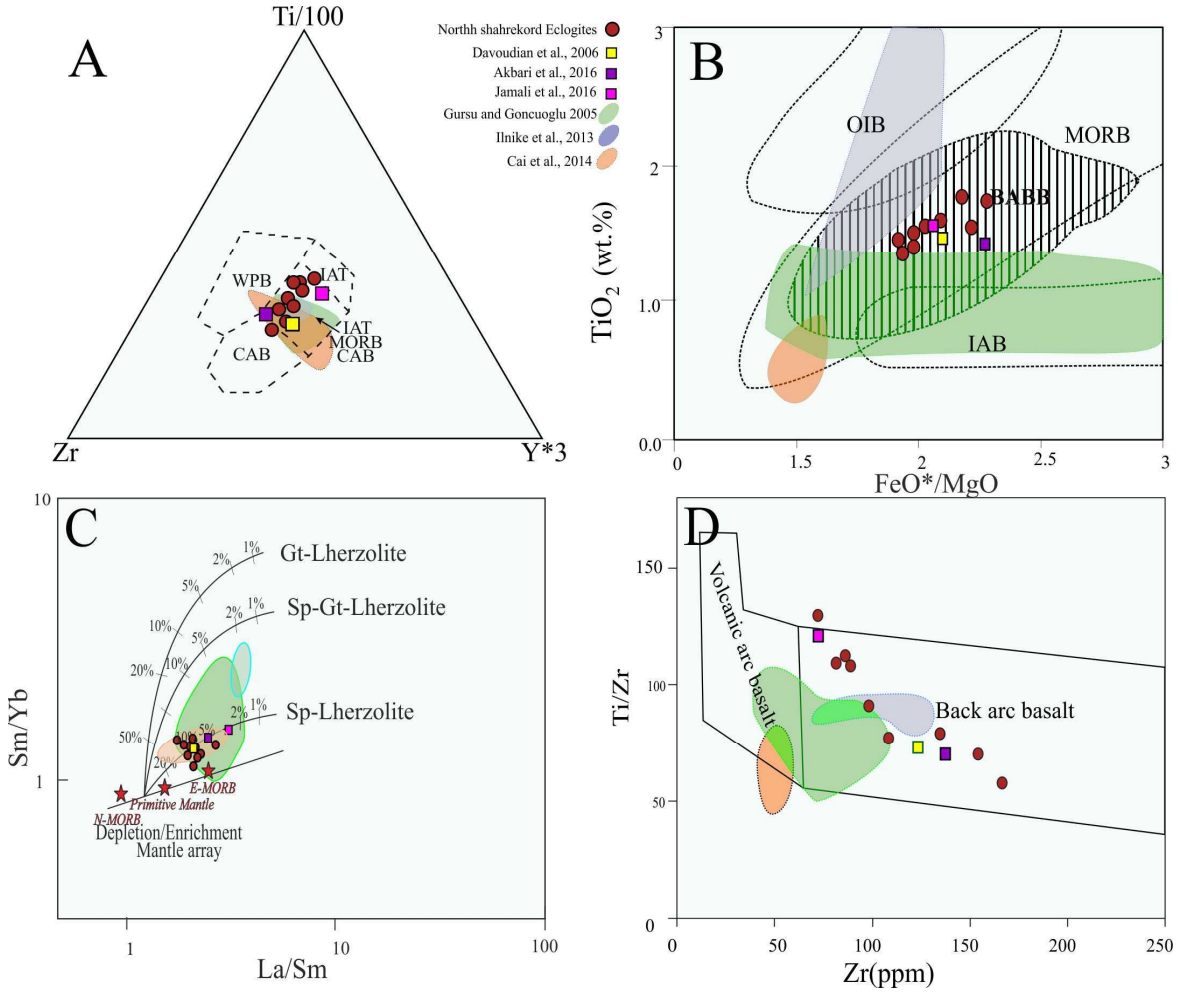
شکل ۵. A: نمودار عنکبوتی عناصر نادر خاکی نمونه‌های مربوط به اکلوژیت‌های شمال شهرکرد خاکی بهنجارشده به کندریت و B: نمودار عناصر نادر بهنجارشده به گوشته اولیه. داده‌های مربوط به گوشته اولیه و کندریت برگرفته ازسان و مک‌دوناف (Sun and McDonough, 1989)

