

فهرست

- زمین ریخت شناسی کارست در سنگ های کربناته گستره آبگرم، جنوب استان قزوین
پرویز ارمانی، مهری کریمی و مهدی تاج آبادی ۱
- ماکرو فسیل های گیاهی سازند لاله بند (تریاس پسین)، گستره ی زغال دار رامسر، شمال ایران
جواد سعادت نژاد ۱۵
- ویژگی های کانی شناسی، شیمی کانی ها و میانبارهای سیال کانسار اسکارن آهن معدن جو، ناحیه معدنی سنگان، شمال شرق ایران
مریم فتوت جلی و مسعود علی پور اصل ۲۹
- تلفیق داده های زمین شناسی، ژئوشیمیایی، دگرسانی و سنجش از دور به منظور معرفی پتانسیل های کانه زایی در منطقه سریش، خراسان جنوبی
سروش مدیری، مینا آذری فر، تمین شمس الدین احمدی و داود ربیعی ۴۹
- بررسی رخساره های رسوبی و مشخصه های هیدرو شیمیایی نهشته های کربناته آب اسک، جنوب شرق آتش فشان دماوند
سمیه رحمانی جوانمرد، محسن رنجبران و وهاب امیری ۷۵
- تلفیق داده های مغناطیس سنجی هوا برد و تصاویر ماهواره ای برای شناسایی پهنه های مستعد کانی سازی آهن به کمک نمودارهای پیش بینی - مساحت در برکه ۱:۱۰۰۰۰۰ اسفوردی
فردین احمدی، حمید افغانی و میثم عابدی ۹۳

Contents

- Karst geology of carbonate rocks mass in Abegarm area, south of Qazvin province
Armani, P., Karimi, M. and Tajabadi, M. 111
- Plant macrofossiles of the Laleband formation (Late Triassic), Ramsar coal-bearing region, Northern Iran
J. Saadatnejad 112
- Mineralogy, geochemistry, and fluid inclusion characteristics of the Madanjoo skarn iron deposit, Sangar mining district, NE Iran
Fotovat Jami, M. and Alipour-Asll, M. 113
- Integration of Geological, Geochemical, Alteration and Remote Sensing Data to Introduce the Mineralization Potentials in the Sarbisheh area, South Khorasan
Modabberi, S., Azarifar, M., Shamsoddin Ahmadi S. and Raiesi, D. 114
- An investigation on sedimentary facies and hydrochemistry characteristics of carbonate deposits in the Ab-e Ask region, Southeast of Damavand volcano
Rahmani Javanmard, S., Ranjbaran, M. and Amiri, V. 115
- Integration of airborne magnetic and satellite imagery data to identify potential zones of iron occurrences using the prediction-area plot in the Esfordi area
Ahmadi, F., Aghajani, H. and Abedi, M. 116



پژوهشکده علوم پایه کاربردی



سال ۱۶، شماره ۶۲، تابستان ۱۴۰۱

صاحب امتیاز:

پژوهشکده علوم پایه کاربردی جهاد دانشگاهی

مدیر مسئول:

دکتر کمال خدائی، استادیار پژوهشکده علوم پایه کاربردی جهاد دانشگاهی

سر دبیر:

دکتر محمدحسین آدابی، استاد دانشگاه شهیدبهشتی

همکار سردبیر:

دکتر حمیدرضا ناصری، استاد دانشگاه شهیدبهشتی

هیئت تحریریه:

دکتر محمدحسین آدابی، استاد دانشگاه شهیدبهشتی

دکتر حمیدرضا ناصری، استاد دانشگاه شهیدبهشتی

دکتر محمدرضا رضایی، استاد دانشگاه کرتین استرالیا

دکتر عزت... رئیسی، استاد دانشگاه شیراز

دکتر عبد... سعیدی، دانشیار سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور

دکتر فریدون غضبان، استاد دانشگاه تهران

دکتر سید محمود فاطمی عقدا، استاد دانشگاه خوارزمی

دکتر منوچهر قرشی، دانشیار سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور

دکتر محمد قوبدل، استاد انستیتو نفت دانشکده فنی دانشگاه تهران

دکتر فرید مر، استاد دانشگاه شیراز

دکتر رضا موسوی حرمی، استاد دانشگاه فردوسی مشهد

دکتر سعید میرزایی، استاد پژوهشکده علوم پایه کاربردی جهاد دانشگاهی

دکتر منصور وثوقی عابدینی، دانشیار دانشگاه شهیدبهشتی

دکتر اصغر کهندل، دانشیار پژوهشکده علوم پایه کاربردی جهاد دانشگاهی

مدیر داخلی: دکتر راحله هاتفی، استادیار پژوهشکده علوم پایه کاربردی جهاد دانشگاهی

مدیر اجرایی: انسیه اسماعیلی

ویراستارها: دکتر حمیدرضا ناصری و ناعمه فاضلی

صفحه‌آرا: آرزو انصاری

تاریخ انتشار: تابستان ۱۴۰۱

چاپ: مجتمع چاپ پیدایش

نشانی: تهران، بلوار کشاورز، خیابان ۱۶ آذر، پلاک ۲۲

نشانی دفتر فصلنامه:

تهران، اوین، دانشگاه شهیدبهشتی، پژوهشکده علوم پایه کاربردی جهاد دانشگاهی، صندوق پستی: ۱۹۶۱۵۱۱۷۱

تلفن: ۲۲۴۳۱۹۳۳-۴، ۲۹۹۰۲۵۹۴

پست الکترونیک: zaminshenasiiran@yahoo.com

وب سایت فصلنامه: Journal.rias.ac.ir

وب سایت پژوهشکده علوم پایه کاربردی جهاد دانشگاهی: www.rias.ac.ir

این فصلنامه دارای مجوز علمی - پژوهشی به شماره ۳/۳۰۹ مورخ ۸۷/۱/۲۸ از وزارت علوم، تحقیقات و فناوری می‌باشد.

این نشریه در پایه استنادی علوم جهان اسلام و نیز ایران ژورنال (نظام نمایه‌سازی مرکز منطقه‌ای اطلاع‌رسانی علوم و فناوری) نمایه شده است و دارای ضریب تاثیر می‌باشد. همچنین این نشریه در پایگاه‌های اطلاع‌رسانی زیر قابل دسترس است:

http://www.isc.gov.ir; http://www.srlst.com; http://www.sid.ir; http://www.magiran.com

راهنمای نگارش مقالات

فصلنامه زمین‌شناسی ایران هر سه ماه یک بار منتشر می‌شود و در زمینه‌های تخصصی زمین‌شناسی مقاله می‌پذیرد. هر مقاله تحقیقی فارسی باید دارای عنوان، چکیده فارسی، واژه‌های کلیدی به فارسی، مقدمه، روش مطالعه، بحث و نتیجه‌گیری، منابع، چکیده انگلیسی و واژه‌های کلیدی به انگلیسی باشد و اصول زیر در آن رعایت شود.

- متن مقاله باید با فاصله سطر ۱ cm و با رعایت حاشیه ۳ سانتی‌متر از لبه‌ها و قلم فارسی B Nazanin ۱۳ و انگلیسی Times New Roman ۱۱، در نرم‌افزار Word تایپ و تصاویر در فولدر جداگانه با فرمت Jpeg یا Tiff به نشانی zaminshenasiiran@yahoo.com به دفتر مجله ارسال شود (حداکثر تعداد صفحات مقاله ۱۵ صفحه می‌باشد).

- مقاله باید دارای یک برگ مشخصات مقاله به‌طور جداگانه شامل نام و نام خانوادگی نویسنده (گان)، مرتبه علمی و آدرس به هر دو زبان فارسی و انگلیسی، شماره تلفن و فاکس و پست الکترونیکی باشد.

- چکیده باید محتوای مقاله را با تأکید بر روش‌ها، نتایج و اهمیت و کاربرد نتایج بازگو نماید و حداکثر در ۲۵۰ کلمه نوشته شود. چکیده انگلیسی باید کاملاً منطبق با چکیده فارسی باشد.

- واژه‌های کلیدی تا پنج مورد به‌ترتیب حروف الفبا بلافاصله بعد از چکیده‌های فارسی و انگلیسی آورده شود.

- در صورت نیاز "سپاسگزاری" قبل از فهرست منابع آورده شود.

- منابع فارسی و به دنبال آن منابع خارجی به‌ترتیب حروف الفبا آورده شود. به‌عنوان مثال:

بابایی، م. و حسنی، ی.، ۱۳۸۳. الگوی سیستم زهکشی در معادن. فصلنامه تحقیقات منابع آب، ۱۲، ۲۷-۱۴.

Bellon, H., and Braud, J., 2003. Carbonate Sedimentary Environment, John Wiley, 360.

Cliff, R.A., Droop, G.T., and Rex, D., 1985. Alpine metamorphic in the south-east Tauern Window. Journal of Metamorphic Geology, 3, 403-415.

- در صورتی که از مقاله‌های اینترنتی استفاده شده است در فهرست منابع آورده شود. چنانچه مقاله‌ای دارای شماره doc. است در ادامه منابع آورده شود.

- برای ارجاع به منابع در متن از نام نویسندگان و سال انتشار منبع استفاده گردد.

- در متن مقاله از آوردن کلمات انگلیسی (به استثنای اسامی جنس و گونه فسیل‌ها و اسامی نویسندگان) خودداری شود و واژه‌ها (با ذکر شماره) در پاورقی آورده شود.

- عناوین جدول‌ها در بالا و عناوین شکل‌ها در زیر آنها نوشته شود. فقط از واژه شکل برای کلیه نمودارها و تصاویر استفاده شود. کلیه تصاویر میکروسکوپی همراه با مقیاس در زیر عکس باشد.

ارسال نسخه اصل شکل‌ها در ابتدای ارسال مقاله ضروری است.

نوشتار و اعداد روی شکل‌ها کاملاً خوانا باشد.

- برگ تعهد را امضا نموده و تا دریافت پاسخ نهایی نشریه، از ارسال آن به سایر نشریات خودداری فرمایید.

- مجله در ویراستاری، رد یا پذیرش مقالات مختار است.

زمین‌ریخت‌شناسی کارست در سنگ‌های کربناته گستره آبگرم، جنوب استان قزوین

پرویز آرمانی^{۱*}، مهری کریمی^۲ و مهدی تاج‌آبادی^۳

۱. دانشیار، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی، قزوین، ایران

۲. کارشناس ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران شمال، ایران

۳. دکترای آب زیرزمینی، شرکت آب منطقه‌ای قزوین، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۴/۰۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۸/۰۸

چکیده

شناخت پدیده‌های زمین‌ریخت‌شناسی کارست که در اثر انحلال ایجاد شده‌اند، می‌تواند کمک شایانی به شناخت و گسترش کارست کند. از این رو، همواره زمین‌ریخت‌شناسی نخستین مرحله در بررسی فرایند کارستزایی است. گستره آبگرم در پهنه ساختاری ایران مرکزی قرار دارد و دربرگیرنده سازندهای دوران‌های دیرینه‌زیستی، میان‌زیستی، و نوزیستی است. مهمترین سازندهای کربناته آبگرم سازندهای سلطانیه، روته، الیکا، لار و قم هستند. در این پژوهش، پس از بررسی‌های میدانی و نمونه‌برداری از واحدهای سنگی کربناته و مقایسه آن‌ها از دید گسترش زمیندیس‌های کارستی، توان کارست‌زایی آن‌ها بررسی شد. نمونه‌برداری از چشمه‌های کارستی در دو دوره خشک و تر، همچنین اندازه‌گیری pH، EC، و دما روی زمین صورت پذیرفت. بررسی‌های سنجش از دور به وسیله نرم‌افزار ILWIS بر روی تصاویر ماهواره‌های لندست برای جداسازی، محاسبه مساحت سازندهای کربناته انجام گرفت. برای بررسی و تفسیر یافته‌های واکاوی‌های شیمیایی از نرم‌افزار AqQa و برای مدل‌سازی شیمی‌آب از نرم‌افزار Phree Qc بهره‌گیری شد. مهم‌ترین زمیندیس‌های کارستی در پهنه شامل انواع کارن، غارک، غار و چشمه کارستی هستند. برپایه تلفیق بررسی‌های میدانی و داده‌های سنجش از دور، شدت کارستی‌شدن در پهنه آبگرم به ترتیب از زیاد به کم شامل: سازندهای قم، سلطانیه، لار و کرتاسه می‌باشد. برپایه گسترش کارست، کارست آبگرم، بخشی و کم ژرف؛ و برپایه چرخه کارست، نوجوان تا جوان است.

واژه‌های کلیدی: ایران مرکزی، جنوب قزوین، زمیندیس‌های، کارست‌زایی، هیدروشیمی.

مقدمه

کارست پدیده‌ای در پوسته زمین است و نشانه‌های آن به صورت پدیده‌های گوناگون مانند حفره‌ها و غارها در سطح و زیر زمین دیده می‌شود. در واژگان فنی به پدیده خوردگی و انحلال توده سنگ‌های کربناته (سنگ‌آهک و دولومیت) کارست گفته می‌شود (قبادی، ۱۳۸۸). Ford and Williams (2007) واژه کارست را به دیگر سنگ‌های رسوبی، مانند سنگ‌های تبخیری، نیز نسبت می‌دهند. نواحی کارستی دارای ویژگی‌ها و زمیندیس‌های ویژه در سطح و زیر سطح زمین هستند. مسیرهایی که در امتداد آنها آب جریان می‌یابد باعث ایجاد این زمیندیس‌ها شده است. این پدیده بیشتر در اثر گسترش تخلخل ثانویه ایجاد می‌شوند. Cvijić (1925) مناطق کارستی را به سه

1. Karstic landforms

* نویسنده مرتبط: armani@sci.ikiu.ac.ir

و ورود و اختلاط سایر آب‌ها به سامانه است (شاهسوندی، ۱۳۸۷). رنگرن و همکاران (۱۳۹۶) آسیب‌پذیری و آلودگی آبخوان کارستی را با بهره‌گیری از روش COP مورد بررسی قرار دادند. باقری و همکاران (۱۳۹۸) اثر بارش و لیتولوژی در ویژگی‌های هیدروشیمیایی چشمه‌های کارستی استان خراسان شمالی را بررسی کردند. محمدی بهزاد و همکاران (۱۳۹۶) با استفاده از ایزوتوپ‌های پایدار اکسیژن ۱۸ و دوتریم بر روی منابع تغذیه چشمه‌های کارستی مهم استان خوزستان پژوهشی انجام دادند. شمعانیان و مریدی (۱۳۹۵) کانی‌شناسی، ژئوشیمی و خاستگاه نهشته بوکسیت رسی شیرین‌آباد را در جنوب خاوری گرگان بررسی کردند و نتیجه گرفتند که در اثر رویداد زمین‌ساختی سیمین پیشین فرایند کارست‌زایی در سازند الیکا رخ داده است.

بیش از ۱۱٪ سطح کشورمان را سازندهای کارستی می‌پوشاند (ناصری، ۱۳۷۰). امروزه با توجه به برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی، نگاه کارشناسان به‌ویژه در کشورهای آب‌وهوای خشک و نیمه‌خشک، مانند ایران، بیش از پیش متوجه برداشت از منبع آب کارستی شده است. در آمریکا نزدیک ۴۰ درصد از آب مورد نیاز این کشور از منابع کارستی به‌دست می‌آید (Ford and Williams, 2007). نزدیک ۳۵ درصد از مساحت فرانسه از سازندهای کارستی پوشیده شده و سهم این سازندها در تأمین آب آشامیدنی این کشور نیز، به همین میزان است (Bakalowicz, 2005). تمرکز جریان و ذخیره آب از مهمترین کارکردهای هیدرولیکی در چهره کارست درونی می‌باشد (Chow, 1988). گوناگونی زمین‌ریخت‌شناسی کارست^۱ و گنجینه مردم‌شناسی به همراه گوناگونی زیستی در سرزمین‌های کارستی نیز از دیگر نقاط بارز و با اهمیت این مناطق است می‌تواند در ساختن الگوهای بهینه برای پیشرفت پایدار سودمند باشد. افزون بر این، امروزه زمین‌گردشگری کارست در کشورهای دارای این پدیده شگفت‌انگیز، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (Migon, 2011).

منطقه تقسیم کرد و شامل کارست فراگیر^۲، کارست بخشی^۳ و کارست میانه^۴ می‌شود. کارست فراگیر هم در سطح زمین و هم در زیر زمین به خوبی گسترش یافته است، اما در کارست بخشی زمیندیس‌های کارستی به صورت فراگیر گسترش نیافته و بیشتر در سنگ‌آهک‌های نازک‌لایه و ناخالص مانند گلسنگ آهکی، دولومیت و بنتونیت دیده می‌شوند. کارست میانه را به دلیل درجه کارستی شدن، میان کارست فراگیر و کارست بخشی قرار می‌دهند، اما بیشتر همانند کارست‌های فراگیر هستند. این نوع کارست بیشتر در سنگ‌آهک‌ها یافت می‌شوند و توسط رسوبات ناتراوا و انحلال‌پذیری کم از هم جدا شده‌اند. در رده‌بندی مهندسی، کارست به نوجوان، جوان، رسیده، پیچیده و گسترده دسته‌بندی می‌شود (Waltham and Fookes, 2003). نشانه‌ها و عوارض کارستی همواره به صورت کارست بیرونی و درونی رده‌بندی می‌شوند. سیمای کارست بیرونی بر روی نقشه‌های زمین‌ریخت‌شناسی دیده می‌شود اما سیمای کارست درونی از بالاترین بخش‌های سنگ‌های کارستی آغاز و به سوی ژرفا گسترش می‌یابند، در نتیجه به آسانی آشکار نمی‌شوند. کارست‌زایی در زمان‌های پیش از کواترنر (کارست دیرینه^۵) کمیاب و آن هم بیشتر وابسته به بوکسیت‌های کارستی است. بنابراین، فرایند کارست‌زایی، مانند آن چیزی که امروزه می‌بینیم، تنها در کواترنر، به‌ویژه در طی ۴۳۰۰ سال در دوران پسایسلا^۶ رخ داده است (Silvestra, 2000).

سنگ‌های کربناتی از منابع مهم مخازن آب زیرزمینی به شمار می‌روند. ویژگی شیمیایی آب زیرزمینی یک گستره متأثر از ترکیب سنگ‌ها، توپوگرافی، کیفیت آب تغذیه‌کننده و شرایط اقلیمی آن است (Anderson et al., 1988). کیفیت آب زیرزمینی یکی از ویژگی‌های شیمی آب می‌باشد که درباره توصیف شیمیایی آب، توزیع مکانی انواع سازندهای شیمیایی و قابلیت مصرف آب برای اهداف گوناگون آشامیدن، کشاورزی و صنعت گفتگو می‌نماید (Alley, 1993).

اگر زیر زمین را به عنوان یک سامانه در نظر گرفت، کیفیت آب خروجی از این سامانه تابع کیفیت آب ورودی، ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی سامانه، زمان گذر یا ایست آب در سامانه، واکنش‌های شیمیایی میان سامانه و آب در طول مسیر حرکت

1. Holokarst
2. Merokarst
3. Transitional
4. Paleokarst
5. Post-Flood era
6. Karst geomorphology

انواع کارن‌ها همواره اهمیت ویژه‌ای دارند، زیرا در چنین سامانه‌ای، بلوک‌های سنگی از یکدیگر جدا می‌شوند (Ford and Williams, 2007). تخلخل و تراوایی در راستای پهنه‌های شکسته سنگ‌های کربناته می‌تواند توسط جریان شماره (سیال) بالارونده به گونه فزاینده‌ای افزایش یابد و باعث گسترش کارست ژرفزادا شوند (Ennes-Silva et al., 2015).

چگونگی قرارگرفتن درزه‌ها بسیار مهم است زیرا در درزه‌های عمود بر هم، مجاری کارستی و غار به آسانی ساخته می‌شوند. از سوی دیگر ترک‌های سطحی که نتیجه فرآیندهای بیرونی است، بر روی سنگ‌های کربناتی در گسترش و پیدایش کارست نقش تعیین کننده‌ای دارند (ناصری و همکاران، ۱۳۹۱؛ مقیمی، ۱۳۹۱). آب، فاکتور اصلی اقلیمی در گسترش کارست است. این عامل، اصلی‌ترین متغیر در کنترل انحلال و فرسایش می‌باشد. به صورت طبیعی، کارست در مناطقی که میزان بارندگی بیشتر باشد، پیشرفت می‌کند. بنابراین، در مناطق خشک (مانند بیابان) یا بسیار سرد (قطبی) کارست گسترش نمی‌یابد (کریمی‌وردنجان، ۱۳۹۴).

روش پژوهش

پراکندگی و گسترش سنگ‌های کربناته گستره آبگرم با به کارگیری نقشه زمین‌شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰۰ آوج (Bolourchi, 1978) شناسایی شد. بازدیدهای میدانی برای بررسی سازندهای کربناته گستره آبگرم، شناسایی زمیندیس‌های کارستی، میزان و شدت کارست‌زایی در آن‌ها انجام گرفت (شکل ۱). برای بررسی‌های دقیق سنگ‌شناسی، از هر واحدهای سنگی دست کم یک نمونه برداشته شد. پس از تهیه بُرش نازک، برای شناسایی کانی کلیست از دولومیت، بُرش‌ها با محلول آلینارین سرخ، به روش (Dickson, 1966)، رنگ‌آمیزی شد و برای بررسی سنگ‌شناختی، با میکروسکوپ پلاریزان مورد بررسی قرارگرفت. با بهره‌گیری از تصاویر ماهواره‌ای لندست، پس از زمین‌مرجع کردن^۲، محدوده سازندهای کربناته در گستره آبگرم از سازندهای غیرکربناته جدا شدند. سپس

در ایران بیشترین کارست‌زایی در پهنه ساختاری-رسوبی زاگرس دیده می‌شود. پس از زاگرس، در البرز، به دلیل فراوانی سازندهای کربناته و شرایط اقلیمی و شکستگی‌ها، این فرایند بیشتر دیده می‌شود. در پهنه ایران مرکزی بیشترین کارست‌زایی در سازند قم گزارش شده است (قبادی و همکاران، ۱۳۸۹؛ غضنفری و همکاران، ۱۳۹۴ و رضائی عارفی و همکاران ۱۳۹۸) (Karimi Vardanjani et al., 2017; Moradi et al., 2018; Biri et al., 2014). هدف اصلی این پژوهش شناسایی زمیندیس‌های کارستی و نقش ویژگی‌های سنگ‌شناسی، شکستگی، و همچنین آب‌وهوا در شکل‌گیری کارست در گستره، همچنین ویژگی‌های چشمه‌های کارستی و همبستگی آن‌ها با سازندهای کربناته است که مورد گفتگو قرار گرفت.

عوامل تأثیرگذار بر زمین‌ریخت‌شناسی کارست

در فرآیند کارست‌زایی، پارامترهای موثر مانند سنگ‌شناختی، شکستگی و آب‌وهوا نقش مهمتری نسبت به ویژگی‌های خاک‌شناسی، پوشش گیاهی، توپوگرافی و دیگر عوامل دارند. ترکیب سنگ‌شناختی و کانی‌شناسی عامل مهمی در پیدایش زمیندیس‌های کارستی است. سرعت انحلال کلسیت بیش از دولومیت است، بنابراین سنگ‌آهک انحلال‌پذیرتر از دولومیت است (Tucker, 2001). البته سرعت انحلال در سنگ‌های تبخیری بسیار بیشتر از سنگ‌آهک است. میزان انحلال در روی سنگ‌های سولفات‌ها (مانند سنگ‌گچ) نزدیک ۱۰ برابر سنگ‌آهک است (Ford and Williams, 2007). این نرخ انحلال در سنگ‌نمک از این هم بیشتر است (Bozak, 2008). بررسی‌های انجام شده در مقیاس زیرپهنه البرز میانی نشانگر این نکته است که ویژگی‌های سنگ‌شناسی مانند میزان خلوص سنگ‌آهک، رخساره سنگی و ستبرای واحدهای سنگی در میزان کارستی‌شدن موثر هستند (Ghanea and Ghazanfari, 2014). درزه و شکاف‌هایی که به صورت یک شبکه گسترش می‌یابند، در شکل‌گیری و ساخت زمین ریخت‌های زیرزمینی مانند مجاری بهم پیوسته و ایجاد زمیندیس‌های بیرونی کارست مانند

1. Hypogene karst

2. GeoRef

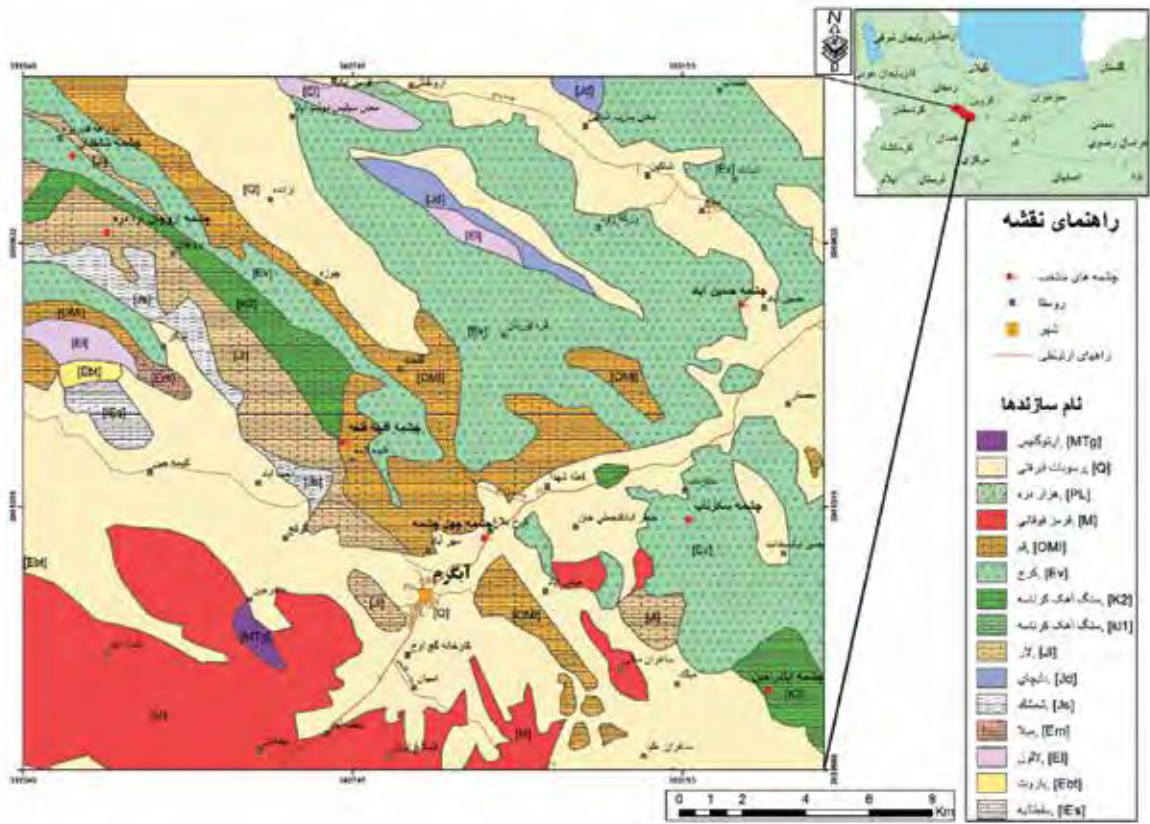
آنیون‌های اصلی و دمای آب، شاخص‌هایی چون P_{CO_2} ، SIC و SID محاسبه شد. در بررسی آبهای زیرزمینی در محیط‌های کارستی، محاسبه شاخص‌های SIC و SID می‌تواند مدت زمان ایست آب در آبخوان را نشان دهد. هر قدر زمان ایست آب در آبخوان کوتاه باشد، مقدار این شاخص‌ها کوچکتر می‌شود. همچنین با مقایسه این شاخص‌ها می‌توان به‌طور نسبی نشان داد، آب از محیط آهکی یا دولومیتی گذر کرده است (Langmuir, 1997). نمونه‌ها در آزمایشگاه سازمان آب منطقه‌ای استان قزوین واکاوی شدند.

گستره مورد بررسی در مختصات جغرافیایی از 49° تا $49^\circ 30'$ طول‌خاوری و از $35^\circ 30'$ تا 36° عرض شمالی است (شکل ۱). این گستره، از جنوب به استان همدان، از خاور به استان البرز و از باختر به استان زنجان محدود می‌شود.

با به‌کارگیری نرم‌افزار ILWIS الگوی شبکه آبراهه‌ها و خطواره‌های زمین‌شناختی استخراج شد. همچنین یکی از روش‌های شناسایی نوع سیستم جریان در آبخوان کارستی، به‌کارگیری نتایج واکاوی‌های شیمیایی آب چشمه‌های این مناطق است. برای شناخت سامانه ژئوشیمیایی آب زیرزمینی از چشمه‌ها در دو دوره خشک (اواخر تیرماه) و تر (فروردین) نمونه برداری شد. پارامترهای EC، pH و دما در روی زمین اندازه‌گیری شد و واکاوی شیمیایی نمونه‌های آب، در آزمایشگاه سازمان آب منطقه‌ای قزوین انجام گرفت. شکل ۲ جایگاه نقاط نمونه‌برداری را نشان می‌دهد. برای بررسی و تفسیر داده‌های واکاوی شیمیایی از نرم‌افزار AqQa (Tick and Vlassopoulos, 2004) و برای مدل‌سازی هیدروشیمیایی از نرم‌افزار Phree Qc (Parkhurst and Appelo, 1999) بهره‌گیری شد. برپایه مقدار کاتیون و



شکل ۱. تصاویر ماهواره‌ای منطقه مورد بررسی در ایران، استان قزوین و گستره پژوهش (شهر تاکستان در بالا، آبگرم در بخش میانی و آوج در جنوب با چهارگوش سرخ رنگ نشان داده شد) (برگرفته از Google Earth)



شکل ۲. جایگاه نمونه برداری از چشمه‌ها در منطقه ابگرم، جنوب استان قزوین (نقشه زمین‌شناسی برگرفته از Bolourchi, 1978)

زمین‌شناسی و چینه‌نگاری

در نزدیکی روستای آورنه، همچنین رخنمون‌های گسترده‌ای از این سازند در بخش‌های شمالی گسترده دیده می‌شود (شکل ۴). سازند الیکا (تریاس زیرین تا میانی) از سنگ‌آهک سرشار از اکسید آهن در زیر و سنگ‌آهک و دولومیت به رنگ روشن در روی آن ساخته شده است. سازند لار (ژوراسیک بالایی) دارای سنگ‌آهک و دولومیت همراه با گچ است. واحدهای سنگی کربناته کرتاسه (کرتاسه میانی-بالایی) از سنگ‌آهک ساخته شده‌اند. سازند زیارت (ائوسن زیرین-میانی) دارای سنگ‌آهک نومولیتی است. سازند قم (الیگومیوسن)، گسترده‌ترین سازند کربناته، از سنگ‌آهک و سنگ‌آهک رسی ساخته شده است (شکل ۴).

یافته‌های پژوهش

بررسی‌های سنگ‌شناختی بُرش‌های نازک از سازندهای کربناته برای شناسایی دقیق سنگ‌شناسی آن‌ها انجام شد و

گستره مورد بررسی در جنوب استان قزوین و در پهنه‌های رسوبی-ساختاری ایران مرکزی و کمی در سنجند-سیرجان قرار دارد. این گستره در برگزیده سازندهای دوران‌های دیرینه‌زیستی، میانه زیستی و نوزیستی است. این سازندها از سنگ‌های گوناگون رسوبی آواری، کربناته و تبخیری، همچنین از انواع سنگ‌های آذرین ساخته شده‌اند. سنگ‌های کربناته چون سنگ‌آهک و سنگ‌دولومیت در سازندهای سلطانیه، میلا، روته، الیکا، دلیچای، لار، کرتاسه، زیارت و قم دیده می‌شوند.

کهن‌ترین رخنمون شناخته شده در ناحیه مورد بررسی سنگ‌های دولومیتی خاکستری رنگ استروماتولیت‌دار همراه با باندها و گرهک‌های سیاه‌رنگ چرت سازند سلطانیه (کامبرین زیرین) است (شکل ۳). سازند میلا (کامبرین میانی-بالایی)، از سنگ‌آهک و دولومیت ساخته شده است (شکل ۳). برونزدهای شناخته شده سازند روته (پرمین) را

زمین ریخت‌شناسی کارست در سنگ‌های کربناته گستره آبگرم ...

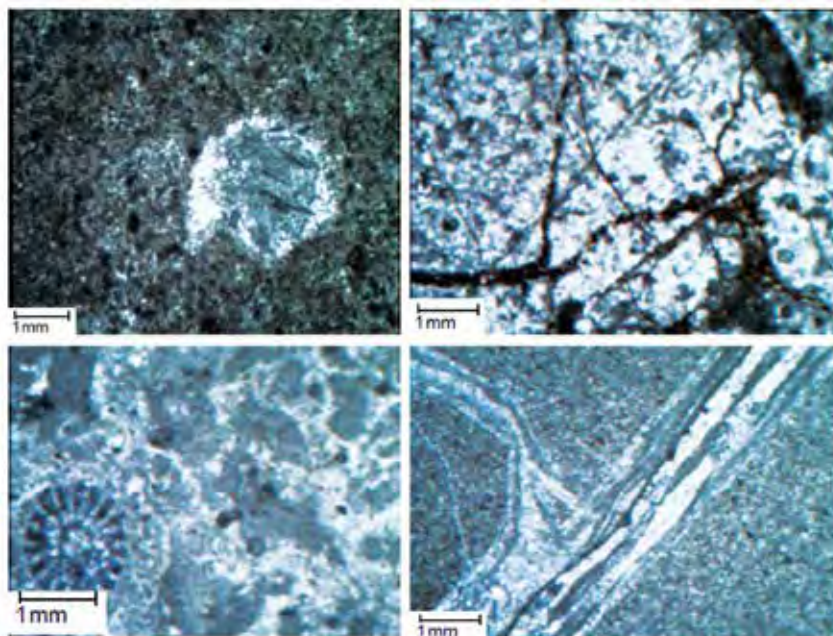
نشان داد بیشتر سنگ‌های کربناته از سنگ‌آهک و به میزان کمتر از سنگ‌های دولومیت است (شکل ۵). سازندهای سلطانیه، میلا و روته از سنگ دولومیت، و سازند قم از سنگ‌آهک ساخته شده‌اند (شکل ۵).



شکل ۳. سازند سلطانیه، جاده شنیز-آورنه، دید به سوی باختر (راست)، سازند میلا، نمایی از روستای آورنه، دید به سوی جنوب خاور (چپ)



شکل ۴. سازند روته، شمال باختر روستای آورنه، دید به سوی جنوب (راست)، سازند قم، شمال آبگرم (دید به سوی شمال باختر) (چپ)



شکل ۵. بُرش‌های نازک میکروسکوپی، در نور XPL. (a) دولومیت، سازند سلطانیه، (b) دولومیت، سازند میلا، (c) دولومیت، سازند روته، (d) سنگ‌آهک فسیل‌دار، سازند قم

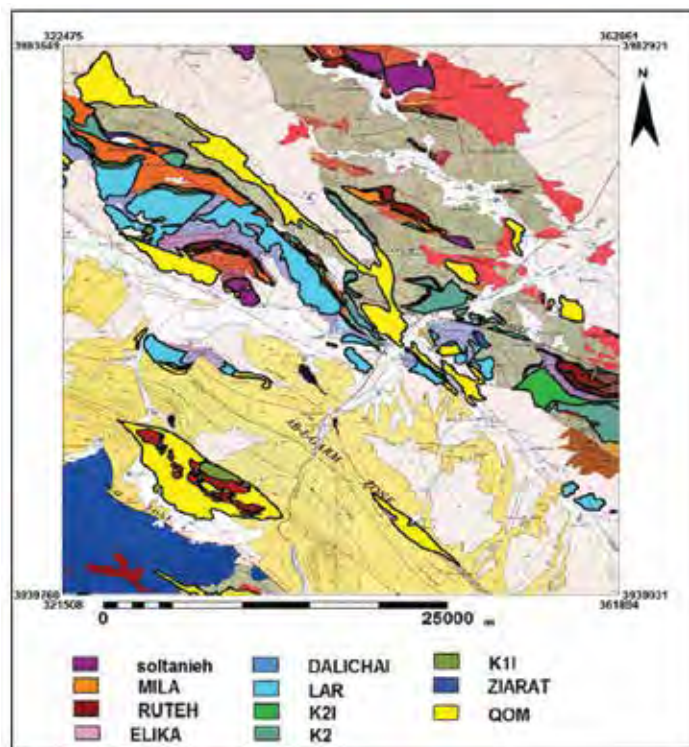
می‌یابد و کارست‌زایی بیشتر می‌شود (قبادی، ۱۳۸۸). دما به عنوان عامل مهم در کارستی‌شدن سنگ‌های کربناته به شمار می‌آید. انحلال سنگ‌آهک در یک لیتر آب با دمای صفر درجه، چهار تا پنج برابر بیشتر از آب با دمای ۳۰ درجه سانتیگراد و شش برابر آب با دمای ۴۰ درجه سانتیگراد است (James, 1981). با افزایش دما، حلالیت کربنات کلسیم، کمتر می‌شود (James and Lupton, 1978). برپایه نقشه همدمای استان، همدمای سالانه آوج میان نه تا یازده درجه سانتیگراد و همدمای سالانه آبگرم میان یازده تا سیزده ۱۳ درجه سانتیگراد است (هدایتی دزفولی و کاکاوند، ۱۳۹۱). برپایه تصاویر ماهواره‌ای لندست، پراکندگی سازندهای کربناته و پوشش گیاهی (شکل ۶) و برپایه نقشه‌های زمین‌شناسی و با به‌کارگیری نرم‌افزار ILWIS (در محیط GIS) نقشه سازندهای کربناته در گستره آبگرم (شکل ۷) و مساحت آن‌ها به دست آمد.

چورلی و همکاران (۱۹۸۵) بر این باورند که در گستره‌هایی که میزان بارندگی کمتر از ۳۰۰ میلی‌متر باشد، زمیندیس‌های کارستی پدید نمی‌آید. بنابراین، ساختارهای کارستی بیشتر در مناطق سرد و مرطوب با بارش بیش‌تر از ۳۰۰ میلی‌متر که دارای سنگ بستر کربناته یا تبخیری باشند شکل می‌گیرند. میانگین بارش‌های جوی سالانه گستره نزدیک ۳۱۲ میلی‌متر است (هدایتی دزفولی و کاکاوند، ۱۳۹۱).

جنوب استان به لحاظ جایگاه جغرافیایی و قرارگرفتن در دامنه کوه خرقان با بلندای میان ۱۶۵۰ تا ۲۵۰۰ متر از سطح دریا، دارای آب و هوای سرد با زمستان‌های دراز و تابستان‌های معتدل می‌باشد. برپایه نقشه هواشناسی استان، منطقه آوج دارای پهنه‌های آب و هوایی فراسرد تا مدیترانه‌ای فراسرد است. گستره آبگرم هم دارای آب و هوای فراسرد تا نیمه‌خشک سرد است (هدایتی دزفولی و کاکاوند، ۱۳۹۱). دیگر عامل تاثیرگذار بر کارستی‌شدن، دمای هوا می‌باشد. هر چه دمای هوا کمتر باشد، قابلیت انحلال آب افزایش



شکل ۶. تصویر ماهواره‌ای لندست همراه با پراکندگی سازندهای کربناته در آبگرم-آوج (برگرفته از Bolourchi, 1978)



شکل ۷. پراکندگی سنگ های کربناته (برگرفته از Bolourchi, 1978)

زمیندیس های کارستی گستره آبگرم

زمیندیس های کارستی دارای گوناگونی بسیاری هستند. در گستره آبگرم، کارست بیرونی و درونی دارای گوناگونی بسیار زیاد نیست. از این روی، کارست آن دارای پیچیدگی کمی است. در زیر به مهمترین آن ها اشاره می شود:

چاله باران: از زمیندیس های انحلالی که بر روی توده ی سنگ و بدون اثر عوامل ساختاری ایجاد می شوند، می توان به چاله های باران اشاره کرد. این کارن ها به صورت حفرات کوچکی با ابعاد چند میلی متر تا چند سانتی متر بر روی سنگ لخت ایجاد می شوند. شکل ظاهری آنها به صورت دایره های نامنظم است و دو طرف آن قرینه می باشد. دلیل پیدایش آن ها ناهمگنی در سنگ آهک و یا عمل موجودات زنده است (کریمی وردنجانی، ۱۳۹۴). این پدیده در بیشتر سازندها دیده می شود (برای نمونه، شکل ۸).

ریزشیاز: ریزکارن^۲ یا ریزشیاز^۳ دارای شیارهای ژرف تر و گسترده تر از حدود یک میلی متر و درازتر از چند سانتی متر نیستند. این پدیده کارستی کوچک، در بسیاری از سازندهای منطقه دیده می شود (برای نمونه، شکل ۸).

کارن شیاری: کارن شیاری^۴ دارای گذرگاه های نازک با بُرش است. این شکل ها در شیب های تند پدید می آیند (شکل ۹). هر چه بارش و شیب بیشتر شود، درازای کارن شیاری هم افزایش می یابد (Bögli, 1980).

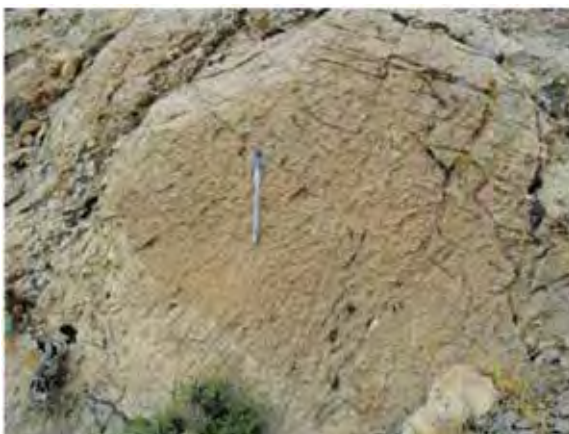
ژرفشیاز: ژرفشیاز^۵ در نتیجه انحلال در محل درزه ها پدیدمی آید. وسعت و ژرفای انحلال، جداکننده آن از شیارهای انحلالی است. ژرفشیارها معمولاً دارای چند سانتی متر عرض و چندین متر ژرفا می باشند (برای نمونه، شکل ۹). اهمیت ژرفشیارها به علت هدایت کنندگی اصلی آب باران به داخل سفره های کارستی می باشند (کریمی وردنجانی، ۱۳۹۴).

غار: غار^۶ یک بازشدگی طبیعی در روی زمین است و دارای اندازه های بزرگی است که یک انسان بتواند وارد آن شود (Fleury, 2009). اگر اندازه حفره کوچکتر از یک

1. Rain pits
2. Microkarren
3. Microrill
4. Rill karren
5. Grikes/Cleft karren
6. Cave

می‌شوند (مقیمی، ۱۳۹۱). بیشتر غارهای گستره آبگرم، در سازند قم ساخته شده‌اند (برای نمونه شکل ۱۰). از غارهای شناخته شده می‌توان به غار قلعه‌کرد در ۲۱ کیلومتری روستای حصار و غار عباس‌آباد در چهار کیلومتری شمال آبگرم اشاره کرد.

متر باشد به آن غارک^۱ گویند. غار در دسته کارست بیرونی قرار می‌گیرد. سنگ‌آهک‌هایی که در میان آن‌ها لایه‌های شیلی وجود دارد از دید ساخت غار بسیار مهم است، زیرا شیل‌ها آب‌های زیرزمینی را متوقف کرده و باعث سرعت بخشیدن به انحلال سنگ‌آهک و در پایان ساخت غار



شکل ۸. ریزکارن و کارن سازند میلا، راه شنیر-آورنه (راست) و میکروکارن و کارن و چاله باران در سازند لار، جنوب آبگرم، راه داخرجین (چپ)



شکل ۹. کارن شیاری، سازند روته، شمال باختر روستای آورنه (راست) و ژرف‌شیار در سازند قم، روستای گنبدک، شمال باختر آبگرم (چپ)



شکل ۱۰. غار و غارک در سازند قم، روستای گنبدک، شمال باختری آبگرم (راست) و در شمال آبگرم (چپ)

ویژگی های سازندهای کربناته در گستره آبگرم از دید سنگ شناختی، مساحت برونزد، زمین ریخت های کارستی و درجه نسبی کارستی شدن در جدول ۱ ارائه شده است. بر این پایه، بیشترین برونزد و گسترده ترین کارستزایی در جوان ترین سازند، که سازند قم باشد، پدید آمده است. در این راستا، فاکتورهایی که بیشترین تاثیر را در درجه نسبی کارستی شدن سازندهای کربناته داشته است، سنگ شناسی و مساحت برونزد آن ها می باشد. برپایه گسترش کارستزایی، کارست آبگرم بخشی و کم ژرف و برپایه چرخه کارست، نوجوان تا جوان است (Veress, 2020).

جدول ۱. سنگ شناختی، مساحت و زمین دیس های کارستی سازندهای کربناته گستره آبگرم

سازند کربناته	دوره زمین شناسی	سنگ شناختی	مساحت (km ²)	زمین دیس های کارستی (Karstic Landforms)	درجه نسبی کارستی شدن
قم	الیگومیوسن	سنگ آهک	۱۲۹/۱۹	ژرف شیار، گودال انحلاهی، غارک، غار	۱۰
روته	پرمین	سنگ آهک و دولومیتی	۱۰/۷۴	کارن، میکروکارن، کارن شکافی، چاله باران	۷
میلا	کامبرین	سنگ آهک، شیل، دولومیت	۷/۷۷	کارن، میکروکارن، کارن شکافی، حفره انحلاهی	۶
سلطانیه	کامبرین	دولومیت	۱۷/۸۲	کارن، میکروکارن	۵
لار	ژوراسیک	دولومیت، سنگ آهک، ژئیس	۶۵/۷۲	کارن، میکروکارن، چاله باران	۴
کرتاسه	کرتاسه	سنگ آهک و گلسنگ آهکی	۶۴/۰۹	کارن، حفره انحلاهی	۳
الیکا	تریاس	دولومیت	۱/۴۲	کارن، میکروکارن	۲
زیارت	ائوسن	سنگ آهک	۹/۶۷	کارن	۱

هیدروشیمی کارست

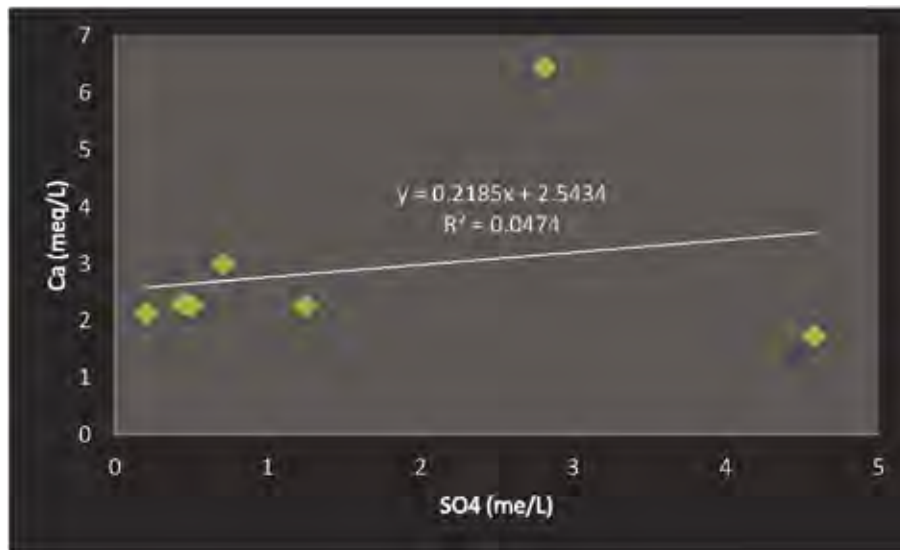
در سازندهای باروت و یا سلطانیه واقع شده است. از دید پارامتر دما، کمترین دمای آب زیرزمینی منطقه مربوط به آروچان آراده می باشد و این موضوع را می توان به دمای هوا، سنگ منشا چشمه و دمای سنگ های کناری که آب چشمه از میان آن ها عبور می کند، نسبت داد که در نتیجه می تواند کارستی شدن بیشتر سنگ منشا چشمه را نشان دهد.

از سوی دیگر، با توجه به مدلسازی هیدروژئوشیمیایی و شناسایی اندیس سیرشدگی هنگامی که مقدار SI نمونه آب نسبت به یک کانی خیلی کوچک باشد، آن کانی می تواند تا مدتها در آب حل شود. اندیس سیرشدگی همه نمونه های آب چشمه های برداشت شده نسبت به کانی های آراگونیت، کلسیت و دولومیت و هالیت منفی است. در نتیجه آب زیرزمینی در این مناطق از این مواد در حالت زیر سیرشدگی می باشد. این ویژگی نشان دهنده زمان ایست کم آب در محیط کارستی است (شکل ۱۲). از دید محیط کارستی، سنگ های کربناته، با سه اندیس منفی سیرشدگی آراگونیت، کلسیت و دولومیت اهمیت بسیاری دارند. برپایه مقدار بسیار

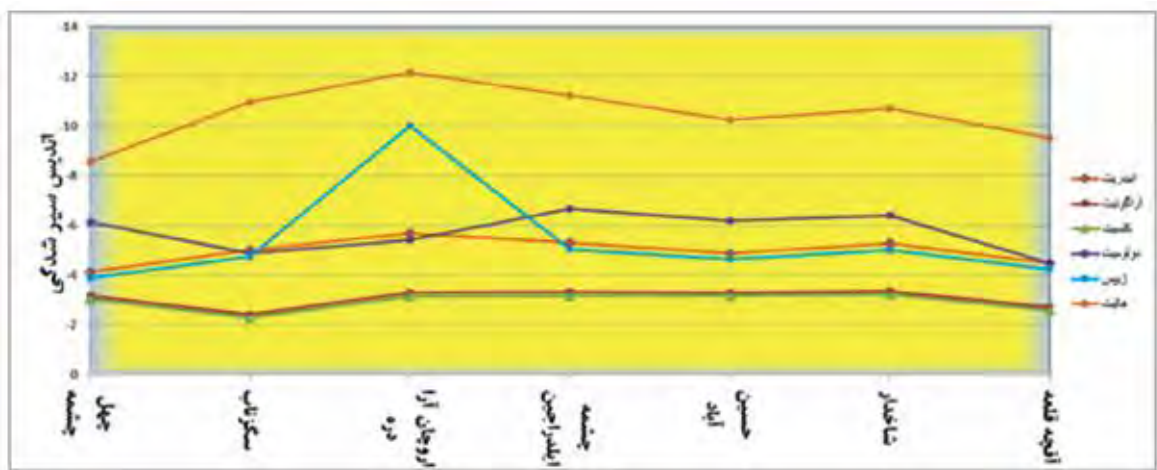
برای راستی آزمایی نتایج به دست آمده از پژوهش های زمین ریخت شناسی و سنجش از دور، هیدروشیمی چشمه های کارستی مورد بررسی قرار گرفت. همچنین سنگ مخزن چشمه های کارستی و همچنین زمان ایست آب در آن ارزیابی شد. برپایه نمودارهای پایپر و استیف، نوع و رخساره نمونه های آبی بیکربناته-کلسیم-منیزیم مشخص شد. این رخساره را می توان با انحلال سازندهای کربناته سنگ آهک، دولومیت و در نتیجه افزایش مقدار بیکربنات و کلسیم در آب زیرزمینی تفسیر کرد. همچنین با توجه به نمودار ترکیبی Ca در برابر SO₄، قطع شدن محور Ca توسط خط برازش، نشان از افزایش این یون است (شکل ۱۱). همچنین نشان دهنده آن است، یون Ca افزون بر ژئیس، دارای منشأ دیگری مانند کربنات کلسیم است.

