

بازسازی تکتونیک قدیمه ماسه‌سنگ‌های تریاس گروه نخلک در ایران مرکزی با استفاده از سن‌سنجی U-Pb زیرکن

سیده حلیمه هاشمی عزیزی^(۱) و پیمان رضائی^(۲)

۱. دانش‌آموخته دکتری، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه بوعلی سینا

۲. دانشیار، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه هرمزگان

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۱۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۲/۱۲

چکیده

گروه نخلک به سن تریاس در ایران مرکزی یک توالی رسوبی بسیار مهم در درک بهتر بسته شدن پالئوتتیس و کوهزایی ائوسیمیرین در خاور میانه است. گروه نخلک متشکل از سه سازند الم، باقرووق و اشین است، که بیشتر از ماسه‌سنگ‌های آذرآواری، کنگلومرای سیلیسی آواری مخلوط و کربنات‌های دریایی تشکیل شده است. در اینجا نگاهی داریم بر سن‌سنجی U-Pb زیرکن‌های آواری گروه نخلک تا خاستگاه آن را مشخص کرده و موقعیت تکتونیک قدیمه آن را در قلمرو پالئوتتیس بازسازی کنیم. غالب زیرکن‌های آواری گروه نخلک شکل‌دار و نیمه‌شکل‌دار بوده و سن پرمین-تریاس (حدود ۲۴۰-۲۸۰ میلیون سال) را نشان می‌دهند، که شاهدهی است بر تأمین رسوب از سنگ‌های آتش‌فشانی پرمین-تریاس کمان جاده ابریشم. تعداد کمتری از زیرکن‌ها سنین پالئوزوئیک پیش از پرمین را با پیک‌هایی در ۳۲۰ و ۴۸۰ میلیون سال نشان می‌دهند، که می‌تواند از پی‌سنجی که کمان ماگمایی بر روی آن تشکیل شده است استخراج شده باشد. دانه‌های زیرکن با سن نئوپروتروزوئیک-مزوپروتروزوئیک پسین (حدود ۵۵۰-۱۱۰۰ میلیون سال) و پالئوپروتروزوئیک (حدود ۱۸۰۰-۲۲۰۰ میلیون سال) بی‌شکل یا گردشده هستند. زیرکن‌های پالئوپروتروزوئیک در بخش بالایی سازند باقرووق (لادینین میانی) فراوان هستند که شاهدهی است بر چرخه مجدد سنگ‌های رسوبی قدیمی‌تر. سنگ‌شناسی ماسه‌سنگ‌های این سازند حاکی از یک خاستگاه اضافی از جنس دگرگونی است. این تغییر کوتاه مدت در خاستگاه می‌تواند با بالاآمدگی تکتونیک در ناحیه منشأ که منجر به فرسایش سنگ‌های دگرگونی با ماهیت شمال‌گندوانایی شده است توجیه شود. می‌توان نتیجه گرفت که قطعات قاره‌ای جدا شده از شمال گندوانا با منشأ احتمالی بلوک سیمیرین، قبل از تریاس پسین به حاشیه جنوبی اوراسیا رسیده‌اند.

واژه‌های کلیدی: ایران مرکزی، پالئوتتیس، تریاس، سن‌سنجی U-Pb زیرکن، گروه نخلک.

مقدمه

در درک بسته شدن اقیانوس پالئوتتیس و رسیدن بلوک سیمیرین به حاشیه جنوبی اوراسیا و برخورد با آن است. این توالی رسوبی بیشتر سیلیسی آواری متفاوت از لایه‌های هم‌سن خود در نواحی اطراف است که اغلب از جنس

این مقاله بر روی سن‌سنجی U-Pb زیرکن‌های آواری گروه نخلک متمرکز است. گروه نخلک به سن تریاس در ایران مرکزی قرار دارد (شکل ۱-الف) که منطقه‌ای کلیدی

* نویسنده مرتبط: s.hashemiazizi@basu.ac.ir

چینه‌شناسی گروه نخلک

توالی رسوبی گروه نخلک با ضخامت تقریبی ۲۷۰۰ متر به شکل کوهی با روند شمال غربی-جنوب شرقی در غرب معدن نخلک رخنمون دارد (شکل ۱-ب). توالی کربناته کرتاسه بالایی به ضخامت حدود ۲۶۰ متر به صورت ناپیوسته بر روی گروه نخلک قرار دارد (Vaziri et al., 2005; 2012). گروه نخلک متشکل از ماسه‌سنگ‌های آذرآواری، کنگلومرای سیلیسی‌آواری مخلوط و کربنات‌های دریایی است که از قاعده به رأس به سه سازند (Davoudzadeh and Seyed-Emami, 1972) الم (اولنکین تا آنیزین میانی)، باقروق (آنیزین بالایی تا لادینین میانی) و اشین (لادینین بالایی تا کارنین) تقسیم شده است. گروه نخلک به صورت تکتونیک بر روی سنگ‌های دگرگونی مافیک و اولترامافیک پیش از تریاس قرار دارد.