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 McDounough (1989)

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

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

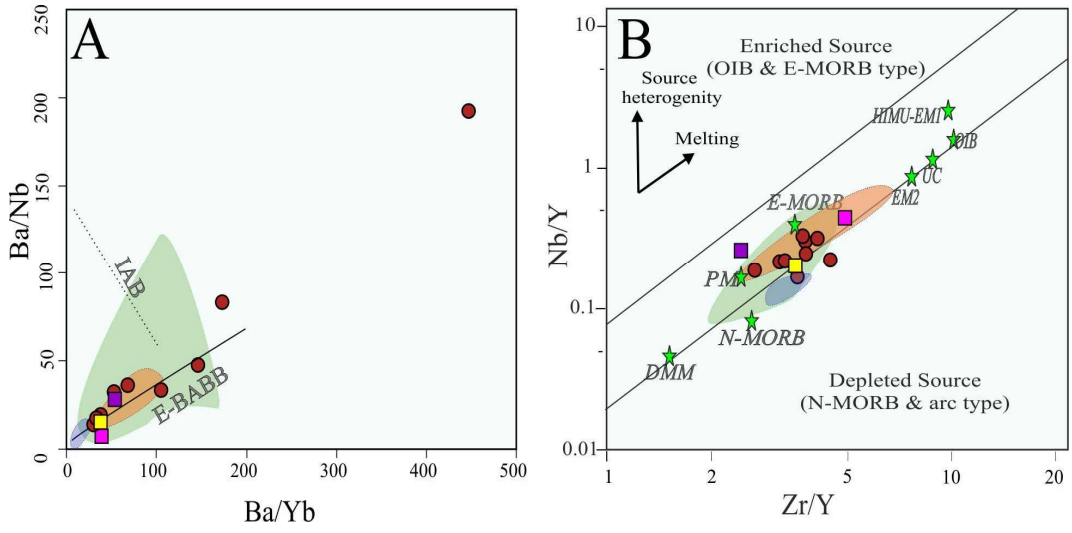
ویژگی‌های ژئوشیمیایی سنگ‌های ایجادشده در محیط پشت‌کمان این است که در نمودارهایی نظیر نمودار بالا، از یک نمودار به نمودار دیگر، محیط زمین ساختی متفاوتی (نظیر درون صفحه‌ای، ریفت و یا پهنه فرورانش) را نشان می‌دهند (Schmincke, 2004). نمودار MgO در برابر TiO_2 (شکل ۶-B) نشان‌دهنده تشکیل ماگمای سنگ مادر اکلوژیت‌ها در محیط پشت‌کمان است (Shuto et al., 2006). شکل (۶-C) بر اساس نسبت نمودار La/Sm در برابر Sm/Yb (Kinzler, 1997; Walter, 1998) و شکل ۶-D، بر اساس Zr در برابر Ti/Zr (Wang et al., 2015) نیز تأییدکننده تشکیل ماگما در محیط پشت‌کمان بوده و میزان ذوب‌بخشی بین ۵ تا ۱۵ درصد است (شکل ۶-C).



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 TiO_2 (Shuto et al., 2006)، C: نمودار La/Sm در برابر Sm/Yb. درصد بیان‌شده برگرفته از کینزلر (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. TiO_2 (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)

