

Magnetite mineralization properties of Narm iron mine with respect to petrology and geochemistry of its adjacent gabbroic- dioritic rocks (North of Tabas, South Khorasan Province)

**Mahboobeh Parvaresh Darbandi¹, Azadeh Malekzadeh Shafaroudi^{2*}
Amir Morteza Azimzadeh³ and Mohammad Hassan Karimpour²**

¹ Department of Geology, Faculty of Science, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

² Department of Geology and Research Center for Ore Deposit of Eastern Iran, Faculty of Science,
Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

³ Department of Geology, Faculty of Science, University of Zanjan, Zanjan, Iran

Abstract

The Narm iron mine located in the north of Tabas, the South Khorasan province in the north east of Iran. Magnetite is the main mineral, is associated with actinolite as the most abundant silicate mineral as well as apatite as the micro crystalline localized aggregations in the mineralization zone. The iron ore grade ranges from 50 to 55 wt% and 3% sulfur content. On the base of field observation, geochemical investigation, the rare earth elements pattern and their distribution there are many similarities between the mineralization of Narm mine and some magnetite-apatite iron oxide (IOA) deposits. Lithologically, the area mainly includes limestone-dolomite units of the Rizu formation in which gabbroic-dioritic magma is intruded. The dominant texture of these intrusive rocks is hypidiomorphic granular, dominated by plagioclase, amphibole (hornblende), pyroxene (mostly diopside), apatite as an important accessory mineral and opaque minerals mainly magnetite and pyrite. The rocks under study are alkaline in nature formed in within plate zone. These gabbroic-dioritic rocks were produced as a result of low degree partial melting of mantle wedge with garnet lherzolite composition. Any geochemical evidence indicating of crustal contamination is not observed. .

Key Words: Gabbroic- dioritic intrusive rocks, magnetite mineralization, geochemistry, Narm iron mine, Kashmar- Kerman tectonic zone

* shafaroudi@um.ac.ir

ویژگی‌های کانه‌زایی مگنتیت معدن آهن نرم با نگرشی بر سنگ‌شناسی و زمین‌شیمی سنگ‌های گابرویی - دیوریتی مجاور آن (شمال طبس، استان خراسان جنوبی)

محبوبه پرورش دربندی^۱، آزاده ملک‌زاده شفارودی^{۲*}، امیرمرتضی عظیم‌زاده^۳ و محمدحسن کریم‌پور^۲
^۱ گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
^۲ گروه زمین‌شناسی و گروه پژوهشی اکتشاف ذخایر معدنی شرق ایران، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
^۳ گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

چکیده

معدن آهن نرم در شمال شهرستان طبس در استان خراسان جنوبی و در شمال‌خاوری ایران جای دارد. مگنتیت کانه اصلی در این منطقه کانی‌سازی است. فراوان‌ترین کانی سیلیکاته همراه آن بلورهای درشت اکتینولیت است که بلورهای ریز آپاتیت نیز با تجمع محلی آنها را همراهی می‌کنند. عیار آهن ۵۵-۵۰ درصد است و مقدار سولفور تا ۳ درصد می‌رسد. برپایه بررسی‌های صحرایی، بررسی‌های زمین‌شیمیایی کانسنگ، الگوی توزیع و فراوانی عنصرهای کمیاب در مگنتیت، شباهت‌های بسیاری میان کانی‌سازی معدن آهن نرم و برخی اندوخته‌های معدنی مگنتیت-آپاتیت (IOA) دیده می‌شوند. بیشتر واحدهای این منطقه را واحدهای آهکی-دولومیتی سازند ریزو تشکیل می‌دهند که ماگمای گابرویی-دیوریتی در آنها نفوذ کرده‌اند. بافت بیشتر این توده‌های آذرین درونی، هیپایدیومورف گرانولار است. این سنگ‌ها بیشتر از کانی‌های پلاژیوکلاز، آمفیبول (هورنبلند)، پیروکسن (بیشتر دیوپسید) و مقدارهای چشمگیری از کانی فرعی آپاتیت به‌همراه کانی‌های کدر، مانند مگنتیت و پیریت، تشکیل شده‌اند. این توده‌ها از نوع آلکان هستند و در جایگاه درون‌صفحه‌ای پدید آمده‌اند. برپایه بررسی‌های زمین‌شیمیایی عنصرهای فرعی و کمیاب، خاستگاه ماگمای مادر این توده‌ها، ذوب‌بخشی درجه پایین گارنت لرزولیت گوشته است و شاهد زمین‌شیمیایی برای رویداد آرایش پوسته‌ای وجود ندارد.

واژه‌های کلیدی: توده‌های آذرین درونی گابرویی-دیوریتی، کانی‌سازی مگنتیت، زمین‌شیمی، معدن آهن نرم، پهنه زمین‌ساختی کاشمر-کرمان

* shafaroudi@um.ac.ir

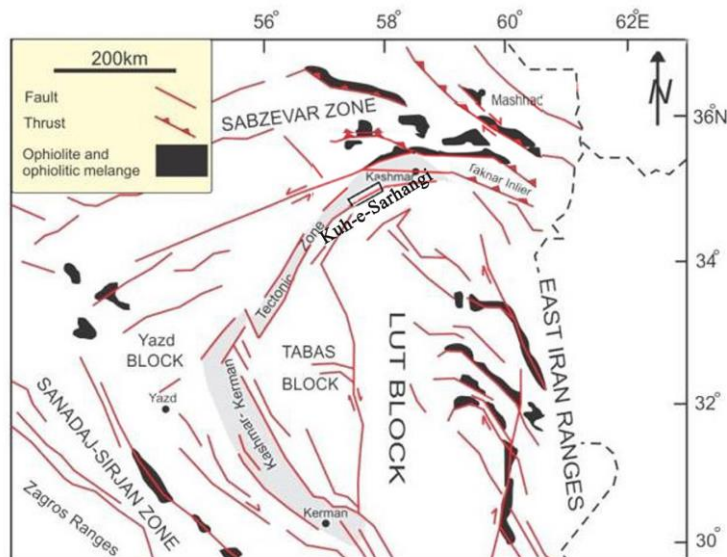
Copyright©2020, University of Isfahan. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0>), which permits others to download this work and share it with others as long as they credit it, but they cannot change it in any way or use it commercially.

DOI: <https://doi.org/10.22108/ijp.2020.118478.1145>

مقدمه

۷۵۰۰ کیلومتر مربع بیشتر از ۳۴ معدن آهن با اندوخته بیش از ۱/۸ میلیارد تن شناسایی شده است (Stosch *et al.*, 2011). کوه سرهنگی در شمال پهنه زمین‌ساختی کاشمر- کرمان که از پهنه‌های آهن خیز ایران مرکزی به‌شمار می‌رود، از دیدگاه ساختاری گوه‌ای کشیده دارد و دربردارنده مجموعه سنگ‌های آذرین، رسوبی و دگرگونی بسیار دگرریختی است که در آرایشی نواری به شکل دوبلکس‌های راستالغز در محدوده‌ای به درازای ۷۵ کیلومتر و پهنای ۱۰ تا ۲۰ کیلومتر جای گرفته‌اند (Nozaem *et al.*, 2014).

منطقه بررسی شده در استان خراسان جنوبی، نزدیک به ۲۰۰ کیلومتری شمال شهرستان طبس و ۹۵ کیلومتری شمال‌باختری عشق‌آباد، در مختصات جغرافیایی ۲۱°۵۷'۳۲" تا ۵۷°۲۳'۱۸/۲۵" طول جغرافیایی خاوری و ۵۱°۳۴'۳۳" تا ۵۳°۳۴'۱۰" عرض جغرافیایی شمالی جای دارد. این منطقه بخشی از محدوده شمال‌خاوری کمربند کاشمر- کرمان (شکل ۱) و در لبه شمال‌باختری کوه سرهنگی است (شکل ۲). در پهنه زمین‌ساختی کاشمر- کرمان و در گستره‌ای به مساحت نزدیک به



شکل ۱- جایگاه پهنه زمین‌ساختی کاشمر- کرمان در نقشه زمین‌شناسی ساختاری خاور ایران (برگرفته از Ramezani و Tucker (۲۰۰۳) و Narooie و همکاران (۲۰۱۷)، با تغییرات). جایگاه کوه‌سرهنگی در این کمربند با کادر مشکی نشان شده است

(Imanpour *et al.*, 2017; Hajimirzajan *et al.*, 2017, 2019; Narooie *et al.*, 2017; Shabani *et al.*, 2017; Naserian *et al.*, 2019).

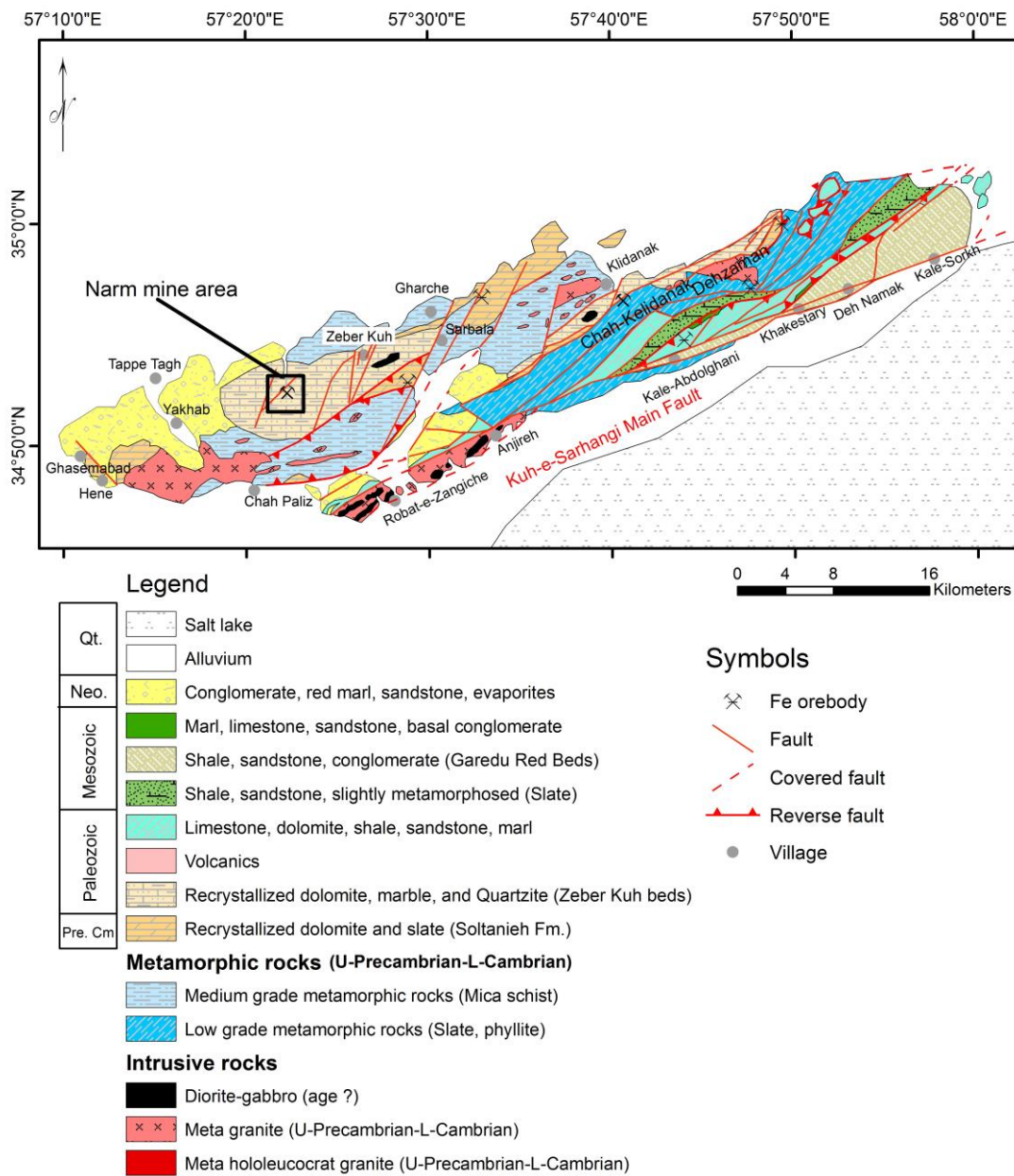
اگرچه معدن نرم در حال بهره‌برداری است، اما تاکنون مگر گزارش پایانی اکتشاف (سازمان صنعت، معدن و تجارت خراسان جنوبی، ۱۳۹۲)، هیچ‌گونه اطلاعات زمین‌شناسی، سنگ‌شناسی و زمین‌شیمیایی در قالب پژوهشی از محدوده این معدن گزارش نشده است. ماگماتیسم کششی پالئوزویک زیرین در ایران

معدن آهن نرم با دریافت پروانه بهره‌برداری در آذرماه ۱۳۹۴ راه‌اندازی شد و اکنون شرکت سنگ آهن آفتاب نرم از آن بهره‌برداری می‌کند. این معدن از معادن فعال در مجموعه کوه سرهنگی به‌شمار می‌رود.

معدن‌های آهن ده‌زمان، دلکن، زبرکوه، کمرکاسه، پده‌بید، بیدو و سرپوزه، چاه کلیدانک، اسبی و رباط از مهم‌ترین معدن‌ها و پهنه‌های اکتشافی آهن در منطقه کوه سرهنگی هستند

کهن‌ترین سنگ‌های پوسته ایران و میزبان مهم‌ترین کانسارهای آهن، سرب، روی و اورانیم است (Ramezani and Tucker 2003; Jami, 2005)؛ از این‌رو، پرداختن به بررسی‌های سنگ‌شناسی، زمین‌شیمیایی و کانی‌سازی منطقه در تکمیل داده‌های مناسب در این کمربند گام ارزشمندی به‌شمار می‌رود.

مرکزی از مهم‌ترین رویدادهای زمین‌شناسی ایران است که کمتر به آن پرداخته شده است. این مقاله به بررسی سنگ‌شناسی و زمین‌شیمی توده‌های گابروی-دیوریتی و کانی‌سازی مگنتیت منطقه می‌پردازد. معدن آهن نرم در جایگاه زمین‌ساختی ویژه‌ای در کمربند کاشمر- کرمان جای دارد. این کمربند دربردارنده



شکل ۲- نقشه زمین‌شناسی کوه سرهنگی و جایگاه منطقه بررسی‌شده روی آن (برگرفته از Nozaem و همکاران (۲۰۱۳) و Narooie و همکاران (۲۰۱۷)، با اندکی تغییرات)

زمین‌شناسی

واحدهای سنگ چینه‌ای منطقه کوه سرهنگی از اینفراکامبرین تا کواترنر را دربر می‌گیرند. گاه با نبوده‌های چینه‌ای (در زمان تریاس و پالئوژن) و رفتار گسل‌های منطقه، برخی سازندها حذف شده‌اند. واحدهای دگرگونی درجه پایین سری مراد کهن‌ترین واحدهای رخنمون یافته در منطقه کوه سرهنگی هستند. سازندهای ریزو و سلطانیه که گسترش چشمگیری در نیمه جنوبی منطقه دارند، روی سری مراد جای گرفته‌اند (شکل ۲).