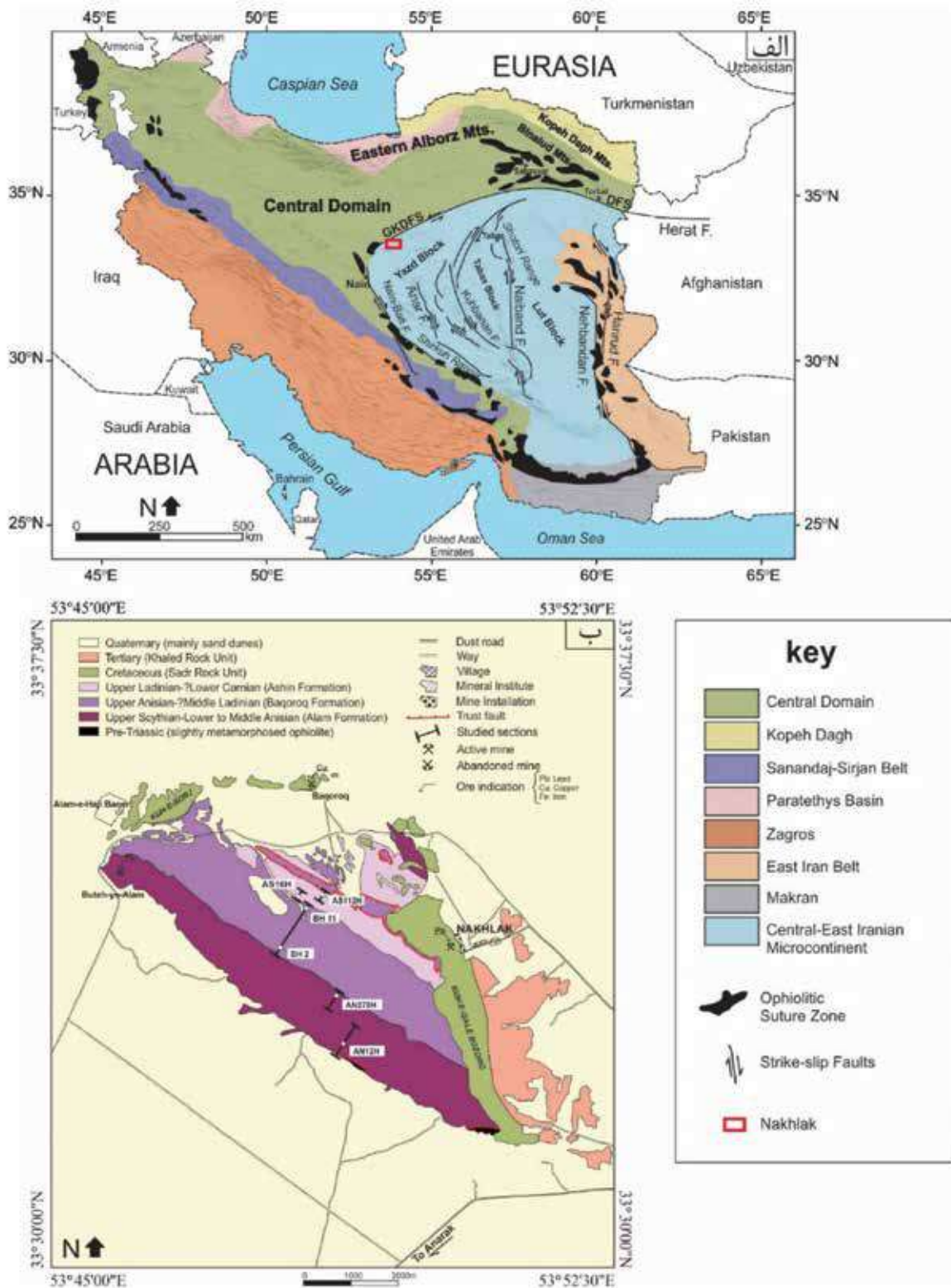
سازند الم با ۱۰۶۰ متر ضخامت، یک توالی مختلط آواری و کربناته (شکل ۲) تشکیل شده از لایه‌های ماسه‌سنگ آذرآواری، کمی لایه‌های کنگلومرای، لایه‌های آهکی توده‌ای و سنگ‌آهک پرفسیل است، که در یک محیط دریایی کم عمق آشفته رسوب‌گذاری شده است. بررسی سنگ‌شناسی مقاطع نازک میکروسکوپی (آنالیز مدال با روش نقطه شماری) نشان داده است که اغلب ماسه‌سنگ‌های سازند الم حاوی خرده‌سنگ‌های آتش‌فشانی و تک‌بلورهای کوارتز آتش‌فشانی و فلدسپارها هستند (Hashemi Azizi et al., 2018a).

سازند باقروق با قاعده فرسایشی بر روی سازند الم قرار گرفته است (شکل ۲). گرچه این سازند بدون هرگونه محتوای زیستی است، اما سن آنیزین پسین-لادینین میانی بر اساس قرارگیری چینه‌شناسی آن در بین دو سازند الم و اشین به آن نسبت داده شده است (Davoudzadeh and Seyed-Emami, 1972; Vaziri and Fürsich, 2007). سازند باقروق با ضخامت ۱۲۹۴ متر با یک لایه کنگلومرای محتوی پبل‌هایی از جنس گرینستون اوئیدی با منشأ احتمالی از سازند الم آغاز می‌شود، و به توالی از جنس کنگلومرای دانه‌پشتیبان توده‌ای قرمز رنگ و ماسه‌سنگ درشت‌دانه ادامه می‌یابد (شکل ۲). در بخش میانی این سازند رو به بالا توالی‌های ریزشونده کنگلومرا، ماسه‌سنگ و شیل به

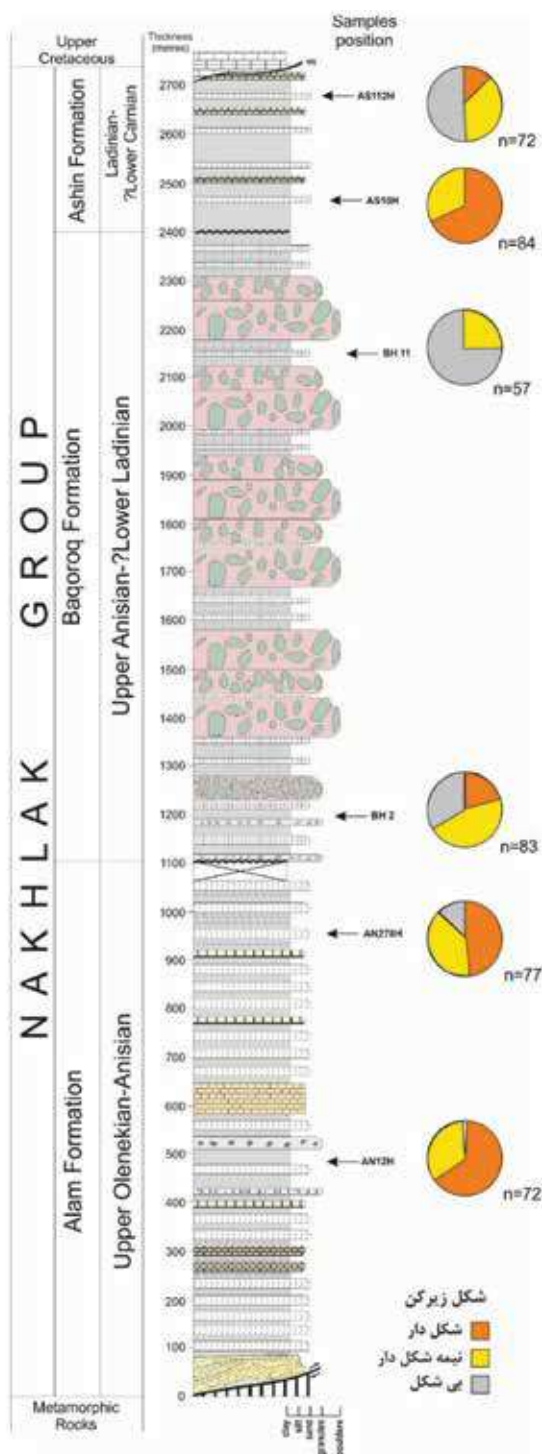
رخساره‌های کربناته پلتفرمی هستند (Alavi et al., 1997; Seyed-Emami, 2003) و با گروه آق‌دربند به سن تریاس واقع در شمال شرق ایران، شرق کپه‌داغ که ماهیت اوراسیایی دارد مشابهت‌هایی را نشان می‌دهد (برای مثال: Davoudzadeh et al., 1981; Baud et al., 1991; Alavi et al., 1997). البته گروه نخلک در یک حوضه پیش‌کمانی نهشته شده است (برای مثال Alavi et al., 1997)، درحالی‌که گروه آق‌دربند در یک حوضه پشت‌کمانی رسوب‌گذاری شده است (برای مثال Baud et al., 1991; Balini et al., 2019).

