



RESEARCH ARTICLE

10.22067/ECONG.2022.78597.1054



Introducing Carbonatites of Bafq Metallogenic Area, Central Iran, Economic Geology of the REEs based on petrology and geochemistry, Unique geodynamic model of continental arc changed to rift in Early Cambrian

Saeed Kolahdani *

M.Sc., Department of Geology, Faculty of Science, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

ARTICLE INFO

Article History

Received: 10 October 2022

Revised: 03 December 2022

Accepted: 04 December 2022

Keywords

Carbonatite

REEs

Trondhjemites

Kiruna Type IOA deposits

Bafq Metallogenic Area-(BMA)

Posht-e Badam Block-(PBB)

Central Iranian Microcontinent-(CIM)

ABSTRACT

Carbonatites are among the rare kind of rocks on this planet. These igneous rocks are included by share of more than 50% carbonate minerals; dolomite, calcite & ankerite. Specific look in petrography and mineralography studies is needed to investigate these rocks, especially for silicates and minor phases from macroscopic as well as to microscopic scales. On the last databases of carbonatites of the world, Iran is represented empty of carbonatites. While there are many unexplored carbonatitic outcrops exists in the Bafq Metallogenic Area, (hereafter BMA). BMA as a significant metallogenic province of Iran, has the largest cluster of riftogenic Kiruna-type Iron Oxide-Apatite (IOA) deposits in the world, its iron resources are estimated over 2 bt in 50 aeromagnetic anomalies. The geological story of BMA at the middle of Posht-e Badam Block (hereafter PBB) is magnificently beautiful. The BMA recorded the oldest major geological events in Central Iranian Microcontinent (hereafter CIM). From the early years of field surveys and published geological maps to recent works which are cited in thousands of papers and dissertations, subvolcanic mineralized carbonatite intrusions within metamorphic complexes and trondhjemites of before Middle Cambrian age in the area, mistaken for marble interlayers, limestone enclaves or just non-important sedimentary carbonate rocks. In spite of the brief hints that carbonatites are related to the huge (IOA) mineralization in the area which is available in the old papers, unfortunately these rocks still remained invisible, even in the new studies. In here, on the basis of provided field and petrography evidences as well as to depicted petro-chemical diagrams, the nature of carbonatites of the area is discussed from different geological aspects. In fact, carbonatites are the most important riftogenic units in lithological columns of PBB, specifically in BMA. These naked virgin multiple peaks should get under the detailed study in the aim for valuable exploration potential of REEs. Moreover, these rocks provide a magnificent case of geodynamic investigation about the Earth history which has occurred during the changing season of Proterozoic to Phanerozoic. CIM is located at the heart of the greatest orogen in the world; The Alp-Himalaya orogenic belt in between Gondwana & Eurasia Paleo-Supercontinents. During late Precambrian to Early Cambrian, the study area had suffered by complicated gigantic orogenic phases. The late units of the phenomena described here unconformably overlaid by the Middle Cambrian trilobite-bearing Mila Formation. Thereupon, the unique, and major geological incidents of BMA have occurred right before Biological Big Bang which is also known as the Cambrian Life Explosion, beneath the only great ice grip of the planet throughout its entire history.

* Corresponding author

Saeed Kolahdani

✉ GSK199@gmail.com

How to cite this article

Kolahdani, S., 2022. Introducing Carbonatites of Bafq Metallogenic Area, Central Iran, Economic Geology of the REEs based on petrology and geochemistry, Unique geodynamic model of continental arc changed to rift in Early Cambrian. *Journal of Economic Geology*, 14(3): 1–35. (in Persian with English abstract) <https://doi.org/10.22067/ECONG.2022.78597.1054>



©2022 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers.

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

The broadly studied BMA at the middle of PBB, is the most important sub-zone of CIM. BMA is encompassing the highly mineralized part of PBB which its mineral resources is exploiting for decades. Numbers of world-class mines for multiple types of Fe-Mn/Fe/Fe-U-Th-Ti-REE/Fe-P/P and Pb-Zn deposits are active in the area. The carbonatites of BMA were emphasized generally in one paper by Samani (1988). In that country scale work, 3 carbonatite zones are outlined on the map of BMA but except for field descriptions, he didn't offer valid geochemical data. Likely because lack of this information, still there is not even a single mark of carbonatites placed in Iran. This is while there are numerous outcrops of these REE-enriched rocks exist in BMA.

Except for Samani (1988), on all geological maps and researches published from the area since the beginning of surveys in the 70th to recent publications, the important subvolcanic carbonatites were mistaken for sedimentary dolomites, minor marble interlayers of Precambrian metamorphic complexes and outcrop scale enclaves of limestone within trondhjemites, (Haghipour et al., 1977; Ramezani and Tucker, 2003; Rajabi et al., 2014). Here, carbonatites with their ultrabasics en suites described to be the riftogenic intrusives within all pre-Early Cambrian units that acted as the magmatic source of massive Kiruna-type Fe-P (IOA) deposits. Along with the interpretation of geodynamic evolution of arc to rift setting having major IOA mineralization, the clarity of first-hand evidences provided for subvolcanic dikes indicate to possibility of major carbonatite bodies close to the recent surface of BMA.

On the concept of carbonatite anatomic scheme, it is discussed how subvolcanic dikes in BMA may constitute uppermost level of magmatic chambers that could be connected to huge coarse grain intrusives as a high potential target for strategic REE resources.

Materials and methods

After presenting lithological evidence obtained from field surveys and petrography studies, geochemical analysis data are given for 5 selected crystalline samples. Plotting discriminative diagrams and REE

normalization to chondrite has confirmed carbonatite genesis.

In trust to geochemical data and Zircon U-Pb geochronological ages given for granitoids of BMA available in the most cited paper of Ramezani and Tucker (2003), several petrological diagrams are discussed which are not presented in the original research. Achieved results have beautifully defined consecutive rapid change of the continental margin subduction system to a mature continental rift setting with carbonatite magmatism and massive IOA metallogenesis during the Early Cambrian at the Gondwana margin.

Results

In this research via interpretation of petrology and geochronology, it is debated how younger tholeiitic trondhjemites formed due to the metasomatic melting of continental crust by ascending and localization of carbonatite-ultrabasic plumes.

Overlapping to a zone of continental arc magmatism, the extreme riftogenic phase with its IOA mineralization happened short after the localization of arc-type granite and granodiorites. In such an environment, the thermal gradient in the basement should have overheated dramatically that led to originating of metasomatitic trondhjemites.

All published scenarios for the BMA are re-evaluated to assemble this theory. The hypothesis of drastic change from subduction-related continental arc granitoid system to a back-arc basin that progressively evolved to a continental rift with fertile carbonatites which occurred from 533 to 529-525 Ma in Early Cambrian, is reasonably accountable for the area which seems to be a unique example of a tectono-magmatic phenomenon in the world.

Therefore, the presence of barren arc-type granitoids and mineralized carbonatite suites having major Fe-P deposits only across 50 km width, could be explained not only as a world-class untouched potential zone for REE prospecting, but also as an outstanding opportunity to study the geodynamic evolution of the planet Earth.

Discussion and conclusion

After all, it could be said that before the current study, Carbonatites of BMA not only yet remained unexplored, but have not even been introduced scientifically. Counting on the described facts, it is claimed that a new era of geological surveys and

exploration with the aim for REEs needs to begin in Central Iran which also has a world-class unknown potential of these critical mineral resources.

In a 600km arcuate structural trend across PBB, numerous carbonatite suites already pointed within the geo-units of older than Middle-Cambrian. By reading geological maps matching to airborne geophysical data and RS studies, (ASTER and Geosy images blended with DEM data), a database of prioritized prospects is provided in GIS-3D format.

By a little search on the web about the market status of REEs and the economical conflicts between China as the 90% holder of the world's carbonatitic reserves (Bayan Obo) with the United States as the main consumer of REEs in high-tech industries, and in the other hand, regarding to huge prices of REEs which in some cases reach to thousands of US\$ per Kg, the importance of classified carbonatites of BMA becomes reveal more.

Few of the investigations planned to follow the study are listed below:

1. Providing stable (O, C, S) and all important radiogenic isotope data; for example, the $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ and $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ ratios are essential to discuss the

origin and evolution of carbothermal genesis, and in deeper view of study of upper mantle composition, (Mitchell, 2005).

The role of subducted crustal materials in the origin of carbonatite melts can be investigated by boron isotopes, (Hulett et al., 2016)

2. Selecting the best situations and methods to determine isotopic ages for Carbonatites; Chemical U-Pb dating of primary prismatic apatite in carbonatites is one possible procedure. Sometimes carbonatites show large enough variations in Pb isotope ratios that yield decent isochrons using the $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ method, (Tykot 1993)


3. Compare results with other occurrences in the Alp-Himalaya organic belt; Turkey for example, and to other provinces of the world, especially with Kiruna in Sweden, Fen in Norway and Aley Carbonatites, Canada

4. Revise geological maps and determine the event of carbonatite magmatism on the litho-stratigraphic column of BMA by all updated databases

5. Incorporating carbonatite-ultrabasic phases in a detailed geodynamic model that generates such deep riftogenic suites with respect to calc-alkaline arc magmatism in a close time-space



معرفی کربناتیت‌های ناحیه متالوژنی بافق، ایران مرکزی، زمین‌شناسی اقتصادی عناصر نادر خاکی بر اساس سنگ‌شناسی و زمین‌شیمی، مدل ژئودینامیک خاص تغییر سریع کمان فرورانشی به ریفت قاره‌ای کامبرین آغازین

سعید کلاه‌دانی * 

کارشناسی ارشد، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

| چکیده | اطلاعات مقاله |
|---|---|
| <p>کربناتیت‌ها از جمله نادرترین سنگ‌های کره زمین هستند. این سنگ‌های آذرین حاوی بیش از ۵۰ درصد کانی‌های کربناته، دولومیت، کلسیت و آنکریت هستند. سنگ‌نگاری و مینرالوگرافی کانی‌های سیلیکاته و فرعی این سنگ‌ها در مقیاس ماکروسکوپی و میکروسکوپی نیازمند دید تخصصی است. بر روی آخرین پایگاه داده‌های رقوم کربناتیت‌های دنیا، هیچ موردی از ایران دیده نمی‌شود؛ در حالی که وسعت رخنمون‌های اکتشاف نشده این سنگ‌ها در ناحیه متالوژنی بافق واقع در میانه بلوک پشت‌بادام از خرد قاره ایران مرکزی قابل توجه است. از زمان آغاز پژوهش‌های میدانی و انتشار نقشه‌های زمین‌شناسی تا بررسی‌های پرجاع جدید، تا پیش از این پژوهش، توده‌های نیمه عمیق کربناتیت بارور در هم‌تافت‌های دگرگونی و توده‌های ترونجمیتی^۱ کامبرین آغازین این ناحیه بارها به عنوان میان لایه‌های مرمری، آنکلاوهای آهکی و یا به عنوان کربنات‌های رسوبی در نظر گرفته شده‌اند. با وجود اشاره‌هایی هرچند کوتاه در مقاله‌های قدیمی، مبنی بر ارتباط کربناتیت‌ها با شدت کانی‌سازی آهن-آپاتیت نوع کایرونا^۲ در ناحیه؛ اما این سنگ‌ها همچنان نادیده باقی مانده‌اند. در این پژوهش، با استناد به تصویرهای صحرایی و شواهد سنگ‌نگاری دست اول، ضمن ترسیم نمودارهای پتروشیمیایی شاخص، ماهیت کربناتیتی این سنگ‌ها از جنبه‌های مختلف بحث شده است. در واقع کربناتیت‌ها مهم‌ترین نسل سنگ‌های ریفت کامبرین زیرین بلوک پشت‌بادام و به خصوص ناحیه بافق هستند که باید در مباحث سنگ‌شناسی، مدل‌های ژئودینامیکی و البته از دیدگاه پتانسیل ارزشمند زمین‌شناسی اقتصادی عناصر نادر خاکی^۳ به طور ویژه بررسی شوند.</p> | <p>تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۷/۱۸ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۰۹/۱۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۹/۱۳</p> |
| | <p>واژه‌های کلیدی</p> <p>کربناتیت عناصر نادر خاکی ترونجمیت ذخایر آهن-آپاتیت نوع کایرونا ناحیه متالوژنی بافق بلوک پشت‌بادام ایران مرکزی</p> |
| | <p>* نویسنده مسئول</p> <p>سعید کلاه‌دانی GSK199@gmail.com </p> |

استناد به این مقاله

کلاه‌دانی، سعید، ۱۴۰۱. معرفی کربناتیت‌های ناحیه متالوژنی بافق، ایران مرکزی، زمین‌شناسی اقتصادی عناصر نادر خاکی بر اساس سنگ‌شناسی و زمین‌شیمی، مدل ژئودینامیک خاص تغییر سریع کمان فرورانشی به ریفت قاره‌ای کامبرین آغازین. زمین‌شناسی اقتصادی، ۱۴(۳): ۱-۳۵.

<https://doi.org/10.22067/ECONG.2022.78597.1054>

مقدمه

ناحیه متالورژی بافق، بزرگ‌ترین خوشه معادن آهن نوع کایرونا در جهان را در بردارد، (Förster and Jafarzadeh, 1994). سنگ‌های کربناتیتی این ناحیه در بخش میانی بلوک پشت‌بادام از خرد قاره ایران مرکزی، پیش از این تنها یک‌بار در مقاله‌ای مورد توجه اجمالی قرار گرفته‌اند (Samani, 1988). در مقاله یادشده که به بحث کلی متالورژی پرکامبرین ایران می‌پردازد، سه زون کربناتیتی بر روی نقشه ارائه‌شده برای ناحیه بافق مشخص شده است؛ اما به غیر از تصویرهای صحرایی، داده آنالیز قابل استنادی ارائه نشده است. به همین دلیل، در ادبیات روز زمین‌شناسی بین‌المللی و از همه مهم‌تر از نظر زمین‌شناسی اقتصادی عناصر نادر خاکی، کشور ایران همچنان تهی از کربناتیت معرفی می‌شود (Simandi and Paradis, 2018).

در ابتدای همه کتاب‌ها و مقاله‌های مرجع مرتبط با کربناتیت‌ها، یک فصل مشترک دیده می‌شود و آن تأکید بر این نکته است که سنگ‌های آذرین کربناتیتی به آسانی با کربنات‌های رسوبی (دولومیت و سنگ آهک) و یا مرمرهای حاصل از دگرگونی آنها اشتباه گرفته می‌شوند. طبق دسته‌بندی استاندارد، این سنگ‌های آذرین شامل ۵۰ درصد کانی‌های کربناته اولیه با منشأ ماگمایی هستند و تشخیص کانی‌های سیلیکاته فرعی در این سنگ‌ها به ویژه در انواع ریز بلور، نیازمند بررسی‌های سنگ‌شناسی ویژه است. از این رو، بدون شواهد پترولوژیکی، نمی‌توان به طور قطع درباره منشأ این سنگ‌ها بحث کرد. بر اساس داده‌های آنالیز اکسیدهای اصلی و عناصر کمیاب و عناصر نادر خاکی و بر مبنای دستاوردهای چشمگیر ارائه‌شده از شواهد صحرایی، سنگ‌نگاری، سنگ‌شناسی و مدل‌های آناتومی کانساری، در این پژوهش، چنین نتیجه گرفته شده است که کربناتیت‌های ناحیه متالورژی بافق در شمال استان یزد از لحاظ پتانسیل ذخایر عناصر استراتژیک نادر خاکی، جزو اولویت‌های اول اکتشاف عرصه‌های ناشناخته این عناصر حتی در کل دنیا قابل معرفی هستند.

پژوهش ارزشمند رضمانی و تاکر (Ramezani and Tucker,

2003)، ضمن ارائه نقشه زمین‌شناسی کاربردی برای مرکز بلوک پشت‌بادام از خرد قاره ایران مرکزی که با نام ناحیه متالورژی بافق نیز خوانده می‌شود، مشتمل بر ده‌ها مورد آنالیز دقیق سنگ‌شناسی و سن‌سنجی ایزوتوپی U-Pb بر روی کانی زیرکن است که در دانشگاه واشنگتن و MIT آمریکا انجام شده است. پژوهش یادشده با ارائه توصیف‌های صحرایی و تفاسیر سنگ‌شناسی دقیق از زمان انتشار به عنوان مرجع ثابت همه کارهای زمین‌شناسی در بلوک پشت‌بادام شناخته می‌شود. طبق آخرین بررسی، این پژوهش بیش از ۱۰۰۰ مورد در نشریه‌های معتبر، ارجاع دریافت کرده است؛ اما با این حال، در طی نزدیک به ۲۰ سال گذشته و تا قبل از نوشته پیش رو، به نظر می‌رسد که اطلاعات کاربردی موجود در آن مورد بازنگری جدی قرار نگرفته است. در اینجا بر اساس داده‌های آنالیز موجود در پژوهش رضمانی و تاکر (Ramezani and Tucker, 2003)، برای توده‌های گرانیتوئیدی این ناحیه، چندین نمودار سنگ‌شناسی جدید تولید شده است که در اصل پژوهش موجود نیست. ترونجمیت‌ها با وجود تنها ۴ تا ۸ میلیون سال فاصله زمانی نفوذ، سنگ‌شناسی و الگوی بهنجار عناصر نادر خاکی کاملاً متفاوتی از گرانیتوئیدهای کالک آلکالن کمانی دارند. با تفسیر و مقایسه سنگ‌نگاری و سنگ‌شناسی ترونجمیت‌ها مشخص می‌شود که این سنگ‌ها که در همراهی با کربناتیت‌ها دیده می‌شوند، در اصل لوکوتونالیت‌های تولییتی حاصل از ذوب متاسوماتیکی پوسته قاره‌ای هستند که در اثر شار حرارتی ناشی از نفوذ گسترده کربناتیت‌ها و اولترابازیک‌های به شدت داغ به درون محور ریفت پشت‌کمانی و پس از فاز نفوذی گرانیتوئیدهای کالک آلکالن فرورانشی طی پرکامبرین پسین - کامبرین آغازین تشکیل شده‌اند. به این ترتیب، مدل‌های ژئودینامیک ارائه‌شده برای زون بافق در مرکز بلوک پشت‌بادام، طی این بازه زمانی تصویر روشن‌تر و کامل‌تری پیدا می‌کنند. بر اساس بررسی کلیه اطلاعات موجود از تکنومگما تیزم و متالورژی ناحیه فلزازی بافق، چنین نتیجه گرفته می‌شود که در ادامه صعود و جای‌گیری توده‌های عقیم گرانیتی و گرانودیوریتی مرتبط با کمان فرورانشی پرکامبرین پسین در لبه

پشت‌بادام تشکیل شده است که در سال‌های آغازین اکتشاف و استخراج در دهه هفتاد میلادی، مجموع ذخایر آن در بیش از ۵۰ آنومالی بالاتر از ۲ میلیارد تن سنگ آهن پرعیار برآورد شده که یک سوم کل ذخایر آهن ایران را در برداشته است (Förster and Jafarzadeh, 1994).