واحدهای پی سنگی کامبرین و پروتروزوییک در این منطقه گزارش شده‌اند (Nozaem *et al.*, 2013). این واحدها عبارتند از:

- سنگ‌های دگرگونی درجه متوسط (بیشتر گارنت- کلریت- آمفیبول شایسته) که پیرامون لاج برقی و جنوب خاور زبرکوه دیده می‌شوند؛
- سازند ریزو (فیلیت، متاولکانیک‌ها، کوارتزیت و دولومیت)؛

- نهشته‌های ادیاکاران پایانی- کامبرین پایینی (تناوب شیل و واحدهای دولومیتی) مربوط به سازند سلطانیه؛

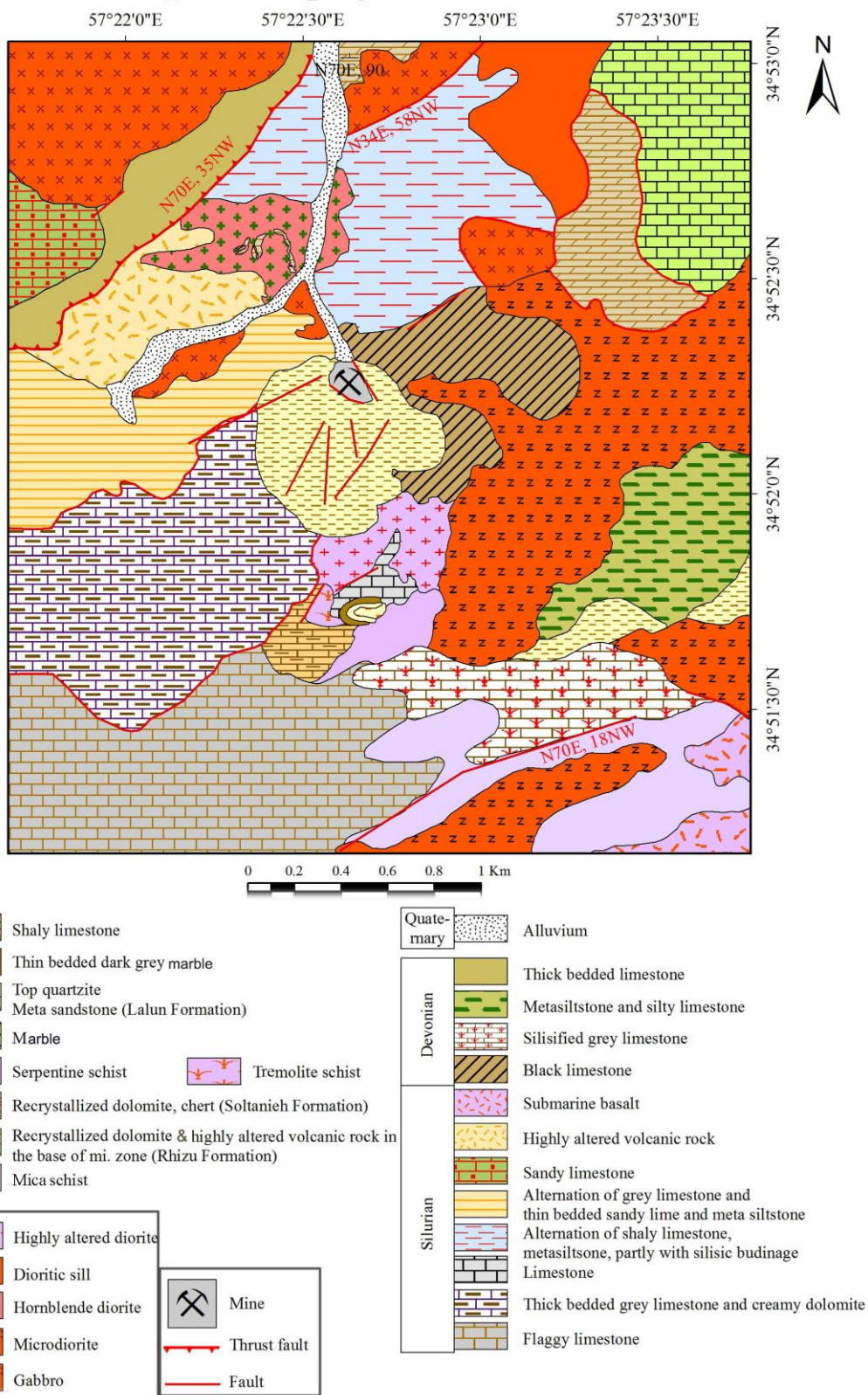
- در منطقه کوه سرهنگی، گرانیتهای دگرگون شده مهم‌ترین و نخستین رخداد ماگماتیسم هستند. برپایه بررسی‌های سن‌سنجی به روش اورانیم- سرب روی کانی زیرکن، سن نزدیک به ۵۲۱/۳ میلیون سال پیش برای سینوگرانیتهای و سن نزدیک به ۵۵۷ میلیون سال پیش برای بیوتیت سینوگرانیتهای منطقه، به‌دست آمده است (Rosseti *et al.*, 2015; Nozaem *et al.*, 2019; Hajimirzajan *et al.*, 2013). همچنین، Hajimirzajan و همکاران (۲۰۱۹) سن

ریولیت‌های منطقه را بررسی کرده‌اند و سنی نزدیک به ۵۲۴/۳ میلیون سال پیش را برای آنها به‌دست آورده‌اند؛

- توده‌های آذرین درونی گابرویی- دیوریتی در بخش‌هایی از کوه سرهنگی (مانند: جنوب روستای زبرکوه، رباط زنگیچه) و در محدوده معدن نرم دیده می‌شوند. سن آنها نامشخص است و به‌طور نسبی می‌باید از واحدهای اردویسین- سیلورین جوان‌تر باشند.

معدن نرم در شمال‌خاوری نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ ازبک‌کوه (Ruttner *et al.*, 1970) جای دارد و رخنمون سری مراد و ماگماتیسم گرانیتهای در این محدوده دیده نمی‌شوند. نقشه زمین‌شناسی محدوده معدن نرم در شکل ۳ نشان داده شده است. میکاشیست‌های کامبرین زیرین از کهن‌ترین سنگ‌های این محدوده هستند. این گروه سنگی در بخش جنوبی منطقه رخنمون دارد. واحدهای سنگ‌چینه‌ای سری ریزو با سن کامبرین زیرین- میانی در محدوده معدن نرم گسترش چشمگیری دارند و در این محدوده، بیشتر دربردارنده دولومیت و واحدهای آتشفشانی بسیار دگرسان شده (توف-ریولیت دگرسان‌شده) هستند. دولومیت‌های با تبلور دوباره سازند سلطانیه که در برخی برونزدهای آن (در بخش خاوری محدوده) چرت قاعده این سازند نیز دیده می‌شوند، توزیع پراکنده‌ای را در محدوده دارد. در قاعده پهنه کانی‌سازی، رخنمون‌های کوچکی از سرپانتین شایسته و ترمولیت شایسته دیده می‌شوند. همین واحدها در یال باختری تاقدیس بخش جنوبی منطقه کانی‌سازی نیز دیده می‌شوند. آهک‌های اردویسین و سیلورین بخش بزرگی از محدوده را دربر گرفته‌اند (شکل ۳).

Geological map of Narm Iron mine



شکل ۳- نقشه زمین شناسی منطقه معدنی نرم

از توده‌های آذرین درونی منطقه برگزیده و پس از خردایش و نرمایش نمونه‌ها، فراوانی اکسیدهای اصلی با روش XRF و نیز مقدار LOI این نمونه‌ها در آزمایشگاه سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور اندازه‌گیری شدند. سپس نمونه‌ها برای تجزیه عنصرهای فرعی و خاکی کمیاب به آزمایشگاه MS کانادا فرستاده شدند و پس از آماده‌سازی به روش ذوب قلیایی به روش ICP-MS تجزیه شدند.

پردازش داده‌های زمین‌شیمیایی به‌دست‌آمده برای ۱۰ نمونه سنگ از واحدهای گابرویی-دیوریتی منطقه، با نرم‌افزار GCDkit انجام شد و از نمودارهای گوناگون با هدف ارائه تحلیل‌های مورد نظر، بهره‌گرفته شد. برای بررسی شیمی کانسنگ نیز ۱۰ نمونه برداشت و به روش ICP-MS در آزمایشگاه زرازا بررسی شدند. برای برای ارزیابی عیار و میزان FeO، فسفر و گوگرد نمونه‌های معدنی، ۵ نمونه به روش شیمی تر و در آزمایشگاه شیمی اداره کل زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی منطقه شمال‌خاور تجزیه شدند. کانی‌مگنتیت برای ۹ نمونه تفکیک و پس از بررسی با میکروسکوپ بینوکولار، برای تجزیه عنصرهای کمیاب به آزمایشگاه MS کانادا فرستاده و پس از آماده‌سازی به روش ذوب قلیایی، با دستگاه ICP-MS تجزیه شدند.

سنگ نگاری توده‌های آذرین درونی

مجموعه حد واسط تا مافیک از دیوریت تا گابرو از سنگ‌های آذرین درونی رخنمون‌یافته در منطقه نرم به‌شمار می‌روند.

واحدهای گابرویی: این واحد با بافت‌های هیپایدیومورف گرانولار و در بخش‌هایی با بافت اینترگرانولار با بلورهای بسیار درشت پلاژیوکلاز در بخش‌های مرکزی توده دیده می‌شود. تغییرات روشنی را می‌توان در حاشیه این توده دید؛ به‌گونه‌ای که در حاشیه، اندازه بلورها کوچک‌تر و رنگ واحد تیره‌تر است. در بررسی

بازالت‌های زیردریایی سیلورین در بخش‌هایی از محدوده دیده می‌شوند. همچنین، واحدهای آهکی دونین که در بخش شمال‌باختری محدوده به‌صورت آهک‌های ضخیم‌لایه روی دیگر واحدها تراست شده‌اند نیز دیده می‌شوند. در محدوده معدن نرم، گسترش چشمگیری از واحدهای گابرویی-دیوریتی دیده می‌شود. این توده‌های آذرین درونی به‌صورت استوک‌های میکرودیوریتی و توده‌های گابرویی-دیوریتی و نیز به‌صورت سیل دیده می‌شوند. در برخی بخش‌ها و اگرچه به‌صورت محدود، نشانه‌های بازتبلور در مرز همبندی واحدهای دیوریتی-گابرویی و واحدهای کربناته دیده می‌شود. برپایه بررسی‌های صحرائی و قطع‌شدن بیشتر واحدهای سنگی پیش از دونین در منطقه، این سنگ‌های آذرین درونی جوان‌تر به‌نظر می‌رسند.

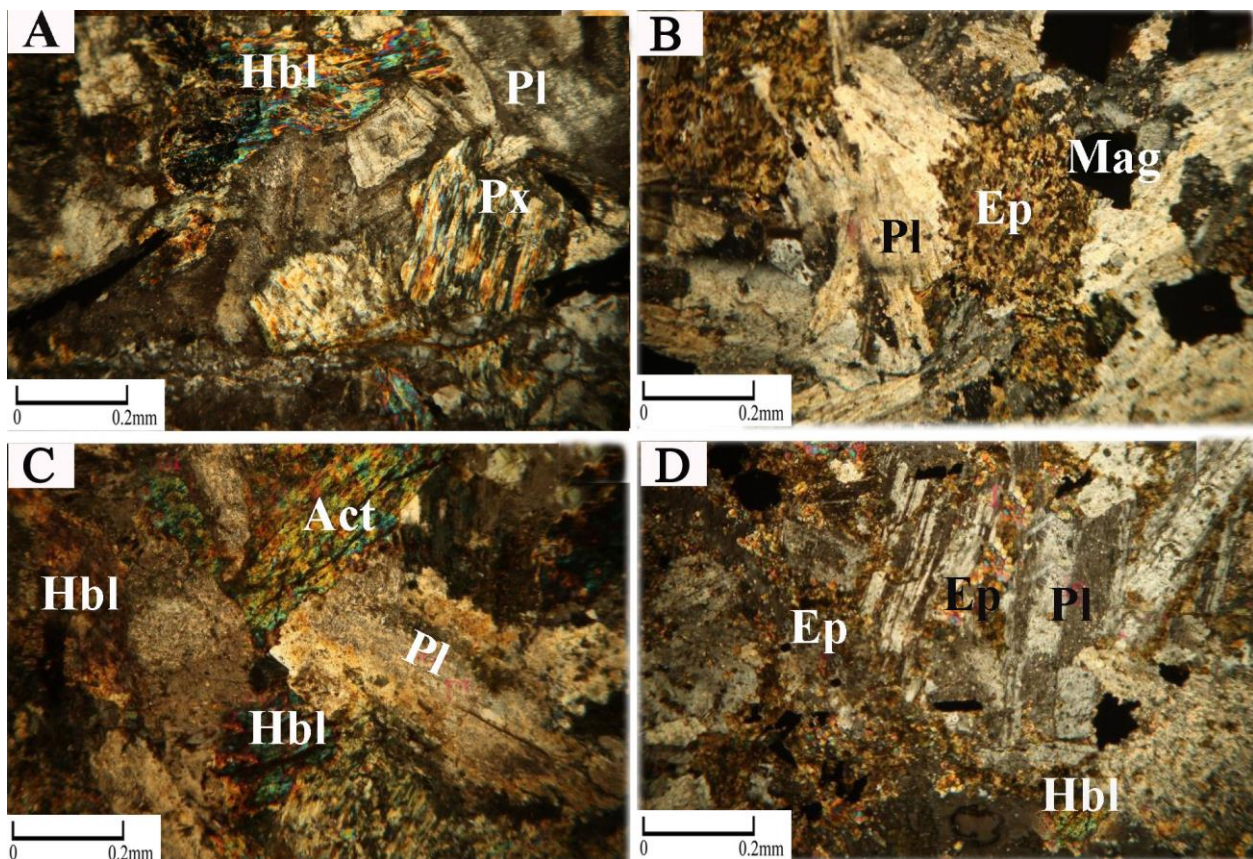
در کنار پهنه کانی‌سازی، واحد میکرودیوریتی دگرسان‌شده دیده می‌شود که آپوفیزهایی از آن در سراسر منطقه کانی‌سازی رخنمون یافته‌اند و واحدهای دولومیتی در پنجره زمین‌ساختی منطقه کانی‌سازی را تحت تأثیر قرار داده است. در این پنجره، واحد میکرودیوریتی دگرسان‌شده در برخی بخش‌ها به‌طور محلی حالت برشی شده دارد و تکه‌هایی از واحد دولومیتی و کانی‌سازی مگنتیت درون آن دیده می‌شوند.

روش انجام پژوهش

برای تهیه نقشه زمین‌شناسی معدن آهن نرم و بررسی‌های سنگ‌شناسی و کانی‌سازی در محدوده، نخست برداشت‌های صحرائی و نمونه‌برداری از واحدهای سنگی و بخش‌های با کانی‌سازی انجام شد. شمار آنها ۲۵۸ نمونه از سطح منطقه برداشت شد و از میان آنها ۸۶ مقطع نازک و ۳۲ مقطع نازک صیقلی ساخته و با دقت بررسی شد. سپس نقشه زمین‌شناسی منطقه در نرم‌افزار ArcGIS رسم شد. پس از بررسی‌های دقیق سنگ‌نگاری ۱۰ نمونه

ثانویه در این توده آذرین درونی است و گمان می‌رود پیامد تجزیه هورنبلند (یا پیروکسن) باشد (شکل ۴- A) (برپایه بررسی‌های میکروسکوپی میزان اکتینولیت در بخش‌های گوناگون توده تا اندازه‌های متفاوت است و به‌فراخور میزان هورنبلندهای مقطع، از ۸-۷ درصد حجمی تا بیشتر از ۲۰-۱۵ درصد حجمی متغیر است). این کانی به‌صورت سوزنی‌شکل و دسته‌جاری دیده می‌شود. تجمع بلورهای اپیدوت پدیدآمده از دگرسانی پلاژیوکلازها نیز در بخش‌هایی از این سنگ‌ها دیده می‌شود (شکل ۴- B). همچنین، به مقدار کمتر، جانشینی هورنبلند با کلریت (۲-۱ درصد حجمی) و نشانه‌هایی از اپاسیتی‌شدن نیز در این سنگ‌ها دیده می‌شوند.