به دلیل نبود داده‌های قابل اعتماد و کافی (به عنوان مثال داده‌های مربوط به خاستگاه) برای بررسی مدل‌های مختلف تکتونیک قدیمه ایران مرکزی، تحولات تکتونیک قدیمه این پهنه مهم از جمله گروه نخلک، سال‌ها بدون قطعیت باقی‌ماند. بالینی و همکاران (Balini et al., 2009) و زانچی و همکاران (Zanchi et al., 2009a) اطلاعاتی را در باب سنگ‌شناسی گروه نخلک ارائه دادند تا از طریق آن خاستگاه این رسوبات آواری را مورد بحث قرار دهند. هاشمی عزیزی و همکاران (Hashemi Azizi et al., 2018a, b) داده‌های سنگ‌شناسی جدیدی را به همراه ژئوشیمی سنگ کل و شیمی کانی ارائه دادند. تمامی این پژوهش‌ها کمان ماگمایی را به‌عنوان منشأ پیشنهاد می‌کنند؛ گرچه بخش میانی گروه نخلک، یعنی سازند باقروق تأمین رسوب از منشأ سنگ‌های دگرگونی پوسته بالایی را نشان می‌دهد.

سن سنجی U-Pb زیرکن به‌عنوان ابزاری در تحلیل خاستگاه رسوبی برای شناسایی نواحی منشأ، مسیرهای حمل و نقل رسوب و سن پیشینه رسوبات توالی‌های رسوبی آواری به‌طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد (برای مثال: Horton et al., 2008; Meinhold et al., 2011; Moghadam et al., 2017). مینهلد و همکاران (Meinhold et al., 2020) برای اولین بار سن U-Pb زیرکن‌های آواری گروه نخلک را برای مطالعه خاستگاه ماسه‌سنگ‌های گروه نخلک گزارش دادند. در اینجا نگاه دوباره‌ای داریم به خاستگاه توالی سیلیسی‌آواری گروه نخلک همراه با منشأ و جایگاه قدیمه آن بر اساس سن سنجی زیرکن آواری.



شکل ۱. الف) نقشه ساده شده ایران همراه با تقسیم‌بندی‌های اصلی ساختاری (با تغییراتی پس از Zanchi et al., 2009a; Buchs et al., 2013)، گستره مورد مطالعه با یک مستطیل قرمز رنگ نشان داده شده است، ب) نقشه زمین‌شناسی کوه نخلک (با تغییراتی پس از Vaziri, 2012) نشان‌دهنده گستره مورد مطالعه، برش‌های مورد مطالعه از سازندهای الم، باقروق و اشین از گروه نخلک با خطوط سیاه نشان داده شده‌اند، محل نمونه‌هایی که برای تعیین سن U-Pb زیرکن مورد استفاده قرار گرفتند با دایره‌های سفید رنگ نشان داده شده‌اند



شکل ۲. ستون سنگ‌شناسی گروه نخلک نشان‌دهنده جایگاه چینه‌شناسی نمونه‌های ماسه‌سنگ مورد استفاده در تعیین سن U-Pb زیرکن، نمودارهای کیکی آنالیز کمی شکل دانه‌های زیرکن را نشان می‌دهد، (شکل دار: لبه‌ها و گوشه‌های کامل؛ نیمه‌شکل دار: کمی گردشده؛ بی‌شکل: گردشده)

خوبی توسعه یافته‌اند. سنگ‌شناسی و ساختمان‌های رسوبی (مانند ایمبریکاسیون و طبقه‌بندی مورب تراف) این سازند حاکی از محیط رسوبی رودخانه‌ای با بستر گراولی است. سازند باقروق به‌طور کلی قابل تقسیم به دو بخش پایینی و بالایی است. چنین تقسیم‌بندی توسط علوی و همکاران (Alavi et al., 1997) نیز شناسایی شده است. بخش پایینی آن متشکل از رسوبات چرخه اول، مواد آتشفشانی و مقداری رسوبات چرخه دوباره از پی‌سنگ دگرگونی است (Hashemi Azizi et al., 2018a). در بخش بالایی این سازند محتوای رسوبی و آتشفشانی کاهش یافته و مواد آواری دگرگونی غالب می‌شوند (Zanchi et al., 2009a; Hashemi Azizi et al., 2018a).

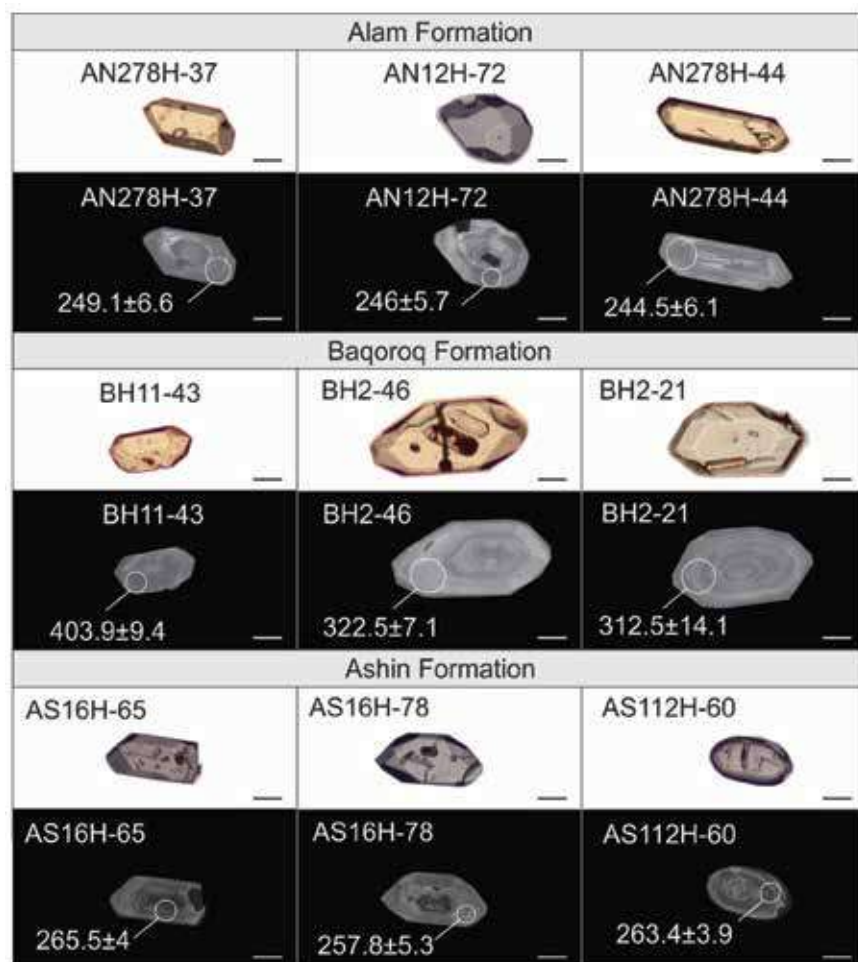
سازند اشین به ضخامت ۳۶۴ متر با ناپیوستگی موازی بر روی سازند باقروق قرار گرفته است. این سازند بیشتر دارای لایه‌های شیلی همراه با میان‌لایه‌های نازک ماسه‌سنگی، سیلتستون آهکی و سنگ‌آهک پرفسیل است (شکل ۲). بخش بالایی این سازند در برش مورد مطالعه به‌صورت تکتونیک قطع شده است. لایه‌های سنگ‌آهک و شیل پرفسیل بوده و به‌طور مثال حاوی بقایای آمونیت‌ها، دوکفه‌ای‌ها و لاله‌وش‌ها هستند. ساختمان‌های رسوبی مانند توالی بوما و اترفسیل‌های نرایتس نشان می‌دهند که سازند اشین توسط جریان‌های آشفته دور از منشأ نهشته شده‌اند (Hashemi Azizi et al., 2018a). مطالعه سنگ‌شناسی مقاطع نازک میکروسکوپی سازند اشین نشان داده است که ماسه‌سنگ‌های آن بیشتر حاوی فلدسپارهای پتاسیم‌دار و قطعات آتشفشانی همراه با مقداری خرده‌های فسیلی هستند (Hashemi Azizi et al., 2018a).