بیشترین دمای آب در دوره خشک در چشمه حسین آباد برابر با ۱۷/۲ درجه سانتیگراد اندازه گیری شده است. این دما می تواند نشان دهد که نسبت به بقیه مخزن ها، این چشمه در ژرفای کمتری قرار دارد. سنگ مخزن این چشمه

پایین این شاخص‌ها در چشمه‌های گستره آبگرم نتیجه‌گیری می‌شود کارست این منطقه بخشی و نارس است. این دید نیز نتایج مدلسازی هیدروشیمیایی و مطالعات زمین ریخت شناسی را تایید می‌کند.



شکل ۱۱. نمودار ترکیبی Ca در برابر SO₄ در نمونه‌های آبی گستره آبگرم



شکل ۱۲. انديس سیرشدگی چشمه‌های برگزیده آبگرم نسبت به کانی‌های عمده

نتیجه‌گیری

در کارستزایی، به ویژه در کارست پیشرفته غارهای قلعه‌کرد و عباس‌آباد، موثر است.

در کل کارست‌های گستره آبگرم بر پایه رده‌بندی زمین‌ریخت‌شناسی از نوع کارست بخشی و برپایه رده‌بندی مهندسی، نوجوان تا جوان است. با توجه به بازدهی‌های میدانی و واکاو‌های انجام شده، سازند قم و پس از آن سازند روتنه، بیشترین میزان کارستزایی را دارند و سازندهای الیکا و زیارت دارای کمترین میزان کارستزایی هستند (جدول ۱). بر پایه مدلسازی هیدروشیمیایی با توجه به زمان ایست کم آب

گستره آبگرم دارای شرایط سنگ‌شناسی و آب و هوایی مناسب برای کارستزایی است. میانگین بارش‌های جوی سالانه منطقه نزدیک ۳۱۲ میلی‌متر می‌باشد. میانگین درازمدت دمای سالانه ۱۰/۱ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. جریان یافتن آب سرد ناشی از آب‌شدن برف و باران به درز و شکاف‌های سنگ‌های کربناته، باعث افزایش انحلال و سرانجام پیدایش زمین‌دیس‌های کارستی شده است. شرایط آب و هوایی و اقلیمی گذشته در دوره‌های یخبندان بیشتر

- در محیط کارستی، می‌توان نتیجه‌گیری کرد، اپی کارست آبگرم گسترش چندانی ندارد و کارست از نوع کارست افشان و توسعه نیافته است.
- منابع**
- باقری، ف.، کرمی، غ.ح.، باقری، ر. و مشکینی، ج.، ۱۳۹۸. اثر بارش و لیتولوژی در خصوصیات هیدروشمیایی چشمه‌های کارستی استان خراسان شمالی. فصلنامه زمین‌شناسی ایران، ۵۲، ۸۹-۱۰۳.
- رضائی عارفی م.، زنگنه اسدی م.ع.، بهنیا ف.ا. و جوانبخت م.، ۱۳۹۸. محاسبه میزان نرخ فرسایش کارستی با بهره‌گیری از تکنیک‌های تجربی و آزمایشگاهی در حوضه آبریز کلات در شمال شرق ایران. پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، ۸، ۳، ۶۴-۷۹.
- رنگزن، ک.، محرایی‌نژاد، ع.، علیجانی، ف. و استادهاشمی، ز.، ۱۳۹۶. آسیب‌پذیری و آلودگی آبخوان کارستی نعل اسبی، جنوب شرق ایزه، با استفاده از روش COP. مجله زمین‌شناسی کاربردی پیشرفته، ۲۳، ۲۰-۲۸.
- شاهسوندی، م.، ۱۳۸۷. تاثیر فاضلاب‌های شهری بر چاه‌های آب شرب شهر قم. پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید بهشتی تهران، ۱۴۳.
- شمعانیان، غ.ح. و مریدی، ز.، ۱۳۹۵. کانی‌شناسی، ژئوشیمی و خاستگاه نهشته بوکسیت رسی شیرین‌آباد، جنوب شرق گرگان. فصلنامه زمین‌شناسی ایران، ۳۹، ۱۰۳-۱۱۵.
- غضنفری، پ.، بختیاری، م. و جلالی، ن.، ۱۳۹۴. کارست‌زایی سنگ‌های کربناته با بهره‌گیری از RS و GIS در منطقه الموت، شمال قزوین. کوآترنری ایران، ۴، ۳۳۹-۳۵۲.
- غضنفری، پ.، بختیاری، م. و تاج‌آبادی، م.، ۱۳۹۶. زمین‌پدیس‌ها و چشمه‌های کارستی دره الموت، شمال قزوین. کوآترنری ایران، ۲ (۸)، ۳۵۳-۳۶۶.
- قبادی، م.ح.، ۱۳۸۸. زمین‌شناسی مهندسی کارست، دانشگاه بوعلی سینا، ۳۰۴.
- قبادی، م.ح.، طالب بیدختی، ع.ر. و مومنی، ع.ا.، ۱۳۸۹. نقش لیتولوژی و ساختارهای تکتونیکی در گسترش کارست، تغییر آبدهی و کیفیت چشمه‌های کارستی منطقه آبگرم قزوین. مجله انجمن زمین‌شناسی مهندسی ایران، ۳ و ۴، ۱-۱۲.
- کریمی‌وردنجان‌سی، ح.، ۱۳۹۴. هیدروژئولوژی کارست، مفاهیم و روش‌ها. انتشارات ارم شیراز، چاپ اول، ۴۱۴.
- محمدی بهزاد، ح.ر.، کلانتری، ن.، چرچی، ع. و ندری، آ.، ۱۳۹۶. شناخت منابع تغذیه چشمه‌های کارستی مهم استان خوزستان با استفاده از ایزوتوپ‌های پایدار اکسیژن ۱۸ و دوتریم. فصلنامه زمین‌شناسی ایران، ۴۳، ۱-۱۳.
- مقیمی، ه.، ۱۳۹۱. هیدروژئولوژی کارست. انتشارات دانشگاه پیام نور، چاپ سوم، ۲۶۸.
- ناصری، ح.ر.، ۱۳۷۰. مطالعه هیدروژئولوژیکی چشمه‌های کراتی حوضه آبریز درودزن. پایان‌نامه کارشناسی ارشد آب‌شناسی، دانشگاه شیراز.
- ناصری، ح.ر.، فتیحی، ا. و صیادی، م.، ۱۳۹۱. پهنه‌بندی پتانسیل آب زیرزمینی در سازندهای کارستی شمال شرق استان تهران با استفاده از آنالیز سلسله مراتبی (AHP). شانزدهمین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران، شیراز.
- هدایتی دزفولی، ا. و کاکاوند، ر.، ۱۳۹۱. پهنه‌بندی اقلیمی استان قزوین. مجله علمی و فنی نیوار، ۷۶، ۷۷: ۵۹-۶۶.
- Alley, W.M., 1993. Regional ground-water quality. John Wiley and Sons. 634.
- Anderson, T.W., Welder, G.E., Lesser, G. and Trujilo, A., 1988. Region 7, Central alluvial basin, In Geology of North America (hydrology). Edited by William Back, Joseph S. Rosenbein, and Paul R. Seaber: 81-86.
- Bakalowicz, M., 2005. Karst groundwater: a challenge for new resources. Hydrogeology Journal, 13, 1: 148-160.
- Biri, G., Ghazanfari, P. and Bajelan, H., 2014. The role of fractures in the karst phenomena and Abasabad cave formation in the southern provenance of Qazvin. 32nd National and 1st International Geosciences Congress Fundamental Geology, 16-19 February, Ferdosi University, Mashhad, Iran.
- Bolourchi, M.H., 1978. Geological map of Avaj 1/100000. Geological Survey of Iran.

- Bögli, A., 1980. Karst hydrology and physical speleology. New York, Springer, 270.
- Bozak, P., 2008. Karst processes and time. *Geologos*, 14, 1: 121-127.
- Chow, V.T., 1988. Applied Hydrology. McGraw-Hill, 627.
- Cvijić, J., 1925. Types morphologiques des terrains calcaires, *Comptes Rendus, Académie des Sciences (Paris)*, 180, 592-594.
- Dickson, J.A.D., 1966. Carbonate identification and genesis as revealed by staining. *Journal of Sedimentary Petrology*, 36: 491-505.
- Ennes-Silva, R.A., Bezerra, F.H.R., Nogueira, F.C.C., Balsamo, F., Klimchouk, A., Cazarin, C.L. and Auler, A.S., 2015. Superposed folding and associated fracturing influence hypogene karst development in Neoproterozoic carbonates, São Francisco Craton, Brazil. *Tectonophysics*, 244-259. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2015.11.006>.
- Fleury, S., 2009. Land Use Policy and Practice on Karst Terrains: Living on Limestone. Springer, 187.
- Ford, D.C. and Williams, P.W., 2007. Karst Hydrogeology and Geomorphology, John Wiley and Sons Ltd, The Atrium, Southern Gate, Chichester, 576.
- Ghanea, M. and Ghazanfari, P., 2014. Karst features of Carbonate Rocks of Cretaceous Haraz Valley, Central Alborz. 32nd National and 1st International Geosciences Congress Fundamental Geology, 16-19 February, Shiraz University, Shiraz. Iran.
- James, A.N., 1981. Solution parameters of carbonate rocks. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 24, 19-25.
- James, A.N. and Lupton, A.R.R., 1978. Gypsum and anhydrite in foundation of hydraulic structures. *Geotechnique*, 28, 249-272.
- Karimi Vardanjani, H., Bahadorinia, S. and Ford, D.C., 2017. An Introduction to Hypogene Karst Regions and Caves of Iran. In: Hypogene Karst Regions and Caves of the World (Klimchouk A, Palmer AN, Waele JD, Auler AS, Audra P), Springer. 479-494.
- Langmuir, D., 1997. Aqueous environmental geochemistry. Prentice Hall, 600.
- Migon, P., 2011. Development of karst phenomena for geotourism in the Moravian Karst (Czech Republic). *Geotourism*, 3-4 (26-27), 3-24.
- Moradi, S., Kalantari, N. and Charchi, A., 2018. Karstification Potential Mapping in Northeast of Khuzestan Province, Iran, using Fuzzy Logic and analytical Hierarchy Process (AHP) techniques. *Geopersia* 6 (2), 2016, 265-282.
- Parkhurst, D.L. and Appelo, C.A.J., 1999. User's guide to PHREEQC (Version 2): A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations. USA Geological Survey Water-Resources Investigations Report, 99-4259.
- Silvestra, E., 2000. Paleokarst-a riddle inside confusion. *CEN Technical Journal*, 14, 3, 100-108.
- Tick, G. and Vlassopoulos, D., 2004. AqQA: quality assurance and presentation graphics for ground water analyses. *Ground Water*, 42(3), 326-329.
- Tucker, M.E., 2001. Sedimentary Petrology: An introduction to the origin of sedimentary rocks. Blackwell Scientific Publication, 262.
- Veress, M., 2020. Karst Types and Their Karstification. *Journal of Earth Science*, 31 (3), 621-634.
- Waltham, A.C. and Fookes, P.G., 2003. Engineering classification of karst ground conditions. *Journal of Engineering Geology and Hydrology*, 36, 101-118.

ماکروفسیل‌های گیاهی سازند لله‌بند (تریاس پسین)، گستره‌ی زغال‌دار رامسر، شمال ایران

جواد سعادت نژاد^(*)

۱. شرکت ملی نفت ایران، مدیریت اکتشاف، اداره زمین‌شناسی نفت

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۹/۲۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۲/۲۴

چکیده

توالی رسوبات گروه شمشک با رخنمون خوبی در گستره زغال‌دار رامسر حاوی چهار سازند اکراسر، لله‌بند، کلاریز و جواهرده می‌باشد. سازند لله‌بند در این منطقه به صورت هم‌شیب و تدریجی بر روی سازند اکراسر و مرز بالایی آن به صورت هم‌شیب و واضح در زیر سازند کلاریز قرار دارد و حاوی ماکروفسیل‌های گیاهی به صورت پراکنده با سن نورین-رتین می‌باشد. برش مورد مطالعه حاوی ماکروفسیل‌های گیاهی خوب حفظ شده با تنوع کم و متعلق به سه راسته Equisetales، Filicales و Pinales است. براساس حضور چهار گونه *Neocalamites* sp. cf. *erdmanni* و موقعیت چینه‌شناسی طبقات مورد مطالعه، سن نورین پسین-رتین پیشین برای این توالی رسوبات پیشنهاد می‌شود.

واژه‌های کلیدی: تریاس پسین، سازند لله‌بند، گستره‌ی زغال‌دار رامسر، ماکروفسیل‌های گیاهی.

مقدمه

و جنوبی رخنمون دارد به طوری که Fürsich و همکاران رخنمون‌های اشاره شده در البرز مرکزی و جنوبی توسط ریپین (Repin, 1978) را مربوط به سازند شهمیرزاد در نظر می‌گیرند. مقطع تیپ این سازند با ضخامت ۴۳۵ متر در ۱۵ کیلومتری جنوب شرقی روستای لله‌بند (معدن زغال سنگ کارمزد، شمال دامغان) معرفی شده است. به طور کلی سازند لله‌بند کم فسیل است و حاوی مقادیر کمی از ماکروفسیل‌های گیاهی و جانوری می‌باشد. براساس سن فسیل‌ها و موقعیت چینه‌شناسی سن نورین پسین-رتین پیشین برای این سازند تعیین شده است (Fürsich et al., 2009). رسوبات زغال‌دار البرز براساس خصوصیات ساختمانی، استخراج زغال و تقسیمات جغرافیایی به سه ناحیه‌ی

سازند لله‌بند برای نخستین بار توسط زمین‌شناسان شرکت دامگ (۱۹۶۱) به عنوان بخش لله‌بند (دومین بخش از سازند طزره) معرفی شد (آقانیاتی، ۱۳۸۸). این سازند در مطالعات بعدی به عنوان سوئیت لله‌بند (Bragin et al., 1976; Sadovnikov, 1976) بخش لله‌بند از سازند طزره (Repin, 1978) و سری لله‌بند (Schweitzer and Kirchner, 2003) و در نهایت به عنوان سازند لله‌بند (Fürsich et al., 2009) معرفی شد. Fürsich و همکاران (۲۰۰۹) برخلاف ریپین (Repin, 1978) معتقدند که این سازند فقط در البرز شمالی رخنمون دارد ولی Repin معتقد بود، بخش لله‌بند در هر سه پهنه البرز شمالی، مرکزی

* نویسنده مرتبط: javadsaadatnejad@gmail.com

شناخته شده می‌باشد بنابراین طبقات آواری این سازند در گستره مورد مطالعه انتخاب و مطالعه شدند. روش کار شامل دو مرحله صحرایی و آزمایشگاهی است، به طوری که در ابتدا پهنه‌هایی که می‌توانستند حاوی ماکروفسیل‌های گیاهی نورین-رتین باشند از روی نقشه‌های زمین‌شناسی شناسایی و در نهایت پس از اعزام به چند ناحیه، پهنه مورد مطالعه انتخاب، مورد بررسی و نمونه‌ها از آن گستره جمع‌آوری شدند. نمونه‌های جمع‌آوری شده درون کیسه‌های پارچه‌ای جداگانه قرار داده شده و شماره‌گذاری شدند. در مرحله بعد ماکروفسیل‌های مناسب مطالعه انتخاب و پس از رسوب‌برداری تا حد امکان در آزمایشگاه و توسط یک میکروسکوپ دوچشمی مطالعه شده و مشخصات بخش‌های آن‌ها از قبیل فروند، پینه، پینول و رگبرگ‌ها بررسی و ثبت شدند. سپس نمونه‌ها شناسایی و نامگذاری شده و در پایان از آن‌ها عکس گرفته شد.

موقعیت جغرافیایی منطقه‌ی مورد مطالعه

روستاهای میان‌لات و بامسی به ترتیب در فواصل ۳/۵ و پنج کیلومتری جنوب باختری رامسر واقع شده‌اند. برش مورد مطالعه (شکل ۳) در فاصله طول‌های شرقی ۵۰ درجه و ۳۵ الی ۳۷ دقیقه و عرض‌های جغرافیایی ۳۶ درجه و ۵۴ الی ۵۵ دقیقه قرار دارد و مسیر دسترسی به آن مسیر چالوس-رامسر-جواهرده می‌باشد. روستاهای بیان شده در مسیر جاده رامسر به جواهرده قرار دارند (شکل ۱).

بحث

چینه‌شناسی گستره مورد مطالعه

گستره مورد مطالعه در زیر پهنه البرز شمالی واقع شده و شامل توالی ستیری از رسوبات گروه شمشک است و به طور ناپیوسته بر روی دولومیت‌های خاکستری و کرم رنگ سازند الیکا با سن تریاس میانی قرار دارد (شکل ۲). در گستره رامسر پس از یک وقفه رسوب‌گذاری و تشکیل لاتریت و بوکسیت در اوایل تریاس پسین، رسوب‌گذاری مجدد توالی تریاس پسین-ژوراسیک میانی (گروه شمشک) آغاز می‌شود به طوری که شروع این رسوب‌گذاری بیشتر به صورت یک کنگلومرای پیش‌رونده می‌باشد ولی در پهنه مورد مطالعه

زغال‌دار البرز غربی، البرز مرکزی و البرز شرقی تقسیم‌بندی شده‌اند (معین السادات و زاده کبیر، ۱۳۷۰). براساس تقسیم‌بندی‌های کارکنان شرکت ملی فولاد ایران ناحیه زغال‌خیز البرز غربی به پنج حوضه‌ی زغال‌خیز سنگرود-آغوزین، رامسر، قزوین، تومول و مناطق زغال‌خیز آذربایجان شرقی و غربی تقسیم‌بندی می‌شود (معین السادات و زاده کبیر، ۱۳۷۰) البته در برخی منابع دو حوضه سنگرود و آغوزین به طور جداگانه و دو حوضه قزوین و تومول نیز مربوط به یک حوضه در نظر گرفته شده است (معین السادات و رضوی ارمغانی، ۱۳۷۲). ناحیه‌ی زغال‌دار البرز غربی شامل ارتفاعات البرز از آذربایجان تا دره رودخانه‌های چالوس و کرج و پهنه زغال‌دار رامسر نیز در بخش شمال شرقی حوضه زغال‌دار البرز غربی و در حدواسط چابکسر تا تنکابن می‌توان در نظر گرفت.

گستره زغال‌خیز رامسر به دو زیرپهنه نیدشت و اکراسر تفکیک می‌شوند. گستره مورد مطالعه در حوضه زغال‌دار البرز غربی، گستره زغال‌دار رامسر و زیرپهنه نیدشت (منتهی‌الیه شمال غرب گستره زغال‌دار رامسر) و در بین دو روستای میان‌لات و بامسی در جنوب غربی رامسر در مسیر رودخانه صفاورد و در برشی کنار جاده رامسر-جواهرده واقع شده است. با توجه به پوشش وسیع گیاهی در منطقه و رخنمون‌های اندک، هوازدگی شدید طبقات بدلیل رطوبت بالای گستره مورد مطالعه و از همه مهمتر با توجه به کم فسیل بودن سازند لله‌بند، نمونه‌های محدودی از این پهنه یافت و مطالعه شده است.

روش مطالعه

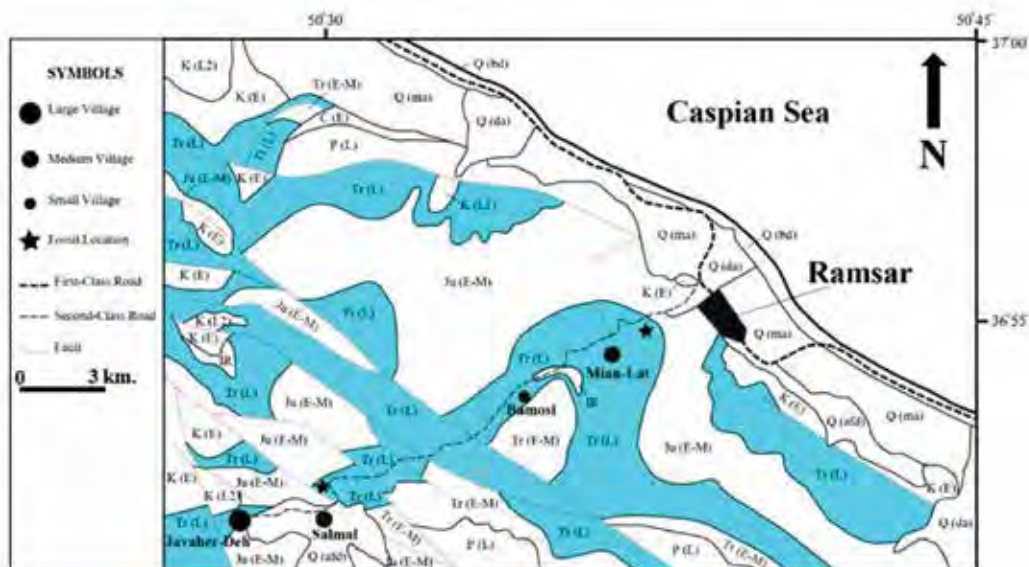
از آنجایی که بیشتر گزارش‌های مربوط به ماکروفسیل‌های گیاهی تریاس پسین در البرز اغلب مربوط به سازند کلاریز با سن رتین می‌باشد، هدف اول مطالعه، شناسایی ماکروفسیل‌های گیاهی و برش‌هایی جدید از سازند لله‌بند با سن نورین پسین-رتین پیشین می‌باشد. همچنین از سری رسوبات حاوی ماکروفسیل‌های گیاهی در تریاس پسین البرز با توجه به اینکه سازند لله‌بند از لحاظ کمیت و تنوع ماکروفسیل‌های گیاهی و همچنین از لحاظ معرفی نقاط و طبقات حاوی این فسیل‌ها در مقایسه با سازند کلاریز کمتر

سازند لسهبند (نورین پسین-رتین پیشین)، طبقات شیلی، سیلتستونی و ماسه‌سنگی سازند کلاریز و حاوی لایه‌های زغال و طبقات آذرین بصورت سیل (رتین) و در نهایت شامل کنگلومرای سازند جواهرده (لیاس-دوگر پیشین) می‌باشند (آقاناتی، ۱۳۷۷).

به‌ویژه در حدواسط رامسر تا جواهرده رسوبات گروه شمشک بدون حضور کنگلومرا بر روی افق بوکسیت-لاتریتی بیان شده قرار دارند (بهار فیروزی و همکاران، ۱۳۸۰). گروه شمشک در ناحیه رامسر شامل طبقات بیشتر شیلی سازند اکراسر (کارنین پسین-نورین پیشین)، طبقات سیلتستونی و شیلی



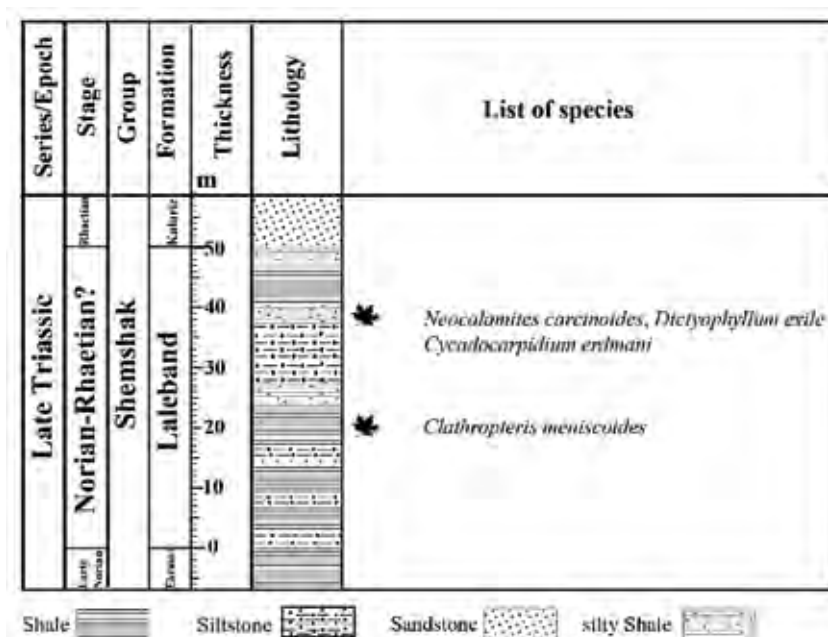
شکل ۱. موقعیت جغرافیایی و راه‌های دسترسی به پهنه مورد مطالعه (ستاره محل برداشت نمونه‌ها)، (عبداللهی، ۱۳۹۱)



شکل ۲. نقشه زمین‌شناسی گستره مورد مطالعه (جنوب غرب رامسر)، اقتباس از برگه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ رامسر (بهار فیروزی و همکاران، ۱۳۸۰)، C (E): کربونيفر پیشین (سازند مبارک)، P (L): پرمین پسین (سازند روتنه)، Tr (E-M): تریاس میان-پیشین (سازند الیکا)، Tr (L): تریاس پسین (سازندهای اکراسر، لسهبند و کلاریز؛ بخش‌های رنگ شده)، Ju (E-M): ژوراسیک پیشین-میانی، K (E): کرتاسه پیشین (سازند تیزکوه)، K (L1): لایه‌های آهکی کرتاسه پسین، K (L2): ولکانیک‌های بازیک کرتاسه پسین، Q (ma): رسوبات دریایی، Q (bd): رسوبات ساحلی، Q (da): رسوبات دلتایی غیرقابل تفکیک، Q (afd): رسوبات آبرفتی و دشت سیلابی

تناوب سیلتستون و شیل و در مجموع به رنگ خاکستری تا خاکستری تیره همراه با میان‌لایه‌هایی از ماسه‌سنگ ریزدانه خاکستری تا خاکستری روشن است و در مقایسه با سازند کلاریز در این گستره از کمیت و تنوع بسیار کمتری در ماکروفسیل‌های گیاهی برخوردار می‌باشد. سازند لله‌بند در برش مورد مطالعه به‌طور هم‌شیب و کاملاً تدریجی بر روی سازند اکراسر و هم‌شیب و به‌طور مشخص در زیر یک لایه ماسه‌سنگ درشت دانه خاکستری روشن مربوط به قاعده سازند کلاریز قرار می‌گیرد (شکل ۳).

به‌طور کلی سازند لله‌بند شامل تناوبی از سیلتستون‌های خاکستری، شیل و ماسه‌سنگ ریزدانه است و سیمای نوارنوار و خاستگاه مردابی-دریاچه‌ای و آبرفتی-دلتایی دارد. همچنین در این سازند لایه‌های نازکی از زغال‌سنگ (غیر اقتصادی) و شیل زغالی در بین طبقات مشاهده می‌شود. در البرز شمالی ضخامت این سازند از شرق (رامسر و اکراسر) به سمت غرب (گلندرود و قشلاق) افزایش می‌یابد (آقاناتی، ۱۳۷۷). در گستره رامسر، سازند لله‌بند با ضخامت ۵۰ متر شامل



شکل ۳. ستون چینه‌شناسی برش مورد مطالعه (جنوب شرق رامسر، بین میان لات و بامسی)

سیکادوفیت‌ها (نخلی شکلان) از گستره زغال‌دار رامسر و زیرمنطقه نیدشت گزارش کرد.
 ۲. Sadovnikov (1989) یک زیرجنس جدید از جنس *Taeniopteris* و دو زیرجنس جدید از جنس *Nilssonia* را از گستره زغال‌دار رامسر معرفی و آن‌ها را با نمونه‌های مشابه مقایسه کرد.
 ۳. Sadovnikov (1991) چهار گونه جدید از شاخه پتریدوسپرموفیت‌ها (سرخس‌های دانه‌دار) از رسوبات نورین-رتین این ناحیه معرفی کرد.
 ۴. معین‌السادات و زاده‌کبیر (۱۳۷۰) طی مطالعات گسترده بر روی رسوبات زغال‌دار سراسر البرز، تعدادی ماکروفسیل

مطالعات پیشین در ناحیه زغال‌دار رامسر (نورین-رتین)
 گستره زغال‌دار رامسر شامل دو زیرپهنه نیدشت و اکراسر است و سازندهای مربوط به گروه شمشک در آن از قدیم به جدید شامل چهار سازند اکراسر (کارنین پسین-نورین)، لله‌بند (نورین پسین-رتین پیشین)، کلاریز (رتین) و جواهرده (لیاس-دوگر) می‌باشد. مطالعات پیشین بر روی ماکروفسیل‌های گیاهی گستره زغال‌دار رامسر شامل موارد زیر می‌باشد. ماکروفسیل‌های گیاهی معرفی شده در این مطالعات در جدول ۱ اشاره شده است.
 ۱. Sadovnikov (1976) تعدادی ماکروفسیل گیاهی عمدتاً از پتریدوسپرموفیت‌ها (سرخس‌های دانه‌دار) و

- گیاهی از گستره زغال‌دار رامسر گزارش دادند.
۵. Schweitzer and Kirchner (1998) دو گونه از سرخس‌های دانه‌دار از رسوبات نورین-رتین و یک گونه جدید از سیکادال‌ها از رسوبات رتین معرفی کردند.
۶. سعادت نژاد (۱۳۸۴) دو گونه از سیکادال‌ها و دو گونه از ژینکوال‌ها را از پهنه جنوب غربی رامسر، برای نخستین بار از ایران گزارش کرد. سن رسوبات حاوی ماکروفسیل‌های گزارش شده در این مطالعه براساس برگه ۱:۲۵۰۰۰۰ قزوین-رشت ژوراسیک گزارش شده در صورتی که براساس برگه ۱:۱۰۰۰۰۰ رامسر مربوط به
- رسوبات تریاس پسین می‌باشد.
۷. سعادت نژاد (۱۳۹۵) ماکروفسیل‌های گیاهی حوضه زغال‌دار البرز غربی را در هر پنج ناحیه حوضه مذکور، بررسی و مقایسه کرد. در این مطالعه جنس *Nilssonia pseudobrevis* و دو گونه *Dictyozamites* و *Dictyozamites asseretoi* از حوضه زغال‌دار البرز غربی، گونه *Pterophyllum aequale* از گستره زغال‌دار رامسر و گونه *Anthrophyopsis crassinervis* از زیرپهنه زغال‌دار نیدشت در این مطالعه برای نخستین بار گزارش شدند.

جدول ۱. ماکروفسیل‌های گیاهی با سن نورین-رتین معرفی شده از گستره زغال‌دار رامسر (نیدشت و اکراسر) به ترتیب سال انتشار

نویسنده/نویسندگان	لیست گونه‌های معرفی شده
Sadovnikov, 1976	<i>Nilssonia (?) simplex</i> , <i>Hyrcaopteris leclerei</i> , <i>Keraiaephyllum</i> sp., <i>Nilssonia brevis</i> , <i>Nilssoniopteris schenkiana</i> , <i>Pterophyllum bavieri</i> , <i>Pterophyllum braunianum</i> , <i>Ptilozamites ctenoides</i> , <i>Ptilozamites nilssoni</i> , <i>Sphenobaiera longifolia</i> , <i>Taeniopteris mikailovii</i>
Sadovnikov, 1989	<i>Nilssonia</i> sub gen. <i>Planinilssonia simplex</i> , <i>Taeniopteris</i> sub gen. <i>Elbursia mikailovii</i> , <i>Taeniopteris</i> sub gen. <i>Taeniopteris barnardii</i>
Sadovnikov, 1991	<i>Ctenophyllum tazarensis</i> , <i>Hsiangchiphylloides rarinervis</i> , <i>Ptilozamites ctenoides</i> , <i>Ptilozamites nilssoni</i>
معین‌السادات و زاده کبیر، ۱۳۷۰	<i>Hyrcaopteris</i> sp., <i>Keraiaephyllum rarinervis</i> , <i>Keraiaephyllum</i> sp., <i>Pterophyllum bavieri</i> , <i>Pterophyllum braunianum</i> , <i>Ptilozamites nilssoni</i> , <i>Sphenobaiera longifolia</i>
Schweitzer and Kirchner, 1998	<i>Anthrophyopsis crassinervis</i> , <i>Ctenozamites caspiensis</i> , <i>Scytophyllum persicum</i> , <i>Baiera furcata</i> , <i>Ctenis kanharai</i> , <i>Ginkgoites longifolius</i> , <i>Pseudocatenis herriesi</i> , <i>Anthrophyopsis crassinervis</i> , <i>Dictyophyllum nathorsti</i> , <i>Dictyozamites asseretoi</i> , <i>Dictyozamites</i> sp., <i>Nilssonia pseudobrevis</i> , cf. <i>Nilssoniopteris musafolia</i> , <i>Pterophyllum aequale</i> , <i>Pterophyllum</i> sp.,

رده‌بندی ماکروفسیل‌های گیاهی

- در بین ماکروفسیل‌های گیاهی مطالعه شده از سازند لاله‌بند از ناحیه میان‌لات-بامسی تعداد یک گونه مربوط به دم‌اسبیان از راسته Equisetales شامل *Neocalamites* sp. cf. *N. carcinoides* شامل *Filicales* و دو گونه سرخس از راسته *Filicales* شامل *Clathropteris* و *Dictyophyllum* sp. cf. *D. exile* شامل *meniscoides* و یک گونه مخروطیان از راسته Pinales شامل اندام زایا با عنوان *Cycadocarpidium erdmani* گزارش می‌شود. رده‌بندی بر اساس Benton (1993) انجام شده و در فهرست مترادف‌ها (به‌غیر از معرف اصلی گونه)، برای جلوگیری از طولانی شدن متن، فقط به نمونه‌های
- معرفی شده از ایران اکتفا شده است.
- Division: **Pteridophyta**
 Class: **Equisetopsida** Takhtajan & Nĕmejĕc 1963
 Order: **Equisetales** Trevisan 1907
 Family: **Equisetaceae** Richard & De Candolle 1805
 Genus: **Neocalamites** (Halle 1908) emend. Harris 1961
Neocalamites sp. cf. **N. carcinoides** Harris 1931 (Figs. 4a-c)
- 1931 *Neocalamites carcinoides* Harris, p. 25, pl. 4, figs. 2,3,5-7; pl. 5, figs. 1-5; pl. 6, figs. 1-6; text-fig. 5 A-D.

به این گونه نمی‌باشد. در نمونه بیان شده براساس تصویر، پهنای ساقه ۲/۵ و فاصله میان‌گره هفت سانتی‌متر است ولی همان‌طور که در بالا به آن اشاره شد پهنای ساقه در این گونه حداقل شش و طول میان‌گره حداقل ۱۰ سانتی‌متر می‌باشد.

سن: انتشار چینه‌شناسی این گونه در سراسر دنیا، نورین تا لیاس می‌باشد به طوری که اغلب، از تریاس پسین گزارش شده است.

Class **Filicopsida** Pichi-Sermolli 1958
Order **Filicales** Engler & Prantl 1902
Family **Dipteridaceae** Seward & Dale 1901
Genus **Dictyophyllum** Lindley & Hutton 1834
Dictyophyllum sp. cf. D. exile (Brauns 1862)
Nathorst 1878
(Figs. 4d,e)

1862 *Camptopteris exilis* Brauns, p. 54, pl. 13, figs. 11 a-c.

1878 *Dictyophyllum exile*; **Nathorst**, p. 39, pl. 5, fig. 7.

1977 *Dictyophyllum exile*; Fakhr, p. 72, pl. 20, figs. 2-5; text-fig. 6E.

2002 *Dictyophyllum exile*; Vaez-Javadi & Ghavidel-Syooki, p. 60, pl. 3, fig. 2.

2009 *Dictyophyllum exile*; **Schweitzer et al.**, p. 41, pl. 10, figs. 1-3; text-fig. 7.

2012 *Dictyophyllum exile*; Vaez-Javadi, p. 118, pl. 1, fig. 3; text-fig. 4, fig. 3 (In Persian).

2015 *Dictyophyllum exile*; Vaez-Javadi & Parvasideh, p. 62, pl. 1, fig. 8, (In Persian).

توصیف: نمونه‌ها همگی شامل پن‌های پراکنده، راشیس پن ۱/۷ میلی‌متر و حاوی دو سری خطوط عرضی و طولی، پن‌ها راست و مستقیم، پهنای پن ۳۵ میلی‌متر، بریدگی پن‌ها کم عمق و شامل یک پنجم طول پینول، طول پینول‌ها در حدود ۱۷ میلی‌متر، رگبرگ اصلی پینول‌ها به‌طور عمود از راشیس پن خارج شده و کم و بیش تا سه چهارم طول پهنک به‌طور افقی و در یک چهارم انتهایی به سمت بالا تا رأس پینول خمیده می‌شوند. رأس پینول‌ها گرد تا نوک ساییده، سینوس بین پینول‌ها نوک ساییده، رگبرگ‌های

توصیف: طول ساقه حفظ شده ۱۴/۵ سانتی‌متر و پهنای ۴/۸ سانتی‌متر، تنها یک بند در کل ساقه حفظ شده، طول میان‌گره حداقل ۱۱ سانتی‌متر، سراسر بدنه حاوی شیارها و برجستگی‌های ظریف و به‌طور کامل مشخص و به موازات هم، در دو طرف بند برخی از شیارها در امتداد هم و برخی به‌طور متناوب، بدون آثار برگ در سراسر بند، در زیر بند حاوی تعداد پنج عدد برآمدگی^۱ با حفظ شدگی ضعیف و ابعاد متفاوت با ۳-۴ میلی‌متر قطر، تراکم شیارها ۱۱-۱۵ عدد در هر سانتی‌متر.

مقایسه: گونه *Neocalamites carcinoides* را می‌توان با گونه *Neocalamites hoerensis* (Schimper, 1869) Halle, 1908 در گونه *Neocalamites carcinoides* در ساقه اصلی طول میان‌گره حداکثر ۲۲ سانتی‌متر و حداقل ۱۰ سانتی‌متر، پهنای ساقه حداکثر ۱۰ سانتی‌متر و حداقل شش سانتی‌متر و تعداد شیارها در قالب داخلی ۱۲۰-۲۴۰ عدد در سراسر پهنای ساقه، اثر برگ‌ها توسط سه تا پنج شیار از هم جدا شده، انشعاب شاخه‌های فرعی از ساقه اصلی به‌طور منظم، پهنای برگ‌ها در بخش میانی دو تا چهار میلی‌متر و به هر دو سمت به تدریج باریک شونده، سطح برگ‌ها حاوی خطوط ظریف عرضی است ولی در گونه *Neocalamites hoerensis* در ساقه اصلی طول میان‌گره ۱۲ سانتی‌متر و پهنای ساقه پنج سانتی‌متر (ولی معمولاً کوچک‌تر) و تعداد شیارها در قالب داخلی ۱۰۰-۶۰ عدد در سراسر پهنای ساقه، اثر برگ‌ها توسط دو تا چهار شیار از هم جدا شده، انشعاب شاخه‌های فرعی از ساقه اصلی به‌طور نامنظم، پهنای برگ‌ها در نزدیک ساقه حداکثر به ۱-۲/۵ میلی‌متر رسیده و سپس کناره‌ها تا نزدیک رأس موازی می‌باشند و سطح برگ‌ها حاوی خطوط به نسبت ضخیم عرضی می‌باشد (Harris, 1931).

انتشار جغرافیایی در ایران: در ایران تاکنون تنها یک نمونه تحت عنوان *Neocalamites carcinoides* از رسوباتی با سن رتین-دوگر مربوط به گروه شمشک در منطقه امامزاده هاشم توسط فرهی‌منش و همکاران (۱۳۸۷) معرفی شده که باتوجه به تفاوت زیاد بین توصیف متن و تصویر ارائه شده از این نمونه و موارد زیر این نمونه به‌طور حتم مربوط

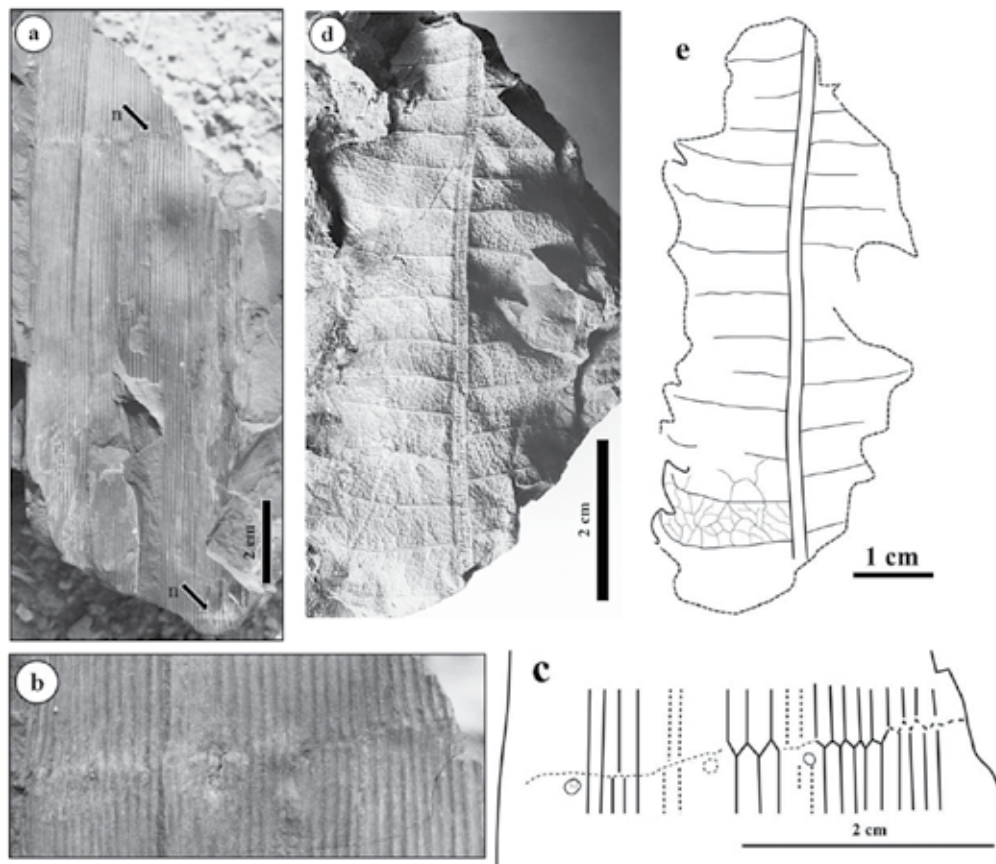
(Vaez-Javadi and Ghavidel- Jajarm, et al., 2009) (Syooki, 2002)، البرز مرکزی (بدون ذکر ناحیه) (Schweitzer et al., 2009) و معدن زغال سنگ تخت (شرق مینودشت) (واعظ جوادی و پرواسیده، ۱۳۹۳) و حوضه طبس شامل گستره پروده (واعظ جوادی، ۱۳۹۱) گزارش شده است. همچنین این گونه تحت عنوان *Dictyophyllum cf. exile* از معدن یورت شرقی در آژادشهر (واعظ جوادی، ۱۳۹۵) گزارش شده است.

سن: این گونه تاکنون از رسوبات تریاس پسین (Fakhr, 1977)، رتین- (Vaez-Javadi and Ghavidel- 2002)، Syooki (2002)، واعظ جوادی، ۱۳۹۱ و واعظ جوادی و پرواسیده، ۱۳۹۳) ورتین پسین (Schweitzer et al., 2009) گزارش شده است. Schweitzer و همکاران (۲۰۰۹) معتقدند که رسوبات دربردارنده این گونه در ایران تاکنون رتین پسین می باشد. انتشار چینه شناسی این گونه در سایر نقاط دنیا، نورین تا قاعده لیا س می باشد.

جانبی تشکیل شبکه های نامنظم و چند وجهی داده، بدون اندام زایا در پهنک.

مقایسه: از گونه های قابل قیاس با این گونه می توان به گونه *Dictyophyllum nathorstii* Zeiller 1903 اشاره کرد. در گونه *Dictyophyllum exile* طول راشی س های حامل پن ۲۰ سانتی متر، تعداد پن ها در هر یک از راشی س ها ۲۵ عدد، پهنای پن در بخش میانی راشی س سه سانتی متر و میزان بریدگی پهنک کمتر یا مساوی یک سوم عرض پهنک است ولی در گونه *Dictyophyllum nathorstii* طول راشی س های حامل پن هشت تا دوازده سانتی متر، تعداد پن ها در هر یک از راشی س ها ۲۰-۲۵ عدد، پهنای پن در بخش میانی راشی س سه تا چهار سانتی متر و میزان بریدگی پهنک بیشتر از یک سوم و کمتر از دو سوم عرض پهنک می باشد.

انتشار جغرافیایی در ایران: این گونه تاکنون از دو حوضه البرز شامل آبیگ (Fakhr, 1977; Schweitzer



شکل ۴. (a) *Neocalamites* sp. cf. *N. carcinoides* (n: محل بندها، (b) نمایی نزدیک از بند بالایی، (c) رسم بند بالایی، *Dictyophyllum* sp. cf. *D. exile* (e) رسم (d)؛ (f) نقشه پراکنش فسیل ها در ایران

ساییده، خروج رگبرگ میانی پینول‌ها از راشیس با زاویه ۶۰ درجه و تا انتهای پینول ادامه دارد، طول پینول‌ها ۵۵ میلی‌متر، رگبرگ میانی یا اصلی (I) کمی به سمت بالا خمیده، رگبرگ‌های جانبی (II) به‌طور کامل مشخص و عمود بر رگبرگ اصلی و تشکیل شبکه‌های منظم مستطیلی، ضلع کوچک مستطیل‌ها شامل رگبرگ‌های اصلی، ابعاد این مستطیل‌ها ۵×۶ میلی‌متر، این شبکه‌های مستطیلی توسط رگبرگ‌های فرعی‌تر (III) به چهار مستطیل و در نهایت شبکه‌های مستطیلی نهایی توسط رگبرگ‌های فرعی‌تر (IV) و ظریف‌تر به شبکه‌های نامنظم و بسیار ظریفی تقسیم می‌شود. پینول‌ها فرتیل، اسپورانژها پراکنده در سطح پهنک، اسپورانژها کروی با قطر ۰/۵ میلی‌متر.

مقایسه: گونه *Clathropteris meniscoides* را می‌توان با گونه *Clathropteris obovata* Oishi 1932, emend. Harris, 1961 مقایسه کرد. شکل کلی پن در گونه *Clathropteris meniscoides* خطی-سرنیزه‌ای ولی در گونه *Clathropteris obovata* تخم‌مرغی معکوس بوده، در گونه *Clathropteris meniscoides* نسبت طول پن به عرض بیشتر و بریدگی کناره پهنک پن‌ها کمتر و شبکه‌ها منظم‌تر و مشخص‌تر می‌باشند. همچنین در گونه *Clathropteris obovata* کناره پینول‌ها لوبه می‌باشد و این حالت در گونه *Clathropteris meniscoides* دیده نمی‌شود.

انتشار جغرافیایی در ایران: این گونه تاکنون از دو حوضه البرز شامل زیراب (Kilpper, 1964)، نج (Assereto et al., 1968)، طوزه (Sadovnikov, 1976)، شمشک (Fakhr, 1977)، شمال شرق شاهرود (Corsin and Stampfli, 1977)، آبیگ و واسک‌گاه (Sadovnikov, 1983)، جاجرم (Vaez - Javadi and Ghavidel-Syooki, 2002) و معدن زغال‌سنگ تخت (شرق مینودشت) (واعظ جوادی و پرواسیده، ۱۳۹۳)، از حوضه طبس شامل معادن زغال‌سنگ پروده (Vaez-Javadi, 2014)، از حوضه کرمان شامل معادن زغال‌سنگ کرمان (بدون ذکر نام منطقه) (Poliansky et al., 1975)، داربیدخون و دهرود (Schweitzer et al., 2009) و از شمال شرق اصفهان (چاهریسه) (منانی و همکاران، ۱۳۹۹) گزارش شده است.

Genus *Clathropteris* Brongniart 1828

***Clathropteris meniscoides* (Brongniart, 1825)
Brongniart 1828
(Figs. 5a,b)**

- 1825 *Filicites meniscoides* Brongniart, p. 218, pl. 11.
1828 *Clathropteris meniscoides*; Brongniart, p. 62, 187.
1964 *Clathropteris meniscoides*; Kilpper, p. 37; text-figs. 15,16.
1968 *Clathropteris meniscoides*; Assereto et al., table 1a.
1975 *Clathropteris meniscoides*; Poliansky et al., p. 1-3,7,11.
1976 *Clathropteris meniscoides*; Bragin et al., p. 11, pls. 7-9.
1976 *Clathropteris meniscoides*; Sadovnikov, p. 79, pl. 2, fig. 8.
1977 *Clathropteris meniscoides*; Sadovnikov, p. 146.
1977 *Clathropteris meniscoides*; Fakhr, p. 75, pl. 22, figs. 1-3; text-fig. 8G.
1977 *Clathropteris meniscoides*; Corsin & Stampfli, p. 523, pl. 1, figs. 3-9.
1978 *Clathropteris meniscoides*; Schweitzer, p. 20.
1980 *Clathropteris meniscoides*; Sadovnikov, p. 86.
1983 *Clathropteris meniscoides*; Sadovnikov, p. 13, figs. 5,6.
2002 *Clathropteris meniscoides*; Vaez-Javadi & Ghavidel-Syooki, p. 60, pl. 2, fig. 2.
2009 *Clathropteris meniscoides*; Schweitzer et al., p. 54, pl. 21, fig. 2; pl. 22. Figs. 1-3; pl. 23, fig. 1; text-fig. 16 & 17.
2014 *Clathropteris meniscoides*; Vaez-Javadi, p. 32, pl. 4, fig. 1.
2015 *Clathropteris meniscoides*; Vaez-Javadi & Parvasideh, p. 62, pl. 1, fig. 3 (In Persian).
2020/2021 *Clathropteris meniscoides*; Mannani et al., p. 232, Figs. 6A-6F (In Persian).