میکروسکوپی، این سنگ‌ها ۶۵-۶۰ درصد حجمی پلاژیوکلاز (لابرادوریت تا آندزین)، ۲۵-۲۰ درصد حجمی کلینوپیروکسن (بیشتر دیوپسید)، هورنبلند (۸-۶ درصد حجمی) و مقدار اندکی پتاسیم‌فلدسپار (۳-۲ درصد حجمی) دارند. در مقطع‌های میکروسکوپی، آپاتیت به‌طور پراکنده به‌صورت بلورهای شکل‌دار بی‌رنگ تا زرد مایل به کرمی و گاه مایل به سبز دیده می‌شود. فراوانی آپاتیت در این واحد تا ۳ درصد حجمی می‌رسد و از ویژگی‌های آن تجمع محلی آپاتیت در بخش‌هایی از مقطع‌های بررسی‌شده است. در این سنگ‌ها، مگنتیت‌های شکل‌دار که تا ۵ درصد حجمی حجمی فراوانی دارند، کانی کدر فراوان به‌شمار می‌روند. اکتینولیت فراوان‌ترین کانی



شکل ۴- تصویرهای میکروسکوپی از سنگ‌های گابروی-دیوریتی منطقه نرم (در PPL): A) گابرو با بلورهای درشت پیروکسن، هورنبلند و پلاژیوکلاز؛ B) واحد گابروی که در آن جانشینی هورنبلندها و پیروکسن‌ها با اپیدوت به‌فراوانی دیده می‌شود؛ C) واحد هورنبلند دیوریت با فراوانی بالای هورنبلند همراه اکتینولیت و پلاژیوکلاز؛ D) واحد میکرودیوریت (نام اختصاری کانی‌ها برگرفته از: Whitney و Evans (۲۰۱۰): Pl؛ پلاژیوکلاز؛ Hbl؛ هورنبلند؛ Px؛ پیروکسن؛ Act؛ اکتینولیت؛ Ep؛ اپیدوت)

به‌طور محلی در برخی بخش‌های این توده، نشانه‌های اپاسیتی‌شدن در هورنبلندها دیده می‌شوند. در برخی بخش‌ها نیز رگچه‌های کلسیتی و گاه سیلیسی با ستبرای متغیر (که گاه به ۳ سانتیمتر می‌رسد) دیده می‌شوند.

کانی‌سازی و دگرسانی

پهنه کانی‌سازی در محدوده معدن نرم به‌صورت یک پنجره زمین‌ساختی به درازای نزدیک به ۲۲۰ متر و پهنای نزدیک به ۱۴۵ متر درون واحدهای دولومیتی بازتبلور یافته دیده می‌شود. رخداد کانه‌زایی در محدوده معدن نرم با ستبرای چشمگیری از عدسی‌ها و توده‌های مگنتیتی و بسیار محدود به‌صورت برشی دیده می‌شود. از دیدگاه بزرگی، این عدسی‌ها و توده‌ها نیم تا بیشتر از ۵ متر ستبرای و تا حداکثر ۱۵ متر گسترش دارند.

در پیشکار اصلی معدن، کانی‌سازی مگنتیت در شکل‌های گوناگون دیده می‌شود که عبارتند از: (۱) کانی‌سازی پراکنده مگنتیت به‌همراه پیریت؛ (۲) کلاست‌های مگنتیتی درون واحدهای دیوریتی و نیز درون دولومیت؛ (۳) عدسی‌های مگنتیت در کنار آپوفیزهای دیوریتی؛ (۴) لایه‌های مگنتیتی که بیشتر روی آنها واحد میکروکنگلومرایی و در برخی بخش‌ها آهک‌ها (که نشانه‌های نفوذ محلول در آنها دیده می‌شود) رخنمون دارند؛ (۵) مگنتیت در زمینه برش‌هایی که بیشتر قطعات آنها را دولومیت‌های بازتبلور یافته دربر گرفته‌اند. در بخش‌هایی از مرزهای پهنه کانی‌سازی، رگه‌های ظریف اسپکیولاریتی دیده می‌شوند. همچنین، کانی‌سازی مگنتیت در واحد شیبستی قاعده منطقه کانی‌سازی به‌طور پراکنده دیده می‌شود.

کانی‌سازی پیریت به‌فراوانی و به‌صورت پراکنده در بیشتر واحدهای سنگی منطقه دیده شد. اکتینولیت و

واحد هورنبلند دیوریت: در بخش‌های کوچکی از منطقه، رخنمون واحد دیوریتی با افزایش میزان هورنبلند در توده آذرین درونی شناخته می‌شود. بافت بیشتر این سنگ‌ها اینترگرانولار است و تا نزدیک به ۴۰ درصد حجمی کانی‌های مافیک سنگ هورنبلند هستند (شکل ۴- C) که در برخی بخش‌ها با اکتینولیت جایگزین شده است. پلاژیوکلاز با فراوانی ۳۵-۳۰ درصد حجمی دومین کانی فراوان این واحد است. نشانه‌های کلریتی و اپیدوتی‌شدن در این واحد بیشتر از واحد گابرویی و میکرودیوریتی به‌چشم می‌خورد و بخش‌هایی از این واحد سیلیسی شده است.

واحد میکرودیوریتی: واحد میکرودیوریتی در نمونه ماکروسکوپی، به‌رنگ خاکستری تا مایل به سبز تیره و بسیار ریزدانه دیده می‌شود. این گروه سنگی بافت هیپایدیومورف گرانولار دارد و در ترکیب مودال خود نزدیک به ۶۰-۵۵ درصد حجمی پلاژیوکلاز (آندزین)، ۳۵-۳۰ درصد حجمی هورنبلند، ۱۰-۵ درصد حجمی کلینوپیروکسن و به مقدار بسیار اندک (کمتر از ۳ درصد حجمی) پتاسیم‌فلدسپار دارد (شکل ۴- D). آپاتیت و زیرکن مهم‌ترین کانی‌های فرعی این واحد به‌شمار می‌روند و ۳-۲ درصد حجمی از مجموعه کانیایی را دربر گرفته‌اند. مجموعه کانی‌های کدر شامل ۳-۲ درصد حجمی مگنتیت (با بلورهای شکل‌دار و اندازه بیشینه نزدیک به ۰/۴ میلیمتر) و نیز ۵-۴ درصد حجمی پیریت (شکل‌دار) هستند. بلورهای انباشته‌شده اکتینولیت با فراوانی نزدیک به ۷-۶ درصد حجمی دیده می‌شود. اپیدوت در زمینه سنگ و به‌صورت جانشینی در پلاژیوکلاز دیده می‌شود و مقدار جانشینی آن به ۴۰-۳۵ درصد حجمی می‌رسد. جانشینی هورنبلند با کلریت نیز در بخش‌های حاشیه‌ای توده و به مقدار کمتر (کمتر از ۱۰ درصد حجمی جانشینی) دیده می‌شود. به‌ندرت و

کانه مگنتیت را همراهی می‌کند. در برخی بخش‌ها، مگنتیت به صورت پراکنده است و گاهی نیز بافت توده‌ای نشان می‌دهد. در این منطقه، مگنتیت‌ها بیشتر بی‌شکل هستند. گاه در نمونه دستی نیز بلورهای شکل‌دار مگنتیت به خوبی شناسایی می‌شوند و ابعاد آنها از ۲ تا ۸ میلی‌متر متغیر است. این کانی به طور بخشی و تا نزدیک به ۶-۵ درصد در راستای مرز بلورها و درزه‌های با هماتیت (مارتیتی شدن) جایگزین شده‌اند (شکل ۵-F). دانه پراکنده، توده‌ای و بافت مارتیتی از فراوان‌ترین بافت‌ها در مقطع‌های صیقلی و نازک صیقلی کانۀ مگنتیت هستند. بافت ریزدانه توده‌ای بافت غالب است. کانه‌زایی مگنتیت دست‌کم در دو مرحله روی داده است. بخش دیگری از کانه‌زایی آهن منطقه در قالب رگه- رگچه‌های مگنتیت \pm اکتینولیت (شکل ۵-E) است که در بخش‌های مختلف، کانی‌سازی مرحله پیشین را قطع کرده‌اند. گفتنی است رگچه‌های ظریف اسپکیولاریت در زمینه مگنتیت نیز در مرز پهنه کانی‌سازی دیده شدند که همزمانی آنها با رگه- رگچه‌های مگنتیتی مرحله پیشین و یا تأخیری بودن احتمالی آنها نیاز به بررسی بیشتر دارد.

پیریت: فراوان‌ترین کانی سولفیدی منطقه پیریت است؛ به گونه‌ای که افزون بر پهنه کانی‌سازی در واحدهای دیوریتی و گابرویدیوریتی منطقه نیز به صورت دانه پراکنده دیده می‌شود. کانه‌زایی پیریت به شکل‌های گوناگون دیده می‌شود: (۱) پیریت‌های بی‌شکل (با فراوانی ۶-۵ درصد حجمی) همراه مگنتیت؛ (۲) بلورهای شکل‌دار پیریت همراه مگنتیت به صورت پراکنده و در زمینه‌ای از اکتینولیت با فراوانی ۳-۲ درصد حجمی؛ (۳) بلورهای پیریت که بیشترین توزیع را در منطقه دارند و نشانه‌هایی از خردشدگی نشان می‌دهند و مقدار آنها به ۱۰-۸ درصد حجمی می‌رسد؛ (۴) اجتماعات کانه‌زایی پیریت با جهت‌یابی‌های روشن که به مقدار کم و تا ۲ درصد حجمی دیده می‌شوند؛ (۵) کانه‌زایی جهت‌یافته و تا اندازه‌ای

ترمولیت کانی‌های شاخص و باطله همراه کانی‌سازی مگنتیت هستند که در برخی بخش‌ها به شکل سوزنی دیده می‌شوند. آپاتیت دیگر کانی مهم همراه با مگنتیت است. اپیدوتی شدن و نیز کلریتی شدن از فراوان‌ترین دگرسانی‌های این منطقه هستند. بخش‌های دگرسانی کلسیمی- آهنی به صورت بخش‌های دما بالا و کم دما (شکل‌های ۵-A و ۵-B) و بخش‌های دگرسانی منیزیمی (اسکارن منیزیمی) تنها در پهنه کانی‌سازی و پیشکار اصلی معدن دیده می‌شوند. این بخش‌ها بر پایه فراوانی و توزیع کانی‌های اکتینولیت، آپاتیت، کانی‌های کربناته و نیز پیدایش کانی‌هایی مانند سرپانتین، تالک و فلوگوپیت (که تنها در قاعده پهنه کانی‌سازی دیده می‌شوند) از هم شناسایی می‌شوند (شکل‌های ۵-D و ۵-E). در دیگر بخش‌های محدوده معدن نرم تنها پدیده کلریتی شدن و اپیدوتی شدن واحدهای آذرین درونی گفتنی است.

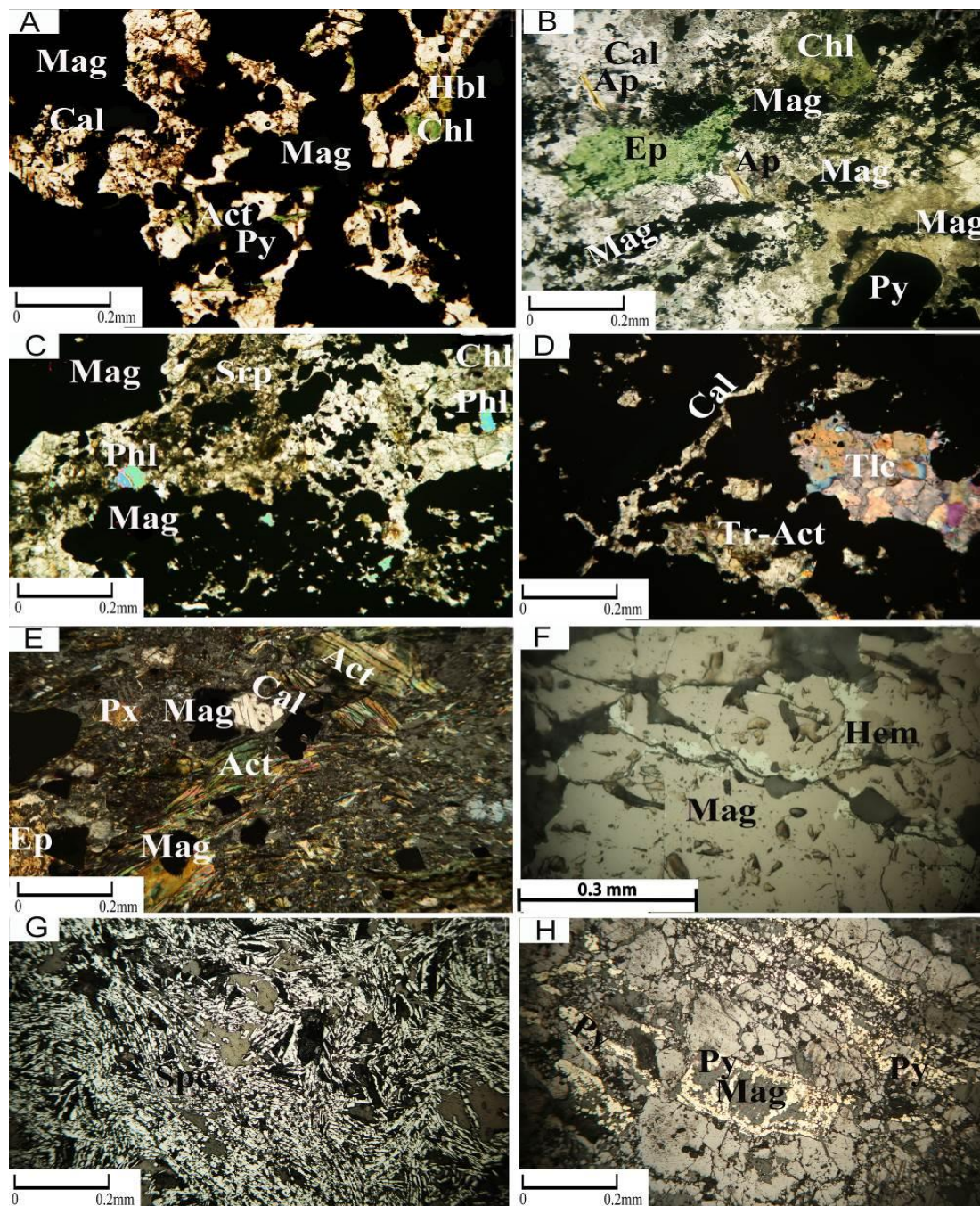
در برخی بخش‌ها، رگه- رگچه‌های سیلیسی (با ستبرای کمتر از یک سانتیمتر تا ۳ سانتیمتر) در واحدهای دولومیتی (به ستبرای نزدیک به ۱/۵ متر) دیده می‌شوند که دارای پیریت به صورت پراکنده هستند. بر پایه بررسی‌های Mehrabi و همکاران (۲۰۱۵)، در چنین واحدهای دولومیتی میزان اکسیدهای آهن بالاست و از آنها به نام دولومیت‌های گرمایی دما بالای سازند ریزو نام برده‌اند. همچنین، نشانه‌های بودین‌شدگی رگچه‌های کوارتز در دیوریت‌های منطقه در بخش‌های گوناگون دیده می‌شود.