روش مطالعه

تعداد شش نمونه از لایه‌های ماسه‌سنگی ریز تا متوسط‌دانه در برش‌های مورد مطالعه برداشت شدند. محل برداشت نمونه‌ها در شکل‌های ۱ و ۲ نشان داده شده است. آماده‌سازی نمونه‌ها در آزمایشگاه‌های مرکز علوم زمین دانشگاه گوتینگن آلمان انجام شد. پس از خرد کردن و عبور نمونه‌ها از الک خشک، رسوبات در اندازه ۶۳-۱۲۵

تهیه شد، برای این کار از میکروسکوپ پلاریزان مدل Zeiss Axioplan 2 مجهز به سیستم دوربین عکاسی استفاده شد. دانه‌های زیرکن به سه دسته تقسیم شدند: شکل دار^۱ (لبه‌ها و گوشه‌های کامل)، نیمه‌شکل دار^۲ (کمی گردشده) و بی‌شکل^۳ (گردشده) (شکل ۲). تصاویر کاندولومینسانس زیرکن‌ها توسط یک دستگاه میکروآنالیز الکترون پروب (EPMA) مدل JEOL JXA 8900 RL مجهز به شناساگر CL (گروه ژئوشیمی، مرکز علوم زمین، دانشگاه گوتینگن) تهیه شد تا منطقه‌بندی رشدی زیرکن‌ها مشخص شده و نقاط مناسب برای انجام آنالیز انتخاب شوند (شکل ۳).

میکرومتر جمع‌آوری شدند و برای زدودن ترکیبات کربناته احتمالی موجود در آنها در محلول اسید استیک ۵٪ سرد قرار داده شدند. در مرحله بعد کانی‌های سنگین موجود در نمونه‌ها با استفاده از محلول پلی‌تنگستات سدیم با چگالی ۲/۸۵ g/ml جداسازی شدند. در مجموع تعداد ۱۶۳، ۱۴۸ و ۱۶۷ دانه زیرکن با استفاده از میکروسکوپ باینوکولار از مجموعه کانی‌های سنگین سازند الم، باقروق و اشین جدا شدند. دانه‌های زیرکن در رزین اپوکسی ثابت شده و صیقل داده شدند. پیش از انجام آنالیز، برای بررسی شکل و میزان گردشدگی زیرکن‌ها تصاویر میکروسکوپی آنها در نور عبوری



شکل ۳. تصاویر میکروسکوپی (نور معمولی) و CL از منتخب دانه‌های زیرکن از بین نمونه‌های آنالیز شده. محل نقطه‌ای که مورد آنالیز LA-ICP-MS قرار گرفته است و سن $^{206}\text{U}/^{238}\text{Pb} (\pm 2\sigma)$ نمونه در همان نقطه نشان داده شده است. شماره‌ای که در بالای هر زیرکن در تصویر وجود دارد، شماره نمونه و شماره نقطه آنالیز است. مقیاس تمامی عکس‌ها ۵۰ میکرومتر است

1. Euhedral
2. Subhedral
3. Anhedral

تعیین سن U-Pb از طریق دستگاه ICP-MS مدل Element2, ThermoFisher مجهز به یک دستگاه ذوب لیزری 193-nm Analyte G2 Excimer Laser Ablation System در موسسه کانی‌شناسی دانشگاه مونسستر انجام شد. آنالیز ایزوتوپی مطابق با روشی که در لوون و همکاران (Löwen et al., 2017) آمده است انجام شد.

بحث

زیرکن‌های آواری مستخرج از شش نمونه ماسه‌سنگ گروه نخلک بیشتر شفاف یا نیمه‌شفاف بوده‌اند. به استثنای نمونه‌های سازند باقروق، زیرکن‌های شکل‌دار و نیمه‌شکل‌دار فراوانی عمده‌ای دارند (شکل ۲). در مجموع تعداد ۴۷۸ زیرکن تعیین سن شده‌اند که از بین آنها تعداد ۴۴۶ زیرکن (۹۳٪ از کل زیرکن‌ها) به میزان ۹۰-۱۱۰٪ هماهنگ هستند (جدول ۱).
 ساده‌سازی داده‌ها مطابق با روشی که در کوئیچمن و همکاران (Kooijman et al., 2012) آمده است انجام شد. داده‌ها مطابق با روش لوون و همکاران (Löwen et al., 2017) فیلترگذاری شدند. نمودارها و تخمین چگالی هسته (KDE) (شکل ۴) با استفاده از نرم‌افزار DensityPlotter ورمیش (Vermeesch, 2012) رسم