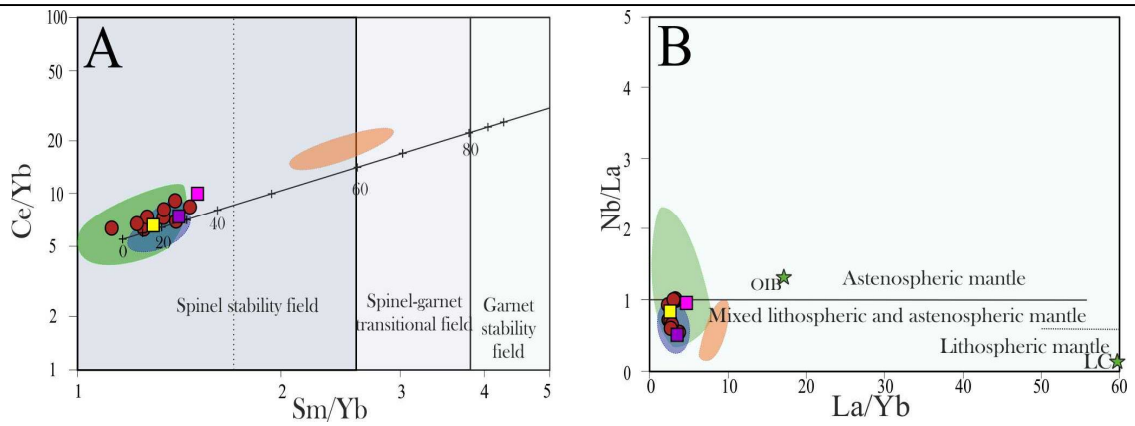
عوامل مختلفی در شکل‌گیری ماگمای پشت‌کمان نقش دارند. اجزای صفحه فرورونده شامل سیالات و یا رسوبات ذوب‌شده، آلایش پوسته‌ای و منشأ گوشته غنی‌شده است (Pearce and Stern, 2006). ماگماهای منتج از محیط‌های پشت‌کمان از تنوع بالایی در ترکیب شیمیایی خود برخوردارند. به‌طور کلی، محیط‌های پشت‌کمان‌های درون اقیانوسی 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). 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 کمانی، روند منفی دارد (Pearce et al., 1995)؛ درحالی‌که این نسبت در بازالت‌های پشت‌کمان مثبت است (Leat et al., 2000). ترسیم نمونه‌های اکلوژیت شمال شهرکرد در نمودارهای تعیین منشأ نشان می‌دهد که سنگ مادر این اکلوژیت‌ها 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 (Shinjo et al., 1999; Cai et al., 2014).



شکل ۷. A: ترسیم نمونه‌های اکلوژیت شمال شهرکرد در نمودار Ba/Nb دربرابر 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

ترسیم نمونه‌های اکلوژیت شمال شهرکرد در نمودار La/Yb در برابر Nb/La (Abdel-rahman, 2002) در شکل (A-۸) نشان‌دهنده عمق جدایش ماگما در لیتوسفر با عمق بین ۱۰ تا ۳۰ کیلومتر و حضور فاز آلومینیم‌دار اسپینل در ماگمای سازنده پروتولیت اکلوژیت‌هاست (Ellam, 1992). همچنین نمونه‌های مورد بررسی از ترکیب گوشته لیتوسفری و استنوسفری تشکیل شده‌اند (شکل ۸-B).



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 اکلوژیت شمال شهرکرد

Fig. 8. A: Sm/Yb vs. Ce/Yb diagram to identify lithospheric thickness and Al-bearing phase (Ellam, 1992), and B: La/Yb vs. Nb/La diagram (Abdel-rahman, 2002) of mantle type of north Shahrekord eclogites source