توصیف: نمونه یافت شده شامل بخشی از یک پن، راشیس پن ظریف، ضخامت یک میلی‌متر و حاوی خطوط طولی ظریف، پهنای پن ۸۰ میلی‌متر، کناره‌های پن حاوی بریدگی‌های کم عمق، رأس لوب‌ها (پینول‌ها) گرد تا نوک

همچنین این گونه بدون ذکر گستره و تنها به صورت اشاره در لیست در برخی مطالعات (Bragin et al., 1976; Sadovnikov, 1977 and 1980; Schweitzer, 1978) گزارش شده است.
سن: این گونه در ایران از رسوبات تریاس پسین (Fakhr, 1977; Sadovnikov, 1976; Kilpper, 1964; Sadovnikov, 1976) رتین (1977 and 1983; Vaez-Javadi & Ghavidel-Syooki, 2002; همکاران، ۱۳۹۹)، تریاس پسین-لیاس پیشین (Poliansky) (et al., 1975; Corsin and Stampfli, 1977) و لیاس پیشین (Assereto et al., 1968) گزارش شده است.
Schweitzer و همکاران (۲۰۰۹) معتقدند که سن این گونه در ایران نورین پسین-رتین پسین است. انتشار چینه‌شناسی این گونه در سراسر دنیا کارنین-لیاس پیشین می‌باشد.

همچنین این گونه بدون ذکر گستره و تنها به صورت اشاره در لیست در برخی مطالعات (Bragin et al., 1976; Sadovnikov, 1977 and 1980; Schweitzer, 1978) گزارش شده است.
سن: این گونه در ایران از رسوبات تریاس پسین (Fakhr, 1977; Sadovnikov, 1976; Kilpper, 1964; Sadovnikov, 1976) رتین (1977 and 1983; Vaez-Javadi & Ghavidel-Syooki, 2002;



شکل ۵. (a) *Clathropteris meniscoides*، (b) رسم *Clathropteris meniscoides*

تخم‌مرغی به‌طور اریب در زیر و دو طرف bract و متصل به پدونکول با ابعاد $۰/۵ \times ۱/۵$ میلی‌متر.

مقایسه: گونه *Cycadocarpidium erdmani* با برخی از گونه‌های این جنس قابل قیاس می‌باشد و در جدول زیر به آن اشاره شده است.

انتشار جغرافیایی در ایران: این گونه تاکنون تنها از حوضه البرز شامل شمشک (Fakhr, 1977) و دره آپون در جنوب زیراب (Schweitzer and Kirchner, 1996) گزارش شده است.

سن: این گونه در ایران تاکنون از رسوبات تریاس پسین (Fakhr, 1977) و نورین (Schweitzer and Kirchner, 1996) گزارش شده است. شویتزر و کرچنر (Schweitzer and Kirchner, 1996) معتقدند رسوبات مورد مطالعه توسط فخر (Fakhr, 1977) احتمالاً سن نورین داشته است.

Division Gymnospermyphyta
Class Pinopsida Meyan 1984
Order Pinales Meyan 1984
Family Voltziaceae Florin 1951
Genus *Cycadocarpidium* Nathorst 1886
***Cycadocarpidium erdmani* Nathorst 1886**
(Figs. 6a,b)

1886 *Cycadocarpidium erdmani* Nathorst, p. 91, pl. 26, figs. 15-20.

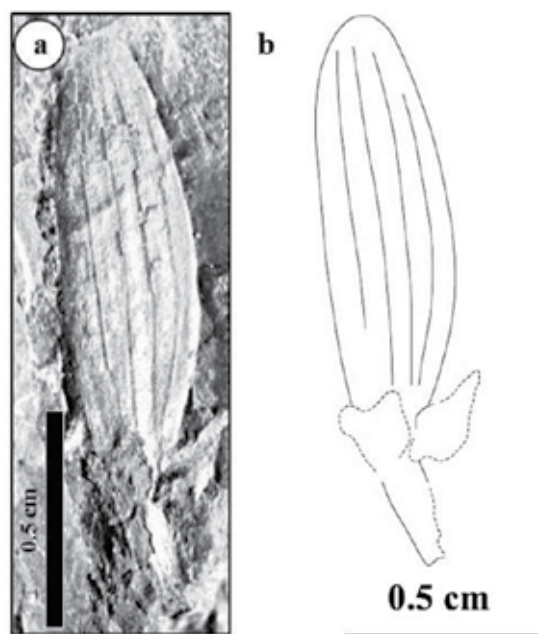
1977 *Cycadocarpidium erdmani*; Fakhr, p. 146, pl. 50, figs. 7,8.

1996 *Cycadocarpidium erdmani*; Schweitzer & Kirchner, p. 97, pl. 2, fig. 7; pl. 3, figs. 2-5; Text-fig. 7.

توصیف: نمونه (اندام زایا) شامل یک bract بیضوی کشیده و منفصل با ابعاد ۳×۱۰ میلی‌متر، رأس آن به‌طور کامل گرد، حاوی شش رگبرگ، حاوی یک پدونکول با ضخامت یک میلی‌متر و دو اوول کم و بیش نزدیک به

جدول ۲. مقایسه گونه *Cycadocarpidium erdmani* با چند گونه از این جنس در تریاس پسین. (اقتباس از Kimura and Ohana, 2000) (C: Carnian, N: Norian, R: Rhaetian, L: Lias)

	Bract Scale			Seed Scale Complex		Age
	Form	Size L/W (mm)	Veins	Seeds		
				Size L/W (mm)	Number	
<i>C. erdmani</i> Nathorst 1886	ovate	۷/۵-۱۰/۵ × ۳-۳/۲	۴-۶	۳ × ۲	۲	N-R
<i>C. redivivum</i> Nathorst 1911	small ovate	۵ × ۲	۴	small	۲	R
<i>C. minor</i> Turtanova-Ketova 1931	lanceolate	۴-۱۰ × ۳-۴	۴	small	۲	N-L
<i>C. parvum</i> Kryshtofovich & Prynada 1932	elongate ovate	۸-۱۹ × ۴-۶/۵	۴-۶	middle	۲	N
<i>C. ferganiensis</i> Turtanova-Ketova 1950	elongate ovate	۱۵-۲۲ × ۳-۷	۴-۶	۲ × ۱	۲	N-L
<i>C. naitoi</i> Kon'no 1961	elliptic	۱۵-۱۷ × ۳/۶-۴	۴	۲/۱-۳/۳ × ۰/۸-۱/۸	۳	C-N
<i>C. osawae</i> Kon'no 1961	ovate-short lanceolate	۱۴/۵-۱۸/۵ × ۴/۶	۴	۱/۶-۲/۳ × ۱/۲-۱/۳	۳	C-N
<i>C. tricarpum</i> Prynada 1978	ovate-lanceolate	۱۵-۱۸ × ۳/۵-۵	۵-۶	۲-۲/۵ × ۱-۱/۵	۳	C-R



شکل ۶. (a) *Cycadocarpidium erdmani*، (b) رسم *Cycadocarpidium erdmani*

نتیجه‌گیری

۱. چهار گونه ماکروفسیل گیاهی در ناحیه میان‌لات-بامسی (گستره زغال‌دار رامسر) شناسایی شد و براساس گونه‌های *Neocalamites* sp. cf. *N. carsinoides*، *Dictyophyllum* sp. cf. *D. exile*، *Clathropteris* و *Cycadocarpidium erdmani* و *eris meniscoides* سن طبقات مورد مطالعه نورین-رتین و با توجه به موقعیت چینه‌ای رسوبات به‌طوری‌که برش مورد مطالعه

۲. به‌طورحتم مربوط به سازند لله‌بند می‌باشد بنابراین سن توالی رسوبات مطالعه شده نورین پسین-رتین پیشین در نظر گرفته می‌شود.

۳. در این مطالعه جنس *Cycadocarpidium* از ناحیه زغال‌دار البرز غربی و دو جنس *Neocalamites* و *Clathropteris* از حوضه زغال‌دار رامسر (نیدشت و اکراسر) برای نخستین بار گزارش می‌شوند.

۴. *Cycadocarpidium erdmani* با چند گونه از این جنس در تریاس پسین. (اقتباس از Kimura and Ohana, 2000) (C: Carnian, N: Norian, R: Rhaetian, L: Lias)

سپاسگزاری

از آقای دکتر محمد صادق فخر از دانشگاه تهران برای رهنمودهای ارزنده و همیشگی شان، از آقای فریبرز جوربنیان که در عملیات صحرایی و جمع‌آوری نمونه‌ها همراه و کمک اینجانب بودند و از آقای دکتر حسین کامیابی شادان و خانم مهندس سعیده رضایی هر دو از مدیریت اکتشاف تشکر و قدردانی می‌نمایم.

منابع

- آقانباتی، ع.، ۱۳۸۸. فرهنگ چینه‌شناسی ایران (جلد سوم-تریاس). سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۷۲۷.
- آقانباتی، ع.، ۱۳۷۷. چینه‌شناسی ژوراسیک ایران-۱. سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۳۵۵.
- بهار فیروزی، خ.، ندیم، ه. و شافعی، ع.ر.، ۱۳۸۰. نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ رامسر، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- سعادت نژاد، ج.، ۱۳۹۵. ماکروفسیل‌های گیاهی سازند کلاریز (رتین) از معادن زغال‌سنگ کناررود (جنوب باختری چابکسر)، تعیین سن و مقایسه آن‌ها با سایر مناطق در حوضه‌ی زغال‌خیز البرز غربی. دو فصلنامه‌ی دیرینه‌شناسی، ۴ (۲): ۱۸۹-۲۰۸.
- سعادت نژاد، ج.، ۱۳۸۴. معرفی چهار گونه از ماکروفسیل‌های گیاهی گروه بازدانگان (سیکادوفیت‌ها و ژینکوفیت‌ها) برای نخستین بار از ایران. فصلنامه‌ی علوم زمین، ۵۷: ۱۳۳-۱۲۸.
- عبداللهی، ه.، ۱۳۹۱. اطلس راه‌های ایران. سپهر اندیشه، ۶۴.
- فرهی منش، م.، خسرو تهرانی، خ. و زواره‌ای، ا.، ۱۳۸۷. معرفی تعدادی از ماکروفسیل‌های گروه شمشک در منطقه‌ی امامزاده هاشم. فصلنامه‌ی زمین‌شناسی کاربردی، ۴ (۳): ۱۸۸-۱۹۳.
- معین السادات، س. ح. و زاده کبیر، ا.، ۱۳۷۰. زمین‌شناسی و رسوبات ذغالدار ایران (جلد اول-البرز). وزارت معادن و فلزات، شرکت ملی فولاد ایران، منتشر شده، ۵۶۶.
- معین السادات، س. ح. و رضوی ارمغانی، م.ب.، ۱۳۷۲. زمین‌شناسی ایران (جلد هفتم-زغالسنگ). سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۲۸۶.
- منانی، م.، سعادت نژاد، ج. و علامه، م.، ۱۳۹۹. ماکروفسیل‌های گیاهی سازند نایبند (تریاس پسین)، شمال شرق اصفهان، ایران مرکزی. رخساره‌های رسوبی، ۱۳ (۲): ۲۳۸-۲۲۶.
- واسیلیف، ا. و.، ۱۳۶۳ (۱۹۸۴). فسیل‌های مزوزوئیک مناطق ذغالدار ایران، جلد اول، قسمت دوم، آلبوم عکس‌ها و اشکال فسیل‌های گیاهی. ترجمه: مهدیان، ج.، شرکت ملی فولاد ایران، منتشر نشده، ۹۷، ۴۷ آلبوم.
- واعظ جوادی، ف.، ۱۳۹۵. ماکروفسیل‌های گیاهی سازند کلاریز معدن یورت شرقی، آزادشهر و تطابق آن با دیگر افاق‌های گیاهی ایران و جهان. فصلنامه‌ی علوم زمین، ۹۹: ۱۱۰-۹۵.
- واعظ جوادی، ف.، ۱۳۹۱. بیوستراتیگرافی سازند نایبند در منطقه معادن زغال‌سنگ پروده طبس بر مبنای ماکروفسیل‌های گیاهی. فصلنامه‌ی پژوهش‌های چینه‌نگاری و رسوب‌شناسی، ۴۶ (۱): ۱۴۳-۱۱۳.
- واعظ جوادی، ف. و پرواسیده، ا.، ۱۳۹۳. ماکروفسیل‌های گیاهی معدن تخت مینودشت، تعیین سن و بررسی فراوانی نسبی و اندکس سورنسون فلور آن و مقایسه با سایر فلوریزون‌های ایران و اوراسیا. فصلنامه‌ی پژوهش‌های چینه‌نگاری و رسوب‌شناسی، ۵۷ (۴): ۸۶-۵۹.
- Assereto, R., Barnard, P.D.W. and Fantini-Sestini, N., 1968. Jurassic Stratigraphy of the Central Elburz. *Rivista Italiana di Paleontologia e Stratigrafia*, 74(1): 3-21.
- Benton, M.J., 1993. *The Fossil Record*. Chapman and Hall, London, 846.
- Bragin, Y., Jahanbakhsh, F., Golubev, S. and Sadovnikov, G., 1976. Stratigraphy of the Triassic-Jurassic Coalbearing Deposits of Alborz. National Iranian Steel Company, 51 p. (unpublished)
- Brauns, D., 1862. Der Sandstein bei Seinstedt unweit des Fallsteins und die In ihm vorkommenden Pflanzenreste. *Palaeontographica*, 9 (2): 47-62. (In Germany)

- Brongniart, A., 1825. Observations sur les végétaux fossils renfermés dans les grès de Hoer en Scanie. *Annales des Sciences Naturelles*, 4: 200-219. (In French)
- Brongniart, A., 1828. *Prodrome d'une histoire des végétaux fossiles*. *Dictionnaire Sciences Naturelles*, 56: 16-212. (In French)
- Corsin, P. and Stampfli, G., 1977. La formation de Shemshak dans l'Elburz oriental (Iran): flore-stratigraphie-paleogeographie. *Geobios*, 10: 509-571. (In French)
- Fakhr, M.S., 1977. Contribution a l'étude de la flore Rheto-Liasique de la formation de Shemshak de l'Elburz (Iran). *Memoire de Section de Science*. 5, 178.
- Fürsich, F.T., Wilmsen, M., Seyed-Emami, K. & Majidifard, M.R., 2009. Lithostratigraphy of the Upper Triassic Middle Jurassic Shemshak Group of Northern Iran. *Geological Society, Special Publications*, 312: 129-160.
- Harris, T.M., 1961. The Yorkshire Jurassic Flora, I. Thalophyta and Pteridophyta, *British Museum Natural History*, London, 212.
- Harris, T.M., 1931. The Fossil Flora of Scoresby Sound, I. Cryptogams (exclusive of Lycopodiales), *Meddeleleser om Grønland*, Kopenhagen, 104.
- Kilpper, K., 1964. Über eine Rat-Lias Flora aus dem nordlichen Abfall des Alburz Gebriges in Nord Iran, I: Bryophyta-Pteridophyta. *Palaeontographica*, B., 114 (1-3), 1-78. (In Germany)
- Kimura, T. and Ohana, T., 2000. A unique Cycadocarpidium from the Upper Triassic Nariwa Group, West Japan. *Bulleton Kitakyushu Museum Natural History*, 19: 111-116.
- Nathorst, A.G., 1886. Om floren i Skanes kolförande Bildningar. I. Floren vid Bjuf. Första Häftet. *Sverige Geology Understanding*, 85: 95-131. (In Germany)
- Nathorst, A.G., 1878. Om floren Skanes kolförande Bildningar. I. Floren vid Bjuf. *Sverige Geology Understanding*, 27: 1-52. (In Germany)
- Poliansky, B.Y., Sikstel, T.A. and Safronov, D.S., 1975. Stratigraphy of Triassic and Jurassic Deposites of Kerman Region. *Polad Iran*, 5: 1-10.
- Repin, J., 1978. Stratigraphy and Paleogeography of Coal-bearing Sediments of Iran. *National Iranian Steel Company*, 326. (unpublished)
- Sadovnikov, G.N., 1991. Upper Triassic Gymnosperms from Northern Iran. *Paleontological Journal*, 25 (4): 123-137.
- Sadovnikov, G.N., 1989. Taeniopteris, Nilssoniopteris and Nilssonia in the Late Triassic Flora of Iran. *Paleontological Journal*, 23 (3): 95-100.
- Sadovnikov, G., 1983. Flora of the Elburz Mesozoic Coalbearing Formation. III. Geshlagh-Flora. Atlas. 46 pl., Moskow. (in Russian).
- Sadovnikov, G., 1980. Flora of the Elburz Mesozoic Coalbearing Formation. *Proceeding of the USSR Akademy Nauk.*, 9: 82-96; (in Russian).
- Sadovnikov, G.N., 1977. The floral assemblages of the Mesozoic of Northern Iran. *Bulleton MOIP, otd. Geology*, 52, 2: 146.
- Sadovnikov, G., 1976. The Mesozoic flora of Alborz and Central Iran and its stratigraphic importance. *National Iranian Steel Company*, 118, 13 table. (unpublished).
- Schweitzer, H.J., 1978. Die rhäto-jurassischen Floren des Iran und Afghanistans: 5. *Todites princeps*. *Thumatopteris brauniana* und *Phlebopteris polypodioides*. *Palaeontographica*, B., 168 (1-3): 17-60. (In Germany)
- Schweitzer, H.J. and Kirchner, M., 2003. Die rhäto-jurassischen Floren des Iran und Afghanistans. 13. *Cycadophyta*. III. *Bennettitales*. *Palaeontographica*, B., 264 (1-6): 1-166. (In Germany)
- Schweitzer, H.J. and Kirchner, M., 1998. Die rhäto-jurassischen Floren des Iran und Af-

- ghanistans. 11. Pteridospermophyta und Cycadophyta I. Cycadales. *Palaeontographica*, B., 248 (1-3): 1-85. (In Germany)
- Schweitzer, H.J. and Kirchner, M., 1996. Die rhaeto-jurassischen Floren des Iran und Afghanistans. 9. Coniferophyta. *Palaeontographica*, B., 238 (4-6): 77-139. (In Germany)
 - Schweitzer, H.J., Schweitzer, U., Kirchner, M., Van Konijnenburg-Van Cittert, J.H.A., Van der Burg, J. and Ashraf, R.A., 2009. The Rhaeto-Jurassic flora of Iran and Afghanistan. 14. Pterophyta-Leptosporangiatae. *Palaeontographica*, B., 279: 1-108.
 - Vaez-Javadi, F., 2014. Triassic and Jurassic Floras and Climate of Central-East Iran. Geological Survey of Iran, Rahi Publ., 254 p.
 - Vaez-Javadi, F. and Ghavidel-Syooki, M., 2002. Plant megafossil remains from Shemshak Formation of Jajarm area, NE Alborz, Iran. *Palaeobotanist*, 51: 57-72.

ویژگی‌های کانی‌شناسی، شیمی کانی‌ها و میانبارهای سیال کانسار اسکارن آهن معدن جو، ناحیه معدنی سنگان، شمال شرق ایران

مریم فتوت جامی^۱ و مسعود علی پوراصل^{۲*}

۱. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه پترولوژی و زمین‌شناسی اقتصادی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه

صنعتی شاهرود

۲. دانشیار گروه پترولوژی و زمین‌شناسی اقتصادی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۹/۲۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۲/۲۴

چکیده

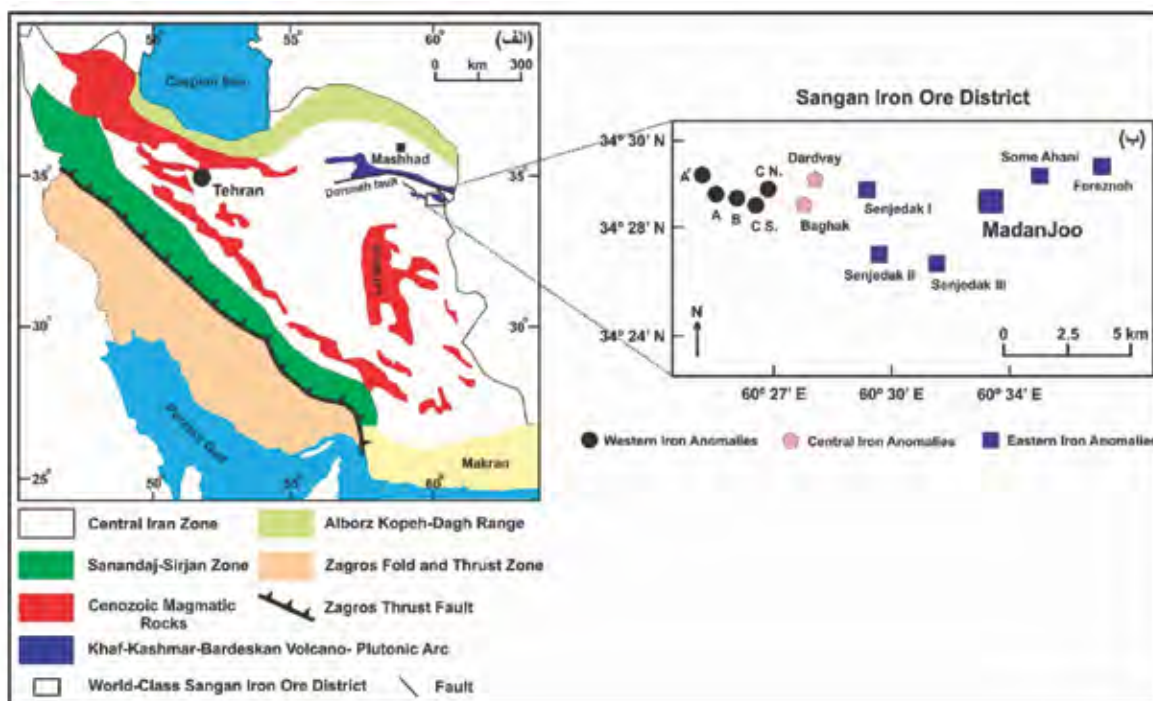
گستره آهن معدن جو، از آنومالی‌های شرقی مجموعه‌ی کانسارهای سنگ آهن در ناحیه‌ی معدنی سنگان است. این پهنه در انتهای بخش شرقی کمان آتشفشانی-نفوذی سنوزوئیک البرز واقع است. زمین‌شناسی پهنه شامل ماسه‌سنگ شیلی، مادستون آهکی و ماسه‌سنگ‌های ژوراسیک، سنگ‌آهک میکرواسپارایتی تا اسپارایتی و سنگ‌آهک دولومیتی کرتاسه بالایی توالی‌های توفی و گدازه‌ای ائوسن بالایی و سنگ‌های اسکارنی ائوسن میان‌رسوبات کواترنری است. مهم‌ترین رخداد در پهنه معدن جو نفوذ سیال‌های آهن‌دار در سازندهای تخریبی و کربناتی، اسکارن‌زایی و کانه‌زایی آهن است و با وجود منیتیت و کانی‌های کالک‌سیلیکاتی مشخص می‌شود. مناطق اسکارن بر اساس نوع و فراوانی کالک‌سیلیکات‌ها شامل الیون-پیروکسن-گارت اسکارن، گارت-پیروکسن اسکارن، گارت اسکارن، پیروکسن-ولاستونیت-منیتیت اسکارن، منیتیت اسکارن، فلوگوپیت اسکارن، ترمولیت-اکتینولیت اسکارن و ایدوت اسکارن است. کانه‌زایی آهن به صورت توده‌ای، نواری، رگه-رگچه‌ای، برش‌یو دانه‌پراکنده بیشتر در سنگ‌آهک و دولومیت کرتاسه بالایی و در امتداد گستره گسلی با روند شمال شرق-جنوب غرب رخ داده است. منیتیت کانه اصلی است و با پیریت، کالکوپیریت، پیروتیتو کانی‌های ثانویه آهن همراهی می‌شود. ترکیب گارت‌های معدن جو از نوع آندرادیت-گروسولار (بیشتر آندرادیت)، پیروکسن‌ها از نوع دیوپسید-هدنبرگیت (بیشتر دیوپسید) و الیون‌ها از نوع فورستریت است. مطالعه دما-فشارسنجی بر اساس شیمی پیروکسن، دمای تبلور پیروکسن‌های پهنه را بین ۴۵۸ تا ۶۸۹ درجه سانتی‌گراد، فشار ۲/۲۱ کیلو بار و عمق تبلور از یک تا ۲/۵ کیلومتر مشخص می‌کند. مطالعه میانبارهای سیال سه مرحله پاراژنتیک اصلی را در تشکیل اسکارن و نهشت مواد معدنی، در کانسار معدن جو مشخص می‌کند: (۱) مرحله پیش‌رونده با تشکیل پیروکسن و گارت‌های پیش‌رونده در دمای ۳۳۰ تا ۴۱۰ درجه سانتی‌گراد با شوری سیال بین ۳۳ تا ۵۸ درصد وزنی معادل نمک NaCl، (۲) مرحله پس‌رونده با پیدایش گارت‌های تاخیری، ترمولیت-اکتینولیت و کلسیت مرحله تاخیری در دمای ۱۲۰ تا ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد با شوری سیال ۱۶ تا ۴۹ درصد وزنی معادل NaCl و (۳) مرحله پس از کانه‌زایی با رگه‌های کلسیت و بندرت کوارتز که در دمای ۹۵ تا ۱۹۰ درجه سانتی‌گراد با دامنه شوری ۲ تا ۱۵ درصد وزنی معادل NaCl بوجود آمده است. آمیختگی سیال‌ها، جوشش، رقیق‌شدگی با آب‌های جوی و کاهش دما مکانیسم احتمالی برای تشکیل کانسنگ‌های آهن می‌باشد. در نهایت، کانه‌زایی آهن معدن جو بعنوان کانسار آهن آگرواسکارن منیزیمی معرفی می‌شود.

واژه‌های کلیدی: اسکارن آهن منیزیمی، ژئوشیمی، کانی‌شناسی، معدن جو، میانبار سیال، ناحیه معدنی سنگان.

مقدمه

را شامل می‌شود (گل محمدی و همکاران، ۱۳۹۳). در بخش غربی ۵ کانسار به نام‌های A, B, A', C شمالی و C جنوبی، در بخش مرکزی ۲ کانسار دردوی و باغک و در بخش شرقی ۶ کانسار سنجدک I، سنجدک II، سنجدک III، معدن جو، سم آهنی و فرزانه جای دارند (شکل ۱-ب). در این پژوهش، نمونه‌های سنگ و کانسنگ از رخنمون‌ها و مغزه‌های حفاری برداشت شده است و هدف از پژوهش تهیه نقشه زمین‌شناسی ۱/۵۰۰۰ و تفکیک واحدهای سنگ‌شناسی و پهنه‌های اسکارنی، کانی‌شناسی مناطق اسکارن، شیمی کانی‌های شاخص اسکارن، میانبار سیال و ژنز کانه‌زایی است.

مجتمع معادن سنگان در ۳۰۰ کیلومتری جنوب‌شرق مشهد، ۲۰ کیلومتری شهر سنگان در استان خراسان رضوی و در کمربند آتشفشانی-نفوذی خواف-کاشمر-بردسکن قرار دارد (شکل ۱-الف). مجموعه‌ی معادن سنگان با ذخیره‌ی بیش از یک میلیارد تن و عیار متوسط ۵۴ درصد اکسید آهن از بزرگترین معادن سنگ آهن ایران و خاورمیانه می‌باشد (Golmohammadi et al., 2015). مجموعه‌ی کانسارهای آهن سنگان در گستره‌ای غربی-شرقی به طول ۲۶ کیلومتر قرار دارند. این گستره به سه بخش غربی، مرکزی و شرقی تقسیم شده است و هر بخش به نوبه‌ی خود چند کانسار



شکل ۱. الف) موقعیت ناحیه معدنی سنگ آهن‌های سنگان در شمال شرق ایران (با تغییر از Stöcklin, 1968)، ب) موقعیت کانسارهای سه‌گانه آهن (آنومالی‌های غربی، مرکزی و شرقی) در ناحیه معدنی سنگان و پهنه اکتشافی معدن جو (با تغییر از گل محمدی و همکاران، ۱۳۹۳)

روش مطالعه

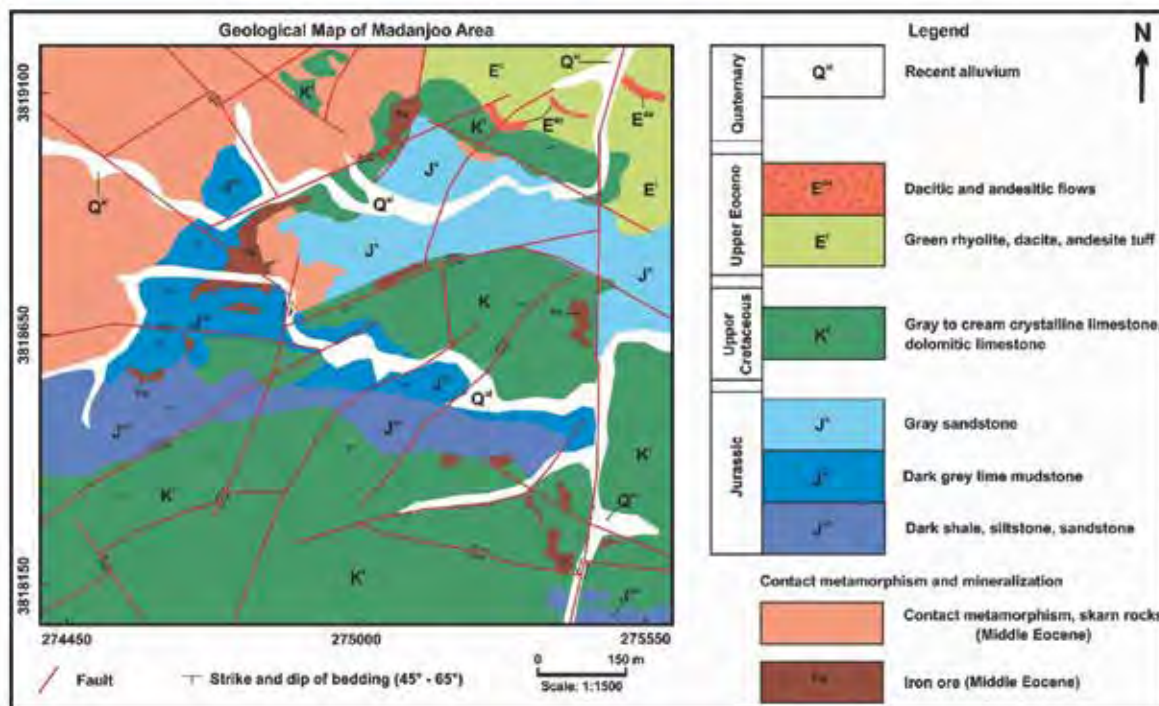
سنگ‌شناسی، کانی‌شناسی و ساخت و بافت ماده معدنی روی مقاطع انجام گرفت. بر اساس شواهد زمین‌شناسی صحرائی و مطالعات میکروسکوپی، تعداد پنج نمونه مقطع نازک-صیقلی از سنگ‌ها و کانسنگ‌های مهم مناطق مختلف اسکارن معدن جو، برای مطالعه‌ی شیمی کانی‌های منیتیت، الیوین، گارنت و پیروکسن با دستگاه ریزکاو الکترونی مدل

برای بررسی‌های سنگ‌شناسی، کانی‌شناسی، زمین‌شیمی و میانبار سیال از سنگ‌ها و کانسنگ‌ها در رخنمون‌های سطحی و مغزه‌های حفاری نمونه‌برداری صورت گرفت. تعداد ۲۶ مقطع نازک، ۱۰ مقطع صیقلی و ۳۴ مقطع نازک-صیقلی از سنگ‌ها و کانسنگ‌های سطحی و زیرسطحی تهیه شده است. سپس مطالعات میکروسکوپی

زمین‌شناسی

کانسار سنگ آهن سنگان از نظر زمین‌ساختاری در انتهای بخش شرقی کمان آتشفشانی-نفوذی سنوزوئیک البرز واقع است، این کمر بند با امتداد غربی-شرقی و خمیدگی به سمت شمال در شمال گسل درونه جای دارد (شکل ۱-الف). در گستره اکتشافی معدن جو واحدهای سنگی از قدیم به جدید شامل ماسه سنگ شیلی، مادستون آهنی و ماسه سنگ‌های ژوراسیک، سنگ آهنک و آهنک دولومیتی کرتاسه، توالی‌های توفی-گدازه‌ای ائوسن بالایی و سنگ‌های اسکارنی ائوسن میانی و رسوبات کواترنری است (شکل ۲).

Cameca SX100 ساخت کشور فرانسه در آزمایشگاه مرکز تحقیقات مواد معدنی ایمیدرو در کرج به صورت نقطه‌ای تجزیه شده است. حد حساسیت روش ریزکاو الکترونی برای همه عناصر در این تحقیق ۱۰۰ گرم در تن می‌باشد. مطالعه میانبارهای سیال بر روی کانی‌های پیروکسن، گارنت، ترمولیت-اکتینولیت و کلسیت در هفت نمونه دوبرصیقلی از مناطق مختلف اسکارن معدن جو (تعداد ۶۸ نقطه) و با استفاده از دستگاه مدل THMS60 ساخت شرکت لینکام کشور انگلستان در آزمایشگاه دانشکده علوم زمین دانشگاه صنعتی شاهرود انجام شده است.



شکل ۲. نقشه زمین‌شناسی گستره آهن معدن جو (فتوت جامی، ۱۳۹۸)

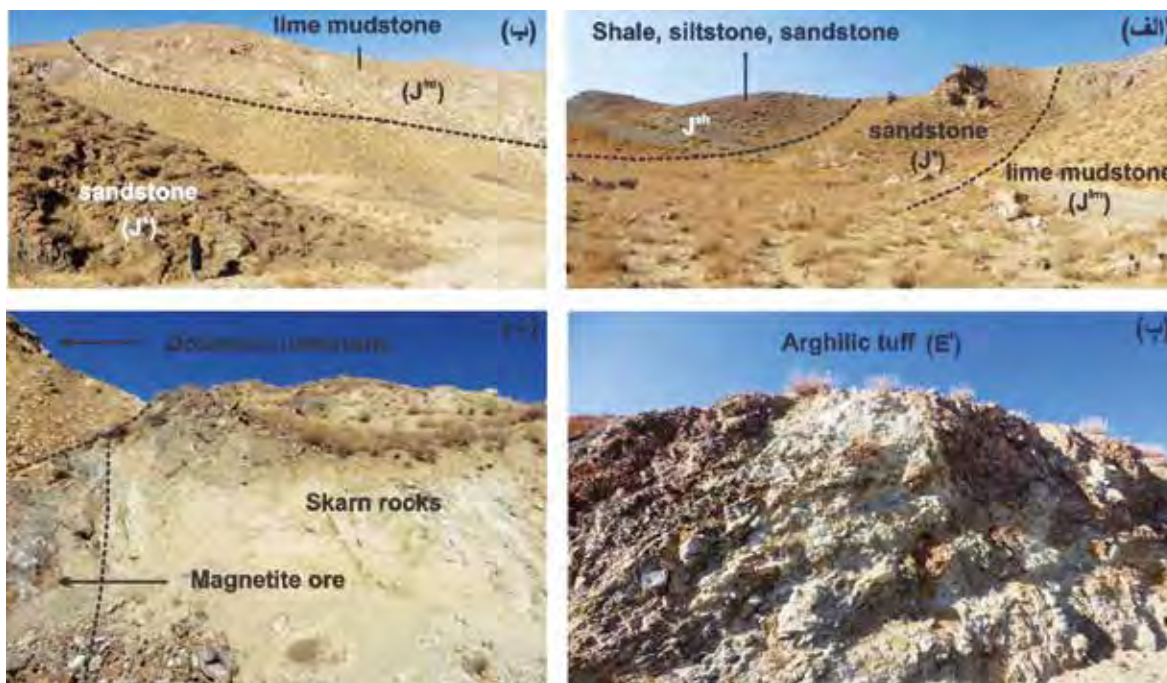
بیشتر دارای سیمان کربناتی و بندرت سیلیسی می‌باشند (شکل ۳-الف، ب). سنگ آهنک و آهنک دولومیتی شده‌ی میکرواسپارایتی تا اسپارایتی کرتاسه بالایی وسیع‌ترین واحد چینه‌شناختی در گستره اکتشافی معدن جو است و درجات ضعیف تا شدید دگرگونی مجاورتی را متحمل شده‌اند. این واحد کربناتی به دلیل وجود اکسید-هیدروکسیدهای آهن به رنگ کرم تا قهوه‌ای مشاهده می‌شود. این واحد در جهت‌های مختلف توسط رگه-رگچه‌های کلسیت قطع شده است و در

سیلتستون با بافت ریزدانه از کوارتز، پلاژیوکلاز، کانی‌های رسی، سربیسیت و موسکوویت ترکیب یافته و درجه ضعیفی از دگرگونی نشان می‌دهند. واحد مادستون آهنکی به رنگ خاکستری تیره دارای بافت ریزدانه میکرایتی است و از بلورهای ریز کلسیت و آثار فسیلی تشکیل شده است. ماسه سنگ‌های ژوراسیک با بافت دانه‌ای دارای رنگ خاکستری هستند. اجزای ماسه سنگ‌ها شامل کوارتز، فلدسپات، کلریت و میکا است. ماسه سنگ‌ها از بلوغ بافتی خوبی برخوردار هستند و

گرانیت-مونزوگرانیت-سینوگرانیت در ناحیه آنومالی‌های شرقی سنگان در طول ائوسن میانی از بارتونین تا لوتسین (۳۸/۳ تا ۴۳/۹ میلیون سال) جای گرفتند (گل محمدی و همکاران، ۱۳۹۳). علاوه بر این، مطالعه U-Pb دانه‌های زیرکن از سه نمونه سینوگرانیت در گستره آنومالی مرکزی دردوی سن‌های ۳۹/۶، ۳۹/۳ و ۳۹/۱ میلیون سال و بر روی دانه‌های زیرکن از دو نمونه سنگ‌های اسکارنی سن‌های ۳۹/۷ و ۳۹/۵ میلیون سال را نشان می‌دهد (Mehrabi et al., 2021). نتایج مطالعات سن‌سنجی ثابت می‌کند، رخداد کانه‌زایی در زمان ائوسن میانی با نفوذی‌های گرانیتی، مونزوگرانیتی و سینوگرانیتی ائوسن ارتباط بسیار نزدیکی دارد. بدین ترتیب که واحدهای سنگی ژوراسیک و کرتاسه در تماس با نفوذی‌های ائوسن دگرگون شده و به سنگ‌های اسکارنی تبدیل شده‌اند و با فاصله از پهنه اسکارن، سنگ‌های آواری ژوراسیک و سنگ‌های کربناتی کرتاسه تبلور مجدد پیدا کرده و مرمری شده‌اند.

محل‌هایی به شدت متبلور و مرمری شده است. در ترکیب این سنگ‌ها، گاهی گارنت، اپیدوت، کلریت، موسکوویت و اکسیدهای آهن نیز که کلسیت و دولومیت را همراهی می‌کنند، وجود دارند.

واحد توفی و گدازه‌ای ائوسن بالایی شامل توف‌های آرژیلیتی و کربناتی و بندرت جریان‌ات گدازه‌ای ریولیتی، داسیتی و آندزیتی که تحت تأثیر متاسوماتیسم قرار دارند، می‌باشد. وجود کانی‌های پیروکسن و موسکوویت در مرحله تاخیری تحت تأثیر دگرسانی‌های اپیدوتی و سرپسیتی قرار دارد (شکل ۳-پ). سنگ‌های اسکارنی ائوسن میانی، مهم‌ترین واحد زمین‌شناختی در گستره معدن جو است و به دلیل اهمیت آنها، در پهنه‌بندی اسکارن آهن معدن جو به‌طور جداگانه توصیف می‌شود (شکل ۳-ت). توده نفوذی بیوتیت مونزوگرانیت در فاصله سه کیلومتری در خارج از گستره پژوهش در داخل سازندهای ژوراسیک و کرتاسه نفوذ کرده است. تجزیه U-Pb زیرکن نشان می‌دهد، نفوذی‌های



شکل ۳. الف) تصویر صحرایی از رخنمون شیل، سیلتستون، ماسه‌سنگ و مادستون آهکی ژوراسیک، نگاه به سمت شمال شرق، ب) تصویر صحرایی از رخنمون مادستون آهکی در همبری با ماسه‌سنگ، نگاه به سمت شمال، پ) تصویر صحرایی از واحد توف آرژیلیتی ائوسن بالایی، نگاه به سمت شمال غرب و ت) تصویر صحرایی از واحد اسکارنی پهنه معدن جو (نگاه به سمت شرق)

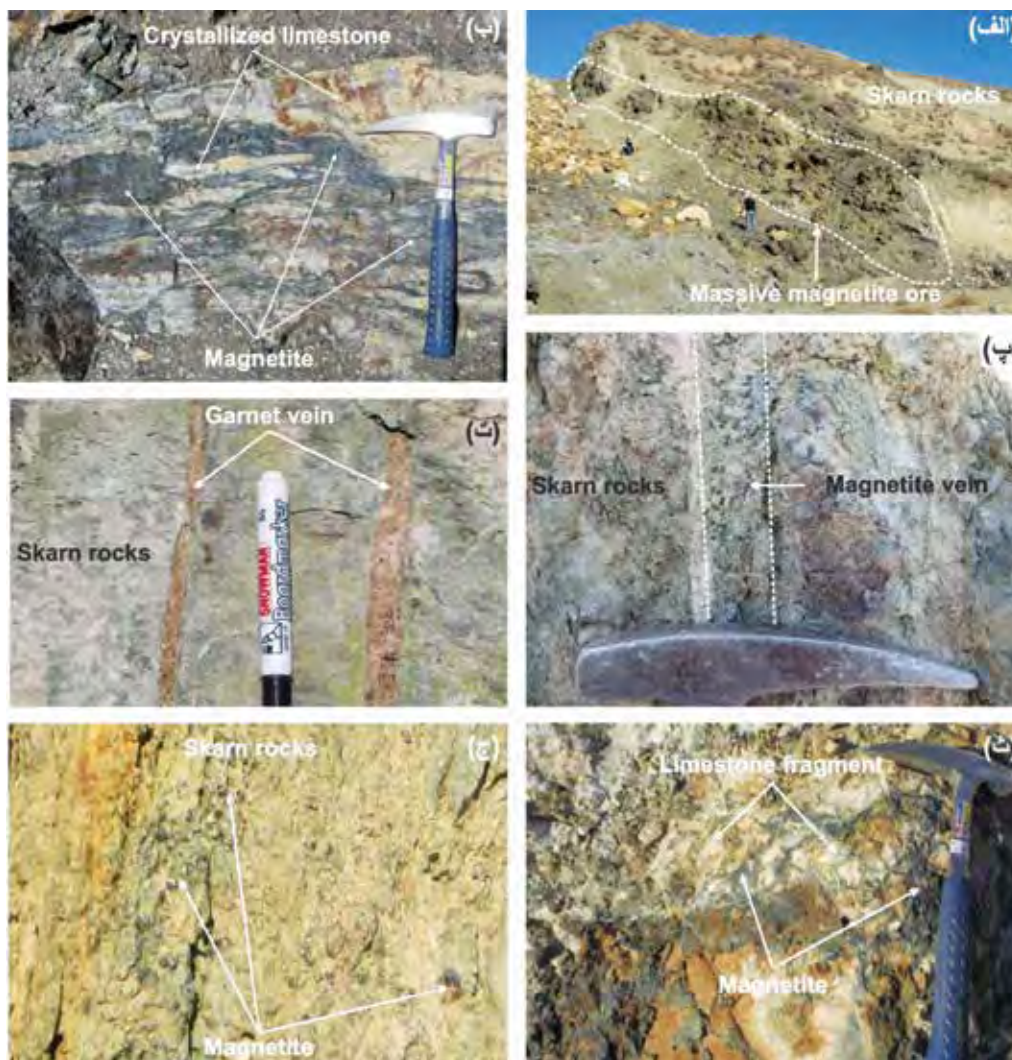
کانه‌زایی در گستره معدن جو

کانه‌زایی در گستره معدن جو در دو مرحله پیشرونده و تاخیری صورت گرفته است. کانی‌های فلزی (اکسیدها و سولفیدها) در مرحله گذر از پیشرونده به تاخیری (مرحله تکوین کانی‌های آب‌دار) و تأثیر آب‌های جوی تشکیل می‌شوند، زیرا در این مرحله محیط برای شکستن کمپلکس‌های حامل فلزات مناسب است (Meinert, 1992). منیتیت مهم‌ترین کانه معدنی در گستره معدن جو است و به صورت اولیه در آخرین مرحله از فاز پیشرونده و شروع فاز تاخیری ته‌نشست شده است. اسپیکولاریت از دیگر کانی‌های اکسیدی در گستره است. رگه-رگچه‌های اسپیکولاریت بیانگر فاز نهایی گرمایی در کانه‌زایی‌های اسکارن است (Einaudi et al., 1981). پیریت نخستین و فراوان‌ترین کانی سولفیدی است و بلورهای آن از شکل دار، نیمه‌شکل دار و بی‌شکل، همراه با منیتیت و هم‌رشدی با کالکوپیریت مشاهده می‌شود. کالکوپیریت به رنگ زرد برنجی و به صورت بلورهای بی‌شکل تا نیمه‌شکل دار و همراه با منیتیت و پیریت وجود دارد. پیروتیت نیز به مقدار خیلی کم در نمونه‌های زیرسطحی مشاهده شده است. الیوین، پیروکسن، گارنت، فلوگوپیت، اپیدوت، ولاستونیت، ترمولیت، اکتینولیت، کلریت و کلسیت به همراه کانی‌های اکسیدی و سولفیدی وجود دارند. کانی‌های ثانویه شامل هماتیت، گوتیت، لیمونیت و به مقدار کم اکسید-هیدروکسیدهای منگنز، مالاکیت و آزوریت است. کانه‌زایی منیتیت و کانی‌های همراه در معدن جو به ترتیب فراوانی به شکل‌های توده‌ای، صفحه‌ای، رگه-رگچه‌ای، برشی و دانه‌پراکنده است. در این میان شکل‌های توده‌ای و صفحه‌ای عمومیت دارند (شکل ۴-الف، ب). در معدن جو، کانه‌زایی اکسیدی-سولفیدی و گارنت به صورت رگه-رگچه‌ای در امتداد گسل‌ها و درزه‌های سنگ‌های میزبان مشاهده می‌شود (شکل ۴-پ، ت). کانه‌زایی آهن با ساختار برشی نیز به صورت محلی وجود دارد (شکل ۴-ث). منیتیت و کانی‌های همراه به صورت دانه‌پراکنده در متن سنگ میزبان دیده می‌شود. کانه‌زایی منیتیت دانه‌پراکنده بیشتر در پهنه گارنت اسکارن مشاهده می‌شود (شکل ۴-ج).

سنگ‌شناسی و کانی‌شناسی اسکارن معدن جو

در گستره معدن جو، نفوذ توده مونزوگرانیتی ائوسن به داخل شیل، مادستون آهکی و ماسه‌سنگی ژوراسیک و سنگ‌آهک و آهک دولومیتی کرتاسه بالایی سبب تشکیل سنگ‌های اسکارن و کانه‌زایی شده است. مناطق اسکارن به‌ویژه در تماس توده‌های نفوذی با سنگ‌های کربناتی کرتاسه بالایی توسعه یافته است، به طوری که شار حرارتی و سیالات گرمایی ناشی از توده‌های نفوذی، باعث دگرگونی ایزوشیمیایی و تبدیل سنگ‌های آهکی خالص به مرمر و آهک‌های دولومیتی به اسکارن شده است. در فرآیند زایش اسکارن واکنش سیال با کانی‌های سنگ میزبان باعث دگرسانی متاسوماتیک پیشرونده و ایجاد کانی‌های کالک‌سیلیکاتی بی‌آب (فورستریت، فاسایت، پیروکسن ولاستونیت و گارنت) می‌شود و در گام‌های پایانی مرحله پیشرونده، منیتیت تشکیل شده است. مرحله تاخیری (پسرونده) با تغییرات شرایط فیزیوشیمیایی و نفوذ آب‌های جوی حرارت پایین و اختلاط آن‌ها با سیال گرمایی همراه است. طی مرحله تاخیری، در اثر فرآیندهای هیدرولیز و کربن‌گیری، کانی‌های سیلیکاتی بی‌آب به کانی‌های آبدار تبدیل می‌شوند. در این مرحله گارنت بیشتر به اپیدوت و کلسیت و پیروکسن به سیلیکات‌های آبدار (ترمولیت-اکتینولیت) تبدیل می‌شود. در این مرحله کاهش دما و مصرف H^+ توسط هیدرولیز کانی‌های کالک‌سیلیکاتی بی‌آب و کانی‌های کربناته (کلسیت) باعث ناپایداری کمپلکس‌های کلریدی و ته‌نشست کانی‌های اکسیدی (منیتیت) و سولفیدی (پیریت، کالکوپیریت و پیروتیت) می‌شود (Einaudi et al., 1981). بر پایه مطالعات سنگ‌نگاری و کانی‌شناسی، در گستره معدن جو پهنه‌های اسکارنی زیر شناسایی شده است.

