

دگرگونی و ماگمازایی نوپروتروزوییک پسین - کامبرین پیشین در ایران

حبیب ا. قاسمی^{۱*}، محبوبه عرب زاده بنی اسدی^۲

۱- گروه پترولوژی و زمین شناسی اقتصادی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود، گروه پژوهشی ماگمازایی و کانی زایی در ایران،

عضو هیأت مدیره و نایب رئیس انجمن زمین شناسی ایران h-ghasemi@shahroodut.ac.ir

۲- گروه پژوهشی ماگمازایی و کانی زایی در ایران، دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود

چکیده

مجموعه‌های دگرگونی- آذرین نوپروتروزوییک پسین- کامبرین پیشین ایران متشکل از انواع گنیس، میگماتیت، آمفیبولیت، آمفیبول شیت، مرمر، میکاشیت، اسلیت و فیلیت به همراه توده‌های افیولیتی، گابرویی و گرانیته در رخساره‌های شیت سبز تا آمفیبولیت میانی- بالایی در سری رخساره‌ای نوع باروین دگرگون شده‌اند. بخش زیرین این مجموعه‌های دگرگونی در رخساره آمفیبولیت میانی- بالایی بوده و ساختار میگماتیته دارند (گنیس و آمفیبولیت، میگماتیت، مرمر) و بخش بالایی آنها با درجه دگرگونی کمتر (رخساره شیت سبز) دیده می‌شود (شیت، فیلیت، اسلیت، مرمر) و میزبان کانسارهای آهن-آپاتیت و سرب و روی هستند. اغلب این مجموعه‌ها متحمل رخداددهای دگرگونی دینامیکی بعدی شده و فابریک میلونیتی نشان می‌دهند. گنیس‌ها از هردو نوع پارا و ارتو هستند ولی آمفیبولیت‌ها و آمفیبول- شیت‌ها از نوع ارتو بوده، سنگ مادر آنها شامل گدازه‌های بازالتی، دایک‌های دیابازی و توده‌های کوچک گابرو/دیوریتی بوده است.

واژگان کلیدی: مجموعه‌های دگرگونی- آذرین، نوپروتروزوییک پسین- کامبرین پیشین، پرکامبرین.

The Late Neoproterozoic-Early Cambrian Metamorphism and Magmatism in Iran

Habibollah Ghasemi^{1*}, Mahboubeh Arabzadeh Baniasadi²

1- Faculty of Earth Sciences, Shahrood University of Technology, Iran. Research Group of Magmatism and Mineralization in Iran (RGMMI), h-ghasemi@shahroodut.ac.ir

2- Research Group of Magmatism and Mineralization in Iran (RGMMI)

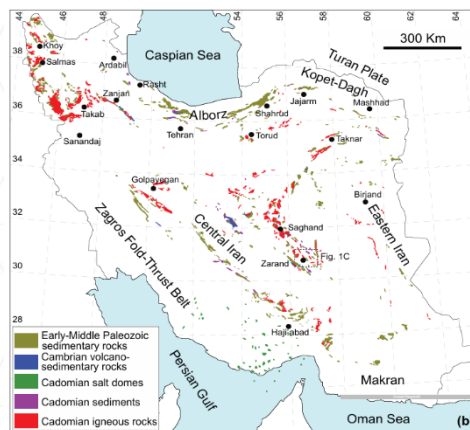
Abstract

The Late Neoproterozoic-Early Cambrian metamorphic and magmatic complexes in Iran composed of gneiss, migmatite, amphibolite, amphibole schist, marble, micaschist, slate and phyllite along with ophiolitic, gabbroic and granitic bodies and meta-volcanics were metamorphosed in green schist to upper-middle amphibolite facies in common barrovian metamorphic series. The lower parts of these metamorphic complexes are in upper-middle amphibolite facies and have migmatitic structure (gneiss, amphibolite, migmatite, marble) and their upper parts show lower metamorphic grade (green schist facies) (schist, phyllite, slate, marble) and hosts iron-apatite and Pb-Zn deposits. Most of these complexes were metamorphosed in the later dynamic metamorphic events and show mylonitic fabrics. The gneisses are both ortho and para types but amphibolites and amphibole schists are of ortho type and their protoliths were basaltic lava flows, diabasic dykes and small gabbro/dioritic bodies.

Key words: Metamorphic and magmatic complexes, Neoproterozoic-Early Cambrian, Precambrian.

