

سن سنجی و دماسنجی تبلور زیر کن در متاگرانیت‌های کمپلکس دگرگونی شمال شهر کرد

افسانه بدر^۱، ناهید شبانیان^۲، علیرضا داودیان^۳ و حسین عزیزی^۴

^۱دانشجوی دکترا، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران

^۲دانشیار، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران

^۳استاد، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران

^۴استاد، گروه معدن، دانشکده مهندسی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۱۰/۲۷ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۲/۰۹

چکیده

کمپلکس دگرگونی شمال شهرکرد (NSMC) در مرکز پهنه سنندج- سیرجان شامل توده‌های متاگرانیتی است که در بعضی از سنگ‌های دگرگونی، مخصوصاً در شیست‌ها نفوذ کرده‌اند. متاگرانیت‌های NSMC خصوصیات دگرگونی و دگرشکلی شکل‌پذیر مشخصی را نشان می‌دهند. این سنگ‌ها از کوارتز، فلدسپار آلکالن، پلاژیوکلاز، بیوتیت، آمفیبول، اپیدوت، گارنت، زیرکن، آلانیت، اسفن (تیتانیت)، آپاتیت و مگنتیت تشکیل شده‌اند. سن سنجی متاگرانیت‌های NSMC به روش U-Pb بر روی زیرکن نشانگر سن [۵۳-۵۳+۵/۰۳-۵۲۳/۹۲] میلیون سال و به روش Rb-Sr سنگ کل نشان‌دهنده سن 47 ± 50.4 میلیون سال است. متاگرانیت‌های NSMC (کامبرین میانی) جوان‌تر از گرانیتوئیدهای نوپروتروزوییک فوقانی و کامبرین تحتانی پهنه سنندج- سیرجان هستند. متاگرانیت‌های NSMC برخلاف اکثر گرانیتوئیدهای مذکور (مرتبط با قوس آتشفشانی)، در موقعیت بعد از برخورد تشکیل شده‌اند. با توجه به ریخت‌شناسی و شکل بلورهای زیرکن موجود در متاگرانیت‌های NSMC، بیشتر زیرکن‌ها در نواحی S19 و S15 طبقه‌بندی ریخت‌شناسی بلورهای زیرکن قرار می‌گیرند. لذا ماگمای گرانیتی منطقه دارای منشأ دورگه (پوسته‌ای و گوشته‌ای) است. دمای تبلور متاگرانیت‌ها بر اساس مطالعات ریخت‌شناسی زیرکن برابر ۷۵۰ تا ۸۵۰ درجه سانتی-گراد، بر طبق روش محاسبه‌ای اشباع زیرکن برابر $753/2$ تا $828/5$ درجه سانتی‌گراد و بر اساس روش ترسیمی (نتایج تجزیه شیمیایی سنگ کل) برابر ۷۶۰ تا ۸۳۰ درجه سانتی‌گراد محاسبه شده است.

کلیدواژه‌ها: پهنه سنندج- سیرجان، متاگرانیت، کادومین، ریخت‌شناسی زیرکن، سن سنجی U-Pb زیرکن.

*نویسنده مسئول: ناهید شبانیان

E-mail: shabanian.nahid@nres.sku.ac.ir

۱- پیش‌نوشتار

کانی زیرکن به علت پایداری فیزیکی و شیمیایی برای مطالعات سنگ‌شناسی و ژئوکرونولوژی مفید است و به‌طور گسترده برای کشف تاریخچه تشکیل سنگ‌های ماگمایی استفاده می‌شود (Corfu et al., 2003). ارتباط نزدیکی بین ریخت‌شناسی زیرکن، منشأ آنها، فرایندها، ترکیب شیمیایی و جایگاه زمین‌شناختی منبع ماگما وجود دارد (Pupin, 1980; Krasnobaev, 1986; Wang, 1998; Berezhnaya, 1999; Wang and Kienast, 1999). Pupin (1980) بر اساس آزمایش سیستماتیک ریخت‌شناسی زیرکن، نموداری را طراحی کرد. در این نمودار، I.A. (اندیس آلکالن $(Al/(Na+K))$) نشان‌دهنده نسبت تشکیل هرم‌های سطح {۲۱۱} در مقایسه با سطح {۱۰۱} زیرکن است، به طوری که رشد نسبی اشکال هرمی مستقیماً مرتبط با ترکیب شیمیایی ماگماست. همچنین I.T. (اندیس حرارت) در این نمودار نشان‌دهنده نسبت تشکیل منشورهای سطح {۱۰۰} در مقایسه با سطح {۱۱۰} زیرکن است. رشد نسبی اشکال منشوری در ارتباط مستقیم با دمای تبلور است، برای مثال زیرکن‌های متبلور شده از مذاب‌های دما بالا، از نظر ریخت‌شناسی بیشتر دارای منشورهای {۱۰۰} و انواع متبلور شده از مذاب‌های دما پایین، بیشتر دارای منشورهای {۱۱۰} هستند که این ارتباط می‌تواند به عنوان یک زمین‌دماسنج (ژئوترمومتر) استفاده شود (Pupin and Turco, 1974).

نقشه‌های زمین‌شناسی ۱:۲۵۰۰۰۰ شهرکرد و ۱:۱۰۰۰۰۰ جادگان به ترتیب توسط زاهدی و همکاران (۱۳۷۱) و قاسمی و همکاران (۱۳۸۵) تهیه شده است. داودیان دهکردی و همکاران (۱۳۷۹ و ۱۳۸۱) و داودیان دهکردی (۱۳۸۹) دمای تبلور و محیط تکتونیکی توده‌های گرانیتوئیدی شمال باختر شهرکرد (حاشیه رودخانه زاینده‌رود) را بررسی کرده‌اند. حسینی و احمدی (۱۳۹۲ و ۱۳۹۵) نیز مطالعات ژئوشیمی و سن سنجی بر روی توده‌های گرانیتوئیدی شمال سامان انجام داده‌اند. در این مقاله تعیین سن ایزوتوپ به روش‌های Rb-Sr (سنگ کل) و U-Pb بر روی زیرکن به روش Tuff-Zirc بر روی متاگرانیت‌های شمال شهرکرد انجام شده و نتایج

به دست آمده مقایسه شده‌اند. همچنین دمای تبلور متاگرانیت‌های مذکور با استفاده از ریخت‌شناسی و نیز درجه اشباع زیرکن محاسبه شده است.