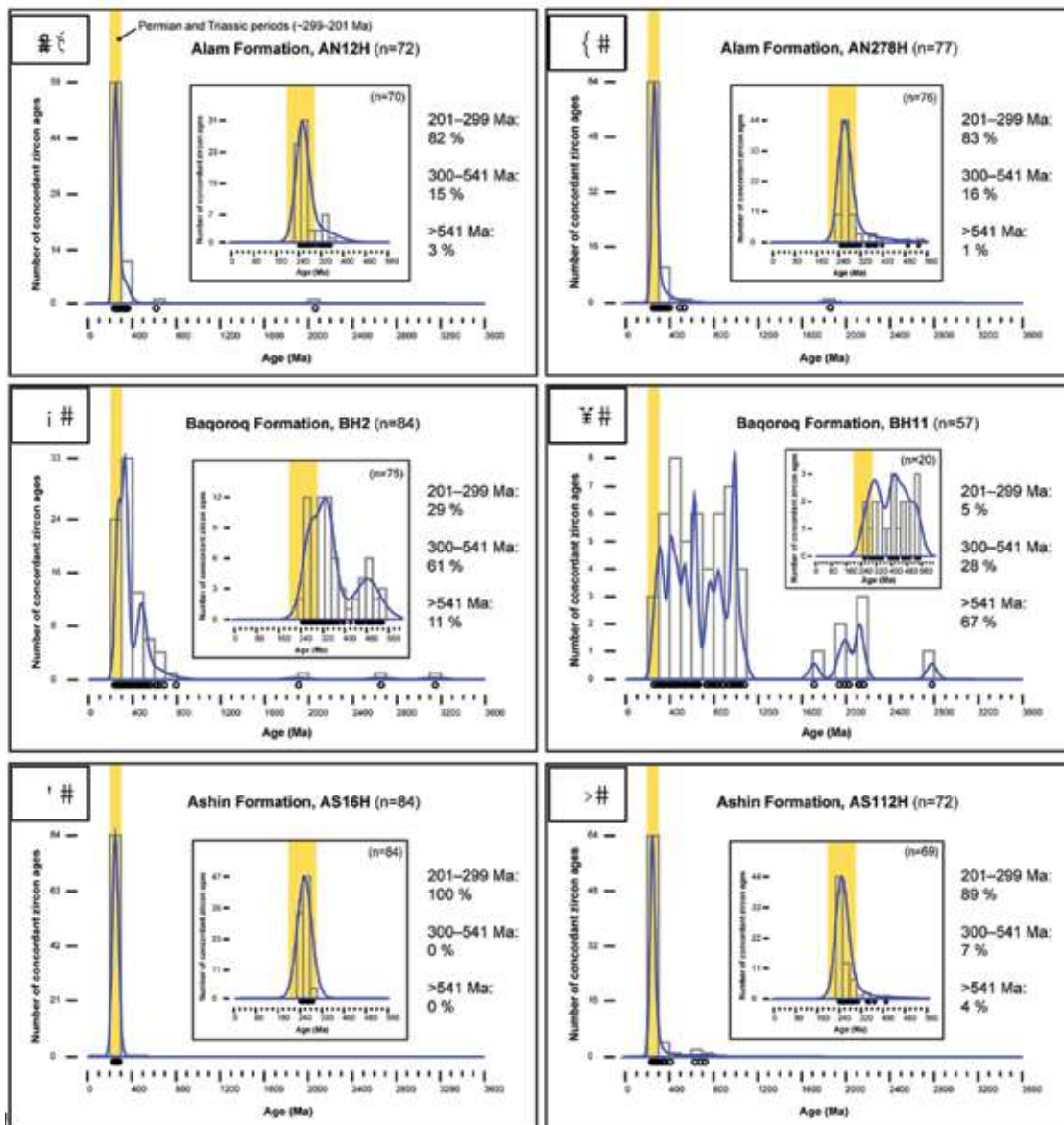
جدول ۱. اطلاعات نمونه‌ها، شش ستون اول در این جدول، جایگاه چینه‌شناسی و نوع سنگ نمونه‌های آنالیز شده در این مطالعه را نشان می‌دهند، جایگاه چینه‌شناسی دقیق نمونه‌ها در شکل ۲ نشان داده شده است، جایگاه چینه‌شناسی نمونه‌ها مطابق با زیست‌چینه‌نگاری مورد بحث در هاشمی عزیز و همکاران (Hashemi Azizi, 2018a) است. نوع سنگ‌ها بر اساس سنگ‌شناسی مقاطع نازک (Hashemi Azizi, 2018a) تعیین شده است، توجه شود که نمونه‌های AS16H، AS112H و BH2 و AN12H در هاشمی عزیز و همکاران (Hashemi Azizi, 2018a) به ترتیب مطابق هستند با نمونه‌های AS16، AS112 و B18 و AN94، چهار ستون آخر در این جدول خلاصه‌ای از سن زیرکن‌های آواری نمونه‌های آنالیز شده در این مطالعه را نشان می‌دهند. سن U-Pb در ستون آخر همراه با عدم قطعیت ۲ سیگما است

نمونه	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی	سن	وضعیت چینه‌شناسی	نوع سنگ	تعداد سن‌های مطمئن	تعداد سن‌های هم‌آهنگ	درصد تعداد سن‌های هم‌آهنگ (میلیون سال)	جوان‌ترین سن هم‌آهنگ
AS112H	۳۳° ۳۴'	۴۸° ۱۷/۳۰"	۵۳° ۴۸' - ۴۷/۱۳"	سازند اشین لادینین بالایی- ؟ کارنین پایینی	لیتیک آرکوز	۸۲	۷۲	۸۸	۲۳۸ ± ۴
AS16H	۳۳° ۳۴'	۱۶° ۷۹"	۵۳° ۴۸' - ۲۲/۹۵"	سازند اشین لادینین بالایی- ؟ کارنین پایینی	آرکوز	۸۵	۸۴	۹۹	۲۳۹ ± ۵
BH11	۳۳° ۳۳'	۴۴° ۸۸"	۵۳° ۴۸' - ۲۶/۰۷"	؟ آنیزین بالایی- لادینین میانی	سازند باقروق لیتیک آرکوز	۶۲	۵۷	۹۲	۲۵۶ ± ۷
BH2	۳۳° ۳۳'	۴۵° ۶۷"	۵۳° ۴۷' - ۵۰/۹۷"	؟ آنیزین بالایی- لادینین میانی	سازند باقروق فلدسپاتیک لیتارنایت	۸۶	۸۴	۹۸	۲۴۲ ± ۷
AN278H	۳۳° ۳۳'	۴۱° ۷۵"	۵۳° ۴۷' - ۴۹/۳۳"	آنیزین میانی	سازند الم فلدسپاتیک لیتارنایت	۸۷	۷۷	۸۹	۲۴۸ ± ۶
AN12H	۳۳° ۳۲'	۴۵° ۶۶"	۵۳° ۴۸' - ۴۵/۴۳"	اولنکین- آنیزین	سازند الم لیتارنایت	۷۶	۷۲	۹۵	۲۴۳ ± ۱۵
					جمع کل:	۴۷۸	۴۴۶	۹۳٪	

سازند الم

ماگمایی^۱ را نشان می‌دهند (شکل ۳). نمونه‌های AN12H و AN278H طیف زیرکن مشابهی را نشان می‌دهند، که ۸۲-۸۳٪ از کلیه دانه‌ها دارای سن پرمین-تریاس هستند (شکل ۴-الف و ب). تعداد زیرکن‌های مربوط به پالئوزوئیک قدیمی‌تر بسیار کم است (۱۵-۱۶٪)؛ زیرکن‌های به سن پرکامبرین تقریباً وجود ندارند (شکل ۴-الف و ب).

در مجموع تعداد ۱۶۳ دانه زیرکن از دو نمونه ماسه‌سنگ از سازند الم تعیین سن شده است، که ۱۴۹ عدد از آنها برای تفسیر مورد استفاده قرار گرفتند (جدول ۱). دانه‌های زیرکن در این نمونه‌ها بیشتر شکل دار و نیمه‌شکل دار هستند، نمونه جوان‌تر (AN278H) حاوی تعداد کمی از دانه‌های بی‌شکل نیز بوده است (شکل ۲). تصاویر CL منطقه‌بندی تناوبی



شکل ۴. نمودارهای تخمین چگالی هسته (KDE) طیف سنی U-Pb زیرکن‌های آواری در نمونه‌های سازندهای الم، باقروق و اشین از گروه نخلک، ایران مرکزی (عرض هر ستون مستطیلی = ۱۰۰ میلیون سال)، در سمت راست هر دیاگرام، درصد گروه‌های سنی زیرکن پرمین-تریاس، کامبرین-کربنیفر و پرکامبرین نشان داده شده است، نمودارهای الحاقی نمای نزدیکی از بازه سنی فائوزوئیک را نشان می‌دهند (عرض هر ستون مستطیلی = ۲۵ میلیون سال)، n = تعداد سن‌های هم‌آهنگ