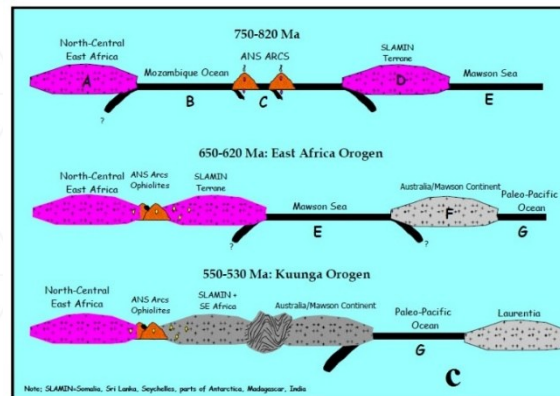
مقدمه

با نگاهی به پراکندگی و گسترش سنگ‌های نوپروتروزوییک پسین- کامبرین پیشین در ایران (شکل ۱) می‌توان دریافت که این سنگ‌ها به‌عنوان پی‌سنگ ایران، تقریباً در همه نواحی ایران، بجز پهنه فلیشی مکران در جنوب خاور و پهنه کپه داغ در شمال خاور دیده می‌شوند. بیشترین بیرون‌زدگی این سنگ‌ها در راستای خطواره‌های گسلی پی‌سنگی ایران مرکزی همچون نه‌بندان، نای‌بند، تکتار، درونه، کلمرد، چاپ‌دونی و پشت بادام دیده می‌شود. این سنگ‌ها در مطالعات اولیه زمین‌شناسی ایران با‌عنوان قدیمی‌ترین سنگ‌های دگرگونی و آذرین ایران به سن پرکامبرین معرفی شده بودند، اما در سال‌های اخیر، مطالعات ارزشمندی بر روی این مجموعه‌های دگرگونی- آذرین با بهره‌گیری از ابزارهای آزمایشگاهی پیشرفته مانند سن‌سنجی‌های ایزوتوپی U-Pb بر روی کانی زیرکن انجام شده و جلوه‌هایی از ماهیت زمین‌شناسی پیچیده آنها روشن گشته است.



شکل ۱- پراکندگی سنگ‌های نوپروتروزوییک پسین- کامبرین پیشین گزارش شده در ایران (برگرفته شده از Shafaii Moghadam et al., 2023).

بررسی‌های زمین‌شناختی دقیق نشان می‌دهند که در بازه زمانی نوپروتروزوییک پسین- کامبرین پیشین، ایران در بخش شمال خاوری ابرقاره گندوانا قرار داشته و رویدادهای زمین‌شناختی اثرگذار بر آن، همان رویدادهای حاکم بر همگرایی بخش‌های خاوری بلوک‌های قاره‌ای مختلف جدا شده از ابرقاره پیشین رودینا در فاصله زمانی ۸۰۰ تا ۵۵۰ میلیون سال پیش بوده که با بسته شدن اقیانوس آغازین تتیس همراه بوده است. در این فاصله زمانی ۲۵۰ میلیون ساله، دست‌کم دو رویداد کوهزادی مهم در جریان همگرایی و به هم پیوستن این بلوک‌های گندوانایی جدا از هم در بازه‌های زمانی ۷۵۰ تا ۶۲۰ میلیون سال پیش (کوهزاد خاور آفریقا) و ۵۷۰ تا ۵۳۰ میلیون سال پیش (کوهزاد کانگا/کادومین) رخ داده است (Meert, 2001).
داده‌های سن‌سنجی دقیق اورانیم- سرب از مجموعه سنگ‌های بلوک‌های قاره‌ای خاور گندوانا نشانگر چهار گروه فراوانی است: (الف) فاز هم‌افزایی و جمع‌شدن کمان‌ها در رویداد کوهزاد خاور آفریقا در بازه زمانی ۸۰۰ تا ۶۵۰ میلیون سال پیش، (ب) فاز اصلی کوهزاد خاور آفریقا در بازه زمانی ۶۵۰ تا ۶۰۰ میلیون سال پیش، (پ) فاز کوهزاد کانگا/کادومین در بازه زمانی ۵۸۰ تا ۵۲۰ میلیون سال پیش و در نهایت، (ت) فاز کششی پس از جمع‌شدن بلوک‌ها، پس از ۵۲۰ میلیون سال پیش. در شکل ۲ تصویر کارتونی از مدل زمین‌ساختی کوهزادهای خاور آفریقا در بازه زمانی ۸۲۰ تا ۵۳۰ میلیون سال پیش و کانگا در فاصله زمانی ۵۵۰ تا ۵۳۰ میلیون سال پیش نشان داده شده است (Meert, 2001).



شکل ۲- تصویر کارتونی از مدل زمین‌ساختی کوهزاد خاور آفریقا که با فرورانش اقیانوس موزامبیک به زیر بخش‌های مرکزی- خاوری آفریقا در ۸۷۰ میلیون سال پیش شروع شده و با همگرایی کمان- کمان و سرزمین‌های گندوانایی و آغاز بسته شدن این اقیانوس و به هم پیوستن سرزمین‌های گندوانایی ادامه یافته است. جمع شدن سرزمین‌های گندوانایی تا ۶۰۰ میلیون سال پیش ادامه یافته و سبب به هم پیوستن خاور و باختر گندوانا و یکپارچگی نهایی آن در ۵۵۰ میلیون سال پیش شده است (Meert, 2001).