۲- زمین‌شناسی منطقه

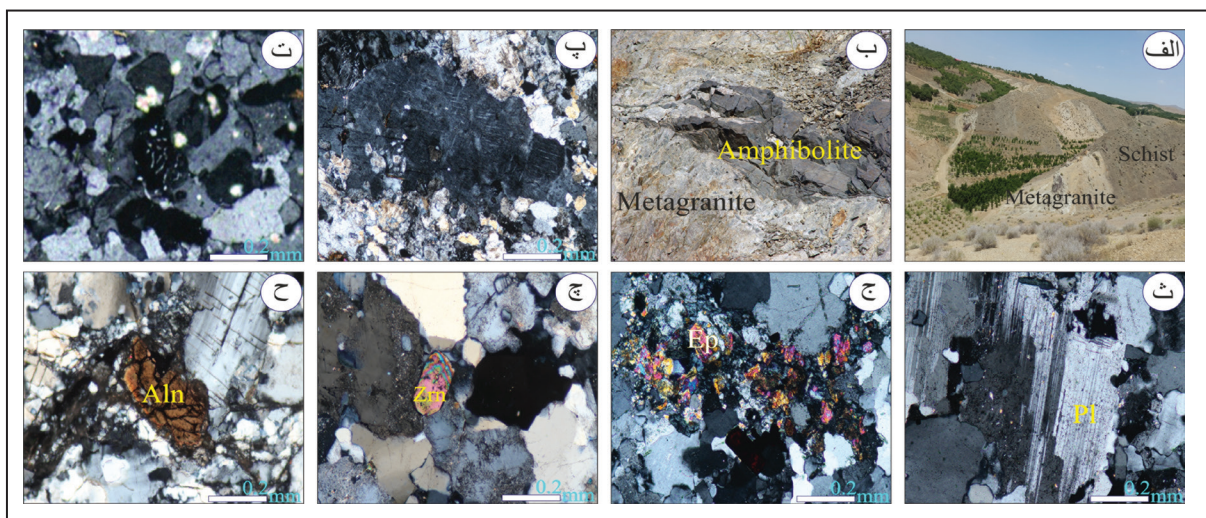
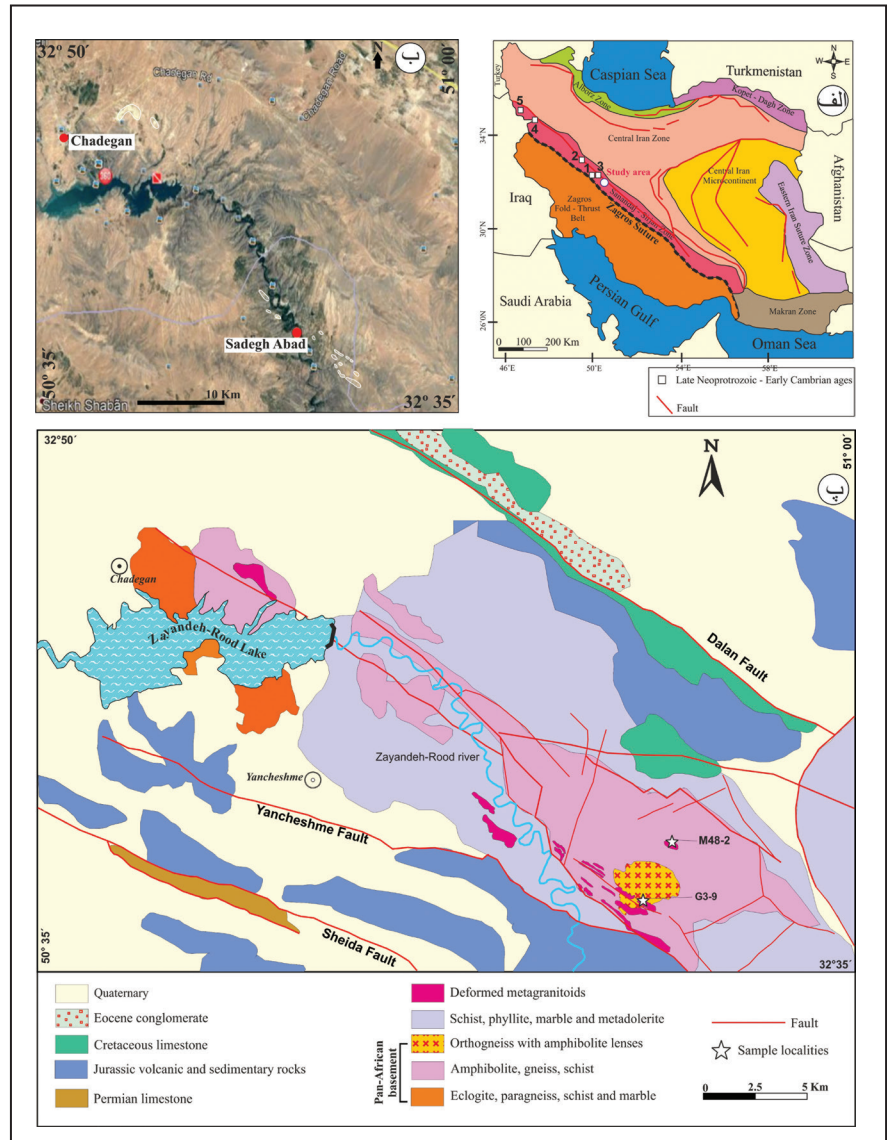
منطقه مورد مطالعه در ۳۵ کیلومتری شمال شهرکرد در مرکز پهنه سنندج- سیرجان واقع شده و قسمتی از NSMC است (شکل‌های ۱- الف، ب و پ). در کمپلکس دگرگونی شمال شهرکرد (North Shahrekord Metamorphic Complex (NSMC)، توده‌های متاگرانیتی به صورت استوک‌های کوچک تا متوسط و یا در مواردی به صورت دایک مشاهده می‌شوند، اما هیچ مدرک روشنی از دگرگونی مجاورتی در اطراف توده‌ها وجود ندارد (داودیان دهکردی، ۱۳۸۹). بر اساس نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه (Badr et al., 2018)، NSMC از سه واحد اصلی شامل واحد دگرگونی درجه بالا، واحد دگرگونی درجه پایین و واحد متاگرانیت دگرشکل شده تشکیل شده است. سنگ‌های دگرگونی درجه بالای کمپلکس به صورت پی‌سنگ پان‌آفریکن در نظر گرفته شده‌اند و می‌توانند به سه زیرواحد تقسیم شوند: ۱) پاراگنیس‌ها با عدسی‌هایی از آمفیبولیت و اکلوزیت؛ ۲) شیست‌ها؛ ۳) ارتوگنیس‌ها با عدسی‌هایی از آمفیبولیت (Davoudian et al., 2008 and 2016; Malek-Mahmoudi et al., 2017). تعیین سن ارتوگنیس‌ها (به روش U-Pb) نشانگر سن 13 ± 56.9 میلیون سال (نوپروتروزوییک فوقانی) است (Davoudian et al., 2016). واحد دگرگونی درجه پایین شامل شیست‌ها، فیلیت‌ها، مرمرها و متادلریت‌ها هستند. واحد گرانیتی شدیداً دگرشکل شده در بعضی از سنگ‌های دگرگونی، مخصوصاً در شیست‌ها نفوذ کرده است (داودیان دهکردی، ۱۳۸۹) (شکل‌های ۲- الف و ب).

متاگرانیت‌های NSMC مشخصات دگرگونی و دگرشکلی شکل‌پذیر مشخصی را نشان می‌دهند. سن دگرگونی در گرانیتهای دگرشکل و

(Davoudian et al., 2016). این سن‌ها بیانگر سن سرد شدن این توده‌ها در گذر از ده‌ماه‌ای ۵۵۰ تا ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد است.

دگرگون شده بر اساس سن‌سنجی $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ بر روی هورنبلند و بیوتیت به ترتیب $170/1 \pm 0/9$ میلیون سال و $110/7 \pm 0/3$ میلیون سال تعیین شده است

شکل ۱- الف) موقعیت متاگرانیت‌های NSMC و همچنین گرانیتوئیدها و میولیت‌های به سن نئوپروتروزویک فوقانی- کامبرین تحتانی در پهنه سندج- سیرجان: (۱) ازنا (قلعه دژ) به سن ۶۰۸ تا ۵۸۸ میلیون سال (Shakerardakani et al., 2015)؛ (۲) ازنا- درود به سن ۵۲۵ میلیون سال (Shabanian et al., 2018)؛ (۳) موته به سن ۵۹۶ تا ۵۷۸ و ورزنه به سن ۵۸۸ میلیون سال (Hassanzadeh et al., 2008)؛ (۴) سورات به سن ۵۴۳ تا ۵۳۷ میلیون سال (Jamshidi Badr et al., 2013)؛ (۵) بوکتان به سن ۵۴۴ و شیخ‌چوپان به سن ۵۵۱ میلیون سال (Hassanzadeh et al., 2008)؛ (ب) عکس ماهواره‌ای گرانیت‌های NSMC به صورت خطوط سفید با راستای شمال باختر- جنوب خاور در حاشیه رودخانه زاینده‌رود؛ (پ) نمایش موقعیت نمونه‌های M48-2 و G3-9 بر روی نقشه زمین‌شناسی منطقه (Davoudian et al., 2016) با تغییرات.



شکل ۲- الف) نفوذ متاگرانیت در شیست؛ ب) کنتاکت متاگرانیت و آمفیبولیت؛ پ) پرتیت شعله‌ای؛ ت) میرمیکت؛ ث) پلاژیوکلاز دارای ماکل تخته شطرنجی و مرزهای دندانه‌ای و کنگره‌ای؛ ج) اپیدوت؛ چ) زیرکن؛ ح) آلانیت. عکس‌ها در نور XPL گرفته شده‌اند. نام اختصاری کانی‌ها بر گرفته از (Whitney and Evans, 2010) است.

PI=Plagioclase, Ep=Epidote, Zrn=Zircon, Aln=Allanite

۳- روش مطالعه

این مطالعه بر اساس کار صحرایی، مطالعات میکروسکوپی، مطالعات زمین دماسنجی (ژئوترمومتری) و سن سنجی است. برای مطالعات زمین دماسنجی و سن سنجی U-Pb بر روی زیرکن، دانه‌های زیرکن دو نمونه (M48-2 و G3-9) با کمترین آثار دگرسانی انتخاب شد و روش‌های مرسوم خردایش، غربالگری، جداسازی و حذف کانی‌های مغناطیسی (توسط دستگاه جداکننده مغناطیسی)، جداسازی کانی‌های سنگین از کانی‌های سبک (به روش مایعات سنگین) و در نهایت جدایش کانی‌های زیرکن از دیگر کانی‌های سنگین به صورت دستی (توسط میکروسکوپ دوچشمی) صورت گرفت.

سپس دانه‌های زیرکن در چسب مانت و صیقلی شدند. تصاویر BSE (Back Scattered Electrons) ۱۹ دانه زیرکن نمونه M48-2 و ۱۹ دانه زیرکن نمونه G3-9 با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) (Scanning Electron Microscopy) مدل هیتاچی N-3400S گرفته شد. تجزیه‌های ایزوتوپی U-Pb بر روی زیرکن توسط دستگاه ICP-MS مدل Agilent 7700 x (Agilent Technologies, USA) مرتبط با LA NWR213، (Electro Scientific Industries, USA) در دانشگاه ناگویا (ژاپن) صورت گرفت. پردازش داده‌های ایزوتوپی و محاسبه سن با استفاده از نرم افزارهای ISOPLOT نسخه ۴/۱۵ بر روش Tuff-Zirc (Ludwig, 2012) انجام و نتایج به دست آمده با روش Tera-Wasserburg, concordia (Badr et al., 2018) مقایسه شد. در تعیین سن U-Pb برای پلات نتایج به دست آمده بر روی منحنی‌های کنکوردا (سازگاری) معمولاً دو روش Tera-Wasserburg و Conventional concordia استفاده می‌شود. روش متداول دیگر، استفاده از نمودار Tuff-Zirc است و در آن داده‌های سنی بر روی محور (y) قرار دارد. نمودار Tera-Wasserburg بر اساس رابطه بین دو نسبت $^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$ و $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ بوده، در حالی که نمودار Conventional concordia رابطه بین دو نسبت $^{207}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ و $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ است.