الیوین-پیروکسن-گارنت اسکارن: این پهنه اسکارنی شامل کانی‌های الیوین، فاسایت، گارنت، پیروکسن و منیتیت است. مجموعه این کانی‌ها در مرحله پیشرونده اسکارن تشکیل شده است. در این پهنه، کانه‌زایی منیتیت به صورت‌های توده‌ای و رگه‌ای مشاهده می‌شود. وجود کانی الیوین شاهده‌ی بر وجود توده نفوذی در نزدیکی این پهنه و دلیلی بر اسکارن نوع منیزیمی می‌باشد (شکل ۵-الف).



شکل ۴. تصاویری از ساخت‌های مختلف کانه‌زایی در پهنه معدن جو، (الف) شکل توده‌ای منیتیت در تماس سنگ‌های اسکارن و سنگ‌های آهکی و آهک دولومیتی متبلور کرتاسه بالایی (نگاه به سمت شرق)، (ب) کانه‌زایی نواری اکسیدهای آهن که ناشی از نفوذ سیالات کانه‌ساز در امتداد لایه‌بندی سنگ‌آهک‌های متبلور است، (پ) رگه منیتیت در سنگ‌های اسکارن، (ت) رگه‌های گارنت در سنگ‌های اسکارن، (ث) ساخت برشی که منیتیت فضاهای میان قطعات سنگ‌آهک و آهک دولومیتی شده را پر کرده است، (ج) شکل دانه‌پراکنده منیتیت در سنگ‌های اسکارن

توده نفوذی است. گارنت‌های معدن جو دارای پهنه‌بندی مشخص است که بیانگر تغییر ترکیب شیمیایی آنها می‌باشد (شکل ۵-پ). گارنت‌های موجود در سنگ‌های دگرگونی گاهی فاقد پهنه‌بندی هستند. تغییرات شیمیایی در مقدار عناصر از مرکز به حاشیه‌ی آنها مشاهده نمی‌شود و دلیل اصلی آن رشد سریع گارنت در یک سیستم بسته است. این ویژگی در گارنت‌های موجود در سنگ‌های دگرگونی پهنه بروجرد گزارش شده است (رحمانی جوانمرد و همکاران، ۱۳۹۹).

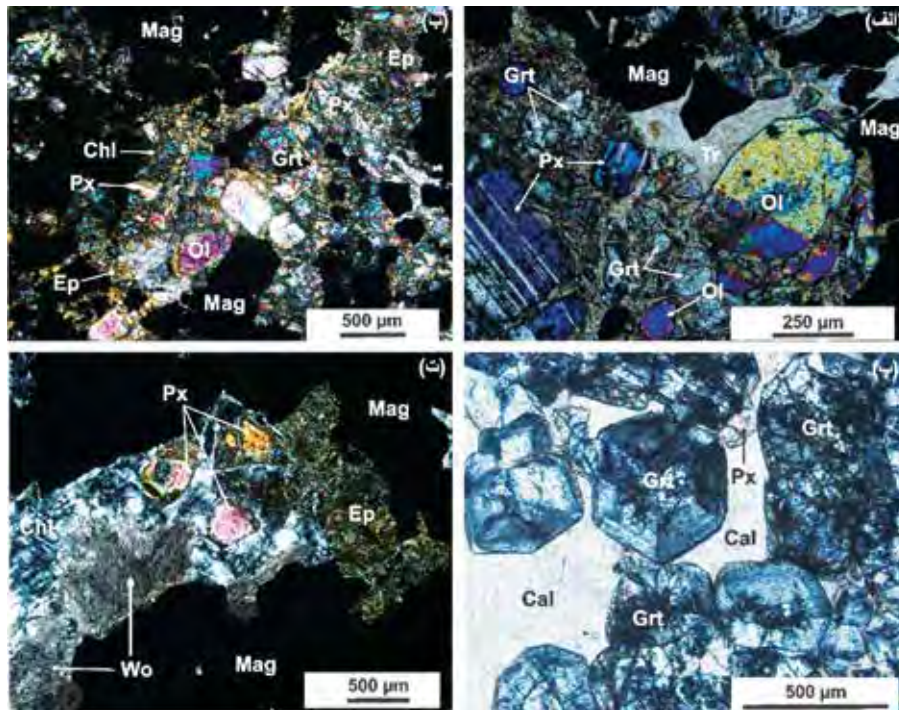
پیروکسن-ولاستونیت-منیتیت اسکارن: پهنه پیروکسن یک پهنه پیشرونده اسکارن است و در همه اسکارن‌ها مشاهده

گارنت-پیروکسن اسکارن: کانی غالب در این زون گارنت است و بوسیله پیروکسن همراهی می‌شود. شواهد بافتی نشان از هم‌رشدی گارنت و پیروکسن در مرحله پیشرونده که با منیتیت، اپیدوت و کلریت مرحله تاخیری دنبال می‌شود، می‌باشد (شکل ۵-ب).

گارنت اسکارن: در گستره معدن جو، گارنت محصول دگرسانی متاسوماتیک پیشرونده و فقیر از آهن است. بلورهای گارنت در این پهنه اغلب شکل دار تا نیمه‌شکل دار و دارای بافت گرانوبلاستیک هستند. همراهی گارنت با بلورهای درشت کلسیت نشان از نزدیکی این پهنه به محل همبری

می‌شود. این پهنه تنوع ترکیبی مشخصی از خود نشان می‌دهند. این پهنه اسکارنی در بخش شمال غرب گستره معدن جو و در واحد توف‌های آرزلی‌شده همراه با تناوبی از سنگ‌آهک‌های

خاکستری مشاهده می‌شود. بر پایه مطالعات میکروسکوپی پیروکسن کانی غالب این پهنه است و با ولاستونیت، منیتیت و اپیدوت همراهی می‌شود (شکل ۵-ت).



شکل ۵. الف) الیون، پیروکسن، گارنت و منیتیت تشکیل درشت بلورهای الیون و پیروکسن مقدم بر گارنت و منیتیت هستند، (ب) تصویر میکروسکوپی از پهنه گارنت-پیروکسن اسکارن که گارنت و پیروکسن بوسیله منیتیت، اپیدوت و کلریت همراهی می‌شوند، (پ) پهنه‌بندی مشخص در گارنت که نشان از تغییر ترکیب شیمیایی در ساختار بلورهای گارنت است و (ت) تصویر میکروسکوپی از کانی‌های پیروکسن، ولاستونیت و اپیدوت به همراه منیتیت. Ep: اپیدوت، Px: پیروکسن، Mag: منیتیت، Ol: الیون، Grt: گارنت، Tr: ترمولیت، Wo: ولاستونیت، Cal: کلسیت، Chl: کلریت نشانه‌های اختصاری از (Whitney and Evans 2010)

زوئیزیت و کلینوزوئیزیت همزمان است، زیرا واکنش‌هایی که سبب پیدایش زوئیزیت می‌شوند، اکتینولیت را نیز تولید می‌کنند. ترمولیت مختص سنگ‌های کربناتی (دولومیتی) دگرگون شده است. کانی غالب در این پهنه ترمولیت است که به همراه آن اکتینولیت نیز مشاهده می‌شود، ترمولیت‌ها در مرحله دگرگونی پسرونده (تاخیری) از تبدیل پیروکسن‌ها ایجاد می‌شود (شکل ۶-پ).

اپیدوت اسکارن: این پهنه از گسترش به نسبت وسیعی در گستره معدن جو برخوردار است. زوئیزیت یک کانی کم و بیش بدون آهن از کانی‌های شاخص گروه اپیدوت در این پهنه است. تشکیل زوئیزیت در دمای بالای حدود ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد، فقط زمانی که سیال محیطی از آب خالص باشد ($X_{CO_2} < 0.05$)، رخ می‌دهد (Groat et al., 2014).

منیتیت اسکارن: منیتیت اسکارن، پهنه اصلی کانه‌زایی آهن در گستره معدن جو است. در این پهنه، منیتیت بیشتر دارای ساختار توده‌ای است، اما گاهی به شکل‌های رگه-رگچه‌ای و دانه‌پراکنده نیز مشاهده می‌شود. در نمونه‌ها به همراه منیتیت کانی‌های پیریت، کالکوپیریت و بندرت پیرویت وجود دارد (شکل ۶-الف).

فلوگوپیت اسکارن: در گستره اکتشافی معدن جو با توجه به گسترش وسیع سنگ میزبان دولومیتی و آهک دولومیتی، شرایط برای تشکیل فلوگوپیت مناسب می‌باشند. کانی غالب در این پهنه فلوگوپیت است و در مواردی با منیتیت همراه است (شکل ۶-ب). وجود این کانی نشانی بر منیزیمی بودن اسکارن معدن جو است.

ترمولیت-اکتینولیت اسکارن: ظهور اکتینولیت با ظهور

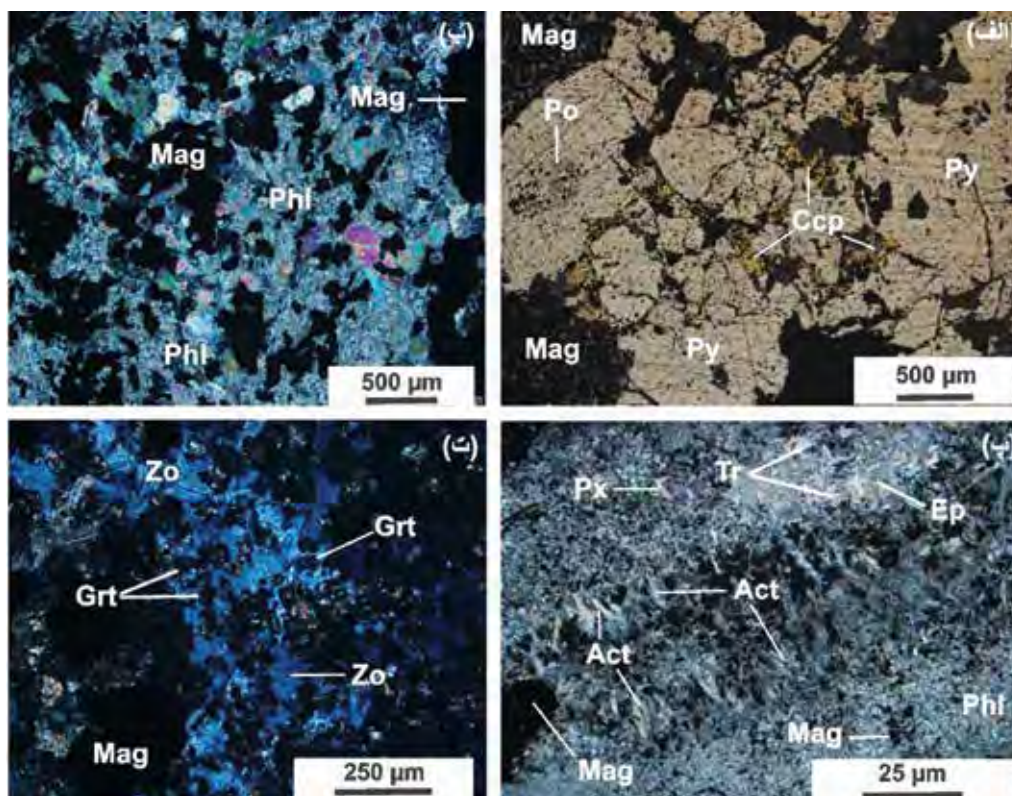
این کانی با استفاده از روش ریزکاوا الکترونی تجزیه شده است. موقعیت نقاط تجزیه و مقادیر غلظت اکسید عناصر به ترتیب در شکل (۷-الف) و جدول ۱ آورده شده است. بر پایه داده‌های ژئوشیمیایی، SiO_2 بیشترین درصد فراوانی را در ترکیب گارنت دارد و مقدار آن از ۳۷/۵۲ درصد تا ۳۹/۰۳ درصد تغییر می‌کند. CaO ، FeO و Al_2O_3 به ترتیب در مرتبه‌های بعدی قرار دارند. مقایسه ترکیب شیمیایی گارنت‌های معدن‌جو با ترکیب آندرادیت، گروسولار، اسپسارتین و آلماندین مرجع (webmineral.com/data)، مشابهت گارنت‌های معدن‌جو را بیشتر با انواع آندرادیت و گروسولار نشان می‌دهد و غنی از کلسیم هستند (شکل ۷-ب). در مثلث آندرادیت، گروسولار، آلماندین+اسپسارتین (Meinert et al., 2005)، ترکیب گارنت‌های معدن‌جو در گستره آندرادیت-گروسولار و نزدیک به رأس آندرادیت و در گستره ترکیبی اسکارن‌های آهن‌دار جهان قرار می‌گیرند (شکل ۷-پ).

کانی‌های این پهنه که در مرحله دگرگونی پسروده تشکیل شده‌اند شامل زونیزیت، کلریت، کلسیت، اپیدوت، گارنت و منیتیت مرحله تاخیری هستند (شکل ۶-ت).

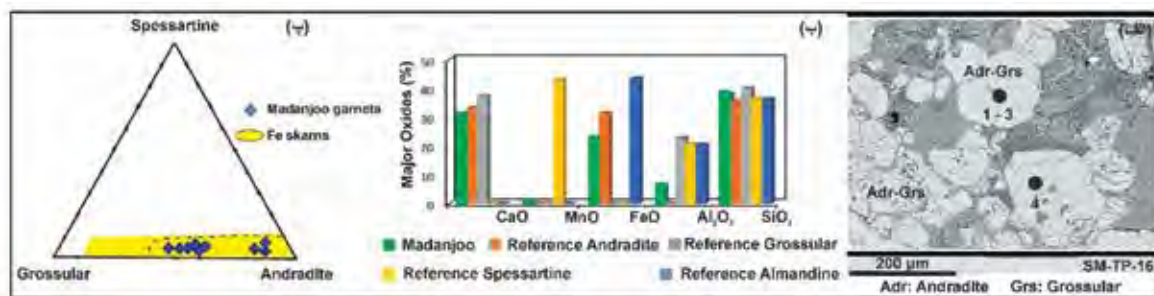
شیمی کانی‌های پهنه اسکارن

در این پژوهش مطالعه شیمی کانی‌ها در پنج نمونه شاخص از پهنه‌های اسکارن معدن‌جو و بر روی کانی‌های الیوین (فورستریت)، گارنت، پیروکسن، منیتیت، فلوگوپیت، کلریت، کلسیت، دولومیت، پیریت، کالکوپیریت و کالکوسیت به تعداد ۷۲ نقطه انجام شده است (جدول‌های ۱، ۲، ۳ و شکل‌های ۷ تا ۹). در ادامه، تنها به توصیف شیمی کانی‌های مهم پهنه اسکارن از قبیل گارنت، پیروکسن، منیتیت و الیوین اکتفاء شده است. برای اطلاع از ترکیب شیمیایی سایر کانی‌ها به داده‌های جدول (۳) رجوع شود.

شیمی گارنت: در گستره معدن‌جو، برای مطالعه ترکیب شیمیایی گارنت و تشخیص نوع آن، تعداد نه نقطه بر روی



شکل ۶. الف) تصویر میکروسکوپی از هم‌رشدی کانی‌های منیتیت، پیریت، کالکوپیریت و پیروتیت، ب) تصویر میکروسکوپی از همیافتی فلوگوپیت و منیتیت، پ) تصویر میکروسکوپی از ترمولیت، اکتینولیت، پیروکسن و فلوگوپیت و ت) تصویر میکروسکوپی از زونیزیت همراه با گارنت و منیتیت تاخیری. Ep: اپیدوت، Px: پیروکسن، Mag: منیتیت، Py: پیریت، Ccp: کالکوپیریت، Po: پیروتیت، Grt: گارنت، Tr: ترمولیت، Act: اکتینولیت، Zo: زونیزیت، Phi: فلوگوپیت نشانه‌های اختصاری از (Whitney and Evans 2010)



شکل ۷. الف) موقعیت و شماره نقاط تجزیه شیمیایی بر روی کانی‌های گارنت، ب) مقایسه ترکیب شیمیایی گارنت‌های معدن‌جو با ترکیب آندرادیت، گروسولار، اسپسارتین و آلماندین مرجع، که گارنت‌های معدن‌جو بیشتر با انواع آندرادیت و گروسولار مشابه می‌باشند و غنی از کلسیم هستند و پ) موقعیت ترکیب شیمیایی گارنت‌های معدن‌جو در نمودار مثلثی گروسولار-اسپسارتین-آندرادیت (با تغییر از Meinert et al., 2005)

جدول ۱. نتایج تجزیه شیمیایی (درصد وزنی) گارنت‌های انتخابی از اسکارن آهن معدن‌جو به روش میکروپروب الکترونی

Sample No.	Point No.	Mineral	Na ₂ O	K ₂ O	MgO	CaO	MnO	FeO	NiO	Al ₂ O ₃	V ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	SiO ₂	TiO ₂	Total
	۱		۰/۰۷	۰/۰۴	۰/۰۰	۳۰/۴۲	۰/۲۲	۲۰/۷۴	۰/۱۲	۷/۹۶	۰/۰۰	۰/۰۰	۳۸/۵۹	۰/۲۳	۹۸/۳۹
	۲		۰/۰۰	۰/۱۰	۰/۰۰	۳۰/۵۰	۰/۲۴	۲۱/۲۱	۰/۲۸	۸/۱۳	۰/۰۰	۰/۰۰	۳۹/۰۳	۰/۰۰	۹۹/۴۹
	۳		۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۳۰/۷۵	۰/۲۵	۲۱/۲۲	۰/۰۰	۷/۶۹	۰/۰۰	۰/۰۰	۳۸/۱۶	۰/۴۱	۹۸/۴۸
	۴	- Andradite	۰/۰۷	۰/۰۰	۰/۰۰	۳۰/۶۲	۰/۳۳	۲۰/۵۷	۰/۱۴	۸/۴۷	۰/۰۰	۰/۰۰	۳۷/۶۹	۰/۲۹	۹۸/۱۸
SM-TP-16	۵	Grossular	۰/۰۴	۰/۰۰	۰/۰۰	۳۰/۸۰	۰/۲۳	۲۸/۴۳	۰/۰۰	۲/۲۱	۰/۰۰	۰/۰۴	۳۷/۵۲	۰/۰۰	۹۹/۲۷
	۶		۰/۰۹	۰/۰۰	۰/۰۰	۳۰/۶۳	۰/۲۳	۲۶/۷۴	۰/۰۰	۲/۹۷	۰/۰۰	۰/۰۳	۳۷/۵۷	۰/۰۰	۹۸/۲۶
	۷		۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۳۱/۱۷	۰/۱۱	۲۶/۷۲	۰/۰۰	۲/۱۵	۰/۰۰	۰/۰۰	۳۸/۵۷	۰/۰۰	۹۸/۷۲
	۸		۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۳۱/۵۳	۰/۳۶	۱۹/۱۴	۰/۰۰	۸/۹۵	۰/۰۰	۰/۰۰	۳۸/۳۲	۰/۳۸	۹۸/۶۸
	۹		۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۳۲/۰۹	۰/۳۳	۱۹/۴۹	۰/۳۶	۸/۹۷	۰/۰۰	۰/۰۰	۳۸/۱۹	۰/۲۱	۹۹/۶۴
		Reference Andradite	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۳۳/۱۱	۰/۰۰	۳۱/۴۲	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۳۵/۴۷	۰/۰۰	۱۰۰/۰۰
		Reference Grossular	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۳۷/۳۵	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۲۲/۶۴	۰/۰۰	۰/۰۰	۴۰/۰۲	۰/۰۰	۱۰۰/۰۰
		Reference Spessartine	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۴۲/۹۹	۰/۰۰	۰/۰۰	۲۰/۶۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۳۶/۴۱	۰/۰۰	۱۰۰/۰۰
		Reference almandine	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۴۳/۳۰	۰/۰۰	۲۰/۴۸	۰/۰۰	۰/۰۰	۳۶/۲۱	۰/۰۰	۱۰۰/۰۰

معدن‌جو را بیشتر با انواع دیوپسید و هدربرگیت نشان می‌دهد و غنی از کلسیم و منیزیم هستند (شکل ۸-ب). در نمودار مثلثی هدربرگیت-دیوپسید-ژوهانسیت (Meinert et al., 2005)، ترکیب پیروکسن‌های معدن‌جو در گستره دیوپسید-هدربرگیت و نزدیک به رأس دیوپسید و در گستره اسکارن‌های آهن‌دار قرار می‌گیرند (شکل ۸-پ). شیمی منیتیت: کانی منیتیت، یک ردیاب پتروژنتیکی مهم است و کاربردهای گسترده‌ای در بررسی‌های زمین‌شناسی اقتصادی و اکتشافات معدنی دارد. شیمی منیتیت به تعداد ۳۴ نقطه در نمونه‌های SM-TP-06، SM-B-49-131 و SM-B-55-42 اندازه‌گیری شده است. موقعیت نقاط تجزیه و مقادیر غلظت اکسید عناصر به ترتیب

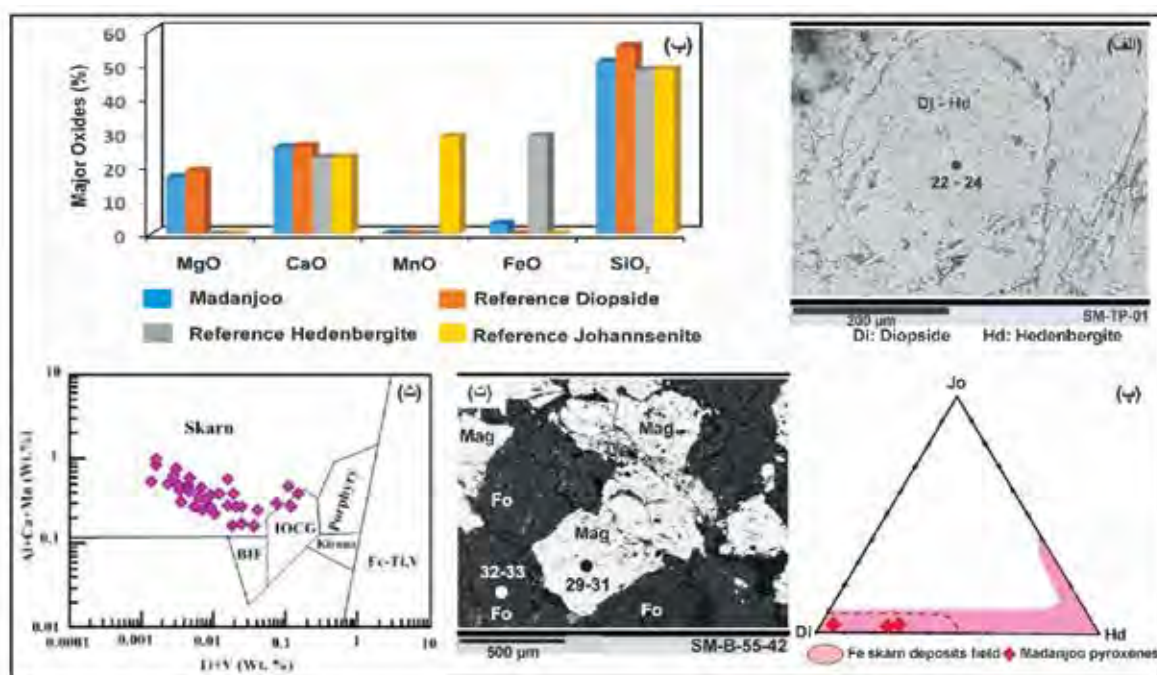
شیمی پیروکسن: پیروکسن از کانی‌های شاخص اسکارن‌ها است و در مرحله پیش‌رونده اسکارن‌زایی ایجاد می‌شود. در گستره معدن‌جو پیروکسن به همراه الیوین، گارنت، ولاستونیت، فلوگوپیت و منیتیت در بیشتر پهنه‌های اسکارنی وجود دارد. در این گستره، برای مطالعه ترکیب شیمیایی پیروکسن و تشخیص نوع آن، تعداد سه نقطه بر روی این کانی با استفاده از روش ریزکاو الکترونی تجزیه شده است. موقعیت نقاط تجزیه و مقادیر غلظت اکسید عناصر به ترتیب در شکل (۸-الف) و جدول ۲ آورده شده است. مقایسه ترکیب شیمیایی پیروکسن‌های معدن‌جو با ترکیب دیوپسید، هدربرگیت و ژوهانسیت مرجع (webmineral.com/data)، مشابهت پیروکسن‌های

در شکل (۸-ت) و جدول (۳) آورده شده است. مقدار FeO از کمینه ۸۷/۲۷ درصد تا بیشینه ۹۳/۴۵ درصد در منیتیت‌های معدن جو تغییر می‌کند و متوسط آن ۹۰/۴۴ درصد است. از ترکیب شیمیایی منیتیت برای شناسایی منیتیت‌های ماگمایی و گرمایی و انواع مختلف کانسارهای

سنگ آهن استفاده می‌شود. به عنوان مثال نمودار Ti+V در مقابل Al+Ca+Mn، برای تشخیص انواع کانسارهای آهن بکار برده می‌شود (Dupuis and Beaudoin, 2011). در این نمودار شیمی منیتیت‌های معدن جو در گستره کانسارهای آهن اسکارن قرار می‌گیرند (شکل ۸-ث).

جدول ۲. نتایج تجزیه شیمیایی (درصد وزنی) پیروکسن‌های انتخابی از اسکارن آهن معدن جو به روش میکروپروب الکترونی

Sample No.	Point No.	Mineral	Na ₂ O	K ₂ O	MgO	CaO	MnO	FeO	Al ₂ O ₃	V ₂ O ₅	Cr ₂ O ₃	SiO ₂	TiO ₂	P ₂ O ₅	Total
	۲۲	- Diopside	۰/۳۳	۰/۰۲	۱۵/۱۴	۲۴/۷۸	۰/۱۷	۴/۱۹	۳/۷۴	۰/۰۰	۰/۰۰	۵۰/۵۳	۰/۲۹	۰/۰۷	۹۹/۲۶
SM-TP-01	۲۳	Hedenbergite	۰/۲۰	۰/۰۴	۱۶/۲۳	۲۵/۶۸	۰/۲۱	۴/۶۴	۱/۰۵	۰/۰۰	۰/۰۰	۵۰/۷۵	۰/۲۶	۰/۰۰	۹۹/۰۶
	۲۴		۰/۰۳	۰/۰۹	۱۸/۸۹	۲۶/۵۳	۰/۰۴	۰/۴۹	۰/۷۶	۰/۰۰	۰/۰۰	۵۱/۶۳	۰/۱۲	۰/۰۰	۹۸/۵۸
		Reference Diopside	۰/۰۰	۰/۰۰	۱۸/۶۱	۲۵/۹۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۵۵/۴۹	۰/۰۰	۰/۰۰	۱۰۰/۰۰
		Reference Hedenbergite	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۲۲/۶۰	۰/۰۰	۲۸/۹۶	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۴۸/۴۴	۰/۰۰	۰/۰۰	۱۰۰/۰۰
		Reference Johannsenite	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۲۲/۶۹	۲۸/۷۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۴۸/۶۲	۰/۰۰	۰/۰۰	۱۰۰/۰۰



شکل ۸. الف) موقعیت و شماره نقاط تجزیه شیمیایی بر روی کانی‌های پیروکسن، ب) مقایسه ترکیب شیمیایی پیروکسن‌های معدن جو با ترکیب دیوپسید، هدنبرگیت و ژوهانسنیت مرجع (پیروکسن‌های معدن جو بیشتر با دیوپسید و تا حدودی با هدنبرگیت مشابه بوده و غنی از کلسیم و منیزیم هستند)، پ) موقعیت ترکیب شیمیایی پیروکسن‌های معدن جو در نمودارهای مثلثی دیوپسید (Di) - هدنبرگیت (Hd) - ژوهانسنیت (Jo) (Meinert et al., 2005)، ت) موقعیت و شماره نقاط تجزیه شیمیایی بر روی منیتیت و کانی‌های دیگر (ث) نمودار دوتایی Ti+V در مقابل Al+Ca+Mn و موقعیت نمونه‌ها در گستره کانسارهای آهن اسکارن

روش ریزکاو الکترونی همانند روش سنگ‌نگاری وجود الیوین را در نمونه‌ی SMB-TP-55-42 ثابت می‌کند. نتایج تجزیه تعداد سه نقطه (نقاط تجزیه ۳۲، ۳۳ و ۳۴) بر روی کانی الیوین (فورستریت) در جدول (۳) آورده شده است. بر پایه

شیمی الیوین: الیوین (فورستریت) از جمله کانی‌های دما بالا در گستره معدن جو است و همراه با کانی‌های فاسایت، پیروکسن، گارنت و منیتیت در پهنه اسکارن مشاهده شده است. تجزیه‌ی شیمیایی کانی‌ها با استفاده از

ادامه جدول ۳.

Sample No.	Point No.	Mineral	SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	Cr ₂ O ₃	CoO	NiO	V ₂ O ₃	SO ₂	CuO	ZnO	Total	
	۲۹		۰/۰۷	۰/۱۸	۹۰/۸۸	۱/۳۳	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۱۱	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۱۶	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۹۲/۷۵
	۳۰	Magnetite	۰/۱۲	۰/۱۷	۹۱/۳۴	۱/۲۲	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۴	۰/۰۳	۰/۰۰	۰/۰۶	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۹۲/۹۶
	۳۱		۰/۱۰	۰/۱۲	۹۳/۴۵	۱/۳۱	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۹	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۷۱	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۹۶/۰۹
	۳۲		۳۴/۰۱	۰/۰۰	۲۰/۰۷	۵۸/۲۵	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۳۳	۰/۰۰	۰/۰۶	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۹۴/۷۵
	۳۳	Forsterite	۳۴/۴۴	۰/۰۰	۲۰/۰۳	۵۸/۵۳	۰/۰۲	۰/۱۰	۰/۰۰	۰/۳۳	۰/۰۶	۰/۰۷	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۲۱	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۹۵/۷۹
SM-B-55-42	۳۴		۳۵/۴۹	۰/۰۳	۱/۹۰	۵۹/۴۵	۰/۰۵	۰/۰۶	۰/۰۳	۰/۲۶	۰/۱۲	۰/۰۵	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۹۷/۵۲
	۳۵		۰/۰۷	۰/۰۶	۹۲/۷۶	۰/۹۳	۰/۰۴	۰/۰۰	۰/۱۳	۰/۰۳	۰/۰۶	۰/۱۰	۰/۰۰	۰/۰۵	۰/۲۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۹۵/۱۲
	۳۶		۰/۶۷	۰/۱۱	۸۹/۵۶	۱/۰۵	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۳	۰/۰۷	۰/۰۸	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۹۱/۸۷
	۳۷	Magnetite	۰/۱۳	۰/۱۰	۹۱/۸۸	۱/۲۳	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۶	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۸۷	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۹۴/۳۰
	۳۸		۰/۱۱	۰/۱۲	۹۰/۴۰	۱/۳۳	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۹	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۹۲/۰۹
	۳۹		۰/۱۳	۰/۱۰	۹۱/۵۱	۱/۱۱	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۹	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۱۶	۰/۰۲	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۹۲/۱۲

ترکیب تک کلینوپیروکسن و کلینوپیروکسن-مذاب ارائه شده است (Nimis and Taylor, 2000). روش تک کلینوپیروکسن بر اساس محاسبه میزان فعالیت انستاتیت در کلینوپیروکسن و بدون دخالت ترکیب مذاب طراحی شده است و همواره بر پایه تعادل Ca-Mg می‌باشد (Putirka, 2008). در این پژوهش برای تخمین شرایط فشار و دما به روش تک کلینوپیروکسن از برنامه Winpyrox (Yavuz, 2013) استفاده شد. بر اساس رابطه زیر برای تخمین شرایط دما و فشار تبلور پیروکسن در اسکارن معدن جو اقدام شده است:

$$T(K) = 93100 + 544P(\text{kbar})/61.1 + 36.6(X\text{Ti}^{\text{epx}}) + 10.9(X\text{Fe}^{\text{epx}}) - 0.95(X\text{Al}^{\text{epx}} + X\text{Cr}^{\text{epx}} - X\text{Na}^{\text{epx}} - X\text{K}^{\text{epx}}) + 0.395[\ln(a\text{En}^{\text{epx}})]^2$$

بر اساس این معادله دمای تشکیل کلینوپیروکسن‌های اسکارن معدن جو بین ۴۵۸ تا ۶۸۹ درجه سانتی‌گراد و فشار ۲/۲۱ کیلو بار بر آورد شده است. شکل (۱۰-الف) نمودار فشار-دما را برای کلینوپیروکسن‌های اسکارن معدن جو نشان می‌دهد.

مطالعه میانبارهای سیال

در سامانه‌های ماگمایی-گرماپی، ماگماها از نظر تأمین حرارت، سیالات ماگمایی و فلزات دارای اهمیت می‌باشند. پتانسیل کانه‌زایی این ماگماها تابع ترکیب سیالات ماگمایی و زمان خروج آن‌ها از ماگما است که در سیالات و مذاب‌های درگیر ثبت می‌شود (John et al., 2010). بررسی دمای تشکیل کانسارها، شوری و ترکیب شیمیایی سیالات کانه‌ساز و فشار حاکم بر محیط کانه‌زایی در شناخت نوع کانه‌زایی و

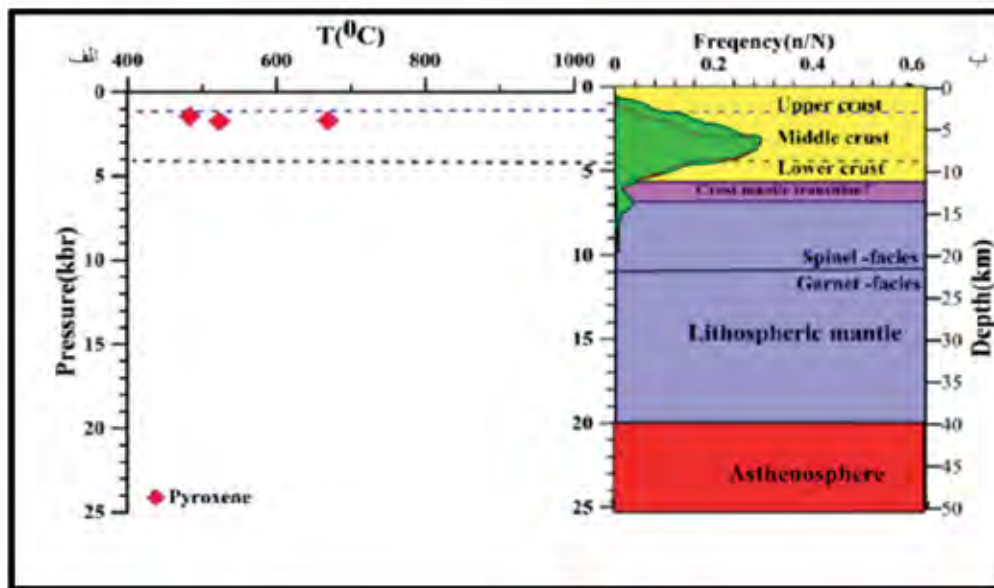
نتایج تجزیه‌های شیمیایی MgO و SiO₂ بیشترین درصد وزنی این کانی را تشکیل می‌دهند. مقدار MgO از ۵۸/۲۵ درصد تا ۵۹/۴۵ درصد و SiO₂ از ۳۴/۰۱ تا ۳۴/۴۹ تغییر می‌کند. در نمودار مثلثی Mn₂SiO₄ (تفروئیت)، Mg₂SiO₄ (فورستریت)، Fe₂SiO₄ (فایالیت) (Deer et al., 1996)، هر سه نقطه در گستره فورستریت قرار می‌گیرند (شکل ۹).



شکل ۹. نمودار مثلثی فورستریت-فایالیت-تفروئیت و موقعیت نمونه‌ها در گستره فورستریت

زمین دما-فشارسنجی بر اساس ترکیب پیروکسن

ترکیب شیمیایی کلینوپیروکسن‌ها تابعی از تغییرات شرایط فشار و دما است (Yavuz, 2013; Aydin et al., 2009). بر این اساس، از ترکیب شیمیایی پیروکسن‌ها برای تعیین دما و فشار سنگ‌های حامل آن‌ها استفاده می‌شود (Putirka, 2008). دو نوع مدل دما-فشارسنجی بر اساس



شکل ۱۰. الف) نمودار دما-فشار برای کلینوپیروکسن‌های اسکارن معدن جو، ب) تصویر شماتیک از ساختار لیتوسفر (کلینوپیروکسن‌ها در عمق یک تا ۲/۵ کیلومتری متبلور شده‌اند) (Putirka, 2008)

تعداد خیلی کم در نمونه‌ها مشاهده شده است. از نظر تعداد فاز، چهار نوع میانبار سیال در این کانی‌ها مشاهده شده است، میانبارها عبارت از میانبارهای تک‌فازی مایع (L)، میانبارهای دوفازی غنی از مایع (L+V)، میانبارهای دوفازی غنی از گاز (V+L)، میانبارهای سه‌فازی مایع-گاز-هالیت (L+V+S) می‌باشند (شکل ۱۱-الف، ب، پ، ت).

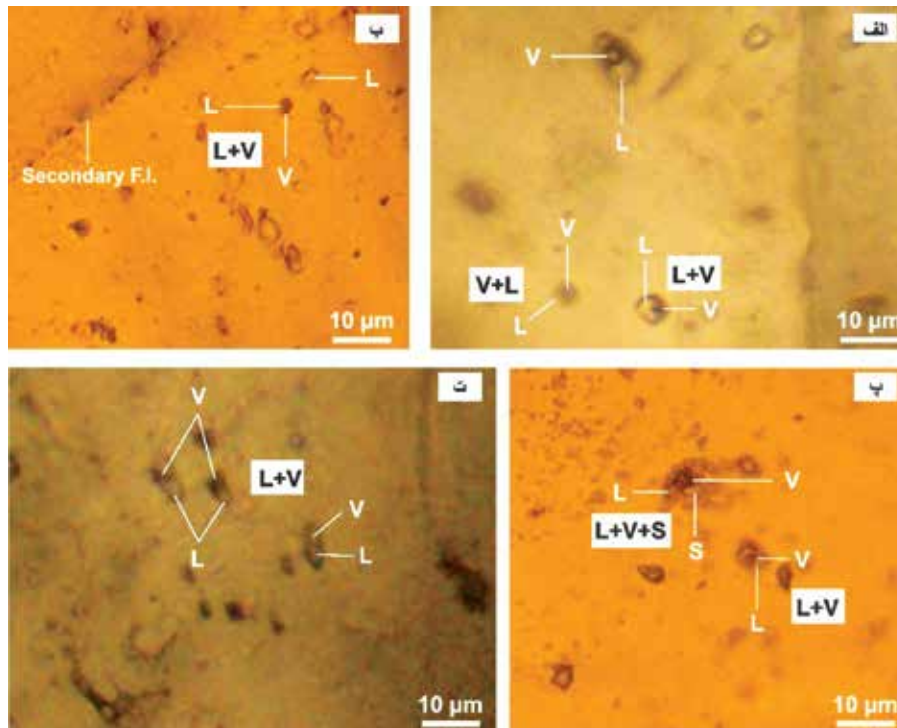
ریزدماسنجی میانبارهای سیال

روش ریزدماسنجی میانبارهای سیال بر پایه مشاهده دقیق و تشخیص تغییرات فازی درون میانبارهای سیال هنگام گرمایش و سرمایش است. با اندازه‌گیری دقیق دمایی که این تغییرات در آن رخ می‌دهد، می‌توان به وضعیت سیال‌ها در زمان به دام افتادن پی برد (Shepherd et al., 1985). نتایج حاصل از مطالعات ریزدماسنجی برای کانی‌های گارنت، کلسیت، پیروکسن و ترمولیت از پهنه اسکارن آهن معدن جو به ترتیب در جدول ۴ آورده شده است. نتایج مطالعات گرمایش سیالات نشان می‌دهد، تغییرات دمایی همگن شدن میانبارها به فاز مایع برای پیروکسن مرحله پیش‌رونده از ۳۳۰ تا ۳۸۰ درجه سانتی‌گراد، گارنت پیش‌رونده از ۳۹۰ تا ۴۱۰ درجه سانتی‌گراد، گارنت مرحله تاخیری از ۱۷۰ تا ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد، ترمولیت تاخیری از ۲۷۵ تا ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد، کلسیت تاخیری از

ارائه مدل اکتشافی بسیار مهم است (Beane, 1983). در گستره معدن جو برای بررسی میانبارهای سیال در کانی‌های گارنت، پیروکسن، ترمولیت و کلسیت، تعداد هفت نمونه از پهنه‌های مختلف اسکارن معدن جو انتخاب شد. این کانی‌ها شامل: ۱- گارنت، از پهنه‌های گارنت و پیروکسن-گارنت اسکارن، ۲- پیروکسن، از پهنه پیروکسن اسکارن، ۳- ترمولیت، از پهنه ترمولیت-اکتینولیت اسکارن و ۴- کلسیت از پهنه‌های منیتیت و گارنت-پیروکسن اسکارن می‌باشد. در این پژوهش، تعداد ۷۰ میانبار سیال اولیه مورد آزمایش ریزدماسنجی قرار گرفت.

پetroگرافی میانبارهای سیال

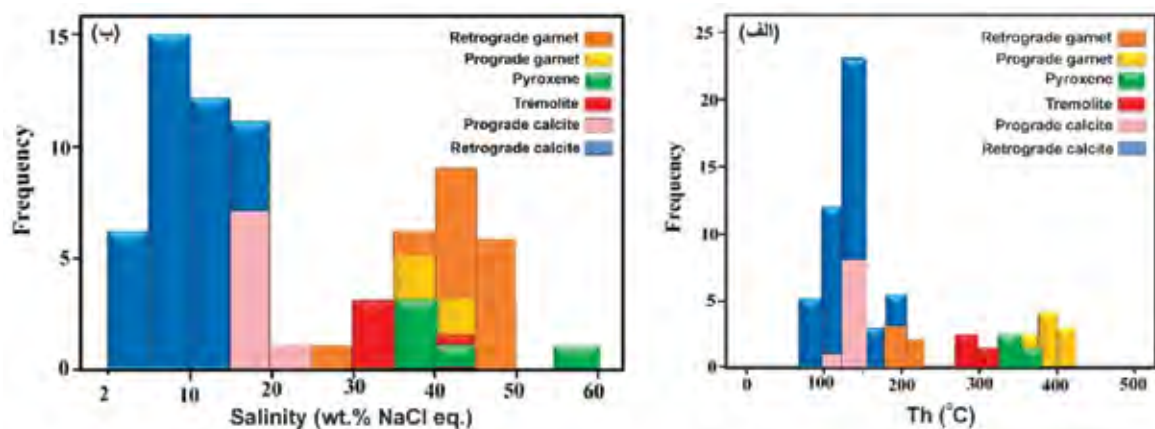
پetroگرافی، یکی از مهم‌ترین مراحل مطالعه میانبارهای سیال است. میانبارهای سیال در نمونه‌های معدن جو دارای اندازه‌های سه تا ۲۰ میکرون هستند. میانبارهای سیال از نظر شکل ظاهری به صورت‌های بی‌شکل، نیمه‌شکل‌دار، تمام‌شکل‌دار، کشیده و بلور منفی می‌باشند. در برخی از میانبارهای سیال پدیده باریک‌شدگی نیز دیده می‌شود. از دید ژنتیکی، میانبارهای سیال از نوع میانبارهای اولیه (P) و ثانویه (S) تشخیص داده شده‌اند. این میانبارها در همه نمونه‌ها بیشتر دارای دو فاز ترکیبی مایع و گاز هستند و میانبارهای تک‌فازی مایع و سه‌فازی جامد-مایع-گاز به



شکل ۱۱. تصاویر میانبرهای سیال از کانی‌های اسکارن معدن جو. الف) میانبرهای سیال دوفازی (V+L)، (L+V) در کلسیت، ب) میانبرهای سیال تک‌فازی (L)، دوفازی (L+V) و (V+L)، سه‌فازی (L+V+S) و میانبرهای ثانویه در گارنت، ت) میانبرهای سیال دوفازی (L+V) در پیروکسن

۱۲۰ تا ۱۳۵ درجه سانتی‌گراد و کلسیت پس از کانه‌زایی از ۹۵ تا ۱۹۰ درجه سانتی‌گراد تغییر می‌کند. در کل دامنه تغییرات دما برای تمام کانی‌ها از ۹۵ تا ۴۱۰ درجه سانتی‌گراد است. مقدار کمینه دما برای کلسیت و مقدار بیشینه آن برای گارنت مرحله پیش‌رونده ثبت شده است (شکل ۱۲-الف). مقدار شوری میانبرهای سیال برای پیروکسن از ۳۷/۱۷ تا ۵۷/۵۷، گارنت پیش‌رونده از ۳۳/۰۲ تا ۴۲/۳۸، گارنت

تاخیری از ۲۹/۵۳ تا ۴۹/۰۵، ترمولیت از ۳۵/۴۰ تا ۴۲/۳۸، کلسیت تاخیری از ۱۶/۳۳ تا ۲۷/۱۴ و برای کلسیت پس از کانه‌زایی از ۲/۰۱ تا ۱۵/۳۲ درصد وزنی معادل نمک طعام در تغییر است. کمینه شوری با مقدار ۲/۰۱ در کلسیت و بیشینه آن با مقدار ۵۷/۵۷ درصد وزنی معادل نمک طعام در پیروکسن ثبت شده است (شکل ۱۲-ب).



شکل ۱۲. مطالعات ریزدماسنجی میانبرهای سیال در اسکارن آهن معدن جو. الف) نمودار ستونی فراوانی دمای همگن شدن، ب) نمودار ستونی فراوانی شوری میانبرهای سیال در کانی‌های شاخص اسکارن

جدول ۴. نتایج مطالعات ریزدماسنجی میانبراهای سیال برای کلسیت، گارنت، پیروکسن و ترمولیت در اسکارن آهن معدن جو

Sample-Point	Size (μm)	Type	Phases	Te (°C)	Tm (ice) (°C)	Th (°C)	Salinity (wt. % NaCl eq.)
SM-13		گارنت					
۱	۳	P	L+V	-۱۳۵	-۴۶	۱۹۵	۴۳/۵۸
۲	۵	P	L+V	-۱۰۹	-۴۳	۲۰۰	۴۰/۱۴
۳	۴	P	L+V	-۱۰۰	-۵۰	۱۹۰	۴۹/۰۴
۴	۳	P	L+V	-۱۱۰	-۴۵	۱۸۵	۴۲/۳۷
۵	۴	P	L+V	-۱۱۵	-۵۰	۱۸۰	۴۹/۰۵
۶	۳	P	L+V	-۸۵	-۴۰	۱۷۰	۳۷/۱۷
۷	۵	P	L+V	-۹۵	-۴۸	۱۹۰	۴۶/۱۸
۸	۴	P	L+V	-۹۰	-۴۵	۱۸۰	۴۲/۳۸
۹	۳	P	L+V	-۸۵	-۳۵	۱۸۵	۳۳/۰۲
۱۰	۷	P	V+L	-۷۵	-۳۰	۲۰۰	۲۹/۵۳
۱۱	۵	P	L+V	-۹۵	-۳۵	۴۱۰	۳۳/۰۲
۱۲	۴	P	L+V+S	-۱۱۰	-۴۵	۴۰۵	۴۲/۳۸
۱۳	۵	P	L+V	-۱۰۰	-۴۵	۴۰۰	۴۲/۳۸
۱۴	۶	P	L+V	-۱۰۰	-۳۵	۳۹۰	۳۳/۰۲
۱۵	۷	P	L+V	-۱۰۵	-۳۸	۳۹۵	۳۵/۴۰
SM-13		کلسیت					
۱	۳	P	L+V	-۳۵	-۶	۱۲۵	۹/۴۹
۲	۷	P	L+V	-۴۰	-۱۱	۱۱۰	۱۵/۳۲
۳	۵	P	L+V	-۳۵	-۵	۱۰۵	۸/۱۳
۴	۳	P	L+V	-۳۲	-۸	۹۵	۱۲/۰۰
۵	۴	P	L+V	-۳۵	-۵	۱۰۰	۸/۱۳
۶	۷	P	L+V	-۴۲	-۱۵	۱۳۰	۱۹/۰۸
۷	۷	P	L+V	-۳۷	-۱۲	۱۳۵	۱۶/۳۳
۸	۶	P	L+V	-۳۷	-۱۱	۱۴۰	۱۵/۳۲
SM-55-67		کلسیت					
۹	۴	P	L+V	-۴۰	-۱۰	۱۲۰	۲۷/۱۴
۱۰	۵	P	L+V	-۳۵	-۸	۱۲۵	۱۲/۰۰
۱۱	۴	P	L+V	-۲۸	-۸	۹۵	۱۲/۰۰
۱۲	۴	P	L+V	-۲۳	-۱۲	۱۰۰	۱۶/۳۳
۱۳	۵	P	L+V	-۳۵	-۹	۱۰۵	۱۳/۱۶
۱۴	۵	P	L+V	-۲۷	-۱۱	۹۵	۱۵/۳۲
۱۵	۵	P	L+V	-۳۸	-۴	۱۱۰	۶/۷۱
۱۶	۴	P	L+V	-۳۰	-۲	۱۰۰	۳/۶۵
۱۷	۵	P	L+V	-۳۳	-۸	۹۵	۱۲/۰۰
۱۸	۵	P	L+V	-۳۲	-۷	۹۵	۱۰/۷۷
۱۹	۶	P	L+V	-۴۵	-۲	۱۹۰	۳/۶۵
۲۰	۵	P	L+V	-۳۷	-۱	۱۸۵	۲/۰۱
۲۱	۵	P	L+V	-۳۵	-۶	۱۸۵	۹/۴۹
۲۲	۵	P	L+V	-۴۰	-۲	۱۴۳	۳/۶۵
۲۳	۴	P	L+V	-۳۷	-۴	۱۳۷	۶/۷۱
۲۴	۵	P	L+V	-۳۷	-۵	۱۳۰	۸/۱۳
۲۵	۵	P	L+V	-۳۰	-۴	۱۳۲	۶/۷۱
۲۶	۴	P	V+L	-۴۲	-۴	۱۳۰	۶/۷۱
۲۷	۶	P	V+L	-۳۵	-۳	۱۲۵	۵/۲۲

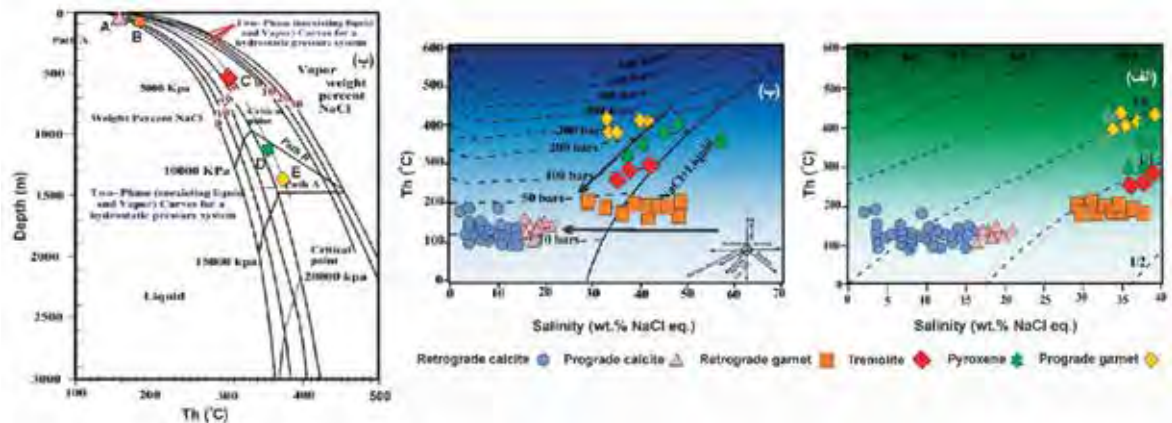
ادامه جدول ۴.