کوهزاد کادومین به عنوان بخش پایانی کوهزاد پان‌آفریکن، از اسپانیا تا شمال خاور آسیا در امتداد نوار آتشفشانی آوالونیا- کادومین ادامه دارد. این کوهزاد در پیرامون گندوانا و درست در لبه شمال خاوری ابرقاره گندوانا در خلال نوپروتروزوییک پسین رخ داده است. محصول این رخداد، کمان ماگمایی کادومین است که توسط فرورانش سنگ‌کره اقیانوسی آغازین تتیس به زیر لبه شمالی گندوانا تشکیل شده است. این سرزمین‌های پیرامون گندوانایی جداشده بر اثر این رخداد کافت‌زایی، امروزه در جنوب اروپا، خاور مدیترانه از جمله ترکیه و ایران و شمال آفریقا پراکنده‌اند. به دنبال این کافت‌زایی، پهنه اقیانوسی آغازین تتیس ایجاد شد و فرورانش رو به جنوب در امتداد لبه شمالی سرزمین‌های گندوانایی آغاز گردید و به ایجاد کمان ماگمایی آوالونیا- کادومین انجامید. سرزمین‌های پیرامون گندوانایی ناحیه مدیترانه (از جمله ترکیه و ایران) در پی‌سنگ خود شامل مجموعه‌های آذرین نوپروتروزوییک پسین- کامبرین پیشین هستند. این سرزمین‌ها در نوپروتروزوییک پسین- کامبرین پیشین و پیش از کافت‌زایی شمال آفریقا تشکیل شده‌اند و دارای شواهد فعالیت ماگمایی گسترده مربوط به فاز نهایی کوهزادی کادومین از ابرچرخه کوهزادی پان‌آفریکن هستند. البته به دلیل قرار نداشتن ایران در قلمرو این کوهزاد، باید در کاربرد واژه کادومین برای رخدادهای پی‌سنگ ایران بازنگری کرد.

بحث

در اولین نقشه زمین‌شناسی یکپارچه ایران، قطعات پی‌سنگی گرانی- ارتوگنیسی برخی نقاط ایران در شمال، مرکز و خاور- مرکز به پرکامبرین منسوب و همانند سنگ‌های پی‌سنگی پرکامبرین سپر عربی در نظر گرفته شدند (Stöcklin, 1968). با این وجود، سن تبلور آنها همواره مورد بحث بوده، و از آرکئن تا پروتروزوییک پیشین، پروتروزوییک میانی و پروتروزوییک پسین در نظر گرفته شده است. بیشتر این سن‌ها، براساس روش‌های سن‌سنجی نامناسب برای این سنگ‌ها (همچون روش‌های Rb-Sr و K-Ar) تعیین شده‌اند، که دمای بسته شدن سیستم آنها پایین است و بر اثر رخدادهای دگرگونی، دگرسانی و هوازدگی‌های بعدی، آشفته شده‌اند. سن‌های جدید براساس روش U-Pb بروی کانی زیرکن تعیین شده‌اند که دمای بسته شدن سیستم آن ۷۰۰-۷۵۰ درجه سانتی‌گراد است و در نتیجه، تحت تأثیر رخدادهای دگرگونی، دگرسانی و هوازدگی‌های معمول پوسته قرار نگرفته‌اند. تعیین سن‌های انجام شده بروی بیش از ۲۵۰۰ دانه زیرکن در بیش از ۶۰۰ نمونه، نشان می‌دهد که بیشتر این سن‌ها در محدوده زمانی ۵۷۰ تا ۵۳۰ میلیون سال پیش قرار می‌گیرند (Azizi and Whattman, 2022) و بنابراین، از سن‌های سپر عربی بسیار جوان‌ترند.

در پرتو مطالعات پیشین و امروزی، اثرات کوهزایی خاور آفریقا/کانگا یا کادومین در ایران را می‌توان در سنگ‌های مجموعه‌های دگرگونی-آذرین نواحی جندق- عروسان (Bagheri and Stampfli, 2008؛ بلوچی و همکاران، ۱۳۹۶)، یزد- چاپدونی- پشت بادام- بافق- اسفوردی-زرنده (Hassanzadeh et al., 2008; Ramezani and Tucker, 2003; Verdel et al., 2007; Mehdi-pour, 2020; Zolala et al., 2025) ، موته- گلپایگان- زاینده‌رود- چادگان- شهرکرد (Hassanzadeh et al., 2008;) (Nutman et al., 2014)، تکاب- زنجان (Hassanzadeh et al., 2008)، سورات (Jamshidi Badr et al., 2013)، خوی- ارومیه (Azizi et al., 2011)، سلماس (Shafaii Moghadam et al., 2015d) و به‌ویژه در ناحیه تروند- بیارجمند تا کاشمر و فریمان (Hassanzadeh et al., 2008; Balaghi Einalou, 2014; Hosseini et al., 2015; Shafaii Moghadam et al., 2015a; 2017a;) (Rossetti et al., 2014; Mazhari et al., 2020; Sepidbar et al., 2023). ساختار بیرون‌زدگی بیشتر این مجموعه‌ها، از جمله در کوه خشومی در چاپدونی- ساغند در یزد (Yassaghi and Masoodi, 2011) و مجموعه‌های دگرگونی تروند- بیارجمند در جنوب خاور شاهرود، به‌گونه‌ای است که می‌توان آنها را به‌عنوان مجموعه هسته دگرگونی^{۱۹} در نظر گرفت. سن‌سنجی‌های دقیق به روش‌های نوین اورانیم-سرب بر روی زیرکن در این مجموعه‌های سنگی، بیانگر جوان‌تر بودن مجموعه‌های پی‌سنگی نوپروتروزوییک ایران در مقایسه با این مجموعه‌ها در سیر عربی- نیوبیا است (سن‌های ۸۰۰ تا ۶۰۰ میلیون سال پیش در سیر عربی در مقایسه با سن‌های کمتر از ۶۰۰ میلیون سال پیش در خردقاره ایران در جدول ۱). بر این اساس، باید خردقاره ایران را مناطق دیرترافزوده‌شده به حاشیه سیر عربی- نیوبیا در خلال رخداد کوهزادی خاور آفریقا/کانگا یا کادومین (شکل ۴) در فاصله زمانی ۶۰۰ تا ۵۳۰ میلیون سال پیش دانست. این فرض با حضور مجموعه‌های افیولیتی قدیمی‌تر از ۵۵۰ میلیون سال پیش، مرتبط با بسته شدن اقیانوس آغازین تتیس در مجموعه‌های پی‌سنگی ایران مرکزی در تکاب، جندق-عروسان و ساغند- پشت بادام سازگاری داشته، همانند سیر عربستان، به‌هم پیوستن بلوک‌های قاره‌ای جدا از هم را در حدود ۶۰۰ میلیون سال پیش نشان می‌دهد.