شواهد ایزوتوپی

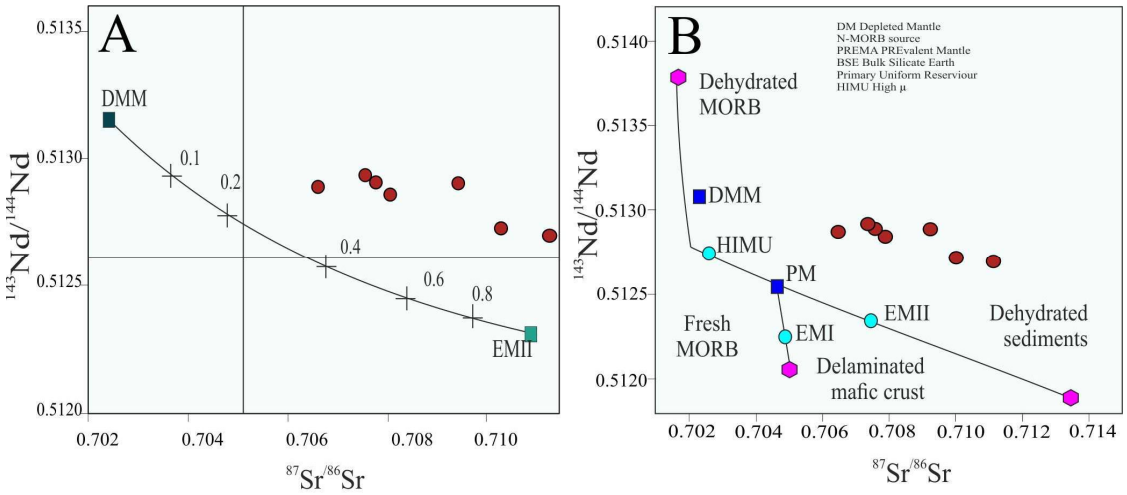
نتایج آنالیز ایزوتوپ‌های Rb-Sr و Nd-Sm مربوط به هفت نمونه از اکلوژیت‌های کمپلکس دگرگونی شمال شهرکرد، مورد بررسی قرارگرفته است (Malek-Mahmoudi et al., 2017). بررسی‌های ایزوتوپی انجام‌شده نشان می‌دهد نسبت $^{87}Sr/^{86}Sr$ بین ۰/۷۰۷ تا ۰/۷۱۱متغیر است و بر مبنای سن سنگ منشأ که انتهای نئوپروتروزوئیک است، نسبت‌های آغازین نیز بین ۰/۷۰۶ تا ۰/۷۰۹ بوده که این نسبت نشان‌دهنده منشأ گوشته‌ای است و گستره آن آلایش پوسته زیرین را نشان می‌دهد (Zindler and Hart, 1986). همچنین نسبت $^{143}Nd/^{144}Nd$ 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 غنی‌شده شده نوع[1] ۲ در واقع ترکیبی از گوشته غنی‌شده و رسوبات بازیافت‌شده است که در زمان فرورانش عمیق تشکیل می‌شود (Dickin, 2005). این حالت اغلب با تشکیل حوضه پشت‌کمان همراه است (Uyeda, 1982).

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

1. EMII

ژئوشیمیایی امکان تفکیک این دو محیط را ندارند. باید توجه‌داشت که ماگماهای مورب از نوع تهی‌شده هستند؛ درحالی‌که نمونه‌های اکلوژیت 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) منجرشده 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 می‌داند. 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 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 نیوبیوم در مقایسه با توریم (شکل ۵–B) و نقش عوامل مربوط به فرورانش در این نمونه‌ها مشخص است (شکل ۹–A و B). مقایسه داده‌ها با نواحی دیگر دنیا که به‌عنوان پشت‌کمان نئوپروتروزوئیک معرفی شده‌اند (Ilnicki et al., 2013; Cai et al., 2014; Gürsu et al., 2015)، شباهت اکلوژیت‌های شمال شهرکرد با این مناطق را تأیید می‌کند. در مجموع استفاده از آنالیزهای ناکافی و نبود برخی عناصر کلیدی نظیر Nb و Th در آنالیز ICP-MS و استفاده از نمودارهای نامناسب ژئوشیمیایی موجب نتیجه‌گیری ناصحیح (Jamali Ashtiani et al., 2016) شده است.