1. Magmatic oscillatory zoning

سازند باقروق

در مجموع تعداد ۱۴۸ دانه زیرکن از دو نمونه ماسه‌سنگ از سازند باقروق تعیین سن شده‌اند که ۱۴۱ عدد از آنها برای تفسیر مورد استفاده قرار گرفته‌اند (جدول ۱). دانه‌های زیرکن مستخرج از نمونه BH2 نیمه‌شکل‌دار و بی‌شکل بوده و تنها ۱۸٪ از آنها شکل‌دار هستند (شکل ۲). در نمونه BH11 بیشتر زیرکن‌ها بی‌شکل و کمتر نیمه‌شکل‌دار هستند. تصاویر CL منطقه‌بندی تناوبی ماگمایی را در زیرکن‌های پالئوزوئیک پسین آشکار ساخته است (شکل ۳). برخی از دانه‌ها هسته‌ای به سن نئوپروتروزوئیک داشته که دارای رورشدی با منطقه‌های تناوبی ماگمایی به سن کربنیفر هستند. نمونه‌های BH2 و BH11 طیف‌های زیرکن متفاوتی را نشان می‌دهند (شکل ۴-پ و ت). حدود ۲۹٪ از دانه‌ها در نمونه BH2 سن پرمین-تریاس داشته، ۶۱٪ سن‌های مربوط به پالئوزوئیک قدیمی‌تر را نشان می‌دهند و ۱۱٪ سن پرکامبرین دارند. در نمونه BH11 ۵٪ از کلیه دانه‌های زیرکن سن پرمین-تریاس را نشان می‌دهند، ۲۸٪ سنین پالئوزوئیک قدیمی‌تر را نشان می‌دهند و ۶۷٪ سن پرکامبرین دارند (شکل ۴-پ و ت).

سازند اشین

در مجموع تعداد ۱۶۷ دانه زیرکن از دو نمونه ماسه‌سنگ از سازند اشین تعیین سن شدند که تعداد ۱۵۶ دانه از آنها برای تفسیر مورد استفاده قرار گرفتند (جدول ۱). دانه‌های زیرکن مستخرج از نمونه AS16H شکل‌دار و تعداد کمی نیمه‌شکل‌دار هستند، در حالی که زیرکن‌های مستخرج از نمونه AS112H بی‌شکل و تعداد کمی نیمه‌شکل‌دار و تنها ۵٪ از آنها شکل‌دار هستند (شکل ۲). تصاویر CL منطقه‌بندی تناوبی ماگمایی را آشکار ساخته است (شکل ۳). زیرکن‌های به دست آمده از نمونه‌های AS16H و AS112H طیف زیرکن مشابهی را نشان می‌دهند، و ۸۹-۱۰۰٪ از کلیه دانه‌ها سن پرمین-تریاس را نشان می‌دهند (شکل ۴-ث و ج). به علاوه، نمونه AS112H تعداد کمی (۷٪) دانه‌های زیرکن به سن دونین دارد؛ زیرکن‌های پرکامبرین در سازند اشین کم و بیش غائب هستند (۴٪) (شکل ۴-ث و ج).

نتیجه‌گیری

شکل زیرکن

نمونه‌های زیرکن مورد بررسی از گروه نخلک به سن تریاس واقع در ایران مرکزی دارای شکل شاخص نشان‌دهنده منشأ آذرین هستند که به‌وسیله تصاویر CL تأیید می‌شود، زیرا اغلب دانه‌های زیرکن منطقه‌بندی تناوبی ماگمایی را نشان می‌دهند (شکل ۳). دانه‌های زیرکن شکل‌دار و نیمه‌شکل‌دار در سازند الم غالب هستند (شکل ۲). رو به بالای توالی دانه‌های زیرکن گردشده‌تر هستند که در سازند باقروق به‌خوبی نشان داده شده است (شکل ۲). افزایش دانه‌های گردشده با افزایش مقدار دانه‌های زیرکن به سن نئوپروتروزوئیک و پالئوپروتروزوئیک مطابقت دارد، که منعکس‌کننده ورود رسوبات بیشتر مربوط به چرخه مجدد قدیمی در سازند باقروق است. دانه‌های زیرکن شکل‌دار و نیمه‌شکل‌دار دوباره در بخش پایینی سازند اشین فراوان می‌شوند. گرچه در بخش بالاتر این سازند دانه‌های زیرکن گردشده‌تر هستند، اما سن آنها مشابه با سن زیرکن‌های بخش پایین سازند است. این اثر نشان‌دهنده حمل و نقل رسوبات در مسافت طولانی‌تر از منشأ به حوضه است، زیرا غیرمعمول است که منشأ نزدیک، زیرکن‌های نیمه‌شکل‌دار تا گردشده را در یک مسافت کوتاه ایجاد کند. سناریوی دیگری که می‌توان متصور شد جابجایی طولانی دانه‌ها در یک محیط پیش‌کمانی و سپس ته‌نشینی دوباره آنها در یک محیط دور از ساحل سازند اشین بالایی است. اگر سناریوی دوم مد نظر باشد، چرخه مجدد از لایه‌های زیرین همچون سازند الم امکان‌پذیر است.

سن U-Pb زیرکن

غالب نمونه‌های زیرکن گروه نخلک سن پرمین-تریاس را نشان می‌دهند، تنها تفاوت‌ها به دلیل تغییرات فراوانی نسبی سن پالئوزوئیک پیشین و پرکامبرین است (شکل ۴)، که این گروه سنی در سازند باقروق دیده می‌شود (شکل ۴-پ و ت).

گروه سنی پرمین-تریاس (بیشتر ۲۴۰-۲۸۰ میلیون سال در نمونه‌های زیرکن گروه نخلک) نشان‌دهنده حوادث ماگمایی

تغییری در محیط رسوبی همراه است. سازند باقروق از رسوبات قاره‌ای تشکیل شده، درحالی‌که سازندهای الم و اشین از رسوبات دریایی تشکیل شده‌اند (برای مثال: Hashemi Azizi et al., 2018a; 2018b). این تغییر کوتاه‌مدت در شرایط محیط رسوبی و خاستگاه، اشاره دارد به رخداد تکتونیکی هم‌زمان با رسوب‌گذاری محلی در حاشیه جنوبی اوراسیا که رسوبات آواری آن از محلی با ماهیت شمال‌شرق‌گندوانا تأمین می‌شود که خود نشان‌دهنده چرخه دوباره رسوبات خردقاره سیمیرین شامل رسوبات پلتفرمی مرتبط طی تریاس میانی باشد. مشاهدات بلوک یزد تأیید کننده آن است، که در زمان تریاس میانی تا پسین توالی حاشیه غیرفعال سیمیرین پیشین تا لایه‌های پالئوزوئیک فرسایش یافته است که نشان‌دهنده فرسایش برآمدگی خمشی^۱ است (Bagheri and Stampfli, 2008). تشکیل برآمدگی خمشی می‌تواند به دلیل برخورد حاشیه شمالی سیمیرین و گوه برهم‌افزایشی باشد. رسوبات حاشیه غیرفعال سیمیرین به گوه برهم‌افزایشی وارد شده‌اند (Meinhold et al., 2020). تحولات تکتونیکی بعد از آن مشابه سیستم کمان عهد حاضر سوندا-باند^۲ در اندونزی (Silver and Reed, 1988)، منجر به جایگیری و بالآمدن سنگ‌های دگرگونی، به‌احتمال زیاد با ماهیت سیمیرین شده است که مواد آواری حوضه پیش‌کمانی را تأمین کرده است. همان‌طور که گفته شد مطالعات پتروگرافی وجود مقادیر زیادی از خرده‌سنگ‌های دگرگونی را در سازند باقروق نشان داده‌اند (Hashemi Azizi et al., 2018a). مجموعه دگرگونی انارک در منطقه انارک در حدود ۲۰ کیلومتری جنوب نخلک که نشان‌دهنده بقایای گوه برهم‌افزایشی واریسکان است، می‌تواند یک منشأ محتمل برای این خرده‌سنگ‌ها باشد (Bagheri and Stampfli, 2008; Zanchi et al., 2009b; Buchs et al., 2013).