اطلاعات سنی حاصل از این دو روش معمولاً یکسان است ولی بعضی از زمین‌شناسان روش Tera-Wasserburg را ترجیح می‌دهند؛ زیرا خطای همبستگی بین نسبت‌های $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ به‌ویژه زمانی که سرب از دست رفته باشد، بسیار کم است. روش دیگر یعنی Tuff-Zirc از نظر ریاضی و مفهومی یک رویکرد ساده بوده که نسبت به دو عامل «به ارث رسیدن» و «از دست دادن سرب» غیر حساس است؛ لذا در مواردی که وجود هسته یا زینوکریست باعث ایجاد سن‌های بیشتر و از دست دادن سرب باعث ایجاد سن‌های کمتر شده، استفاده از روش Tuff-Zirc بسیار مناسب است (Ludwig, 2012).

استنباط‌های حاصل از تجزیه زمین شیمیایی و ایزوتوپ Rb-Sr بر اساس داده‌های (Badr et al. 2018) انجام پذیرفته است.

۴- مطالعات سنگ‌نگاری

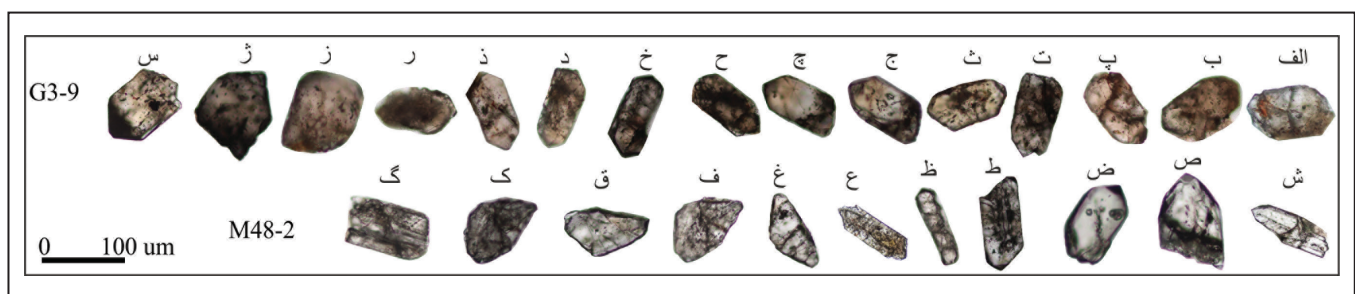
متاگرانیت‌های منطقه متوسط تا ریزدانه و به رنگ خاکستری کم رنگ تا سفید هستند. بافت‌های اصلی متاگرانیت‌ها عبارت از میلونیتی، دانه‌ای، پرتیتی (شکل ۲- پ) و میرمکیتی (شکل ۲- ت) هستند. کانی‌های اصلی متاگرانیت‌های منطقه شامل کوارتز، فلدسپار آلکالن و پلاژیوکلاز (شکل ۳- ث) و کانی‌های فرعی شامل بیوتیت، آمفیبول، اپیدوت (شکل ۲- ج) و گارنت هستند. همچنین زیرکن (شکل ۲- چ)، آلانیت (شکل ۲- ح)، تیتانیت (اسفن)، آپاتیت و مگنتیت به صورت کانی‌های جزئی و محصولات دگرسانی به صورت کلریت، سریسیت، کانی‌های رسی و اکسیدهای آهن در این متاگرانیت‌ها مشاهده می‌شوند. فلدسپارهای آلکالن به صورت ارتوکلاز (دارای ماکل کارلسباد)، میکروکلین (دارای ماکل مشبک) و پرتیت شعله‌ای مشاهده می‌شوند.

۵- بحث

۵-۱. زمین دماسنجی

زمین دماسنجی بر اساس کانی زیرکن در گرانیته‌ها به روش‌های ریخت‌شناسی و درجه اشباع زیرکن امکان پذیر است.

– **زمین دماسنجی توسط ریخت‌شناسی زیرکن:** بلورهای زیرکن متاگرانیت‌های NSMC شفاف تا نیمه شفاف و به رنگ زرد تا کهربایی و در بعضی از موارد بی‌رنگ هستند. با توجه به شکل بلورهای زیرکن‌های موجود در متاگرانیت‌های منطقه و طبقه‌بندی ریخت‌شناسی زیرکن (Pupin 1980)، در زیرکن‌ها سطوح منشوری {۱۰۰} بیشتر از {۱۱۰} و سطوح هرمی {۱۰۱} بیشتر از سطوح هرمی {۱۱۱} وجود دارد. در نمونه M48-2 بیشتر بلورهای زیرکن در نواحی S19 و S15 و تعداد کمتری در نواحی P3 و در نمونه G3-9 اکثر بلورهای زیرکن در نواحی S15، S19، S20 و تعداد کمتری در نواحی P4 و S24 قرار دارند (شکل ۳ و جدول ۱). در نمونه M48-2 میانگین شاخص‌های I.A. و I.T. به ترتیب برابر ۵۵۰/۰ و ۵۹۰/۹ و در نمونه G3-9 میانگین شاخص‌های I.A. و I.T. به ترتیب برابر ۵۶۶/۷ و ۵۷۵/۰ است. برای محاسبه روند تکاملی گونه‌شناختی (T.E.T) (Typological Evolutionary Trend)، از نقطه تقاطع I.A. و I.T. یک خط با شیب ST/SA (standard deviation of index T/standard deviation of index A) رسم شده است.



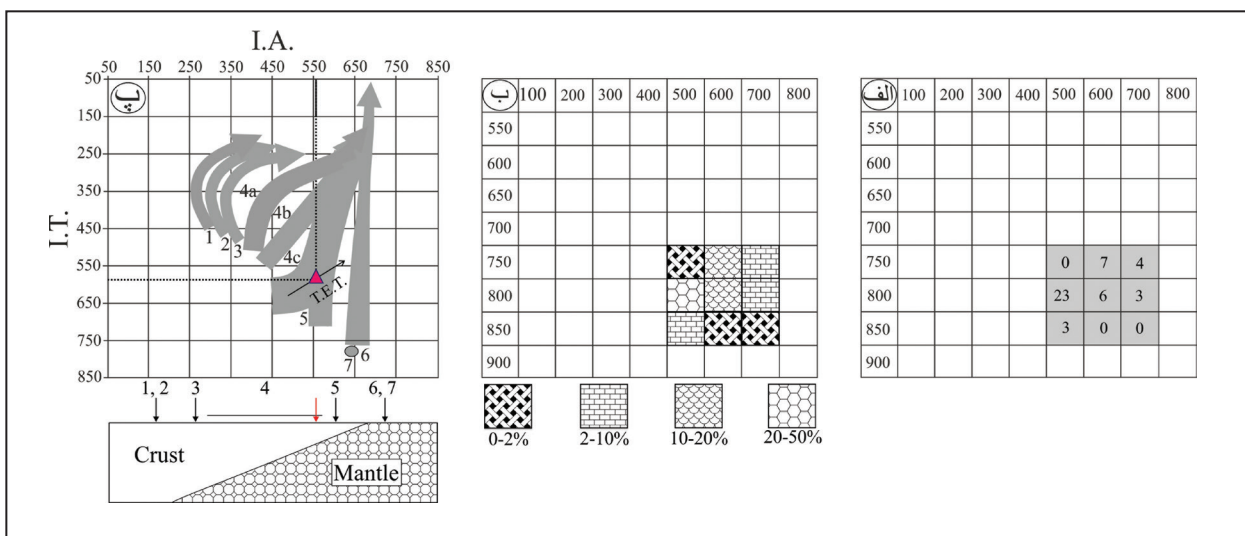
شکل ۳- بلورهای زیرکن در متاگرانیت‌های NSMC: زیرکن‌های الف، ب، پ، ت، ث، ج، ح در رده S19، زیرکن‌های خ، د و ط در رده P3، زیرکن‌های ذ، ظ و ع در رده P4، زیرکن‌های و ز در رده S15، زیرکن‌های ژ، س، ق و ک در رده S20، زیرکن‌های غ و ف در رده S15 و زیرکن گ در رده S24 قرار می‌گیرند.

جدول ۱- خصوصیات مشاهده شده در زیرکن‌های موجود در متاگرانیت‌های NSMC.

نام زیرکن	خصوصیت	منطقه‌بندی	میانبار مذاب	میانبار غیر مذاب	ماکل	شگستگی
الف و ض		+	+		+	+
ب، د، ژ، ش، ص، ظ و ع		+	+			+
پ، ت و ذ		+	+	+	+	+
ث، ج، ح، خ، ز، س، ط، غ، ف، ق، ک و گ		+	+	+		+
ر			+			+

(Pupin, 1980)، در محدوده گرانیتهای کالک آلکانل قرار گرفته و از ماگمایی با منشأ دو رگه (پوسته‌ای و گوشته‌ای) متبلور شده‌اند (شکل ۴- پ).
 - **زمین‌دماسنجی توسط درجه اشباع زیرکن:** غلظت عنصر Zr در مذاب گرانیتهی اغلب به وسیله درجه حلالیت زیرکن کنترل می‌شود. اگر ترکیب مذاب ثابت باشد، حلالیت زیرکن تابعی از دما خواهد بود، اما تمرکز این عنصر تا حدی، به ترکیب حلال وابسته است (Watson and Harrison, 1983). بنابراین غلظت زیرکنیم مذاب و ترکیب کانی‌های زیرکن می‌تواند به عنوان زمین‌دماسنج شیمیایی مستقل برای برآورد دمای ماگما استفاده شود.