در ادامه، موقعیت ناحیه متالورژی بافق با بیش از ۱۶۵۰۰ کیلومتر مربع مساحت بر روی نقشه لیتوتکتونیک ایران نشان‌دهنده شده است (شکل ۱). بر روی این نقشه که برای نخستین بار انتشار می‌یابد، تعریف حوضه‌های رسوبی و انواع بلوک‌های تشکیل‌دهنده خرد قاره ایران مرکزی در قلب ابر کوه‌زاد آلپ-همالیا به روز شده است. انواع کمرندهای ماگمایی، افیولیت‌ها و سنگ‌های دگرگونی بر اساس پایگاه داده یکپارچه نقشه‌های ۱:۲۵۰۰۰۰ سازمان زمین‌شناسی ایران تفکیک و به همراه موقعیت دقیق کانسارهای مهم پیاده شده است. موقعیت زمین‌درزها و گسل‌های پی‌سنگی و سایر ساختارهای مهم به کمک تفسیر داده‌های مغناطیس و رادیومتری هوابرد جدید، ارائه شده در پژوهش باسون و همکاران (Basson et al., 2018)، تصحیح شده است. با تفسیر حاصل از تلفیق داده‌های گرانی‌سنجی زمینی و ماهواره‌ای منتشر شده در پژوهش جیمز و همکاران، (Jiménez et al., 2012)، لایه کنتوری ضخامت پوسته قاره‌ای نیز پیاده شده است. در فرایند چندین ساله تولید این نقشه با استفاده از انبوه داده‌های ژئوفیزیکی و دورسنجی، شبکه ساختارها با دید تکنوماگماتیزم و متالورژی بازترسیم شده است که در همراهی با مجموع دیگر عوارض تصحیح شده، درک ژئودینامیک و تکنوماگماتیزم از جمله برای ناحیه بافق در میانه بلوک پشت‌بادام در حاشیه گندوانا را طی تغییر دوره پروتروزوئیک به فانروزوئیک^۴ تسهیل می‌کند. از لحاظ مجموعه پدیده‌های بزرگ و بارز، این بازه زمانی در ادبیات زمین‌شناسی ایران با نام غیر رسمی اینفراکامبرین^۵ نیز شناخته می‌شود که بیشتر در مورد بلوک پشت‌بادام به کار برده شده است (Förster and Jafarzadeh, 1994). رمضانی و تاکر (Ramezani and Tucker, 2003)، در تحلیل محیط ماگماتیزم

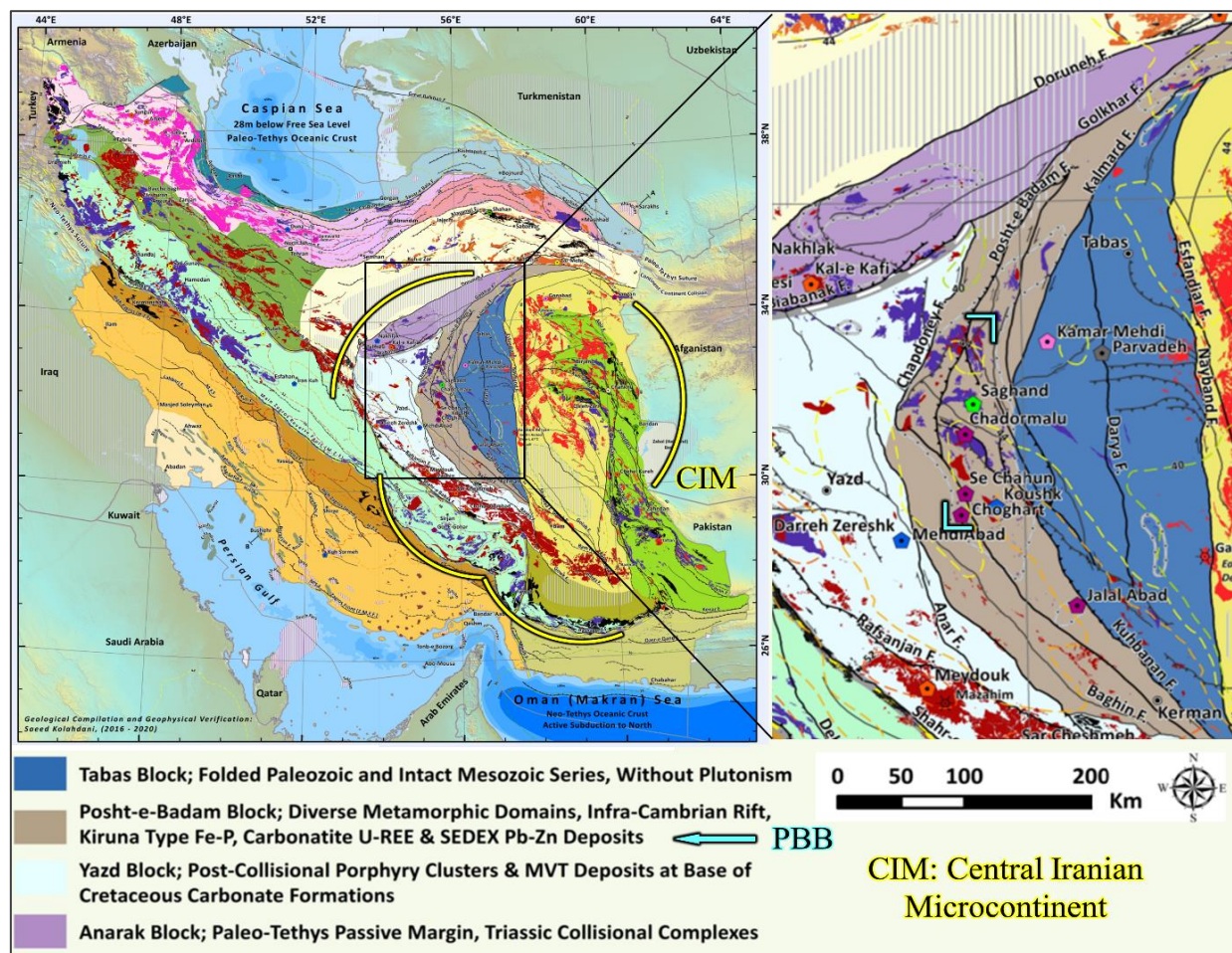
خرد قاره ایران مرکزی، حوضه کشش پشت کمانی طی کامبرین آغازین تا مرحله بلوغ کامل ریفت قاره‌ای و ماگماتیزم اولترابازیک و کربناتیتی تکامل پیدا کرده که فلززایی آهن-آپاتیت و عناصر نادر خاکی را به دنبال داشته است. تا کنون این نحوه تغییر سریع محیط ژئودینامیکی در یک زون زمین‌ساختی باریک به عرض تنها ۵۰ کیلومتر در دنیا معرفی نشده است. بر مبنای شواهد زمین‌شناسی محکم ارائه شده، ناحیه بافق از سه نظر منحصر به فرد است: بزرگ‌ترین خوشه معادن آهن کایرونا در دنیا؛ مدل خاص تغییر کمان به ریفت قاره‌ای و البته به پشتوانه شواهد بحث شده؛ بزرگ‌ترین اجتماع کربناتیتی ناشناخته در جهان که بر اساس مقایسه با پایگاه داده‌های به روز جهانی، ظرفیت بسیار زیادی از کانی‌زایی عناصر نادر خاکی را با اولویت ویژه در بردارد.

با اندک جستجو بر روی اینترنت در مورد وضعیت بازار این عناصر و جنگ اقتصادی بین چین به عنوان دارنده ۹۰ درصد ذخایر کربناتیتی دنیا با ایالات متحده آمریکا که بزرگ‌ترین مصرف‌کننده عناصر نادر خاکی در صنایع پیشرفته است؛ ضمن توجه به قیمت نجومی این عناصر که در برخی موارد تا چند هزار دلار به ازای هر کیلوگرم می‌رسد، اهمیت شناسایی و توجه به کربناتیت‌های ایران مرکزی بیش از پیش آشکار می‌شود. نکته دیگری که مدل ژئودینامیکی و متالورژیکی ناحیه بافق را جالب توجه‌تر می‌کند، هم‌زمانی تمام پدیده‌های عظیم زمین‌شناسی تشریح شده، درست پیش از انفجار زیستی کامبرین و شکوفایی حیات پرسلولی بر روی سیاره زمین است.

جایگاه زمین‌شناسی ناحیه متالورژی بافق در ایران مرکزی

ناحیه مورد بررسی در شمال استان یزد بین شهر بافق در جنوب و پشت‌بادام در شمال واقع شده و در برگیرنده شمار زیادی از معادن مهم آهن ایران از جمله چفارت، چادرملو، سه چاهون و چاه‌گز است. چنان‌که اشاره شد، بزرگ‌ترین و غنی‌ترین تجمع معادن نوع کایرونای جهان در زون متالورژی بافق واقع در مرکز بلوک

کمانی پشت‌بادام، زون زمین‌ساختی کاشمر- کرمان را
تعریف کرده و به نقشه در آورده‌اند؛ اما نام بلوک پشت‌بادام ضمن
استفاده بیشتر، مفاهیم زمین‌شناسی جامع‌تری را در بر می‌گیرد.



شکل ۱. بر روی بریده نقشه لیتوتکتونیک ایران در بخش خرد قاره ایران مرکزی، ناحیه متالوژنی بافق واقع در مرکز بلوک هلالی شکل پشت‌بادام با کادر آبی رنگ نشان داده شده است. این نقشه که به صورت جداگانه برای انتشار مقاله و پایگاه داده رقومی GIS برخط مدنظر قرار دارد، برای انواع تفسیرهای زمین‌شناسی قابل استفاده است.

Fig. 1. On the Litho-Tectonic Map of Iran which is verified by Aeromagnetics, Radiometric and Gravimetric Data, the BMA at the middle of arcuate PBB from CIM is shown by the blue frame. This map is an output of compiled geophysical and geological GIS databases, chosen to be decided to be discuss fully in a separate paper.

اختصاصی مورد توجه سنگ‌شناسی و زمین‌شناسی اقتصادی قرار نگرفته‌اند، بر روی نقشه‌های زمین‌شناسی در مقیاس‌های مختلف و در مقاله‌ها و پایان‌نامه‌های دانشگاهی، یا شناسایی و تفکیک

کربناتیت‌های ناحیه متالوژنی بافق؛ تاریخچه، شواهد
صحرائی و سنگ‌نگاری
کربناتیت‌های موضوع این پژوهش که تا قبل از این به طور

گرانیت گنایس است که در زمره قدیمی‌ترین واحد پرکامبرین ناحیه بافق قرار می‌گیرد. یکی از رخنمون‌های مهم این هم‌تافت در شمال استان یزد، ۴۵ کیلومتری جنوب شهر پشت‌بادام، ۱۸ کیلومتری شمال معدن آهن چادرملو، در غرب ورقه ۱:۱۰۰۰۰۰ زمان آباد و شمال‌شرق کوه تاشک قرار دارد. در پژوهش‌های رضمانی و تاکر (Ramezani and Tucker, 2003)، علاوه بر آنالیز و سن‌سنجی انواع واحدهای آذرین و دگرگونی، توصیف‌های صحرایی و گزارش بررسی مقاطع نازک بسیار خوبی نیز ارائه شده است. در پژوهش‌های یادشده، برای توضیح تقسیم‌بندی هم‌تافت دگرگونی شرقی چنین آمده است:

میان لایه‌های دولومیتی با وجود حجم کم، واحد کلیدی مهمی در هم‌تافت دگرگونی بنه شور در شرق گسل پشت‌بادام هستند. مشاهدات صحرایی مشخص کرده است که مرمرها بیشتر در مرکز واحدهای دگرگونی دیده می‌شوند و هیچ ارتباط توالی خاصی را نشان نمی‌دهند. کانی‌های فرعی موجود در این مرمرها، آپاتیت، فلوگوپیت، ترمولیت، هماتیت-مگنتیت و اکسیدهای تیتان هستند. احتمالاً به دلیل تمرکز بر روی بررسی توده‌های گرانیتوئیدی فراوان موجود در این منطقه وسیع و دور از دسترس که در ادامه مورد تحلیل بیشتر واقع شده‌اند، توجه کافی به این واحدهای دولومیتی معطوف نشده است؛ چرا که کانی‌های فرعی نام‌برده شده برای این مرمرها، در اصل هم‌بافت کانیایی معمول کربناتیت‌ها هستند. وجود آپاتیت همراه با فلوگوپیت و ترمولیت در واحد مرمر با پروتولیت رسوبی به طور مشخص معمول نیست و مثالی از دگرگونی ناحیه‌ای دیناموترمال (هم‌ارز گنایس‌های میزبان) برای دولومیت رسوبی دگرگون‌شده با چنین هم‌بافت کانی‌شناسی بر روی اینترنت موجود نیست.

مشاهده کانی‌های درشت‌بلور ترمولیت، فلوگوپیت و آپاتیت به همراه اولیژیست و مگنتیت که توسط بلورهای کلسیت در بر گرفته شده‌اند و در زمینه دولومیتی پراکنده هستند، در تشخیص صحرایی، استفاده از نام کربناتیت را برای این واحدهای نیمه عمیق مجاز می‌کند. کیفیت مستندهای ارائه‌شده برای نمونه‌های بررسی شده در

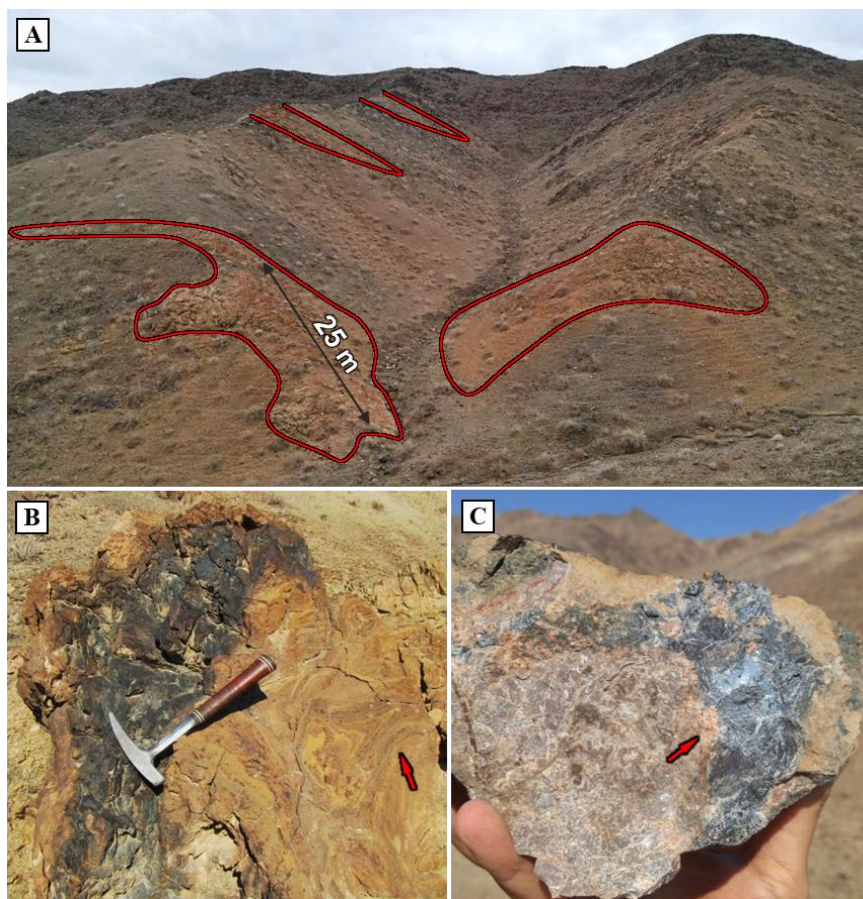
نشده‌اند و یا در صورت تمایز، در قالب توالی‌های مرمری واحد جزو هم‌تافت‌های دگرگونی معرفی شده‌اند. در حادث‌ترین حالت اشتباه پیش آمده، این نفوذی‌های بارور با سنگ آهک‌ها و اغلب دولومیت‌های سری ریزو-دزو بیانگر توالی‌های رسوبی-آتشفشانی حوضه ریفت اینفراکامبرین، یکسان در نظر گرفته شده و به نقشه در آمده‌اند، (Haghipour et al., 1977; Rajabi et al., 2014). اشتباه‌های فراوان از این دست سبب شده است که بررسی زمین‌شناسی این سنگ‌های خاص در گستره وسیع بلوک پشت‌بادام از پایه با مشکل مواجه باشد.

در بین انبوه پژوهش‌هایی که در طول همه این سال‌ها در ارتباط با متالورژی عظیم آهن در ناحیه بافق منتشر شده است، در محدود مواردی به احتمال حضور کربناتیت‌ها اشاره شده است (Daliran, 1994; Förster and Jafarzadeh, 1990). علاوه بر ابعاد وسیع و گسترده آهن‌زایی نوع کایرونا، پدیده کانی‌زایی خاص و جالب توجه دیگر در این ناحیه، وجود معدن آپاتیت ماگماتوژنیک اسفوردی^۶ در شمال شهر بافق است که همانند عمده معادن آهن مجاور، آنومالی عناصر نادر خاکی نیز دارد. با وجود اینکه در پژوهش‌های جدید اشاره‌ای به ارتباط منشأ این کانسار با منشأ کربناتیتی نشده است (Jami et al., 2007; Aftabi et al., 2011; Bonyadi et al., 2009)؛ اما درویش‌زاده، (Darvishzadeh, 1983) اذعان داشته که سیالات آزاد شده از یک منشأ کربناتیتی، عامل غنی‌شدگی شدید فسفر و کانی‌زایی آپاتیت اولیه در این کانسار بوده است. در مجموع، به جز پژوهش سامانی (Samani, 1988)، در پژوهش دیگری حضور کربناتیت‌ها به صورت مشخص مستند نشده است. در ادامه به شواهد ارائه‌شده از کربناتیت‌های ناحیه بافق در پژوهش متالورژی پرکامبرین در ایران، استناد شده است (Samani, 1988).

بیشتر نمونه‌های این پژوهش از دایک‌های نفوذی نیمه عمیق کربناتیتی گزارش می‌شوند که درون هم‌تافت دگرگونی بنه شور^۷ شناسایی و بررسی شده‌اند. هم‌تافت بنه شور با ۵۴۴ میلیون سال سن متشکل از گارنت آمفیبولیت، میکاشیست، گنایس صورتی و

عدم امتزاج فاز اکسیدهای آهن از زمینه کربناتیتی (شکل ۲-ب) و تصویر سطح تازه شکسته دایک کربناتیت دولومیتی با کانی‌زایی رگه اولیژیست خودشکل (شکل ۲-ج) که در شمال شرق کوه تاشک بررسی شده‌اند، آورده شده است.

ناحیه بافق که ساخت آنها در تمام موقعیت‌ها به صورت سیل و دایک است، به خوبی منشأ کربناتیتی را نشان می‌دهد. در ادامه، تصویر صحرایی یک موقعیت پر تراکم از نفوذ نیمه عمیق کربناتیت‌ها (شکل ۲-ا)، تصویر پدیده جدایش به دست آمده از

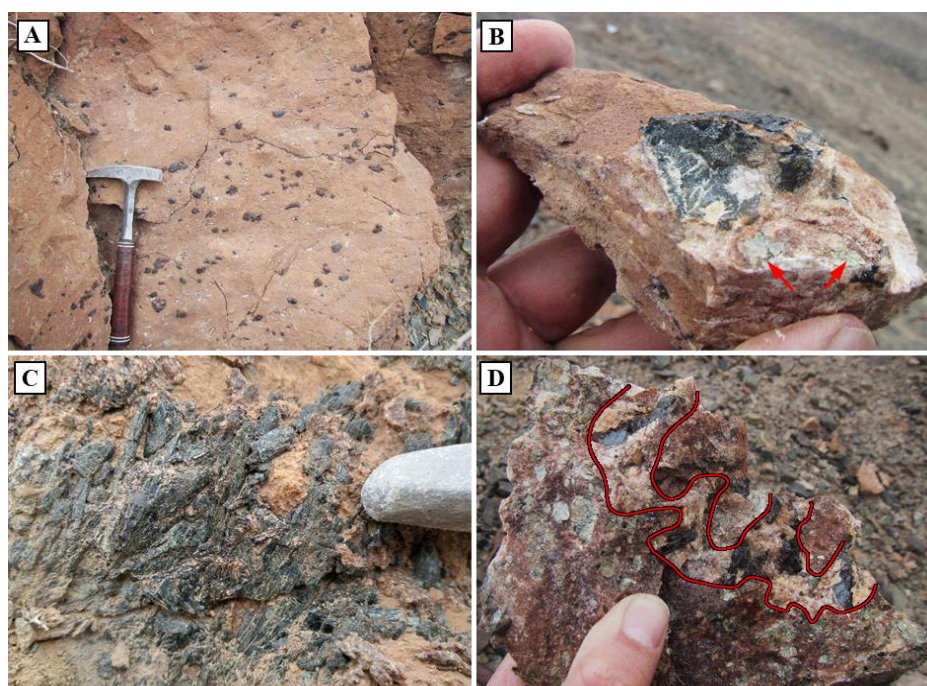


شکل ۲. ا: رخنمون‌های آخراپی رنگ مشخص شده بر روی تصویر، سیل و دایک‌های کربناتیتی با بیشینه ضخامت ۲۵ متر هستند که به طور نامنظم به درون گرانیت گنایس‌های هم‌تافت بنه شور در شمال شرق کوه تاشک نفوذ کرده‌اند، دید به سمت جنوب، ب: رگه اکسید آهن (هماتیت-اسپیکولاریت) به سبب عدم امتزاج شیمیایی از ماگمای رقیق کربناتیتی با حاشیه تدریجی از زمینه دایک جدایش یافته است. ساخت **لایه‌بندی جریانی**^۸ (فلش قرمز) منشأ آذرین سنگ کربناتیتی را به خوبی نشان می‌دهد و ج: در سطح تازه نمونه شکسته‌شده از دایک، رگه‌های متشکل از کانی‌های درشت و شکل‌دار اولیژیست دیده می‌شوند که به همراه کانی‌های فلدسپاتی در حاشیه (آلبیت صورتی رنگ، فلش قرمز) در زمینه متبلور دولومیتی تزریق شده‌اند. همراهی آلبیت و اولیژیست، بازگوکننده منشأ آذرین سنگ کربناتیتی است (برای تصویر پلاژیوکلاز در مقطع نازک به شکل ۴-ب مراجعه شود).

Fig. 2. A: the ocher outcrops with max 25m thickness are carbonatites intruded as dike and sills into the granitic gneiss of Bone-Shurow metamorphic Complex in the NE of Tashk mountain, looking South, B: Fe-Oxides veins (Hematite-Specularite) with transitional margins segregated from the magma in addition to flow banding structure of the dike (red arrow), represents the igneous carbonatite genesis, and C: large euhedral crystals of specularite formed as the veinlet with the pink albite minerals at the margin (red arrow) that cut through the crystalline dolomitic matrix, confirms the carbonatite, (for Plagioclase in thinsection photomicrographs see Fig. 4-B).