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

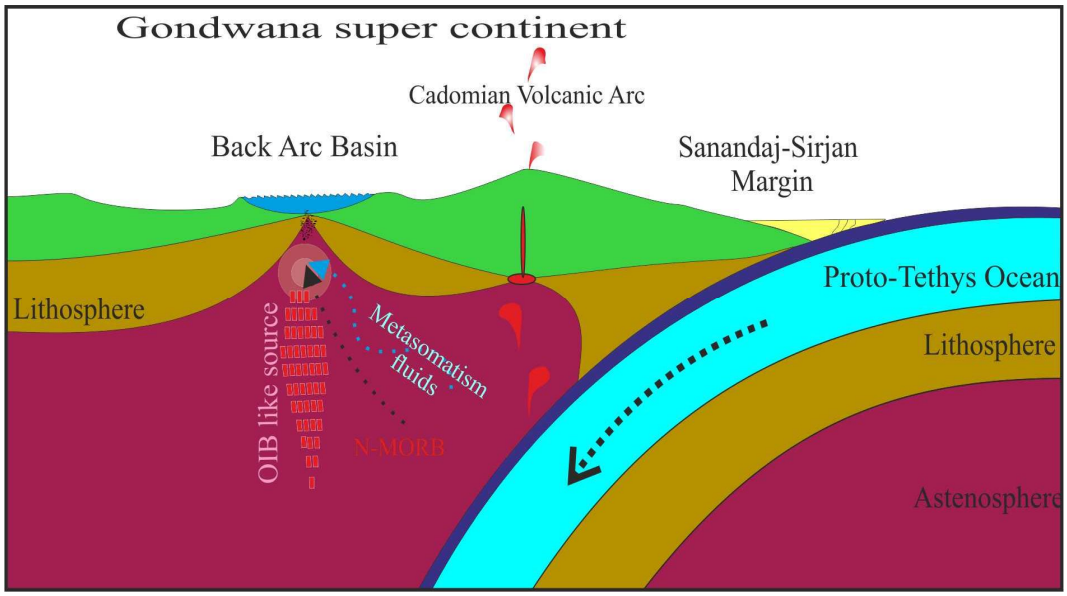
Fig. 9. A: Effect of subduction component in studied eclogite (Zhao et al., 2016), and B: Diagram of source of the North Shahrekord eclogites base on isotopic ratios (Tatsumi, 2005)

شواهد منطقه‌ای و مدل زمین‌ساختی

فرورانش اقیانوس پروتوتتیس به زیر ابرقاره گندوانا، ماگماتیسم کمان و پشت‌کمان در حاشیه شمالی این قاره را در پی داشته است (Shafaii Moghadam et al., 2016b). این فعالیت‌ها

در فاصله زمانی ۶۳۰ تا ۵۱۴ میلیون سال پیش در بخش‌های مختلف ایران گزارش‌شده است (Hassanzadeh and Wernicke, 2016). گسترش محیط پشت‌کمان 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 Göncüoglu, 2005; Abbo et al., 2015) و همچنین اروپا (Ilnicki et al., 2013; Linnemann et al., 2014) گزارش‌شده است. این ماگماها ترکیبی مشابه مورب غنی‌شده دارند (Gürsu and Göncüoglu, 2005; Ilnicki et al., 2013; Linnemann et al., 2014; Hosseini et al., 2015). با توجه به مشابهت زمانی و ترکیب ماگما به‌نظر می‌رسد محیط پشت‌کمان گسترده‌ای در انتهای نئوپروتروزوئیک در ابرقاره گندوانا گسترش‌داشته است (Abbo et al., 2015). تشکیل پروتولیت اکلوژیت‌های 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 متاگرانیتی با سن ۵۱۲ میلیون سال (Badr et al., 2018) قرار دارد. سن سنگ مادر بازالتی این اکلوژیت‌ها در تطابق با سایر فوران‌های پشت‌کمان در ایران بوده که حدود ۵۷۰ میلیون سال درنظرگرفته شده است (Shafaii Moghadam et al., 2016b).

اکلوژیت‌های کمپلکس دگرگونی شمال شهرکرد در کنار سنگ‌های رسوبی دگرگون‌شده نظیر شیست، کوارتزیت، مرمر و متاپسامیت دیده می‌شود که شاهدی بر وجود محیطی رسوبی کم‌عمق در زمان ماگماتیسم اولیه است. حضور این شواهد صحرایی در کنار بررسی‌های ژئوشیمیایی نشان‌دهنده وجود حوضه‌ای پشت‌کمان در پهنه سنندج-سیرجان است. پروتولیت اکلوژیت‌های کمپلکس دگرگونی شمال شهرکرد از تلفیق ماگمای منتج از گوشته غنی‌شده به‌همراه گوشته نرمال به‌دست آمده که تأثیر سیالات فرورانش نیز در آنها قابل‌مشاهده است. شکل ۱۰ مدل حوادث زمین‌ساختی رخداده در این بازه زمانی را نمایان می‌کند. درنهایت، فاز دگرگونی فشار بالا در ژوراسیک زیرین به تشکیل اکلوژیت‌های کمپلکس دگرگونی شمال شهرکرد و سرانجام سربرآوری آن منجر شده است (Davoudian et al., 2016).