مقدار این شیب مساوی با تانژانت زاویه بین محور T.E.T. و محور I.A. است. مقدار T.E.T. در نمونه‌های M48-2 و G3-9 به ترتیب برابر با ۴۷/۰۵ و ۴۵/۴۱ است. دمای تشکیل زیرکن هادر دو نمونه متاگرانیت NSMC براساس ریخت‌شناسی بلورهای زیرکن، در محدوده ۷۵۰ تا ۸۵۰ درجه سانتی‌گراد است (شکل‌های ۴- الف و ب). همچنین عدم وجود زیرکن‌های به ارث رسیده، بیانگر تشکیل ماگمای والد در دمای کمتر از ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد است (Clemens et al., 1986؛ شبانیان بروجنی، ۱۳۸۸). از طرفی فقدان برهم‌رشدی هیدروزیرکن نشانگر یک ماگمای خشک است. بلورهای زیرکن منطقه مورد مطالعه بر اساس طبقه‌بندی ریخت‌شناسی زیرکن



شکل ۴- الف و ب) توزیع فراوانی ریخت‌شناسی زیرکن گرانیتهای NSMC و قرارگیری زیرکن‌های منطقه در محدوده دمای ۷۵۰ تا ۸۵۰ درجه سانتی‌گراد در نمودار (Pupin 1980)؛ نقطه تقاطع در نمودار I.A. در مقابل I.T. و روند تکاملی گونه‌شناختی (T.E.T.) محاسبه شده بر روی نمودار (Pupin 1980). روندها به ترتیب نشان‌دهنده گرانیتهای پوسته‌ای یا عمدتاً دارای منشأ پوسته (گرانیتهای تیپ S آتاکسی غنی از Al شامل: ۱) لوکوگرانیتهای آلومینوس؛ ۲) گرانودیوریت‌ها و مونزوگرانیتهای بیرونی نیمه (برجا؛ ۳) گرانودیوریت‌ها و مونزوگرانیتهای آلومینوس نفوذی، گرانیتهای دارای منشأ پوسته‌ای و گوشته‌ای (گرانیتهای دو رگه) شامل: (Fa,b,c) گرانیتهای سری کالک آلکانل (نواحی تحتانی روندها شامل گرانودیوریت‌ها و مونزوگرانیتهای نواحی فوقانی روندها شامل مونزوگرانیتهای و گرانیتهای آلکانل)؛ ۵) گرانیتهای سری ساب آلکانل (تیپ I، غنی از پتاسیم) و گرانیتهای گوشته‌ای یا عمدتاً دارای منشأ گوشته شامل: ۶) گرانیتهای سری آلکانل (تیپ I)؛ ۷) گرانیتهای سری تولیتی هستند.

دمای تبلور زیرکن می‌تواند به وسیله دو روش محاسبه‌ای و ترسیم (براساس نتایج تجزیه شیمیایی سنگ کل) برآورد شود:

الف) روش محاسبه‌ای: (Watson and Harrison 1983) معادله زیر را بین حلالیت زیرکن، دما و ترکیب ماگما اثبات کردند:

$$\ln D_{Zr/Zircon/melt} = \{-3.80 - [0.85 (M-1)]\} + 12900/T [K]$$

$$T_{Zr} = 12900 / [2.95 + 0.85 M + \ln (496000/Zr_{melt})]$$

در این معادله، $\ln D_{Zr}$ نسبت غلظت زیرکنیم در کانی زیرکن به غلظت زیرکنیم در مذاب است (که توسط تجزیه زمین‌شیمیایی بر حسب

شرایط لازم جهت استفاده از این روش عبارت است از (Janoušek and Saturnin, 2006):

الف) جدایش زیرکن‌ها به گونه‌ای صورت گیرد که هیچ زیرکن موروثی و زینوکریست در نمونه‌های انتخاب شده وجود نداشته باشد.

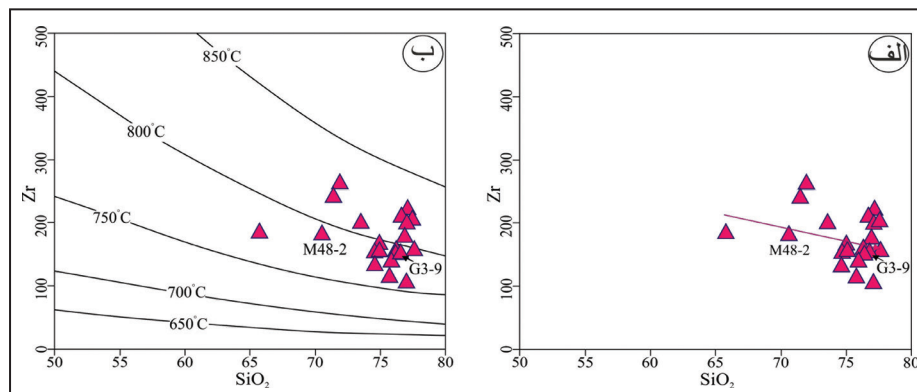
ب) بلورهای زیرکن گرانیتهای مذکور به صورت یکنواخت در کل سنگ توزیع شده باشند.

ج) همبستگی منفی در نمودار دوتایی SiO_2 در مقابل Zr وجود داشته باشد (شکل ۵- الف).

سانتی گراد محاسبه شده است. این نتایج با دمای حاصل از مطالعه ریخت شناسی زیرکن متاگرانیت های منطقه (۷۵۰ تا ۸۵۰ درجه سانتی گراد) همخوانی دارد.

(ب) روش ترسیمی (بر اساس نتایج تجزیه شیمیایی سنگ کل): دمای تبلور زیرکن های ۲۱ نمونه متاگرانیت NSMC بر اساس نمودار SiO_2 در برابر Zr (Watson and Harrison, 1983)، از ۷۶۰ تا ۸۳۰ درجه سانتی گراد محاسبه شده است (شکل ۵-ب). دو نمونه متاگرانیت M48-2 و G3-9 بر اساس روش ترسیمی به ترتیب در دماهای ۷۸۰ و ۷۷۰ درجه سانتی گراد متبلور شده اند (شکل ۵-ب).

ppm مشخص می شود). عدد نشانگر غلظت زیرکنیم برحسب ppm است و T نیز دما را برحسب کلون معرف می کند. همچنین M نسبت کاتیونی است که به حلالیت زیرکن نسبت به SiO_2 و پرآلومین بودن مذاب بستگی دارد و بر اساس فرمول $M = (\text{Na} + \text{K} + 2\text{Ca}) / (\text{Al.Si})$ و $M = (\text{Na} + \text{K} + 2\text{Ca}) / (\text{Al.Si})$ NSMC برابر ۷۷۹/۲ (G3-9) و ۷۸۴/۷ (M48-2) درجه سانتی گراد محاسبه شده است (جدول ۲). همان طور که در جدول ۲ نشان داده شده، دمای تبلور ۲۱ نمونه زیرکن متاگرانیت های NSMC بر اساس معادله مذکور، از ۷۵۳/۲ تا ۸۲۸/۵ درجه



شکل ۵-الف) نمایش همبستگی منفی بین SiO_2 و Zr در متاگرانیت های NSMC؛ ب) نمودار SiO_2 در برابر Zr (Watson and Harrison, 1983)، جهت تعیین دمای تبلور متاگرانیت های NSMC.

جدول ۲- نتایج تجزیه متاگرانیت های NSMC و محاسبه مقدار M، درجه اشباع و دمای اشباع زیرکن در آنها (Badr et al., 2018).