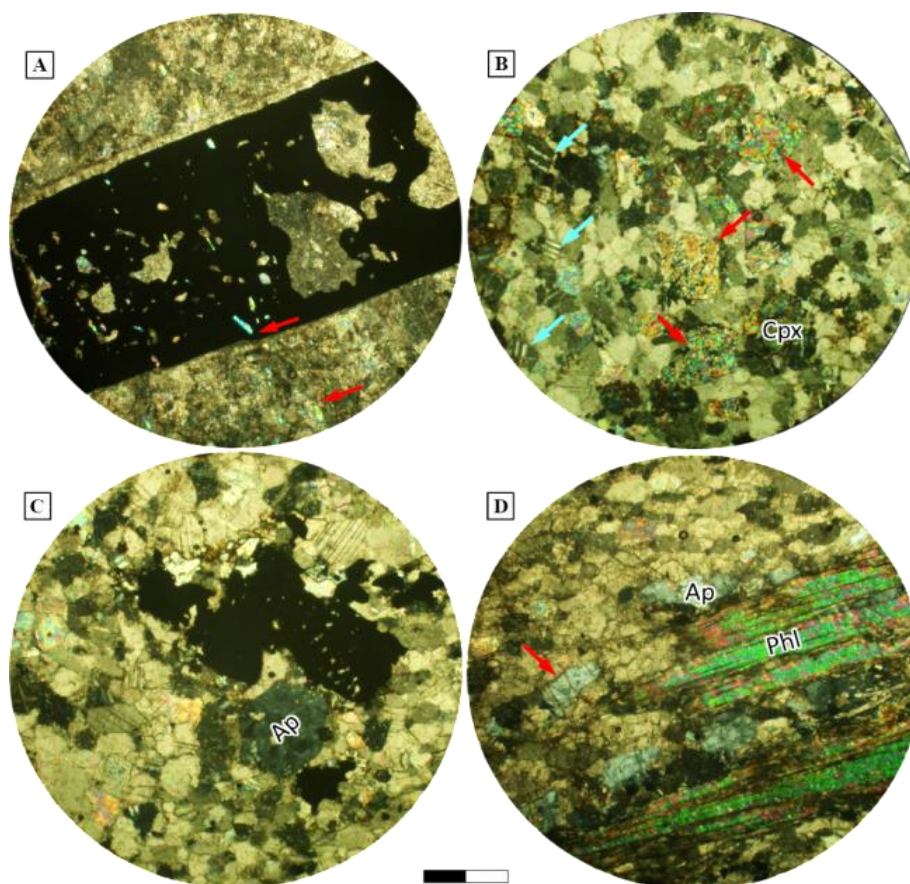
سدیک به عنوان سیلیکات‌های فرعی (شکل ۴-۲)، تصویر هم‌فازی منشور آپاتیت خودشکل با کانی‌زایی فلزی (شکل ۴-۳) و تصویر مقطع نازک از درصد بالای حضور آپاتیت و فلوگوپیت در زمینه یک نمونه کربناتیت کلسیتی غنی از عناصر نادر خاکی آورده شده است (شکل ۴-۴).

پس از آن، تصویر ریخت‌شناسی سطح یک مورد دایک (شکل ۳-۳) به همراه تصویرهای نما نزدیک نمونه‌های ماکروسکوپی با کانی‌شناسی و کانی‌زایی شاخص کربناتیت آورده شده است (شکل ۳-۳، C و D). در پایان این بخش، فتومیکروگراف‌های مقاطع نازک ارائه شده است. تصویر هم‌فازی کانی‌زایی فلزی با فلوگوپیت (شکل ۴-۳)، تصویر کلینوپیروکسن و پلاژیوکلاز



شکل ۳. تصویرهای نما نزدیک گرفته شده از نمونه‌های کلیدی کربناتیت‌های بررسی شده در شمال شرق کوه تاشک، A: مگنتیت‌های پراکنده (تا ۳ سانتی‌متر) و فلوگوپیت‌های سبز کم رنگ به عنوان فاز کانایی اصلی در سطح دایک کربناتیتی مشخص هستند، B: رگچه‌ها و لکه‌های کلسیتی که به صورت هم‌فاز در متن کانه مگنتیت تشکیل شده‌اند، منشأ ماگمایی کانی‌سازی را تبیین می‌کنند. فلوگوپیت‌ها نیز با فلش قرمز مشخص شده‌اند، C: آگرگات ترمولیت که به عنوان آمفیبول کلسیک در کربناتیت‌ها معمول است، در سطح هوازده سنگ مشخص است. مقیاس استفاده شده نوک چکش زمین‌شناسی است و D: بلورهای درشت فلوگوپیت، آمفیبول و آپاتیت تا اندازه یک سانتی‌متر، بیش از ۵۰ درصد متن سنگ را تشکیل می‌دهند. مرز تزریق رگه کلسیت پنوماتولیت تأخیری حاوی کانی‌های فلزی درشت مشخص شده است. این نمونه به شماره SK-1، تنها کربناتیت کلسیتی در مجموعه آنالیز است که کانی‌سازی پرعیار REE دارد (همچنین به جدول ۱، شکل ۴، شکل ۹ و شکل ۱۱ مراجعه شود).

Fig. 3. close up images of studied carbonatites from NE of Tashk mountain, A: scattered magnetite patches (up to 3 cm) and large abundant weathered phlogopite minerals are visible at the surface of the carbonatite dike, B: calcite veinlets within the exsolved magnetite phase are a direct witness of the igneous nature of mineralization and the carbonatitic origin, phlogopites are also shown by red arrow, C: the aggregate of tremolite as the common calcic amphibole in carbonatites is visible at the surface of dike, the tip of hammer as scale, and D: phlogopite, amphibole and apatite crystals up to 1 cm are forming more than 50% of the matrix, the contact of late penomatolic calcite veinlet with mineralization of metallic phases is shown. This sample is SK-1, the only calciocarbonatite which has strong REE mineralization, (also refer to Table 1, Fig. 4, Fig. 9 and Fig. 11).



شکل ۴. فتومیکروگراف‌های حاصل از بررسی مقاطع نازک تهیه‌شده از کربناتیت‌های شمال‌شرق کوه تاشک. تمام تصویرها در XPL ثبت شده‌اند. مقیاس ارائه‌شده برای تصویر A، معادل ۵۰۰ میکرون و برای سایر تصویرها معادل ۲۵۰ میکرون است. A: قطعه‌های کوچک کانی‌های فلوگوپیت (فلش‌های قرمز)، در متن کانی فلزی ضمن حضور پراکنده به میزان ۷ درصد در زمینه کربناته ریز بلور بیانگر منشأ نفوذی سنگ کربناتیت است، B: کلینوپروکسن‌های (آژرین؟) با فراوانی ۱۵ درصد (فلش‌های قرمز) و پلاژیوکلازها سدیک با فراوانی ۷ تا ۱۰ درصد (فلش‌های آبی) که در زمینه دولومیتی پراکنده‌اند، هم‌فازی این کانی‌ها و منشأ آذرین کربناتیت را بازگو می‌کنند، C: مقطع عرضی منشور کامل کانی آپاتیت به رنگ آبی تیره در مجاورت کانی فلزی که توسط زمینه کربناته در برگرفته شده‌اند، به طور مشخص بیانگر تشکیل آذرین این مجموعه کانی‌سازی از مذاب قلیایی و رقیق کربناتی است و D: حاشیه آپاسیته بلورهای درشت فلوگوپیت بیانگر اکسایش حرارتی کانی‌ها در هنگام سردشدن نهایی سنگ است. کانی‌های آپاتیت آبی رنگ نیز با فراوانی حدود ۲۰ درصد مشاهده می‌شوند. این تصویر متعلق به نمونه SK-1 است که با کمترین درصد اکسید منیزیم از نوع کلسیو کربناتیت است (جدول ۱). علائم اختصاری از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده‌اند (Ap: آپاتیت، Cpx: کلینوپروکسن، Phl: فلوگوپیت).

Fig. 4. thin section photomicrographs of the studied carbonatites at NE of Tashk mountain, all images are captured in XPL. The scale bar is equal to 500 μm for A, and 250 μm for others. A: scattered fine phlogopites as inclusions in the opaque minerals and the crystalline calcite-dolomite groundmass about 7%, show carbonatite source of intrusive, B: clinopyroxene minerals (agerine? the red arrows) up to 35% and albite minerals in the matrix with 7-10% rate (the blue arrows), seemingly crystallized concurrent to dolomitic matrix, C: plan section of euhedral prismatic dark blue apatite next to the opaque phase introducing syngenetic mineralization in such a dilute carbonatite magma, and D: opacitic rims of large phlogopite beside apatites with 20 % share in calcite matrix confirm the magmatic source of rock as a carbonatite. This is the SK-1 sample that has the lowest MgO% and is the only calcite carbonatite in the analysis data, (Table 1). Abbreviations after Whitney and Evans (2010) (Ap: Apatite, Cpx: Clinopyroxene, Phl: phlogopite).

جدول ۱. نتایج آنالیز XRF و ICP-MS تعداد ۵ نمونه متبلور از کربناتیت‌های بررسی شده در ناحیه متالوژنی بافق

Table 1. Chemical composition of the 5 selected crystalline subvolcanic carbonatite of BMA, using XRF method for major oxides and ICP-MS for trace elements and REEs, (Analyzed in ZarAzma Lab)

| Sample | SK-1 | SK-2 | SK-3 | SK-4 | SK-5 |
|---|-------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| XRF Results; Major Oxides (%) | | | | | |
| SiO ₂ | 1.7 | 1.25 | 0.84 | 1.23 | 1.11 |
| TiO ₂ | 0.078 | 0.073 | 0.05 | 0.055 | 0.459 |
| Al ₂ O ₃ | 0.91 | 0.55 | 0.03 | 0.05 | 3.96 |
| Fe ₂ O ₃ | 0.54 | 2.48 | 2.61 | 3.25 | 90.86 |
| MnO | 0.113 | 0.203 | 0.23 | 0.212 | 0.158 |
| MgO | 0.45 | 12.61 | 12.46 | 11.68 | 2.19 |
| CaO | 35.27 | 29.11 | 39.12 | 39.63 | 1 |
| Na ₂ O | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.17 | 0.01 |
| K ₂ O | 0.03 | 0.04 | 0.06 | 0.04 | 0.4 |
| P ₂ O ₅ | 0.842 | 2.091 | 4.571 | 4.397 | 0.065 |
| LOI | 28.56 | 27.55 | 39.24 | 38.43 | 0.21 |
| Total | 80.823 | 86.007 | 99.95 | 99.814 | 101.04 |
| ICP-MS Results; Selected Minor Elements & REEs (ppm) | | | | | |
| Ba | 2540 | 4488 | 1579 | 482 | 2825 |
| Ce | >1% | 1944 | 1852 | 1547 | 2103 |
| Dy | 19.7 | 15.49 | 22.37 | 18.69 | 28.35 |
| Er | 10.91 | 6.23 | 8.67 | 6.72 | 10.64 |
| Eu | 38.9 | 23.58 | 27.32 | 23.8 | 34.28 |
| Gd | 175 | 61.03 | 72.61 | 64.57 | 89.49 |
| La | 8156 | 1013 | 872 | 712 | 948 |
| Lu | 0.39 | 0.32 | 0.51 | 0.34 | 0.61 |
| Nb | 36.3 | 30.9 | 90 | 64.6 | 182 |
| Nd | 2661 | 787 | 893 | 777 | 1049 |
| Pr | 974 | 228 | 238 | 202 | 278 |
| Sc | 24.7 | 26.2 | 18.5 | 17.3 | 25.7 |
| Sr | 1872 | 2957 | 3453 | 2791 | 3456 |
| Ta | 0.78 | 0.26 | 2.36 | 1.57 | 3.58 |
| Tb | 8.96 | 4.7 | 6.24 | 5.51 | 7.92 |
| Tm | 0.34 | 0.39 | 0.57 | 0.45 | 0.79 |
| V | 18 | 35 | 49 | 61 | 123 |
| Y | 31.1 | 38.8 | 53.6 | 41.2 | 67.8 |
| Yb | 2.3 | 2.1 | 3.1 | 2.3 | 4.1 |
| ΣREE | >2.54 % | 4151 | 4065 | 3419 | 4648 |

ترونجمیت‌های ناحیه بافق؛ متاسوماتیزم و ذوب پوسته زیرین طی نفوذ کربناتیت‌ها

به غیر از همتافت دگرگونی بنه شورو، نفوذی‌های نیمه عمیق کربناتیتی نیز در درون توده‌های ترونجمیتی کامبرین آغازین ناحیه بافق نیز حضور دارند. بزرگ‌ترین رخنمون ترونجمیت‌ها در واحد نام‌گذاری شده با عنوان گرانیت زیریگان در غرب معادن آهن چاه‌گز و چادرملو واقع در نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ آریز وجود دارد (Majidi and Babakhani, 2000). دیگر رخنمون این توده‌ها، گرانیت سفید و گرانیت دوزخ دره واقع در جنوب شهر پشت‌بادام هستند. صرف نظر از عدم نام‌گذاری کربناتیت‌ها، نقشه ۱:۵۰۰۰۰۰ زون بافق- بیابانک، تهیه‌شده توسط حقی‌پور و همکاران (Haghipour et al., 1977)، پس از گذر همه این سال‌ها، هنوز از بهترین نقشه‌های موجود برای ناحیه مورد بحث است. به نظر نویسنده، نقشه بافق- بیابانک جزو بهترین نقشه‌های تهیه‌شده در سطح کشور و تداعی‌کننده همت و چیره‌دستی زمین‌شناسان پیش‌کسوت ایران زمین است.

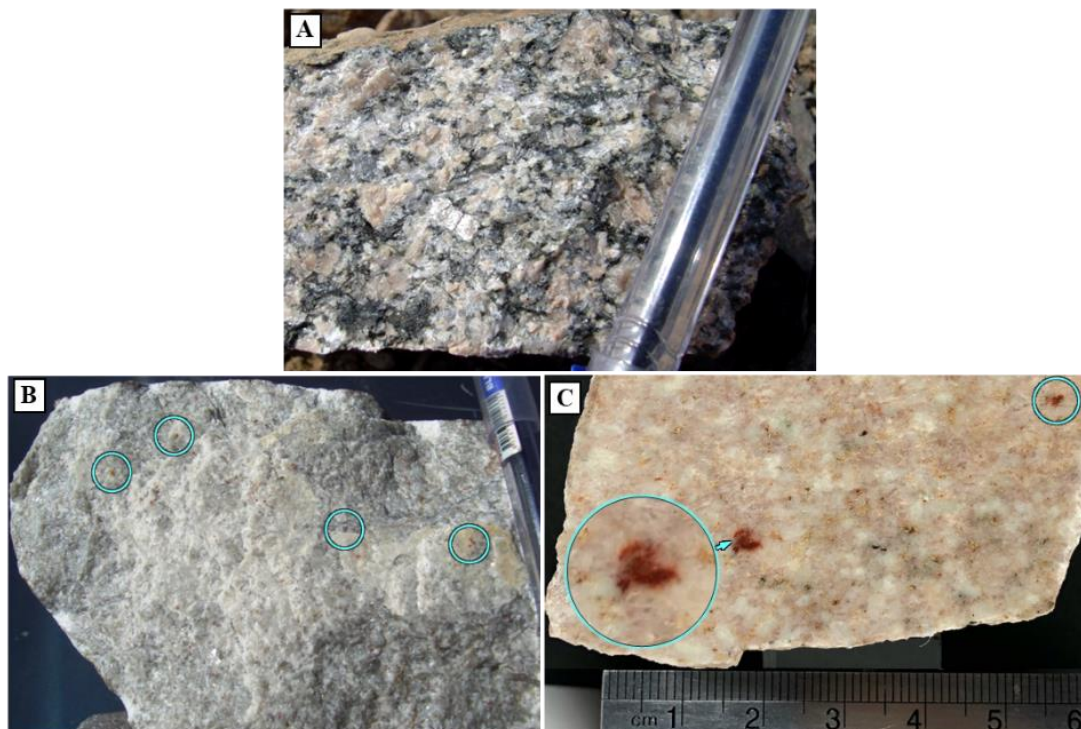
رضایی و تاکر (Ramezani and Tucker, 2003)، به تعیین منشأ و سن‌سنجی توده‌های گرانیتی، گرانودیوریتی و ترونجمیتی این ناحیه پرداخته و همه این توده‌ها را از نوع سری مگنتیتی مرتبط با کمان حاشیه قاره ایران مرکزی طی پرکامبرین پسین- کامبرین آغازین معرفی کرده‌اند؛ اما با نگاه دقیق‌تر ترونجمیت‌ها از گرانیت‌ها و گرانودیوریت‌ها مستثنی هستند. نخستین مؤلفه تفکیک نسل‌های متفاوت این توده‌ها، تباین بارز پذیرفتاری مغناطیسی^۹ در آنهاست. این مؤلفه برای ترونجمیت‌ها بسیار پایین و در حدود نزدیک به صفر با بیشینه مقدار $10^{-3} \times 0.2$ در مقیاس SI اندازه‌گیری شده است؛ اما این مقدار برای گرانیت‌ها و گرانودیوریت‌ها تا نزدیک به 0.6 بالا می‌رود که بازگوکننده تعلق آنها به سری مگنتیتی در مقابل سری ایلمنیتی ترونجمیت‌هاست. ترونجمیت در حقیقت یک نفوذی اسیدی لوکوکرات و بدون کانی‌های فرومیزین است که فلدسپارهای غیر قابل تمایز^{۱۰} آن در

زمینه سنگ، ترکیب به شدت سدیک (آلیتی) دارند (Ramezani and Tucker, 2003). از لحاظ ترکیب غنی از پلاژیوکلاز سدیک، این سنگ‌ها بر روی نمودار نام‌گذاری شیمیایی در حریم توانالیت جای می‌گیرند. این نفوذی‌های ریز بلور به علت ظاهر سفید رنگ از دیگر گرانیت‌های زون بافق و بلوک پشت‌بادام بر روی تصویرهای ماهواره‌ای و در صحرا به آسانی قابل تفکیک هستند. در ادامه، کانی‌شناسی ماکروسکوپی یک نمونه گرانیت کالک‌آلکان (شکل ۵-A) با دو نمونه ترونجمیت از منطقه دوزخ دره و واحد نفوذی زیریگان در غرب معدن چادرملو مقایسه شده است (به ترتیب شکل ۵-B و C).

آلیت‌های قرمز که گاه به صورت رگه‌ای هم دیده می‌شوند، از شاخصه‌های متمایزکننده اصلی ترونجمیت‌های ناحیه بافق هستند که عامل ایجاد رنگ صورتی در این سنگ‌ها نیز هستند؛ در حالی که در نبود کامل ارتوز، فلدسپات آلکان این سنگ‌ها از نوع میکروکلین است. رنگ قرمز آلیت‌ها در اثر بافت مالگاشیتی و جانشینی اکسیدهای آهن در بین ماکل پلی‌سنتیک این کانی‌ها ایجاد شده است که با زمینه اسیدی سنگ در حال واکنش انحلالی هستند (Shang et al., 2004).

گل‌کرم و همکاران (Golokaram et al., 2011)، با بررسی تعداد زیادی مقطع نازک و آنالیز زمین‌شیمی از ترونجمیت زیریگان نتیجه گرفته‌اند که این توده‌ها در اثر فرایند متاسوماتیزم تشکیل شده‌اند و منشأ ماگمایی عادی ندارند.

بافت این ترونجمیت‌ها دانه‌ای پورفیری است. آلکالی فلدسپات، کوآرتز و آلیت کانی‌های اصلی تشکیل‌دهنده این سنگ‌ها هستند. زیرکن، اسفن، موناژیت و اکسیدهای آهن کانی‌های فرعی هستند و سربیسیت، کلریت، اپیدوت، کانی‌های رسی و کربنات‌ها کانی‌های ثانویه ترونجمیت‌ها را تشکیل می‌دهند. دیگر ویژگی این سنگ‌ها، بافت میرمکیتی و گرانوفیری زیاد و شاخص در بررسی مقاطع نازک است.



شکل ۵. مقایسه تصویب‌های سطح تازه شکسته یک نمونه گرانیت کالک‌آلکالن و ترونجمیت‌های تولیتی کامبرین آغازین از مرکز ناحیه متالوژنی بافق. A: به علت رنگ صورتی روشن ناشی از بافت دانه‌ای متشکل از کوآرتز، بیوتیت و نسبت مساوی ارتوز - پلاژیوکلاز به میزان ۳۵ تا ۴۰ درصد، سری مگنتیتی غنی از پتاسیم این گرانیت‌ها قابل استنباط است، B: در سطح تازه شکسته ترونجمیت سفید رنگ متعلق به منطقه دوزخ دره، مشخص است که این سنگ بدون کانی‌های آهن و منیزیم‌دار است. نکته کلیدی حضور آل‌بیت‌های سرخ رنگ در زمینه سنگ است (دایره‌های آبی رنگ) که با بافت حاشیه واکنشی به صورت انحلالی در زمینه سنگ پراکنده هستند و C: انحلال بلورهای آل‌بیت سرخ رنگ با بافت مالگاشیتیک در متن فلسیک متشکل از فلدسپار و کوآرتز و سریسیت‌های ثانویه در نمونه ترونجمیت زیرین بیانگر لو کوکرات‌های نوع متاسوماتیت است. طی ارائه شواهد سنگ‌شناسی در ادامه گنایس‌های بنه شور به عنوان منشأ ذوب پوسته قاره‌ای این سنگ‌ها معرفی شده‌اند.

Fig. 5. hand specimen photos of Early-Cambrian arc-type granite and tholeiitic trondhjemites. A: mineral assemblage of pinkish granite composed of quartz, biotite and Feldspars (orthoclase-plagioclase with equal 35 to 40% share) point to the High-K calc-alkaline magnetite series for the arc type granite, B: leucocratic composition without any ferromagnesian minerals, confirms different genesis for trondhjemites, blue circles are red albitic minerals with malgashitic texture in the felsic matrix of quartz and feldspars is such a discriminative key factor that points to metasomatite type of intrusion. Trondhjemites should have absolute different source. In the following, based on petrological evidence it is debated how younger trondhjemites could be originated by extensive metasomatism and partial melting of lower continental basement due to extreme heat flow of ascending riftogenic carbonatite magmas. Granitic gneisses of the Boneh-Shurow metamorphic complex may be considered as the most likely protolith.