کانی‌شناسی و کانه‌نگاری

مگنتیت: مگنتیت کانۀ اصلی در این محدوده است. فراوانی ۵۰-۴۵ درصد حجمی دارد و بیشتر با پیریت همراه است. آپاتیت و اکتینولیت مهم‌ترین کانی‌های غیرفلزی در ارتباط با مگنتیت در این پهنه کانی‌سازی هستند (شکل ۵-E). آپاتیت به صورت بلورهای ریزدانه

(H). در برخی مقطع‌ها و بسیار کم، نشانه‌هایی از جایگزینی پیریت با گوتیت دیده می‌شود.

سوزنی‌شکل پیریت در رگچه‌های کوارتز، همراه مگنتیت. این رگچه‌ها ستبرای کم (۵-۳ میلیمتر) دارند (شکل ۵-)



شکل ۵- تصویرهای میکروسکوپی از دگرسانی‌ها و کانی‌سازی‌های گوناگون در منطقه نرم: (A) دگرسانی کلسیمی آهنی کم‌دما با اکتینولیت، آپاتیت، کلسیت و کلریت؛ (B) دگرسانی کلسیمی - آهنی دما بالا با اپیدوت، اکتینولیت و کلسیت؛ (C) دگرسانی منیزیمی با فلوگوپیت + کلریت + سرپانتین؛ (D) دگرسانی منیزیمی با ترمولیت - تالک و رگچه‌های کلسیت؛ (E) رگچه مگنتیت - اکتینولیت در دیوریت میزبان؛ (F) مگنتیت‌هایی که به‌طور ظریف در محل شکستگی‌ها مارتیتی شده‌اند؛ (G) اسپکیولاریت حاشیه منطقه کانی‌سازی؛ (H) پیریت‌ها و مگنتیت‌های خردشده (Mag: مگنتیت؛ Py: پیریت؛ Spec: اسپکیولاریت؛ Act: اکتینولیت؛ Ap: آپاتیت؛ Hem: همتایت؛ Tr: ترمولیت؛ Phl: فلوگوپیت؛ Srp: سرپانتین؛ Chl: کلریت؛ Ep: اپیدوت؛ Hbl: آمفیبول؛ Tlc: تالک؛ Cal: کلسیت)

دیده می‌شوند.

اکتینولیت- ترمولیت: فراوان‌ترین کانی باطله همراه مگنتیت در پهنه کانی‌سازی است که مقدار آن به ۲۰-۱۸ درصد حجمی می‌رسد. اکتینولیت به صورت الیافی و شعاعی، به رنگ سبز تیره با توزیع بالا و نیز به صورت تجمعی از بلورهای سوزنی و دسته‌جاری دیده می‌شود (شکل ۵- E). بلورها با اندازه متفاوت از ۰/۲ تا ۷ سانتیمتر دیده می‌شوند. در برخی مناطق، نشانه‌های هوازدگی و تغییر رنگ بلورهای سوزنی اکتینولیت از سبز به سفید به خوبی دیده می‌شوند. در بخش‌های منطبق بر دگرسانی‌های منیزیمی حضور کانی ترمولیت شناسایی می‌شود (شکل ۵- D).

اپیدوت: به صورت تجمعات بلوری که به رنگ سبز مشخص در نمونه دستی و با فراوانی ۱۵-۱۲ درصد حجمی در بخش‌های دگرسان شده دیده می‌شوند و پیامد تبدیل پلاژیوکلازها و هورنبلند هستند (شکل ۵- B).

کلریت: به طور پراکنده و در قالب کانی‌های بی‌شکل سبزرنگ در مرز بلورهای هورنبلند و نیز در مرز برخی بلورهای مگنتیت، دیده می‌شود (شکل ۵- A). فراوانی این کانی در منطقه نرم ۵-۴ درصد حجمی است.

بیوتیت ثانویه: به صورت جانشینی در هورنبلند و به شکل بلورهای ریز با فراوانی کمتر از ۵٪ در زمینه سنگ واحد میکرودیوریتی دگرسان شده در پهنه کانی‌سازی دیده می‌شوند.

کلسیت: افزون‌بر بلورهای کلسیت که به صورت ثانویه و پرکننده حفره‌ها درون واحدهای سنگی دگرسان شده منطقه دیده می‌شوند، این کانی به دو صورت در پهنه کانی‌سازی شناسایی می‌شود: (۱) حضور کلسیت در رگه- رگچه‌های مگنتیتی و گاه در

کالکوپیریت: به صورت پراکنده و بی‌شکل و با توزیع بسیار کم (کمتر از ۱ درصد حجمی) همراه با مگنتیت‌های شکل‌دار و پیریت دیده می‌شود. بزرگی آن نزدیک به ۲-۱ میلیمتر است. همچنین، میانبرهایی از کالکوپیریت درون بلورهای مگنتیت دیده می‌شوند. کالکوپیریت در دمای زیر ۵۵۷ درجه سانتیگراد پایدار است و به گفته دیگر، در دامنه دمایی تبلور دیوریت (۱۰۰۰-۸۰۰) پایدار نیست. از این رو، تجزیه انحلال جامدهای حد واسط اولیه یا انحلال جامد در شرایط کاهش تدریجی گوگرد حضور میانبرهای کالکوپیریت در مگنتیت را توجیه می‌کند (Rojas et al., 2018a).

اسپیکولاریت: اسپیکولاریت به صورت بلورهای تیغه‌ای و درون رگه- رگچه‌های بسیار ظریف به ضخامت ۳-۲ میلیمتر دیده می‌شود. در این رگچه‌ها مگنتیت، پیریت و کوارتز کانی‌های اصلی همراه هستند. تمرکز این رگچه‌ها در حاشیه پهنه کانی‌سازی به ۵-۴ رگچه در هر متر مربع می‌رسد. در بخش خاوری پیشکار اصلی، برش‌های با اسپیکولاریت و مگنتیت نیز دیده می‌شوند. در این برش‌ها میزان اسپیکولاریت چشمگیر است و تا ۲۵ درصد حجمی هر برش را شامل می‌شود (شکل ۵- G).

آپاتیت: بلورهای شکل‌دار آپاتیت با هندسه کامل و برجستگی بالا در مقطع‌های میکروسکوپی پهنه کانی‌سازی، همراه با مگنتیت و اکتینولیت به خوبی شناسایی می‌شوند (شکل ۵- B). بزرگی آن از ۰/۳ میلیمتر تا ۳ میلیمتر متغیر است. این بلورها در نمونه دستی، بی‌رنگ تا مایل به سبز دیده می‌شوند. همچنین، بلورهای آپاتیت در دیوریت‌های دگرسان شده پهنه کانی‌سازی و واحدهای میکرودیوریتی نیز دیده می‌شوند و توزیع کمابیش خوبی در مقطع‌های میکروسکوپی دارد. آپاتیت در مقطع نمونه‌های منطقه کانی‌سازی به رنگ سبز

مگنتیت‌های هر دو مرحله بسیار دچار فرایندهای زمین‌ساختی بعدی شده‌اند. پیریت پیش از کانه‌زایی مگنتیت به صورت دانه پراکنده و نیز همزمان با کانه‌زایی دیده می‌شود. در حاشیه منطقه کانه‌زایی و به صورت اندک، رگچه‌های کالکوپیریت و کانی‌سازی اسپیکولاریت به صورت رگه-رگچه‌ای دیده می‌شوند. آپاتیت و اکتینولیت همراه کانی‌سازی مگنتیت به فراوانی دیده می‌شوند. در مراحل تأخیری نیز تجمعات اکتینولیت-ترمولیت دیده می‌شوند. کلریت و اپیدوت از مهم‌ترین کانی‌های دگرسانی منطقه هستند. کلسیت افزون‌بر حضور در زمینه و نیز همراه با کانی‌سازی در مراحل پایانی در قالب رگچه‌های کلسیتی، فراوانی بالایی دارد.

گمان می‌رود فرایندهای ماگمایی-گرماابی در کانه‌زایی مگنتیت در منطقه نقش بنیادی داشته‌اند. کانه‌زایی در دو مرحله روی داده است و در مرحله دوم با افزایش محلول‌های گرماابی، تغییرات بافتی در کانه‌زایی مگنتیت‌های گرماابی دیده می‌شوند. پیریت به صورت نخستین در هر دو مرحله کانه‌زایی توزیع یکنواختی دارد. کالکوپیریت و اسپیکولاریت کانی‌های مرحله تأخیری هستند که با کاهش دما در منطقه کانی‌سازی پدید آمده‌اند. آپاتیت کانی همراه مگنتیت است و در مراحل گوناگون کانه‌زایی توزیع یکنواختی دارد. آرانجایی که عنصرهای آهن و کلسیم در منطقه، در سراسر محدوده کانی‌سازی حضور خوبی دارند، ترمولیت و اکتینولیت نیز به فراوانی دیده می‌شوند و در مراحل تأخیری با افزایش رفتار محلول‌های گرماابی فراوانی آن افزایش یافته است.

شیمی کانسنگ

برپایه داده‌های به‌دست‌آمده به روش شیمی تر،

رگچه‌های اسپیکولاریت+مگنتیت+کوارتز؛ (۲) رگچه‌های کلسیتی که کانی‌سازی همراه ندارند و در بخش‌های گوناگون پهنه کانی‌سازی دیده می‌شوند.

کوارتز: این کانی به صورت بلورهای ریز و پراکنده با بزرگی کمتر از ۰/۵ میلیمتر در زمینه کانسنگ مگنتیتی با فراوانی ۱-۲ درصد حجمی دیده می‌شود. همچنین، کوارتز در قالب رگچه‌های اسپیکولاریت+مگنتیت+کوارتز±کلسیت دیده می‌شود. **هماتیت:** این کانی در بخش بالایی پهنه کانی‌سازی واحد آهنی دیده می‌شود و به خوبی نشانه‌های نفوذ محلول با فراوانی رگه-رگچه‌های اکسید آهن در آن دیده می‌شود. در قاعده این واحد هماتیت‌زایی و جانشینی مگنتیت با هماتیت‌های ثانویه دیده شد. هماتیت به صورت پدیده مارتیتی شدن (نزدیک به ۶-۵ درصد حجمی) در محل درزه‌ها و مرز بلورهای مگنتیت دیده می‌شود (شکل ۵-F). **گوتیت:** این کانی در پی اکسیداسیون پیریت‌ها و با فراوانی کمتر از ۱ درصد حجمی دیده می‌شود و بافت‌های کلوییدی مشخصی نشان نمی‌دهد.

برپایه بررسی‌های کانی‌شناسی، توالی کانی‌های همیافت برای کانی‌سازی آهن معدن نرم در شکل ۶ آورده شده است.

Minerals	Hypogene			Oxidized Zone
	Early		Late	
	Stage1	Stage2		
Magnetite	██████████			
Pyrite	██████████			
Chalcopyrite			-----	
Specularite			-----	
Apatite	██████████			
Actinolite-Termolite	██████████			
Epidote			-----	
Chlorite	██████████			
Calcite	██████████			
Hematite	██████████			
Goethite				---

شکل ۶- توالی کانی‌های همیافت در اندوخته معدنی آهن نرم

نشانه‌های کانی‌سازی مگنتیت در دو مرحله با تفکیک بافت و ساخت کانه مورد توجه است.

درصدوزنی کانسنگ و مقدار گوگرد کانسنگ نیز برابر با ۰/۵ تا ۳ درصد است و از این رو، کانسنگ آهن مطلوبی ارزیابی می‌شود.

عیار آهن در منطقه ۵۵-۵۰ درصدوزنی و میزان FeO کل برابر با ۱۸/۰۴ تا ۲۲/۰۳ درصدوزنی است (جدول ۱). میزان فسفر برابر با ۰/۰۴ تا ۰/۱۸

جدول ۱- مقدار عیار آهن (برپایه درصدوزنی) به روش شیمی تر در کانسنگ آهن نرم

Sample No.	NP- 90	NP- 91	NP- 92	NP- 122	NP- 123
Fe%	51.04	52.64	54.23	51.65	55.03
FeO (total)	22.03	21.15	20.58	18.04	21.18

در کانسنگ به چشم می‌خورد. همچنین، همبستگی کمابیش خوبی میان مس و گوگرد دیده می‌شود (جدول ۳) که چه بسا به حضور کانی‌هایی مانند کالکوپیریت در منطقه کانی‌سازی و به احتمال بالا حضور کبالت در شبکه کانی پیریت مربوط است.

بالابودن مقدار گوگرد در کانسنگ آهن نرم با توجه به فراوانی کانی پیریت همراه مگنتیت توجیه‌شدنی است. مقدار مس در کانسنگ آهن نرم از ۲ تا ۶۱۹ گرم بر تن متغیر است (جدول ۲). نکته جالب توجه اینست که همبستگی مثبت بالایی میان عنصر گوگرد و کبالت

جدول ۲- داده‌های به‌دست‌آمده از تجزیه شیمیایی برخی عنصرها در کانسنگ آهن نرم (برپایه ppm)

Sample No.	NP- 61	NP- 63	NP- 64	NP- 65	NP- 66	NP- 76	NP- 77	NP- 79	NP- 80	NP- 81
Al	67228	18311	50160	66981	66444	11611	65479	19867	12285	19346
Ca	32469	55281	61693	33331	37195	>10000	56307	97081	34553	46440
Co	19.5	350.4	77.1	43.3	12.7	50.5	12.6	24.7	31.6	33.8
Cr	11	10	16	9	7	18	5	25	9	31
Cu	4	10	16	6	15	619	8	2	2	8
Fe	63831	>10000	>10000	78210	65240	>10000	60688	>10000	>10000	>10000
Mg	16573	12961	17023	19498	13709	8960	>20000	18491	15251	19331
Mn	484	351	295	272	420	2221	1507	894	628	781
Na	49042	4222	21053	45251	50213	640	8198	732	1428	3299
Nb	54.7	16.1	13.7	49.4	38	15.9	52.3	11.2	17.2	14.3
Ni	5	32	15	13	4	19	5	22	23	27
P	2032	1529	2767	2421	2104	942	2203	2629	1828	2444
S	2419	30000	18175	8426	1936	3898	1315	664	758	2312
Ta	2.52	0.82	0.65	1.95	1.67	0.37	2.43	0.72	0.26	0.29
Te	0.1	0.12	0.12	0.17	0.1	0.1	0.1	0.1	0.14	0.1
Th	8.74	2.95	7	6.43	6.55	0.1	7.09	6.71	0.76	1.66
Ti	8439	1523	6173	9972	9837	848	10215	1781	309	1003
Zr	114	37	115	95	97	33	97	24	20	24
V	37	242	65	50	38	143	41	158	275	275
Y	19.2	16.5	30.5	22.1	27.6	20	23.7	20	5.6	8.6
La	53	48	53	31	40	48	21	39	39	45
Ce	101	70	90	61	77	58	39	72	56	69
Pr	14.62	10.86	10.42	8.88	10.58	7.48	4.14	11.62	9.16	10.53
Nd	55.3	40	39.9	35.1	41	27.7	18	42.3	31.4	35.3
Sm	10.54	7.54	8.22	7.59	8.48	5.81	4.37	7.3	4.68	5.48
Eu	2.96	2.29	3.17	2.29	2.45	2.47	1.49	1.77	1.47	1.73
Gd	9.81	7.79	9.35	7.47	8.97	6.54	5.47	6.87	4.03	4.92
Tb	0.99	0.87	1.18	0.94	1.16	0.84	0.84	0.85	0.46	0.55
Dy	5.21	4.44	7.32	5.49	6.89	4.88	5.66	4.87	2.27	2.92
Hf	3.4	1.45	3.83	3.06	2.69	1.31	2.34	1.13	0.82	0.96
Er	2.61	1.88	3.74	2.76	3.31	2.22	2.93	2.36	0.99	1.26
Tm	0.33	0.21	0.47	0.34	0.4	0.23	0.35	0.27	0.11	0.14
Yb	1.9	1.1	2.5	1.9	2.1	1.2	1.7	1.4	0.5	0.7
Lu	0.28	0.15	0.37	0.27	0.28	0.16	0.24	0.2	0.1	0.1
ΣREE	294.11	218.57	263.43	200.37	242.83	189.02	142.47	221.1	159.35	190.84