تغییرات کوتاه مدت در خاستگاه و محیط رسوبی که در گروه نخلک مشاهده شده است، می‌تواند با تغییرات کوتاه مدت در نوع، هندسه و شیوه تغییر شکل حوضه پیش‌کمانی

حاصل از فرورانش رو به شمال پالئوتتیس به زیر حاشیه جنوبی اوراسیا است که منجر به شکل‌گیری یک سیستم کمان ماگمایی بزرگ شده که حیات طولانی مدتی داشته است و توسط ناتالین و شنگور (Natal'in and Şengör, 2005) کمان جاده ابریشم نام‌گذاری شده است. از این پس در ساده‌سازی برای اشاره به خاستگاه کمان ماگمایی پرمین-تریاس از این واژه استفاده خواهد شد، زیرا نمی‌توان به یک واحد سنگی ماگمایی مجزا به‌عنوان منشأ رسوبات اشاره کرد، به این دلیل که پس از تشکیل کمان، حرکات تکتونیکی امتدادلغز بزرگ‌مقیاس بازسازی تکتونیک قدیمه را در طول حاشیه جنوبی اوراسیا پیچیده کرده است (رجوع شود به Ruttner, 1993; Natal'in and Şengör, 2005). برای مثال، سنگ‌های ماگمایی و آتش‌فشانی-رسوبی حاصل از این کمان‌ها در شرق حوضه کاسپین در قلمرو توران یافت شده است (برای مثال: Garzanti and Gaetani, 2002; Natal'in and Şengör, 2005; Zanchetta et al., 2013). سنگ‌های ماگمایی پالئوزوئیک پیش از تریاس نیز از این پهنه گزارش شده‌اند و پی‌سنگی را ایجاد کرده‌اند که کمان بر روی آن گسترش یافته است (برای مثال: Natal'in and Şengör, 2005; Zanchetta et al., 2013). این سنگ‌ها یا محصولات چرخه دوباره آنها طی ماگمازایی پرمین-تریاس، یعنی زیرکن‌های زون‌کریست، نشان‌دهنده منشأهای محتمل برای دانه‌های زیرکن پالئوزوئیک پیش از تریاس است که در ماسه‌سنگ‌های گروه نخلک یافت شده‌اند.

در زمان رسوب‌گذاری سازند باقروق زیرکن‌های دارای منشأ کمان جاده ابریشم کم‌وبیش کمیاب شدند و خاستگاه در سازند باقروق تغییر کرد. این اثر همراه با وجود دانه‌های زیرکن به سن نئوپروتروزوئیک پسین، به منشأیی با ماهیت شمال‌شرق‌گندوانا اشاره دارد (برای مثال: Meinhold et al., 2013). برای مثال از ماسه‌سنگ‌های نئوپروتروزوئیک بالایی و پالئوزوئیک کوه‌های البرز در شمال ایران، که نشان‌دهنده رسوبات حاشیه قاره‌ای بلوک‌های سیمیرین ایران است (Horton et al., 2008; Honarmand et al., 2016; Moghadam et al., 2017).

تغییر خاستگاه در بخش میانی گروه نخلک با

1. Silk Road Arc
2. Flexural bulge
3. Sunda-Banda

Zanchi, A., Bollati, I., Larghi, C., Zanchetta, S., Salamati, R. and Mossavvari, F., 2009. The Triassic stratigraphic succession of Naxhlak (Central Iran), a record from an active margin. In: Brunet, M.F., Wilmsen, M., Granath, J.W. (Eds.), South Caspian to Central Iran Basins. Geological Society London, Special Publication, 312, 287-321.

- Baud, A., Stampfli, G. and Steen, D., 1991. The Triassic Aghdarband Group: volcanism and geological evolution, *Abhandlungen der Geologischen Bundesanstalt Wien*, 38, 125-137.

- Berberian, M. and King, G., 1981. Toward a paleogeographic and tectonic evolution of Iran, *Canadian Journal of Earth Sciences*, 18, 210-265.

- Buchs, D.M., Bagheri, S., Martin, L., Hermann, J. and Arculus, R., 2013. Paleozoic to Triassic ocean opening and closure preserved in Central Iran: constraints from the geochemistry of meta-igneous rocks of the Anarak area, *Lithos*, 172-173, 267-287.

- Cohen, K.M., Harper, D.A.T., Gibbard, P.L. and Fan, J.-X., 2018. The International Chronostratigraphic Chart, International Commission on Stratigraphy, <http://www.stratigraphy.org/ICSchart/ChronostratChart2018-08.pdf>.

- Davoudzadeh, M., Soffel, H. and Schmidt, K., 1981. On the rotation of Central-East-Iran-microplate, *Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie*, 3, 180-192.

- Davoudzadeh, M. and Seyed-Emami, K., 1972. Stratigraphy of the Triassic Naxhlak Group, Anarak region, Central Iran, *Geological Survey of Iran Report*, 28, 5-28.

- Garzanti, E., Gaetani, M., 2002. Unroofing history of Late Paleozoic magmatic arcs within the "Turan Plate" (Tuarkyr, Turkmenistan). *Sediment. Geol.* 151, 67-87.

- Kooijman, E., Berndt, J. and Mezger, K., 2012. U-Pb dating of zircon by laser ablation ICP-MS: recent improvements and new insights, *Eur. J. Mineral.*, 24, 5-21.

مرتبط باشد، یعنی نوع غیر برهم‌افزایشی (فرسایشی) تا خنثی یا نوع برهم‌افزایشی فشاری که نودا (Noda, 2016) توصیف کرده است. شاید حرکات تکتونیکی امتدادلغز نقش مهمی را در ژئودینامیک زمان تریاس ایفا کرده‌اند (Ruttner, 1993; Natal'in and Şengör, 2005).

پس از نهشت سازند باقروق، حوضه رسوبی به سرعت فرورانش کرده و تبدیل به دریایی عمیق شده است که با ایکنوفاسیس نریتس در سازند اشین مشخص است (Vaziri and Fürsich, 2007)، که حرکات تکتونیکی امتدادلغز در اثر همگرایی مایل پالئوتتیس در حال فرورانش می‌تواند محرک آن بوده باشد (Natal'in and Şengör, 2005).

سپاسگزاری

از پروفیسور گیدو ماینهلد برای همکاری در این پروژه، حمایت مالی و راهنمایی‌های سازنده‌شان صمیمانه قدردانی می‌شود. از مرکز علوم زمین دانشگاه گوتینگن آلمان برای فراهم کردن تجهیزات آزمایشگاهی برای آماده‌سازی نمونه‌ها قدردانی می‌شود. سپاس از آندریاس کرونز برای تأمین دسترسی به دستگاه میکروپروپ الکترونی برای تصویربرداری CL و بئاته اشمیت برای دستگاه LA-ICP-MS. همچنین از داوران ناشناس مجله برای دقت نظر و پیشنهادات سازنده‌شان سپاس‌گزاری می‌شود.