Element	SiO_2	Al_2O_3	CaO	Na_2O	K_2O	Zr	Zr Saturation		
Units	%	%	%	%	%	PPm	M	Zr.sat	TZr.sat. °C
M52-2	۶۵/۷۸	۱۵/۰۷	۱/۵۷	۴/۳۹	۰/۴۹	۱۸۳/۲	۱/۱۳	۸۲/۸	۸۱۸/۸
M-387	۷۶/۶۸	۱۲/۳۲	۰/۴۴	۶/۷۲	۰/۰۰	۲۰۸/۲	۱/۳۵	۱۰۰/۱	۸۱۳/۱
M-104	۷۱/۴۸	۱۴/۰۵	۰/۶۹	۶/۶۰	۰/۱۷	۲۳۸/۷	۱/۳۱	۹۷/۲	۸۲۸/۵
M51-7	۷۷/۱۲	۱۲/۴۶	۰/۵۳	۷/۰۶	۰/۰۰	۲۲۰/۷	۱/۴۱	۱۰۵/۸	۸۱۳/۴
M51-4	۷۶/۹۲	۱۲/۷۵	۰/۵۰	۶/۶۳	۰/۰۲	۱۴۷/۲	۱/۳۱	۹۶/۹	۷۹۹/۹
M7-3	۷۱/۹۳	۱۴/۳۵	۲/۵۰	۶/۱۶	۰/۳۹	۲۶۰/۲	۱/۵۸	۱۲۱/۹	۸۱۵/۴
M53-3	۷۷/۲۰	۱۲/۹۰	۱/۲۱	۵/۷۰	۰/۷۵	۱۰۲/۹	۱/۳۳	۹۸/۶	۷۵۳/۵
M-20-17	۷۶/۴۰	۱۲/۴۶	۰/۵۷	۳/۶۵	۴/۵۵	۱۵۴/۷	۱/۳۳	۹۸/۹	۷۸۷/۷
M21-19D	۷۷/۰۱	۱۲/۱۳	۱/۱۵	۴/۵۱	۲/۵۰	۲۰۰/۴	۱/۳۹	۱۰۳/۶	۸۰۶/۵
M21-12	۷۷/۲۹	۱۲/۲۳	۰/۴۱	۴/۶۵	۳/۱۱	۲۰۵/۸	۱/۳۳	۹۸/۶	۸۱۳/۵
M51-6	۷۳/۵۷	۱۲/۷۴	۱/۲۰	۳/۹۰	۲/۶۶	۱۹۷/۵	۱/۳۰	۹۶/۲	۸۱۱/۹
M48-2	۷۰/۶۲	۱۴/۴۷	۲/۷۵	۴/۰۶	۲/۹۳	۱۷۹/۱	۱/۵۵	۱۱۸/۵	۷۸۴/۷
M21-7A	۷۷/۶۲	۱۲/۴۰	۰/۴۲	۴/۹۰	۲/۹۰	۱۵۲/۹	۱/۳۳	۹۸/۸	۷۸۶/۷
M53-9	۷۴/۷۶	۱۳/۱۵	۱/۳۱	۵/۰۷	۲/۲۱	۱۴۷/۴	۱/۴۲	۱۰۶/۶	۷۷۷/۰
M6-15	۷۵/۹۳	۱۲/۵۴	۱/۰۶	۴/۰۹	۲/۴۱	۱۳۶/۲	۱/۲۵	۹۲/۳	۷۸۲/۶
M53-10	۷۵/۸۰	۱۲/۶۴	۱/۰۳	۳/۶۱	۴/۳۳	۱۱۱/۷	۱/۳۸	۱۰۲/۹	۷۵۶/۷
M22-11	۷۴/۶۶	۱۲/۸۳	۰/۹۱	۳/۷۴	۴/۴۷	۱۳۰/۰	۱/۳۹	۱۰۴/۰	۷۶۸/۴
MPS1-2	۷۵/۳۷	۱۳/۰۲	۰/۶۵	۳/۶۹	۴/۸۶	۱۴۷/۹	۱/۳۵	۱۰۰/۶	۷۸۲/۳
G3-10	۷۶/۲۵	۱۲/۳۸	۰/۵۹	۳/۷۶	۴/۴۵	۱۴۱/۲	۱/۳۶	۱۰۰/۸	۷۷۸/۱
G3-9	۷۶/۴۳	۱۲/۱۵	۰/۶۴	۳/۶۴	۴/۴۶	۱۴۳/۶	۱/۳۶	۱۰۱/۲	۷۷۹/۲
RH5-1	۷۵/۱۳	۱۲/۸۹	۱/۰۴	۳/۷۱	۳/۹۳	۱۶۸/۷	۱/۳۴	۹۹/۲	۷۹۵/۰

۵-۲. سنسنجی

– **شناسایی زیرکن دگرگونی و ماگمایی:** نسبت‌های Th/U کمتر از ۰/۳ در زیرکن نشانگر منشأ دگرگونی (مرتبط با تأثیرات فازهای دگرشکلی شدید) و نسبت‌های Th/U بالای ۰/۳ در محدوده زیرکن‌های ماگمایی هستند (Chen et al., 2007). نسبت Th/U به تنهایی برای تعریف یک زیرکن دگرگونی و ماگمایی کافی نیست. شناسایی زیرکن دگرگونی تا حدی بر اساس ریخت‌شناسی و ساختارهای داخلی (الگوی منطقه‌بندی و تداخل‌ها) است که توسط تصاویر BSE یا کاتدولو مینسانس (CL) مشخص می‌شود. همچنین سایر عوامل همانند نوع عناصر کمیاب (P, Y, Hf) و سن زمین‌شناسی نیز باید در نظر گرفته شوند. به‌طور کلی ویژگی‌های شاخص زیرکن دگرگونی شامل فراوانی نسبتاً کم U، تصاویر BSE نسبتاً تیره، تصاویر CL روشن و عدم وجود منطقه‌بندی نوسانی هستند (Kroner et al., 1987). بر اساس نتایج تجزیه LA-ICPMS، نسبت‌های Th/U در نمونه M48-2 از ۰/۱۵۲ تا ۱/۳۶ (میانگین ۰/۶۰) و در نمونه G3-9 از ۰/۰۲۶ تا ۲/۷۸ (میانگین ۰/۳۸) متغیر است (Badr et al., 2018)، که نشان می‌دهد اکثر زیرکن‌های مورد مطالعه از نوع ماگمایی هستند.

– **سنسنجی به روش U-Pb بر روی زیرکن:** دو نمونه متاگرانیت NSMC (M48-2 و G3-9) برای سنسنجی به روش U-Pb بر روی زیرکن انتخاب شدند. هر دو نمونه دارای زیرکن‌های منشوری کوتاه یا بلند شکل دار تا نیمه‌شکل دار فراوان و همچنین زیرکن‌های شکسته شده یا دارای شکستگی و بعضی اوقات تداخل (میانبار) هستند.

در نمونه M48-2، شکل خارجی زیرکن‌ها توسط تصاویر کیفیت بالای BSE (شکل ۶- الف) تهیه شده از مقاطع صیقلی مطالعه شد. پردازش حاصل از ۱۳ تجزیه (سطح اطمینان ۹۷/۸ درصد) در این نمونه با استفاده از روش Tuff-Zirc، سن $^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$ برابر $[+ ۵/۰۳ - ۵/۷۳]$ ۵۲۳/۹۲ میلیون سال (شکل ۷- الف) و پردازش سن‌های $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ و $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ حاصل از ۱۹ تجزیه به روش Tera-Wasserburg, concordia، سن معادل 10 ± 515 میلیون سال را نشان می‌دهد (Badr et al., 2018). سن حاصل از روش Tuff-Zirc با سن حاصل از روش Tera-Wasserburg, concordia به مقدار زیادی سازگار و همخوان است. بر پایه مقادیر ایزوتوپی U و Pb به دست آمده در نمودار $^{235}\text{U}/^{207}\text{Pb}$ در برابر $^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$ همه تجزیه‌های انجام شده، سن‌های سازگار (concordant) یا نیمه‌سازگار (sub-concordant) را بر روی منحنی کنکوردیا نشان می‌دهند (شکل ۷- ب). این تجزیه‌ها از نظر سن $^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$ نشانگر یک دامنه سنی از ۴۹۸/۸ تا ۵۴۵/۵ میلیون سال هستند (Badr et al., 2018) (شکل ۷- پ). در نمونه M48-2 دو دانه زیرکن (به عنوان مثال نقاط تجزیه ۲۸ و ۳۴) سن‌های $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ برابر $14/3 \pm 624/7$ و $15/5 \pm 697/0$ میلیون سال را نشان می‌دهند (شکل ۷- پ). محل نقطه تجزیه‌های مذکور در مجاورت ترک‌های زیرکن بوده که باعث ورود مقادیر زیادی سرب به زیرکن شده است. همچنین اثرات دگرگونی یا دگرشکلی نیز می‌تواند باعث ایجاد این سن‌های قدیمی باشد. این سن‌های قدیمی تر غیر معمول، در محاسبات میانگین سن (میان یا متوسط) حذف شده اما در محاسبه مد (نما) در نظر گرفته شده‌اند.

در نمونه G3-9 شکل خارجی زیرکن‌ها به‌وسیله تصاویر BSE (شکل ۶- ب) تهیه شده از مقاطع صیقلی، بررسی شد. زیرکن‌های این نمونه علاوه بر منطقه‌بندی طبیعی، منطقه‌بندی معکوس (به عنوان مثال نقاط تجزیه ۲، ۳، ۴، ۵، ۱۱، ۱۹، ۲۰، ۳۲، ۳۳ و ۴۵) (شکل ۷- ب) را نشان می‌دهند که حاشیه‌ها قدیمی‌تر از هسته‌ها و منعکس کننده شرایط عدم تعادل هستند. مثلاً تغییر ناگهانی فشار، دما (توقف جوشش در هنگام آزاد شدن فشار)، شوری و pH (افزایش قلیایی بودن) بین رشد بلورها و سیالات حل شده است (Abdalla et al., 2008). در نمونه G3-9 پردازش