پلاژیوکلاز، غیرعادی بودن توالی تبلور و همچنین روند غیرخطی یا قائم در نمودارهای دوتایی هارکر (Harker, 1909)، Na_2O - Ba-SiO_2 و $\text{Rb-SiO}_2 - \text{K}_2\text{O-SiO}_2 - \text{SiO}_2$ را به عنوان منشأ متاسوماتیزم ترونجمیت زیرین بر شمرده‌اند.

این پژوهشگران مواردی همچون نبود شواهد اختلاط ماگمایی و نبود آنکلاوهای مافیک، نبود زونینگ شیمیایی در فلدسپات‌ها، امحاء زونینگ پلاژیوکلازها، جانشین شدن فلدسپات‌های آلکالن به جای پلاژیوکلاز از حاشیه و یا لکه‌های فلدسپات آلکالن درون

و مولر و همکاران (Müller et al., 1992) ارائه و بحث شده است (شکل B-7 و D). به عنوان یکی از شواهد پترولوژیکی مستدل، نمودار عنکبوتی بهنجار عناصر نادر خاکی^{۱۱} این سنگ‌ها نیز بر اساس پژوهش بایوتون (Boynton, 1984) ترسیم شده است که در کنار دیگر شواهد، تفسیر سنگ‌شناسی جالبی را نشان می‌دهد (شکل ۸).

در نمودار شکل ۸، دیده می‌شود که بازه تغییر مقادیر بهنجار شده عناصر نادر خاکی سبک در مقابل عناصر سنگین برای گرانیته‌ها و گرانودیوریت‌ها با شیب نرمال به سمت عناصر سنگین‌تر، به ترتیب بین حدود ۱۰۰ تا حدود ۱۰ تغییر می‌کند. میانگین نسبت La/Yb در آنالیز این توده‌ها بر حسب ppm معادل ۱۹/۷ است. این ویژگی‌ها به همراه تهی‌شدگی شاخص یوروپوم که شاهد جدایش پلاژیوکلازهای کلسیک طی صعود مذاب‌های کمانی است، منشأ فرورانشی این توده‌ها را تأیید می‌کند (Hanson, 1980; Richards, 2007; Karimpour et al., 2021)؛ اما با یک نگاه مشخص است که برای ترونجمیت‌ها علاوه بر تفاوت بارز الگو و مقادیر بسیار پایین‌تر مجموع REE ها، در دو نمونه پیک مثبت یوروپوم و عناصر نادر خاکی سنگین، لوتیوم و ایتربیوم دیده می‌شود.

رضمانی و تاکر (Ramezani and Tucker, 2003) به طور صریح اظهار داشته‌اند که الگوی بهنجار محذب رو به بالا^{۱۲} برای REE ها در ترونجمیت‌ها نمی‌تواند به آسانی با مدل‌های اختلاط و یا تکامل ماگماتیزم کمانی توضیح داده شود؛ اما در نهایت بروز پدیده ریفت در بلوک پشت‌بادام را رد کرده و تنها کمان حاشیه فعال را برای بلوک پشت‌بادام مدنظر قرار داده‌اند. علاوه بر شواهد پترولوژیکی ارائه شده در بالا، مشاهده بافت رورُشدی در کانی‌های زیرکن موروثی^{۱۳} در ترونجمیت‌ها که توسط خود این پژوهشگران مستند شده است، بازگو‌کننده منشأ و شرایط تشکیل متفاوت ترونجمیت‌ها از گرانیته‌های کمانی است.

ترکوف و شارباکوا (Terekhov and Shcherbakova, 2006) با بررسی سنگ‌های پرکامبرین سپر بالتیک به این نتیجه

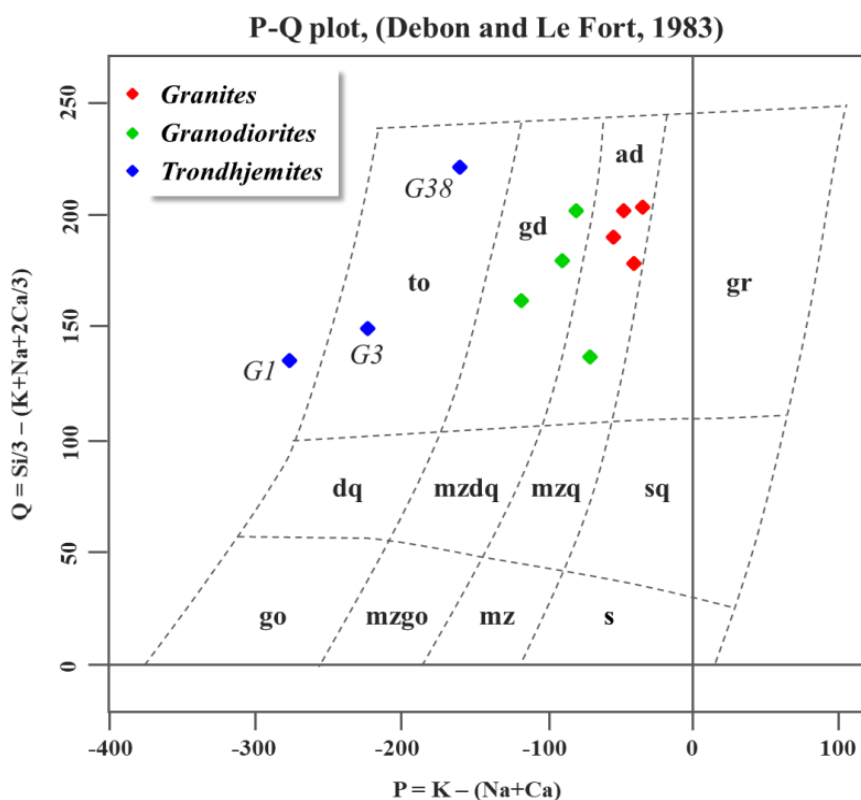
با توجه به سنگ‌شناسی این ترونجمیت‌های غنی از سدیم و از طرفی گستردگی متاسوماتیزم سدیک در ناحیه بافق، فرضیه منشأ متاسوماتیک منطقی به نظر می‌رسد. تشریح زمین‌شیمیایی پدیده متاسوماتیزم سدیک گسترده در ناحیه بافق برای مقاله‌ای مجزا مدنظر است؛ اما در رخنمون‌های زیادی از این ناحیه به ویژه در حاشیه معادن آهن از جمله چاه‌گز، این رخساره متاسوماتیزم حرارت بالا دیده می‌شود که بررسی‌هایی نیز بر روی آنها انجام شده است (Deymar et al., 2018).

در پژوهش رضمانی و تاکر (Ramezani and Tucker, 2003)، تنها به زمین‌شیمی و پتروژنز گرانیته‌ها بر اساس نمودارهای عناصر کمیاب پرداخته شده است و بدون ترسیم و تفسیر نمودارهای نام‌گذاری شیمیایی، تعیین محیط زمین‌ساختی و بهنجار عناصر نادر خاکی که نقش کلیدی در آشکارسازی شرایط تشکیل سنگ‌های آذرین دارند، ترونجمیت‌ها نیز همراه با گرانیته‌ها و گرانودیوریت‌های مرتبط با ماگماتیزم کمانی معرفی شده‌اند. اما با استناد به اصل داده‌های آنالیز موجود در پژوهش یاد شده و ترسیم نمودارهای پترولوژیکی، شواهد بسیار جالبی از منشأ دوگانه همراهی گرانیته‌های کالک‌آلکان در مقابل ترونجمیت‌های تولیتی با فاصله سنی بسیار کم آشکار می‌شود که در مجاورت یکدیگر رخنمون دارند.

نمودارهای ارائه شده در این بخش بر اساس جدول ۲ پژوهش رضمانی و تاکر (Ramezani and Tucker, 2003) رسم شده است. نمودار شکل ۶، یکی از دقیق‌ترین نام‌گذاری شیمیایی سنگ‌های نفوذی بر اساس ترکیب عناصر اصلی است که در مورد گرانیته‌های ناحیه بافق استفاده شده است (Debon and Le, 1983; Fort, 1983). نمودارهای تعیین سری ماگمایی این سنگ‌ها طبق پژوهش‌های پی‌سریلو و تیلور (Peccerillo and Taylor, 1976) و ایروین و باراگار (Irvine and Baragar, 1971) ترسیم شده است (شکل A-7 و C). همچنین تغییرات محیط ژئودینامیکی برای گرانیته‌ها و ترونجمیت‌ها بر اساس نمودارهای شندل و گورتون (Schandl and Gorton, 2002)

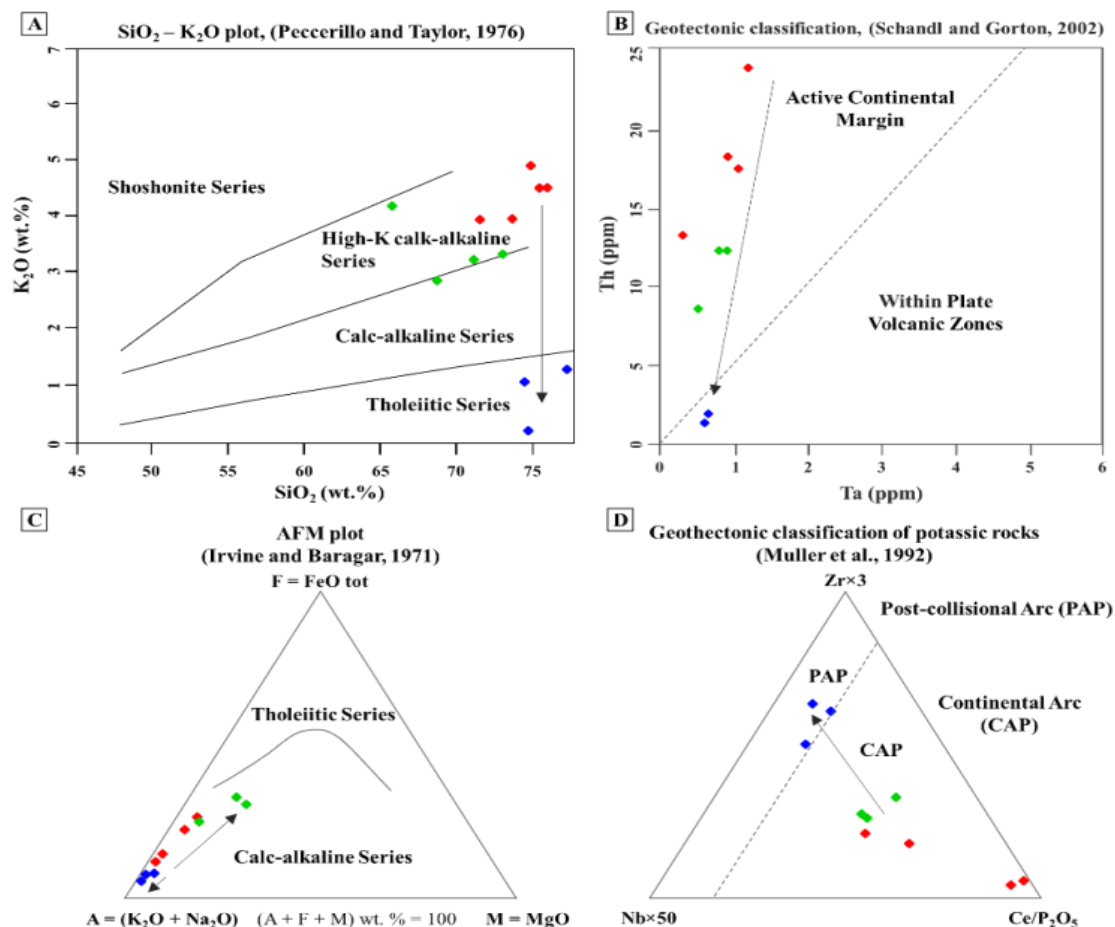
کشش‌شی، با ورود گسترده سیالات احیایی عمیق به زون انتقالی شککننده- شکل‌پذیر، ذوب‌بخشی پوسته و جدایش کنترل‌شده REE ها با الگوی محدب برای ترونجمیت‌ها توجیه می‌شود.

رسیده‌اند که آنومالی مثبت Eu در سنگ‌های لوکوکرات اسیدی حاصل مشارکت سیالات بسیار عمیق در فرایند تشکیل این سنگ‌هاست. در طی هضم پوسته میانی تا زیرین در یک محیط



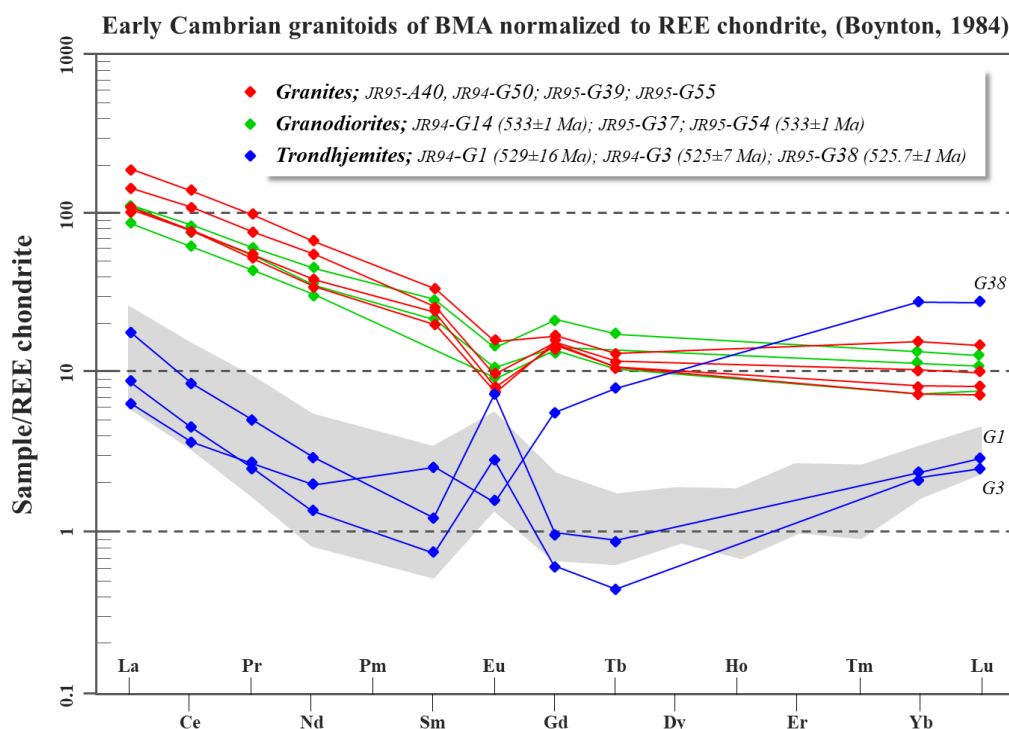
شکل ۶. نمودار نام‌گذاری شیمیایی توده‌های آذرین نفوذی بر اساس ضرایب P-Q است (Debon and Le Fort, 1983) که برای گرانیتوئیدهای ناحیه بافق استفاده شده است. داده‌ها از رضانی و تاکر (Ramezani and Tucker, 2003) اقتباس شده است. مخفف‌های استفاده شده بر روی نمودار به این شرح هستند؛ to: تونالیت، gd: گرانودیوریت، ad: آداملیت؛ این نام بیانگر گرانیتی است که حاوی کوآرتز، بیوتیت یا هورنبلند است و در آن نسبت الیگوکلاز به آلکالی فلدسپار برابر است. با نگاه به تصویر یک نمونه گرانیت کم‌انرژی شاخص از ناحیه (به شکل ۵-A مراجعه شود)، دقت نمودار در نام‌گذاری دقیق نوع گرانیت بارز می‌شود. ترونجمیت‌ها در محدوده تونالیت قرار می‌گیرند که با ماهیت پلاژیو کلاز سدیک آنها همخوانی دارد. پایین بودن ضرایب نمودار در نمونه G1 که با ۸/۴۷ درصد Na_2O سدیک‌ترین مورد و با ۵۲۹ میلیون سال سن، قدیمی‌ترین در بین سه نمونه است، می‌تواند به عنوان شاهد ترکیب غیر نرمال سنگ لوکوکرات اسیدی و ناشی از منشأ متاسوماتیتی ابتدایی در نظر گرفته شود. نشانه‌گذاری دسته‌بندی سنگ‌ها در نمودارهای بعد نیز تکرار شده است. برای سایر مخفف‌ها و توضیح بیشتر نمودارها به راهنمای نرم‌افزار GCD-Kit 3.6 مراجعه شود.

Fig. 6. geochemical plot for naming intrusive rocks based on P-Q ratios used for granitoids of the BMA (Debon and Le Fort, 1983). data from Ramezani and Tucker (2003). the abbreviations used on the chart are as follows; to: Tonalite. gd: Granodiorite, ad: Adamlite; this name is representative of a granite that contains Quartz, Biotite and/or Hornblende and an equal proportion of Oligoclase-Alkali-feldspare, (See Fig. 5-A). Trondhjemites are plotted within the tonalite range which is consistent with their sodic plagioclase-rich composition. Out of range position of G1 as the oldest ssmample (529 ma) with highset Na_2O (8.47%) may represent its immature metasomatic source. For other abbreviations and more descriptions refer to the Manual. Symbols are repeated in the following diagrams.



شکل ۷. نمودارهای سنگ‌شناسی گرانیتوئیدهای ناحیه بافق بر اساس داده‌های رمضانی و تاگر (Ramezani and Tucker, 2003). A: چنان‌که بر روی نمودار دوتایی ضریب آلکالیت مشخص است، برخلاف گرانیتوئیدها که با توجه به منشأ فرورانشی جزو سری کالک‌آلکالن غنی از پتاسیم تفکیک شده‌اند، ترونجمیت‌ها ماهیت تولیتی فقیر از پتاسیم نشان می‌دهند (Peccerillo and Taylor, 1976). B: در برابر گرانیتوئیدها که جزو کمان حاشیه قاره‌ای می‌گیرند، ترونجمیت‌ها متعلق به محیط درون صفحه‌ای منشأ می‌شوند. این نمودار تغییر محیط تکتونوماگمایی از حاشیه فعال به ریفت قاره‌ای را به خوبی تبیین می‌کند (Schandl and Gorton, 2002). C: بر روی نمودار AFM دیده می‌شود که ترکیب گرانیت‌ها تا گرانودیوریت‌ها به سمت رأس F حرکت می‌کند؛ در حالی که ترونجمیت‌ها با کمترین میزان آهن و منیزیم بیشینه غنی‌شدگی از سدیم را دارند که ناشی از ترکیب پوسته‌ای آنهاست (Irvine and Baragar, 1971) و D: ترونجمیت‌ها که جوان‌تر از گرانیت (آداملیت) و گرانودیوریت‌ها هستند، به عنوان توده‌های پس از کوه‌زایی تفکیک شده‌اند. به این ترتیب، تعیین محیط و سری تشکیل متوالی گرانیتوئیدها در فاز کوه‌زایی و ریفت قاره‌ای کامبرین آغازین ناحیه بافق آشکار می‌شود (Müller et al., 1992).

Fig. 7. petrological diagrams for granitoids of BMA based on Ramezani and Tucker (2003). A: On the alkalinity chart (Peccerillo and Taylor, 1976), the tholeiitic composition of trondhjemites vs. High-K calc-alkaline series of granites and granodiorites reveals a strong signature of different magma genesis, B: continental margin and within plate geotectonic setting for generations of granites and granodiorite to trondhjemites are characterized on this diagram respectively (Schandl and Gorton, 2002), C: on the AFM plot the composition of granites to granodiorites move to the F corner while trondhjemites with lowest Fe and Mg content are enriched in Na that represent their crustal source (Irvine and Baragar, 1971), and D: on this diagram, the younger trondhjemites are differentiated as the post-collisional phase rather than arc type granite (adamlite) and granodiorites (Müller et al., 1992). Therefore, successive arc and rift geodynamic settings get accountable for these entangled intrusive rocks.



شکل ۸. نمودار عنکبوتی بهنجار عناصر نادر خاکی (Boynton, 1984)، ترسیم شده برای توده‌های گرانیتوئیدی پرکامبرین پسین - کامبرین آغازین ناحیه متالورژی بافق بر اساس داده‌ها از رضانی و تاکر (Ramezani and Tucker, 2003). سن ایزوتوپی ارائه شده برای نمونه‌ها بر حسب میلیون سال داخل پرانتز آورده شده است. مقادیر ۵ عنصری که ترسیم نشده‌اند، در جدول ۲ آنالیز مقاله مورد ارجاع موجود نیست. با وجود سن نزدیک گرانیت‌ها و گرانودیوریت‌ها (۵۳۳ م.س) نسبت به ترونجمیت‌های جوان‌تر (۵۲۹-۵۲۵ م.س)، الگوی بهنجار کاملاً متفاوت این سنگ‌ها مشخص است. این دوگانگی شدید در ادامه نمودارهای قبل، بیانگر منشأ مجزای این نسل از توده‌ها با وجود فاصله تشکیل بسیار کم آنهاست. حریم خاکستری رنگ داده‌های زمین‌شیمی گل کرم و همکاران (Golkaram et al., 2011)، ۹ نمونه از ترونجمیت زیرگان را نشان می‌دهد که در آزمایشگاه ALS Chemex کانادا آنالیز شده‌اند.