Sample-Point	Size (μm)	Type	Phases	Te ($^{\circ}\text{C}$)	Tm (ice) ($^{\circ}\text{C}$)	Th ($^{\circ}\text{C}$)	Salinity (wt. % NaCl eq.)
۲۸	۶	P	V+L	-۳۵	-۵	۱۲۷	۸/۱۳
۲۹	۵	P	L+V	-۳۶	-۲	۱۲۷	۳/۶۵
۳۰	۶	P	L+V	-۳۸	-۴	۱۳۰	۶/۷۱
۳۱	۷	P	L+V	-۳۵	-۸	۱۲۵	۱۲/۰۰
۳۲	۷	P	L+V	-۳۲	-۷	۱۲۰	۱۰/۷۷
۳۳	۶	P	L+V	-۳۴	-۶	۱۲۰	۹/۴۹
۳۴	۵	P	L+V	-۳۱	-۵	۱۱۵	۸/۱۳
۳۵	۶	P	L+V	-۴۰	-۱۰	۱۳۵	۱۴/۲۷
۳۶	۶	P	L+V	-۳۷	-۷	۱۴۰	۱۰/۷۷
۳۷	۵	P	L+V	-۳۳	-۴	۱۲۵	۶/۷۱
۳۸	۵	P	L+V	-۲۷	-۲	۱۲۰	۳/۶۵
۳۹	۱۰	P	L+V+S	-۴۲	-۱۱	۱۶۰	۱۵/۳۲
۴۰	۱۲	P	V+L	-۴۰	-۹	۱۳۰	۱۳/۱۶
۴۱	۵	P	L+V	-۴۳	-۱۷	۱۳۵	۲۰/۷۲
۴۲	۵	P	L+V	-۳۴	-۱۲	۱۳۰	۱۶/۳۳
۴۳	۴	P	L+V	-۳۳	-۱۳	۱۲۷	۱۷/۲۹
۴۴	۷	P	L+V	-۳۵	-۱۵	۱۲۴	۱۹/۰۸
۴۵	۶	P	L+V	-۳۵	-۱۴	۱۲۵	۱۸/۲۰
SM-01					پیروکسن		
۱	۶	P	L+V	-۹۵	-۴۲	۳۵۰	۳۹/۱۰
۲	۴	P	L+V	-۹۰	-۴۷	۳۸۰	۴۴/۸۵
۳	۳	P	L+V	-۹۴	-۴۵	۳۷۵	۴۲/۳۸
۴	۵	P	L+V	-۹۲	-۵۵	۳۵۵	۵۷/۵۷
۵	۴	P	L+V	-۷۰	-۴۰	۳۳۰	۳۷/۱۷
SM-11					ترمولیت		
۱	۵	P	L+V	-۷۵	-۴۳	۳۰۰	۴۲/۳۸
۲	۴	P	L+V	-۷۰	-۴۰	۲۸۵	۳۷/۱۷
۳	۳	P	L+V	-۶۵	-۳۸	۲۷۵	۳۵/۴۰

بحث

براساس نمودار دما-فشار-عمق (Haas, 1971)، کلسیت و گارنت تاخیری در عمق ۱۰۰ تا ۱۵۰ متر، ترمولیت در عمق ۶۰۰ متر، پیروکسن در عمق ۱۲۰۰ و گارنت پیش‌رونده در عمق ۱۴۰۰ متر تشکیل شده است. براساس مقادیر کمینه و بیشینه دمای همگن‌شدن و شوری، عمق تقریبی کانه‌زایی به ترتیب ۱۰۰ متر و ۱۴۰۰ متر تخمین زده می‌شود (شکل ۱۳-پ). لازم به ذکر است که عمق تخمینی برای تبلور پیروکسن بر اساس داده‌های میانبار سیال (۱/۲ کیلومتر) با عمق محاسبه شده بر اساس دما-فشارسنجی پیروکسن (یک تا ۲/۵ کیلومتر، شکل ۱۰-الف) تایید می‌شود.

چگالی، فشار و عمق به دام افتادن میانبرهای سیال
با استفاده از نمودارهایی که بر اساس دمای همگن‌شدن و شوری میانبرهای سیال برای محاسبه چگالی، فشار بخار و عمق به دام افتادن میانبرهای سیال طراحی شده است (Driesner and Heinrich, 2007; Wilkinson, 2001)، چگالی سیال‌ها برای همه کانی‌ها از یک تا ۱/۱ تغییر می‌کند و فشار بخار در دامنه‌ی ۱۰ تا ۴۰۰ بار قرار می‌گیرد، پیروکسن و گارنت پیش‌رونده تحت فشار بخار ۱۰۰ تا ۴۰۰ بار و ترمولیت، گارنت تاخیری و کلسیت تاخیری تحت فشار بخار کمتر از ۱۰۰ بار تشکیل شده‌اند (شکل ۱۳-الف، ب).



شکل ۱۳. الف) نمودار دما-شوری برای تعیین چگالی محلول‌های $\text{NaCl-H}_2\text{O}$ اشباع از بخار (Wilkinson, 2001)، ب) نمودار تعیین فشار بخار محلول بر حسب دمای همگن شدن و شوری (Driesner and Heinrich, 2007)، آمیختگی سیال‌ها، رقیق شدگی سیال و جوشش از عوامل مهم در نهشت کانی‌ها در اسکارن معدن‌جو هستند، پ) نمودار دما-فشار-عمق جهت تعیین عمق تشکیل کانسار (Haas, 1971)، (در نمودار عمق تقریبی به دام افتادن میانبارهای سیال در کانی‌های شاخص اسکارن معدن‌جو مشخص شده است)

منشاء و تکامل سیال کانسار ساز

سیال و کاهش انحلال‌پذیری عناصر کانه‌ساز و نهشت ماده معدنی می‌شود (تقی‌پور و بذرافشان، ۱۳۹۴؛ Drummond and Ohmoto, 1985). به عبارتی سیال گرمابی و شور اولیه با سیال با درجه شوری پایین‌تر (آب‌های جوی و آب‌های سازندی) در انتهای مراحل کانه‌زایی مخلوط شده است. همچنین وجود بلورهای نمک NaCl در میانبارهای سیال نشان می‌دهد، کاتیون‌های آهن از طریق یون‌های کلر منتقل شده‌اند. میزان کلرید محلول‌های متاسوماتیکی به احتمال زیاد بیشترین کنترل‌کننده انتقال و ته‌نشست آهن در اسکارن‌ها است (Meinert, 1992). بر اساس نتایج مطالعه میانبارهای سیال سه مرحله پاراژنتیک اصلی تشکیل اسکارن و نهشت مواد معدنی در کانسار معدن‌جو شناخته شده است: ۱) مرحله پیش‌رونده با تشکیل پیروکسن و گارنت‌های پیش‌رونده در دمای ۳۳۰ تا ۴۱۰ درجه سانتی‌گراد با شوری سیال بین ۳۳ تا ۵۸ درصد وزنی معادل نمک NaCl توسعه یافته است، ۲) مرحله پس‌رونده با پیدایش گارنت‌های تاخیری، ترمولیت-اکتینولیت و کلسیت مرحله تاخیری در دمای ۱۲۰ تا ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد با شوری سیال ۱۶ تا ۴۹ درصد وزنی معادل NaCl تشکیل شده است و ۳) مرحله پس از کانه‌زایی با رگه‌های کلسیت و بندرت کوارتز که در دمای ۹۵ تا ۱۹۰ درجه سانتی‌گراد با دامنه شوری ۲ تا ۱۵ درصد وزنی معادل NaCl بوجود آمده است.

در نهشت کانی‌ها و تشکیل ذخایر معدنی، عوامل تغییر دما (سرد شدن سیالات کانه‌ساز)، تغییر فشار، تغییرات شیمیایی ناشی از واکنش سیال کانه‌ساز با سنگ میزبان و تغییرات شیمیایی ناشی از پدیده آمیختگی سیال‌های ماگمایی و جوی و جوشش سیال از اهمیت بالایی برخوردار هستند (Barnes, 1997). جوشش و آمیختگی سیالات دو عامل مهمی هستند که همواره باعث فوق اشباع شدن سریع سیالات ماگمایی و ایجاد شرایط لازم جهت ته‌نشست کانه‌ها در سنگ‌های میزبان می‌شوند (Wilkinson, 2001). بر اساس داده‌های ریزدماسنجی، پراکنش شوری‌ها در مقابل دمای همگن‌شدگی در میانبارهای سیال اسکارن معدن‌جو، روندهای متفاوت آمیختگی هم‌دما، جوشش و رقیق‌شدگی سطحی سیال مشاهده می‌شود (شکل ۱۳-ب). فرآیندهای آمیختگی هم‌دما و رقیق‌شدگی سطحی سیالات از عوامل مهم در ناپایداری کمپلکس‌های کلریدی و نهشت آهن در پهنه‌های اسکارنی و به دنبال آن تشکیل فازهای سولفیدی و اکسیدی در مراحل پایانی کانه‌زایی است. پدیده جوشش سیال نیز در نتیجه کاهش ناگهانی فشار در شکستگی‌ها و گسل‌ها ایجاد می‌شود. شواهدی از قبیل وجود ساختار برشی و میانبارهای سیال غنی از بخار رخداد احتمالی جوشش سیال را در پهنه معدن‌جو تایید می‌کنند. پدیده آمیختگی سیال‌ها موجب کاهش دمای سیستم، کاهش دمای انحلال

مقایسه کانسار آهن معدن جو با سایر کانسارهای آهن در ناحیه سنگان

بر اساس مقادیر غلظت عناصر اصلی و کمیاب، شیمی منیته‌های معدن جو در گستره کانسارهای آهن اسکارن قرار می‌گیرند (شکل ۸-ث). در ترکیب الیوین مقدار MgO از ۵۸/۲۵ درصد تا ۵۹/۴۵ درصد و SiO_2 از ۳۴/۰۱ تا ۳۴/۴۹ تغییر می‌کند و از نظر ترکیب شیمیایی در گستره فورستریت هستند (شکل ۹). مطالعات انجام شده روی آنومالی‌های آهن غربی (آنومالی‌های A، A'، C جنوبی و شمالی)، مرکزی (آنومالی‌های باغک و دردوی) و شرقی (آنومالی سنجدک I) نشان می‌دهد، آنومالی‌های آهن A، A' و C جنوبی از نوع اسکارن کلسیمی هستند و با حرکت به سوی شرق، اسکارن کلسیمی به منیزیمی تغییر می‌یابد به طوری که آنومالی‌های C شمالی، باغک، دردوی و سنجدک I ترکیب منیزیمی دارند (Golmohammadi et al., 2015)؛ مظهری و همکاران، ۱۳۹۵). کانه‌زایی آهن بغل‌بید که از آنومالی‌های شرقی آهن سنگان است از نوع گرمایی معرفی شده است (سربوزی حسین‌آبادی و همکاران، ۱۳۹۹). اگرچه ویژگی‌های زمین‌شناسی، کانی‌شناسی و ژئوشیمیایی آنومالی آهن معدن جو بی‌شبهت با سایر آنومالی‌های آهن در ناحیه معدنی سنگان نیست، با وجود این قرابت آن به آنومالی سنجدک I بیشتر است و ترکیب منیزیمی دارد.

نتیجه‌گیری

کانسار آهن معدن جو در بخش شرقی ناحیه معدنی سنگان در شمال شرق ایران واقع است. سنگ‌های آهکی و دولومیتی کرتاسه بالایی میزبان اصلی کانه‌زایی آهن است و در امتداد ساختارهای گسلی با روند NE-SW و در مجاورت با توده‌های نفوذی دگرگون شده‌اند. اگرچه رخنمونی از سنگ‌های نفوذی در معدن جو مشاهده نمی‌شود، اما وجود کانی الیوین در پهنه اسکارن شاهدهی بر نزدیکی سنگ‌های میزبان به توده‌های نفوذی است و رخنمون توده‌های بیوتیت گرانیته در سه کیلومتری گستره مورد مطالعه، این گفته را تایید می‌کند. تشکیل کانی‌های کالک‌سیلیکاتی بی‌آب الیوین، پیروکسن و گارنت و سیلیکات‌های آبدار فلوگوپیت، ترمولیت، اکتینولیت، هورنبلند، اپیدوت و کلریت، اسکارن‌زایی را تایید می‌کند. کانه‌زایی آهن (بیشتر مگنتیت) به صورت‌های توده‌ای، نواری، رگه-رگچه‌ای، برشی و دانه‌پراکنده در گذر از

در گستره معدن جو، کانه‌زایی آهن (بیشتر به صورت منیته) با ساختار توده‌ای، نواری، رگه-رگچه‌ای، برشی و دانه‌پراکنده در سنگ‌های میزبان رسوبی دگرگون شده (بیشتر سنگ‌های آهکی-دولومیتی) در مرحله عبور از فاز پیش‌رونده به تاخیری و به همراه سیلیکات‌های بدون آب تشکیل شده است (شکل ۴-الف-ج). توده‌های نفوذی و ساختارهای زمین‌شناسی از قبیل گسل‌ها و درزه‌ها مجراهایی برای عبور سیال کانه‌ساز هستند و در رخداد کانه‌زایی نقش مهمی دارند. اسکارن معدن جو بر اساس نوع و درصد کانی‌های شاخص به مناطق مختلف تقسیم شده است. ترکیب گارنت‌های معدن جو در گستره آندرادیت-گراسولار (بیشتر آندرادیت) و ترکیب پیروکسن‌ها در گستره دیوپسید-هدنبرگیت (بیشتر دیوپسید) و در گستره اسکارن‌های آهن دار قرار می‌گیرند (شکل‌های ۷-پ، ۸-پ). ترکیب اجزای گارنت‌های معدن جو میان Andradit: 49.82-83.60، Grossular: 10.44- میان 42.38، Spessartine: 0.26-0.83 و پیروکسن معدن جو میان Wollastonite: 39.18-50.77، Enstatite: 33.99- میان 4.89-16.43، Forsterite: 50.69 در نوسان است. در آنومالی آهن سنجدک I تغییرات ترکیب گارنت‌ها از مرکز به حاشیه برای آندرادیت از ۴۲/۶ تا ۱۰۰ درصد، برای گراسولار از صفر تا ۵۵/۳۲ درصد و برای اسپسارتین از صفر تا ۱/۳۹ درصد در تغییر است و ترکیب پیروکسن‌ها برای دیوپسید از ۶۳ تا ۹۲ درصد، برای هدنبرگیت از چهار تا ۳۵ درصد و برای ژوهانسیت از ۰/۵ تا ۳/۹ درصد تغییر می‌کند (مظهری و همکاران، ۱۳۹۵). ترکیب گارنت‌ها در آنومالی‌های آهن A، A' و C جنوبی، آندرادیت-گراسولار ($Adr_{50-97}Grs_{0-45}$) و ترکیب پیروکسن‌ها هدنبرگیت-دیوپسید ($Sps-Alm_{2-7}$) است. ترکیب پیروکسن‌های آنومالی‌های آهن باغک و C شمالی دیوپسیدی ($Hd_{20}Di_{80}$) است (Golmohammadi et al., 2015). ترکیب گارنت‌ها در آنومالی آهن دردوی آندرادیت-گراسولار ($Andradite_{40}$) و ترکیب پیروکسن‌ها در گستره دیوپسید-هدنبرگیت (بیشتر دیوپسید) است (Mehrabiet al., 2021).

منشا کان سنگ آهن عنبر کوه استان فارس. فصلنامه زمین شناسی ایران، ۹، ۳۴، ۸۵-۱۰۲.

- رحمانی جوانمرد، س.، طهماسبی، ز.، دینگ، ز. و احمدی خلجی، ا.، ۱۳۹۹. بررسی رفتار زمین شیمیایی عناصر اصلی و کمیاب خاکی در گارنت های موجود در سنگ های دگرگونی پهنه بروجرد (پهنه سندرچ-سیرجان). فصلنامه زمین شناسی ایران، ۱۴، ۵۳، ۸۷-۱۰۷.

- سربوزی حسین آبادی، آ.، بومری، م. و گل محمدی، ع.، ۱۳۹۹. مطالعه کانه زائی آهن بغل بید با استفاده از شواهد زمین شناسی، کانی شناسی و ژئوشیمی، سنگان خواف در شمال خاوری ایران. فصلنامه زمین شناسی ایران، ۱۴، ۵۴، ۵۴-۳۷.

- فتوت جامی، م.، ۱۳۹۸. کانی شناسی، دگرسانی، ژئوشیمی و الگوی پیدایش کانسار آهن معدن جو، آنومالی شرقی معدن سنگ آهن سنگان، جنوب شرقی خواف. پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شاهرود، ۳۰۲. - گل محمدی، ع.، مظاهری، س.ا.، ملک زاده سفارودی، آ. و کریم پور، م.ح.، ۱۳۹۳. سن سنجی زیرکن با روش U-Pb و ژئوشیمی توده های گرانیتی سرخر و برمانی شرق معدن سنگ آهن سنگان خواف. مجله پترولوژی، ۵، ۱۷، ۸۳-۱۰۲.

- مظهری، ن.، ملک زاده سفارودی، آ. و قادری، م.، ۱۳۹۵. ژئوشیمی توده های نفوذی، سنگ شناسی اسکارن، کانی شناسی و شیمی ماده معدنی در آنومالی سنجک I، خاور مجموعه معدنی سنگان خواف. فصلنامه علوم زمین، ۲۵، ۱۰۰، ۲۴۶-۲۳۵.

- Aydin, F., Thompson, R.M., Karsli, O., Uchida, H., Burt, J.B. and Downs, R.T., 2009. C2/c pyroxene phenocrysts from three potassic series in the Neogene alkaline volcanics, NE Turkey: their crystal chemistry with petrogenetic significance as an indicator of P-T conditions. Contribution in Mineralogy and Petrology, 158 (1), 131-147.

- Barnes, H.L., 1997. Geochemistry of hydrothermal ore deposits. 3rd Edition, New York, John Wiley and Sons, 992.

- Beane, R.E., 1983. The Magmatic-metamorphic transition. Geothermal Resources Council, Special Report, 13, 245-253.

مرحله اسکارن پیش رونده به مرحله تاخیری رخ داده است. ترکیب شیمیایی گارنت، پیروکسن و منیتیت معدن جو در گستره اسکارن های آهن دار قرار می گیرد. داده های میان بار سیال نشان می دهد، کانی های اسکارن پیش رونده در دمای ۳۳۰ تا ۴۱۰ درجه سانتی گراد و شوری ۳۳ تا ۵۸ درصد وزنی معادل نمک NaCl، کانی های اسکارن تاخیری در دمای ۱۲۰ تا ۳۰۰ درجه سانتی گراد و شوری ۱۶ تا ۴۹ درصد وزنی معادل NaCl و رگه های کلسیت و کوارتز پس از کانه زائی در دمای ۹۵ تا ۱۹۰ درجه سانتی گراد و شوری دو تا ۱۵ درصد وزنی معادل NaCl تشکیل شده است. به عبارتی آب ماگمایی مسئول تشکیل کانی های اسکارن پیش رونده دمای بالا و شوری زیاد است. با رقیق شدگی سیال ماگمایی و کاهش دمای آن در نتیجه اختلاط با آب جوی و جوشش سیال شرایط برای تشکیل سیلیکات های آب دار مرحله تاخیری و در ادامه برای کلسیت و کوارتز پس از کانه زائی فراهم می شود. شواهد صحرایی، همیافتی کانی شناسی، شیمی کانی و میان بار سیال تیپ کانه زائی آهن معدن جو را آگزواسکارن منیزیمی پیشنهاد می کند.

سپاسگزاری

نگارندگان مقاله از دانشکده علوم زمین دانشگاه صنعتی شاهرود که بستر و محیط مناسبی را برای انجام این پژوهش آماده کرده اند، سپاسگزاری می نمایند. از همکاری معاونت محترم وقت برنامه ریزی توسعه و اکتشاف مجتمع معدن سنگ آهن سنگان جناب آقای دکتر عباس گل محمدی و مدیریت محترم اکتشاف جناب آقای مهندس علی اکبر بادامه کمال امتنان را داریم. از مرکز تحقیقات فرآوری مواد معدنی ایران وابسته به سازمان توسعه و نوسازی معادن صنایع معدنی ایران که تجزیه های ریزکاو الکترونی را انجام دادند، قدردانی می شود. از دست اندرکاران محترم مجله و داورانی که ارزیابی مقاله حاضر را قبول می فرمایند، تشکر می شود.

منابع

- تقی پور، ب. و بذرافشان، آ.، ۱۳۹۴. سنگ شناسی و زمین شیمی کمپلکس ماگمایی-دگرگونی توتک و تعیین

- Deer, W.A., Howie, R.A. and Zussman, J., 1996. An introduction to the rock-forming minerals. 2 ed. Hong Kong, Longman, 695.
- Drummond, S.E. and Ohmoto, H., 1985. Chemical evolution and mineral deposition in boiling hydrothermal systems. *Economic Geology*, 80, 126-147.
- Dupuis, C. and Beaudoin, G., 2011. Discriminant diagrams for iron oxide trace element fingerprinting of mineral deposit types. *Mineralium Deposita*, 46(4), 319-335.
- Driesner, T. and Heinrich, C.A., 2007. The system H₂O-NaCl. Part I: Correlation formulae for phase relations in temperature-pressure-composition space from 0 to 1000 °C, 0 to 5000 bars, and 0 to 1X NaCl. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 71(20), 4880-4901.
- Einaudi, M., Meinert, L.D. and Newberry, R.J., 1981. Skarn deposits. *Economic Geology*, 75th Anniversary Volume, 317-391.
- Golmohammadi, A., Karimpour, M.H., Malekzadeh Shafaroudi, A. and Mazaheri, S.A., 2015. Alteration-mineralization, and radiometric ages of the source pluton at the Sangan iron skarn deposit, northeastern Iran. *Ore Geology Reviews*, 65(2), 545-563.
- Groat, L.A., Turner, D.J. and Evans, R.J., 2014. Gem Deposits. In *Treatise on Geochemistry*, 2nd ed.; Holland, H.D., Ed.; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 13, 595-622.
- Haas, J.L., 1971. The effect of salinity on the maximum thermal gradient of a hydrothermal system at hydrostatic pressure. *Economic Geology*, 66 (6), 940-946.
- John, D.A., Ayuso, R.A., Barton, M.D., Blakely, R.J., Bodnar, R.J., Dilles, J.H., Gray, Floyd, Graybeal, F.T., Mars, J.C., McPhee, D.K., Seal, R.R., Taylor, R.D. and Vikre, P.G., 2010. Porphyry copper deposit model, chap. B of Mineral deposit models for resource assessment. U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report, 5070-B, 169.
- Mehrabi, B., Ghasemi Siani, M., Zhang, R., Neubauer, F., Lentz, D.R., Tale Fazel, E. and Karimi Shahraki, B., 2021. Mineralogy, petrochronology, geochemistry, and fluid inclusion characteristics of the Dardvay skarn iron deposit, Sangan mining district, NE Iran. *Ore Geology Reviews*, 134, 104146.
- Meinert, L.D., Dipple, G.M. and Nicolescu, S., 2005. World Skarn Deposits. *Economic Geology 100th Anniversary: Littleton, CO, USA, Volume 299-336*.
- Meinert, L.D., 1992. Skarns and skarn deposits. *Geoscience Canada*, 19 (4), 145-162.
- Nimis, P. and Taylor, W.R., 2000. Single clinopyroxene thermobarometry for garnet peridotites. Part 1 Calibration and testing of a Cr-in-cpx barometer and an enstatite-in-cpx thermometer. *Contribution in Mineralogy and Petrology*, 139, 541-554.
- Putirka, K.D., 2008. Thermometers and barometers for volcanic systems, in: *Minerals, inclusions and volcanic processes*, edited by: Putirka, K. and Tepley, F. *Review in Mineralogy and Geochemistry*, 69, 61-120.
- Shepherd, T.J., Rankin, A.H. and Alderton, D.H.M., 1985. A practical guide to fluid inclusion studies. Blackie, Glasgow, 239.
- Stöcklin, J., 1968. Structural history and tectonics of Iran: a review. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 52 (7), 1229-1258.
- Whitney, D.L. and Evans B.W., 2010. Abbreviations Sheferd et al., for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist*, 95, 185-187.
- Wilkinson, J.J., 2001. Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits. *Lithos*, 55(1-4), 229-272.
- Yavuz, F., 2013. WinPyrox: A Windows program for pyroxene calculation classification and thermobarometry. *American Mineralogist*, 98(7), 1338-1359.

تلفیق داده‌های زمین‌شناسی، ژئوشیمیایی، دگرسانی و سنجش از دور به منظور معرفی پتانسیل‌های کانه‌زایی در منطقه سربیشه، خراسان جنوبی

سروش مدبری^{۱*}، مینا آذری‌فر^۲، ثمین شمس‌الدین احمدی^۳ و داود رئیسی^۴

۱. دانشیار دانشکده زمین‌شناسی، دانشکده‌گان علوم، دانشگاه تهران

۲. دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده زمین‌شناسی، دانشکده‌گان علوم، دانشگاه تهران

۳. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده زمین‌شناسی، دانشکده‌گان علوم، دانشگاه تهران

۴. پژوهشگر پسادکتری، دانشکده زمین‌شناسی، دانشکده‌گان علوم، دانشگاه تهران

۵. شرکت معادن و صنایع معدنی کارند صدر جهان

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۹/۲۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۲/۲۴

چکیده

پهنه سربیشه در غرب شهر سربیشه و جنوب شرقی بیرجند، استان خراسان جنوبی، واقع است. این منطقه در زون آمیزه افیولیتی بیرجند قرار دارد و بخش شمالی کمربند فلززایی ایران‌شهر-بیرجند را شامل می‌شود. واحدهای سنگ‌شناسی منطقه شامل آمیزه افیولیتی، رسوبات رخساره فلیش، سنگ‌های آذرآواری و رسوبات کواترنری است. مطالعات ژئوشیمیایی رسوب آبراهه‌ای و شناسایی شاخص‌های ژئوشیمیایی مرتبط با ذخایر معدنی منطقه، با استفاده از نتایج تجزیه ژئوشیمیایی و به روش تحلیل مولفه‌های اصلی انجام شده است. مطالعات سنجش از دور به روش ترکیبات رنگی بر روی تصویر ماهواره استر و لندست، و همچنین تحلیل مؤلفه‌های اصلی انتخابی (کروستا) بر روی تصویر ماهواره لندست ۸، به منظور شناسایی زون‌های دگرسانی انجام شده است. خطواره‌های منطقه به روش فیلتر بالاگذر از تصویر ماهواره استر و تصویر گوگل طراحی شد. در نهایت با ایجاد لایه‌های شاهد از واحدهای زمین‌شناسی، داده‌های ژئوشیمیایی، دگرسانی و خطواره‌های گسلی و تلفیق فازی آنها مناطق مستعد کانه‌زایی عناصر نیکل، کروم، کبالت، مس، سرب، روی و منیزیت بارزسازی شد.

واژه‌های کلیدی: پتانسیل معدنی، تحلیل مولفه‌های اصلی، ترکیب داده‌ها، دگرسانی، منطق فازی.

مقدمه

برای اکتشاف و تلفیق اطلاعات معدنی و زمین‌شناسی استفاده شد و پایه‌های اصلی این مطالعات، شناخت رابطه بین نوع خاصی از کانی‌سازی با سنگ‌های ماگمایی و توده‌های نفوذی خاص، وجود منطقه‌بندی در کانی‌سازی، رابطه میان تکامل پوسته زمین و توسعه کانسارهای خاص و رابطه میان سنگ‌شناسی و کانسنگ‌ها است

متالورژی آمیخته‌ای از مجموعه علوم مرتبط با زمین است و قانونمندی طبیعی حاکم بر چگونگی تشکیل و توزیع زمانی و مکانی کانسارها را تعیین می‌کند. متالورژی نخستین بار به‌طور گسترده در نیمه دوم قرن بیستم در کشورهای مختلف استفاده شد. در اوایل قرن بیست و یکم از متالورژی

* نویسنده مرتبط: modabberi@ut.ac.ir

و گسل‌ها و شکستگی‌هایی که کانسارها را در خود تمرکز داده‌اند و (۲) تشخیص سنگ‌های دگرسان شده گرمایی از راه آثار طیفی آنها.

در رویکرد اول فرض بر این است که ذخایر معدنی در ارتباط با واحدهای سنگی خاص و یا در محل‌هایی با الگوی شکستگی بخصوص ایجاد می‌شوند. رویکرد دوم بر این حقیقت استوار است که محلول‌های گرمایی، ایجادکننده توده‌های معدنی هستند و سنگ میزبان اطراف خود را تحت تأثیر دگرسانی‌های مختلف قرار می‌دهند. تغییرات حاصل از دگرسانی در سنگ‌ها، میزان انرژی جذب‌شده و یا بازتاب‌شده در آنها را تغییر می‌دهد و به همین دلیل، با مطالعه تصاویر ماهواره‌ای به‌خوبی می‌توان مناطق دگرسانی را شناسایی کرد (Sabins, 1999).

پهنه سربیشه به مساحت ۹۰۰ کیلومتر مربع در استان خراسان جنوبی و ۴۵ کیلومتری جنوب شرقی بیرجند واقع شده است. نویسندگان این مقاله، با استفاده از روش تلفیق فازی (حیدریان دهکردی و همکاران، ۱۴۰۰) داده‌های ژئوشیمیایی آبراهه‌ای، دگرسانی و خطواره‌های حاصل از مطالعات سنجش از دور و همچنین واحدهای موثر سنگ‌شناسی، به ارزیابی فلزایی و منابع معدنی محتمل این پهنه پرداخته‌اند. مقاله حاضر به اکتشاف سیستماتیک در منطقه سربیشه و معرفی ذخایر معدنی سولفید توده‌ای، کرومیت و منیزیت پرداخته است.

زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در طول جغرافیایی $19^{\circ} 23' 59''$ تا $19^{\circ} 36' 43''$ عرض $59^{\circ} 45' 43''$ و $32^{\circ} 40' 4''$ تا $32^{\circ} 40' 4''$ واقع است. این منطقه بر اساس تقسیم‌بندی آقنابتی (۱۳۸۳) در زون ساختاری سیستان، شرق ایران قرار می‌گیرد. بخش مرکزی منطقه مورد مطالعه در کمربند فلیش و آمیزه رنگین شرق ایران با روند شمالی-جنوبی واقع شده است. منطقه جوش‌خورده سیستان در شرق ایران، یک شاخه از اقیانوس نئوتتیس با روند تقریباً شمالی-جنوبی است (Tirrul et al., 1983). اقیانوس سیستان با استناد بر مطالعات انجام شده، در زمان کرتاسه اولیه باز شده است

(Wang et al., 2020). در پنجاه سال گذشته، نیاز جهان به مواد معدنی به شدت رو به افزایش بوده است و چالش برای تامین به موقع و کافی این نیازها، باعث شده تا جامعه معدنی به شیوه‌های مختلف در جستجوی این مواد باشد (Porwal and González-Álvarez, 2019). اکتشاف مواد معدنی گستره‌ای وسیع از فعالیت‌ها، از شناسایی منطقه امیدبخش تا ارزیابی دقیق احجام و ذخیره ماده معدنی را در برمی‌گیرد (Haldar, 2013). هدف از اکتشافات ناحیه‌ای، شناسایی مناطق مستعد کانی‌سازی به منظور اجرای عملیات اکتشاف تفصیلی و شناسایی مواد معدنی مورد نیاز برای جامعه رو به توسعه است.

مطالعات اکتشافات ژئوشیمیایی در مقیاس ناحیه‌ای، یکی از پایه‌های اساسی عملیات اکتشافی است (Demetriades et al., 2018) که در بسیاری از نقاط جهان در فاز مقدماتی اکتشاف بر اساس نمونه‌برداری از رسوبات آبراهه‌ای صورت می‌پذیرد. بنیادی‌ترین پیش‌فرض این است که هر رسوب آبراهه‌ای، معرف محصولات هوازدگی و فرسایش در بالادست محل نمونه است. همچنین به‌طور تجربی ثابت شده است که تمرکزهای بی‌هنجار فلزات در رسوبات آبراهه‌ای در اجزای ریزدانه مشاهده می‌شود. نتایج حاصل از بررسی این نمونه‌ها می‌تواند در تحلیل ایالت‌های ژئوشیمیایی و شناخت الگوهای ژئوشیمیایی ناحیه‌ای و همچنین مناطقی که در آنها احتمال کشف نهشته‌های کانساری بیشتر است، بسیار مؤثر واقع شود (Gandhi and Sarkar, 2016).

سنجش از دور در تعریف جامعی که Sabins (1999) ارائه می‌دهد، علم به دست آوردن، پردازش، و تفسیر تصاویر و داده‌های مرتبط با آنها معرفی می‌شود که از هواپیما یا ماهواره به دست آمده و برهم‌کنش میان ماده و انرژی الکترومغناطیسی را ثبت می‌کند. استفاده از ابزار سنجش از دور در اکتشاف مواد معدنی از سال‌ها پیش مورد توجه قرار گرفته و در مناطق مختلف جهان برای منابع معدنی مختلف به‌کار گرفته شده است (Abrams and Yamaguchi, 2019).

تصاویر سنجش از دور، دو کاربرد در اکتشاف مواد معدنی دارند: (۱) به نقشه در آوردن واحدهای زمین‌شناسی

و رخساره‌های رسوبی-آواری حوضه‌های کافتی و سنگ‌های آتشفشانی است که سن آن‌ها به قبل از کرتاسه تا کرتاسه پایانی نسبت داده می‌شود. سنگ‌های مافیک و اولترامافیک، شامل پریدوتیت‌ها، هارزبورژیت‌ها و سرپانتین، دونیت و دایک‌های صفحه‌ای و سنگ‌های مافیک شامل گابرو (لابه‌ای و توده‌ای)، دیاباز و اسپیلیت است. سنگ‌های پریدوتیت به رنگ سبز تیره تا قهوه‌ای هستند و در شکستگی‌ها به اکسید آهن و سیلیس آغشته‌اند. معمولاً در حاشیه گسل‌ها و حواشی توده‌های سرپانتینی شده و به‌خصوص محل تقاطع گسل‌ها، همراه کربنات، کوارتز، اپال، تالک، کلریت، سریسیت و لیستیونیت یافت می‌شود.

۲. رسوبات رخساره فلیش: در این محدوده دو نوع فلیش به سن کرتاسه پایانی و پالئوسن وجود دارد. فلیش‌های کرتاسه پایانی، در بخش آمیزه افیولیت قرار دارند و معمولاً از شیل‌های سبزرنگ، ماسه‌سنگ و شیل‌های فیلیتی تشکیل شده‌اند. فلیش‌های جوان‌تر در حاشیه شمالی منطقه آمیزه افیولیتی قرار گرفته‌اند و توسط ماسه‌سنگ، سیلتستون و شیل‌های خاکستری‌رنگ به سن ترشیری آغازین یا احتمالاً پالئوسن می‌باشند، پوشیده می‌شود.

۳. سنگ‌های آذرآواری و رسوبات جوان: تناوبی از رخساره‌های آواری شامل شیل و ماسه‌سنگ‌های سبزرنگ، ارغوانی، رادیولاریت‌های قرمز رنگ و چرت‌دار خاکستری‌رنگ، سنگ‌های آتشفشانی، میکروکنگلومرا و کنگلومرای درون‌سازندی ماسه‌سنگ‌های قهوه‌ای‌رنگ و توف است. این مجموعه سنگی از نظر زمانی مربوط به پالئوسن تا ائوسن بالایی-الیگوسن است.

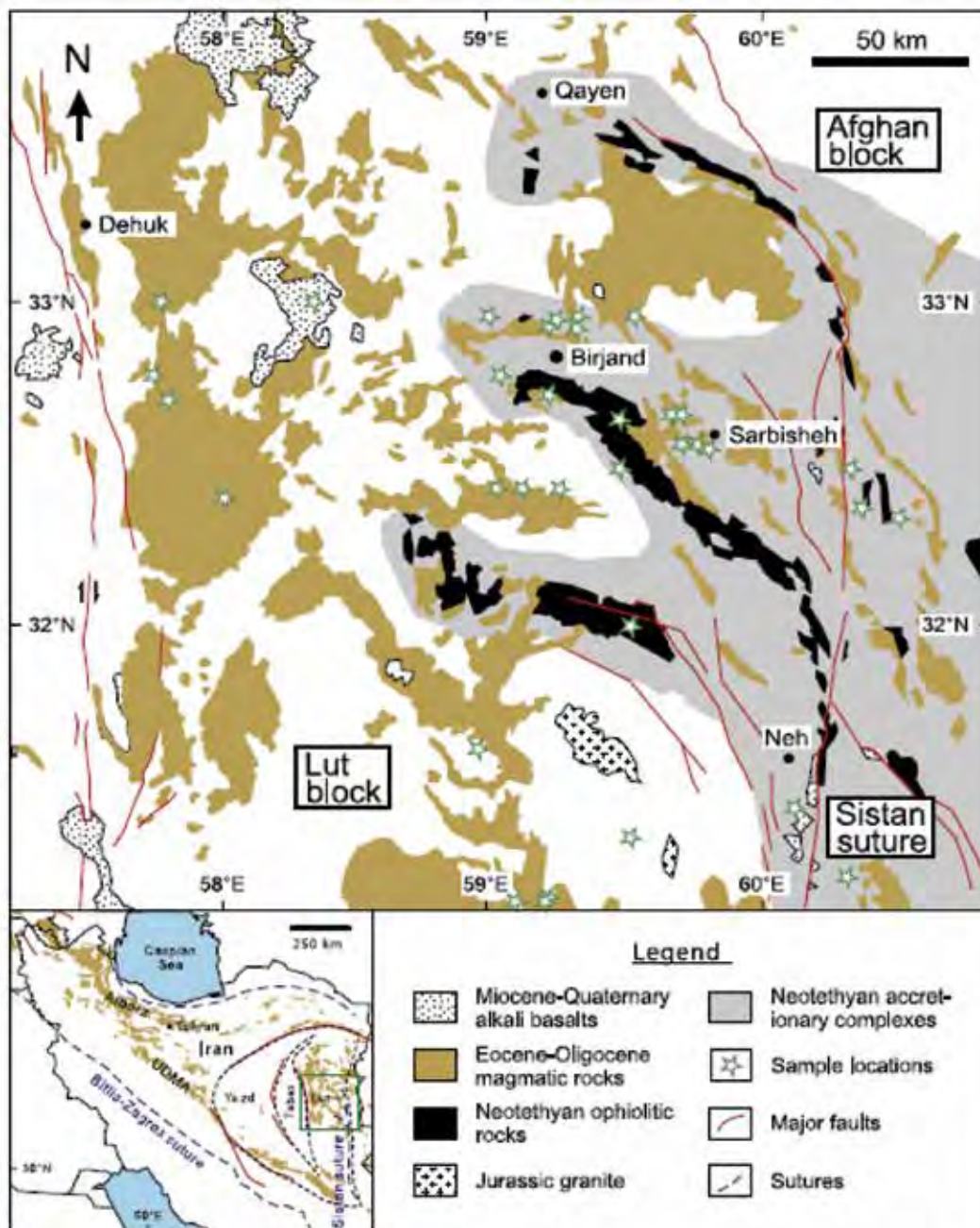
۴. رسوبات کواترنری: این رسوبات شامل مخروط‌افکنه‌ها، یادگانه‌های آبرفتی رودخانه‌ای و رسوبات جدید رودخانه‌ای، نهشته‌های دانه‌ریز از کلوت‌ها و دغ‌های رسی و بادرفت‌های تحکیم‌یافته و تحکیم‌نیافته که همه این سری نهشته‌ها بر روی واحدهای سنگی قدیمی‌تر منطقه قرار گرفته‌اند.

(Babazadeh and De Wever, 2004). زمان بسته شدن اقیانوس و برخورد بلوک‌های لوت-افغان میانه ائوسن یا کرتاسه پایانی پیشنهاد شده است (Saccani et al., 2010). در منطقه لوت-سیستان (۳۱ تا ۳۵ درجه شمالی و ۵۷ تا ۶۱ درجه شرقی) سنگ‌های ماگمایی ائوسن-الیگوسن رخنمون یافته‌اند (Karimpour et al., 2011). بر اساس بیرون‌زدگی‌ها، این سنگ‌ها در مساحت ۴۰۰ در ۳۰۰ کیلومتر گسترش یافته‌اند و ممکن است گستره آنها به غرب افغانستان نیز برسد (Richards et al., 2012). برخلاف ماگماتیسم در دیگر نقاط ایران که به شکل خطی یا کمربندهای ماگمایی منحنی (به عنوان مثال محدوده ارومیه-دختر و البرز) هستند، ماگماتیسم شرق ایران دارای یک الگوی پراکنده است (شکل ۱). حد شرقی ماگماتیسم شمال منطقه سیستان جوش خورده و حد غربی آن توسط گسل نایبند (گسل امتدادلغز با روند شمالی-جنوبی که در کرتاسه پایانی فعال بوده) مشخص می‌شود (Walker et al., 2009).

ماگماتیسم ائوسن-الیگوسن در شرق ایران سبب شکل‌گیری گسترده سنگ‌های آتشفشانی (گدازه‌ها و سنگ‌های آذرآواری) و سنگ‌های نیمه آتشفشانی شده است. سنگ‌های نفوذی به‌طور محدود در پلوتون‌های کوچک شکل گرفته‌اند. در منطقه جوش خورده سیستان، سنگ‌های آتشفشانی جزء جداناپذیری از چینه‌شناسی منطقه و متشکل از لایه ضخیمی از سنگ‌های رسوبی دریایی (فلیش) انباشته شده بر روی یک زیربنای افیولیتی، از کرتاسه پایانی تا ائوسن، هستند. نفوذی‌هایی که قبل‌تر از آنها یاد شد داخل سکنس‌های فلیش و افیولیت ملانژها جای گرفته‌اند (Pang et al., 2013; Modabber et al., 2019; Tarabi et al., 2019).

به‌طور کلی، واحدهای سنگ‌شناسی منطقه سربیشه را می‌توان به چهار بخش تقسیم کرد (شکل ۲) (اشتوکلین و همکاران، ۱۳۵۲):

۱. آمیزه‌های افیولیتی: کهن‌ترین سنگ‌های موجود در منطقه مورد مطالعه، ردیفی از سنگ‌های افیولیتی



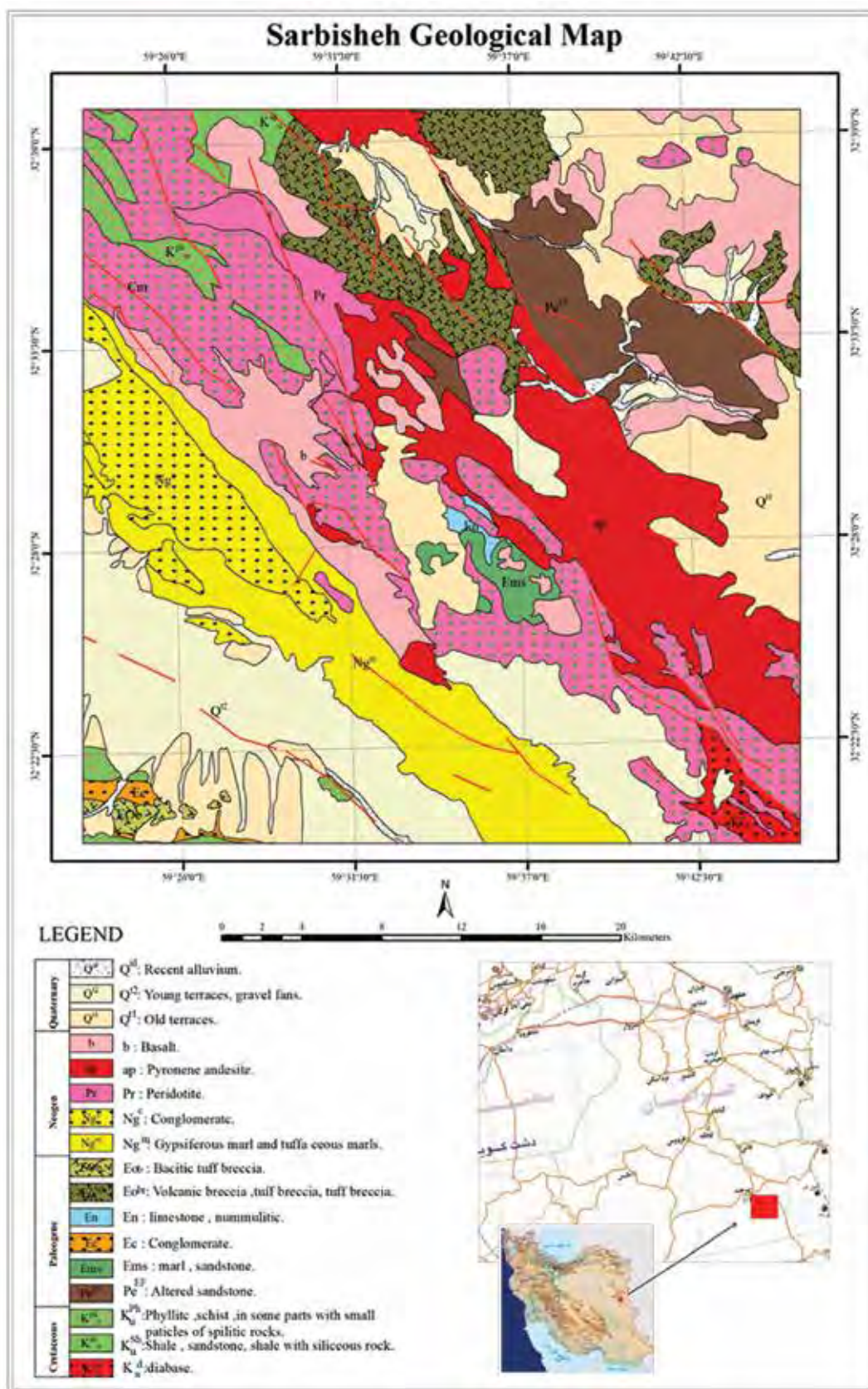
شکل ۱. نقشه زمین‌شناسی شرق ایران و زون جوش خورده سیستان برگرفته از (Pang et al., 2013; Modabberi et al., 2019)

روش مطالعه

مطالعات سنگ‌شناسی

برای آماده‌سازی این لایه شاهد اطلاعاتی، ابتدا با استفاده از نقشه‌های ۱:۱۰۰۰۰۰ زمین‌شناسی بیرجند، سهل آباد، مختاران و سرپیشه، نقشه پهنه سرپیشه در محیط GIS نقشه رقومی شده و واحدهای زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه رسم و واحدهای مهم و مرتبط با کانی‌سازی شناسایی و تفکیک شدند. سپس با استفاده از تابع Distance در محیط نرم‌افزار ARC GIS نقشه رستر

در انجام مطالعات متالوژنی و اکتشافات ناحیه‌ای، به‌طور معمول، لایه‌های مختلف اطلاعاتی از جمله ژئوشیمی، ساختارها و شکستگی‌ها، توپوگرافی، لیتولوژی، افزون بر اطلاعات پراکنش ماده معدنی، به‌طور مجزا و یا در ترکیب با یکدیگر تحلیل می‌شوند (Mosusu et al., 2021).



شکل ۲. نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ سریشه

واحدهای زمین‌شناسی مساعد برای کانی‌سازی تهیه شد. بر اساس آنچه در مبحث زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه گفته شد و از سوی دیگر با توجه به ارتباط میان سنگ‌های رخنمون شده و تیپ‌های مختلف کانساری، قابل توجه‌ترین واحد لیتولوژیک مستعد که می‌تواند میزبان کانی‌سازی در منطقه باشد، واحدهای اولترامافیک هستند که در این پژوهش برای مدل‌سازی متالوژنی مورد مطالعه خاص قرار گرفتند.

مطالعات ژئوشیمیایی

برای مطالعات ژئوشیمیایی، ۲۹۲ نمونه مرکب رسوب آبراهه‌ای از چهار برگه ۱۰۰/۰۰۰ بیرجند، سربیشه، مختاران و سهل‌آباد، برداشت شد. پس از مخلوط کردن و غربال کردن نمونه‌ها، اندازه سیلت و رس برای آنالیز انتخاب شدند. به منظور کاهش اثر آلودگی سطحی، نمونه‌ها از عمق نیم متری برداشت شدند. نمونه‌ها برای تجزیه ژئوشیمیایی عناصر مهم اقتصادی As, Ba, Co, Cr, Cu, Mo, Ni, P, Pb, Sn, Sr, Th, Ti, U, V, W, Zn به روش ICP-OES آماده‌سازی شده و به آزمایشگاه زرآما فرستاده شدند.