جدول ۳- ضریب‌های همبستگی برخی عناصر در کانسنگ آهن نرم (به‌دست‌آمده به روش پیشنهادی Spearman (۱۹۰۴))

	Al	Ca	Co	Cu	Fe	Mg	Mn	Na	P	S	Ti	V	REE
Al	1.000												
Ca	-.204	1.000											
Co	-.479*	.351	1.000										
Cu	-.346	.227	.766**	1.000									
Fe	-.345	.273	.774**	.182	1.000								
Mg	.638**	-.089	-.337	-.458*	.006	1.000							
Mn	-.072	.664**	-.070	-.169	.153	.236	1.000						
Na	.871**	-.104	-.395*	-.278	-.249	.439*	-.070	1.000					
P	.584**	.183	-.049	-.203	.236	.498*	.066	.503*	1.000				
S	-.063	.304	.818**	.782**	.316	-.295	-.212	.046	.182	1.000			
Ti	.918**	-.004	-.387*	-.161	-.469*	.657**	-.041	.843**	.717**	.023	1.000		
V	-.298	.125	.294	-.142	.921**	.198	.259	-.196	.068	.040	-.428*	1.000	
REE	.414*	.406*	-.083	-.179	-.098	-.074	.125	.679**	.535*	.212	.557*	-.251	1.000

* Correlation is significant at the 0.05 level (1- tailed); ** Correlation is significant at the 0.01 level (1- tailed)

میانگین مقدار Al نیز در کانسنگ آهن نرم نزدیک به ۰.۴٪ وزنی اندازه‌گیری شده است (جدول ۲). مقدار کروم از ۵ تا ۳۱ گرم بر تن (میانگین فراوانی برابر با ۳۹/۵ گرم بر تن) متغیر است (جدول ۲). کم‌بودن مقدار کروم چه‌بسا پیامد تبلور کانی‌های خانواده پیروکسن هنگام تبلور مگنتیت و ورود کروم به ساختار این کانی‌های مافیک باشد که در بررسی‌های کانه‌نگاری کانسنگ نیز دیده شد. همبستگی بالای سدیم با عنصرهای کمیاب (حدود ۰/۸) به احتمال بالا پیامد ورود این عناصر به شبکه آپاتیت برای تنظیم بار است. مقدار کل عنصرهای REE در کانسنگ آهن نرم از ۱۴۲/۴۷ تا ۲۹۴/۱۱ گرم بر تن متغیر است و همبستگی بالای عنصرهای REE با فسفر، وانادیم و سدیم در منطقه دیده می‌شود (جدول ۳).

شیمی کانی مگنتیت

در شناسایی نوع کانی‌سازی اندوخته‌های معدنی آهن مگنتیتی، بررسی زمین‌شیمیایی عنصرهای فرعی و کمیاب در شبکه کانی مگنتیت مؤثر است. پیش از آن، توجه به ویژگی‌های زمین‌شناسی، دگرسانی‌ها، بافت و ساخت کانی‌سازی و نوع کانه‌ها تعیین‌کننده خواهد بود. در مگنتیت‌های منطقه نرم، مقدار کروم از ۸ تا ۱۱۲ گرم بر تن و مقدار وانادیم در شبکه مگنتیت از ۵۵ تا ۲۴۸ گرم بر تن تغییر

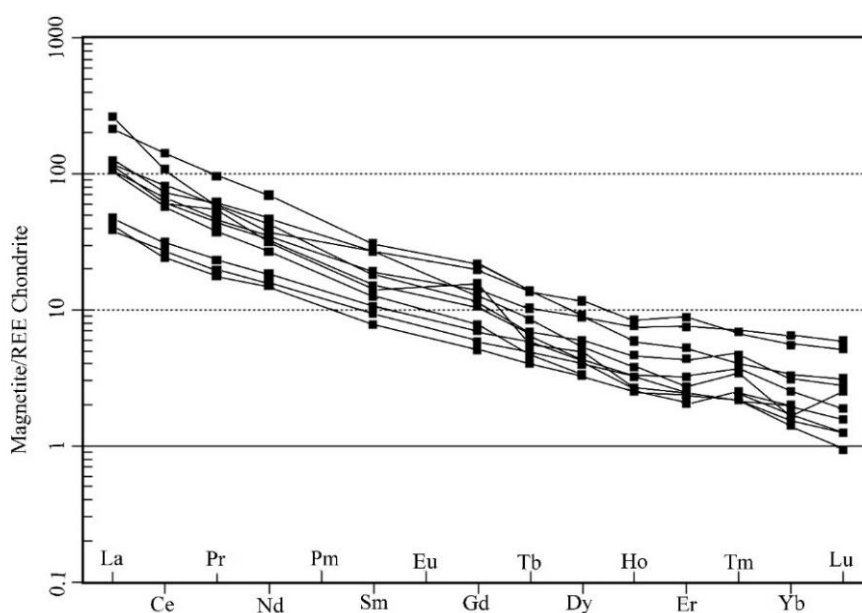
بالاترین همبستگی مثبت عنصر آهن در منطقه با وانادیم و نزدیک به یک است (جدول ۳) و چشمگیر است. همبستگی منفی بزرگی نیز میان وانادیم و آهن با تیتانیم (به‌ترتیب نزدیک به ۰/۴- و ۰/۵-) دیده می‌شود. از آنجایی که در بررسی‌های کانه‌نگاری، کانی مستقل آهن و وانادیم‌دار دیده نشد، همبستگی آهن و وانادیم می‌تواند مرتبط با جایگزینی آهن سه ظرفیتی در شبکه مگنتیت با وانادیم باشد. میزان وانادیم در کانسنگ آهن نرم از ۳۷ تا ۲۷۵ گرم بر تن متغیر است (جدول ۲). همچنین، هیچ‌گونه شواهد کانه‌نگاری نشان‌دهنده حضور کانی تیتانومگنتیت در منطقه کانی‌سازی دیده نشد. همچنین، همبستگی بالای تیتانیم با آلومینیم (نزدیک به یک)، سدیم (نزدیک به ۰/۹)، فسفر (نزدیک به ۰/۶) و عنصرهای حاکی کمیاب (REE) (نزدیک به ۰/۵) احتمال حضور این عنصر در شبکه کانی‌های مافیک همراه کانی‌سازی مانند اکتینولیت را نشان می‌دهد. پس همبستگی منفی آهن و تیتانیم چه‌بسا به کاهش دما مرتبط باشد که به‌دنبال آن ناسازگاری تیتانیم در شبکه مگنتیت و ورود آن به ساختار کانی‌های دگرسانی مانند اکتینولیت روی داده است. میانگین مقدار منگنز در نمونه‌های کانی‌سازی نرم، ۷۸۶ گرم بر تن است و به‌ندرت در برخی نمونه‌ها به یک درصد و بالاتر می‌رسد. کم‌بودن مقدار منگنز در منطقه کانی‌سازی با فراوانی و توزیع کانی اکتینولیت مرتبط است.

مگنتیت‌های معدن نرم (مگر در یک نمونه) زیر یک است و الگوی عنصرهای کمیاب بهنجارشده به ترکیب کندریت کمابیش هموار است (شکل ۷).

می‌کند. مقدار کل عنصرهای کمیاب در کانی مگنتیت منطقه از ۵۸/۰۶ تا ۲۹۸/۶۴ گرم بر تن متغیر است (جدول ۴). نسبت Eu/Eu^* در

جدول ۴- داده‌های به‌دست‌آمده از تجزیه عنصرهای کمیاب برای مگنتیت‌های منطقه نرم (برپایه ppm)

Sample No	MT- 1	MT- 2	MT- 3	MT- 4	MT- 5	MT- 6	MT- 7	MT- 8	MT- 9
Ba	163.5	76.7	>10000	369.4	1400.6	186.6	201.1	1391.9	304.6
Cr	11	61	112	44	8	41	36	10	10
Cs	0.43	0.67	0.05	0.07	0.34	0.25	0.22	0.09	0.04
Ga	27.1	23	10.6	28.5	12.5	20.9	22.5	12.3	18.4
Hf	0.5	0.6	0.2	0.2	0.3	0.2	0.2	0.2	0.2
Nb	2.1	1.9	0.2	0.7	1.9	2.6	1.3	1.5	0.1
Rb	4.9	5.6	0.5	1.6	2.1	3.9	2.4	1.1	0.6
Sr	51.8	44.2	389.5	60.3	98	83.1	55.1	79.9	45.7
Th	4.26	3.91	0.97	1.07	1.57	1.99	1.57	1.59	2.17
U	0.8	1.04	1.76	0.28	0.61	0.46	0.53	0.61	0.37
V	248	202	55	94	156	149	84	112	137
Y	12.6	9	6.9	4.8	4.8	5.9	4.2	4.4	5.2
Zr	22	27	5	2	3	3	6	2	3
La	65.9	32.8	80.8	11.9	35.5	14.6	12.7	32.5	36.3
Ce	113.7	50	86.6	21.7	49.4	25	19.5	46.4	65.7
Pr	11.64	5.33	6.96	2.37	6.55	2.81	2.17	4.55	7.08
Nd	41.5	19.6	22.5	9.5	19	10.9	8.9	16	25.5
Sm	5.97	2.91	5.22	1.82	2.74	2.05	1.51	2.44	3.53
Eu	1.51	0.92	1.32	0.51	0.64	0.61	0.45	0.66	0.97
Gd	5.56	2.7	3.27	1.5	4.01	1.79	1.31	2	2.91
Tb	0.64	0.32	0.4	0.23	0.26	0.27	0.19	0.22	0.3
Dy	2.91	1.89	1.69	1.27	1.56	1.39	1.04	1.06	1.36
Ho	0.42	0.33	0.27	0.23	0.19	0.23	0.18	0.18	0.19
Er	1.09	0.91	0.57	0.52	0.49	0.67	0.43	0.48	0.51
Tm	0.13	0.15	0.11	0.07	0.08	0.12	0.08	0.07	0.07
Yb	0.68	0.64	0.35	0.41	0.35	0.52	0.41	0.32	0.29
Lu	0.1	0.09	0.04	0.05	0.08	0.06	0.05	0.04	0.03
Eu/Eu*	0.8	1	0.73	0.94	1.02	0.97	0.98	0.91	0.92
ΣREE	298.64	157.77	230.12	87.52	58.06	92.96	79.01	127.1	170.95



شکل ۷- الگوی بهنجارشده عنصرهای کمیاب در مگنتیت‌های منطقه کانی‌سازی نرم

زمین‌شیمی توده‌های گابرویی - دیوریتی

داده‌های به‌دست‌آمده از تجزیه عنصرهای اصلی، فرعی و خاکی کمیاب برای توده‌های آذرین درونی در محدوده معدن نرم در جدول ۵ آورده شده‌اند. مجموع عنصرهای آلکالی برابر با ۳/۷۴ تا ۶/۷۲ درصدوزنی است. همچنین، مقدار نسبت $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ از ۱/۱ بیشتر است و تا ۳ می‌رسد. مقدار SiO_2 نیز برابر با ۴۷/۷۷ تا ۵۲/۸۶ درصدوزنی است (جدول ۵). از این‌رو، در نمودار نامگذاری Co_x (۱۹۷۹) این نمونه‌ها در گروه سنگ‌های گابرویی-دیوریتی جای می‌گیرند (شکل ۸). مقدار فراوانی Al_2O_3 و TiO_2 به ترتیب برابر با ۱۴/۳۵ - ۱۶/۸ و ۲/۵ - ۱/۱۸ درصدوزنی است. با توجه به بالا بودن مقدار TiO_2 و مجموع عنصرهای آلکالی، این توده‌ها سرشت آلکالی دارند. نمودار فراوانی عنصرهای خاکی کمیاب بهنجار شده در برابر ترکیب کندریت برای توده‌های گابرویی-دیوریتی نرم در شکل ۹ نشان داده شده است. مقدار La_N/Yb_N از ۹/۸۹ تا ۲۱/۹۷

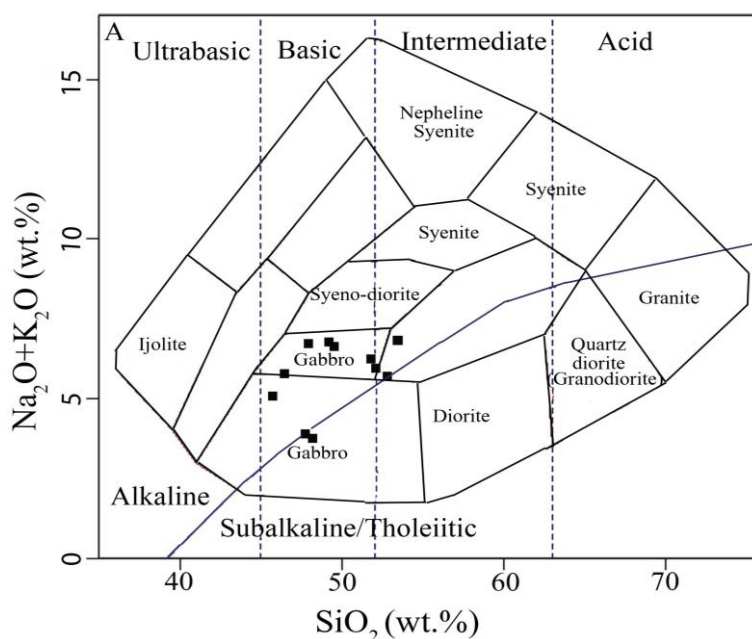
تغییر می‌کند. نسبت Eu/Eu^* برای توده‌های آذرین درونی منطقه از ۰/۸ تا ۱/۱ متغیر است (بیشتر از ۰/۸) است. این ویژگی نبود یا کم‌بودن پلاژیوکلاز در خاستگاه و یا چه‌بسا بالا بودن فوگاسیته اکسیژن را نشان می‌دهد؛ به‌گونه‌ای که در این شرایط Eu وارد شبکه پلاژیوکلاز نمی‌شود (Rollinson, 1993). پیدایش و فراوانی کانی‌های مگنتیت و اسپکیولاریت در واحدهای سنگی منطقه نشان‌دهنده درستی این نکته است. نمودار عنکبوتی عنصرهای فرعی و برخی عنصرهای خاکی کمیاب در برابر ترکیب گوشته اولیه برای توده‌های گابرویی-دیوریتی منطقه نرم در شکل ۱۰ نشان داده شده است. در این نمودار غنی‌شدگی از عنصرهای LILE (مانند: Ba, Cs, Rb, K) و عنصرهای REE سبک (مانند: Nd, Ce, La) و Sm دیده می‌شود. تهی‌شدگی فسفر که در این نمودار دیده می‌شود در ارتباط با تبلور آپاتیت و فراوانی این کانی در واحدهای گابرویی-دیوریتی منطقه است.