Fig. 8. Chondrite-normalized diagram (Boynton, 1984), for Late Precambrian to Early Cambrian granitoids of BMA. Data from Ramezani and Tucker (2003). The 5 elements that are not plotted are not given in Table 2 of that paper. Available ages (Ma) are mentioned for some samples that are determined by U-Pb zircon dating. Despite relatively close ages for granites and granodiorites (533 Ma), it is clear that the younger trondhjemites (529-525 Ma) showing considerably dissimilar normalization REE pattern which represents them as a separate phase originated from absolutely different magma genesis. The gray field shows the range of geochemical data for 9 samples from Zarigan trondhjemite that were analyzed in ALS Chemex, Canada (Golkaram et al., 2011). These strong dissimilarity, in the following of pervious plots confirms separate sources.

است که از ذوب بخشی رسوبات پلیتی ایجاد شده است. سری تولییتی ترونجمیت‌ها بیانگر عمق کم تشکیل مذاب منشأ و نقش غالب ترکیب پوسته در سنگ‌های آذرین اسیدی است (Richards, 2003; Richards, 2007). مجموع این موارد

فیانکا و کیرینسی یونه (Fiannacca and Cirrincione, 2020)، با بررسی ترمودینامیک تشکیل ترونجمیت‌های جزیره سیسیل ایتالیا چنین بیان داشته‌اند که آنومالی مثبت Eu در کنار مقادیر پایین عناصر HFSE و نسبت بالای Na/K حاصل از مذاب‌های ابتدایی

نفوذی دایک و سیل کربناتیتی در درون ترونجیت‌های منطقه دوزخ دره (شکل ۹-۱)، به همراه تصویر کانی‌شناسی شاخص کربناتیت در سطح تازه نمونه شکسته شده از دایک ارائه شده است (شکل ۹-۲). هم‌یافتی کربناتیت در ترونجیت (شکل ۹)، به خوبی نشان می‌دهد که بدون نگاه دقیق به کانی‌شناسی کربناتیت‌ها، حتی اساتید زمین‌شناسی امریکا نیز می‌توانند در شناخت ماهیت حقیقی این سنگ‌ها دچار اشتباه شوند.

تعیین رده کربناتیت‌های ناحیه متالورژی بافق

تصویرهای ارائه شده در شکل ۱۰، یکی از موقعیت‌های کربناتیتی را نشان می‌دهد که توسط سامانی (Samani, 1988) به عنوان دایک فرو کربناتیت معرفی شده است (شکل ۱۰-۱). این موقعیت دوباره توسط نویسنده مورد بازدید و نمونه‌برداری قرار گرفته است که به دلیل شواهد موجود از نفوذ دایک کربناتیتی به درون واحد مافیک (شکل ۱۰-۲) که واجد بافت دولومیتی متبلور همراه با کانی‌زایی اولیژیست است، شناخت صحیح سنگ‌شناسی کربناتیت در این موقعیت تأیید می‌شود (شکل ۱۰-۳).

به دلیل نبود آنالیزهای معتبر و بدون تحلیل سنگ‌شناسی، احتمالاً سامانی (Samani, 1988) تنها به استناد مشاهد رگچه‌های هماتیت در متن این دایک‌ها و از طرفی متالورژی عظیم آهن در ناحیه بافق، نوع این سنگ‌ها را فرو کربناتیت (کربناتیت آهن‌دار) در نظر گرفته است. شناسه اصلی فرو کربناتیت حضور غالب کانی آنکریت^{۱۴} (کربنات آهن) است؛ در حالی که، کانی اصلی بیشتر کربناتیت‌های بررسی شده در این منطقه دولومیت است. به منظور بررسی زمین‌شناسی و بررسی دقیق سنگ‌شناسی دایک‌های کربناتیتی ناحیه بافق، تعداد ۵ نمونه متبلور و غیرهوازده از این سنگ‌ها انتخاب شده و در شرکت زر آزما^{۱۵} مورد آنالیز قرار گرفته است (جدول ۱).

اعتبار قابل قبول این نتایج به کمک تحلیل آماری مقادیر عناصر در نمونه‌های تکراری، توسط نویسنده بررسی و تأیید شده است. نکته بسیار جالب توجه، هماهنگی سنگ‌شناسی و سنگ‌نگاری با درصد

بیانگر ماگماتیزم درون صفحه‌ای و فرایند ذوب درجه بالای سنگ‌های دگرگونی پوسته زیرین برای منشأ ترونجیت‌های ناحیه متالورژی بافق است.

تمایز آشکار سرشت ترونجیت‌های تولیتی از گرانیتوئیدهای کالک‌آلکان، تفسیر ژئودینامیکی بسیار جالب و منحصر به فردی را ممکن می‌کند. در ادامه، طی بحث مدل ژئودینامیک ناحیه بافق، این نظر مطرح شده است که ترونجیت‌ها در اثر شار حرارتی حاصل از پدیده ریفت و نفوذ کربناتیت‌ها و در طی متاسوماتیزم گسترده و ذوب‌بخشی هماتیت‌های دگرگونی پوسته زیرین تشکیل شده‌اند.

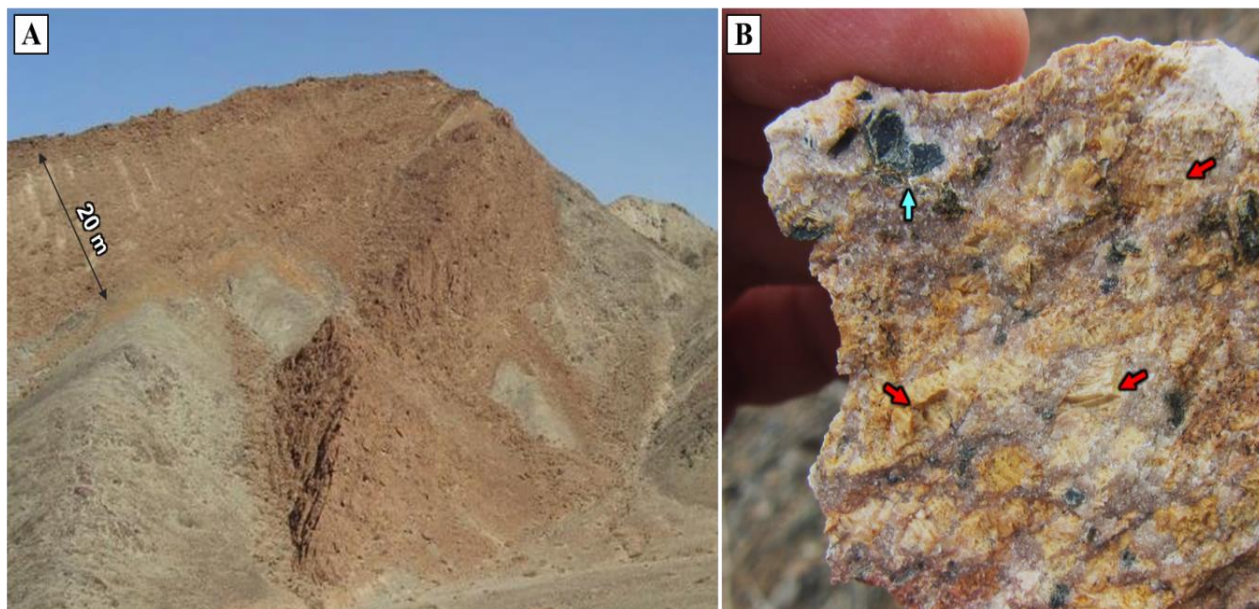
اهمیت در نظر گرفتن ترونجیت‌ها، زمانی بارزتر می‌شود که به توصیف‌های صحرائی ارائه شده برای این سنگ‌ها توجه شود. در پژوهش رضانی و تاکر (Ramezani and Tucker, 2003)، چنین آمده است:

ترونجیت‌های ناحیه با نسلی از دایک‌های مافیک (دیاباز) همراه هستند که با مرز تدریجی و در حجم زیاد در این لوکوگرانیت‌ها تزریق شده‌اند. این پدیده بازگوکننده تزریق فاز مافیک هم‌زمان با سرد شدن ترونجیت‌هاست. در ترونجیت‌زریگان در غرب معدن آهن چاه‌گز، آنکلاوهای از سنگ‌های کربناته نخودی رنگ و به شدت سخت وجود دارد که احتمالاً متعلق به توالی آتشفشانی رسوبی کامبرین آغازین هستند. این آنکلاوها که گاه در ابعاد رخنمون‌های بزرگ دیده می‌شوند، حاوی رگه‌های هماتیتی هستند که گاهی قابلیت استخراج نیز دارند.

با نگاه به تصویرهای ارائه شده از دایک‌های کربناتیتی واجد کانی‌سازی آهن (شکل ۲-۲) به خوبی استنباط می‌شود، آن سنگ‌های آهنی که آنکلاوهای بزرگ از توالی رسوبی انگاشته شده‌اند نیز در حقیقت دایک‌های کربناتیتی هستند که همچون دیابازها در درون ترونجیت‌ها به صورت نفوذی هم‌فاز جای‌گیری کرده‌اند. در این موقعیت‌ها نیز مثل پیش فرض میان لایه‌های مرمری هماتیت بنه شورو، سنگ‌شناسی کربناتیت تشخیص داده نشده و مورد توجه نیز قرار نگرفته است. در ادامه تصویرهای یک سامانه

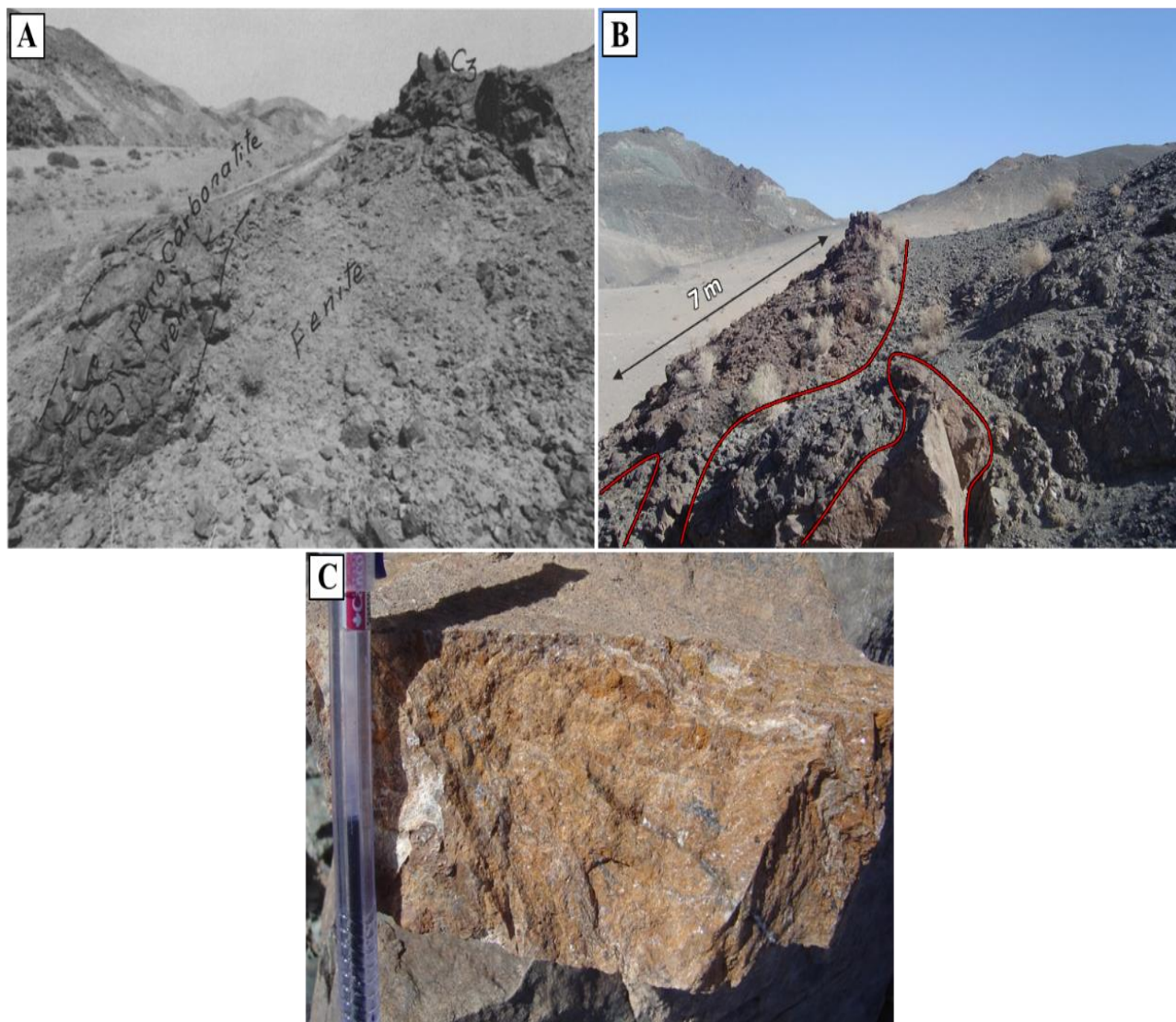
است (شکل ۱۱-A). با توجه به ترکیب زمینه اغلب دولومیتی که توسط بررسی نمونه‌های دستی و سنگ‌نگاری مشخص شده است (شکل ۲، شکل ۳ و شکل ۴)، با ترسیم نمودارهای سنگ‌شناسی نیز نوع دقیق چهار مورد از نمونه‌ها منیزو کربناتیت یا کربناتیت دولومیتی تعیین می‌شود که با نام علمی **بفورسیت**^{۱۷} نیز شناخته می‌شود. فقط نمونه SK-1 با بیشینه غنی‌شدگی عناصر نادر خاکی و کمترین مقدار MgO به میزان زیر ۰/۵ درصد ترکیب کلسیتی نشان می‌دهد که نام دیگر آن **سوویت**^{۱۸} است، (شکل ۱۱-B).

اکسیدهای اصلی است. مجموع پایین جمع اکسیدهای اصلی در کنار بالا بودن شدید مقادیر LOI، بیانگر ترکیب غنی از فازهای گازی در گیر در ترکیب کانی‌شناسی این سنگ‌ها، از جمله در کانی‌های آپاتیت، فلوگوپیت و سایر فازهای میزالیزه در متن کربناته این سنگ‌هاست. عیارهای افزوده مجموع REE ها به ویژه **عناصر نادر خاکی سبک**^{۱۶} در نتایج آنالیز ICP-MS نیز چشمگیر است. به کمک نمودار دوتایی عناصر کمیاب و نادر خاکی، ماهیت زمین‌شیمیایی کربناتیت‌های شمال شرق کوه تاشک اثبات شده



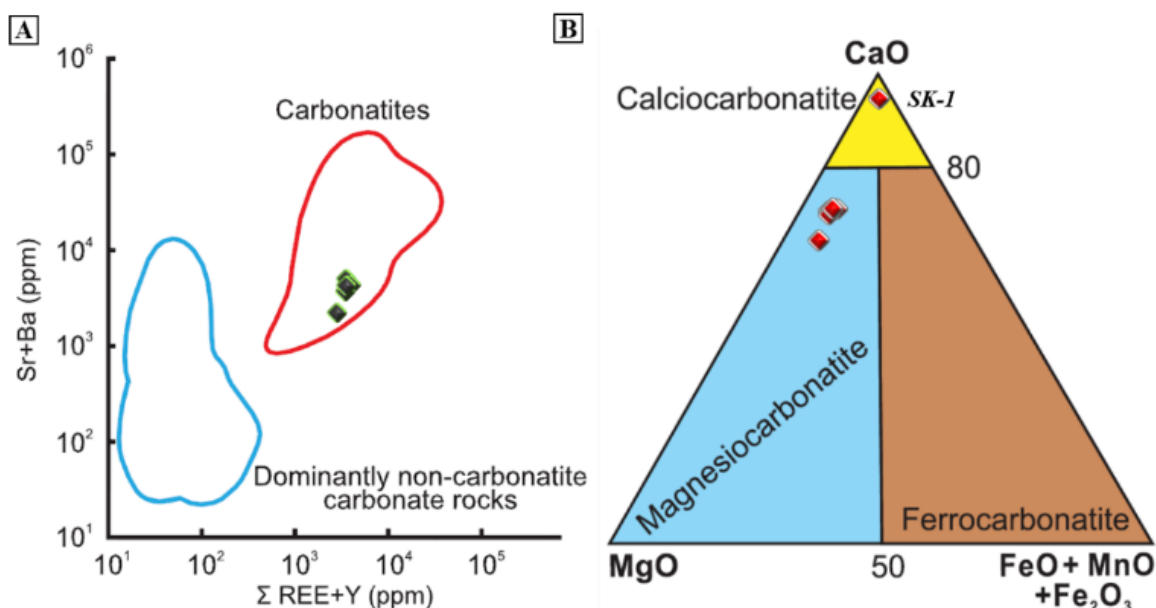
شکل ۹. A: نمای دید به شمال، یک سامانه نفوذی نیمه عمیق کربناتیتی با بیشینه ضخامت ۲۰ متر واقع در منطقه دوزخ دره دیده می‌شود که در یک ساخت بازشدگی ۴۵ درجه به درون ترونجمیت میزبان تزریق شده است. رخنمون‌های سفید رنگ توده ترونجمیت از موقعیت نمونه G38 رضانی و تاگر (Ramezani and Tucker, 2003) هستند و B: در سطح تازه شکسته دایک کربناتیتی، بافت درشت بلور متشکل از فنو کریست‌ها و رگه‌های کانی کلسیت زرد رنگ دیده می‌شود که با رخ رومبوئیدی شاخص (فلش‌های قرمز) در زمینه گوشته رنگ دولومیتی پراکنده‌اند. حضور فلوگوپیت‌ها، (فلش آبی) و کانی‌های فلزی پراکنده به همراه آپاتیت‌های دانه ریز نیز به خوبی منشأ کربناتیتی سنگ را به تصویر می‌کشد.

Fig. 9. A: an intrusion of subvolcanic carbonatite system with max thickness of about 20 meters injected at a 45° structural opening system in the white outcrops of trondhjemites in the Dozakh-Darreh area, the G38 sample location in Ramezani and Tucker (2003), looking North, and B: in the matrix of the sample broken of the dike, the coarse grain crystalline matrix of the carbonatite is obvious. The large primary calcite veins and phenocrysts with rhombohedral cleavage in centimeters size (red arrows) are visible in the purple dolomitic matrix. Presence of phlogopite, (blue arrow), fine grain apatite and metallic phases showing common mineral paragenesis of carbonatites.



شکل ۱۰. A: دایک فروکربناتیتی که به درون هاله متاسوماتیزم فینیت شاخص کربناتیت‌ها تزریق شده است (Samani, 1988). تشریح متاسوماتیزم و دگرسانی نوع فینیت این کربناتیت‌ها برای مقاله‌ای مجزا مدنظر است، B: این عکس موقعیت تصویر قبل را در زاویه کمی متفاوت به سمت شمال‌شرق در منطقه دوزخ دره به سمت گذار تاشک نشان می‌دهد. نفوذ تأخیری دایک کربناتیتی با ضخامت ۰/۵ تا ۷ متر با هاله فینیتی در توده مافیک میزبان محرز است و C: در سطح تازه شکسته این دایک، رگچه‌های اولیژیست در زمینه متبلور و دانه ریز دولومیتی دیده می‌شود. به احتمال زیاد به دلیل مشابهت زیاد با سنگ‌های رسوبی، این دایک‌ها با رخنمون‌های واحدهای سری ریزو- دزو اشتباه گرفته شده و در طول سالیان در نقشه‌ها و پژوهش‌های فراوان به عنوان واحدهای آتشفشانی- رسوبی ریفت کامبرین آغازین معرفی شده‌اند (Babakhani et al., 1999).

Fig. 10. A: ferrocarnatite dike intruded in fenite metasomatism halo, (Samani, 1988). Description and classification of fenite metasomatic halos that enveloped these dikes is regarded for a separate paper, B: the exact location of the previous picture in slightly different angle in the Dozakh Darreh are, view to NE, is photographed and studied by the author in 2012. The carbonatite dike with 0.5 to 7 meters width, having fenite halo intruded in mafic suites is approved, and C: specularite veinlets in the fine grain dolomitic matrix represent the carbonatite origin. Because lack of detailed attention, these dikes on this location from the ZamanAbad map, were mistaken to be part of the dolomitic layers of the Precambrian Rizu-Deso volcano-sedimentary series of the rift basin (Babakhani et al., 1999).



شکل ۱۱. نمودارهای استاندارد اصلی شناسایی و دسته‌بندی کربناتیت‌ها برای نمونه‌های آنالیز شده از شمال شرق کوه تاشک ارائه شده است (Simandl and Paradis, 2018). A: بر روی این نمودار بر اساس مجموع استرانسیوم و باریوم که از جانشین‌های اصلی کلسیم در انواع سنگ‌های کربناته هستند، در مقابل مجموع عناصر نادر خاکی به علاوه ایتریوم که فراوانی گوشته‌ای دارند، حریم کربناتیت‌ها از سایر سنگ‌های کربناته تفکیک شده است. به طور هماهنگ با بررسی‌های سنگ‌نگاری و سایر شواهد، منشأ دایک‌های کربناتیتی ناحیه بافق تأیید می‌شود و B: بر روی نمودار رده‌بندی استاندارد IUGS و بر اساس آنالیز اکسیدهای اصلی، ۴ نمونه از دایک‌های کربناتیتی بررسی شده از نوع کربناتیت منیزیومی تعیین هویت می‌شوند. تنها نمونه SK-1 در رده کلسیستی قرار می‌گیرد (به شکل ۳-D و شکل ۴-D مراجعه شود). نمودار عنکبوتی بهنجار عناصر نادر خاکی این سنگ‌ها در شکل ۱۲ آورده شده است.