مجموعه‌های دگرگونی- آذرین نوپروتروزوییک پسین- کامبرین پیشین ایران در رخساره‌های شیست سبز تا آمفیبولیت میانی- بالایی در سری رخساره‌ای نوع باروین معمول دگرگون شده‌اند. این مجموعه‌های سنگی تقریباً مشابه هم بوده، اما تغییرات جزئی ناشی از تغییر پهنه‌های رسوبی را نشان می‌دهند. در منطقه جنوب خاور شاهرود که رخنمون‌های تقریباً کاملی از این سنگ‌ها برنزد دارد، دو مجموعه تا حدودی متفاوت شامل بخش زیرین با درجه دگرگونی بالا (رخساره آمفیبولیت میانی- بالایی) و چهره میگماتیکی و بخش بالایی با درجه دگرگونی کمتر (رخساره شیست سبز) دیده می‌شود.

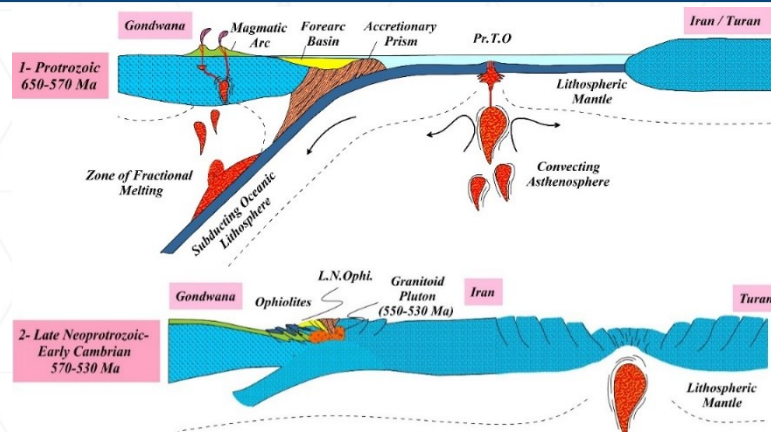
سنگ‌شناسی بخش زیرین را انواع گنیس (گنیس، گارنت گنیس و سیلیمانیت گنیس)، میگماتیت، آمفیبولیت (آمفیبولیت، گارنت آمفیبولیت)، آمفیبول‌شیست، مرمر و میکاشیست (میکاشیست، گارنت میکاشیست، گارنت- استارولیت میکاشیست، گارنت-کیانیت شیست و در برخی مناطق اطراف ساغند، پشت بادام و کاریزنو در فریمان آندالوزیت شیست و سیلیمانیت شیست)، تشکیل می‌دهند که بیشتر آنها در رخدادهای بعدی متحمل دگرگونی برگشتی در رخساره شیست سبز و دگرگونی دینامیکی با فابریک میلونیتی شده‌اند. گنیس‌ها از هردو نوع پارا و ارتو هستند ولی آمفیبولیت‌ها و آمفیبول‌شیست‌ها از نوع ارتو بوده، سنگ مادر آنها شامل گدازه‌های بازالتی، دایک‌ها و توده‌های کوچک گابرو/دیوریتی بوده است. این بخش زیرین که امروزه از بسیاری از مجموعه‌های پی‌سنگی ایران در ارومیه، خوی، تکاب، شهرکرد، موته- گلپایگان، چادگان- زاینده‌رود، تروند- بیارجمند، جندق، و ساغند- پشت بادام- زرنده- تکاب- فریمان در ایران مرکزی گزارش شده است را می‌توان هم‌ارز مجموعه‌های دگرگونی چاپدونی، پشت بادام، بنه‌شورو، نی‌باز، زمان‌آباد و بخش زیرین سازند تاشک در گزارش‌های زمین‌شناسان پیشگام دانست. وجود مجموعه‌های افیولیتی کوچک مقیاس در برخی از مناطق از جمله میشو در شمال باختر تبریز (Shahzeidi et al., 2016)، تکاب (Hajialioghli et al., 2007; Saki, 2010)، جندق- عروسان (ترابی، ۱۳۹۱؛ بلوچی و همکاران، ۱۳۹۶) و پشت بادام (Haghipour, 1974) را می‌توان با دو نظریه متفاوت تفسیر کرد. این مجموعه‌های افیولیتی یا بقایای پهنه اقیانوسی ۸۰۰ تا ۷۵۰