جدول ۵- داده‌های زمین‌شیمیایی اکسیدهای اصلی (بر پایه درصدوزنی) و عنصرهای فرعی و خاکی کمیاب (بر پایه ppm) توده‌های آذرین درونی محدوده معدن نرم

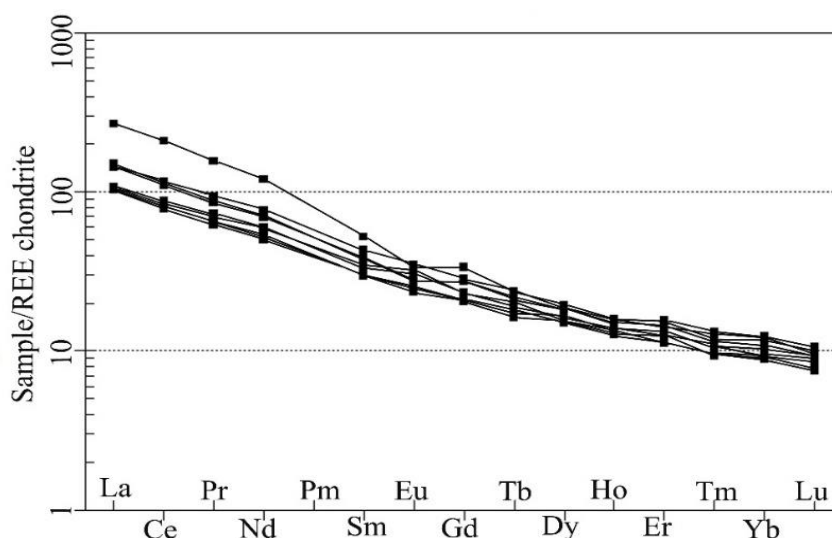
Sample No.	NP- 5 Gabbro	NP- 10 Diorite	NP- 11 Gabbro- Diorite	NP- 14 Diorite	NP- 16 Diorite	NP- 17 Gabbro	NP- 20 Gabbro	NP- 25 Gabbro	NP- 40 Gabbro- Diorite	NP- 48 Diorite
Longitude	57°22'23.3"	57°22'14.8"	57°22'13.2"	57°22'49.5"	57°22'26.5"	57°23'17.9"	57°22'15.3"	57°21'53.3"	57°22'15.5"	57°22'54.9"
Lotitude	34°52'40.2"	34°52'38.9"	34°52'38.7"	34°52'19.6"	34°52'38.8"	34°51'58.7"	34°52'36.9"	34°52'27.2"	34°52'17.2"	34°52'52.4"
SiO ₂	45.75	52.86	49.46	54.28	51.83	46.47	48.14	48.02	49.28	51.77
TiO ₂	2.01	1.31	2.19	1.48	1.35	2.33	1.18	2.2	2.5	1.23
Al ₂ O ₃	14.5	15.27	16.61	17.35	16.8	16.16	14.35	16.55	16.74	14.43
FeOt	11.45	9.65	10.62	6.65	8.56	10.68	11.35	10.91	9.48	11.34
MnO	0.24	0.11	0.22	0.03	0.08	0.08	0.12	0.1	0.03	0.12
MgO	9.87	7.11	6.83	5.4	5.14	8.4	9.26	7.69	6.51	8.14
CaO	8.14	4.44	4.22	4.47	6.67	6.15	8.79	4.9	3.82	8.79
Na ₂ O	3.37	2.96	3.79	5.59	4.43	3.1	2.81	3.81	4.26	2.81
K ₂ O	1.69	2.66	2.83	1.23	1.73	2.65	0.93	2.89	2.46	0.99
P ₂ O ₅	0.6	0.66	0.82	0.58	0.55	0.59	0.39	0.8	1.43	0.36
LOI	1.75	2.55	2.08	2.01	2.43	2.31	2.23	1.47	2.33	2.38
Total	99.37	99.58	99.67	99.7	99.57	98.92	99.55	99.34	98.84	99.36

جدول ۵- ادامه

Sample No.	NP- 5 Gabbro	NP- 10 Diorite	NP- 11 Gabbro- Diorite	NP- 14 Diorite	NP- 16 Diorite	NP- 17 Gabbro	NP- 20 Gabbro	NP- 25 Gabbro	NP- 40 Gabbro- Diorite	NP- 48 Diorite
Ba	516.8	1030.8	784.4	209.1	415.8	1086.6	221.7	209.1	307.6	209.1
Cs	8.86	2.41	3.74	1.54	1.82	4.19	1.31	1.54	1.11	1.54
Hf	4.7	6.6	6.6	5.5	4.9	5.4	5.3	5.5	9.8	5.5
Nb	32.7	38.5	45.5	31.5	28.4	34	29.7	31.5	89.5	31.5
Rb	39.8	76.7	48.3	34.6	38.8	65.7	32.8	34.6	24.3	34.2
Sr	407.2	401	439	247.5	496.9	607.6	262.4	247.5	162.4	247.5
Ta	1.7	1.9	2.1	1.5	1.5	1.9	1.7	1.5	3.7	1.5
Th	4.55	7.4	7.2	5.74	5.38	4.94	5.54	5.74	11.28	5.74
V	212	92	197	105	98	238	111	105	140	105
Zr	206	292	284	233	203	208	227	233	468	233
Y	23.1	29.3	29.1	24.7	23.3	24.7	30.2	24.7	28.9	28.7
La	33.6	46.7	44.1	31.7	33.3	31.9	32.1	31.7	83.1	31.7
Ce	71	91.5	93.8	88.8	66.4	68.4	62.9	65.7	169.6	65.7
Pr	8.91	10.61	11.48	7.83	7.91	8.51	7.56	7.83	19.07	7.83
Nd	36	42.3	46.1	31.1	32	35.5	30.1	31.1	72.1	31.1
Sm	6.45	7.56	8.41	5.9	5.75	6.8	5.87	5.9	10.17	5.9
Eu	2.24	2.07	2.58	1.86	1.81	2.34	1.72	1.86	2.47	1.86
Gd	5.98	7.12	7.37	5.29	5.48	6.05	5.36	5.29	8.69	5.29
Tb	0.95	1	1.13	0.83	0.86	0.9	0.77	0.82	1.12	0.82
Dy	5	5.8	5.95	5.36	4.84	5.21	4.98	5.36	6.26	5.36
Ho	0.96	1.13	1.08	0.96	0.9	0.99	0.91	0.96	1.14	0.96
Er	2.35	3.19	3	2.78	2.41	2.7	2.64	2.78	3.28	2.78
Tm	0.31	0.38	0.37	0.34	0.31	0.3	0.35	0.34	0.43	0.34
Yb	1.84	2.44	2.28	2.16	1.98	1.92	1.92	2.16	2.55	2.16
Lu	0.24	0.32	0.3	0.3	0.29	0.25	0.28	0.3	0.31	0.3
Na ₂ O/K ₂ O	1.99	1.11	1.34	4.55	2.56	1.17	3.02	1.32	1.73	2.84
LaN/YbN	12.31	12.9	13.04	21.07	11.34	11.2	11.27	9.89	21.97	9.89
Eu/Eu*	1.1	0.86	1	1.02	0.99	1.12	0.94	1.02	0.8	1.02



شکل ۸- جایگاه توده‌های آذرین درونی محدوده معدن نرم در نمودار نام‌گذاری Cox و همکاران (۱۹۷۹)



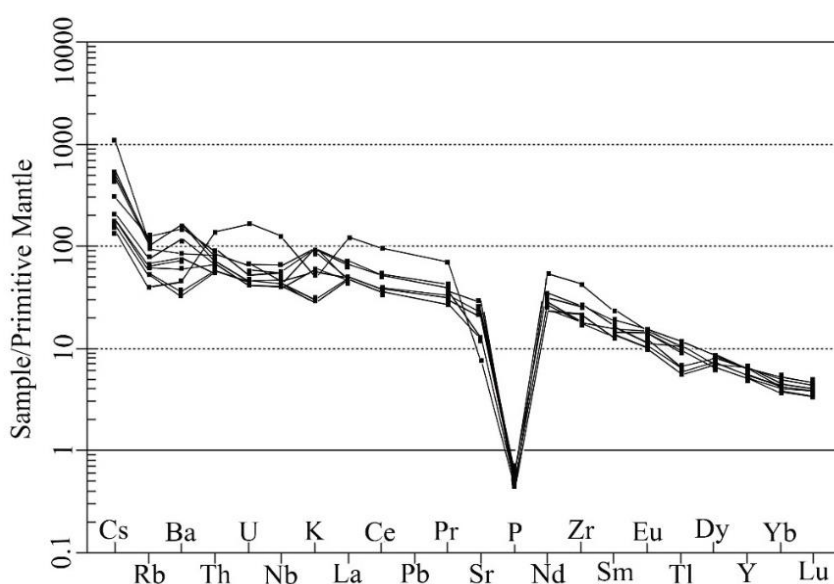
شکل ۹- الگوی پراکندگی عنصرهای خاکی کمیاب بهنجار شده به ترکیب کندریت (Boynnton, 1985) برای توده‌های آذرین محدوده معدنی نرم

بحث

سنگ‌زایی توده‌های گابرویی-دیوریتی منطقه

بر پایه ویژگی‌های سنگ‌شناسی و زمین‌شیمی سنگ کل، ماگماتیسم منطقه سرشت آکالن دارد (شکل ۸). مقدار Zr/Nb در توده‌های آذرین درونی بررسی شده برابر با ۵/۲۳ تا ۷/۸ است. از آنجایی که نسبت پایین Zr/Nb (کمتر از ۱۵/۷۱) خاستگاه غنی‌شده ماگما را نشان می‌دهد (Sun and McDonough, 1989)، پس خاستگاه

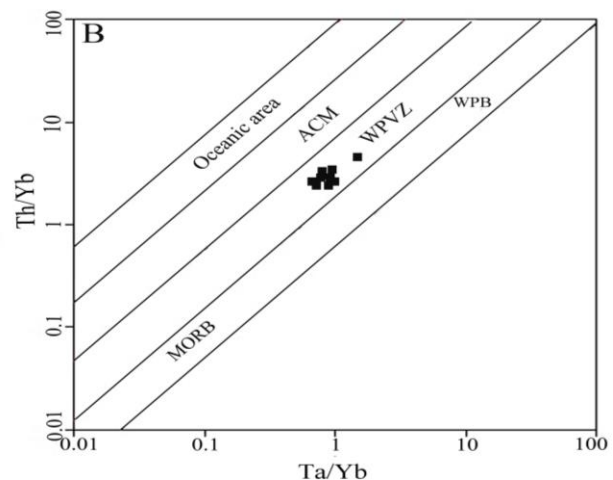
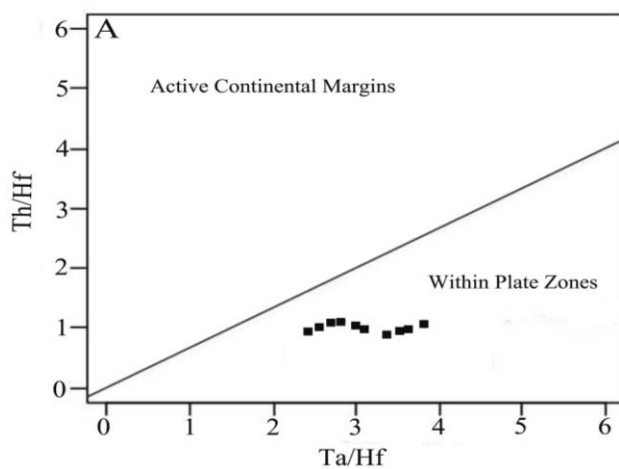
ماگماتیسم در منطقه، چه بسا گوشته‌ای غنی‌شده باشد. همچنین، نسبت عنصرهای HFSE/LREE در ماگمای آکالن چنانچه بیشتر از یک باشد نشان‌دهنده ماگمای برخاسته از سست کره و نسبت‌های کمتر از یک، ماگمای برخاسته از سنگ کره را نشان می‌دهند (Smith et al., 1999). بر پایه داده‌های به دست آمده از تجزیه زمین‌شیمیایی، این نسبت برای توده‌های آذرین درونی منطقه برابر با ۲/۲۱ تا ۲/۷۲ است.



شکل ۱۰- نمودار بهنجار شده در برابر ترکیب گوشته اولیه (Sun and McDonough, 1989) برای توده‌های آذرین درونی منطقه معدنی نرم

در نمودارهای شناسایی جایگاه زمین‌ساختی پیدایش ماگما، این توده‌ها در جایگاه درون‌صفحه‌ای جای می‌گیرند (شکل ۱۱). از نسبت عنصرهای کمیاب برای بررسی تحولات ماگمای سازنده توده‌های آذرین درونی و میزان آلیایش پوسته‌ای بهره برده می‌شود. برپایه بررسی‌های Hart و همکاران (۱۹۸۹)، نسبت La/Nb بیشتر از $1/5$ و نیز نسبت La/Ta بیشتر از ۲۲ نشانه آلیایش ماگما با مواد پوسته‌ای است. نسبت La/Nb برای توده‌های آذرین درونی این منطقه برابر با $0/93$ تا $1/2$ است و نسبت La/Ta ، مگر برای دو نمونه، در دیگر نمونه‌ها از ۲۲ کمتر است. پس چه‌بسا توده‌های بررسی شده دچار آلیایش پوسته‌ای نشده‌اند.