Fig. 11. Geochemical analysis result of carbonatite samples from NE of Tashk mountain are plotted on the basic diagrams in use to distinguishing and classification of carbonatites (Simandl and Paradis, 2018), A: bi-variate discriminative plot of Sr + Ba as the main elements substitute for Ca, against $\Sigma\text{REE} + \text{Y}$ known to have mantle source, recommended as a criterion for distinguishing carbonatites from other carbonate rocks. All the studied samples meaningfully drop in the carbonatite domain, and B: by plotting values of major oxides based on wt.%, from the XRF data on the carbonatite classification diagram according to IUGS, it is obvious that 4 of the studied samples fall in Magnesiocarbonatite domain, and only the SK-1 sample represent Calciocarbonatites composition, (see Fig. 3-D and Fig. 4-D). REE normalization spider plot of these carbonatite dikes is presented in Fig. 12.

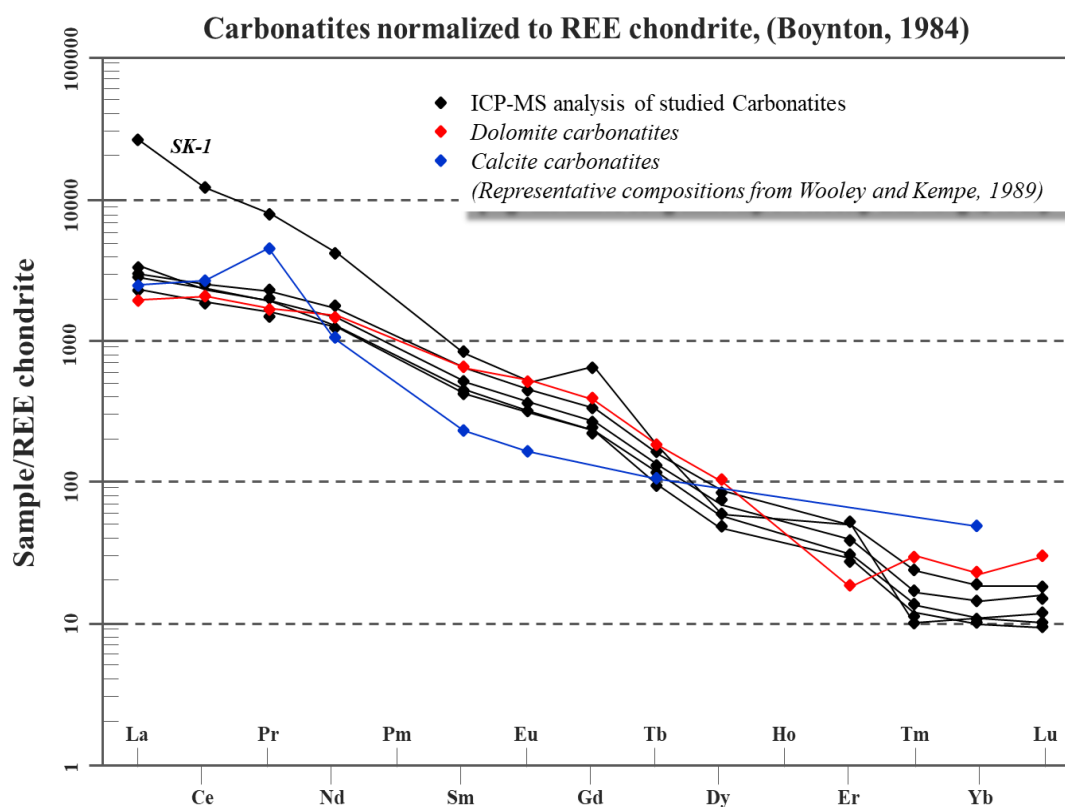
مینرالوگرافی، زمین‌شیمی تخصصی، بررسی‌های ایزوتوپی، غنی‌شدگی عناصر نادر خاکی و در مجموع زمین‌شناسی اقتصادی کربناتیت‌های فراوان موجود در این ناحیه، موضوع طرح جامع اکتشاف و مقاله‌های مجزاست؛ اما به طور خلاصه و بر مبنای داده‌های زمین‌شیمی ارائه‌شده، می‌توان گفت که ظرفیت زمین‌شناسی اقتصادی بالقوه ارزشمندی از عناصر نادر خاکی برای رخنمون‌های دست‌نخورده و ناشناخته کربناتیت‌ها در کل بلوک

نقش ساخت نیمه عمیق کربناتیت‌های ناحیه بافق در تحلیل زمین‌شناسی اقتصادی عناصر نادر خاکی

تا پیش از این پژوهش به کربناتیت‌های ناحیه متالورژی بافق توجه جدی نشده است؛ اما آنومالی عناصر نادر خاکی در این ناحیه معدن‌خیز به طور اجمالی شناخته‌شده و پژوهش‌هایی در زمینه اهمیت غنی‌شدگی این عناصر همراه با ذخایر آهن از جمله چادرملو نیز منتشر شده است (Talab and Alinia, 2015).

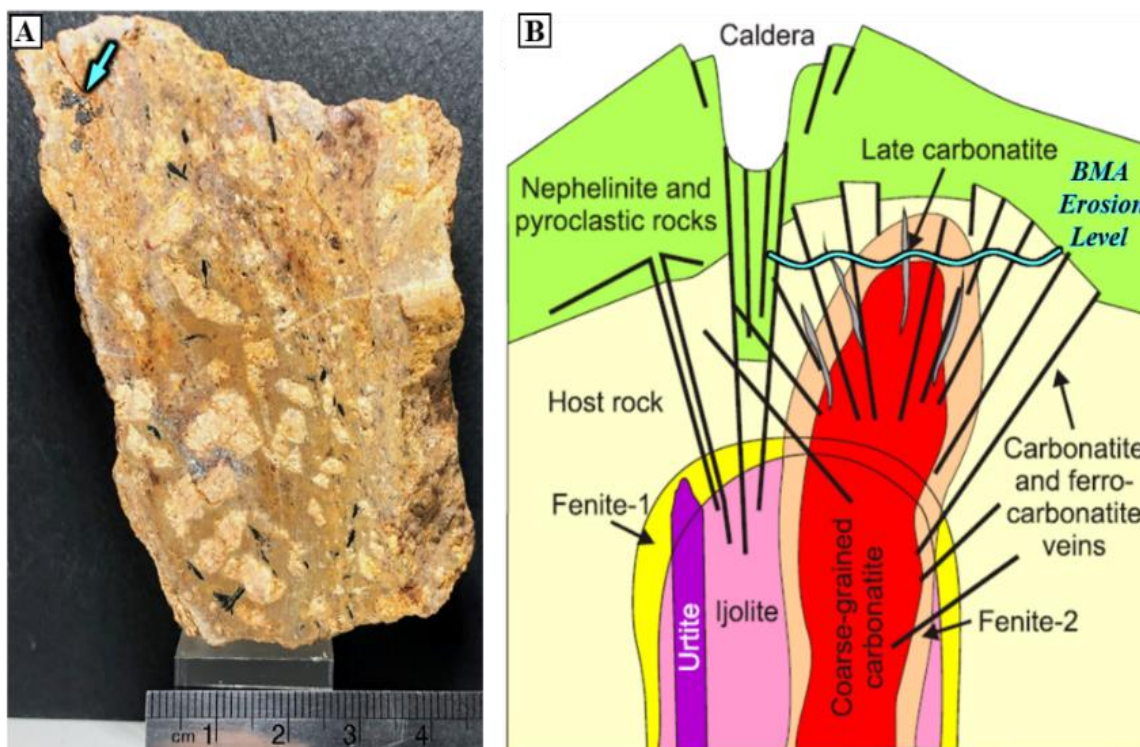
ناحیه متالوژنی بافق بررسی شده است، در شکل ۱۳-A آورده شده است. تراز لیتوتکتونیک کربناتیت‌های بررسی شده در ناحیه بافق بر روی مدل به روز آناتومی این توده‌ها آورده شده است (شکل ۱۳-B). نکته بسیار مهمی که پتانسیل کار نشده این نوع ذخایر در این بخش از ایران را حتی نسبت به همه ایالت‌های کربناتیتهای کار نشده دنیا، در زمره رده‌های اول مطرح می‌کند، تراز لیتولوژیکی و سطح فرسایش دایک‌های نیمه عمیق مستند شده است.

پشت‌بادام و به ویژه ناحیه بافق قابل تعریف است. این عناصر که در مقیاس کیلوگرم ارزش گذاری می‌شوند، گاهی قیمت‌های نجومی دارند. لازم است خاطر نشان شود که کربناتیت‌ها از دیدگاه پیوستگی عیارهای به شدت افزوده و ضرایب بهینه بازیابی طی فرایند فراوری، از بهترین کانسنگ‌های عناصر نادر خاکی و سایر عناصر کمیاب هستند. تصویر هم‌یافت کانیایی شاخص در سطح تازه یک نمونه از دایک سوویت کربناتیت پر عیار که در مرکز



شکل ۱۲. به وسیله ترسیم نمودار بهنجار عناصر نادر خاکی، امکان مقایسه ترکیب کربناتیت‌های بررسی شده در شمال شرق کوه تاشک با مقادیر معرف ارائه شده برای دو نوع اصلی این سنگ‌ها، استناد محکم‌تری پیدا می‌کند. مقادیر استاندارد از وولی و کمپه، (Wooley and Kempe, 1989) اقتباس شده است. روشن است که الگوی عناصر نادر خاکی دایک‌های ناحیه متالوژنی بافق به طور هماهنگ با کربناتیت‌های دولومیتی رسم شده است. نمونه SK-1 که در نمودار شکل قبل در حریم کربناتیت کلسیتی قرار می‌گیرد، به دلیل بیشینه آنومالی عناصر نادر خاکی سبک از سایر نمونه‌ها جدا شده است.

Fig. 12. the chondrite normalized REE pattern of the studied dikes in NE of Task mountain illustrates strong similarity with the standard composition of Dolomite Carbonatites, (Representative compositions from Wooley and Kempe 1989). The SK-1 sample has calciocarbonatite composition, separated by strong anomalies of LREEs.



شکل ۱۳. A: این تصویر متعلق به نمونه‌ای دیگر از یک دایک کلسیو کربناتیت پورفیری است که در مرکز ناحیه متالورژی بافق بررسی شده است. فنوکریست‌های درشت کلسیت، فلئوئور آپاتیت‌های آبی رنگ و بلورهای سوزنی آمفیبول (ترمولیت) در زمینه ریز بلورین دیده می‌شوند. کانه‌سازی فلزی اولیه با فلش آبی مشخص شده است. عیار مجموع عناصر نادر خاکی در نمونه خرده سنگی برداشت‌شده از این دایک بیش از ۳/۶ درصد به دست آمده است که در بین ۱۶ کانسار شاخص کربناتیتی دنیا در رده دهم قرار می‌گیرد (Elliott et al., 2018) و B: تا کنون همه موقعیت‌های کربناتیتی زون متالورژی بافق در ساخت نیمه عمیق و در ظاهر سیل و دایک بررسی شده‌اند. بر روی آخرین مدل آناتومی کربناتیت‌ها (Simandl and Paradis, 2018)، دایک‌های تأخیری، بالاترین تراز سامانه‌های کربناتیتی را تشکیل می‌دهند که ضمن نفوذ به درون انواع سنگ‌های میزبان، می‌توانند در عمق نزدیک به سطح به توده‌های عظیم کربناتیتی با ذخیره بسیار بالا از REE ها و دیگر عناصر کمیاب از جمله Nb متصل باشند. شاخص‌ترین مثال معدن بایان ابو در شمال چین است. تراز لیتوژئوشیمیایی و سطح فرسایش ناحیه بر اساس روابط سنگی و دگرسانی بر روی شکل نشان داده شده است.

Fig. 13. A: this sample is taken from another porphyry calciocarbonatite dike in the center of BMA. Calcite, blue fluorapatite and amphibole phenocrysts are scattered in the cryptocrystalline matrix. Primary metallic ore minerals are shown by the blue arrow. With Σ REE enrichment over 3.6%, the grade of this sample places at 10th on the chart of 16 key carbonatites of the world (Elliott et al., 2018), and B: all studied carbonatite outcrops in the BMA so far, have subvolcanic structure. BMA erosion level has depicted by study of rock type associations and alteration assemblages. On the last model of carbonatite intrusions (Simandl and Paradis, 2018), the late dikes constitute the uppermost level of a magmatic chamber which could be connected to the huge plutons, something like gigantic Bayan Obo mine in the North of China. These kind of intrusives may have immense potential of REEs and other minor elements resources, such as Nb, near to the surface of BMA.

نهایت حفاری بر روی موقعیت‌های نیمه عمیق پرعیار چه بسا توده‌های بزرگ کربناتیتی در عمق نزدیک به سطح ناحیه بافق در انتظار کشف باشند.

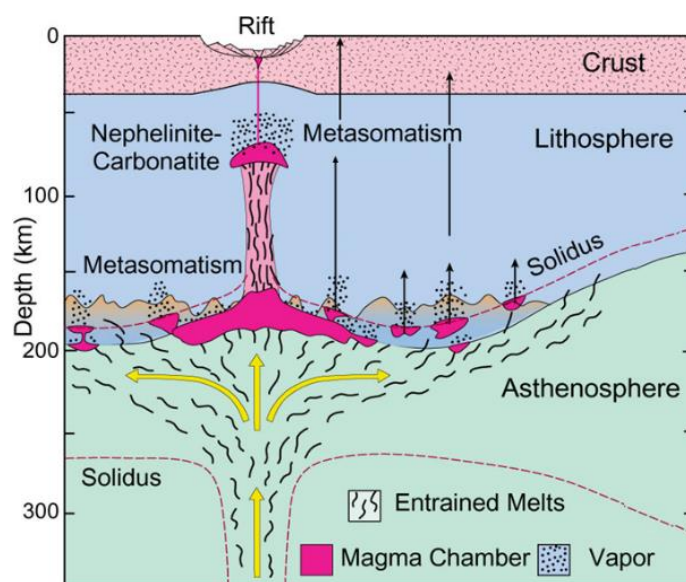
با نگاه به مدل بالا و توجه به ذخایر عظیم آهن کایرونای هم نسل کربناتیت‌ها، می‌توان این نظر را به طور منطقی مطرح کرد که با انجام بررسی‌های دقیق زمین‌شناسی، زمین‌ساخت، ژئوفیزیک و در

دارند و می‌توانند تا بیش از ۵۰ درصد وزنی از گاز کربنیک و سایر بخارهای ماگمایی از جمله گاز فلئوئور به عنوان واکنش‌پذیرترین هالوژن سرشار باشند (Simandl and Paradis, 2018). به سبب این ویژگی‌های ترمودینامیکی، غنی‌ترین و بزرگ‌ترین کانسارهای اولیه عناصر نادر خاکی که در واقع فلزهای گروه لانتانیدها با فراوانی گشته‌ای هستند، همراه با این نفوذی‌ها تشکیل می‌شوند. به عنوان یک پدیده شاخص جهانی، نزدیک به ۹۰ درصد از کل ذخیره REE جهان تنها در معدن کربناتیت **بایان اوبو**^{۲۰} در شمال پایتخت چین متمرکز است (Yang et al., 2011). در توجیه منشأ ریفتی کربناتیت‌های بررسی شده، باید گفت که ذخایر آهن-آپاتیت کایرونا‌ی ناحیه بافق مرتبط با توده‌های آلکالن مافیک و به عنوان نشانه‌های موقعیت ماگماتیزم ریفت درون قاره معرفی شده‌اند (Torab and Lehmann, 2007; Mokhtari et al., 2013). شرایط تشکیل مذاب‌های آلکالی بازیک و کربناتیت‌های ریفتی در مدل تکتونوماگمایی زیر نشان داده شده است (شکل ۱۴).

مدل تکتونوماگمایی ناحیه بافق در کامبرین آغازین؛ تغییر سریع کمان ماگمایی به ریفت قاره‌ای

اکنون به استناد شواهد ارائه شده، می‌توان گفت که بخش خاص و مهمی از رسوبات آهک و دولومیتی توالی‌های آتشفشانی-رسوبی حوضه پشت کمان - ریفت اینفراکامبرین، میان لایه‌های مرمری هم‌تافت‌های دگرگونی پرکامبرین و همچنین آنکلاوهای آهکی بزرگ با کانی‌سازی آهن در ترونجمیت‌ها، در حقیقت نیمه عمیق‌های مینرالیزه کربناتیتی با رخنمون‌های پراکنده و گسترده هستند که در حجم قابل توجهی در ناحیه متالورژی بافق تزریق شده است و نسبت‌های متفاوتی از غنی‌شدگی عناصر نادر خاکی نیز دارند. با وجود عدم شناخت و معرفی علمی، این سنگ‌ها از اهمیت بسیار ویژه‌ای برخوردارند.

ماگماهای کربناتیتی رقیق‌ترین، قلیایی‌ترین و داغ‌ترین مذاب‌های شناخته شده کره زمین هستند که بر اثر ذوب بخشی گوشته بالایی، در عمق محور ریفت‌ها تشکیل می‌شوند. این ماگماها بیشینه فشار سیالات فوق بحرانی^{۱۹} در دمای بالای ۲۰۰۰ درجه سانتی‌گراد را



شکل ۱۴. فرایندهای تکتونوماگمایی ذوب گوشته بالایی، تشکیل ماگماهای آلکالن- کربناتیتی و همچنین متاسوماتیزم مرتبط با توسعه ریفت‌های قاره‌ای بر روی مدل زمین‌شناسی بالا نشان داده شده است (Winter, 2001).

Fig. 14. The general tectono-magmatic model of alkaline-carbonatite magma generation and metasomatism in rifts (Winter, 2001).

می‌شود. وفور میکای منیزیومی نیز در صد بالای سیالات ارتوماگمایی را تأیید می‌کند. به دلیل این شواهد مستدل، بروز ماگماتیزم اولترابازیک-آلکالی مافیک همراه با فاز کربناتیت‌های نیمه عمیق ریفتی در ناحیه بافق محرز است که به نوبه خود پتانسیل حضور توده‌های بزرگ و بارور کربناتیتی در عمق را تقویت می‌کند.

افزون بر دایک‌های دیابازی که به فراوانی در کل بلوک پشت‌بادام وجود دارند و در انواع واحدها تریق شده‌اند، (به تصویب‌های ماهواره‌ای توده ترونجمیت زیرگان، غرب معدن چادرمو مراجعه شود)، حضور کوارتز دیوریت‌های هم‌نسل گرانیتوئیدهای کمانی نیز به طور مضاعف بر پیچیدگی تفکیک نسل‌های متفاوت توده‌های ملانوکرات ناحیه بافق با منشأ دوگانه کمانی-ریفتی افزوده است. به عنوان مثال، نمونه G12 بررسی شده در دانشنامه دکتری رضانی (Ramezani, 1997) یک کوارتز دیوریت کمانی به سن ۵۴۷ میلیون سال است.

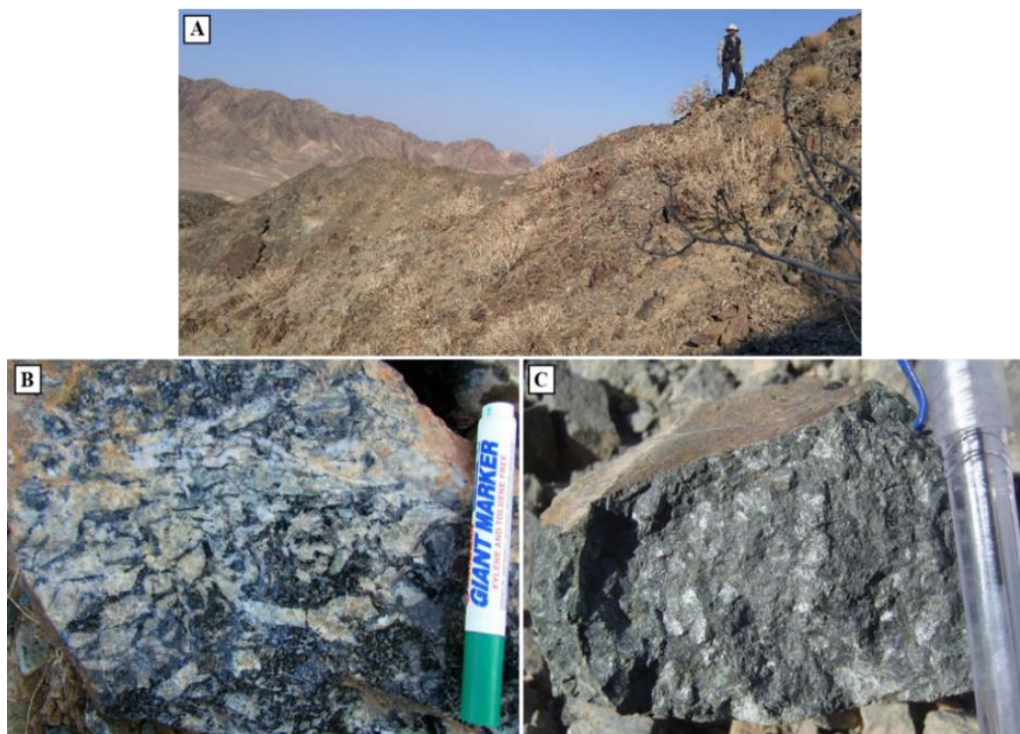
در تلاش برای مدل‌سازی تکنوماگماتیزم این ناحیه، رجی و همکاران (Rajabi et al., 2014)، با تمرکز بر بررسی توالی‌های رسوبی-آتشفشانی کامبرین آغازین^{۲۱} که میزبان کانسارهای سرب و روی نوع سدکس کوشک^{۲۲} و آهن و منگنز نارینگان^{۲۳} هستند، بدون در نظر گرفتن کربناتیت‌ها و اولترابازیک‌ها، یک حوضه پشت کمانی در لبه خرد قاره ایران مرکزی را مطرح کرده‌اند. این پژوهشگران نیز همچون بسیاری دیگر، کانی‌زایی گسترده آهن کایرونا در ناحیه بافق را به اشتباه در ارتباط ژنتیکی با ترونجمیت‌ها و منتج از ماگماتیزم کمانی معرفی کرده‌اند (شکل ۱۶).