شکل ۱۰. مدل شماتیک از شکل‌گیری پروتولیت اکلوژیت‌های کمپلکس دگرگونی شمال شهرکرد در انتهای نئوپروتروزوئیک

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

نتیجه‌گیری

فرورانش اقیانوس پروتوتتیس به زیر ابرقاره گندوانا در انتهای نئوپروتروزوئیک به شکل‌گیری حوضه پشت‌کمان در پهنه سنندج-سیرجان منجرشده است. پروتولیت سنگ‌های متابازیک اکلوژیتی مرتبط با فعالیت پشت‌کمان در منطقه سد زاینده‌رود از نوع بازالتی بوده و ماگمای سازنده آنها تمایلات تولئیتی نشان می‌دهد. غنی‌شدگی جزئی از عناصر نادر خاکی سبک در مقایسه با عناصر نادر خاکی سنگین و همچنین آنومالی منفی نیوبیوم، تیتانیوم و زیرکنیوم در عناصر نادر قابل‌مشاهده است. شواهد ژئوشیمیایی، رخداد محیط زمین‌ساختی پشت‌کمان و وجود ماگمای غنی‌شده را در نمونه های اکلوژیت کمپلکس دگرگونی شمال شهرکرد تأیید می‌کند. بررسی ایزوتوپ‌های Nd-Sr نشان‌دهنده نقش گوشته غنی‌شده نوع دو (مرتبط با فرورانش) در شکل‌گیری سنگ‌های مافیک اولیه است. به نظر می‌رسد نمونه‌های مورد بررسی حاصل ترکیب گوشته غنی‌شده نوع دو با گوشته تهی شده است.

قدردانی

نویسنده‌گان مقاله از حمایت دانشکده منابع طبیعی و علوم‌زمین دانشگاه شهرکرد در به ثمر رساندن این پژوهش قدردانی می‌نمایند.

References

Abbo, A., Avigad, D., Gerdes, A. and Güngör, 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, thermobarometery 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, thermobarometery 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. $^{40}Ar/^{39}Ar$ 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., Noorbehsht, 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 plunetary processes. Geological Society of America, Special Papers 430, Boulder- Clorado, pp. 387–412.

Gürsu, S. and Göncüoglu, 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., Göncüoglu, 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 Zanjan–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 Mineralogists, 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.

Journal of Economic Geology
Vol. 11, No. 3 (2019)
ISSN 2008-7306

زمین‌شناسی اقتصادی
جلد ۱۱، شماره ۳ (سال ۱۳۹۸)
صفحات ۳۹ و ۴۰

Geochemical and Isotopic Characteristics of the Protolith of Eclogites from the North Shahrekord Metamorphic Complex: Evidence of Late Neoproterozoic Back-arc Basin development in Sanandaj-Sirjan Zone

Forough Malek Mahmoudi[1], Ali Reza Davoudian Dehkordy[1]*, Nahid Shabanian Boroujeni[1] and Hossein Azizi[2]

1) Faculty of Natural Resources and Earth Sciences, Shahrekord University, Shahrekord, Iran
2) Mining Department, Faculty of Engineering, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran

Submitted: Nov. 11, 2017
Accepted: July 16, 2018

Keywords: *Eclogites, enriched mantle, Sr-Nd isotope ratios, North Shahrekord, Sanandaj-Sirjan Zone*

Introduction

All of the major tectonic zones of Iran, except for the Kopet-Dagh, contain Pan-African crystalline basement. Subduction of the Proto-Tethys at about 630 Ma caused Cadomian arc– and backarc magmatism in the northern margin of Gondwana (Hassanzadeh and Wernicke 2016). Sanandaj-Sirjan Zone with NW-SE trend is the most active zone in Iran that extends to the southeast of Turkey and then to Bitlis Massif. There are many similarities between the Precambrian basement in the zone from Iran with Bitlis and Menderes massifs from Turkey.

The study area is a part of a large-scale ductile shear zone, containing a wide range of metamorphic rocks with sedimentary and magmatic origins. Metasedimentary rocks comprise of paragneiss, various schists and meta-carbonates that have cropped out through the shear zone which extends along the Zayandeh-Rood River. Metabasic rocks of the North Shahrekord Metamorphic Complex (NSMC) are composed of amphibolites, garnet amphibolites and eclogites as lenses in metagranitoid bodies and other metamorphic rocks.