در نمودارهای شناسایی جایگاه زمین‌ساختی پیدایش ماگما، این توده‌ها در جایگاه درون‌صفحه‌ای جای می‌گیرند (شکل ۱۱). از نسبت عنصرهای کمیاب برای بررسی تحولات ماگمای سازنده توده‌های آذرین درونی و میزان آلیایش پوسته‌ای بهره برده می‌شود. برپایه بررسی‌های Hart و همکاران (۱۹۸۹)، نسبت



شکل ۱۱- جایگاه توده‌های گابرویی- دیوریتی منطقه معدنی نرم در نمودارهای رده‌بندی جایگاه زمین‌ساختی (Schand and Gorton, 2002)

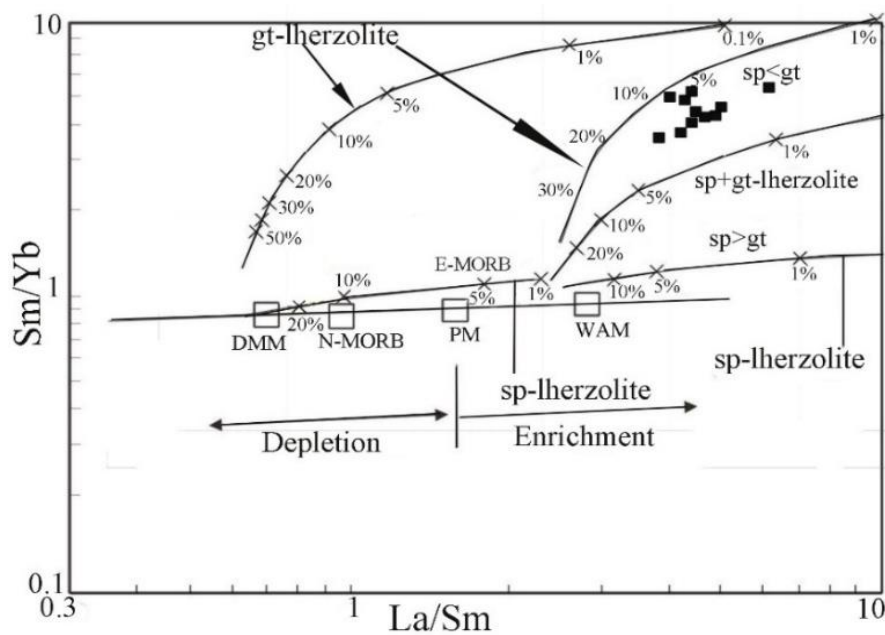
می‌یابد (Zeng et al., 2018). شکل ۱۲، جایگاه نمونه‌های گابرو- دیوریتی بررسی شده را نسبت به منحنی ذوب‌بخشی گوشته با خاستگاه و ترکیب متفاوت نشان می‌دهد. همان‌گونه که دیده می‌شود ماگمای پدیدآورنده سنگ‌های گابرویی- دیوریتی منطقه نرم از ذوب‌بخشی درجه پایین (۵ تا ۱۰ درصد) گوشته‌ای با ترکیب گارنت لرزولیتی (گارنت < اسپینل در خاستگاه) پدید آمده است.

درجه جدایش بلوری و غنی‌شدگی عنصرهای HREE با نسبت Dy_N/Yb_N نشان داده می‌شود. غنی‌شدگی در MREE (مانند: Dy و Yb) تنها هنگامی رخ می‌دهد گارنت فاز به‌جامانده است؛ زیرا Yb نسبت به Dy به‌طور ترجیحی در ساختار

همچنین، نسبت عنصرهای کمیاب برای ارزیابی درصد ذوب‌بخشی و شناخت وضعیت کانی‌های کلیدی هنگام ذوب‌بخشی گوشته به کار می‌رود. برای نمونه، عنصرهای HREE سازگاری بیشتری در گارنت دارند. از این‌رو، گارنت کانی است که در ذوب‌بخشی گوشته جدایش بزرگی میان عنصرهای HREE و LREE و نیز MREE پدید می‌آورد؛ به این معنی که مذاب پدیدآمده از خاستگاه اسپینل لرزولیت نسبت‌های مشابهی از MREE/HREE (مانند: Sm/Yb) را نشان می‌دهد؛ اما بر خلاف ماگمای خاستگاه گرفته از ژرفای گارنت لرزولیت، با افزایش درجه ذوب‌بخشی، نسبت LREE/MREE (مانند: La/Sm) کاهش

بلوک پشت‌بادام شباهت دارند. این ویژگی با نشانه‌های ریف‌زایی پالتوتیس در ایران مرکزی (که Vesali و همکاران (۲۰۱۸) در منطقه جلال‌آباد آن را بررسی کرده و به بازشدگی پالتوتیس در اردویسین تا سیلورین نسبت داده‌اند) همخوانی دارد.

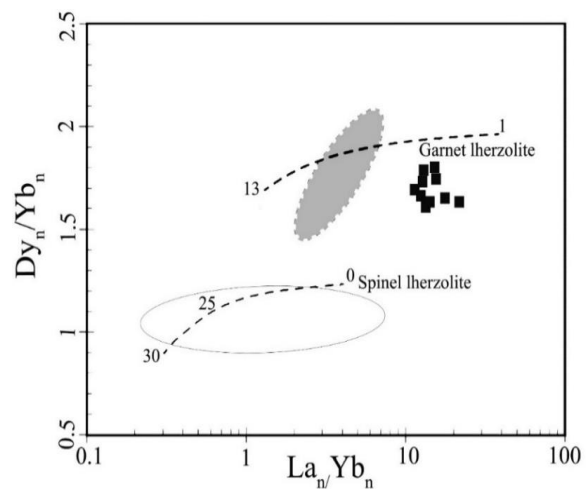
کانی پذیرفته می‌شود (Peters et al., 2008). از این‌رو، نسبت‌های Dy_n/Yb_n و La_n/Yb_n در شکل ۱۳، خاستگاه گارنت لرزولیتی برای سنگ‌های نفوذی منطقه را نشان می‌دهند. رخنمون‌های گابرو- دیوریتی منطقه از دیدگاه خاستگاه با نفوذی‌های مافیک بررسی شده در



شکل ۱۲- نمودار La/Sm در برابر Sm/Yb برای نمونه‌های گابرو- دیوریتی در مقایسه با منحنی ذوب‌بخشی خاستگاه گوشته‌ای گارنت لرزولیت و اسپینل لرزولیت (Aldanmaz et al., 2000; Zeng et al., 2018)

رخداد کانی‌سازی

کانی‌سازی آهن معدن نرم گویا با کانی‌سازی‌های آهن پالتوزویک ایران نزدیکی زمانی دارد و بیشتر به میزبانی سازند ریزو و با حضور توده‌ها و کلاست‌های مگنتیتی همراه اکتینولیت و کمی آپاتیت (کمتر از ۱٪ مدال) شناخته می‌شود. در این منطقه، رگچه‌های ظریف سولفید (پیریت- کمی کالکوپیریت) - اکتینولیت تأخیری نیز در مرزهای منطقه کانی‌سازی با گسترش محلی رگچه‌های اسپیکولاریتی به‌چشم می‌خورند. از دیدگاه ظاهری، این منطقه کانی‌سازی



شکل ۱۳- نمودار Dy_n/Yb_n در برابر La_n/Yb_n (Rogers, 2015) برای شناسایی خاستگاه سنگ‌های نفوذی منطقه نرم

منطقه کانی‌سازی است. همچنین، بی‌هنجاری منفی Ce که مرتبط با اندوخته‌های معدنی آهن رسوبی است، در آن دیده نمی‌شود.

همچنین، از نمودارهای مقایسه‌ای الگوی توزیع عنصرهای کمیاب در اندوخته‌های معدنی گوناگون بهره گرفته شد (شکل ۱۴). همان‌گونه که دیده می‌شود از دیدگاه الگوی توزیع، بیشترین شباهت میان مگنتیت‌های نرم با مگنتیت‌های گرمابی (گرمابی) دیده می‌شود. همچنین، از دیدگاه فراوانی و الگوی توزیع، مگنتیت‌های نرم بیشترین شباهت را با مگنتیت‌های معدن کایرونا سوئد نشان می‌دهند. در اندوخته اسکارنی می‌سی بی‌هنجاری منفی Eu و بی‌هنجاری مثبت Gd دیده می‌شود؛ اما چنین الگویی در اندوخته مگنتیتی نرم دیده نمی‌شود.

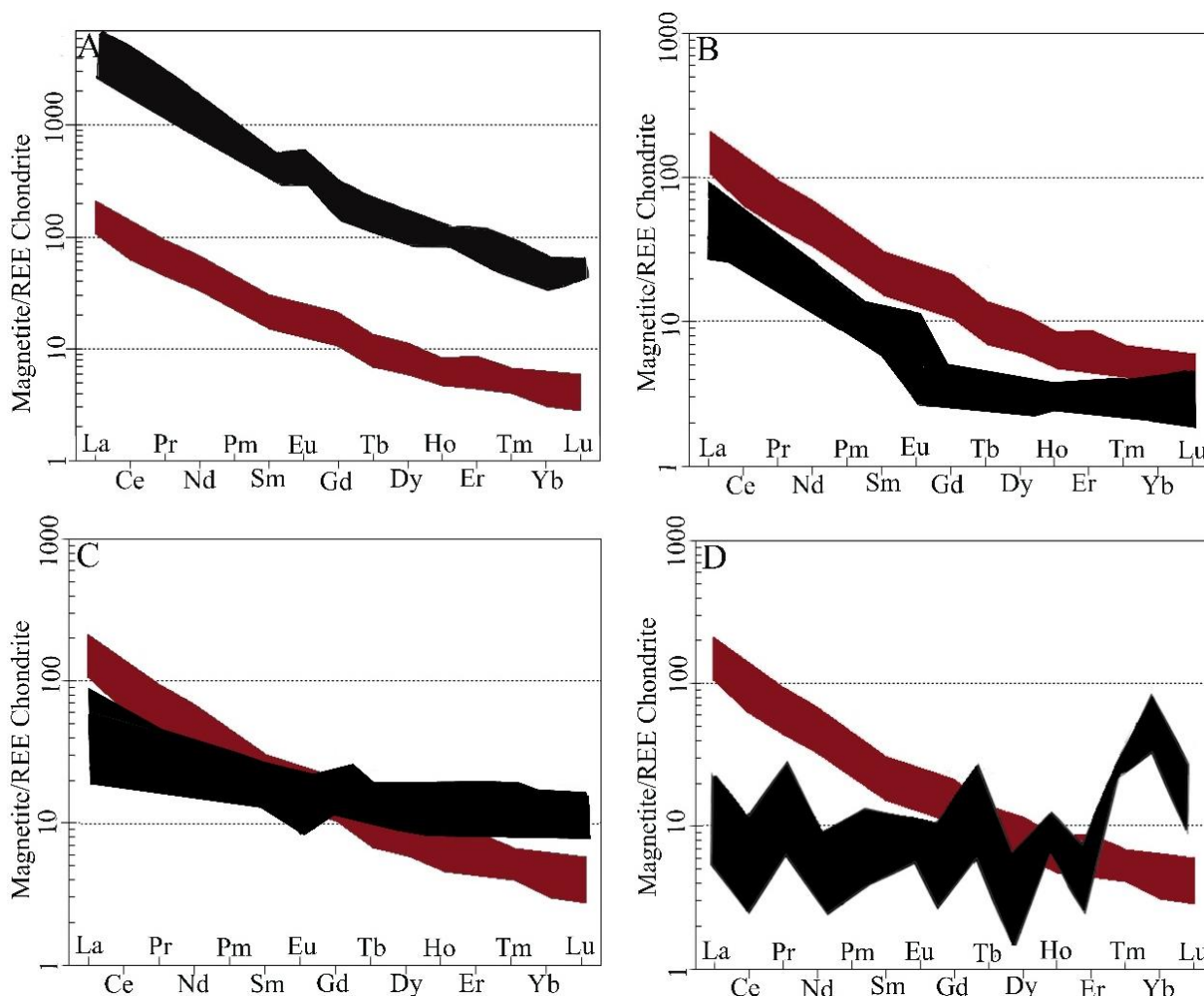
در منطقه کانی‌سازی، آپوفیزهای دیوریتی رخنمون دارند که گمان می‌رود با توده‌های گابرویی-دیوریتی رخنمون‌یافته در منطقه ارتباط دارند. همچنین، گمان می‌رود این ماگماتیسم گابرویی-دیوریتی نیز با توده‌های آذرین درونی مافیک در عمق مرتبط باشند. زمین‌ساخت فعال منطقه در فاصله‌های زمانی متفاوت بر کانی‌سازی اثر داشته است. همچنان که گسل‌های سطحی در انتقال آب‌های جوی به عمق به‌عنوان گذرگاه خوبی رفتار کرده‌اند، گسل‌های ژرف منطقه نیز در انتقال آب ماگمایی و پیدایش سیال ماگمایی-گرمابی و انتقال سیال کانه‌دار مؤثر بوده‌اند. در مرحله پس از کانی‌سازی، فرایندهای زمین‌ساختی، گسل‌ها و شکستگی‌های با روند کلی N70E کانه‌زایی مگنتیت را قطعه قطعه‌شدن کرده‌اند (شکل ۱۵).

شباهت بسیاری به اندوخته‌های معدنی IOA شمال شیلی دارد که Bookstrom (۱۹۷۷)، Marschik و Fontboté (۲۰۰۱)، Alva-Valdi و همکاران (۲۰۰۳) و Rojas و همکاران (۲۰۱۸a) آنها را شناسایی و بررسی کرده‌اند.

وجود بلورهای درشت اکتینولیت همراه مگنتیت با مقدار کمی کانی‌های سولفیدی مانند کالکوپیریت از دیگر ویژگی‌های این منطقه کانی‌سازی به‌شمار می‌رود و نشان‌دهنده حضور حباب‌های سرشار از سیال در الگوی پیدایش اندوخته معدنی است (Rojas et al., 2018b و Knipping et al., 2015).

بررسی‌های زمین‌شیمیایی این اندوخته معدنی شباهت‌های بسیاری با اندوخته‌های آهن ایران مرکزی (در بلوک پشت بادام) نشان می‌دهد. برای نمونه، مقدار تیتانیم در کانسنگ نرم از ۵۱۱ گرم بر تن تا یک درصدوزنی متغیر است که در مقایسه با اندوخته‌های معدنی آهن منطقه بافق بیشترین شباهت را به معدن چادرملو دارد و از اندوخته‌های معدنی آهن کم تیتانیم به‌شمار می‌رود. مقدار میانگین تیتانیم چادرملو ۰/۳ درصدوزنی و میانگین فراوانی این عنصر در معدن نرم برابر با ۰/۳۸ درصدوزنی است. فراوانی تیتانیم در کانسنگ میشدوان تا بیشتر از ۲/۵ درصدوزنی و در چغارت تا ۱۵ درصدوزنی می‌رسد (Sabet Mobarhan Talab et al., 2017). در چادرملو نیز همانند معدن نرم، اکسلوشن تیتانیم‌دار در مگنتیت و یا کانی تیتانیم‌دار دیده نشده است.