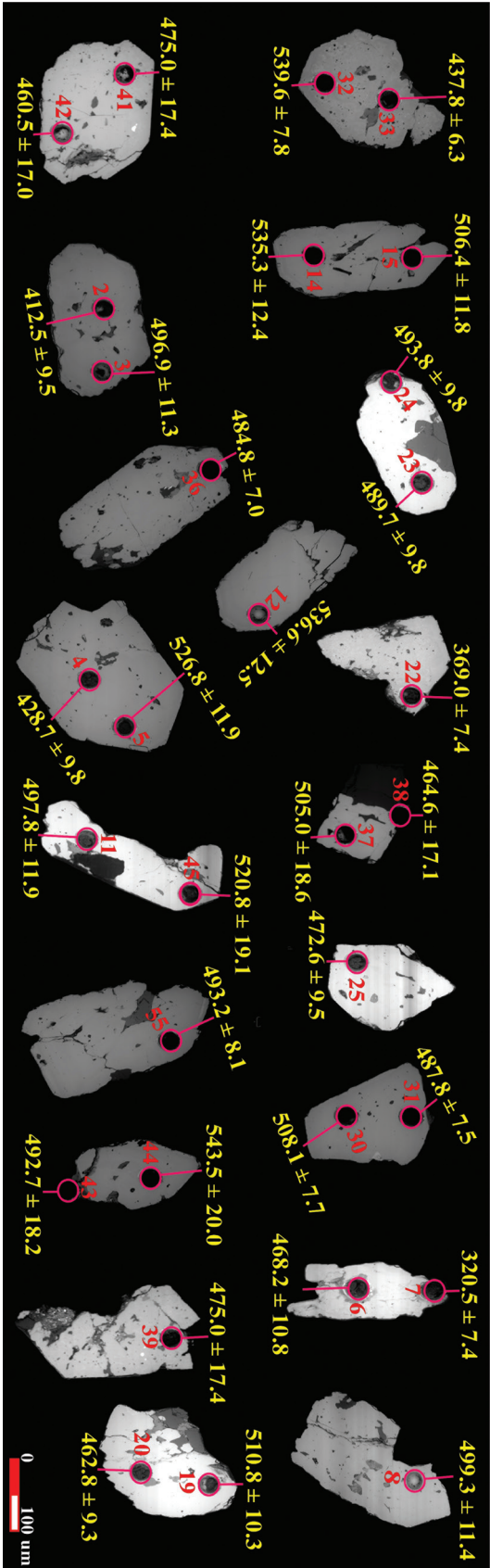
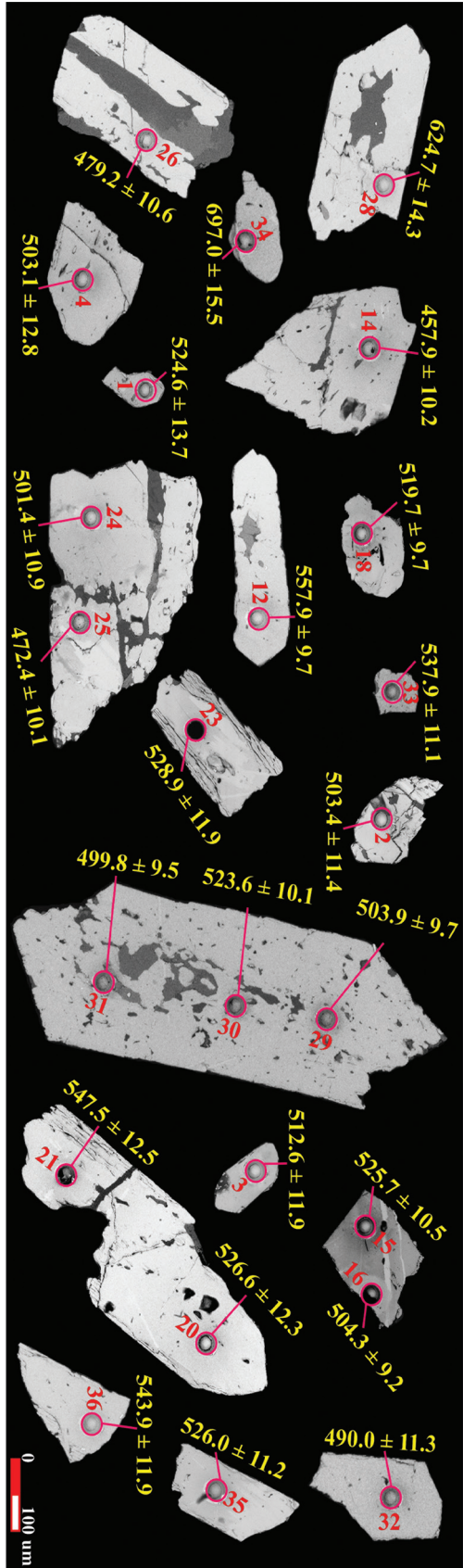
سن $^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$ حاصل از ۱۳ تجزیه (سطح اطمینان ۹۷/۸ درصد)، با استفاده از روش Tuff-Zirc، سن معادل $[+ ۸/۰۷ - ۴/۱۱]$ ۴۶۴/۵۷ میلیون سال را نشان می‌دهد (شکل ۷- ت). همچنین پردازش سن‌های $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ و $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ حاصل از ۲۷ تجزیه به روش Tera-Wasserburg, concordia، نشانگر سن $[۸/۶ \pm ۸/۵]$ ۵۱۳/۵ میلیون سال است (Badr et al., 2018). مقایسه سن حاصل از روش Tuff-Zirc با سن حاصل از روش Tera-Wasserburg, Concordia (Badr et al., 2018)، در این نمونه نشانگر ناسازگاری این دو سن است که نشان می‌دهد یک قسمت از سرب بعد از تبلور زیرکن به علت عواملی همانند دگرگونی، دگرشکلی و میلوئیتی شدن، از دست رفته است.

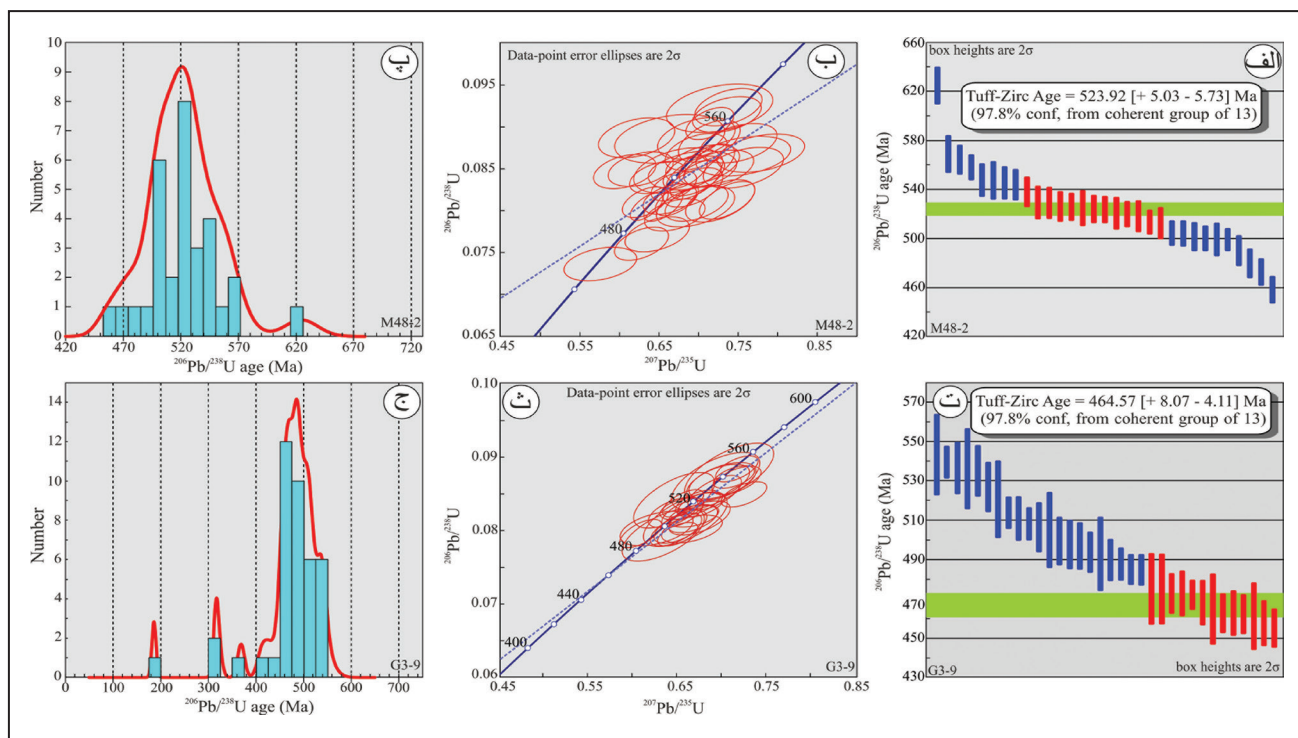
بر اساس مقادیر ایزوتوپی U و Pb به دست آمده در نمودار $^{235}\text{U}/^{207}\text{Pb}$ در برابر $^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$ ، همه تجزیه‌های انجام شده سن سازگار (شکل ۷- ث) و این تجزیه‌ها از نظر سن $^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$ یک دامنه سنی از ۴۹۲/۷ تا ۵۴۶/۱ میلیون سال نشان می‌دهند (Badr et al., 2018) (شکل ۷- ج). علاوه بر این، سن‌های حاصل از ۵ تجزیه (سن‌های $4/40 \pm 186/2$ ، $6/62$ ، $283/1$ ، $4/96$ ، $316/7$ ، $7/4$ ، $320/5$ و $7/4 \pm 369/0$ میلیون سال) به‌صورت مشخص جدا از دیگر سن‌ها قرار می‌گیرند که همان‌طور که ذکر شد، عمدتاً مربوط به تأثیرات دگرگونی بر گرانیتهای منطقه هستند (Badr et al., 2018) (شکل ۷- ج). لازم به ذکر است که منطقه مورد مطالعه دگرگونی‌های شدید رخساره‌های اکلوزیت و آمفیبولیت را پشت سر گذاشته است (Davoudian et al., 2016).