مطالعات آماری

خلاصه اطلاعات آماری و نیز تحلیل آماری داده‌های ژئوشیمیایی توسط نرم افزارهای SPSS 26 و Excel 2019 انجام گرفت. تحلیل و نتیجه‌گیری داده‌های ژئوشیمیایی بخصوص زمانی که برای تعداد زیادی از عناصر آنالیز شیمیایی شده باشند، به دلیل حجم زیاد، کار دشواری است. روش تحلیل مولفه‌های اصلی یکی از روش‌های کاهش داده است. این روش بر اساس بردارهای ویژه و مقادیر ویژه کار می‌کند و روشی است برای پیدا کردن ترکیبات خطی از متغیرهای اولیه، به صورتی که تشکیل یک دستگاه مختصات جدید بدهند. به این ترکیبات خطی، مولفه‌های اصلی گفته می‌شود (Grunsky and de Caritat, 2020). پیش از انجام عملیات تحلیل مولفه‌های اصلی، ابتدا داده‌های سنسورد به روش جایگزینی ساده، جایگزین شدند و سپس برای نرمال‌سازی، داده‌های اولیه به داده‌های لگاریتمی تبدیل شده و پارامترهای آماری برای نمونه‌های موردنظر

محاسبه شد. آزمون‌های KMO و Bartlett که شاخصی برای مقایسه مقادیر ضرایب همبستگی ساده و جزئی بر روی کلیه متغیرها هستند، محاسبه شدند. مقادیر بزرگ KMO دلالت بر تایید تحلیل مولفه‌ای دارد. برای مقادیر حدود ۰/۸ این کمیت، تحلیل مولفه‌ای بسیار مناسب، حدود ۰/۵ مناسب، ۰/۷ متعادل، ۰/۶ متوسط، ۰/۵ ناچیز و کمتر از ۰/۵ نامناسب است (Zuo, 2011). واریانس کل مقادیر ویژه، درصد واریانس و درصد تجمعی واریانس متناظر با مولفه‌ها محاسبه شده و سپس مقادیر ویژه بزرگ‌تر از ۱ استخراج و دوران داده شدند. چهار مولفه اول، مقدار ویژه بیشتر از ۱ داشته و بیش از ۷۶٪ واریانس نمونه‌ها را در برمی‌گرفتند. چون در بسیاری از موارد، تعدادی از متغیرها به بیش از یک مولفه همبستگی دارند، تعبیر مولفه، مشکل خواهد بود. از این‌رو، روش‌هایی به‌وجودآمده‌اند که بدون تغییر میزان اشتراک باعث تعبیر ساده‌تر مولفه‌ها می‌شوند. در این بخش از روش Varimax برای دوران مولفه‌ها استفاده شده است که دورانی متعامد بر روی ضرایب مولفه‌ها صورت می‌دهد (Kaiser, 1958). این روش مقادیر نسبتاً بزرگ (قدر مطلق مقادیر) و یا صفر به ستون‌های ماتریس ضرایب مولفه‌ها اختصاص می‌دهد. در نتیجه مولفه‌هایی ایجاد می‌شوند که به شدت به متغیرها وابسته‌اند و یا مستقل از آن‌ها هستند. این امر سبب ساده‌تر شدن تفسیر مولفه‌ها خواهد شد.

مقادیر ویژه مولفه‌ها با توجه به همبستگی عناصر تفسیر شد و در نهایت از مولفه دوم، سوم و چهارم در نرم‌افزار ARC-GIS ۱۰/۸ به روش درون‌یابی IDW نقشه ژئوشیمیایی تهیه شد.

مطالعات دورسنجی

از تصاویر ماهواره‌ای می‌توان به عنوان ابزاری نیرومند در اکتشاف ذخایر معدنی در مرحله ابتدایی و تهیه نقشه‌های دگرسانی، با هزینه کم و دقت بالا استفاده کرد (Mather and Koch, 2011; Sekandari et al., 2020). در مطالعه حاضر، برای شناسایی زون‌های دگرسانی از روش ترکیبات رنگی حقیقی و کاذب سنجنده استرو روش‌های تحلیل مولفه‌های انتخابی (کروستا) برای سنجنده OLI ماهواره لندست ۸ استفاده شده است

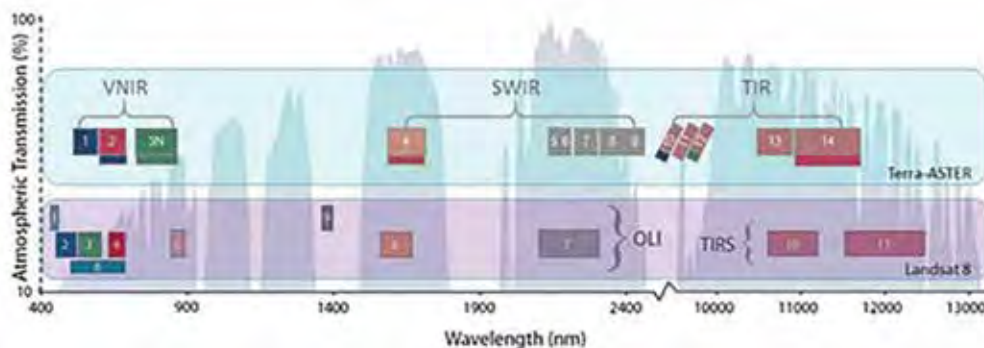
ماهواره استر

این سنجنده در ۱۴ باند تصویربرداری می‌کند و امواج الکترومغناطیس بازتابیده شده در محدوده طیفی بین ۰/۵۲ و ۰/۸۶ میکرومتر نور مرئی فرسرخ نزدیک^۱ را در سه باند با قدرت تفکیک مکانی ۱۵ متر و در محدوده طیفی بین ۱/۶ و ۲/۴۳ فرسرخ موج کوتاه^۲ را در شش باند با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر ثبت می‌کند. علاوه بر این، امواج الکترومغناطیس ساطع شده از سطح زمین در محدوده فرسرخ از ۸/۱۲۵ تا ۱۱/۶۵ میکرون را در پنج باند با قدرت تفکیک مکانی ۹۰ متر ثبت می‌کند (Abrams, 2000). محدوده بانندی سنجنده استر در شکل ۳ ارائه شده است. با توجه به اینکه تصاویر سنجنده استر در طول موج‌های متعددی برداشت می‌شوند، این امکان وجود دارد که تفکیک سنگ‌شناسی به نحو آشکاری انجام شود. یکی از ویژگی‌های بارز تصاویر استر قدرت تفکیک بالای آن در مقایسه با لندست است (Gupta, 2017).

(Safari et al., 2018; Langford, 2015). در ادامه مختصر به معرفی ماهواره‌های انتخابی پرداخته شده است.

ماهواره لندست ۸

آخرین سری از ماهواره‌های لندست، لندست ۸ است که از سال ۲۰۱۳ شروع به کار کرد و هم اکنون در ارتفاع ۷۰۵ کیلومتری با مدار خورشید آهنگ به دور زمین می‌چرخد. این ماهواره دارای دو سنجنده OLI و TIRS و سنجنده OLI این ماهواره دارای ۱۱ باند است. این سنجنده تصاویری با تفکیک متوسط ۱۵ تا ۱۰۰ متر از سطح زمین و مناطق قطبی فراهم می‌آورد. سنجنده‌های OLI و TIRS ماهواره لندست ۸ نسبت سیگنال به نویز (SNR) را در عملکرد رادیومتریکی بهبود بخشیده‌اند که این مسئله در نتیجه افزایش قدرت تفکیک رادیومتریکی این تصاویر نسبت به تصاویر سنجنده پیش از خود یعنی ETM+ است (Irons et al., 2012). محدوده بانندی ماهواره لندست در شکل ۳ ارائه شده است.



شکل ۳. مقایسه محدوده بانندی تصاویر ماهواره‌های Landsat8 و ASTER

پردازش داده‌های ماهواره‌ای

برای داشتن دید کلی از منطقه، ابتدا باید تصویری با دید حقیقی از هر منطقه تهیه کرد. برای ایجاد تصاویر دید حقیقی باید باندهایی از یک سنجنده که در محدوده طیفی رنگ‌های طبیعی اصلی (قرمز، سبز و آبی) قرار دارند، انتخاب و هر کدام در کانال رنگی اصلی خود قرار داده شوند (Sekandari et al., 2020).

پیش‌پردازش داده‌های ماهواره‌ای

پیش از پردازش داده‌ها و استخراج اطلاعات، برای حذف اثرات جمعی جوی (پراکندگی) از روش کاهش تاریکی^۳ و سپس برای حذف اثرات ضربی جوی از الگوریتم باقیمانده‌های لگاریتمی^۴ استفاده شد. این الگوریتم در حقیقت نوعی روش کالیبراسیون است که تأثیرات جو، اثر سنجنده، و توپوگرافی را تا حد زیادی کاهش و تصحیح قابل قبولی بر روی تصاویر انجام می‌دهد (Ayoobi and Tangestani, 2017).

1. Visible Near Infrared (VNIR)
2. Short Wave Infrared (SWIR)
3. Dark subtract
4. Log residuals

بارسازی ساختارهای خطی و شکستگی‌ها

تصاویر ماهواره‌ای به دلیل میدان دید وسیع و توان تفکیک بالا در تشخیص ساختارهای زمین‌شناسی کاربرد وسیعی دارند. گسل‌ها و شکستگی‌ها ساختارهای خطی هستند که به عنوان خطواره در تصاویر ماهواره‌ای شناخته می‌شوند. خطواره در تصاویر ماهواره‌ای به صورت یک عنصر خطی مستقیم و قابل رویت در سطح زمین تعریف می‌شود که نشانگر پدیده‌های زمین‌شناختی زمین‌ریخت‌شناسی است (Ahmadi and Pekkan, 2021).

گسل‌ها و شکستگی‌ها از جمله عوامل موثر در تشکیل ذخایر معدنی هستند، زیرا محلول‌های گرمایی حاوی عناصر کانسارساز از طریق این شکستگی‌ها به سطح زمین راه می‌یابند. بنابراین بررسی آنها می‌تواند در شناسایی مناطق مستعد کانی‌سازی مفید و موثر باشد. از طرفی مطالعات متالورژی بدون در نظر گرفتن این ساختارهای خطی امکان‌پذیر نخواهد بود. به همین منظور، از تصاویر ماهواره‌ای اس‌تر و تصاویر گوگل برای بررسی موقعیت گسل‌ها و شکستگی‌های موجود در منطقه مورد مطالعه استفاده شد. بارسازی خطواره‌های منطقه با استفاده از فیلتر بالاگذر انجام شد و پس از ارزیابی موقعیت و شکل ظاهری خطواره‌های تشخیص داده شده و تفکیک آنها از دیگر ساختارهای خطی، این خطواره‌ها در محیط نرم‌افزار ARC GIS به صورت رقومی رسم شدند. در مرحله بعد مدل‌سازی رستر از لایه ساختارهای خطی در محیط نرم‌افزار ARC GIS با استفاده از روش Density رسم شد.

مدل لایه‌های شاهد اطلاعاتی در منطقه مورد مطالعه

پتانسیل‌یابی مواد معدنی در منطقه مورد بررسی با استفاده از روش منطق فازی انجام شد. در مدل‌سازی فازی، نقشه‌های شاهد فازی برای ایجاد یک نقشه با مقادیر پیش‌گویانه فازی با هم ترکیب‌شده تا نواحی هدف برای اکتشافات بعدی ذخایر معدنی شناسایی شوند (Pazand and Hezarkhani, 2018; Zhang et al., 2017).

کانی‌های حاوی هیدروکسیل همچون کائولینیت، مونت‌موریلونیت، ایلیت و دیگر کانی‌های رسی و سیلیکات‌های ورقه‌ای و نیز اکسیدهای آهن نیز به شکل کانی‌هایی چون هماتیت، لیمونیت و گوتیت از گسترده‌ترین محصولات دگرسانی هستند. مطالعات متعدد نشان داده است که تصاویر ماهواره‌ای اس‌تر به دلیل دارا بودن باندهای طیفی متعدد در محدوده فرورسرخ و طول موج کوتاه قابلیت زیادی در شناسایی مناطق رسی دارند (Fatima et al., 2017). برای شناسایی واحدهای مختلف سنگی و دگرسانی‌ها باید نمایش موارد فوق با استفاده از رنگ‌های مختلف صورت گیرد تا قابلیت تفکیک و شناسایی برای بیننده فراهم کند. به همین دلیل از روش ترکیبات رنگی کاذب برای شناسایی و تفکیک زون‌های دگرسانی استفاده می‌شود (Noori et al., 2019).

تحلیل مولفه‌های اصلی روشی مبتنی بر بردارهای ویژه است. با استفاده از مقادیر ویژه و بردارهای ویژه، جهت‌هایی با بیشینه تغییرپذیری شناسایی شده و سپس با تعریف متغیرهای جدید ابعاد متغیرها کاهش داده می‌شود. در این روش، رابطه بین پاسخ‌های طیفی کانی‌های هدف و مقادیر عددی استخراج شده از ماتریس بردار ویژه برای محاسبه تصاویر مؤلفه اصلی به‌کارگرفته می‌شود. با استفاده از این رابطه، امکان تعیین مکان‌هایی که حاوی اطلاعات طیفی خاص از کانی‌های دارای اکسید آهن و نیز کانی‌های رسی هستند، وجود دارد (Sulemana et al., 2020). در تحلیل مولفه‌های اصلی انتخابی باندهایی با بیشترین جذب و یا بازتاب برای کانی هدف انتخاب می‌شود. شرط انتخاب مولفه‌های مناسب در این روش نیز همانند روش مؤلفه اصلی استاندارد به این صورت است که در ماتریس بردارهای ویژه، باندهای مربوط به جذب و بازتابش کانی‌های هدف به‌طور هم‌زمان دارای بالاترین مقادیر بوده و همچنین این مقادیر ناهم‌علامت نیز باشند (فاطمی و رضایی، ۱۳۹۳).

پس از انجام پردازش‌های ذکر شده، نقشه دگرسانی منطقه تهیه و سپس با روش درون‌یابی فاصله معکوس وزنی^۱ از آن یک لایه رستری برای مراحل بعدی تهیه شد.

1. Inverse Distance Weighted (IDW)

است که نشان دهنده کانی‌سازی این عناصر در طبیعت و توزیع غیرنرمال عناصر است (حسنی‌پاک و شرف‌الدین، ۱۳۹۱). گستره عناصر بخصوص برای کبالت، کروم، مس و نیکل بالاتر از حدود پوسته زمین است و نشانگر تغلیظ در سنگ‌های منطقه می‌باشد. این غنی‌شدگی عناصر، به رفتار ژئوشیمیایی عنصر و فاز کانی‌شناختی آن نیز بستگی دارد که در این منطقه، کانی‌های مقاوم را تشکیل داده و به همین دلیل کروم در نمونه‌ها غلظت بالایی را نشان داده است. از سوی دیگر به توجه به بافت زمین‌شناسی و لیتولوژی منطقه مورد مطالعه، می‌توان مقادیر مس، سرب و روی را نیز به عنوان مقادیر بالاتر از حدود متعارف در نظر گرفت.

به منظور تعیین همبستگی و همراهی عناصر اندازه‌گیری شده در رسوبات آبراهه‌ای و رابطه میان عناصر، از آزمون چند متغیره تحلیلی مولفه‌های اصلی PCA استفاده شد. در این آزمون، نتایج آزمون KMO برای داده‌های منطقه ۰/۷۹۸ است که نشان دهنده مناسب بودن این روش برای این مجموعه داده‌هاست. تحلیل مولفه‌های اصلی، چهار مولفه را به دست داده که اینجا به بررسی چهار مولفه اول پرداخته می‌شود. جدول ۲ ماتریس ضرایب مولفه‌های دوران

این نقشه‌های شاهد فازی با استفاده از عملگرهای فازی مناسب تفسیر می‌شوند و نتیجه نهایی آن با دیفازی کردن مجموعه فازی ارائه می‌شود. دیفازی یا فازی‌زدایی روشی برای تبدیل اعداد فازی به اعداد قطعی است. این عملیات باعث می‌شود تا نتایج حاصل از استنتاج فازی به صورتی قابل فهم برای مخاطب ارائه شود.

لایه‌های شاهد از واحدهای زمین‌شناسی، داده‌های ژئوشیمیایی، دگرسانی و خطواره‌های گسلی تهیه شده و با استفاده از عملگر فازی ۷ تلفیق شدند. مقدار استاندارد ۷ در مطالعات اکتشافی ۰/۹ است (Bonham-Carter, 1989). بنابراین مقدار ۷ در این مطالعه ۰/۹ در نظر گرفته شد.

بحث

پردازش داده‌های ژئوشیمیایی محدوده مورد مطالعه

جدول ۱ خلاصه پارامترهای آماری نمونه‌های مورد بررسی را ارائه می‌دهد. بررسی این داده‌ها توزیع غیرنرمال را برای بیشتر عناصر در نمونه‌های رسوب برداشته شده نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود پارامتر کشیدگی برای بیشتر عناصر و چولگی برای تعدادی از عناصر بیشتر از ۳

جدول ۱. پارامترهای آماری نمونه‌های محدوده مورد بررسی (مقادیر بر حسب بخش در میلیون)

Element	Min	Max	Mean	SD	Kurtosis	skewness
As	۴٫۹	۲۲٫۸	۹٫۴	۲٫۷	۵	۱٫۷
Ba	۱۲۹	۵۷۵	۱۶۲	۷۴	۳	۲
Co	۷	۶۳۲	۴۴	۸۴	۱۷٫۸	۴
Cr	۵۷	۱۲۱۰	۱۱۳	۱۶۷	۱۱٫۱	۳٫۲
Cu	۱۳	۷۱	۲۵	۷	۵٫۵	۱
Mo	<۰٫۵	۲٫۵	۰٫۷	۰٫۵	-۰٫۳	۰٫۷
Ni	۲۸	۱۱۶۸	۱۷۷	۱۹۶	۴٫۴	۲٫۲
P	۳۳۹	۷۷۷	۴۲۵	۱۱۳	-۰٫۴	۱
Pb	<۱	۴۶	۱۷	۶	۳٫۳	۱٫۲۳
Sn	۰٫۱۵	۵٫۴	۱٫۶	۰٫۷	۳٫۱	۱٫۳
Sr	۱۵۶	۶۹۴	۱۸۸	۷۸	۷٫۸	۲٫۶
Th	۳٫۶	۱۹٫۷	۵٫۶	۲٫۷	۲	۱٫۴
Ti	<۱۰	۱۳۱۰۰	۱۹۹۴	۲۶۰۰	۰٫۶	۱٫۱
U	<۰٫۵	۳٫۵	۰٫۸	۰٫۹۷	-۱٫۳	۰٫۷
V	۵۴	۱۹۹	۷۶٫۲۲	۳۰٫۲۴	۱	۱٫۳
W	<۱	۸٫۳	۰٫۷	۱	۲۹٫۸	۵
Zn	۴۶	۱۰۴	۷۰	۱۰	۴	۲٫۸

داده شده را نشان می‌دهد.

مولفه اول: معرف غنی‌شدگی عناصر V, Ti, P, U, Th است که وزن بالاتر از ۰/۶ را به خود اختصاص داده‌اند. این عامل و همراهی این عناصر می‌تواند نشان‌دهنده ذخایر رادیواکتیو باشد. همان‌طور که در نتیجه بررسی پارامترهای آماری مشاهده شد، این عناصر احتمال کانی‌سازی قابل‌توجهی را در منطقه نشان نمی‌دهند و به همین دلیل در ادامه مدل‌سازی ذخایر موجود در منطقه، از این عامل چشم‌پوشی می‌شود.

مولفه دوم: در این مولفه عناصر Sr و Ba مقادیر بالایی را نشان می‌دهند که در رابطه با کانه‌زایی خاصی نبوده و عناصر قلیایی خاکی هستند که سنگ‌های دارای کلسیم را نشان می‌دهند.

جدول ۲. ماتریس ضرایب مولفه‌های دوران داده شده

	۱	۲	۳	۴
As	-۰/۲۷۵	-۰/۴۴۴	-۰/۵۲۴	-۰/۲۰۷
Ba	-۰/۳۰۱	۰/۸۴۱	۰/۲۸۷	۰/۱۸۹
Co	-۰/۱۴۷	-۰/۴۱۰	-۰/۷۳	۰/۸۶۵
Cr	-۰/۱۷۲	۰/۰۷۸	۰/۱	۰/۸۸۱
Cu	۰/۲	۰/۲۲۸	۰/۶۶۸	۰/۳۰۵
Mo	۰/۵۸۳	-۰/۴۱۲	۰/۱۲۶	-۰/۳۵۲
Ni	-۰/۱۱۷	۰/۰۹۸	-۰/۱۳۸	۰/۸۲۰
P	۰/۹۲۹	-۰/۱۰۴	۰/۰۳۷	-۰/۱۰۶
Pb	۰/۱۵۴	۰/۲۰۷	۰/۸۳۶	۰/۱۱۵
Sn	۰/۴۹۶	-۰/۰۷	۰/۳۵۱	-۰/۰۶۸
Sr	۰/۲۷۱	۰/۸۵۹	۰/۲۳۳	۰/۱۳۲
Th	۰/۸۴۸	-۰/۱۵۹	۰/۲۶۳	-۰/۱۷۲
Ti	۰/۹۳۸	-۰/۱۱۷	۰/۱۲۳	-۰/۱۱۱
U	۰/۹۱۵	-۰/۱۶۶	۰/۲۱۶	-۰/۱۴۴
V	۰/۸۹۴	-۰/۱۱۹	۰/۱۶۶	-۰/۱
W	-۰/۲۰۱	۰/۰۱۴	۰/۲۹	۰/۳۲۱
Zn	۰/۲۵۱	۰/۱۳۱	۰/۷۰۴	-۰/۰۱

مولفه سوم: عناصر Zn, Pb, Cu دارای ضریب مولفه‌ای بالایی هستند که در نگاه اول می‌توانند در ارتباط با تیپ کانسارهای پورفیری، اپی‌ترمال و یا چندفلزی باشد، اما با توجه به نبود میزبان نفوذی اسیدی تا حدواسط این احتمال رد می‌شود. با توجه به اینکه سنگ میزبان منطقه واحدهای اولترامافیک هستند، لذا این دسته می‌تواند نشانگر

سولفیدهای توده‌ای نوع قبرس با میزبان بازالتی نیز باشد. **مولفه چهارم:** معرف غنی‌شدگی Ni, Cr, Co است، این عامل به بی‌هنجاری این عناصر در توده‌های اولترامافیک منطقه نسبت داده می‌شود که به سری‌های افیولیتی و آمیزه رنگین وابسته هستند. در شکل ۴ نقشه ژئوشیمیایی تهیه شده از عناصر مولفه‌های دوم تا چهارم آورده شده است. همبستگی عناصر Ni-Cr-Co و Ti-V، در مولفه‌های بالا با نتایج تحقیقات شایسته‌فر و همکاران (۱۳۸۹) که با آنالیز ۴۳ عنصری ICP-MS از ۸۱۰ نمونه برداشت شده از منطقه سربیشه انجام شده، مشابه است.

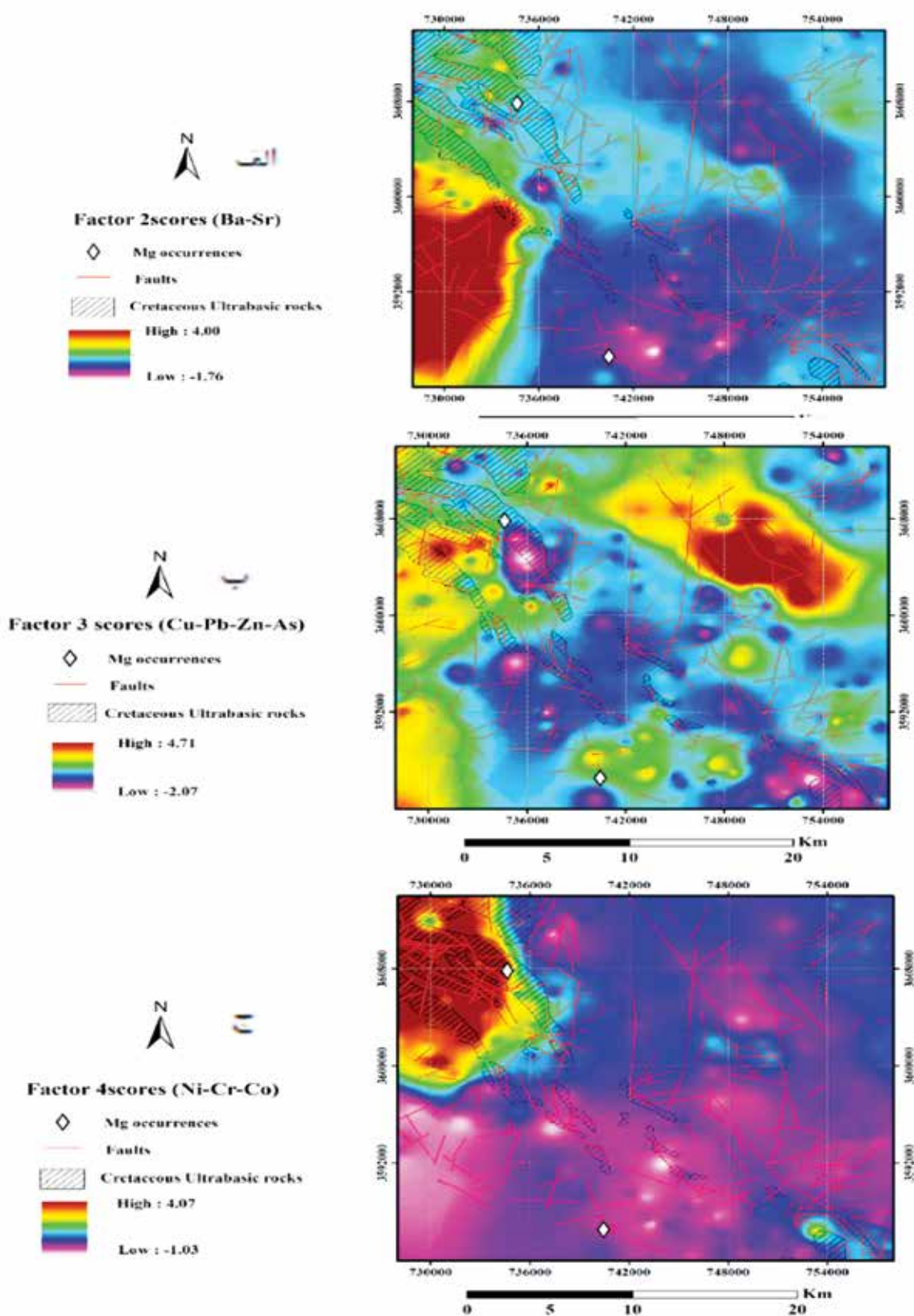
پردازش داده‌های ماهواره‌ای منطقه مورد مطالعه

ترکیب رنگی حقیقی

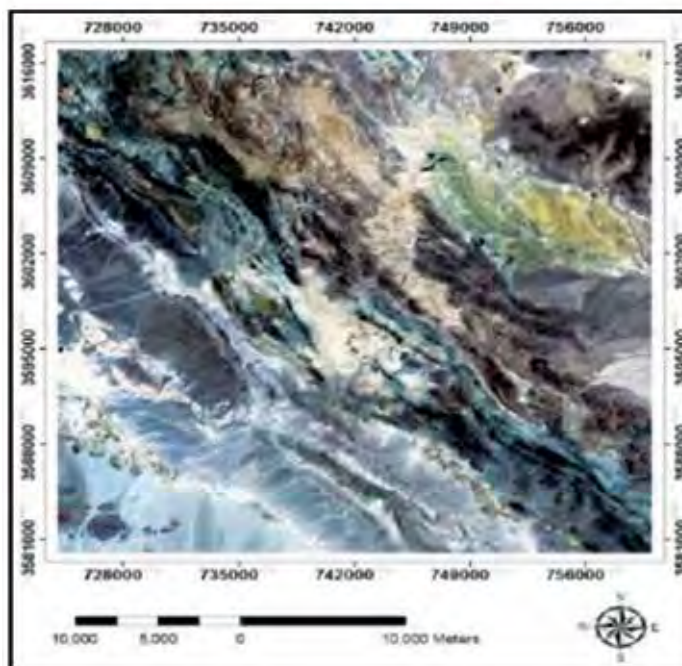
برای داشتن دید کلی از منطقه باندهای ۴ و ۳ و ۲ سنجنده OLI لندست ۸ به ترتیب در کانال‌های قرمز، سبز و آبی قرار گرفت تا تصویر ترکیب رنگی RGB=۴۳۲ ماهواره لندست ۸ در شکل ۵ برای نمایش تصویر رنگی حقیقی منطقه ایجاد شود. واحدهای تیره رنگ سنگ‌های ماگمایی منطقه و بخش‌های روشن شامل رسوبات و سنگ‌های عهد حاضر هستند.

ترکیب رنگی کاذب

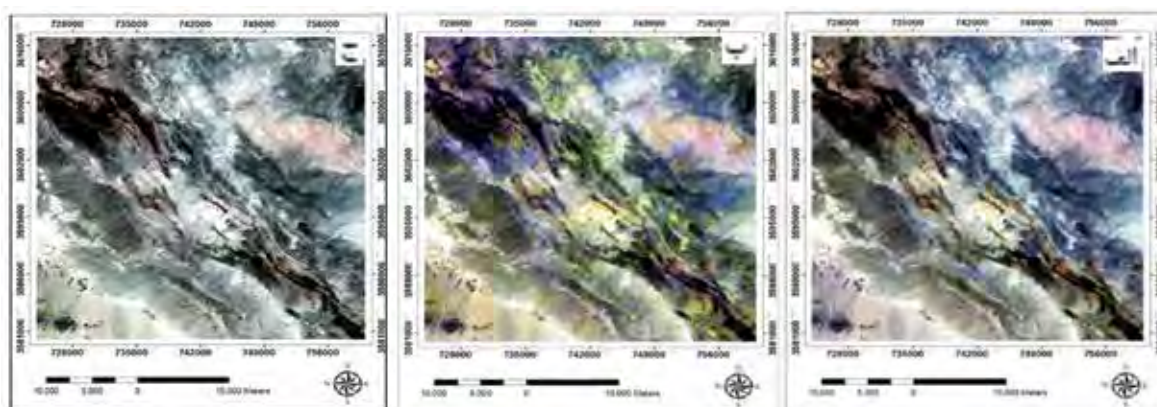
برای ایجاد تصاویر ترکیب رنگی منطقه و شناسایی زون‌های دگرسانی مرتبط با کانی‌سازی در منطقه از باندهای ۴، ۶ و ۸ سنجنده استر به ترتیب در کانال‌های قرمز، سبز و آبی، استفاده شد (احمدی و قره‌شیخ بیات، ۱۴۰۰). در این ترکیب رنگی RGB=468 ماهواره استر، مناطق دگرسانی پروپلیتیک به رنگ سبز و دگرسانی آرژیلیک به رنگ صورتی نشان داده شده است. (Shirazi et al., 2018) نیز در مطالعات خود بر روی سربیشه از این ترکیب رنگی استفاده کرده است. نتیجه این ترکیب رنگی در شکل ۶-الف ارائه شده است. به همین ترتیب، ترکیب رنگی RGB=461 استر برای نمایش مناطق دگرسانی فیلیک-آرژیلیک (صورتی و زرد متمایل به صورتی) اکسیدهای آهن (آبی) (شکل ۶-ب) و ترکیب RGB=۴۵۶ استر برای نمایش مناطق دگرسانی



شکل ۴. الف) نقشه بی‌هنجاری ژئوشیمیایی عناصر عامل دوم، ب) نقشه بی‌هنجاری ژئوشیمیایی عناصر عامل سوم نشانگر حضور احتمالی ذخایر سولفید توده‌ای، ج) نقشه بی‌هنجاری ژئوشیمیایی عناصر عامل چهارم نشانگر ذخایر کرومیت موجود در منطقه



شکل ۵. ترکیب رنگی حقیقی لندست ۸ RGB=432



شکل ۶. الف) ترکیب رنگی RGB=468 سنجنده استر برای نمایش مناطق دگرسانی پروپیلیتیک (سبز کدر) و آرژیلیک (صورتی)، ب) ترکیب رنگی RGB=461 سنجنده استر برای نمایش مناطق دگرسانی فیلک-آرژیلیک (صورتی و زرد متمایل به صورتی) اکسیدهای آهن (آبی)، ج) ترکیب رنگی RGB=456 سنجنده استر برای نمایش مناطق دگرسانی آرژیلیک (قرمز)-آرژیلیک پیشرفته (صورتی)

آرژیلیک (قرمز)-آرژیلیک پیشرفته (صورتی) (شکل ۶-ج) برای تعیین دگرسانی کانی‌های رسی استفاده شد (جدول ۳ بالا). با بررسی مولفه‌های مختلف و با توجه به

شرط انتخاب مولفه مناسب، مشخص شد که مولفه اصلی چهارم بهترین گزینه برای تشخیص مناطق دگرسانی رسی است. در این مولفه، کانی‌های رسی در باند ۶ بیشترین جذب و در باند ۷ بیشترین بازتابش را دارند، این مولفه معکوس شد تا در تصویر حاصل پیکسل‌های روشن نشانگر کانی‌های رسی باشند (شکل ۷-الف).

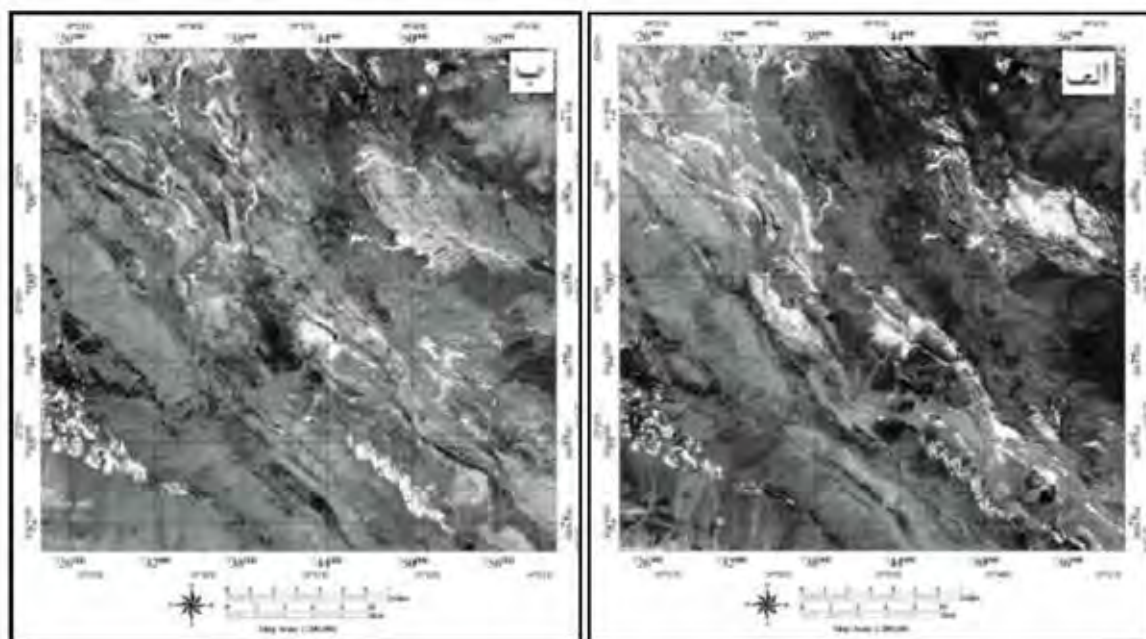
روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی
برای انجام تحلیل مولفه اصلی انتخابی از باندهای

همچنین از باندهای ۲-۴-۵-۶ برای تعیین مناطق

دگرسانی کانی‌های اکسید آهن استفاده شد و با بررسی مولفه‌های مختلف و با در نظر گرفتن شرط انتخاب مولفه مناسب، مولفه اصلی چهارم برای شناسایی اکسیدهای آهن انتخاب شد (جدول ۳ پایین). در این مولفه، کانی‌های اکسید آهن در باند ۴ بیشترین جذب و در باند ۲ بیشترین بازتابش را دارند. پیکسل‌های روشن حاصل از معکوس مولفه چهارم نشانگر کانی‌های اکسید آهن هستند (شکل ۷-ب).

جدول ۳. نمایش نتایج روش کروسا برای کانی‌های رسی در بالا و نتایج روش کروسا برای نمایش اکسید آهن در پایین

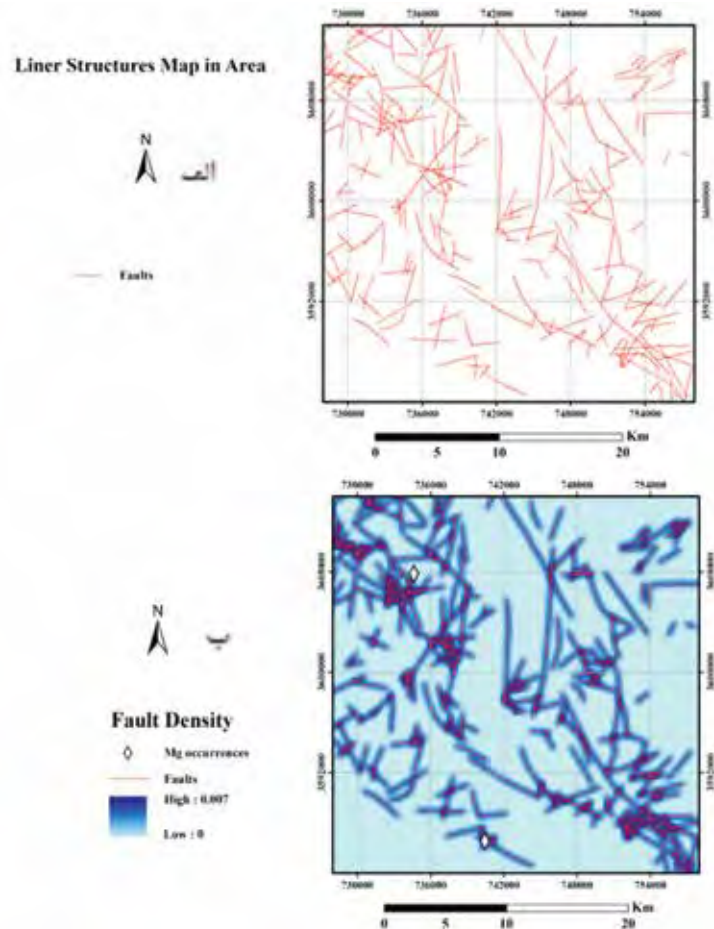
Eigenvector	Band 2	Band 5	Band 6	Band 7
PC1	۰/۲۰۲۷۳۹	۰/۴۹۹۸۳۳	۰/۵۹۱۶۳۴	۰/۵۹۹۱۹۴
PC2	۰/۰۸۴۰۱۹	۰/۸۴۷۷۷۴	-۰/۳۵۷۳۳	-۰/۳۸۲۸
PC3	-۰/۹۶۷۷۱	۰/۱۷۳۸۳۲	۰/۱۸۲۵۰۳	۰/۰۲۲۲۲
PC4	-۰/۱۲۳۹۷	۰/۰۳۵۰۵	-۰/۶۹۹۲۷	۰/۷۰۳۱۵۴
Eigenvector	Band 2	Band 4	Band 5	Band 6
PC1	۰/۲۲۸۸۵۶	۰/۴۶۸۴۱	۰/۵۶۰۶۱۲	۰/۶۴۳۳۷۵
PC2	-۰/۱۱۷۲۲	-۰/۲۳۹۵۱	-۰/۶۰۹۱۶	۰/۷۴۶۸۷
PC3	۰/۷۰۳۱۵۴	۰/۴۷۳۵۶۷	-۰/۵۰۸۰۹	-۰/۱۵۲۱۷
PC4	۰/۶۶۲۹۱۶	-۰/۷۰۶۳۷	۰/۲۳۲۶۷۲	۰/۷۱۳۶۹



شکل ۷. الف) مولفه اصلی چهارم، پیکسل‌های روشن مقادیر کانی‌های رسی، ب) مولفه اصلی چهارم، پیکسل‌های روشن بالاترین مقادیر اکسید آهن

بارزسازی ساختارهای خطی و شکستگی‌ها

همان‌طور که در بخش روش‌ها توضیح داده شد، نقشه خطوارگی با روش‌های سنجش از دور تهیه شد. شکل ۸-الف و ب به ترتیب نقشه رقومی خطواره‌ها و نقشه چگالی آنها را نشان می‌دهد.



شکل ۸. الف) نقشه رقومی خطواره‌های گسلی، ب) نقشه چگالی خطواره‌ها

و قابل بررسی در کانی‌سازی منطقه واحدهای اولترامافیک هستند و این واحدها نمی‌توانند میزبان کانی‌سازی این عناصر باشند، به همین دلیل این مولفه در ادامه از مسیر مدل‌سازی حذف می‌شود. برای مدل‌سازی ذخایر منیزیت نیز به دلیل شباهت شرایط نهشته شدن ذخایر با عناصر مولفه چهارم از نقشه مولفه چهارم ژئوشیمیایی استفاده شد (شکل ۱۰).

آماده‌سازی لایه شاهد گسل‌ها

لایه شاهد دیگری که در مدل‌سازی پتانسیل‌یابی مواد معدنی در ناحیه مورد مطالعه بررسی شد، لایه گسل‌ها و شکستگی‌های موجود در منطقه است (شکل ۱۱). بسیاری از مناطق کانی‌سازی در امتداد زون‌های گسلی رخ می‌دهد. از این‌رو مطالعه ساختارهای خطی و گسل‌ها به عنوان یک لایه اطلاعاتی شاهد بسیار مهم است، البته این مسئله نیز

فازی‌سازی لایه‌های شاهد اطلاعاتی در منطقه مورد مطالعه

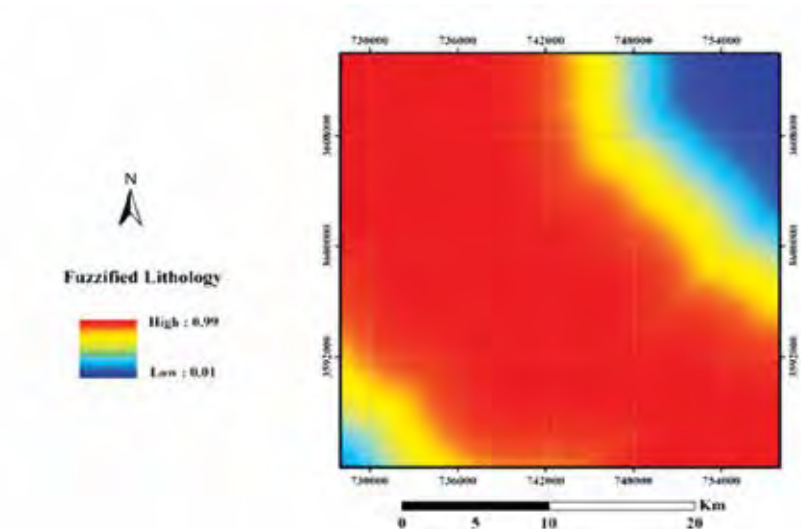
لایه شاهد اطلاعاتی واحدهای زمین‌شناسی

مهم‌ترین عامل در وقوع یک پتانسیل معدنی در هر منطقه واحدهای زمین‌شناسی مطلوب و مساعد کانی‌سازی است. با توجه به زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه و بررسی واحدهای سنگی مستعد کانی‌سازی، واحدهای اولترامافیک به عنوان سنگ میزبان موثر در کانی‌سازی مشخص شد که نقشه رقومی شده این واحدهای سنگی در محیط نرم‌افزار ARC GIS تهیه شد (شکل ۹).

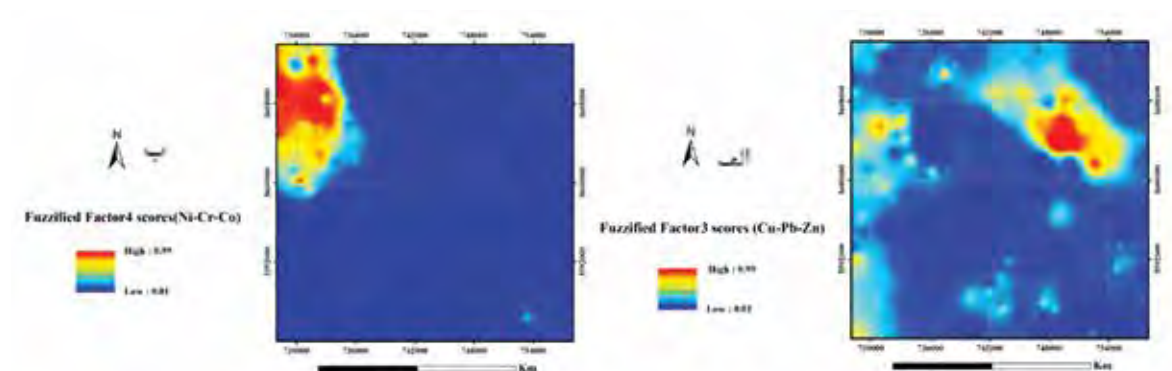
لایه شاهد اطلاعاتی داده‌های ژئوشیمیایی

همان‌طور که قبل‌تر بیان شد عناصر مولفه اول ژئوشیمیایی در بررسی‌های آماری کانی‌سازی قابل‌توجهی را نشان ندادند. از طرفی باتوجه به اینکه واحدهای سنگی مهم

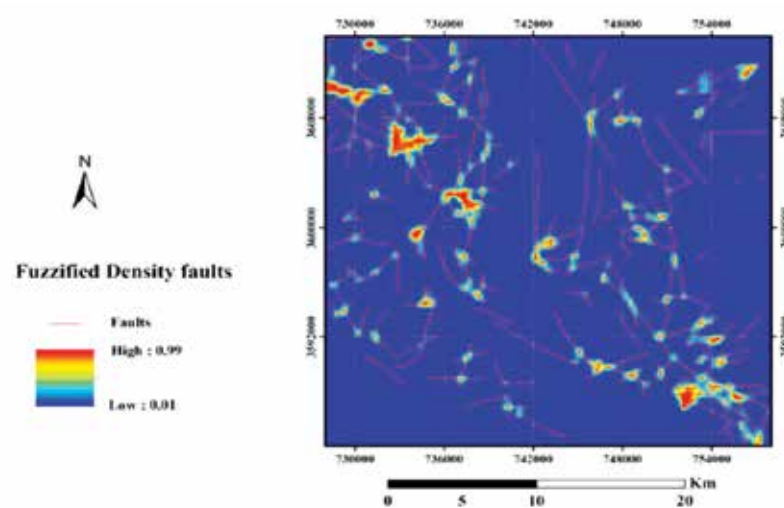
قابل توجه است که آثار گسلی همیشه با بی‌هنجاری‌های ژئوشیمیایی منطبق نیست و این به دلیل فرایندهای زمین‌شناسی مؤثر در توزیع بی‌هنجاری‌ها و کانی‌سازی‌ها است (Wang et al., 2012). تلاقی و تراکم شکستگی‌ها در جنوب‌شرقی، مرکز و شمال‌غربی گستره بیشتر است و در شکل ۱۱ به رنگ قرمز قابل مشاهده است.



شکل ۹. لایه شاهد واحدهای الترامافیک



شکل ۱۰. الف) لایه شاهد ژئوشیمیایی عناصر مولفه سوم، ب) لایه شاهد ژئوشیمیایی عناصر مولفه چهارم

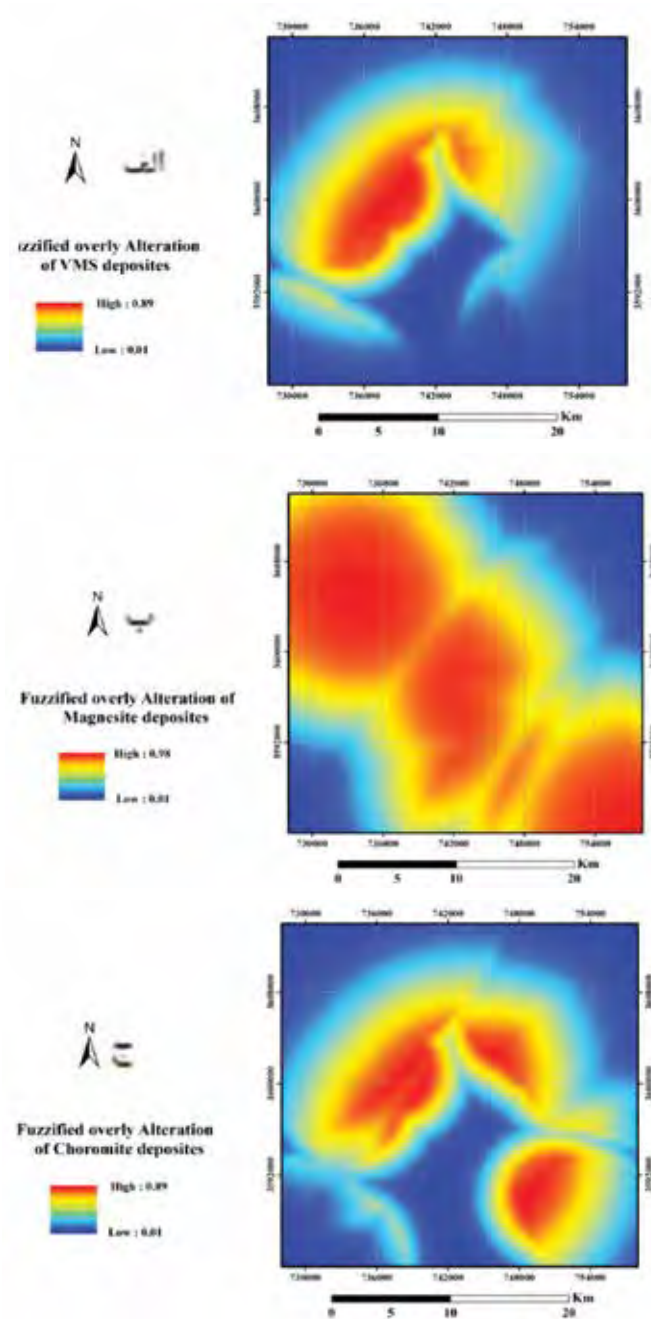


شکل ۱۱. لایه شاهد خطواره‌های گسلی

لایه شاهد دگرسانی‌ها

موجود در هر مجموعه دگرسانی آماده می‌شود، لذا برای به دست آوردن یک نقشه واحد برای دگرسانی مرتبط با هر نوع کانی‌سازی ابتدا نقشه حاصل از هر کانی موجود در دگرسانی به صورت فازی تبدیل می‌شود، و سپس با استفاده از عملگر AND نقشه‌های حاصل با هم تلفیق شده تا برای هر نوع ذخیره معدنی یک نقشه دگرسانی برای تلفیق و مدل‌سازی داشته باشیم.