الگوی کمابیش هموار توزیع عنصرهای کمیاب در مگنتیت نرم (شکل ۷) همانند اندوخته آهن لکه‌سیاه منطقه بافق است (Mokhtari et al., 2013) که چه‌بسا پیامد حضور ترمولیت و اکتینولیت به‌همراه مگنتیت در



شکل ۱۴- مقایسه الگوی پراکندگی عنصرهای کمیاب بهنجارشده به ترکیب کندریت در منطقه نرم: (A) الگوی پراکندگی عنصرهای REE در کانسنگ مگنتیتی اندوخته‌های معدنی آهن گرمایی (Tallarico et al., 2005); (B) الگوی پراکندگی عنصرهای REE در نمونه‌های کانسنگ آهن تیپ کایرونا (Frietsch and Pendahl, 1995); (C) الگوی پراکندگی REE در آهن اسکارنی می‌سی (Niiranen et al., 2005); (D) الگوی پراکندگی REE در نمونه‌های مگنتیتی کانسارهای آهن رسوبی (Oksuz and Koc, 2009)

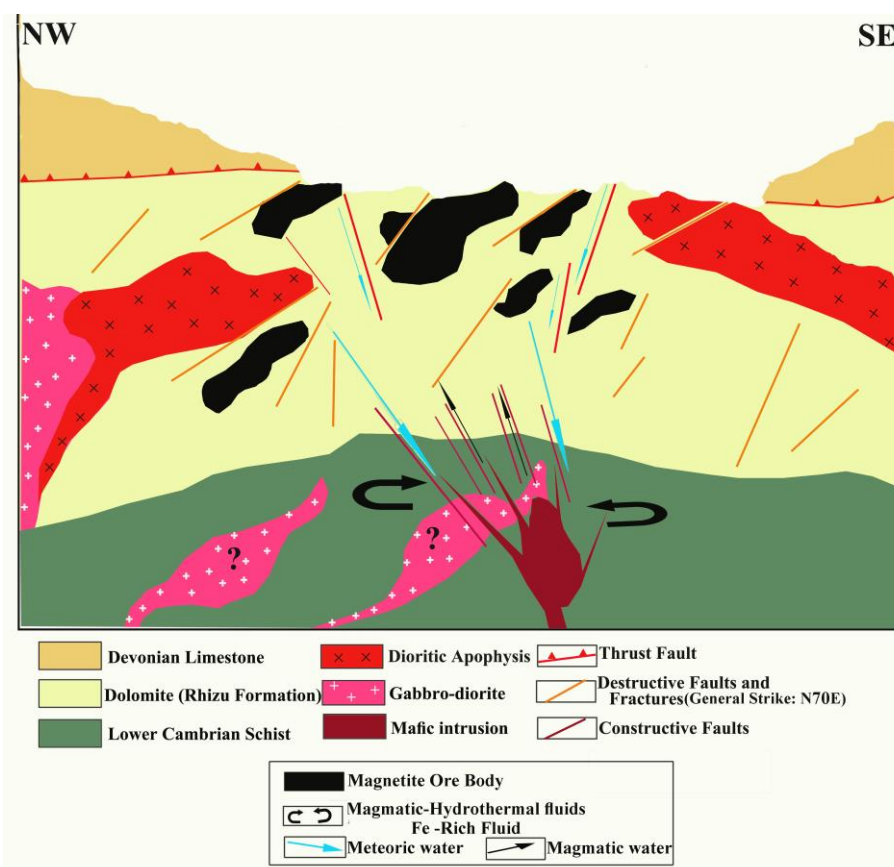
برداشت

ماگماتیسیم گابرویی- دیوریتی این منطقه پیامد ذوب‌بخشی درجه پایین گوشته غنی شده است که در پهنه زمین‌ساختی درون‌صفحه‌ای روی داده است. الگوی مشابهی در فراوانی عنصرهای کمیاب منطقه کانی‌سازی با ماگماتیسیم گابرو- دیوریتی این منطقه دیده می‌شود. آنچه از بررسی‌های صحرایی، سنگ‌نگاری و کانه‌نگاری در معدن نرم می‌توان دریافت این است که به احتمال

بالا محیط پیدایش کانی‌سازی آهن منطقه و ماگماتیسیم گابرویی- دیوریتی منطقه از دیدگاه جایگاه زمین‌ساختی همانند بوده است. همچنین، برپایه بررسی‌های سنگ‌نگاری و کانه‌نگاری، هر دو پس از پیدایش دچار محلول گرمایی شده‌اند. فراوانی کانی آپاتیت در واحدهای گابرویی- دیوریتی منطقه و نیز حضور تجمعی این کانی در بخش‌هایی از سنگ‌های گابرویی منطقه، فراوانی بالای کانی اکتینولیت در واحدهای نفوذی و

شناخته می‌شوند، پیش از کانه‌زایی رخ داده‌اند. در برخی مناطق و به‌طور محلی، میکاشیست‌های کامبرین به‌عنوان میزبان کانی‌سازی دیده می‌شوند. گمان می‌رود توده‌های آذرین مافیک با ویژگی‌های زمین‌شیمیایی همانند ماگماتیسیم محیط‌های ریفتی در عمق، در پیدایش سیال ماگمایی-گرماپی کانه‌دار دخالت داشته‌اند.

همراهی کانه مگنتیت با آپاتیت و اکتینولیت در منطقه کانی‌سازی از مهم‌ترین شواهد در این رابطه به‌شمار می‌روند. در قاعده منطقه کانی‌سازی نشانه‌هایی از حضور اسکارن منیزیمی دیده می‌شود. شواهد دگرگونی ناحیه‌ای مرتبط با رخداد هرسینین (?) در منطقه که با حضور شیست‌های کامبرین زیرین در قاعده منطقه کانی‌سازی



شکل ۱۵- الگوی نمادین پیدایش اندوخته مگنتیتی معدن آهن نرم (شمال‌باختری عشق‌آباد) (بدون مقیاس)

سپاس‌گزاریم. از آقایان مهندس سهندی و دکتر طاهری که در تهیه نقشه زمین‌شناسی منطقه و سن‌سنجی نسبی رخنمون‌های سنگی همراهی کردند نیز صمیمانه سپاس‌گزاری می‌کنیم. از مدیریت و کارکنان شرکت معدن آهن آفتاب نرم نیز که در فراهم‌سازی امکانات بازدید صحرایی با ما همکاری داشتند، بسیار سپاسگزاریم.

سپاس‌گزاری

این مقاله با پشتیبانی مالی دانشگاه فردوسی مشهد در ارتباط با طرح پژوهشی شماره ۳/۴۷۰۳۶ به تاریخ ۹۷/۴/۱۹ انجام شده است. از امور آزمایشگاه‌های سازمان زمین‌شناسی کشور و شرکت‌های زراژما تهران برای انجام پاره‌ای از آنالیزهای به‌کاررفته در این پژوهش و نیز همکاری در فرستادن نمونه‌ها به خارج از کشور

منابع

- Aldanmaz, E., Pearce, J. A., Thirlwall, M. F. and Mitchell, J. G. (2000) Petrogenetic evolution of late Cenozoic, post-collision volcanism in western Anatolia, Turkey. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 102(1-2): 67-95.
- Alva-Valdi, L. M., Rivas-Sánchez, M. L., Goguitchaichvili, A., Urrutia-Fucugauchi, J., Gonzalez, A. and Vivallo, W. (2003) Integrated magnetic studies of the El Romeral iron-ore deposit, Chile: implications for ore genesis and modeling of magnetic anomalies. *Journal of Applied Geophysics* 53:137-151.
- Bookstrom, A. (1977) The magnetite deposits of El Romeral, Chile. *Economic Geology* 72: 1101-1130.
- Boynton, W. V. (1985) Cosmochemistry of the rare earth elements, Meteorite studies. In: *Rare Earth Element Geochemistry* (Ed. Henderson, P.) 115-1522. Elsevier, Amsterdam.
- Cox, K. G., Bell, J. D. and Pankhurst, R. J. (1979) *The interpretation of igneous rocks*. George Allen and Unwin, London.
- Frietsch, R. and Pendahl, J. A. (1995) Rare earth elements in apatite and magnetite in kiruna-type iron ores and some other Iron types. *Ore Geology Reviews* 9: 489-510.
- Hajimirzajan, H., Malekzadeh Shafaroudi, A., Hidarian Shahri, M. R. and Homam, S. M. (2017) Modeling of magnetite-specularite mineralization in Dehzaman iron deposit, Khorasan Razavi province: mineralogy, texture and structure, and alteration. *Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy* 25(3): 543-556 (in Persian).
- Hajimirzajan, H., Malekzadeh Shafaroudi, A., Hidarian Shahri, M. R. Homam and Santos, J. F. (2019) Geochronological and geochemical characteristics of the Dehzaman intrusive and volcanic rocks (NE Iran): Implication for a Cadomian magmatism. *Periodico di Mineralogia* 88: 33-56.
- Hart, W. K., Wolde, G. C., Walter, R. C. and Mertzman, S. A. (1989) Basaltic volcanism in Ethiopia: constraints on continental rifting and mantle interactions. *Journal of Geophysical Research* 94(B6): 7731-7748.
- Imanpour, B., Karimpour, M. H. and Malekzadeh Shafaroudi, A. (2017) Mineralization and geochemistry of Dehzaman hematite ore deposit (southwest of Bardaskan) and comparison with banded iron formation deposits. *Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy* 4(24): 675-690 (in Persian)
- Jami, M. (2005) *Geology, geochemistry and evolution of the Esfordi phosphate-iron deposit, Bafq Area, Central Iran*. Ph.D. thesis. The University of New South Weles, Australia.
- Knipping, J. L., Bilenker, L. D., Simon, A. C., Reich, M., Barra, F., Deditius, A. P., Wälle, M., Heinrich, C. A., Holtz, F. and Munizaga, R. (2015) Trace elements in magnetite from massive iron oxide-apatite deposits indicate a combined formation by igneous and magmatic-hydrothermal processes. *Mineralium Deposita* 171: 15-38.
- Marschik, R. and Fontboté, L. (2001) The Candelaria-Punta del Cobre iron oxide Cu-Au (-Zn-Ag) deposits, Chile. *Economic Geology* 96: 1799-1826.
- Mehrabi, B., Karimi Shahraki, B., Bazargani Guilani, K. and Masoudi, F. (2015) Early Cambrian high-temperature dolomite of the Rizu Series in the Jalal-Abad iron ore deposit, Central Iran. *Arabian Journal Geoscience* 8: 7163-7176.
- 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.
- Narooie, H., Malekzadeh Shafaroudi, A. and Karimpour, M. H. (2017) Mineralogy and geochemistry of Skarn Fe orebody and syenodioritic intrusive host rock in Zeber Kuh prospect area (SW Bardaskan, South Khorasan province). *Iranian Journal of Petrology* 31: 89-110 (in Persian).
- Naserian Motlagh, Z., Heidarian Shahri, M. R. and Malekzadeh Shafaroudi, A. (2019) Iron occurrence and geochemistry of Chahkelidanak iron, SW Bardaskan, South Khorasan province. 38th National

- Geosciences Congress, Tehran, Iran.
- Niiranen, T., Manttari, I., Poutiainen, M., Oliver, N. and Miller, J. A. (2005) Genesis of Palaeoproterozoic iron skarns in the Misi region, northern Finland, *Mineralium Deposita* 40: 192-217
- Nozaem, R., Mohajjel, M., Rossetti, F., Della Seta, M., Vignaroli, G., Yassaghi, A., Salvini, S. and Eliassi, M. (2013) Post-Neogene right-lateral strike-slip tectonics at the north-western edge of the Lut Block (Kuh-e-Sarhangi Fault), Central Iran. *Tectonophysics* 589: 220–233.
- Nozaem, R., Mohajjel, M., Yasaghi, A. and Nasrabadi, M. (2014) Structural analysis and determination of deformation under Kuh-e-sarhangi shear zone in the granite of the mountain, northwest Lut Block. *Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy* 22(1): 15-26 (in Persian).
- Oksuz, N. and Koc, S. (2009) Examination of Sarikaya (Yozgat-Turkey) iron mineralization with rare earth element (REE) method. *Journal of Rare Earths* 28: 143-164.
- Peters, T. J., Menzies, M., Thitwall, M. and Kyle, P. K. (2008) Zuni- Bandera volcanism, Rio Grande, USA, Melt formation in garnet-and spinel-facies mantle straddling the asthenosphere-lithosphere boundary. *Lithos* 102: 295-315.
- 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: 622-665.
- Rogers, N. (2015) The Composition and Origin of Magmas. In: *The Encyclopedia of volcanoes* (Ed. Sigurdsson, H.) 93-112. Academic Press, London.
- Rojas, P. A., Barra, F., Reich, M., Deditius, A., Simon, A., Uribe, F., Romero, R. and Rojo, M. A. (2018a) genetic link between magnetite mineralization and diorite intrusion at the El Romeral iron oxide-apatite deposit, northern Chile. *Mineralium Deposita* 53: 947-966.
- Rojas, P. A., Barra, F., Reich, M., Deditius, A., Simon, A., Uribe, F., Romero, R. and Rojo, M. A. (2018b) New contributions to the understanding of Kiruna-type iron oxide-apatite deposits revealed by magnetite ore and gangue mineral geochemistry at the El Romeral deposit, Chile. *Ore Geology Reviews* 93: 413-435.
- Rollinson, H. R. (1993) *Using Geochemical Data: evaluation, presentation, interpretation*. Longman, Harlow, England.
- Rossetti, F., Nozaem, R., Lucci, F., Vignaroli, G., Gerdes, A., Nasrabadi, M. and Theye, T. (2015) Tectonic setting and geochronology of the Cadomian (Ediacaran-Cambrian) magmatism in Central Iran, Kuh-e-Sarhangi region (NW Lut Block). *Journal of Asian Earth Sciences* 102: 24-44.
- Ruttner, A., Nabavi, M.H. and Alavi, M. (1970) Geological map of Ozbak Kuh Mountain (1/100,000). Geological survey of Iran, Tehran.
- Sabet Mobarhan Talab, A., Alinia, F. and Asadi, F. (2014) Hydrothermal overprint of the chadormalu Kiruna-type deposit (Bafq District, Central Iran) and associated REE Mobilization: evidence from mineralogy and geochemistry. *International Journal of Economic and Environmental Geology* 5: 1–14.
- Schandl, E. S. and Gorton, M. P. (2002) Application of high field strength elements to discriminate tectonic setting in VMS environment. *Economic Geology* 97(3): 629-642.
- Shabani, S., Karimpour, M. H. and Malekzadeh Shafaroudi, A. (2017) Mineralogy and geochemical studies on Delkan iron mine, Khorasan Razavi province. 8th Conference on Economic Geology, Zanjan, Iran (in Persian).
- Smith, E. I., Sánchez, A., Walker, J. D. and Wang, K. (1999) Geochemistry of mafic magmas in the Hurricane Volcanic Field, Utah: implications for small- and large scale chemical variability of the lithospheric mantle. *Journal of Geology* 107: 433-448.
- Spearman, C. (1904) The proof and measurement of association between two things. *American Journal of Psychology* 15(1): 72–101.
- Stosch, H. G., Romer, R. L., Daliran, F. and Rhede, D. (2011) Uranium–lead ages of apatite from iron

- oxide ores of the Bafq District, East-Central Iran. *Mineralium Deposita* 46: 9–21.
- Sun, S. S. and McDonough, W. F. (1989) Chemical and isotopy systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. In: *Magmatism in the Ocean: Basins*. (Eds. Saunders, A. D. and Norry, M. J.) Special Publications 42: 313–345. Geological Society, London.
- Tallarico, F. H. B., Figueiredo, B. R., Groves, D. I., Kositcin, N., McNaughton, N. H., Fletcher, I. R. and Rego, J. L. (2005) Geology and SHRIMP U-Pb geochronology of the Igarape Bahia deposit, Carajas copper-gold belt, Brazil: An Archean (2.57 Ga) example of iron-oxide Cu-Au-(U-REE) mineralization. *Economic Geology* 100: 7-28.
- Vesali, Y., Esmaili, D., Sepidbar, F., Sheibi, M. and Niroomand, S. (2018) Petrology, geochemistry and tectonic setting of alkaline mafic rocks in the Jalal Abad area in the NW of Zarand (Kerman Province): Evidence for Paleo-Tethys rifting in the Central Iran. *Iranian Journal of Petrology* 33: 1-20 (in Persian).
- Whitney, D. and Evans, B. (2010) Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist* 95: 185–187.
- Zeng, Y. C., Chen, Q., Xu, J. F., Chen, J. L., Feng, H., Yu, H. X. and Zhao, P. P. (2018) Petrogenesis and geodynamic significance of Neoproterozoic (~925 Ma) highFe–Ti gabbros of the RenTso ophiolite, Lhasa Terrane, central Tibet. *Precambrian Research* 314: 160-169.