The work is focused on the origin of the eclogites based on field geology, petrography, geochemistry and Sr-Nd isotopic ratios. The new petrological and geochemical analyses are presented to show a geodynamic model for the protolith of the eclogites and their relations to Proto-Tethys subduction during Late Neoproterozoic.

Materials and methods

After microscopic studies, nine fresh samples were selected for whole-rock geochemical analysis (XRF and ICP-MS analysis) for determining the major trace elements, and REE contents. Six samples were analyzed at Nagoya University (Japan) and three samples were analyzed for XRF at Salzburg University (Austria) and ICP-MS, in ACME lab (Vancouver, Canada).

Results

Chondrite normalized REE diagrams display minor enrichment of LREE in comparison with HREE. $(La/Yb)_{cn}$ ratio varies between 1.7 to 2.7 without Eu anomaly. Primary mantle normalized diagram of trace elements show negative anomaly in P, Ti, Nb and Zr. Initial magma had been a basalt to andesite-basalt composition. Tholeiitic magma are revealed by relatively flat REE patterns and geochemical diagrams for their protolith. The geochemical data of the NSMC eclogites shows compositional characteristics of E-MORB which is composed of a mix of lithospheric and asthenospheric mantle, and final melt segregation has occurred at depths between 10 to 30 km. Spinel was aluminum bearing phase in the mantle. Tectonic discrimination diagrams display that magma is formed in a back-arc basin

*Corresponding authors Email: alireza.davoudian@gmail.com
DOI: https://doi.org/10.22067/econg.v11i3.68644

environment. Studying Sr-Nd isotopes specifies a range of 0.707 to 0.711 for $^{87}Sr/^{86}Sr$ and 0.5129 as an average of $^{143}Nd/^{144}Nd$. εNd_t varies between 3 to 7. Moreover, the initial $^{87}Sr/^{86}Sr$ ratios of the samples vary from 0.705–0.709 (Malek-Mahmoudi et al., 2017). The isotopic evidences indicate that the initial magmas are formed from the mixture of EMII and MORB reservoir with a 0.4 to 0.8 influence of the subduction component.

Discussion

Iranian basement rocks that were affected by the Cadomian orogeny are reported from different zones of Iran with an age range between 630 to 514 Ma (Hassanzadeh and Wernicke 2016). Neoproterozoic rocks of the Gondwana supercontinent, which were formed in a back-arc basin setting, have been reported from some zones of Iran, such as Alborz, Central Iran and Zagros Hormoz complex (e.g. Etemad Saeed et al., 2015; Faramarzi et al., 2015; Hosseini et al., 2015) and also from Turkey (e.g. Gürsu and Göncüoglu, 2005). Ages of the back-arc successions range from 570 to 530 Ma (e.g., Abbo et al., 2015; Shafaii Moghadam et al., 2016).

Our geochemical evidences indicate the formation of a continental back-arc basin in Sanandaj-Sirjan Zone during Late Neoproterozoic. The association of eclogites with meta-sedimentary rocks including paragneiss, schist, quartzite, metadolomite and metasandstone, display a shallow marine sedimentary environment. The combination of field observations and chemical composition of the eclogites shows that the protolith of the rocks are formed at a rifted back-arc basin at the Gondwana during late Neoproterozoic to early Cambrian. Then, high-pressure metamorphic phase was affected on the rocks during Early Jurassic (Davoudian et al., 2016).

Acknowledgements

The authors would like to thank the Shahrekord University for providing the budget for this research.

References

Abbo, A., Avigad, D., Gerdes, A. and Güngör, 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.

Davoudian, A., Genser, J., Neubauer, F. and Shabanian, N., 2016. $^{40}Ar/^{39}Ar$ 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.

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.

Gürsu, S. and Göncüoglu, 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.

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.

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.

Shafaii Moghadam, H., Li, X.H., Stern, R.J., Santos, J.F., Ghorbani, G. and Pourmohsen, M., 2016. 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.