^{۱۹} Metamorphic Core Complex

میلیون سال پیش آغازین تتیس هستند که در رخدادهای کوهزادی خاور آفریقا در ۶۰۰ میلیون سال پیش بسته شده است و بنابراین در زمره قدیمی‌ترین سنگ‌های ایران هستند و یا مربوط به مرحله گسترش پهنه رسوبی تا تشکیل سنگ‌کره اقیانوسی در زمانه ۵۸۰ تا ۵۳۰ میلیون سال پیش هستند که در خلال رخدادهای کوهزادی کانگا/کادومین در ۵۳۰ میلیون سال پیش بسته شده است. با توجه به قرارگیری ضخامت زیادی از شیست‌ها، آمفیبولیت‌ها و مرمرها بر روی این مجموعه‌های افیولیتی و نفوذ گرانیتهایی به سن ۵۵۰ میلیون سال پیش در این شیست‌ها و آمفیبولیت‌ها (بلوچی و همکاران، ۱۳۹۶)، به نظر می‌رسد نسبت دادن این افیولیت‌ها به رخدادهای کوهزادی خاور آفریقا و نسبت دادن دگرگونی‌های رویی به رخدادهای کانگا/کادومین منطقی‌تر باشد.

بخش بالایی مجموعه‌های دگرگونی- آذرین نوپروتروزوییک پسین ایران بیشتر از انواع اسلیت، فیلیت، ماسه‌سنگ و گریوک‌های دگرگون شده، مرمهرهای دولومیتی و شیست‌های درجه پایین تشکیل شده که در بیشتر موارد میزبان توده‌های گرانیتهی و در برخی مناطق مانند بافق و اسفوردی، میزبان توده‌های گابرویی، دیوریتی، سینییتی و گرانیتهای قلیایی و کانی‌زایی آهن- آپاتیت- عناصر خاکی کمیاب- اورانیم- مس- سرب- روی هستند. بررسی‌های صحرایی نشانگر ارتباط بسیار نزدیک کانی‌زایی آهن- آپاتیت با توده‌های گابرویدیوریتی است. این بخش بالایی را می‌توان هم‌ارز بخش بالایی سازنده تاشک و هم‌ارز سازنده‌های کهر، قره‌داش، کلمرد، تکنار، سری‌های مراد، ریزو، دزو (دسو)، راور و هرمز در نوشتارهای زمین‌شناسان پیشگام دانست. به روشنی پیداست که دست‌کم دگرگونی‌های بخش بالایی، بر اثر رخدادهای کوهزادی کانگا/کادومین ایجاد شده باشند که منجر به برخورد، بسته شدن نهایی، ایجاد کمان ماگمایی حاشیه فعال قاره‌ای کادومین و سپس بروز رخدادهای کششی پس از برخورد، رهایی پوخته و ایجاد محیط کششی کافی برای تشکیل سنگ‌های آذرین قلیایی (گرانیته و ریولیت نوع A) و رسوبی تخریبی- تبخیری در ۵۳۰ میلیون سال پیش (کامبرین پیشین) شده است که به تشکیل سازنده‌های کافی ریزو، دزو، راور و هرمز منجر شده است. به دنبال این رخداد است که ماگماتیسم اسیدی پس از برخورد سبب ایجاد بسیاری از توده‌های گرانیتهی و ریولیتی نوپروتروزوییک پسین- کامبرین پیشین ایران نظیر زیرگان، نریگان، بُرنُرد و دوران شده است.