لایه شاهد اطلاعاتی آخر که در پتانسیل‌یابی ذخایر معدنی حائز اهمیت است، لایه دگرسانی‌های مرتبط با کانی‌سازی است (شکل ۱۲). دگرسانی‌های موجود در منطقه که در ارتباط با کانی‌سازی هستند با استفاده از تکنیک‌های سنجش از دور بارزسازی شده است. قابل توجه است که چون نقشه دگرسانی‌ها به صورت نقشه کانی‌های



شکل ۱۲. الف) لایه شاهد دگرسانی مرتبط با ذخایر سولفید توده‌ای، ب) لایه شاهد دگرسانی مرتبط با ذخایر منیزیت، ج) لایه شاهد دگرسانی مرتبط با ذخایر کرومیت

تلفیق لایه‌های اطلاعاتی و مدل‌سازی متالوژنی ذخایر معدنی موجود در منطقه

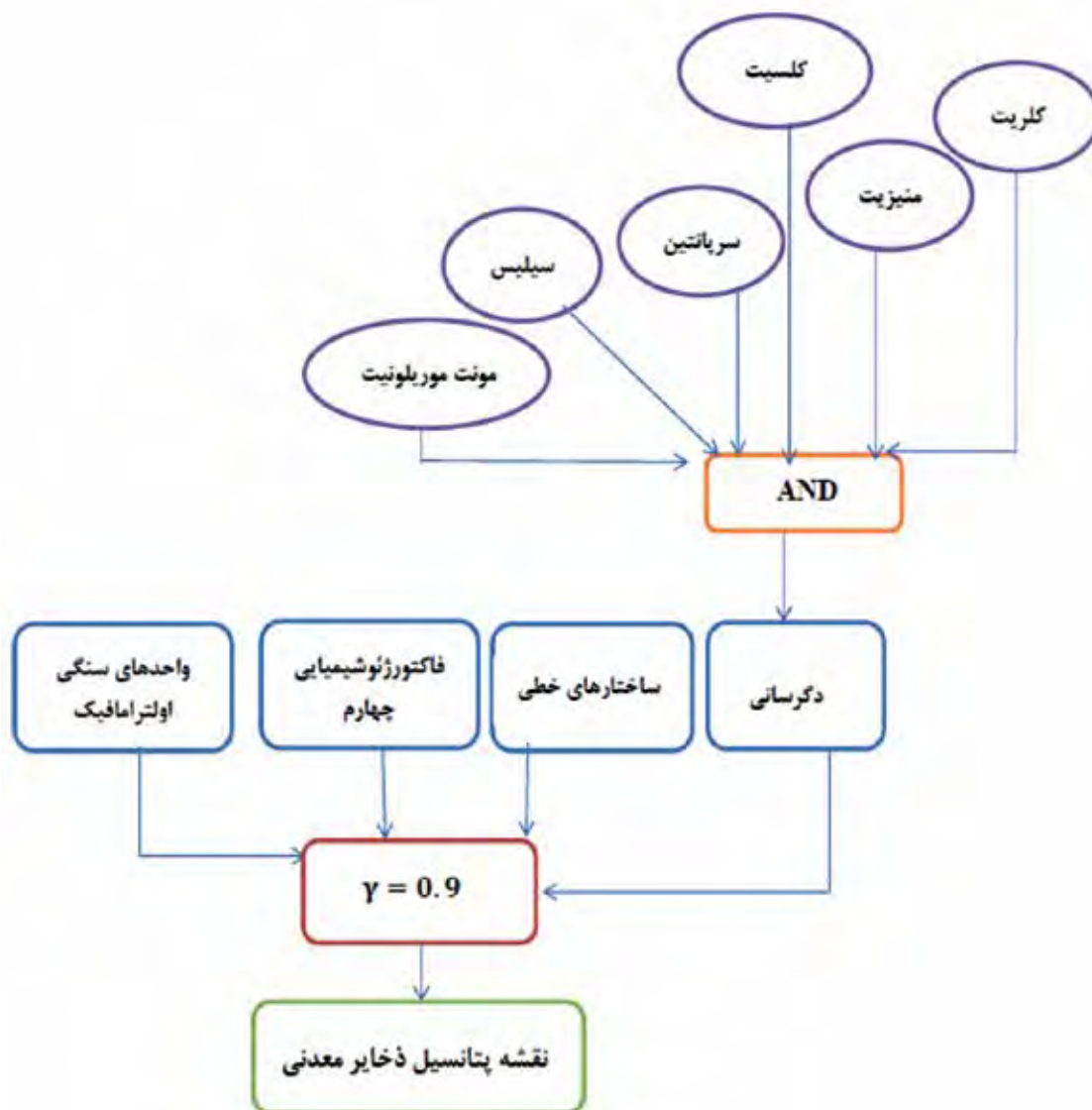
مدل‌سازی و پتانسیل یابی ذخایر کرومیت

کانسنگ‌های کرومیت به دو صورت در سنگ‌های آذرین مافیک و اولترامافیک مشاهده می‌شود، یکی در توده‌های نفوذی مافیک لایه‌ای و دیگری در افیولیت‌ها و پریدوتیت‌های آلیبی. افیولیت‌ها شامل جایگزینی زمین‌ساختی برش‌هایی از گوشته بالایی و پوسته اقیانوسی سنگ‌های مافیک و اولترامافیک هستند که در کانون‌های گسترش بسستر اقیانوس‌ها در داخل و یا روی پوسته قاره‌ای تشکیل

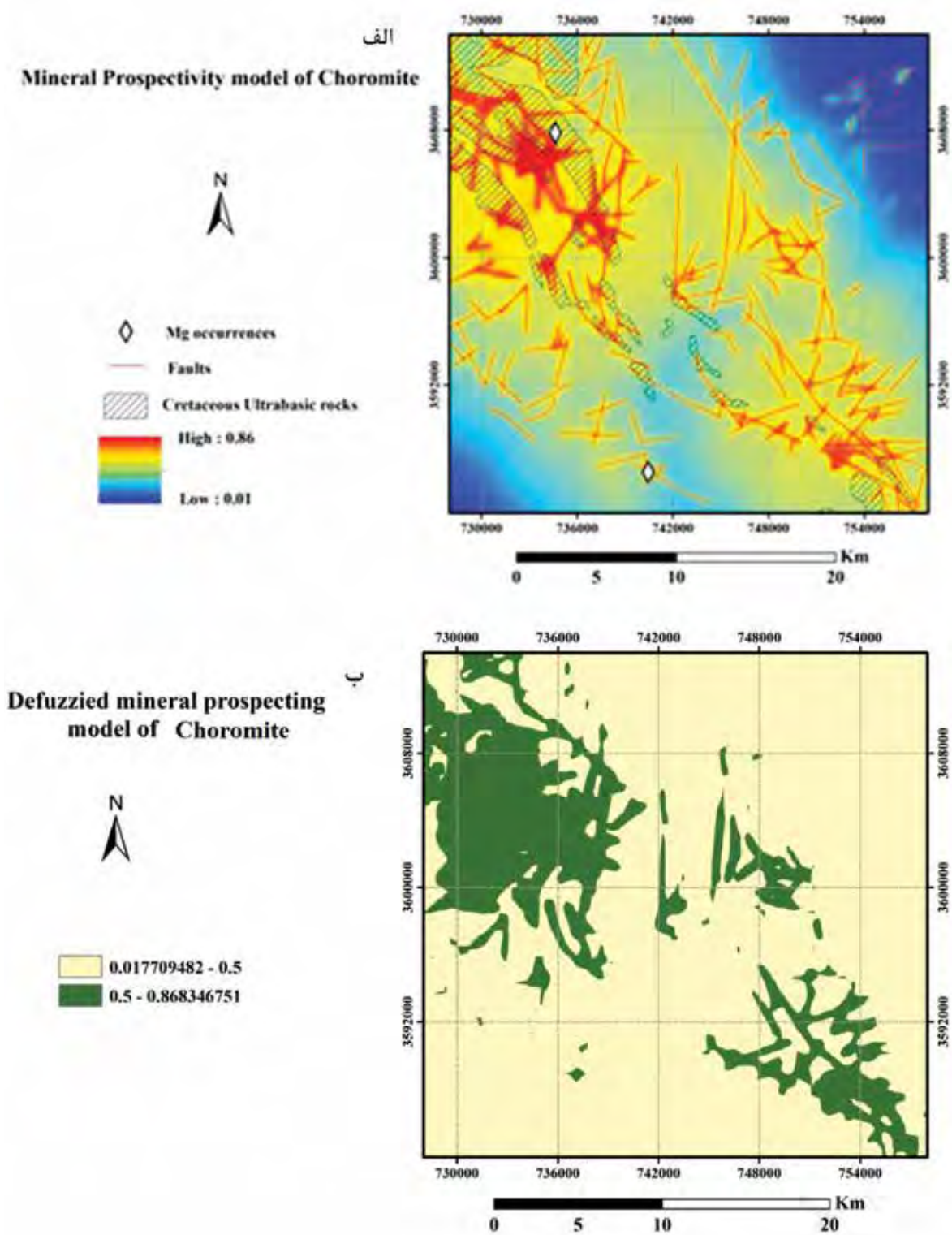
می‌شوند و در منطقه مورد مطالعه احتمال وجود آنها می‌رود (Guilbert and Park, 2007).

مدل مفهومی ذخایر کرومیت در شکل ۱۳ ارائه شده است. برای تهیه لایه دگرسانی مرتبط با ذخیره کرومیت از کانی‌های کلریت، منیزیت، کلسیت، سرپانتین، سیلیس و مونت‌موریلونیت استفاده شد. لایه شاهد دگرسانی به همراه سه لایه شاهد دیگر که در بخش قبل تهیه شدند با با عملکرد فازی γ و استاندارد ۰/۹ تلفیق شدند.

نقشه فازی هم پوشانی و نقشه دی‌فازی برای جانمایی ذخایر احتمالی کرومیت در شکل ۱۴ ارائه شد.



شکل ۱۳. مدل مفهومی ذخایر کرومیت

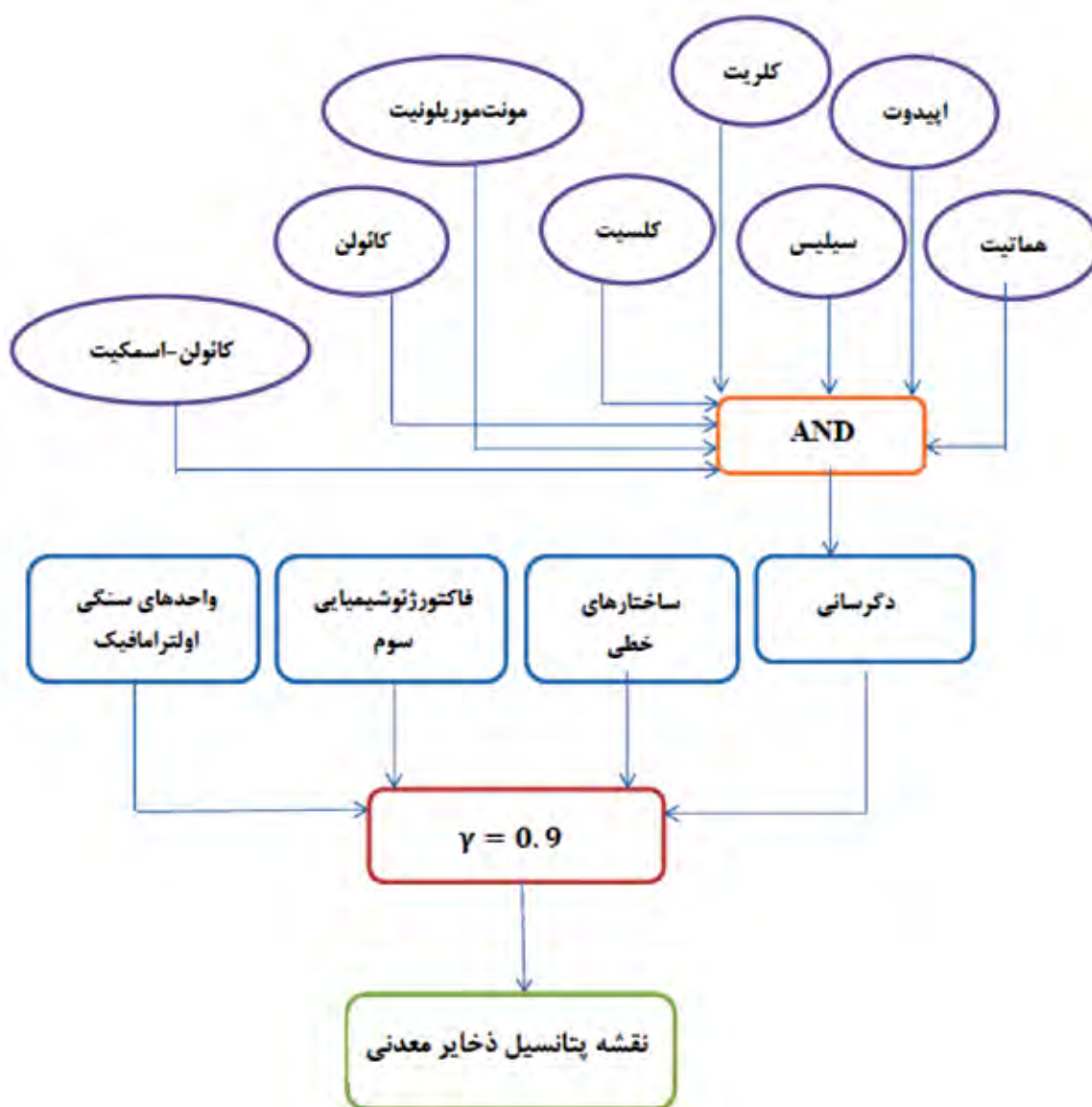


شکل ۱۴. الف) نقشه همپوشانی لایه‌های شاهد مرتبط با دخابر کرومیت، ب) دی‌فازی شده (مناطق با پتانسیل بالا به رنگ سبز هستند)

مدل سازی و پتانسیل یابی ذخایر سولفید توده‌ای

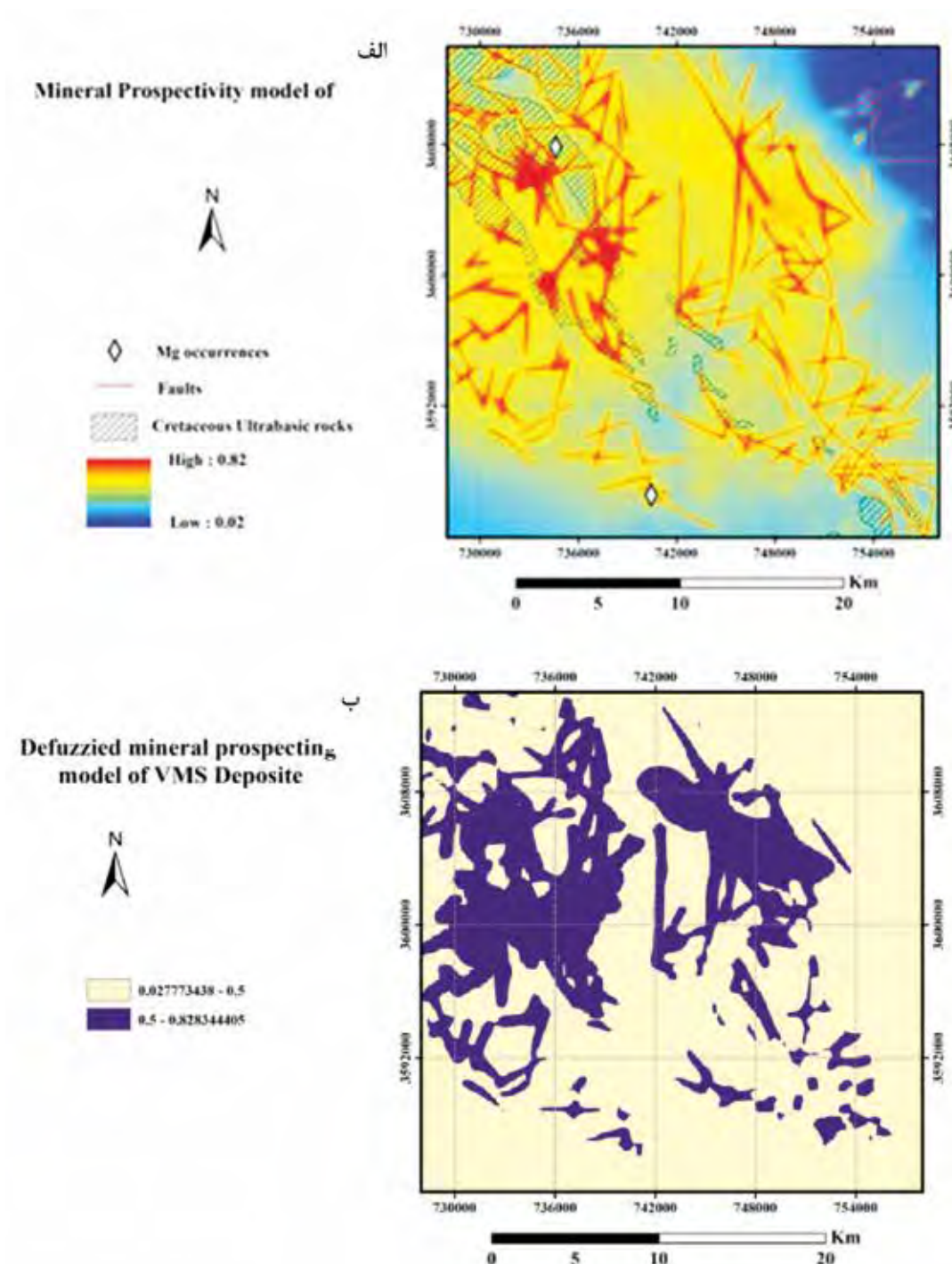
عملکرد آب‌های اقیانوسی به عنوان سیال کانسار ساز بر روی سنگ میزبان بازالتی نهشته می‌شوند و محتوی فلزی آنها عبارتند از مس، سرب و روی و همچنین گاهی دارای مقادیر کمی طلا نیز هستند (Mousivand et al., 2018). کانی‌های موثر در دگرسانی مربوط به ذخایر VMS شامل: هماتیت، اپیدوت، سیلیس، کلریت، کلسیت، مونت‌موریلونیت، کائولن و اسمکتیت است (شکل ۱۵).

این کانسارها یکی از منابع اصلی مس، روی، سرب و نقره و طلا هستند که بسته به سنگ میزبان، موقعیت زمین‌ساختی و سن به انواع مختلفی تقسیم می‌شوند. با توجه به اینکه سنگ‌های میزبان کانی‌سازی در این منطقه واحدهای مافیک و اولترامافیک هستند، ذخایر VMS در صورت وجود در این منطقه، بر اساس تقسیم‌بندی (Hutchinson, 1973) می‌توانند جزو ذخایر VMS نوع قبرسی باشند. ذخایر سولفید توده‌ای نوع قبرسی، بر اثر



شکل ۱۵. مدل مفهومی ذخایر VMS

اگرچه ساختارهای خطی برای ذخایر سولفید توده‌ای که متاثر از واحدهای سنگی منطقه و سیالات کانسارساز اقیانوسی می‌باشند چندان قابل توجه نیستند، اما چون در فرایند مدل‌سازی به روش منطق فازی وزن تمام لایه‌ها به صورت یکسان اعمال می‌شود، لایه شاهد ساختارهای خطی نیز به عنوان یکی از لایه‌های موثر در مدل‌سازی متالوژنی مورد استفاده قرار گرفت (Hosseini-Dinani and Yazdi, 2021). با تلفیق لایه‌های شاهد که در بخش قبل ایجاد شد، نقشه فازی همپوشانی و نقشه دی‌فازی برای جانمایی ذخایر احتمالی VMS تهیه شد (شکل ۱۶).



شکل ۱۶. الف) نقشه همپوشانی لایه‌های شاهد مرتبط با ذخایر سولفید توده‌ای، ب) نقشه دی‌فازی شده (مناطق با پتانسیل بالا به رنگ بنفش هستند)

پتانسیل یابی منیزیت

پیدایش منیزیت از نظر تئوریک به سه عامل وابسته است (تقریبی ۱۳۷۸):

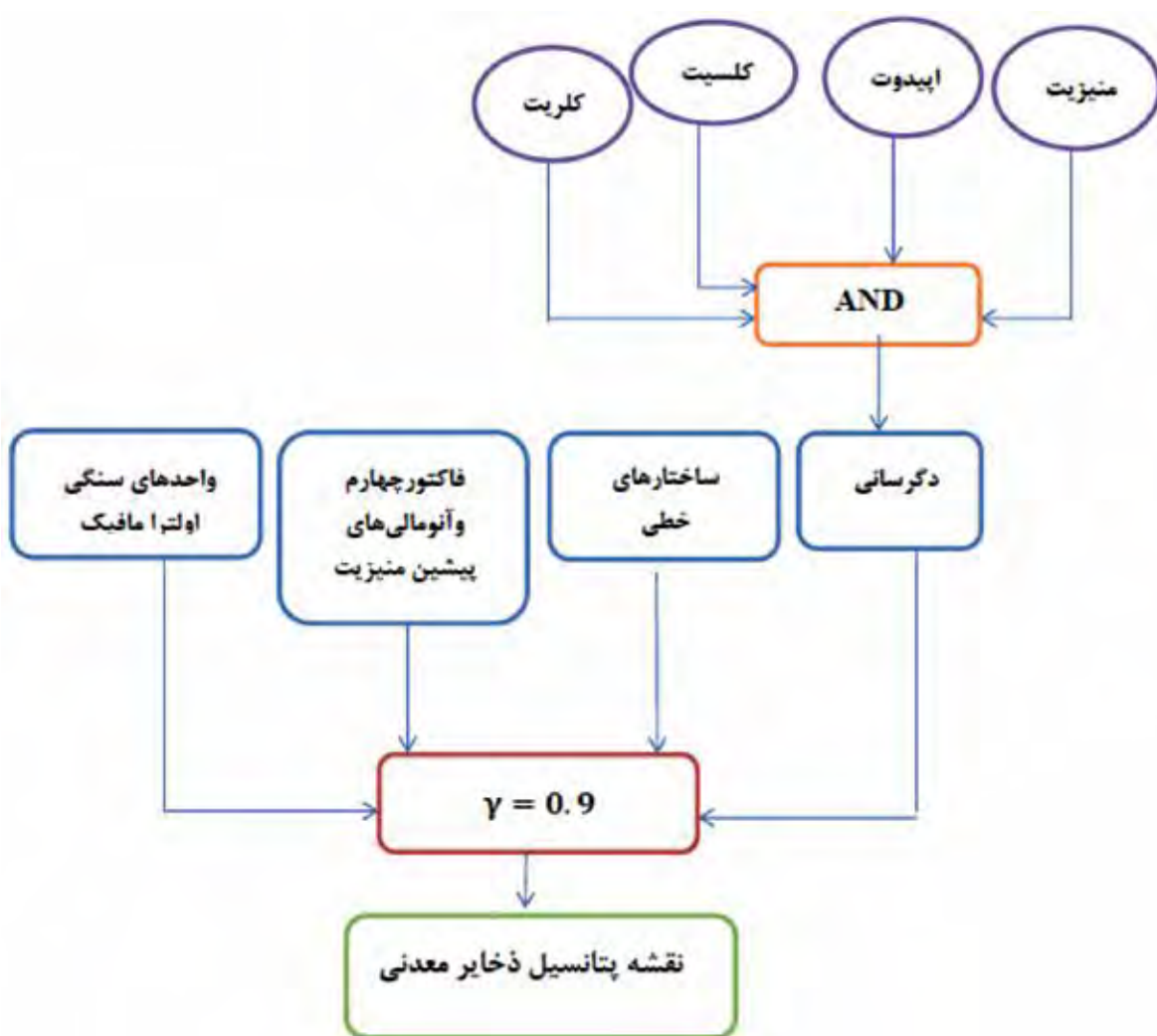
الف- سنگ مادر مناسب که تأمین کننده میزان بالایی منیزیم باشد. در اصل این سنگ‌ها اولترامافیک و سریانتینیت هستند.

ب- مناطق و ساختارهای مناسب برای نهشته شدن منیزیت، گسل‌های اصلی و فرعی فراوان منطقه شرق ایران بستر مناسب برای کانی‌سازی منیزیت را فراهم می‌آورند.

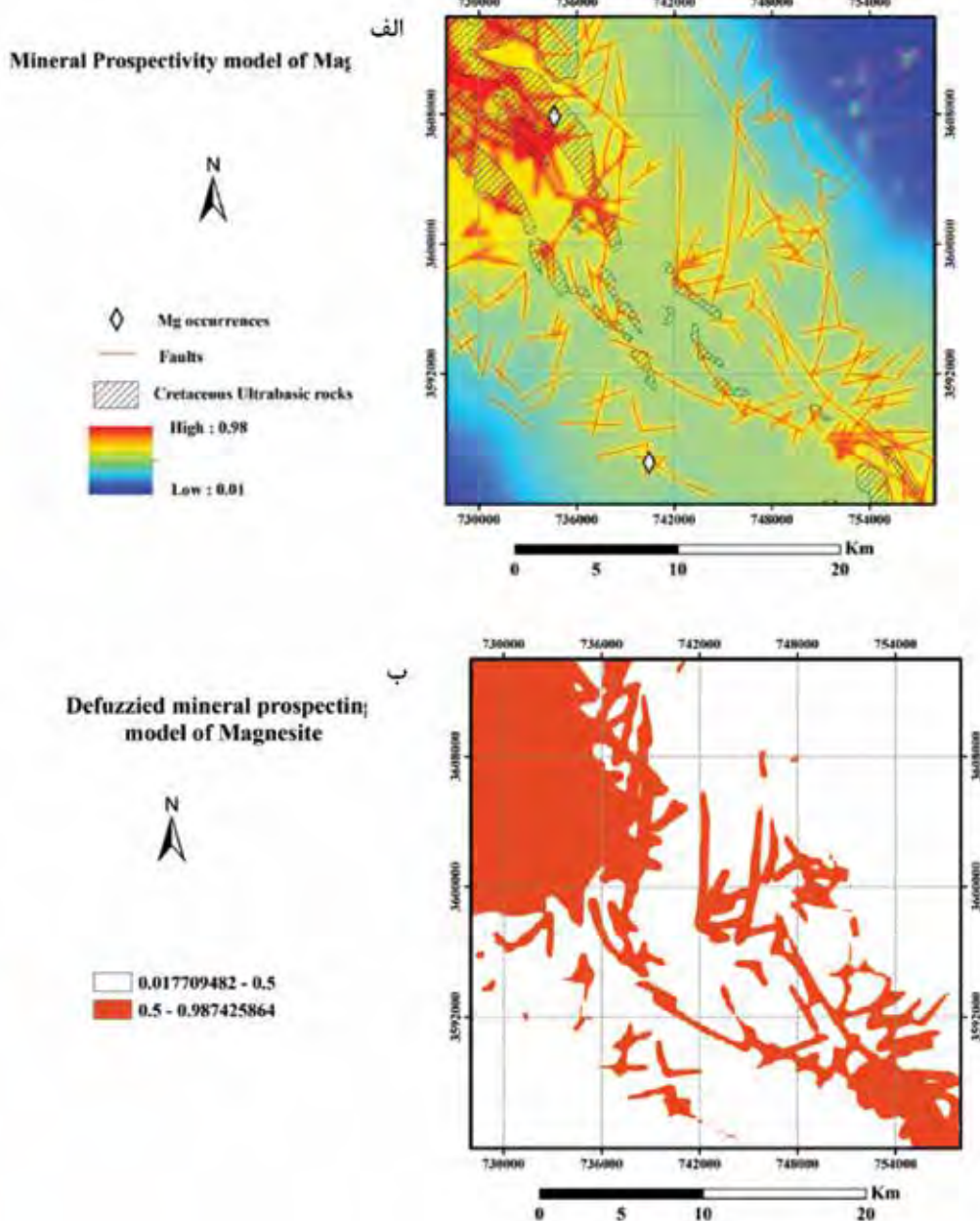
ج- وجود منبعی از انرژی گرمایی که فعال شدن محلول‌ها، بالا رفتن گرادیان ژئوترمال و سرعت بخشیدن و افزایش دادن واکنش محلول‌ها با سنگ‌ها را میسر می‌سازد.

کانی‌های دگرسانی منیزیت، اپیدوت، کلسیت و کلریت برای تهیه لایه شاهد دگرسانی تلفیق شدند. لایه شاهد ساختارهای خطی، فاکتور چهارم و واحدهای سنگی الترامافیک با مقدار استاندارد $\gamma = 0.9$ تلفیق شدند (شکل ۱۷).

در شکل ۱۸ نقشه فازی هم پوشانی و نقشه دی‌فازی برای جانمایی ذخایر احتمالی منیزیت ارائه شده است.



شکل ۱۷. مدل مفهومی ذخایر منیزیت



شکل ۱۸. الف) نقشه همپوشانی لایه‌های شاهد مرتبط با ذخایر منیزیت، ب) نقشه دی‌فازی شده (مناطق با پتانسیل بالا به رنگ نارنجی هستند)

نتیجه‌گیری

عناصر Ba, Sr, V, Ti, P, U, Th در مولفه اول عناصر، در مولفه دوم، عناصر Zn, Pb, Cu مولفه سوم عناصر، Ni, Cr, Co در مولفه چهارم مشخص شدند که با توجه به دانش قبلی گروه چهارم به عنوان عناصر دارای پتانسیل در منطقه در نظر گرفته شدند. نتیجه استفاده از روش‌های سنجش از دور از جمله ترکیب باندی، نسبت باندی و تحلیل مولفه‌های اصلی کروستا، بارسازی مناطق دگرسانی

بر اساس مطالعات اولیه زمین‌شناسی، واحدهای مافیک و الترامافیک منطقه موثرترین واحد سنگی برای تشکیل ذخایر معدنی تشخیص داده شد. از آنجا که مطالعات در فاز اولیه است برای ایجاد یک ایده کلی، مطالعات ژئوشیمیایی رسوب آبراه‌ای و تفسیر آنها به روش تحلیل مولفه‌های اصلی انجام گرفت. در نتیجه مطالعات ژئوشیمیایی چهار گروه از

کشور. ۱۵.

- حسنی‌پاک، ع. و شرف‌الدین، م.، ۱۳۹۱. تحلیل داده‌های اکتشافی. انتشارات دانشگاه تهران. ۱۰۱.

- حیدریان دهکردی، ن.، نیرومند، ش.، ادیب، ش.، تاج‌الدین، ح. و میرزایی، س.، ۱۴۰۰. زمین‌شناسی، کانی‌شناسی، دگرسانی و پتانسیل‌سنجی کانسار لخشک، پهنه زمین‌درز سیستان بر مبنای مطالعات ژئوفیزیکی (IP/RS). فصلنامه زمین‌شناسی ایران. ۱۵، ۵۸، ۲۵-۳۹.

- شایسته‌فر، م.، جلالی، م.، دهقانی، ح.، و تقوایی‌نژاد، م.، ۱۳۸۹. پتانسیل‌یابی مواد معدنی با استفاده از پردازش‌های آماری داده‌های ژئوشیمی اکتشافی (مطالعه موردی: برکه ۱:۱۰۰۰۰۰ سربیشه)، نشریه علمی پژوهشی روش‌های تحلیلی و عددی در مهندسی معدن. ۶-۱۶.

- فاطمی، ب. و رضایی، ی.، ۱۳۹۳. مبانی سنجش از راه دور. انتشارات آزاده. ۳۵۰.

- مجددی، ح.، بومری، م.، و بیابانگرد، ح. ۱۴۰۰. پتروگرافی و ژئوشیمی سنگ‌های آذرین و کانی‌زایی آنتیموان در لخشک، شمال غرب زاهدان، جنوب شرق ایران. فصلنامه زمین‌شناسی ایران. ۱۵، ۵۷، ۸۷-۱۰۶.

- Abrams, M., 2000. The Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER): data products for the high spatial resolution imager on NASA's Terra platform. *International Journal of Remote sensing*, 21(5), 847-859.

- Abrams, M. and Yamaguchi, Y., 2019. Twenty years of ASTER contributions to lithologic mapping and mineral exploration. *Remote Sensing*, 11(11), 1394.

- Ahmadi, H. and Pekkan, E., 2021. Fault-based geological lineaments extraction using remote sensing and GIS-a review. *Geosciences*, 11(5), 183.

- Ayoobi, I. and Tangestani, M. H., 2017. Evaluation of relative atmospheric correction methods on ASTER VNIR-SWIR data in playa environment. *Carbonates and Evaporites*, 32(4), 539-546.

- Babazadeh, S. A. and De Wever, P., 2004. Early Cretaceous radiolarian assemblages from ra-

آرژبلیک، پروپلیتیک، فلیک و کانی‌های آهن‌دار بوده است. همچنین با استفاده از فیلترگذاری بالاگذر، خطواره‌های منطقه رسم شد. در نهایت با تلفیق چهار لایه اطلاعاتی سنگ‌شناسی، ژئوشیمی، دگرسانی و خطواره‌گی سه نقشه دی‌فازی حاوی اطلاعات مکانی به‌دست آمده است که پس از دی‌فازی‌سازی این تلفیق محدوده‌هایی با بالاترین احتمال وجود ذخایر کرومیت در شمال غربی تا جنوب شرقی گستره، سولفید توده‌ای در شمال غرب تا شمال شرق محدوده و منیزیت غالباً در شمال غرب محدوده سربیشه معرفی شدند. با تهیه نقشه‌های زمین‌شناسی با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰، شناسایی و تایید صحرایی زون‌های دگرسانی و نمونه برداری ژئوشیمی در محدوده‌های مشخص شده، احتمال معرفی ذخیره معدنی اقتصادی امید بخش خواهد بود.

سپاسگزاری

نویسندگان این مقاله برای حمایت از این پژوهش، مرهون جناب آقای مهندس بهرام آقا ابراهیمی سامانی هستند که ضایعه دردناک درگذشت ایشان در ماه‌های اخیر موجب تأسف و تألم جامعه علوم زمین کشور شد. از درگاه خداوند متعال برای ایشان علو درجات و رحمت الهی آرزومندیم.

همچنین از سرکار خانم بهناز ضرغام، که زحمت تهیه نقشه یکصد هزار پهنه سربیشه را بر عهده داشتند کمال تشکر و قدردانی را داریم.

منابع

- آقاناتی، ع.، ۱۳۸۳. زمین‌شناسی ایران. سازمان زمین‌شناسی کشور. ۶۴۰.

- احمدی، ر. و قره‌شیخ بیات، ع. ۱۴۰۰. تلفیق روش‌های سنجش از دور و مغناطیس‌سنجی به‌منظور اکتشاف کانسار آهن در گستره مراغ بندر چارک. فصلنامه زمین‌شناسی ایران، ۱۵، ۵۹، ۴۹-۶۷.

- اشتوکلین، ی. افتخارنژاد، ع. و هوشمندزاده، ع.، ۱۳۵۲. بررسی مقدماتی زمین‌شناسی در لوت مرکزی، شرق ایران. سازمان زمین‌شناسی کشور. گزارش شماره ۲۲ف. ۸۶.

- تقریبی، م.، ۱۳۷۸. منیزیت و جایگاه آن در شرق کشور، انتشارات سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی

- diolarites in the Sistan Suture (eastern Iran). *Geodiversitas*, 26(2), 185-206.
- Bonham-Carter, G. F., 1989. Weights of evidence modeling: a new approach to mapping mineral potential. *Statistical applications in the earth sciences*, 171-183.
 - Demetriades, A., Smith, D. B. and Wang, X., 2018. General concepts of geochemical mapping at global, regional, and local scales for mineral exploration and environmental purposes. *Geochimica Brasiliensis*, 32(2), 136-136.
 - Fatima, K., Khattak, M. U. K., Kausar, A. B., Toqeer, M., Haider, N. and Rehman, A. U., 2017. Minerals identification and mapping using ASTER satellite image. *Journal of Applied Remote Sensing*, 11(4), 046006.
 - Gandhi, S. M. and Sarkar, B. C., 2016. *Essentials of mineral exploration and evaluation*. Elsevier.
 - Grunsky, E. C. and de Caritat, P., 2020. State-of-the-art analysis of geochemical data for mineral exploration. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 20(2), 217-232.
 - Guilbert, J. M. and Park, C. F., 2007. *The geology of ore deposits*. Waveland Press. 985.
 - Gupta, R. P., 2017. *Remote sensing geology*. Springer 451 ..
 - Halder, S., 2013. *Mineral Exploration, Principles and Applications*. Elsevier 360 .p.
 - Hosseini-Dinani, H. and Yazdi, M., 2021. Multi-dataset analysis to assess mineral potential of MVT-type zinc-lead deposits in Malayer-Isfahan metallogenic belt, Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 14(8), 1-23.
 - Hutchinson, R. W., 1973. Volcanogenic sulfide deposits and their metallogenic significance. *Economic Geology*, 68(8), 1223-1246.
 - Irons, J. R., Dwyer, J. L. and Barsi, J. A., 2012. The next Landsat satellite: The Landsat data continuity mission. *Remote Sensing of Environment*, 122, 11-21.
 - Karimpour, M. H., Stern, C., Farmer, L. and Saadat, S., 2011. Review of age, Rb-Sr geochemistry and petrogenesis of Jurassic to Quaternary igneous rocks in Lut Block, Eastern Iran. *Geopersia*, 1 (1), 19-54
 - Kaiser, H. F., 1958. The varimax criterion for analytic rotation in factor analysis. *Psychometrika*, 23 (3), 187-200.
 - Langford, R. L., 2015. Temporal merging of remote sensing data to enhance spectral geolith, lithological and alteration patterns for regional mineral exploration. *Ore Geology Reviews*, 68, 14-29.
 - Mather, P. M. and Koch, M., 2011. *Computer processing of remotely-sensed images: an introduction*. John Wiley and Sons
 - Modabberi, S., Namayandeh, A., Setti, M. and López-Galindo, A., 2019. Genesis of the Eastern Iranian bentonite deposits. *Applied Clay Science*, 168, 56-67.
 - Mosusu, N., Bokuik, A., Petterson, M. and Holm, R., 2021. Stream Sediment Datasets and Geophysical Anomalies: A Recipe for Porphyry Copper Systems Identification—The Eastern Papuan Peninsula Experience. *Geosciences* 11 (7), 299.
 - Mousivand, F., Rastad, E., Peter, J. M. and Maghfouri, S., 2018. Metallogeny of volcanogenic massive sulfide deposits of Iran. *Ore Geology Reviews*, 95, 974-1007.
 - Noori, L., Beiranvandpour, A., Askari, G., Taghipour, N., Pradhan, B., Lee, C.-W. and Honarmand, M. 2019. Comparison of different algorithms to map hydrothermal alteration zones using ASTER remote sensing data for polymetallic vein-type ore exploration: Toroud-Chahshirin Magmatic Belt (TCMB), North Iran. *Remote Sensing*, 11(5), 495.
 - Pang, K. N., Chung, S. L., Zarrinkoub, M. H., Khatib, M. M., Mohammadi, S. S., Chiu, H. Y., ... and Lo, C. H., 2013. Eocene-Oligo-

- cene post-collisional magmatism in the Lut-Sistan region, eastern Iran: Magma genesis and tectonic implications. *Lithos*, 180, 234-251.
- Pazand, K. and Hezarkhani, A., 2018. Predictive Cu porphyry potential mapping using fuzzy modelling in Ahar-Arasbaran zone, Iran. *Geology, Ecology and Landscapes*, 2(4), 229-239.
 - Porwal, A. and González-Álvarez, I., 2019. Reprint of: Introduction to special issue on geologic remote sensing. *Ore Geology Reviews*, 108, 1-7.
 - Richards, J. P., Spell, T., Rameh, E., Raziq, A. and Fletcher, T., 2012. High Sr/Y magmas reflect arc maturity, high magmatic water content, and porphyry Cu±Mo±Au potential: examples from the Tethyan arcs of central and eastern Iran and western Pakistan. *Economic Geology*, 107., 295-332
 - Sabins, F. F., 1999. Remote sensing for mineral exploration. *Ore geology reviews* 14 (3-4), 157-183.
 - Saccani, E., Delavari, M., Beccaluva, L. and Amini, S. 2010. Petrological and geochemical constraints on the origin of the Nehbandan ophiolitic complex (eastern Iran): Implication for the evolution of the Sistan Ocean. *Lithos*, 117 (1-4), 209-228.
 - Safari, M., Maghsoudi, A. and Beiranvandpour, A., 2018. Application of Landsat-8 and ASTER satellite remote sensing data for porphyry copper exploration: a case study from Shahr-e-Babak, Kerman, south of Iran. *Geocarto international*, 33 (11), 1186-1201.
 - Sekandari, M., Masoumi, I. , Beiranvand Pour, A., Muslim, A. M., Rahmani, O., Hashim, M., Zoheir, B., Pradhan, B., Misra, A. and Aminpour, S. M., 2020. Application of Landsat-8, Sentinel-2, ASTER and WorldView-3 spectral imagery for exploration of carbonate-hosted Pb-Zn deposits in the Central Iranian Tethyan (CIT). *Remote Sensing*, 12 (8), 1239.
 - Shirazi, A., Shirazy, A. and Karami, J., 2018. Remote sensing to identify copper alterations and promising regions, Sarbishe, South Khorasan, Iran. *International Journal of Geology and Earth Sciences*, 4(2), 36-52.
 - Sulemana, I. A., Quaye-Ballard, J., Ntori, C., Awotwi, A., Adeyinka, O. M., Okrah, T. M. and Asare-Ansah, A., 2020. Location mapping of hydrothermal alteration using landsat 8 Data: A case of study in Prestea Huni Valley District, Ghana. *International Journal of Geography and Geology*, 9(1), 13-37.
 - Tarabi, S., Emami, M. H., Modabberi, S. and Sheikh Zakariaee, S. J., 2019. Eocene-Oligocene volcanic units of Momen Abad, east of Iran: petrogenesis and magmatic evolution. *Iranian Journal of Earth Sciences*, 11(2), 126-140.
 - Tirrul, R., Bell, I., Griffis, R. and Camp, V., 1983. The Sistan suture zone of eastern Iran. *Geological Society of America Bulletin*, 94, 134-150
 - Walker, R., Gans, P., Allen, M., Jackson, J., Khatib, M., Marsh, V and Zarrinkoub, M. 2009. Late Cenozoic volcanism and rates of active faulting in eastern Iran. *Geophysical Journal International*, 177 (2), 783-805.
 - Wang, Q., Tang, G, Hao, L. , Wyman, D. , Ma, L., Dan, W., Zhang, X., Liu, J. , Huang, T. and Xu, C. 2020. Ridge subduction, magmatism, and metallogenesis. *Science China Earth Sciences*, 1-20.
 - Wang, W., Zhao, J., Cheng, Q. and Liu, J., 2012. Tectonic-geochemical exploration modeling for characterizing geo-anomalies in southeastern Yunnan district, China. *Journal of Geochemical Exploration*, 122, 71-80.
 - Zhang, N., Zhou, K. and Du, X., 2017. Application of fuzzy logic and fuzzy AHP to mineral prospectivity mapping of porphyry and hydrothermal vein copper deposits in the Dananhu-Tousuquan island arc, Xinjiang, NW China. *Journal*

of African Earth Sciences, 128, 84-96.

- Zuo, R., 2011. Identifying geochemical anomalies associated with Cu and Pb-Zn skarn mineralization using principal component analy-

sis and spectrum-area fractal modeling in the Gangdese Belt, Tibet (China). Journal of Geochemical Exploration, 111 (1-2), 13-22

بررسی رخساره‌های رسوبی و مشخصه‌های هیدروشیمیایی نهشته‌های کربناته آب اسک، جنوب شرق آتشفشان دماوند

سمیه رحمانی جوانمرد^(۱)، محسن رنجبران^(۲) و وهاب امیری^(۳)

۱. استاد مدعو، گروه جغرافیا، مؤسسه آموزش عالی الشتر، لرستان، الشتر، ایران

۲. دانشیار، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۳. استادیار، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه یزد، یزد، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۹/۲۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۲/۲۴

چکیده

چشمه‌های آهک‌ساز آب اسک در فاصله ۸۵ کیلومتری شمال شرقی تهران در دامنه شرقی آتشفشان دماوند واقع شده‌اند. نهشته‌های این چشمه‌ها، بیشتر به صورت تراورتن دیده می‌شوند. بررسی‌های میکروسکوپی حاکی از وجود چهار رخساره غیرزیستی و تعداد دو رخساره زیستی در تراورتن‌های آب اسک است. بر اساس توالی رسوب‌گذاری و رخساره‌های سنگی و همچنین با دور شدن از چشمه‌ها سه نوع مختلف تراورتن در منطقه شناسایی شد (تراورتن‌های نوع اول با مورفولوژی دهانه‌ای و کانالی، تراورتن‌های نوع دوم با مورفولوژی حوضچه‌ای، سدی و آبشاری و تراورتن‌های نوع سوم یا لامینه‌ای). بر روی نمودار $\delta^{13}\text{C}$ در مقابل $\delta^{18}\text{O}$ (VPDB)، این تراورتن‌ها در دو رده آنکوپید و قشرهای بلورین از نظر سنگ‌رخساره قرار می‌گیرند. بر اساس رخساره‌های شناسایی شده، این چشمه‌ها گرمابی هستند و در رده چشمه‌های ترموزن قرار می‌گیرند. مقادیر مثبت ضریب اشباع شدگی لائزلیه (LSI) برای چشمه‌های پشنگ، نادعلی و زاغ بیانگر فوق اشباع بودن این نمونه‌ها نسبت به کربنات کلسیم است و همین موضوع موجب رسوب‌گذاری قابل توجه در اطراف چشمه‌های مورد نظر شده است. در مقابل، مقدار LSI منفی در چشمه سر پل به تحت اشباع بودن آب نسبت به کربنات کلسیم اشاره دارد. بنابراین به نظر می‌رسد نقش این چشمه در رسوب‌گذاری تشکیلات تراورتنی در این منطقه کمتر از سایر چشمه‌ها است. همچنین موقعیت نمونه‌ها بر روی نمودار بهینه شده گیبس و نمودار ون ویردام نشان می‌دهد، برهمکنش آب با سنگ‌های کربناته و تا حدودی سیلیکاته به‌عنوان مهم‌ترین منبع تأمین عناصر کلسیم و سدیم در این منطقه شناخته می‌شوند.

واژه‌های کلیدی: آب اسک، ایزوتوپ‌های پایدار کربن و اکسیژن، تراورتن‌های گرمزاد، رخساره رسوبی، هیدروشیمی.

مقدمه

بیش از ده چشمه سرد و دما دار مورد توجه ویژه گردشگران و همچنین پژوهشگران می‌باشد. نهشته‌های این چشمه‌های آهک‌ساز، بیشتر تراورتن می‌باشد. اصطلاح تراورتن پیش‌تر توسط کوهن (Cohn, 1864) به کار رفته است و در وسیع‌ترین معنای آن به همه رسوبات کربناته غیردریایی تشکیل شده

مجموعه چشمه‌های معدنی آب اسک (واقع در ۸۵ کیلومتری شمال شرق تهران) در ترازهای پایین ارتفاعی جاده هراز رخنمون دارند. این منطقه از نواحی شناخته شده در دامنه جنوب شرقی آتشفشان دماوند است و بواسطه ظهور

* نویسنده مرتبط: rahmani.somaye@gmail.com

آب، دما، pH، سرعت و غیره اشاره دارد. به دلیل تغییر مکان چشمه‌ها که ناشی از تغییر سرعت جریان آب چشمه‌ها و باز و بسته بودن دهانه چشمه‌هاست رخساره‌ها به‌طور نسبی جانشین هم شده و به‌طور مداوم بازسازی می‌شوند (Fouke et al., 2003; Fouke et al., 2001; Fouke et al., 2000). از سوی دیگر براساس مورفولوژی و کانی‌شناسی، در تراورتن‌ها پنج رخساره رسوبی (دهانه^۱، کانالی^۲، حوضچه‌ای^۳، دامنه نزدیک به منشأ^۴ و دامنه دور از منشأ^۵) شناسایی شده است (Inskeep and McDermott, 2005; Fouke et al., 2000; Chafetz and Folk, 1984 (شکل ۱). پنتکاست و وایلز (Pentecost and Viles, 1994) و پنتکاست (Pentecost, 1995 a, b) تراورتن‌ها را براساس شکل و محیط رسوبی به هفت گروه رده‌بندی کرده‌اند (شکل ۲): الف) پشته‌ای-شکافی، ب) آبشاری، پ) سدی، ت) قشرهای رودخانه‌ای، ث) قشرهای دریاچه‌ای با آنکوئید، ج) مردابی و چ) رودایت‌های سطحی سیمانی شده. اوزکول و همکاران (Özkul et al., 2002) با استفاده از مقادیر ایزوتوپ‌های پایدار کربن و اکسیژن تراورتن‌ها را براساس سنگ‌رخساره به نه گروه زیر، رده‌بندی کرده‌اند: ۱) قشرهای بلورین، ۲) بوته‌ای، ۳) آنکوئیدی یا پیژولیتی، ۴) تیغه‌ای، ۵) پوشیده شده از حباب گاز، ۶) نی‌مانند، ۷) سنگ آواری، ۸) قلوهای و ۹) خاک‌های دیرینه^۷. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی چشمه‌های آب گرم بستگی به ترکیب محلول نفوذ کننده، عمق مهاجرت، زمان اقامت آب‌های گرم در مسیر مهاجرت و واکنش‌های آب/سنگ در عمق سازندها (اختلاط با رسوبات هوا نژده) دارد (Kele et al., 2008). این ویژگی‌ها ترکیب رسوبات کربناته مانند تراورتن را که از این آب‌ها تشکیل می‌شود تحت تأثیر قرار می‌دهد.