سن‌های به دست آمده برای متاگرانیت‌های NSMC جوان‌تر از سن گرانیتهای اداکاران (نئوپروتروزویک فوقانی) و کامبرین تحتانی پهنا سنندج- سیرجان است. برای مثال متاگرانیت ازنا- درود (Shabanian et al., 2018)، میلوئیت گرانیتهای قلعه دژ ازنا (Shakerardakani et al., 2015)، لوکوگرانیت و گرانیتهای بیوتیت‌دار موده و میلوئیت گرانیتهای بیوتیت‌دار ورزنه گلپایگان (Hassanzadeh et al., 2008)، سینوگرانیت سورسات تکاب (Jamshidi Badr et al., 2013)، گرانیتهای بیوتیت‌دار بوبکتان (Hassanzadeh et al., 2008) و گرانودیوریت شیخ چوپان (Hassanzadeh et al., 2008) (شکل ۱- الف) دارای سن‌های قدیمی‌تر هستند. موقعیت تشکیل اغلب گرانیتهای اداکاران تا کامبرین تحتانی در پهنا سنندج- سیرجان به قوس آتشفشانی (Ahadnejad, 2013) نسبت داده شده است، در حالی که شواهد زمین‌شیمیایی نشان می‌دهد که متاگرانیت‌های NSMC در موقعیت بعد از برخورد (Badr et al., 2018) تشکیل شده‌اند. این شواهد به خوبی می‌تواند اختلاف سن مذکور را توجیه کند.

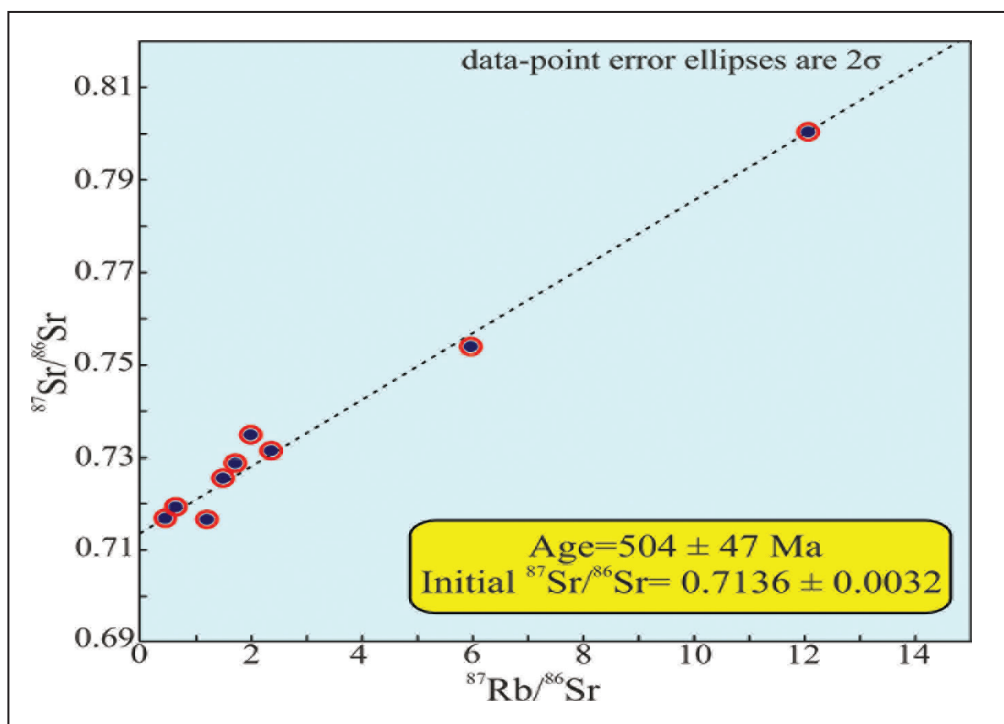
– **سنسنجی به روش Rb-Sr بر روی سنگ کل:** با در دست داشتن مقادیر Rb، Sr و $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ حاصل از تجزیه و مقادیر $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ و $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (i) محاسبه شده حاصل از ۱۱ نمونه معرف متاگرانیت‌های NSMC (Badr et al., 2018)، ابتدا در دستگاه مختصات، $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ بر روی محور (x) و $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ را بر روی محور (y) ترسیم و سپس از بین نقاط ترسیم شده، بهترین خط راست عبور داده می‌شود. اغلب نقاط کم و بیش بر روی خط همزمانی به دست آمده (ایزوکرون) قرار دارند. محل تلاقی ایزوکرون با محور (y)، مقدار نسبت $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ را نشان می‌دهد (شکل ۸). شیب ایزوکرون برابر با m و یا به عبارت دیگر $t-1$ است و بنابراین با محاسبه رابطه $t-1$ ، مقدار t برابر 47 ± 504 میلیون سال (کامبرین میانی) به دست می‌آید. نسبت Rb/Sr سنگ‌های مورد مطالعه بیشتر از ۰/۳ است، بنابراین سن به دست آمده بر اساس روش Rb-Sr می‌تواند تا حدودی قابل قبول باشد. از طرفی سن حاصل از روش Rb-Sr با سن حاصل از روش U-Pb (10 ± 515 میلیون سال) (Badr et al., 2018) اختلاف کمی دارد.

شکل ۶- تصاویر BSE زیر میکروسکوپ تجزیه شده نقاط تجزیه شده به همراه سن‌های به دست آمده نیز نشان داده شده است.





شکل ۷- الف و ت) نمودارهای میانگین وزنی برای سن‌های به‌دست‌آمده نمونه‌های M48-2 و G3-9؛ ب و ت) نمودارهای کنکوردیا $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ در مقابل $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ نمونه‌های M48-2 و G3-9؛ پ و ج) نمودارهای ستونی برای سن‌های $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ نمونه‌های M48-2 و G3-9.



شکل ۸- موقعیت نمونه‌های منطقه در نمودار $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ در مقابل $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$.

۶- نتیجه‌گیری

منشأ دو رگه (پوسته‌ای و گوشته‌ای) دارد. دمای تبلور متاگرانیت‌ها بر اساس مطالعات ریخت‌شناسی زیرکن برابر ۷۵۰ تا ۸۵۰ درجه سانتی‌گراد، بر طبق روش محاسبه‌ای اشباع زیرکن برابر ۷۵۳/۲ تا ۸۲۸/۵ درجه سانتی‌گراد و بر اساس روش ترسیم (نتایج تجزیه شیمیایی سنگ کل) برابر ۷۶۰ تا ۸۳۰ درجه سانتی‌گراد محاسبه شده است. دمای تبلور متاگرانیت‌ها حاصل از مطالعات ریخت‌شناسی زیرکن، روش محاسبه‌ای اشباع زیرکن و روش ترسیم (نتایج تجزیه شیمیایی سنگ کل) همپوشانی دارند.

سپاسگزاری

نویسندگان مقاله از حمایت دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین دانشگاه شهرکرد در به ثمر رساندن این پژوهش قدردانی می‌کنند.

تعیین سن‌های U-Pb بر روی زیرکن نشان داده که متاگرانیت‌های NSMC در کامبرین میانی و متاگرانیت‌های NSMC در موقعیت بعد از برخورد تشکیل شده‌اند. در حالی که اکثر گرانیتوئیدها و معادل‌های دگرگونی آنها دارای سن نئوپروتروزویک فوقانی- کامبرین تحتانی در پهنه سندج- سیرجان، در موقعیت مرتبط با قوس آتشفشانی تشکیل شده‌اند.

با توجه به ریخت‌شناسی و شکل بلورهای زیرکن موجود در متاگرانیت‌های NSMC، بیشتر بلورهای زیرکن در نواحی S15، S19 و S20 و تعداد کمتری در نواحی P3، P4 و S24 طبقه‌بندی ریخت‌شناسی زیرکن (Pupin, 1980) قرار دارند. بر اساس مطالعات ریخت‌شناسی، سطوح منشوری {۱۰۰} بیشتر از {۱۱۰} و سطوح هرمی {۱۰۱} بیشتر از سطوح هرمی {۲۱۱} است. بنابراین ماگمای گرانیتی منطقه