پس از این زمان، پی‌سنگ نوپروتروزوییک پسین ایران، پاکستان، بخش‌هایی از افغانستان، ترکیه و عربستان به صورت محیط کافی و کرانه ساحلی درآمده و به شکل یک پوخته پایدار عمل کرده است. در این دوره زمانی، تمام این مناطق توسط دریای کم‌عمقی پوشیده شده و پوشش رسوبی نازکی را از نوع تخریبی (ماسه‌سنگ لالون، زاگون و میلا) و تبخیری در بسیاری از مناطق به‌ویژه جنوب و جنوب‌باختر ایران به‌وجود آورده است. واحدهای تبخیری جنوب ایران شامل لایه‌های نمکی سری هرمز، بخش زیرین این رسوبات را تشکیل می‌دهند. علاوه بر رسوب‌های تبخیری یادشده، شواهدی از سنگ‌های آذرین بازالتی، آندزیتی، تراکیتی و ریولیتی و نفوذی از جمله گرانودیوریت به سن $549 \pm 4/8$ در گنبد‌های نمکی از جمله گنبد چمپه در بندر لنگه (پیروج و همکاران، ۱۳۹۸)، ریولیت در گنبد گچی-نمکی جزیره هرمز به سن ۵۵۸-۵۶۷ میلیون سال پیش (Faramarzi et al., 2015) و گرانیتهای دوران، زیرگان، نریگان، بُرنُرد و معادل‌های آتشفشانی آنها مانند ریولیت‌های قلیایی سری هرمز و بازالت‌های همراه، ریولیت تکنار در کاشمر، سری‌های مراد، راور، ریزو و دزو در کرمان، قره‌داش در آذربایجان، اسفوردی در بافق و بازالت‌های قلیایی ده‌بید، توده‌های آتشفشانی در نوار سهند- سیرجان از این گونه فعالیت‌ها هستند. با توجه به ویژگی‌های بیان شده برای مجموعه‌های سنگی نوپروتروزوییک پسین- کامبرین پیشین ایران و جمع‌بندی نظریه‌های مختلف پیرامون توسعه و تکامل آنها، می‌توان مدل زمین‌ساختی شکل ۳ را برای تکامل زمین‌ساختی آنها ارائه داد.



شکل ۳- مدل‌های زمین‌ساختی برای توسعه و تکامل زمین‌ساختی مجموعه‌های پی‌سنگی نوپروتروزوییک پسین- کامبرین پیشین ایران در زمان‌های ۶۵۰-۵۷۰ میلیون سال پیش (۱) و ۵۷۰-۵۳۰ میلیون سال پیش (۲). Pr.T.O. = اقیانوس آغازین تتیس، L.N.Ophi. = افیولیت‌های نوپروتروزوییک پسین.

فراخاست و بیرون‌زدگی رخنمون‌های پی‌سنگ کادومین در بخش‌های مختلف ایران در رخداد‌های مختلفی صورت گرفته است. در ناحیه ساغند- پشت بادام (Ramezani and Tucker (2003 سن ۴۶ میلیون سال را برای اوج رخداد دگرگونی و میگماتیت‌زایی، سن $44/3 \pm 1/1$ میلیون سال را برای گرانیت خشومی و سن $43/4 \pm 0/2$ را برای دیوریت دره انجیر گزارش کرده‌اند. به نظر Kargarbafghi et al. (2012) در این منطقه، رخداد کشش در زمان ائوسن انجام شده و با فعالیت آذرین کوتاه پسین- پالئوسن ناشی از فروانش مایل سنگ‌کره اقیانوسی نوتیس به زیر ایران مرکزی و تشکیل نوار ماگمایی ارومیه- دختر همراه بوده است. به باور شفاهی مقدم و همکاران (۲۰۱۵) در منطقه تکاب- زنجان (علم‌کندی) نیز گنیس‌های مجموعه‌های دگرگونی نوپروتروزوییک پسین به سن حدود ۵۵۵ میلیون سال پیش در یک رخداد دگرگونی بعدی در زمان ائوسن- لیگوسن (۳۸-۲۳ میلیون سال پیش)، متحمل ذوب بخشی و میگماتیت‌زایی شده‌اند. اما براساس شواهد زمین‌شناختی، فراخاست و بیرون‌زدگی پی‌سنگ کادومین نواحی ترو- بیارجمند در رخداد کششی و تشکیل پهنه جنینی پشت‌کمانی زمان تریاس پسین- ژوراسیک پیشین در ورای پهنه دگرگونی- ماگمایی سنندج- سیرجان رخ داده است که پس از گسترش به ایجاد پهنه‌های اقیانوسی فرافروانشی^{۲۰} مزوزوییک (نائین- بافت، سبزوار، سیستان، بیرجند) پیرامون خردقاره ایران مرکزی انجامیده است (قاسمی و همکاران، ۱۳۹۷). در این منطقه در بخش زیرین سازند معادل شمشک، یک واحد کنگلومرای قاعده‌ای متشکل از قطعات درشت گنیس‌ها و گرانیت‌های نوپروتروزوییک پسین به سترای بیش از ۷۰۰ متر دیده می‌شود که توسط فوج دایک‌های دیابازی ژوراسیک میانی ناشی از فرایند کشش و کافت‌زایی حوضه پشت‌کمانی سبزوار قطع شده است.