شاخصه‌های خودپذیری مغناطیسی، بافت و کانی‌شناسی، ترکیب تولییتی غنی از پلاژیوکلاز سدیک و شواهد پترولوژیکی به همراه الگوی بهنجار عناصر نادر خاکی ترونجمیت‌های ناحیه به عنوان شاهد متاسوماتیزم و منشأ ذوب‌بخشی پوسته زیرین در بالا مفصل بحث شد، (شکل ۵، شکل ۶، شکل ۷، شکل ۸ و شکل ۹). بر مبنای بررسی‌های انجام‌شده، این سنگ‌ها به هیچ عنوان نمی‌توانند حاصل از مذاب‌های کمانی باشند. محتمل‌ترین پروتولیت^{۲۴} برای

سن‌سنجی ایزوتوپی کانی‌های فلوئورآپاتیت در معدن سه چاهون به عنوان معرف فاز کانی‌زایی آهن ناحیه بافق، معادل ۵۱۰ میلیون سال به دست آمده است که سن زمین‌شناسی کامبرین آغازین این کانسارها را به دنبال گرانیتوئیدهای کمانی و در مجاورت مکانی با ترونجمیت‌های کامبرین آغازین تأیید می‌کند (Bonyadi et al., 2011). استوچ و همکاران (Stosch et al., 2011)، بر اساس سن‌سنجی ایزوتوپی بر روی کانی آپاتیت نتیجه گرفته‌اند که کانی‌سازی گسترده آهن ناحیه بافق در ارتباط با ماگماتیزم کمانی کامبرین آغازین ایجاد شده است؛ اما در بین پژوهشگران زمین‌شناسی ایران، در مورد متالورژنی ناحیه بافق و تشکیل ذخایر آهن-آپاتیت نوع کایرونا در آن، یک اتفاق نظر جامع در مورد محیط ریفت قاره‌ای کوتاه مدت در پرکامبرین پسین به درستی مطرح است (Berberian and King, 1981; Daliran, 1990; Förster and Jafarzadeh, 1994). در این میان فقط سامانی (Samani, 1988) به طور صریح بیان کرده است که ذخایر آهن مگنتیتی ناحیه بافق با ماگماتیزم کربناتیتی در ارتباط است که همراه با صعود و جای‌گیری توده‌های مافیک-اولترابازیک رخ داده است. لازم است اشاره شود که فازهای مهم اولترابازیک ریفتی نیز همچون کربناتیت‌ها مورد چشم‌پوشی قرار گرفته و اغلب با عنوان کلی دیوریت بر روی نقشه‌های زمین‌شناسی مشخص شده‌اند (Babakhani et al., 1999). توده‌هایی از جنس آلکالی سینودوریت (شکل ۱۵-A)، ملانوفیلیت (شکل ۱۵-B) و ارتوپروکسنیت (شکل ۱۵-C) که شاخص محیط ریفت قاره‌ای هستند، در موقعیت‌های مختلف ناحیه بافق توسط نویسنده بررسی شده‌اند که تصویر آنها از سه موقعیت متفاوت در شکل ۱۵ آورده شده است.

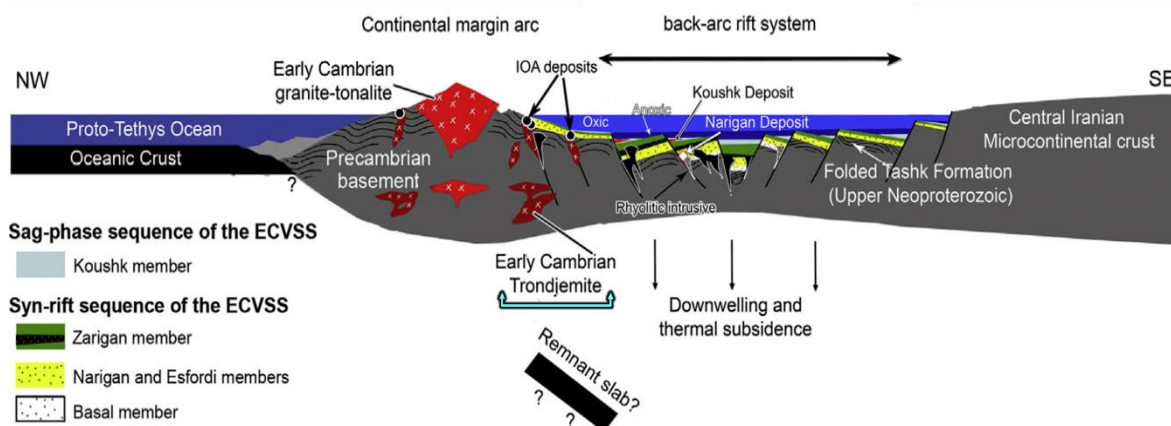
سنگ‌شناسی و سنگ‌نگاری شاخص سنگ‌های بحث‌شده در بالا بیانگر ماگماتیزم به شدت قلیایی و بیانگر توسعه ریفت قاره‌ای تا ترازهای سطحی ناحیه بافق است. به دلیل حضور ارتوپروکسنیت، شدت بالای ترکیب اولترابازیک مذاب مادر این سنگ‌ها تأیید

ترکیب مذاب پوسته‌ای مادر این ترونجمیت‌ها را می‌توان هم‌ارز واحدهای گرانیت گنایس حاصل از دگرگونی رسوبات رسی حاشیه فلات قاره گندوانا در پرکامبرین پسین در نظر گرفت که در هم‌تافت بنه شور و نیز رخنمون فراوان دارند.



شکل ۱۵. A: واحد سبز تیره جلوی تصویر، توده بزرگ از جنس سینودیوریت آلکالن را در دید به شمال شرق نشان می‌دهد که در ارتفاعات خشن و دور از دسترس کوه تاشک بررسی شده است، **B:** این تصویر سطح تازه سنگ ملانوفیلینیت آپاتیتیت بررسی شده در منطقه دوزخ دره را نشان می‌دهد. هم‌رشدی کانی‌های نفلین سفید رنگ و آپاتیت‌های آبی رنگ با ابعاد تا ۱۰ سانتی‌متر در مجموع به میزان بیش از ۵۰ درصد دیده می‌شوند که در متن متبلور متشکل از پیروکسن و پلاژیوکلاز حالت پگماتوئید رگه‌ای تشکیل داده‌اند. مشاهده بافت جریان‌ی به سبب حرارت بالا و ویسکوزیته پایین مذاب قلیایی تحت اشباع از سیلیس در مذاب‌های آلکالی مافیک ریفتی قابل انتظار است (همچنین به شکل ۲-B مراجعه شود). این نمونه با نزدیک به ۲۴ درصد P_2O_5 بر اساس آنالیز XRF، یک سنگ بسیار کمیاب است که تنها در موقعیت ریفت‌های درون صفحه‌ای دیده می‌شود و **C:** متن متشکل از ارتوپيروکسن‌های درشت بلور و فلوگوپیت‌ها با نسبت به ترتیب ۷۵ و ۲۵ درصد حجمی در نمونه پیروکسنیت از شمال معدن چادرملو بیانگر ترکیب اولترابازیک و درصد بالای سیالات ارتوماگمایی در مذاب مادر این نسل از سنگ‌هاست. بررسی‌های سنگ‌شناسی و زمین‌شناسی اقتصادی این توده‌های آلکالی مافیک - اولترابازیک ریفتی برای انتشار در مقاله‌ای جداگانه مدنظر است.

Fig. 15. A: the dark green unit in the front is a big pluton of alkali syenodiorite studied at Tashk mountain, view to NE, **B:** this photo shows the fresh surface of a melano-nephelinite apatitite from Dozakh-Darreh area. In a ratio of more than 50%, the white minerals are co-growth of nepheline and apatite with a length to 10cm in the pyroxene and plagioclase crystalline texture. These mag-crysts formed pegmatoidal flow-banding feature in a dilute magma (see also Fig. 2-B). With up to 24% P_2O_5 , this is such a very rare kind of P-rich alkali-mafic rock that only can be seen in within plate rifts, and **C:** this is a fresh pyroxenite sample from north of Chadormalu Fe deposit. This rock which is composed of orthopyroxene (75%) and phlogopite (25%) confirms the riftogenic ultrabasic magmatism in BMA with high pressure of orthomagmatic fluids captured in mg-mica. The study of these alkali-mafic and ultrabasic suites is regarded for a separate paper.



شکل ۱۶. بر روی مدل ژئودینامیک، پدیده فروانش حاشیه قاره و حوضه پشت کمانی ناحیه بافق در کامبرین آغازین با دید به توالی‌های رسوبی-آتشفشانی و کانی‌سازی سرب و روی نوع سدکس در معدن کوشک تصویرسازی شده است (Rajabi et al., 2014). نکته کلیدی از دست رفته در این مدل، نادیده گرفتن نقش فازهای اولترابازیک و کربناتیتی است که تکامل تکتونوماگماتیزم رفتی در مرحله پیشرفته و تشکیل کانسارهای عظیم آهن-آپاتیت و عناصر نادر خاکی را توجیه می‌کند. چنان که مشخص است، ترونجمیت‌ها به عنوان محصول ماگماتیزم کمانی معرفی شده و به همین ترتیب ذخایر آهن نوع کایرونا نیز در ارتباط با آنها نمایش داده شده است؛ در حالی که، ترونجمیت‌ها، میزبان و هم‌نسل نفوذی‌های بازیک-اولترابازیک و کربناتیت‌ها هستند که فاز مادر حقیقی کانی‌سازی آهن گسترده در ناحیه بافق را تشکیل می‌دهند. احتمالاً این پژوهشگران به اهمیت داده‌ها و مستندات موجود در پژوهش رضمانی و تاکر (Ramezani and Tucker, 2003) توجه کافی نداشته‌اند.

Fig. 16. on the geodynamic model above, the association of the arc and back-arc environments illustrated for BMA during the Early Cambrian (Rajabi et al., 2014). They concentrated on the SEDEX-type Pb-Zn mineralization in the Koushk deposit. Unfortunately, these researchers not only didn't consider the existence of Carbonatite and Ultrabasic rocks that indicate to a mature intracontinental rifting in the area, but also wrongly depicted IOA mineralizations genetically related to trondhjemites as a common part of arc-type magmatism. Apparently, they didn't fully appreciated the given field observation and geochemical data of granitoids in the study of Ramezani and Tucker (2003). ECVSS is: Early Cambrian Volcano-Sedimentary Series.

پرحرارت و شدید پدیده ریف‌ت قاره‌ای در زون متالوژنی بافق طی کامبرین آغازین است (Heidarian, et al., 2017). لذا بر مبنای همه این شواهد می‌توان گفت که محیط ریف‌ت قاره‌ای بافق با شار حرارتی شدید ناشی از فوران ماگماهای ریف‌توژنیک غنی از مواد فرار قلبایی، به طور قطع محیط مناسبی برای متاسوماتیزم گسترده و ذوب پوسته بوده که به تشکیل ترونجمیت‌ها منجر شده است. بدین ترتیب و با استناد به شواهد موجود از توده‌های گرانیت و گرانودیوریت کمانی بررسی شده در ناحیه که سن نزدیک؛ ولی قدیمی‌تر از ترونجمیت‌ها دارند، می‌توان چنین تصور کرد که در اثر مکش ناشی از فرو رفتن پوسته اقیانوسی^{۲۵} و پس از فاز فروانش در حاشیه پوسته نازک، جوان و نابالغ خرد قاره ایران

چنان که اشاره شد، رضمانی و تاکر (Ramezani and Tucker, 2003) بیان کرده‌اند که مرز دایک‌های مافیک فراوان در متن ترونجمیت‌ها تدریجی است. این پدیده ضمن نشان دادن سرد شدن هم‌زمان با نفوذ، می‌تواند بیانگر منشأ ذوب پوسته قاره‌ای این سنگ‌ها در اثر افزایش حرارت و اشاعه گسترده سیالات از ستون‌های عظیم ماگمای آلکالن اولترابازیک-کربناتیتی در عمق نیز قلمداد شود. جای‌گیری گرانیت زیرگان به عنوان بزرگ‌ترین رخنمون این سنگ‌ها در غرب معادن آهن چاه‌گز و چادرملو شاهد این مدعا است. توره‌های آتشفشانی بزرگ پر شده توسط مذاب آهنی با کانی‌سازی مگنتیت پرعیار، از جمله در معدن عظیم چادرملو با ذخیره اولیه بیش از ۴۰۰ میلیون تن، به خوبی بیانگر فاز

- فرونشست حوضه پشت کمانی، نهشت توالی آتشفشانی- رسوبی؛ تشکیل کانسارهای سرب و روی نوع سدکس؛ مهم‌ترین کوشک؛

- تشدید تنش کششی، افت شدید فشار لیتواستاتیک تا مرز پایین لیتوسفر؛ توسعه حوضه پشت کمانی تا تبدیل به ریف‌ت قاره‌ای کامل؛

- ماگماتیزم آلکالن درون صفحه‌ای، نفوذ و جای‌گیری کربناتیت‌ها و اولترابازیک‌ها؛ تشکیل ذخایر آهن-آپاتیت نوع کایرونا؛

- متاسوماتیزم شدید و ذوب پوسته زیرین بر اثر سیالات پر فشار و داغ حاصل از مذاب‌های ریف‌تی؛ نفوذ و جای‌گیری ترونجمیت‌ها. همه واحدهای سنگی متعلق به این پدیده‌های تکنوماگمایی در ناحیه بافق توسط سازند شناخته‌شده آهک میلا که به دلیل داشتن فسیل تریلوبیت، شاخص کامبرین بالایی ایران مرکزی است، پوشیده می‌شوند (Rajabi et al., 2014). این شاهد چینه‌شناسی می‌تواند به عنوان فاز خاتمه مجموعه وقایع پیچده و پی‌درپی ماگماتیزم کمانی-ریف‌تی بخش میانی بلوک پشت‌بادام در کامبرین زیرین تا میانی معرفی شود. حضور شواهد کانسارهای آهن نوع راپیتان در ناحیه، از جمله در آنومالی 19-D واقع در غرب معدن آهن چادرملو و همچنین معدن میشدوان که توسط نویسنده بررسی شده است، هم‌عصر بودن این وقایع ژئودینامیکی و متالوتکتونیکی را با تنها دوران یخبندان کامل کره زمین درست پیش از انفجار زیستی کامبرین میانی تأیید می‌کند که مدنظر برای بحث در مقاله‌ای جداگانه است.

بر اساس جستجوهای انجام‌شده، باید گفت که تا کنون مثالی از تغییر سریع محیط فرورانش به ریف‌ت کربناتیتی تنها در فاصله زمانی ۴ میلیون سال، آن هم در ناحیه باریکی به عرض کنونی فقط ۵۰ کیلومتر در هیچ کجای سیاره مستند نشده است. بنابراین با شناسایی کربناتیت‌های ناحیه بافق یکی از بی‌نظیرترین موقعیت‌ها برای بررسی تکامل ژئودینامیکی لیتوسفر زمین در خرد قاره ایران مرکزی معرفی می‌شود که پتانسیل ارزشمندی از نظر زمین‌شناسی

مرکزی در مرکز بلوک پشت‌بادام، رژیم کشش پشت کمانی و ذوب گوشته بر اثر کاهش فشار لیتواستاتیک به سرعت تا مرحله ماگماتیزم اولترابازیک-کربناتیتی درون قاره‌ای تکامل پیدا کرده است. با جای‌گیری ماگماهای آلکالن غنی از آهن و گاز کربنیک در محور ریف‌ت کامبرین آغازین بلوک پشت‌بادام، متالورژی گسترده آهن-آپاتیت نوع کایرونا اتفاق افتاده است. این ماگماهای ریف‌تی پس از کوه‌زایی که غنی از مواد فرار بوده‌اند، خود در طی صعود موجب متاسوماتیزم و ذوب پوسته قاره‌ای و تشکیل ترونجمیت‌ها شده‌اند.

به بیان دیگر، می‌توان چنین نیز مطرح کرد که به دلیل مؤلفه‌هایی همچون سرعت بالای تغییر تنش در لبه پوسته ایران مرکزی، محیط پشت کمانی بلوک پشت‌بادام به سرعت به یک ریف‌ت قاره‌ای تبدیل شده است. طی صعود فاز قدرتمند و پرحرارت ماگماتیزم ریف‌تی به درون ناحیه بافق که بر اثر آمیزش و نفوذ گرانیتوئیدهای کمانی از پیش ملتهب و داغ بوده است، ذوب بخشی پوسته قاره‌ای و نفوذ ترونجمیت‌ها نیز تسهیل شده است. بر مبنای مجموع این مفاهیم، هم‌یافتی گرانیتوئیدهای فرورانشی عقیم در مجاورت پدیده کانی‌سازی ذخایر عظیم آهن نوع کایرونا در همراهی با نفوذ و جای‌گیری کربناتیت‌ها، اولترابازیک‌ها و ترونجمیت‌ها در ناحیه متالورژی بافق توجه می‌شود. مجموع وقایع اتفاق افتاده در زون متالورژی بافق از پرکامبرین پسین تا کامبرین میانی را می‌توان به ترتیب زیر خلاصه کرد:

- آغاز فرورانش پالئوتیس به زیر بلوک پشت‌بادام از خرد قاره ایران مرکزی در حاشیه فعال گندوانا؛

- تنش فشارشی گسترده و دگرگونی درجه بالای پی‌سنگ ایران؛ هم‌تافت بنه شور در طی این فاز تشکیل شده است؛

- آزاد شدن آب از صفحه اقیانوسی به زیر لیتوسفر صفحه ایران؛ تشکیل، صعود و جای‌گیری گرانیتوئیدهای کمانی تا کامبرین آغازین

- خلاصی زمین‌ساختی و عقب‌گرد صفحه اقیانوسی فرورونده^{۲۶}، تغییر رژیم تنش از فشارش شدید به کشش سریع و گسترده؛

۲) انتخاب بهترین موقعیت و روش برای تعیین سن ایزوتوپی کربناتیت‌ها؛ سن سنجی شیمیایی اورانیوم-سرب^{۲۹} بر روی منشورهای آپاتیت اولیه می‌تواند به عنوان یک روش کاربردی بررسی شود. همچنین کربناتیت‌ها گاه تمایز مناسبی از نسبت ایزوتوپ‌های سرب ($^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$) نشان می‌دهند که ایزوکرون‌های سن سنجی مناسبی را به دست می‌دهد (Tykot, 1993).

۳) مقایسه نتایج با داده‌های موجود از سایر رخنمون‌های کربناتیتی در کمربند کوه‌زایی آلپ-هیمالیا؛ ترکیه و پاکستان به عنوان مثال‌های همسایه ایران اولویت دارند و در ادامه ایالت کایرونای سوئد، فن در نورژ و آلی کربناتیت‌های بریتیش کلمبیای کانادا انتخاب شده‌اند.

۴) بازبینی همه نقشه‌ها و تعیین دقیق فاز ماگماتیزم ریفتی بر روی ستون لیتواستراتیگرافی ناحیه بافق به پشتوانه داده‌های مدنظر برای تولید

۵) تهیه الگوی نرم‌افزاری سه بعدی پویا از تکامل یکی از خاص‌ترین مجموعه پدیده‌های حرارتی کره زمین در قالب ماگماتیزم ریفتی در ادامه نفوذ گرانیتوئیدهای کمانی درست پیش از انفجار زیستی کامبرین میانی و آغاز شکوفایی حیات پرسلولی پیشرفته در اقیانوس‌های زمین.

نتیجه‌گیری

بر روی آخرین نقشه‌ها و پایگاه داده‌های منتشر شده از کربناتیت‌های دنیا، هیچ نشانه‌ای از ایران پیاده نشده است. در حالی که، رخنمون‌های گسترده این سنگ‌ها و کانسارهای مهم در نواحی زیادی از بلوک پشت‌بادام و به ویژه ناحیه متالورژی بافق وجود دارند که نه تنها مورد اکتشاف واقع نشده‌اند، بلکه حتی به درستی معرفی نیز نشده‌اند. در این پژوهش، همه استانداردهای به روز مورد استفاده در شناسایی و طبقه‌بندی کربناتیت‌ها به کار گرفته شده است.

اقتصادی عناصر نادر خاکی دارد. نزدیک‌ترین هم‌ارز کربناتیت‌های بافق از لحاظ مشابهت سن و هم‌یافت کانی‌سازی آهن-آپاتیت-REE، ایالت کربناتیتی کایرونای سوئد است که نام آن بارها در ادبیات زمین‌شناسی ایران تکرار شده است.