منابع

- Alavi, M., Vaziri, H., Seyed Emami, K. and Lasemi, Y., 1997. The Triassic and associated rocks of the Naxhlak and Aghdarband areas in central and northeastern Iran as remnants of the southern Turanian active continental margin, *Geological Society of American Bulletin*, 109, 1563-1575.

- Bagheri, S. and Stampfli, G.M., 2008. The Anarak, Jandaq and Posht-e-Badam metamorphic complexes in Central Iran: new geological data, relationships and tectonic implications. *Tectonophysics* 451, 123-155.

- Balini, M., Nicora, A., Berra, F., Garzanti, F., Levera, M., Mattei, M., Muttoni, M.,

- Hashemi Azizi, S.H., Rezaee, P., Jafarza-deh, M., Meinhold, G., Moussavi Harami, S.R. and Masoodi, M., 2018a. Early Mesozoic sedimentary-tectonic evolution of the Central-East Iranian microcontinent: evidence from a provenance study of the Naxhlak Group, *Geochemistry*, 78, 340-355.
- Hashemi Azizi, S.H., Rezaee, P., Jafarza-deh, M., Meinhold, G., Moussavi Harami, S.R. and Masoodi, M., 2018b. Evidence from detrital chrome spinel chemistry for a Paleo-Tethyan intra-oceanic island-arc provenance recorded in Triassic sandstones of the Naxhlak Group, Central Iran, *Journal of African Earth Sciences*, 143, 242-252.
- Honarmand, M., Li, X.-H., Nabatian, G., Rezaeian, M. and Etemad-Saeed, N., 2016. Neoproterozoic-Early Cambrian tectono-magmatic evolution of the Central Iranian terrane, northern margin of Gondwana: Constraints from detrital zircon U-Pb and Hf-O isotope studies. *Gondwana Research*, 37, 285-300.
- Horton, B.K., Hassanzadeh, J., Stockli, D.F., Axen, G.J., Gillis, R.J., Guest, B., Ammini, A., Fakhari, M.D., Zamanzadeh, S.M. and Grove, M., 2008. Detrital zircon provenance of Neoproterozoic to Cenozoic deposits in Iran: implications for chronostratigraphy and collisional tectonics. *Tectonophysics*, 451, 97-122.
- Löwen, K., Meinhold, G., Güngör, T. and Berndt, J., 2017. Palaeotethys-related sediments of the Karaburun Peninsula, western Turkey: constraints on provenance and stratigraphy from detrital zircon geochronology, *International Journal of Earth Sciences*, 106, 2771-2796.
- Meinhold, G., Hashemi Azizi, S.H. and Berndt, J., 2020. Permian-Triassic magmatism in response to Palaeotethys subduction and pre-Late Triassic arrival of northeast Gondwana-derived continental fragments at the southern Eurasian margin: Detrital zircon evidence from Triassic sandstones of Central Iran, *Gondwana Research*, 83, 118-131.
- Meinhold, G., Morton, A.C. and Avigad, D., 2013. New insights into peri-Gondwana paleogeography and the Gondwana super-fan system from detrital zircon U-Pb ages, *Gondwana Research*, 23, 661-665.
- Meinhold, G., Morton, A.C., Fanning, C.M., Frei, D., Howard, J.P., Phillips, R.J., Strogen, D. and Whitham, A.G., 2011. Evidence from detrital zircons for recycling of Mesoproterozoic and Neoproterozoic crust recorded in Paleozoic and Mesozoic sandstones of southern Libya, *Earth and Planetary Science Letters*, 312, 164-175.
- Moghadam, H., Li, X.H., Griffin, W.L., Stern, R.J., Thomsen, T.B., Meinhold, G., Ahari-pour, R. and O'Reilly, S.Y., 2017. Early Paleozoic tectonic reconstruction of Iran: tales from detrital zircon geochronology, *Lithos*, 268-271, 87-101.
- Natal'in, B.A. and Şengör, A.M.C., 2005. Late Palaeozoic to Triassic evolution of the Turan and Scythian platforms: the pre-history of the Palaeo-Tethyan closure, *Tectonophysics*, 404, 175-202.
- Noda, A., 2016. Forearc basins: types, geometries, and relationships to subduction zone dynamics. *Geological Society of American Bulletin*, 128, 879-895.
- Ruttner, A.W., 1993. Southern borderland of Triassic Laurasia in north-east Iran, *Geologische Rundschau*, 82, 110-120.
- Seyed-Emami, K., 2003. Triassic of Iran, *Facies*, 48, 91-106.
- Silver, E.A. and Reed, D.L., 1988. Back-thrusting in accretionary wedges. *Journal of Geophysics Research*, 93, 3116-3126.
- Vaziri, S.H. and Fürsich, F.T., 2007. Middle to Upper Triassic deep-water trace fossils from the Ashin Formation, Naxhlak Area, Central Iran, *Journal of Sciences, Islamic Republic of Iran*, 18,

263-268.

- Vaziri, S.H., Senowbari-Daryan, B. and Kohansal-Ghadimvand, N., 2005. Lithofacies and microfacies of the Upper Cretaceous rocks (Sadr unit) of Nakhlak area in Northeastern Iran, Central Iran, *Journal of Geosciences*, Osaka City University, 48, 71-80.

- Vaziri, S.H., Fürsich, F.T. and Kohansal-Ghadimvand, N., 2012. Facies analysis and depositional environments of the Upper Cretaceous Sadr unit in the Nakhlak area, Central Iran, *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 29, 384-397.

- Vermeesch, P., 2012. On the visualisation of detrital age distributions, *Chemical Geology*, 312-313, 190-194.

- Zanchetta, S., Berra, F., Zanchi, A., Bergomi, M., Caridroit, M., Nicora, M. and Heidarzadeh, G., 2013. The record of the Late Palaeozoic active margin of the Palaeotethys in NE Iran:

constraints on the Cimmerian orogeny, *Gondwana Research*, 24, 1237-1266.

- Zanchi, A., Zanchetta, S., Garzanti, E., Balini, M., Berra, F., Mattei, M. and Muttoni, G., 2009a. The Cimmerian evolution of the Nakhlak-Anarak area, Central Iran, and its bearing for the reconstruction of the history of the Eurasian margin. In: Brunet, M.F., Wilmsen, M. and Granath, J.W. (Eds.), *South Caspian to Central Iran Basins*, Geological Society London, Special Publication 312, 261-286.

- Zanchi, A., Zanchetta, S., Garzanti, E., Balini, M., Berra, F., Mattei, M. and Muttoni, G., 2009b. The Cimmerian evolution of the Nakhlak-Anarak area, Central Iran, and its bearing for the reconstruction of the history of the Eurasian margin. In: Brunet, M.F., Wilmsen, M., Granath, J.W. (Eds.), *South Caspian to Central Iran Basins*. Geological Society London, Special Publication 312, 261-286.