کتابنگاری

- حسینی، ب. و احمدی، ا. ر.، ۱۳۹۲- رده‌بندی و تعیین سن توده گرانیتوئیدی شمال سامان، اولین همایش زمین‌شیمی کاربردی ایران. دانشگاه دامغان، ص. ۱۱۱۴ تا ۱۱۱۹.
- حسینی، ب. و احمدی، ا. ر.، ۱۳۹۵- ژئوشیمی و سن‌سنجی اورانیم- سرب سنگ‌های گرانیتوئیدی شمال سامان. فصلنامه علوم زمین، شماره ۱۰۰، ص. ۱۰۹ تا ۱۲۰.
- داودیان دهکردی، ع.، ۱۳۸۹- شیمی کانی‌ها و شرایط فشار- دمای تبلور توده‌های گرانیتوئیدی حاشیه رودخانه زاینده‌رود، پهنه برشی شمال شهرکرد با نگرشی ویژه به حضور اپیدوت ماگمایی. مجله بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران، شماره ۳، ص. ۴۹۷ تا ۵۱۲.
- داودیان دهکردی، ع.، سبزه‌بی، م.، کورنگ، م. و شبانیان، ن.، ۱۳۷۹- بررسی عملکرد دگرگونی دینامیک و تأثیر توده‌های گرانیتی بر سیستم‌های پیرامون دریاچه زاینده‌رود. چهارمین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران، انجمن زمین‌شناسی ایران، دانشگاه تبریز.
- داودیان دهکردی، ع.، نقره‌نیان، م. و شبانیان، ن.، ۱۳۸۱- نگرشی بر توده‌های نفوذی گرانیتوئیدی در شمال باختر شهرکرد. ششمین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران، انجمن زمین‌شناسی ایران، دانشگاه باهنر کرمان.
- زاهدی، م.، واعظی پور، ج. و رحمتی ایلخچی، م.، ۱۳۷۱- نقشه زمین‌شناسی چهارگوش شهرکرد، مقیاس ۱/۲۵۰۰۰۰، انتشارات سازمان زمین‌شناسی کشور.
- شبانیان بروجنی، ن.، ۱۳۸۸- سنگ‌شناسی و محیط زمین‌ساختی توده‌های گرانیتوئیدی منطقه ازنا (پهنه سندج- سیرجان، ایران). پایان‌نامه دکتری، دانشکده علوم، دانشگاه اصفهان، ۱۸۵ ص.
- قاسمی، آ.، حاج‌حسینی، آ. و حسینی، م.، ۱۳۸۵- نقشه زمین‌شناسی چادگان، مقیاس ۱/۱۰۰۰۰۰. سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.

References

- Abdalla, H. M., Helba, H. and Matsueda, H., 2008- Chemistry of zircon in rare metal granitoids and associated rocks. eastern desert, Egypt. Resource Geology 59(1), p. 51- 68.
- Ahadnejad, V., 2013- Comparative review of the Northern Sanandaj-Sirjan Zone granitoids. Journal of Tethys 1(2), p. 128- 137.
- Badr, A., Davoudian, A. R., Shabanian, N., Azizi, H., Asahara, Y., Neubauer, N., 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 300-301, p. 86- 104.
- Berezhnaya, N. G., 1999- Criteria for the genetic typification of zircon from metamagmatic associations of the Aldan Shield. In Doklady Earth Sciences 368, p. 982- 984. Springer.
- Chen, R. X., Zheng, Y. F., Zhao, Z. F., Tang, J., Wu, F. Y. and Liu, X. M., 2007- Zircon U-Pb age and Hf isotope evidence for contrasting origin of bimodal protoliths for ultrahigh-pressure metamorphic rocks from the Chinese Continental Scientific Drilling Project. Journal of Metamorphic Geology 25, p. 873- 894.
- Clemens, J. D., Holloway, J. R. and Whiten, A. J. R., 1986- Origin of an A-type granite: Experimental constraints. American Mineralogist 71, p. 314-317.
- Corfu, F., Hanchar, J. M., Hoskin, P. W. and Kinny, P., 2003- Atlas of zircon textures. Reviews in mineralogy and geochemistry 53(1), p. 469- 500.
- Davoudian, A. R., Genser, J., Dachs, E. and Shabanian, N., 2008- Petrology of eclogites from north of Shahrekord, Sanandaj-Sirjan Zone, Iran. Mineralogy and Petrology 92, p. 393- 413.

- Davoudian, A. R., 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, p. 216- 240.
- Hassanzadeh, J., Stockli, D. F., Horton, B. K., Axen, G. J., Stockli, L. D., Grove, M., Schmitt, A. K. and Walker, J. D., 2008- U-Pb zircon geochronology of late Neoproterozoic-Early Cambrian granitoids in Iran: implications for paleogeography, magmatism and exhumation history of Iranian basement. *Tectonophysics* 451, p. 71- 96.
- Jamshidi Badr, M., Collins, A. S., Masoudi, F., Cox, G. and Mohajjel, M., 2013- The U-Pb age, geochemistry and tectonic significance of granitoids in the Soursat Complex, Northwest Iran. *Turkish Journal of Earth Sciences* 21, p. 10- 37.
- Janoušek, V. and Saturnin, R., 2006- Language script for application of accessory-mineral saturation models in igneous geochemistry. *Geological Carpathica* 57, p. 131- 142.
- Krasnobaev, A. A., 1986- Zircon as an indicator of geological processes. Moscow Izdatel Nauka p. 146.
- Kroner, A., Williams, I. S., Compston, W., Baur, N., Vitanage, P. W. and Perera, L. R. K., 1987- Zircon ion microprobe dating of high grade rocks in Sri Lanka. *Journal of Geology* 95, p. 775- 791.
- Ludwig, K. R., 2012- ISOPLOT/Ex, version 4.15. A Geochronological toolkit for microsoft excel. Berkeley Geochronological Center Special, Publication, No.4.
- Malek-Mahmoudi, F., Davoudian, A. R., 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, p. 56- 72.
- Pupin, J. P. and Turco, G., 1974- Application a quelques roches endogenes du massif franco-italien de l'Argentera-Mercantour, une typologie originale du zircon accessorie Etude comparative avec la methode des RMA. *Bulletin de la Société Française de Mineralogie et de Cristallographie* 97, p. 59- 69.
- Pupin, J. P., 1980- Zircon and granite petrology. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 73(3), p. 207-220.
- Shabanian, N., Davoudian, A. R., Dong, Y. and Liu, X., 2018- U-Pb zircon dating, geochemistry and Sr-Nd-Pb isotopic ratios from Azna-Dorud Cadomian metagranites, Sanandaj-Sirjan Zone of western Iran. *Precambrian Research* 306, p. 41- 60.
- Shakerardakani, F., Neubauer F., Masoudi, F., Mehrabi, B., Liu, X., Dong, Y., Mohajjel, M., Monfaredi, B. and Friedl, G., 2015- Panafrikan basement and Mesozoic gabbro in the Zagros orogenic belt in the Dorud-Azna region (NW Iran): Laser-ablation ICP-MS zircon ages and geochemistry. *Tectonophysics* 647-648, p. 146- 171.
- Wang, X. and Kienast, J. R., 1999- Morphology and geochemistry of zircon: a case study on zircon from the microgranitoid enclaves. *Science in China Series D: Earth Sciences* 42(5), p. 544- 552.
- Wang, X., 1998- Quantitative description of zircon morphology and its dynamics analysis. *Science in China Series D: Earth Sciences* 41(4), p. 422- 428.
- Watson, E. B. and Harrison, T. M., 1983- Zircon saturation revisited: Temperature and composition effects in a variety of crustal magma types. *Earth and Planetary Science Letters* 64, p. 295- 304.
- Whitney, D. L. and Evans, B. W., 2010- Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist* 95, p. 185- 187.

Age dating and thermometry of the zircon crystallization of the metagranites from the North Shahrekord metamorphic complex

A. Badr¹, N. Shabani^{2*}, A. R. Davoudian³ and H. Azizi⁴

¹Ph.D. Student, Faculty of Natural Resources and Earth Sciences, Shahrekord University, Shahrekord, Iran

²Associate Professor, Faculty of Natural Resources and Earth Sciences, Shahrekord University, Shahrekord, Iran

³Professor, Faculty of Natural Resources and Earth Sciences, Shahrekord University, Shahrekord, Iran

⁴Professor, Department of Mining, Faculty of Engineering, Kurdistan University, Sanandaj, Iran

Received: 2018 January 17

Accepted: 2018 April 29

Abstract

The North Shahrekord Metamorphic Complex (NSMC) in the center of Sanandaj-Sirjan Zone includes metagranite bodies, which has been intruded in some metamorphic rocks, especially schists. The NSMC metagranites display metamorphic and distinctive ductile deformation characteristics. These rocks are composed of quartz, alkali feldspar, plagioclase, biotite, amphibole, epidote, garnet, zircon, allanite, titanite, apatite and magnetite. Ages of the NSMC metagranites by zircon U-Pb shows the age of 523.92 [+ 5.03 – 5.73] Ma, and the whole rock Rb-Sr isotopes represents the age of 504 ± 47. The ages of NSMC metagranites (middle Cambrian) are younger than the Late Neoproterozoic - Lower Cambrian granitoids of the Sanandaj-Sirjan Zone, the NSMC metagranites are formed in the post-collisional setting, while the older granitoids are mostly related to volcanic arc. According to the morphology and shape of zircon crystals in NSMC metagranites, most of zircons are placed on S19 and S15 areas in morphology classification of zircon crystals, therefore, the granite magma of the area has hybrid (crust and mantle) origin. The crystallization temperature of metagranites, according to zircon morphology studies, is 750 to 850 °C, based on Zircon saturation calculation method, is 753.2 to 828.5 °C, and based on the graphical method (results of total rock chemical analyses), is 760 to 830 °C.

Keywords: Sanandaj-Sirjan Zone, Metagranite, Cadomain, Zircon morphology, Zircon U-Pb dating.

For Persian Version see pages 109 to 118

*Corresponding author: N. Shabani; E-mail: shabani.nahid@nres.sku.ac.ir