منابع

- پیروج، ه.، طهماسبی، ز.، و احمدی خلجی، ا.، ۱۳۹۸، کانی‌شناسی، زمین‌شیمی و سن‌سنجی پرتوسنجی سنگ‌های آذرین گنبد‌های نمکی چمپه، شمال بندر لنگه. مجله بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران ۲۳(۲): ۹۲۴-۹۰۹.
- ترابی، ق.، ۱۳۹۱، دگرگونی پریدوتیت‌های گوشته افیولیت جندق (ایران مرکزی). مجله پترولوژی ۳(۱۱): ۱۸-۱.
- ویس کرمی، م.، صادقیان، م.، قاسمی، ح.، شکاری، س.، مینگو، ج.، ۱۳۹۷، پترولژ و سن‌سنجی U-Pb متاریولیت‌های نوپروتروزوییک پسین مجموعه دگرگونی- آذرین ماجراد (جنوب‌خاور شاهرود): شواهدی بر تشکیل و توسعه حوضه‌های کششی درون قاره‌ای در سرزمین‌های گندوانایی ایران. مجله علوم زمین خوارزمی ۲۴(۲): ۲۶۲-۲۴۱.

ویس کرمی، م.، صادقیان، م.، مینگو، ج.، و قاسمی، ح.، ۱۳۹۸، سنگ‌شناسی، زمین‌شیمی و سن‌سنجی متابازیت‌های نفوپروتروزوییک پایانی مجموعه دگرگونی ماجراد (جنوب‌خاور شاهرود): گامی به سوی شناخت تحولات زمین‌دینامیکی سرزمین‌های گندوانایی ایران. مجله بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران ۲۷(۱): ۲۰۶-۱۹۱.

[Azizi, H., Chung, S.L., Tanaka, T., and Asahara, Y., 2011, Isotopic dating of the Khoy metamorphic complex \(KMC\), northwestern Iran: A significant revision of the formation age and magma source. *Precambrian Research*. 185\(3-4\): 87-94.](#)

[Azizi, H., and Whattam, S.A., 2022, Does Neoproterozoic-Early Paleozoic \(570–530 Ma\) basement of Iran belong to the Cadomian Orogeny? *Precambrian Research* 368 \(2022\) 106474. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2021.106474>](#)

[Azizi, H., Daneshvar, N., Asahara, Y., Minami, M., and Anma, R., 2023, The Generation of Eocene Mafic Dike Swarms During the Exhumation of a Core Complex, Biarjmand Area, NE Iran. *Journal of Petrology*, 2023, 64, 1–18. <https://doi.org/10.1093/petrology/egad039>](#)

Badr, A., Davoudian, A.R., 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*, v. 300, p. 86–104. 10. 1016/j.lithos.2017.12.008

[Balaghi Einalou, M., Sadeghian, M., Zhai, M., Ghasemi, H. and Mohajjel, M., 2014, 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: 92–124.](#)

[Faramarzi, N.S., Amini, S., Schmitt, A.K., Hassanzadeh, J., Borg, G., McKeegan, K., Razavi, S.M.H., 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* 236–237 \(2015\) 203–211. <http://dx.doi.org/10.1016/j.lithos.2015.08.017>](#)

Haghipour, A., 1974, Etude géologique de la région de Biabanak-Bafg (Iran Central); pétrologie et tectonique du précambrien et de sa couverture, Ph.D. thesis, université scientifique et médicale de Grenoble, France, 403p.

Hajjialioghli, R., Moazzen, M., Droop, G. T. R., Oberhänsli, R., Bousquet, R., Jahangiri, A. and Ziemann, M. (2007) Serpentine polymorphs and P-T evolution of meta-peridotites and serpentinites in the Takab area, NW Iran. *Mineralogical Magazine* 71: 155–174

Hajjialioghli, R., Moazzen, M., Jahangiri, A., Oberhänsli, R., Mocek, B. and Altenberger, U., 2011, Petrogenesis and tectonic evolution of metaluminous sub-alkaline granitoids from the Takab Complex, NW Iran. *Geological Magazine* 148 (2): 250-268.

[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\(1\): 71–96.](#)

[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. *Journal of Chemie der Erde*. 75: 207-218.](#)

Jamshidi Badr, M., Masoudi, F., Collins, A.S., and G. Cox, G., 2010, Dating of Precambrian Metasedimentary Rocks and Timing of their Metamorphism in the Soursat Metamorphic Complex (NW IRAN): Using LA–ICP–MS, U–Pb Dating of Zircon and Monazite. *Journal of Sciences, Islamic Republic of Iran*. 21(4): 311–319.

[Jamshidi Badr, M.J., 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*. 22\(1\): 1–31.](#)

[Karagaranbafghi, F., Foeken, J.P.T., Guest, B., and Stuart, F.M., 2012, Cooling history of the Chapedony metamorphic core complex, Central Iran: Implications for the Eurasia–Arabia collision. *Tectonophysics*. 524: 100–107.](#)

[Mazhari, S.A., Klötzli, U., and Safari, M., 2020, U–Pb geochronology, petrogenesis and tectonomagmatic evolution of uppermost Neoproterozoic– lower Cambrian intrusive rocks in Kaboodan area, NE of Iran. *International Geology Review*, 62916\): 1971–1987 <https://doi.org/10.1080/00206814.2019.1681029>.](#)

[Meert, J.G., 2001, A Synopsis of Events Related to the Assembly of Eastern Gondwana. *Meert* 04/27/01 3:43.](#)