پیشنهاد‌های ادامه بررسی بر روی کربناتیت‌های ناحیه متالورژی بافق

به سبب نادر بودن و پیچیدگی ذاتی کربناتیت‌ها و از طرفی در هم آمیخته بودن این واحدهای قدیمی (کامبرین آغازین) با انواع رسوبات کربناته قدیم‌تر و جدیدتر، ادامه کار اکتشاف در آینده مستلزم عملیات زمین‌شناسی صحرایی سنگین برای تهیه نقشه کربناتیت‌ها هم‌زمان با تحلیل لیتوژئوشیمی آنهاست. بررسی‌های دورسنجی تصویرهای ماهواره‌ای با دید تخصصی به تفکیک کربناتیت‌ها با هدف بالابردن دقت برداشت‌های میدانی تا حد بسیار زیادی انجام شده است. نسبت بانندی‌های خاص به دست آمده از داده‌های آستر به همراه تصویرهای ژئوآی رنگی از ماهواره‌های بینگ و کوئیک‌برد با داده‌های مدل ارتفاع رومی در مقیاس‌های مختلف ادغام شده‌اند^{۲۷}. به کمک تفسیر موازی ژئوفیزیک هوارد و همه اطلاعات و نقشه‌ها، پایگاه داده کاملی از اهداف اکتشافی اولویت‌بندی شده و به صورت سه بعدی در محیط جی‌آی‌اس^{۲۸} آماده انتشار است. برخی از مطالعات مدنظر برای پیشبرد پژوهش در زیر فهرست شده‌اند:

۱) تولید داده‌های ایزوتوپ‌های عناصر پایدار (اکسیژن، کربن، گوگرد) و همه انواع رادیوژنیک، به عنوان مثال نسبت‌های $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ و $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ برای بررسی منشأ و تکامل مذاب قلبایی به سیال کربوترمال ضروری است (Mitchell, 2005). در نگاه عمیق‌تر، این داده‌ها بیانگر زمین‌شیمی مرز استنوسفر بالایی-لیتوسفر زیرین در زیر پی‌سنگ ایران خواهند بود. نقش ترکیب‌های پوسته‌ای فرورانش یافته در منشأ مذاب‌های کربناتیتی را می‌توان به کمک داده‌های ایزوتوپ‌های عنصر بور بررسی کرد (Achterbergh et al., 2002; Hulett et al., 2016).

راستا، نویسنده بیش از ۱۱ سال انواع بررسی‌های زمین‌شناسی، دورسنجی و ژئوفیزیک را انجام داده و مدیریت کرده است و اکنون پایگاه داده اولویت‌بندی شده کاملی از رخنمون‌های دست‌نخورده این توده‌های کانی‌سازی شده نیمه عمیق آماده استفاده است.

به این ترتیب، ناحیه متالورژی بافق به شدت نیازمند عملیات اکتشاف گسترده با نگاه به این عناصر ارزشمند معرفی می‌شود که برخی از آنها تا چند هزار دلار برای هر کیلوگرم قیمت دارند. از لحاظ برآوردهای عدم امنیت تأمین منابع مورد نیاز صنایع استراتژیک پیش رو در آینده نزدیک (کمتر از ۱۰ سال)، این فلزها به عنوان **عناصر بحرانی**^{۳۰} نام‌گذاری شده‌اند. از آنجا که کربناتیت، سنگ معدن اصلی این فلزهای بسیار مهم است؛ اهمیت ژئوپولیتیک این کانسارها تا حدی تعیین‌کننده است که چشم‌انداز اقتصادی کشور ضعیفی همچون مالای در شرق افریقا تنها با کشف یک ذخیره کربناتیتی به کلی دگرگون‌شده است. امروزه شناسایی ذخایر جدید عناصر نادر خاکی از اولویت‌های اصلی همه شرکت‌های بین‌المللی تراز اول دنیا است که در زمینه اکتشاف فعالیت دارند.

با دنبال کردن سر تیتراخبار سیاسی سال‌های اخیر و توجه به گزارش‌های منتشر شده در مورد قیمت نجومی و وضعیت ناپایدار بازار عناصر نادر خاکی که به جنگ اقتصادی بین چین (به عنوان دارنده ۹۰ درصد ذخایر کربناتیتی دنیا) با ایالات متحده آمریکا (بزرگ‌ترین مصرف‌کننده این عناصر در تکنولوژی‌های پیشرفته) منجر شده است، اهمیت شناسایی و توجه به کربناتیت‌های ایران مرکزی بیش از پیش آشکار می‌شود. یکی از مسائل سیاسی دشوار و پیچیده مرتبط با بحث هر روزه و غیر قابل پیش‌بینی احتمال آغاز جنگ جهانی سوم و به طور کلی آینده بشریت، موضوع مناقشه بین چین و آمریکا بر سر استقلال جزیره تایوان است که صادرکننده اصلی ریزپردازنده‌های فوق حساسی است که ارتباطی هم‌بسته با صنایع REE ها دارد.

برای خواننده علاقه‌مند به پژوهش بیشتر مطالعه کتاب‌های میچپو

بنیان علمی این پژوهش به دلیل بررسی و ارجاع به همه داده‌ها و نظرهای مهم منتشر شده برای این ناحیه استحکام بیشتر یافته است. اکنون با استناد به تفاسیر سنگ‌شناسی و زمین‌شیمی در ادامه مستندسازی شواهد صحرایی و سنگ‌نگاری، حضور گسترده کربناتیت‌های بارور در ناحیه فلزایی بافق واقع در ایران مرکزی قابل تأیید است.

با لحاظ کردن کربناتیت‌ها در مدل ژئودینامیک و متالورژی ناحیه بافق در مرکز بلوک پشت‌بادام، چنین نتیجه‌گیری می‌شود که در ادامه فاز کوه‌زایی فرورانشی و نفوذ گرانیتوئیدهای کمانی به حاشیه ابر قاره کهن گندوانا طی پرکامبرین پسین، رژیم کشش پشت کمانی کامبرین آغازین تا مرحله ریفت کامل و نفوذ ماگماهای کربناتیتی - اولترابازیک پیشرفت داشته که به تشکیل بزرگ‌ترین و غنی‌ترین تجمع ذخایر آهن نوع کایرونای دنیا در این ناحیه منجر شده است. تغییر شرایط فرورانشی و نفوذ گرانیتوئیدهای کمانی به محیط ریفت قاره‌ای با ماگماتیزم کربناتیتی در بازه زمانی تنها ۴ میلیون سال پدیده‌ای نادر است که به نظر می‌رسد تا کنون در هیچ کجای زمین مشاهده و تحلیل نشده و منحصر به فرد است.

تا پیش از این پژوهش، به شواهد کانی‌زایی کربناتیت‌ها به عنوان کانسارهای اصلی عناصر نادر خاکی در زون بافق اشاره نشده است؛ اما بر اساس داده‌های آنالیز و مستندات غیر قابل چشم‌پوشی ارائه‌شده از این سنگ‌های کمیاب بر روی مدل‌های آناتومی کانساری، می‌توان گفت که سطح فرسایش و تراز نیمه عمیق دایک‌های کربناتیتی پرعیار به عنوان پتانسیل اتصال این دایک‌ها به توده‌های بزرگ کربناتیت کانی‌سازی شده در عمق نزدیک به سطح زمین قابل بررسی است. از این نظر کربناتیت‌های ناحیه متالورژی بافق در شمال استان یزد، از نظر ظرفیت ذخایر عناصر نادر خاکی جزو اولویت‌های اول اکتشاف عرصه‌های ناشناخته این کانسارها حتی در سطح جهانی قابل معرفی هستند. اولین گام در چالش پیش رو برای اکتشاف و شناسایی دقیق این کانسنگ‌های پرعیار، تهیه نقشه یکپارچه و تفکیک این واحدها از کربنات‌های رسوبی و توالی‌های مرمری هم‌تافت‌های دگرگونی است. در این

تعارض منافع

کاکو، دانشمند ژاپنی-آمریکایی، از جمله فیزیک آینده^{۳۱} پیشنهاد

هیچ‌گونه تعارض منافی توسط نویسنده بیان نشده است.

می‌شود.

1. Trondhjemite
2. Iron Oxide-Apatite (IOA); Kiruna type Fe-P deposits
3. REE; Rare Earth Elements
4. Proterozoic to Phanerozoic
5. Infracambrian
6. Esfordi
7. Boneh-Shurow Metamorphic Complex
8. Flow banding
9. Magnetic susceptibility
10. nondescript feldspare
11. spider plot of REEs normalized to Chondrite
12. concave-up
13. overgrowth in inherited zircon
14. Ankerite; FeCO_3
15. <http://www.Zarazma.com>
16. LREE; Light Rare Earth Elements
17. Beforsite
18. Sovite
19. Super critical magmatic fluids
20. Bayan Obo
21. Early Cambrian Volcano-Sedimentary Series; ECVSS
22. Koushk Pb-Zn SEDEX type deposit
23. Narigan Fe-Mn SEDEX type
24. protolith
25. trench suction
26. Tectonic relaxation, slab roll-back
27. Specific band composition of ASTER data with Bing & QuickBird Geoeye RGB Images, blended with DEM data at different scales
28. GIS-3D formats
29. Chemical U-Pb dating
30. Critical Elements
31. Refer to the books of *Michio Kaku; The Japanese-American Scientist and Star*; amongst best is; *Physics of Future*, printed in 2011

References

- Achterbergh, E., Griffin, W., Ryan, C., O'Reilly, S., Pearson N, Kivi, K. and Doyle, B., 2002. Subduction signature for quenched carbonatites from the deep lithosphere. *Geology* 30(8): 743–746.
[https://doi.org/10.1130/0091-7613\(2002\)030<0743:SSFQCF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(2002)030<0743:SSFQCF>2.0.CO;2)
- Aftabi, A., Mohseni, A., Babeki, A. and Azaraien, H., 2009. Fluid inclusion and stable isotope study of Esfordi apatite-magnetite deposit, Central Iran. *Economic Geology*, 104(1): 137–143.
<https://doi.org/10.2113/gsecongeo.104.1.137>
- Babakhani, A.R., Poulratifi, A., Saidi, A. and Ghlamghash, J., 1999. Geological map of ZamanAbad, scale 1: 100000. Geological Survey of Iran.
- Basson, I., Ravasan, R., Mahdavi, F., Hemmati, Y., Sabzeparvar, M., Masoodi, M., Wooldridge, A., Andrew, J., Doyle, G. and King, J., 2018. Structural Interpretation of New High-Resolution Aeromagnetic and Radiometric Data over Central Iran: Block Definition and Rotational Tectonics. *Journal of African Earth Sciences*, 147: 585–602.
<https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2018.06.016>
- Berberian, M. and King, G.C.P., 1981. Towards a paleogeography and tectonic evolution of Iran. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 18(2): 210–265.
<https://doi.org/10.1139/e81-019>
- Bonyadi, Z., Davidson, G.J., Mehrabi, B., Meffre, S., and Ghazban, F., 2011. Significance of apatite REE depletion and monazite inclusions in the brecciated Se–Chahun iron oxide–apatite deposit, Bafq district, Iran: Insights from paragenesis and geochemistry. *Chemical Geology*, 281(3–4): 253–269.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.chemgeo.2010.12.013>
- Boynton, W.V., 1984. Cosmochemistry of the rare earth elements: meteorite studies. In: P. Henderson (Editor), *Rare Earth Element Geochemistry*. Elsevier, Amsterdam, 114 pp.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-444-42148-7.50008-3>
- Daliran, F., 1990. The magnetite-apatite deposit of Mishdovan, east central Iran. An alkali rhyolite hosted, "Kiruna type" occurrence in the infracambrian bafq metallogenic (Mineralogic, petrographic and geochemical study of the ores and the host rocks). Heidelberg, Ruprecht-Karls-Universität, 248 pp. Corpus ID: 127555608. Retrieved November 26, 2022 from https://books.google.com/books/about/The_Magnetite_apatite_Deposit_of_Mishdov.html?id=wg23zQEACAAJ
- Darvishzadeh, A., 1983. The study of Bafq phosphate, Esfordi. *Science Magazine of Tehran University*, 2: 2–24. (in Persian) Retrieved November 26, 2022 from https://jos.ut.ac.ir/article_16155.html
- Debon, F. and Le Fort, P., 1983. A chemical-mineralogical classification of common plutonic rocks and associations. *Earth and Environmental Science Transactions of the Royal Society of Edinburgh*, 73(3): 135–149.
<http://dx.doi.org/10.1017/S0263593300010117>
- Deymar, S., Yazdia, M., Reghvanianzadeh, M. and Behzadia, M., 2018. Alkali metasomatism as a process for Ti–REE–Y–U–Th mineralization in the Saghand Anomaly 5, Central Iran: Insights from geochemical, mineralogical, and stable isotope data. *Ore Geology Reviews*, 93: 308–336.
<https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2018.01.008>
- Elliott, H.A.L., Wall, F., Chakhmouradian, A.R., Siegfried, P.R., Dahlgren, S., Weatherley, S., Finch, A.A., Marks, M.A.W., Dowman, E. and Dedy, E., 2018. Fenites associated with carbonatite complexes: A review. *Ore Geology Reviews*, 93: 38–59.
<https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2017.12.003>
- Fiannacca, P. and Cirrincione, R., 2020. Metasedimentary Metatexites with Trondhjemitic Leucosomes from NE Sicily: Another Example of Prograde Water-fluxed Melting in Collisional Belts. *Geosciences*, 10(4): 123.
<https://doi.org/10.3390/geosciences10040123>
- Förster, H. and Jafarzadeh, A., 1994. The Bafq mining district in Central Iran—A highly mineralized infracambrian volcanic field. *Economic Geology*, 89(8): 1697–1721.
<https://doi.org/10.2113/gsecongeo.89.8.1697>
- Golkaram, S., Rashidnejhad Omran N., Masoudi, F. and Vahabzadeh, G., 2011. Zarigan granite, magmatic or metasomatic? *Science magazine of Tarbiat-e Modares University*, 10(2): 825–840. Retrieved November 26, 2022 from <https://jsci.khu.ac.ir/article-1-1387-fa.html>
- Haghipour, A., Valeh, N., Pelissier, G. and Davoudzadeh, M., 1977. Explanatory text of the Ardekan Quadrangle 1:250000 scale Geological

- Map (Yazd Province, Central Iran). Geological Survey of Iran, Tehran, Report 8, 58 pp.
- Hanson, G.N., 1980. Rare earth elements in petrogenetic studies of igneous systems: Annual Review of Earth Planetary Sciences, 8: 371–406. <https://doi.org/10.1146/annurev.ea.08.050180.002103>
- Harker, A., 1909. The Natural History of Igneous Rocks. Cambridge University Press, Cambridge, 384 pp. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511920424>
- Heidarian, H., Alirezaei, S. and Lentz, D., 2017. Chadormalu Kiruna-type magnetite-apatite deposit, Bafq district, Iran: Insights into hydrothermal alteration and petrogenesis from geochemical, fluid inclusion, and sulfur isotope data. Ore Geology Reviews, 83: 43–62. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.11.031>
- Hulett, S., Simonetti, A., Rasbury, T. and Hemming, N., 2016. Recycling of subducted crustal components into carbonatite melts revealed by boron isotopes. Nature Geoscience, 9: 904–908. <https://doi.org/10.1038/NGEO2831>
- Irvine, T.M. and Baragar, W.R., 1971. A guide to the chemical classification of common volcanic rocks. Canadian Journal of Earth Science 8: 523–548. <https://doi.org/10.1139/e71-055>
- Jami, M., Dunlop, A.C. and Cohen, D.R., 2007. Fluid Inclusion and Stable Isotope Study of the Esfordi Apatite-Magnetite Deposit, Central Iran. Economic Geology, 104(1): 1111–1128. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.104.1.140>
- Jiménez, M., Fernández, M., Saura, E., Vergés, J. and Garcia-Castellanos, D., 2012. 3-D lithospheric structure and regional/residual Bouguer anomalies in the Arabia–Eurasia collision (Iran). Geophysical Journal International, 190(3): 1311–1324. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2012.05580.x>
- Karimpour, M.H., Rezaei, M., Zarasvandi, A. and Malekzadeh, A., 2021. Saveh-Nain-Jiroft Magmatic Belt replaces Urumieh-Dokhtar Magmatic Belt: Investigation of genetic relationship between porphyry copper deposits and adakitic and non-adakitic granitoids. Journal of Economic Geology, 13(3): 465–506. (in Persian with English abstract) <https://doi.org/10.22067/ECONG.V13I3.1034>
- Majidi, J. and Babakhani, A.R., 2000. Geological map of Ariz, scale 1: 100000. Geological Survey of Iran.
- Mitchell, R.H., 2005. Carbonatite and Carbonatites and Carbonatites. The Canadian Mineralogist, 43(6): 2049–2068. <https://doi.org/10.2113/gscanmin.43.6.2049>
- Mokhtari, M.A.A., Hossein Zadeh, G. and Emami, M.H., 2013. Genesis of iron-apatite ores in Posht-e-Badam Block (Central Iran) using REE geochemistry, Journal of Earth System Science, 122(3): 795–807. <https://doi.org/10.1007/s12040-013-0313-z>
- Müller, D., Rock, N.M.S. and Groves, D.I., 1992. Geochemical discrimination between shoshonitic and potassic volcanic rocks in different tectonic settings: a pilot study. Mineral Petrology, 46: 259–289. <https://dx.doi.org/10.1007/BF01173568>
- Peccerillo, A. and Taylor, S.R., 1976. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Northern Turkey. Contribution Mineral Petrology, 58: 63–81. <https://dx.doi.org/10.1007/BF00384745>
- Rajabi, A., Canet, C., Rastad, E. and Alfonsod, P., 2014. Basin evolution and stratigraphic correlation of sedimentary-exhalative Zn–Pb deposits of the Early Cambrian Zarigan–Chahmir Basin, Central Iran. Ore Geology Reviews, 64: 328–353. <http://dx.doi.org/10.1016/j.oregeorev.2014.07.013>
- Ramezani, J., 1997. Regional geology, geochronology and geochemistry of the igneous and metamorphic rock suites of the Saghand Area, central Iran. Unpublished Ph.D. thesis, Washington University, St. Louis, Missouri, USA, 416 pp.
- 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. <https://doi.org/10.2475/ajs.303.7.622>
- Richards, J.P., 2003. Tectono-Magmatic Precursors for Porphyry Cu-(Mo-Au) Deposit Formation. Economic Geology, 98(8): 1515–1533. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.98.8.1515>
- Richards, J. P., 2007; Adakite-Like Rocks: Economic Geology, 102(4): 537–576.

- <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.102.4.537>
Samani, B., 1988. Metallogeny of the Precambrian in Iran. *Precambrian Research*, 39(1–2): 85–106. [https://doi.org/10.1016/0301-9268\(88\)90053-8](https://doi.org/10.1016/0301-9268(88)90053-8)
- Schandl, E.S. and Gorton, M.P., 2002. Application of high field strength elements to discriminate tectonic settings in VMS environments. *Economic Geology*, 97(3): 629–642. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.97.3.629>
- Shang, C.K., Satir, M., Siebel, W., Nsifa, E.N., Taubald, H., Liégeois, J.P. and Tchoua, F.M., 2004. TTG magmatism in the Congo craton: Case study of the Sangmalima region, Ntem Complex, southern Cameroon. *Journal of African Earth Sciences*, 40(1–2): 61–79. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2004.07.005>
- Simandl, G. and Paradis, S., 2018. Carbonatites: related ore deposits, resources, footprint, and exploration methods. *Transactions of the Institutions of Mining and Metallurgy*, 127(4): 123–152. <https://doi.org/10.1080/25726838.2018.1516935>
- Stosch, H.G., Romer, R.L., Daliran, F. and Rhede, D., 2011. Uranium-lead ages apatite from iron oxide ores of the Bafq District, east-central Iran. *Mineralium Deposita*, 46: 9–21. <http://dx.doi.org/10.1007/s00126-010-0309-4>
- Talab, A.S. and Alinia, F., 2015. Rare earth elements in the Chadormalu iron ore mine: Statistical analysis of Σ REE grade-variate in the northern orebody, REE enrichment through beneficiation process, and Th contents. 5th Conference of Mining Engineering Organization, Ministry of Industry, Mining and Trade, Tehran, Iran.
- Terekhov, E.N. and Shcherbakova, T.F., 2006. Genesis of positive Eu anomalies in acid rocks from the Eastern Baltic Shield. *Geochemistry International*, 44: 439–455. <https://doi.org/10.1134/S0016702906050028>
- Torab, F. and Lehmann, B., 2007. Magnetite-apatite deposits of the Bafq district, Central Iran: apatite geochemistry and monazite geochronology. *Mineralogical Magazine*, 71(3): 347–363. <https://doi.org/10.1180/minmag.2007.071.3.347>
- Tykot, R., 1993. *Absolute Age Determination: Physical and Chemical Dating Methods and Their Application*. Mebus A. Geyh and Helmut Schleicher. Translated by R. Clark Newcomb. Springer-Verlag, New York, 503 pp. <https://doi.org/10.2307/282217>
- Whitney, D.L. and Evans, B.W., 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist*, 95(1): 185–187. <https://doi.org/10.2138/am.2010.3371>
- Winter, J.D., 2001 *An Introduction to Igneous and Metamorphic Petrology*. Prentice-Hall Inc. Ontario, 697 pp. <https://doi.org/10.2113/gscanmin.39.5.1503>
- Wooley, A.R. and Kempe, D.R.C., 1989. Carbonatites: nomenclature, average chemical compositions, and element distribution. In: K. Bell (Editor), *Carbonatites*. Unwm Hyman, London. pp. 1–14.
- Yang, K., Fan, H., Santosh, M., Hu, F. and Wang, K., 2011. Mesoproterozoic carbonatitic magmatism in the Bayan Obo deposit, Inner Mongolia, North China: Constraints for the mechanism of super accumulation of rare earth elements. *Ore Geology Reviews*, 40(1): 122–131. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2011.05.008>