- Mehdipour Ghazi J., and Moazzen, M., 2015, geodynamic evolution of the Sanandaj-Sirjan zone, Zagros orogen, Iran. *Turkish Journal of earth Sciences*. 24: 513-528.
- Mehdipour Ghazi, J., and Moazzen, M., 2024, Cadomian Iron ore bodies in the Bafq-Saghand metallogenic province, Iran: genetic constraints from field observations and laser ablation ICP-MS mineral studies, *International Geology Review*, DOI: 10.1080/00206814.2023.2238210
- Monazzami Bagherzadeh, R., Karimpour, M.H., Farmer, G.L., Stern, C.R., Santos, J.F., Rahimi, B., Heidarian Shahri, M.R., 2015, U–Pb zircon geochronology, petrochemical and Sr–Nd isotopic characteristic of Late Neoproterozoic granitoid of the Bornaward Complex (Bardaskan-NE Iran). *Journal of Asian Earth Sciences*, 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jseaes.2015.05.019>.
- Nutman, A.P., Mohajjel, M., Bennett, V.C., and Fergusson, C.L., 2014, Gondwanan Eoarchean– coproterozoic ancient crustal material in Iran and Turkey: zircon U– Pb–Hf isotopic evidence. *Canadian Journal of Earth Sciences*. 51(3): 272–285.
- Rahmati-Ilkhchi, M., Faryad, S.V., Holub, F.V., Kosler, J., and Frank, W., 2009, Magmatic and metamorphic evolution of the Shotur Kuh metamorphic complex (Central Iran). *International Journal of Earth Science (Geol Rundsch)*. DOI 10.1007/s00531-009-0499-0
- Ramezani, J., and Tucker, R.D., 2003, The Saghand Region, Central Iran: U–Pb geochronology, petrogenesis and implications for Gondwana Tectonics. *American Journal of Science*. 303(7): 622–665.
- Shafaii Moghadam, H., Li, X.H., Stern, R.J., Ghorbani, Gh., and Bakhshizad F., 2015, 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*. doi:10.1016/j.lithos.2015.11.004.
- Shafaii Moghadam, H., Khademi, M., Hu, Z., Stern, R.J., Santos, J.F., and Wu, Y., 2015, Cadomian (Ediacaran–Cambrian) arc magmatism in the ChahJam–Biarjmand metamorphic complex (Iran): Magmatism along the northern active margin of Gondwana. *Gondwana Research*. 27(1): 439–452.
- Shafaii Moghadama, H., Li, X.H., Stern, R.J., Santos, J.F., Ghorbani, Gh. 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*. <http://dx.doi.org/10.1080/00206814.2016.1166461>
- Shafaii Moghadam, H., Li, X.H., Santos, J.F., Sterne, R.J., Griffin, W.L., Ghorbani, Gh., Sarebani, N., 2017, Neoproterozoic magmatic flare-up along the N. margin of Gondwana: The Taknar complex, NE Iran. *Earth and Planetary Science Letters* 474 (2017) 83–96. <http://dx.doi.org/10.1016/j.epsl.2017.06.028>
- Shafaii Moghadam, H., Li, Q.L., Griffin, W.L., Li, X.H., Karsli, O., Spencer, Ch. J., Santos, J.F., Kirschenbaur, M., Nasir, S., O'Reilly, S.Y., 2023, Neoproterozoic to early Paleozoic crustal growth, recycling, and the changing geodynamics of North Gondwana. *Gondwana Research* (2023). doi: <https://doi.org/10.1016/j.gr.2023.09.006>
- Shakerardakani, F., Neubauer, F., Masoudi, F., Mehrabi, B., Liu, X., Dong, Y., Mohajjel, M., Monfaredi, B., Friedl, G., 2015. Pan african 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, 146–171
- Shahzeidi, M., Moayyed, M., Murata, M., Yui, T.F., Arai, A., Chen, F., Pirnia, T. and Ahmadian J., 2016, Late Ediacaran crustal thickening in Iran: Geochemical and isotopic constraints from the ~550 Ma Mishu granitoids (northwest Iran). *International Geology Review*. <http://dx.doi.org/10.1080/00206814.2016.1198728>
- Stöcklin, J., 1968, Structural history and tectonics of Iran; a review, *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*. 52(7): 1229-1258.
- Verdel, C., Wernicke, B.P., Hassanzadeh, J., and Guest, B., 2011, A Paleogene extensional arc flare–up in Iran. *Tectonics*. 30: 3008–3302.
- Yassaghi, A., and Masoodi, M., 2011, A Metamorphic Core Complex Model for the Host of Uranium Mineralization in the Khoshoumi Mountain, Central Iran. *Resource Geology*. 61(3): 259–269. doi: 10.1111/j.1751-3928.2011.00162.x
- Zolala, F., Alipour-Asll, M., Sadeghian, M., Ghasemi, H., Zhai, M., Amidimehr, E., 2025, Mineralogy, geochemistry, and petrogenesis of iron oxide-apatite ores in the Bafq mining district, Central Iran: Proposed a new tectonic setting for mineralization. *Journal of Geochemical Exploration*, 275, 107785.