انصاری (Ansari, 2013)، رحمانی جوانمرد (۱۳۹۰)،

در یا نزدیک چشمه‌های زمینی، رودخانه‌ها، دریاچه‌ها و غارها اشاره دارد (Sanders and Friedman, 1967). طبق تعریف پنتکاست (Pentecost, 2005b) تراورتن یک سنگ آهک قاره‌ای رسوب کرده در اطراف چشمه‌هاست و از کلسیت یا آراگونیت با تخلخل بین بلورین پایین تا متوسط، تخلخل قالبی یا داربستی بالا تشکیل شده است. تراورتن در محیط وادوز یا اساساً فراتیک تشکیل می‌شود و رسوب‌گذاری آنها از طریق انتقال دی‌اکسیدکربن از منابع زیرزمینی که منجر به فوق اشباع شدن کربنات کلسیم می‌شود؛ صورت می‌گیرد. در مورد رده‌بندی تراورتن‌ها، طبقه‌بندی جامعی بر مبنای خصوصیات سنگ‌شناسی و ارتباط ژنتیکی این ویژگی‌ها با محیط رسوبی ارائه نشده و تاکنون بیشتر طبقه‌بندی‌ها بر مبنای ویژگی‌های زمین‌شیمیایی و کانی‌شناسی بوده است (Jones and Renaut, 2010; Guo and Riding, 1998; Folk et al., 1985; Chafetz and Folk, 1984; Cipriani et al., 1972; Gonfiantini et al., 1968). بیشتر تحقیقات انجام شده در سطح جهانی حاکی از ارتباط محیط تشکیل تراورتن‌ها به سیستم گرمایی و در سه سیستم رسوبی (تراورتن‌های گرم‌زاد) و متشکل از هشت نوع رسوب کربناته است (جدول ۱). تراورتن‌ها متشکل از رسوبات متنوعی می‌باشند و ناشی از دو فرایند اصلی هستند (Gandin and Capezuoli, 2008): ۱) رسوبات کربناته‌ای که از آب‌های جاری منشأ می‌گیرد و در طی رسوب‌گذاری که هم در شرایط اپی‌ژن (سیستم‌های گرمایی زیرجوی) و هم در شرایط هیپوژن (کانال‌های زمین گرمایی عمیق) می‌تواند رخ می‌دهد، به‌صورت پوسته‌های سخت دچار سنگ‌شدگی می‌شوند (رخساره‌های کربناته زیستی و غیرزیستی)؛ ۲) رسوباتی که مانند کربنات‌های دریایی در محیط‌های زیرآبی نظیر دریاچه‌ها، باتلاق‌ها، رودخانه‌ها و حوضچه‌های موقتی ته‌نشین شده و به ترتیب از طریق فرایندهایی مانند تعلیق یا حمل و نقل به شکل دانه‌های سست و مجزا، رسوب‌گذاری و در نهایت دفن شدن به سنگ تبدیل می‌شوند. رخساره‌های تراورتنی به ته‌نشینی تراورتن‌ها در طیفی از شرایط محیطی مانند درجه حرارت، عمق نسبی

1. Thermogene travertines
2. Vent
3. Channel
4. Pound
5. Proximal slope
6. Distal slope
7. Palaeosols

با شیمی آب، تجزیه و تحلیل نمونه‌های آب چشمه‌های تراورتن‌ساز نیز انجام خواهد شد.

روش مطالعه

برای انجام این پژوهش از داده‌های نمونه‌های آبی منتشر شده توسط انصاری (Ansari, 2013) استفاده شد. همچنین در طی پژوهش حاضر، پارامترهای فیزیکوشیمیایی مانند درجه حرارت، EC و pH بعضی از چشمه‌های اسک اندازه‌گیری شد (جدول ۴). به منظور تعیین رخساره‌های رسوبی، از تراورتن‌ها در امتداد مسیر جریان چشمه‌های آب نمونه‌برداری (۵۰ نمونه) انجام گرفت و تصاویر لازم از ویژگی‌های صحرایی و ماکروسکوپی منطقه تهیه شد. در راستای بررسی دقیق‌تر ویژگی‌های بافتی و رخساره‌ای، تعدادی مقطع نازک از نمونه‌ها تهیه و با میکروسکوپ

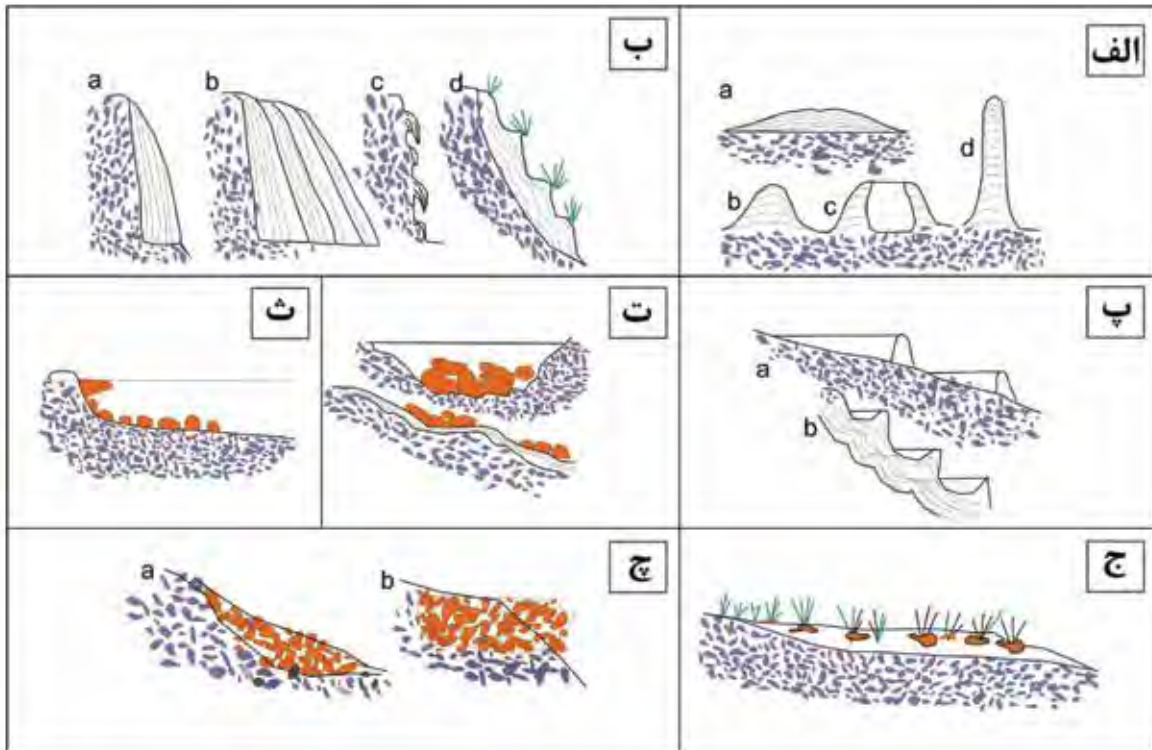
رحمانی جوانمرد و همکاران (Rahmani Javanmard et al., 2012) و رنجبران و همکاران (Ranjbaran et al., 2019) به ترتیب با بررسی فاکتورهای فیزیکوشیمیایی آب چشمه‌ها، مطالعات زمین‌شیمیایی و ایزوتوپی نهشته‌های کربناته ناشی از فعالیت چشمه‌ها و همچنین نتایج حاصل از مطالعات دورسنجی به بررسی عوامل مؤثر در ظهور چشمه‌های این ناحیه پرداختند. اما تاکنون مطالعات جامعی برای رده‌بندی و بررسی رخساره‌های رسوبی تراورتن‌های آب اسک و سازوکار تشکیل آنها انجام نشده است. از این رو، در بررسی‌های پیش‌بینی شده در طی این پژوهش، با استفاده از نتایج حاصل از مطالعات میکروسکوپی و از دید ایزوتوپی‌های پایدار کربن و اکسیژن به توصیف و بررسی رخساره‌های رسوبی تراورتن‌های مورد مطالعه پرداخته می‌شود. علاوه بر این، در راستای درک بهتر ارتباط رخساره‌های تراورتنی

جدول ۱. رده‌بندی بافتی کربنات‌های گرمایی (سنگ آهک‌های تراورتنی) (Gandin and Capezzuoli, 2014)

قشرهای بلورین غیرزیستی	قشرهای زیستی
بلورهای پرماند	بایندستون
بلورهای شعاعی-بادبزی	میکرایت لخته‌ای (ترومبولیت)
سنگ‌های اسفنجی	استروماتولیت
	بوته‌های دندریتی
	طبقه‌های میکروبی



شکل ۱. مقطع عرضی از رخساره‌های تراورتنی و جهت جریان آب چشمه (Fouke et al., 2000)



شکل ۲. رده‌بندی تراورتن‌ها براساس شکل و محیط رسوبی (Pentecost and Viles, 1994; Pentecost, 1995a, b)

زمین‌شناسی منطقه

منطقه آب اسک بین طول جغرافیایی $۵۲^{\circ} ۰۸'$ تا $۵۲^{\circ} ۱۰'$ شرقی و عرض جغرافیایی $۳۵^{\circ} ۵۱'$ تا $۳۵^{\circ} ۵۲'$ شمالی واقع شده است (شکل ۳). از نظر زمین‌شناسی این منطقه در حد فاصل بین سازندهای دوران پالئوزویک، مزوزویک تا نهشته‌های آذرآواری و توده‌های آذرین قرار دارد (شکل ۳). سازندهای پالئوزویک موجود در منطقه، متشکل از سنگ آهک میلا و سنگ آهک دورود هستند. از جمله سازندهای مزوزویک موجود در منطقه می‌توان به سنگ آهک الیکا، ماسه‌سنگ‌ها و شیل‌های سازند شمشک و سنگ آهک سازند لار اشاره کرد. این منطقه بخشی از پهنه ساختاری البرز مرکزی است و دو روند ساختاری شرق-شمال شرق (البرز شرقی) و غرب-شمال غرب (البرز غربی) در منطقه کوه آتشفشانی دماوند به هم می‌رسند. گسل‌های فعال و توانمند فشارشی (مانند گسل مشا) و چین‌خوردگی‌های عظیم کم و بیش شرقی-غربی در پهنه ۶۰۰ کیلومتری البرز

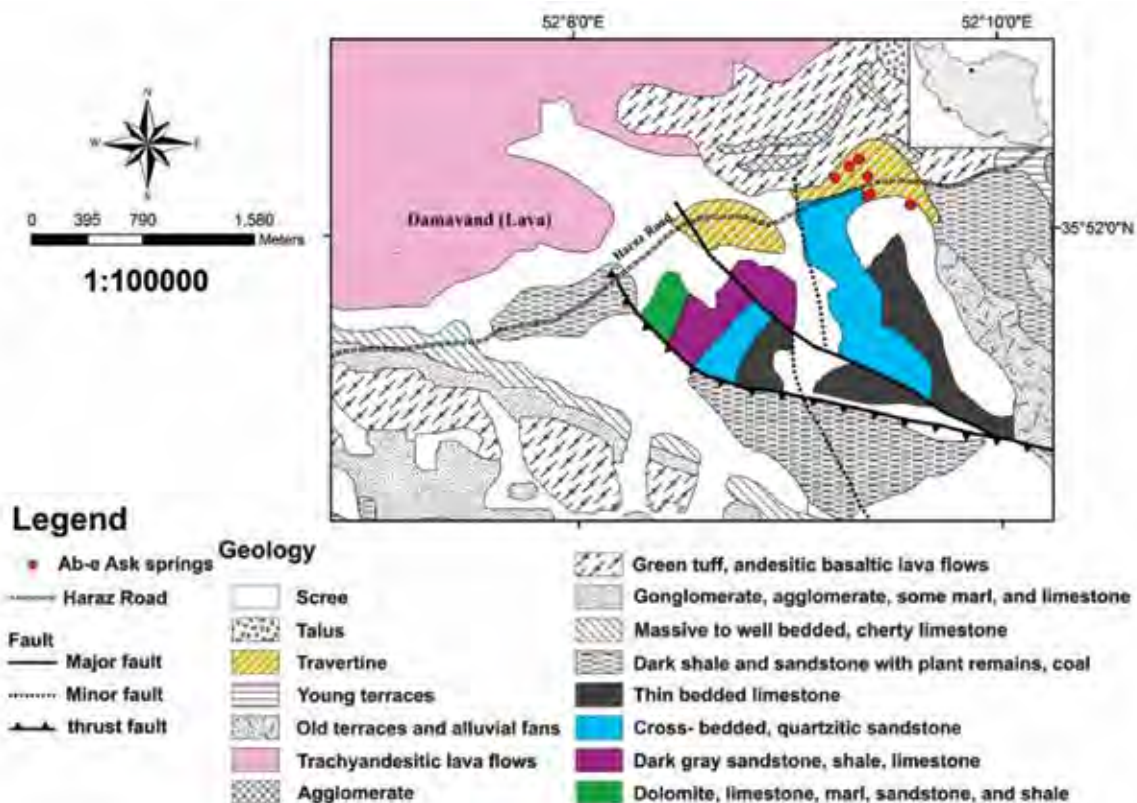
پلاریزان مورد مطالعه قرار گرفتند. سپس به منظور مطالعه دقیق‌تر با میکروسکوپ الکترونی روبشی^۱ مورد بررسی واقع شدند. با توجه به اینکه این تراورتن‌ها از زمانی که شروع به رسوب‌گذاری کرده‌اند به طور مستقیم در معرض آب‌های جوی^۲ قرار دارند بنابراین پتانسیل لازم برای تحمل فرایندهای دیازنزی را پیدا کرده‌اند. بر اساس مطالعات پتروگرافی، دیاژنز در این تراورتن‌ها به وسیله وجود کلسیت ثانویه یا کلسیت تبلور یافته، قابل شناسایی است. به همین منظور با استفاده از دستگاه Craftsman Rotary مدل EX 22 M 22000 RPM، کلسیت ثانویه جدا شد و آنالیزهای ایزوتوپی ^{13}C و ^{18}O بر روی تراورتن‌های مورد مطالعه انجام گرفت. مقدار ایزوتوپ‌ها با استفاده از دستگاه طیف‌سنج جرمی Thermo Fisher DELTA-V با دقت $۰/۲$ پرمیل و برحسب استاندارد پی‌دی بلمنیت (PDB) در آزمایشگاه ایزوتوپ پایدار ETH (زوریخ، سوئیس) انجام شد. انجام آنالیز SEM در دانشکده برق دانشگاه تهران محقق شد.

1. Scanning electron microscope

2. Meteoric water

امیدیان (۱۳۸۶) معتقدند که تغییر جهت رژیم تنشی در این زمان، عامل تکتونیکی برای ایجاد درز و شکاف‌های عمیق در ناحیه شکننده خمشی البرز مرکزی می‌باشد و موجب فوران دماوند در یک محیط تراکششی شده است. به نظر می‌رسد که فعالیت سیستم‌های جدید تکتونیکی حاکم بر البرز مرکزی، ظهور چشمه‌های متعدد اطراف آتشفشان دماوند و نهشته‌های تراورتنی ناشی از آن را فراهم کرده است (امیدیان، ۱۳۸۶). بر اساس اطلاعات نقشه زمین‌شناسی، گسل‌های ساختاری ایرا و نوا با روند ESE و دارا بودن مکانیسم معکوس در شرق آتشفشان دماوند، جزء سیستم تکتونیکی البرز مرکزی محسوب می‌شوند. ادامه روند این گسل‌ها به سمت غرب، با افزایش شاخه‌های فرعی فعالی همراه است و با تغییر جهت بارز به زیر گدازه‌های دماوند در منطقه آب اسک محو می‌شوند (اسکویی و امیدیان، ۱۳۹۳).

حاکمی از کوهزایی فعال این ناحیه است. پی‌سنگ رسوبی حاشیه غیرفعال پالئوزوییک-موزووییک این منطقه همراه با تظاهرات رسوبی-آتشفشانی سنوزوییک به دلیل این کوهزایی فعال که ناشی از فشارش مداوم صفحه عربستان به صفحه ایران است، از نظر تکتونیکی به شدت متحول شده است. چرخش راستگرد بلوک خزر در 2 ± 5 میلیون سال پیش منجر به تغییر روند گسلش فشارشی راستگرد این ناحیه به چپگرد شده است (Allen et al., 2003). امیدیان (۱۳۸۶) با بررسی‌های پالئواسترس در اطراف آتشفشان دماوند و تحلیل شواهد متعدد ثبت خش‌لغزهای گسلی فشارشی دارای مؤلفه امتدادی چپگرد که بر روی خش‌لغزهای فشاری با مؤلفه امتدادی راستگرد حک شده بودند، روند تنشی این منطقه را همخوان با سیستم تراکششی معرفی کردند. حسن‌زاده و همکاران (Hassanzadeh et al., 2006) و



شکل ۳. نقشه زمین‌شناسی خلاصه شده منطقه مورد مطالعه که در آن موقعیت زمین‌شناسی تراورتن‌ها و چشمه‌های تراورتن‌ساز مشخص شده است (Allenbach and Shteiher, 1966)

بحث

رخساره‌های رسوبی

تراورتن‌ها تقریباً شامل دو گونه اصلی کربنات کلسیم، آراگونیت و کلسیت هستند. این کانی‌ها اطلاعاتی را در مورد محیط‌های گذشته ارائه می‌دهند. شرایطی که براساس آن این کانی‌ها می‌توانند تشکیل شوند متغیر است و شامل ترکیب شیمیایی منبع آب، درجه حرارت، فعالیت‌های میکروبی (Fouke et al., 2000; Turi, 1986)، فشار، نرخ رسوبگذاری، تلاطم و نرخ انتشار دی‌اکسید کربن می‌باشد (Lippmann, 1973; Kitano, 1962). در منطقه مورد مطالعه و با فاصله گرفتن از دهانه چشمه‌ها، پنج رخساره تراورتنی بر اساس شکل و ترکیب کانی‌شناسی تشخیص داده شده است:

دهانه^۱: این رخساره از بلورهای سوزنی کلسیت با اندازه کمتر از ۱۰۰ میکرومتر تشکیل شده است (شکل ۴-الف).

کانالی^۲: این رخساره از بلورهای سوزنی کلسیت تشکیل شده است و به صورت افقی در کانال‌های رودخانه‌ای گسترش پیدا کرده و یک شکل پلکانی به نام تخت‌انک^۳ یا تراس‌های پلکانی شکل را تشکیل داده است (شکل ۴-ب).

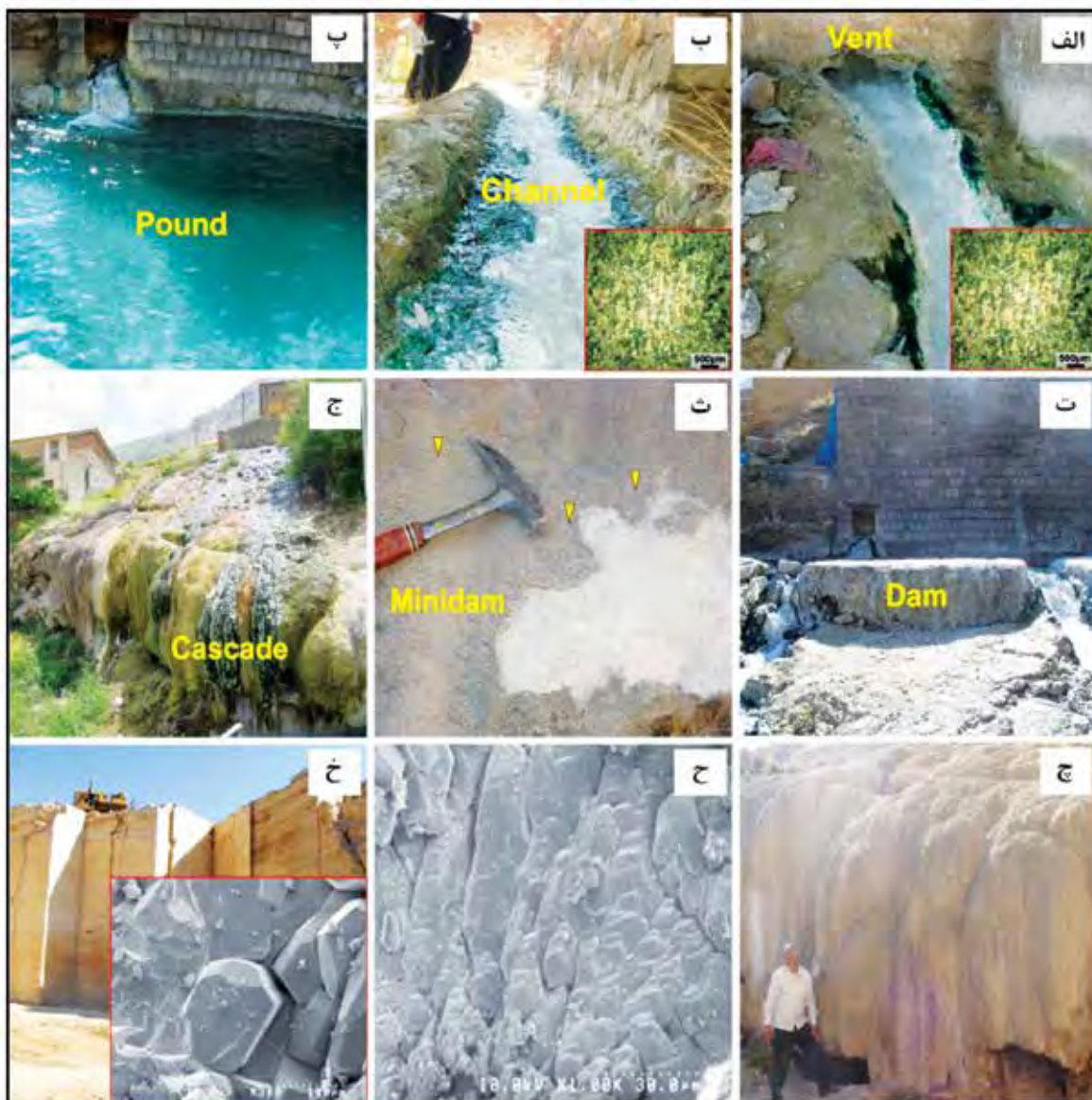
دامنه نزدیک به منشأ^۴: در امتداد این رخساره حوضچه‌ها (شکل ۴-پ)، تراورتن‌های سدی (شکل ۴-ت و ث) و تراورتن‌های آبشاری^۵ بر روی سرایشی‌های تند تشکیل شده است (شکل ۴-ج و چ). از نظر ترکیب کانی‌شناسی این رخساره از بلورهای کلسیت ستونی یا رشته‌ای تشکیل شده است (شکل ۴-ح). این عقیده وجود دارد که اسپار ستونی تا حد بسیار زیادی مربوط به اوایل دیاژنز و نئومورفیسم هستند (Braithwaite, 1979; Love and Chafetz, 1988; Janssen et al., 1999). رخساره حوضچه‌ای^۶ ناشی از افت شدید در جریان آب چشمه‌هاست (شکل ۴-پ) و به دلیل پایین بودن درجه حرارت آب از کلسیت تشکیل شده است. تراورتن‌های سدی^۷ در اطراف یکی از چشمه‌های آب گرم موجود در منطقه به نام چشمه بیلاق تشکیل شده‌اند (شکل ۴-ت). این نوع تراورتن‌ها از تراورتن‌های نوع آبشاری به وسیله افزایش موضعی عمودی خود که منجر به تشکیل آبگیر شده است تشخیص داده می‌شوند. اصطلاح

سد در اینجا به سدهای سرریز مصنوعی اطلاق می‌شود. در سدها، جریان آب مقدار زیادی از قطعات و خرده‌های گیاهان را جمع می‌کند و باعث رشد جلبک‌ها و پوشش آهکی می‌شوند و این خود باعث گسترش تراورتن‌زایی و بزرگ شدن سدها می‌شود. از انواع سدها می‌توان به سدهای کوچک^۸ در منطقه مورد مطالعه اشاره کرد (شکل ۴-ث) که دارای مقیاس کوچک هستند و اغلب در تراورتن‌های گرم‌آباد دیده می‌شوند (Geurts et al., 1992). تعدادی از تراورتن‌های منطقه مورد مطالعه نیز به شکل آبشاری و به دو صورت فعال و غیرفعال دیده می‌شوند (شکل ۴-ج و چ). این نوع از تراورتن‌ها بر روی سرایشی‌های تند در اثر افت سرعت جریان و فشار آب به وجود آمده‌اند. بعضی از آن‌ها در فواصل متغیری از منشأ آب توسعه پیدا کرده‌اند و حالت توده‌ای دارند. در منطقه مورد مطالعه این رسوبات بر اساس طبقه‌بندی پنتکاست (Pentecost, 2005b) از نوع رسوبات فرسایشی^۹ هستند. مورفولوژی این نوع از آبشارها تا حد بسیار زیادی به وسیله مسیر سیلاب آب کنترل شده است و بر روی دیوارهای قائم گسترش یافته‌اند (شکل ۴-ج و چ).

دامنه دور از منشأ^{۱۰}: در نهایت انتقال تدریجی به رخساره دامنه دور از منشأ، جایی که تراورتن‌های لامینه‌ای رخنمون دارند صورت می‌گیرد (شکل ۴-خ). این رخساره از کلسیت بلوکی تشکیل شده است (شکل ۴-خ).

در ادامه، به بررسی رخساره‌های شناسایی شده در تراورتن‌های آب اسک در دو گروه رخساره‌های غیرزیستی^{۱۱} و رخساره‌های زیستی^{۱۲} پرداخته خواهد شد (جدول ۲).

1. Vent
2. Channel
3. Terracette
4. Proximal slope
5. Cascade
6. Pound
7. Dam travertines
8. Mini dam
9. Erosively-shaped
10. Distal slope
11. Abiotic
12. Microbially



شکل ۴. تصاویری از رخساره‌های تراورتنی منطقه مورد مطالعه. الف) رخساره دهانه، ب) رخساره کانالی، پ) رخساره حوضچه‌ای، ت) رخساره سدی، ث) نمایی از سدهای کوچک در تراورتن‌های مورد مطالعه، ج و چ) رخساره آبشاری، ح) تصویر SEM از کلسیت رشته‌ای یا ستونی، خ) رخساره دامنه دور از منشأ

جدول ۲. رخساره‌های کربناته زیستی و غیرزیستی شناسایی شده در چشمه‌های تراورتن ساز آب اسک

قشرهای زیستی	قشرهای بلورین غیرزیستی
بایندستون (استروماتولیت)	بلورهای سوزنی
طبقه‌های میکروبی	بلورهای شعاعی-بادبزی
	قشر بلورین
	سنگ‌های اسفنجی

رخساره، شکل بادبزنی و شعاعی، به دلیل قرار گرفتن وجود بلورهای کشیده کلسیت است که با زاویه غیر از ۹۰ درجه نسبت به سنگ بستر قرار دارند.

رخساره قشر بلورین^۵

در این نوع سنگ رخساره، بلورهای کلسیت عمود بر لایه‌های میکرایتی رشد کرده‌اند (شکل ۵-ج و چ). با فاصله گرفتن از دهانه چشمه‌ها این رخساره بیشتر به صورت تناوبی از لایه‌های روشن کلسیت اسپاریتی و لایه‌های تیره رنگ اکسید آهن قابل مشاهده است (شکل ۵-ج و چ).

سنگ‌های اسفنجی^۶

برخی از این عوارض در اثر خروج گازهایی که به صورت محلول در آب وجود دارد و یا دارای منشأ آرگانیکی (گیاهان، باکتری‌ها و جلبک‌ها) هستند، به وجود می‌آیند. این اشکال همواره بعد از نهشتگی بسته شده و به صورت کره یا آلایت کوچکی در سطح رسوب ظاهر می‌شود و آن‌ها را به عنوان سنگ اسفنجی یا سنگ لانه زنبوری^۷ نامگذاری می‌کنند (شکل ۵-ح).

رخساره‌های زیستی^۸

رخساره‌های بلورین زیستی در منطقه مورد مطالعه به صورت بایندستون-استروماتولیت و تجمع میکروبی قابل مشاهده هستند (شکل ۶).

رخساره بایندستون استروماتولیتی^۹

این رخساره به صورت تناوبی از پوشش‌های جلبکی و کلیست میکرایتی-اسپاریتی قابل مشاهده است (شکل ۶-الف). رشد جلبک‌های سبز در چشمه‌های آب گرم اسک و تشکیل تراورتن بر روی آنها باعث ایجاد نوعی ساخت استروماتولیتی شده است. لامیناسیون‌های میکرایتی

رخساره‌های غیرزیستی

در منطقه مورد مطالعه، رخساره‌های بلورین غیرزیستی متشکل از بلورهای کلسیت می‌باشد و به صورت بلورهای سوزنی، بادبزنی-شعاعی، قشر بلورین و سنگ‌های اسفنجی قابل مشاهده است (شکل ۵).

رخساره توفای

در منطقه مورد مطالعه، این رسوبات نرم و سست، با سطوح سبز و به شکل ندولار در کانال‌های رودخانه‌ای دیده می‌شوند، به صورت لایه‌ای نازک بر روی اشیای مختلف ته‌نشین شده‌اند و نهشته‌های عهد حاضر کربنات کلسیم در منطقه محسوب می‌شوند (شکل ۵-الف). مطالعات میکروسکوپی نشان می‌دهد این رسوبات نرم و سست از بلورهای خیلی ریز کربنات کلسیم یا لوبلینایت تشکیل شده‌اند و حاوی حدود ۳۵ تا ۷۵ درصد آب هستند. به هنگام رسوب‌گذاری حالت پلاستیکی دارند، ولی بعد از خشک شدن به صورت پودر در می‌آیند (رحیم‌پور بناب، ۱۳۸۴؛ شکل ۵-ب). پدلی (Pedley, 1987) اشکال یک کلسیت تیغه‌ای با یک ماکل پلکانی^۲ که لوبلینایت^۳ نامیده می‌شود را از منطقه Caerwys که احتمال دارد در ارتباط با خشکی باشد توصیف کرده است. منشأ بلورهای لوبلینایت به نظر می‌رسد در ارتباط با مراحل انتهایی سیمانی شدن در توفای باشند (Gruszczyski et al., 2004). فولک و همکاران (Folk et al., 1985) گزارش کردند، بلورهای لوبلینایت در طی تبخیر، زمانی که پوشش‌های باکتریایی به طور کامل خشک شده باشند تشکیل می‌شوند. تصاویر SEM این رسوبات نشان می‌دهد که فعالیت‌های جلبکی مانند دیاتومه‌ها در نهشته شدن آنها نقش بسزایی داشته است (شکل ۵-پ). این بلورها شاخص محیط متئوریک-وادوز هستند و در جایی که نرخ اشباع‌شدگی نسبت به کربنات کلسیم افزایش یافته و جریان آب آشفته است تشکیل می‌شوند (Nelson, 1990; Chafetz et al., 1985).

بلورهای بادبزنی-شعاعی^۴

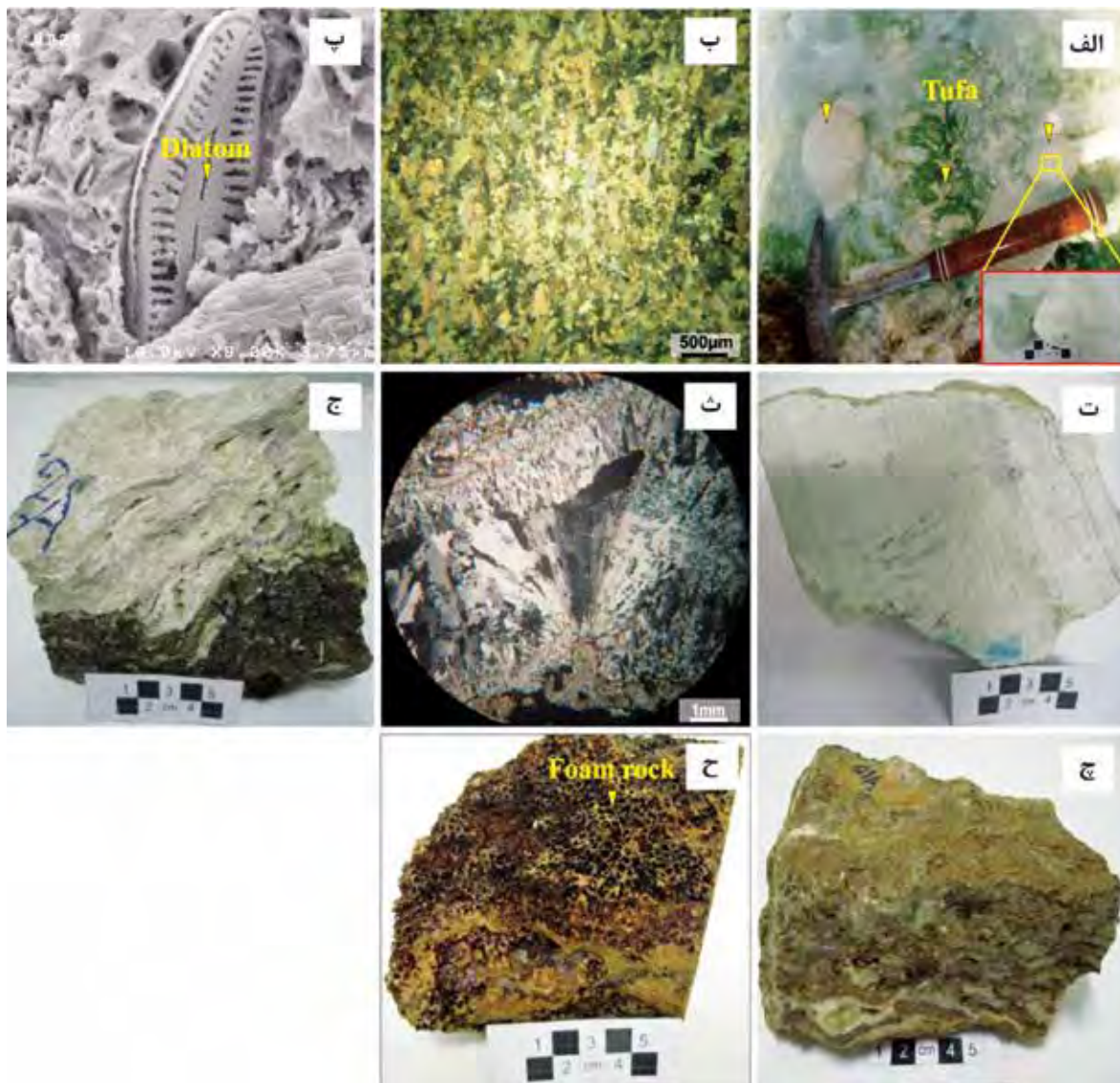
در تراورتن‌های مورد مطالعه این بلورها به شکل بادبزنی و شعاعی قابل مشاهده هستند (شکل ۵-ت و ث). در این

1. Tufa
2. Enechelon twinning
3. Lublinit
4. Fan-ray crystals
5. Crystalline crust
6. Foam rocks
7. Honeycomb rock
8. Microbialite
9. Stromatolitic bindstone

رخساره گرینستون پلوئیدی^۲

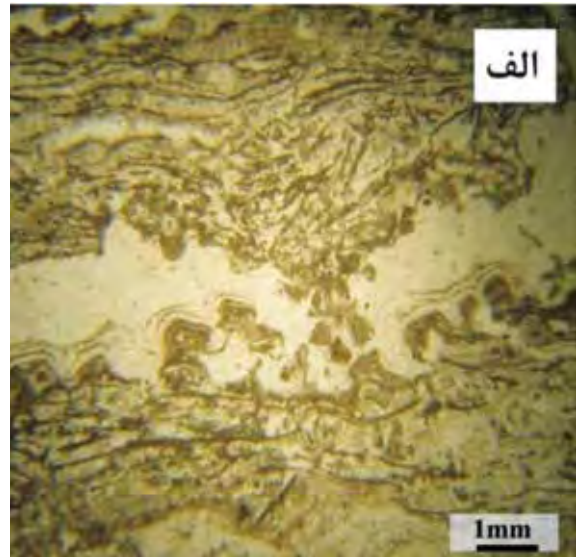
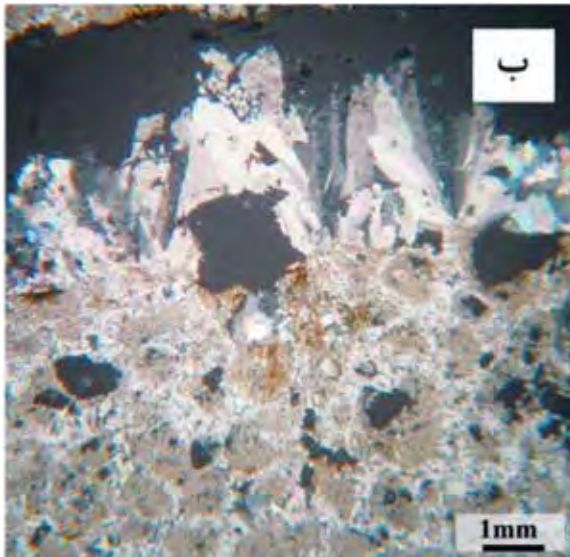
این رخساره در تراورتن‌های مورد مطالعه از پلوئیدها با بافت لخته‌ای تشکیل شده است و به احتمال زیاد دارای منشأ میکروبی هستند (شکل ۶-ب). تجمعاتی از پلوئیدها با ساختار لخته‌ای^۳ در طیف گسترده‌ای از انواع تراورتن‌ها به‌ویژه آنهایی که در ارتباط با کلونی باکتری‌ها و سیانوباکتری‌ها هستند گزارش شده است (Mohanty and Das, 1997).

بیشتر در این تراورتن‌های جلبکی، جایی که بیشتر در رابطه با رشد فصلی جلبک‌ها می‌باشند، آشکار هستند. میکرایت‌ها در اطراف و شاید در کلونی باکتری‌ها و در اطراف جلبک‌ها و اساساً سیانوباکتری‌ها ته‌نشین می‌شوند (Monty, 1996; Freydet and Plet, 1976). برخی از این جلبک‌ها با بافت کلو فورم^۱ در مقاطع میکروسکوپی دیده می‌شوند (شکل ۶-الف).



شکل ۵. الف و ب) تופا در مقیاس صحرایی و در مقطع میکروسکوپی که در آن بلورهای ریز کربنات کلسیم یا لوبلینایت نشان داده شده است (نور پلاریزه)، پ) تصویر SEM از تופا، ت و ث) بلورهای بادبزنی-شعاعی در مقیاس صحرایی و میکروسکوپی (نور پلاریزه)، ج و چ) سنگ‌رخساره قشرهای بلورین در تراورتن‌های مورد مطالعه، ح) پوششی از حباب‌های گازی در سطح تراورتن‌های لامینه‌ای که بر اثر خروج گاز به وجود آمده است

1. Colloform
2. Peloidal grainstone
3. Clotted structure



شکل ۶. الف) رخساره بایندستون (استروماتولیت) (نور پلاریزه)، ب) پلوئیدها در مقاطع میکروسکوپی تراورتن‌های لامینه‌ای (نور پلاریزه)

آبی هستند (Chafetz and Meredith, 1983). وجود رشته‌های جلبکی در مقاطع نازک و تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی^۱ نشان می‌دهد، فعالیت‌های بیولوژیکی مانند جلبک‌های سبز-آبی در تشکیل این تراورتن‌ها نقش قابل توجهی داشته‌اند.

تحلیل هیدروژئوشیمیایی

آنالیز فیزیکوشیمیایی آب زیرزمینی می‌تواند اطلاعات ارزشمندی در مورد فاصله طی شده توسط آب‌های زیرزمینی از منطقه تغذیه تا محل برداشت و همچنین مدت زمان تماس آن با کانی‌های انحلال‌پذیر را در اختیار قرار دهد (Domenico and Schwartz, 1990). عوامل مختلفی می‌توانند ترکیب شیمیایی آب را کنترل کنند. برخی از مهم‌ترین آنها شامل برهمکنش آب با سازندهای زمین‌شناسی در مسیر حرکت، تبادلات یونی، واکنش‌های ژئوشیمیایی و همین‌طور آلودگی‌های انسانی است (Amiri et al., 2021b, 2021c).

در این مطالعه، از نتایج آنالیز فیزیکوشیمیایی برای تحلیل رفتار هیدرودینامیکی چشمه‌های مورد مطالعه (جدول ۴؛ شکل ۸) استفاده شده است. به منظور تعیین اعتبار نتایج آنالیز شیمیایی آب، درصد خطای بیان بار^۲ که به صورت

تعیین سنگ‌رخساره تراورتن‌ها با استفاده از ایزوتوپ‌های پایدار

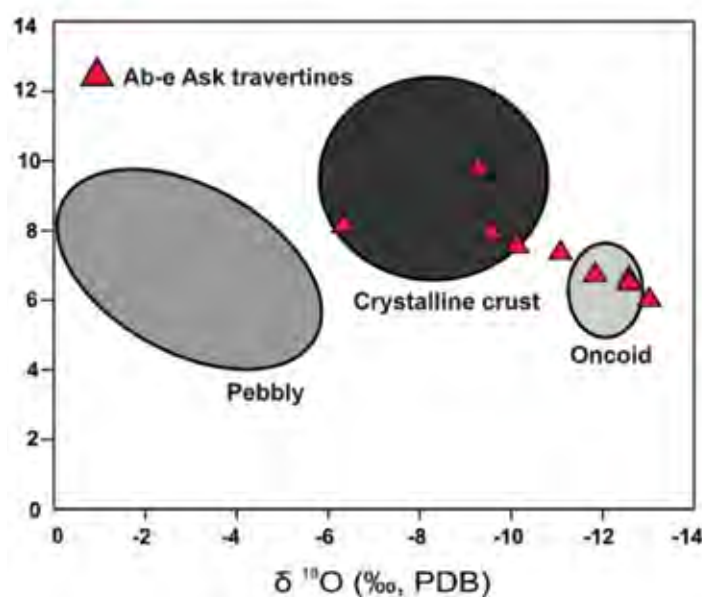
به منظور تعیین سنگ‌رخساره تراورتن‌های آب اسک آنالیزهای $\delta^{18}\text{O}$ و $\delta^{13}\text{C}$ بر روی آنها انجام شده است (جدول ۳). تراورتن‌های منطقه مورد مطالعه، دارای مقادیر $\delta^{13}\text{C}$ در حدود +۶ تا +۹/۷۹ پرمیل و مقدار $\delta^{18}\text{O}$ در گستره‌ای بین -۱۳/۰۲ تا -۶/۳۴ پرمیل بر اساس استاندارد VPDB می‌باشند. نمونه‌های مورد مطالعه از نظر مقدار $\delta^{13}\text{C}$ غنی‌شدگی قابل توجهی نشان می‌دهند. این غنی‌شدگی به کربنات‌زدایی سنگ آهک، فعالیت‌های جلبکی و گاز زدایی سریع چشمه‌های آب گرم نسبت داده شده است (Rahmani Javanmard et al., 2012). ایزوتوپ‌های اکسیژن نسبت به ایزوتوپ‌های کربن بیشتر تحت تأثیر دیاژنز قرار می‌گیرند و تفسیر آنها نسبت به ایزوتوپ کربن از صحت کمتری برخوردار است (Pentecost, 2005b). بنابراین، انواع تفریق دی‌اکسیدکربن بهتر از ایزوتوپ‌های اکسیژن شناخته شده است و این امر ناشی از تبادل اکسیژن کربنات‌ها با اکسیژن مولکول‌های آب است (Pentecost, 2005b). در نمودار مقادیر ایزوتوپی اکسیژن و کربن، نمونه‌های آب اسک در دو قشر بلورین و آنکوئید (پیزولیت) قرار می‌گیرند (شکل ۷). وجود پیزولیت‌ها در نهشته‌های تراورتنی بسیار متداول است و در ارتباط با فعالیت جلبک‌های سبز-

1. Scanning electron microscope

2. Charge Balance Error-CBE

جدول ۳. داده‌های ایزوتوپی کربن و اکسیژن تراورتن‌ها در منطقه ژئوترمال آب اسک

شماره نمونه	$\delta^{18}\text{O}$ (VPDB)	$\delta^{13}\text{C}$ (VPDB)	$\delta^{18}\text{O}$ (VSMOW)
SR T1	-۱۲/۵۸	۶/۶۱	۱۸/۹۲
SR M 13	-۱۳/۰۲	۶	۱۷/۴۳
SR Z 14	-۱۲/۵۹	۶/۴۸	۱۷/۸۸
SR A 22	-۱۱/۸۴	۶/۷۲	۱۸/۶۵
SR A 12	-۱۱/۰۸	۷/۳۵	۱۹/۴۳
SR A 15	-۱۰/۱۳	۷/۵۴	۲۰/۴۱
SR A 60	-۹/۵۷	۷/۹۲	۲۰/۹۹
SR A 9	-۹/۲۹	۹/۷۹	۲۱/۲۸
SR B 32	-۶/۳۴	۸/۱۴	۲۴/۳۲



شکل ۷. مقادیر $\delta^{18}\text{O}$ و $\delta^{13}\text{C}$ تراورتن‌های آب اسک با توجه به سنگ‌رخساره (Roshanak et al., 2018)

موجود در آب را نشان می‌دهد، یکی از مهم‌ترین اطلاعات مورد نیاز برای محاسبه‌های مربوط به تعادلات ژئوشیمیایی و نرخ حلالیت مواد مختلف است. مقدار pH نمونه‌های آب بین شش تا ۶/۸ تغییر می‌کند و این بیانگر حالت اسیدی اندک آب‌های این چشمه‌ها است. از این پارامتر به همراه تغییرات دما، غلظت یون‌های بیکربنات، کلسیم و TDS برای تعیین تمایل آب برای انحلال بیشتر محیط انتقال آب و یا ته‌نشینی املاح آب استفاده می‌شود. بررسی ضریب اشباع شدگی لانتزلیه می‌تواند وضعیت اشباع‌شدگی آب از نظر میزان کربنات کلسیم و همین‌طور پتانسیل انحلال بیشتر

فرمول زیر بیان می‌شود را می‌توان برای آنالیزهای هر نمونه آب مورد استفاده قرار داد:

$$CBE = \frac{\sum cations - |\sum anions|}{\sum cations + |\sum anions|} \times 100 \quad (1) \text{ معادله}$$

که در آن، غلظت کاتیون‌ها و آنیون‌ها برحسب meq/l می‌باشد. بررسی مقدار CBE برای آنالیز شیمیایی نمونه‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد که برخی در دامنه خطای ترجیحی $\pm 5\%$ درصدی و برخی نیز با دارا بودن بیشینه خطای قابل قبول $\pm 10\%$ می‌توانند برای تحلیل‌ها مورد استفاده قرار گیرند.

pH که قدرت واکنش آب با مواد اسیدی یا قلیایی

1. Langelier Saturation Index (LSI)

جدول ۴. پارامترهای فیزیکوشیمیایی چشمه‌های مورد مطالعه

نام چشمه‌ها	pH	EC	HCO ₃	Cl	SO ₄	K	Na	Mg	Ca	Fe	SiO ₂	T
نادعلی	۶/۶	۳۱۶۰	۱۲۵۶/۸	۴۲۶/۵	۱۰۱/۸	۲۷/۳	۲۲۹/۹	۳۶	۳۷۶/۶	۱/۲	۱۷/۵	۲۸
زاغ	۶/۷	۳۰۰۰	۱۱۳۴/۷	۴۳۷/۹	۹۸/۹	۲۷/۳	۲۲۹/۹	۶۷/۴	۳۲۲/۶	۰/۹۱	۱۵	۲۵
سرپل	۶	۳۱۱۰	۱۲۳۸/۵	۴۰۰/۷	۹۵/۵	۲۹/۳	۲۱۱/۵	۵۱/۶	۳۷۰	۱/۰۴	۱۶/۵	۳۲
پشنک	۶/۸	۲۶۰۰	۷۹۳	۱۱۷	۱۰۶	۲۸	۲۱۵	۷۳	۶۸۰	۰/۵	۲۶/۷	۳۱
قل قل	۶/۲۸	۱۳۹۰	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۲۳/۴
جنب مخابرات	۶/۳۸	۳۶۴۰	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۲۹/۲
بیلاق	۶	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۳۰

* مقدار EC بر حسب $\mu\text{S}/\text{cm}$ ، دما بر حسب درجه سانتیگراد و سایر مؤلفه‌ها بر حسب mg/L است. توجه شود که برخی از اطلاعات پس از رفع خطا و صحت سنجی از انصاری (2013) برگرفته شده است



شکل ۸. الف) زاغ چشمه، ب) چشمه قل قل (آب اسک)

هستند. این بدان معناست که تیپ شیمیایی این نمونه‌ها بیکربنات کلسیم است. از آنجایی که بیکربنات کلسیم به‌عنوان تیپ غالب آب زیرزمینی در مناطق تغذیه قلمداد می‌شود، به نظر می‌رسد منابع آب مورد مطالعه دارای چرخه کوتاهی از محل تغذیه تا تخلیه هستند. این بدان معناست که تمایل هیدروژئوشیمیایی آب از بیکربنات به سولفات و در نهایت کلروره مشاهده نمی‌شود. این رخداد می‌تواند با توجه به ساختارهای درز و شکافدار منطقه و نقشی که در ایجاد مسیرهای ترجیحی حرکت آب زیرزمینی داشته باشند، قابل توجیه باشد.

منبع و منشأ یون‌های موجود در نمونه‌های آب این چشمه‌ها را می‌توان به‌وسیله تغییر در نسبت $\text{Na}/(\text{Na}+\text{Ca})$ به‌عنوان تابعی از کل املاح محلول جامد (TDS) به‌طور جامع مورد

ترکیبات کربناته و یا پتانسیل ته‌نشینی آب را نشان دهد (Esmaeili-Vardanjani et al., 2015). محاسبه‌های انجام شده نشان می‌دهد، مقدار LSI برای چشمه‌های پشنک، نادعلی و زاغ به ترتیب برابر ۰/۸۶، ۰/۴۵ و ۰/۵۱ است و این بیانگر فوق اشباع بودن این نمونه‌ها از نظر مقدار کربنات کلسیم هستند. همین موضوع منجر به رسوب‌گذاری قابل توجه در اطراف چشمه‌های مورد نظر شده است (Amiri et al., 2021a). از سوی دیگر، مقدار LSI در نمونه تهیه شده از چشمه سرپل برابر با ۰/۲۳- است که این به تحت اشباع بودن آب از نظر محتویات کربنات کلسیم اشاره دارد. بنابراین به نظر می‌رسد نقش این چشمه در رسوب سنگ‌های تراورتنی در این منطقه کمتر از سایر چشمه‌های مورد نظر است.

بررسی ترکیب شیمیایی منابع آب مورد مطالعه نشان می‌دهد، کلسیم و بیکربنات به ترتیب کاتیون و آنیون غالب

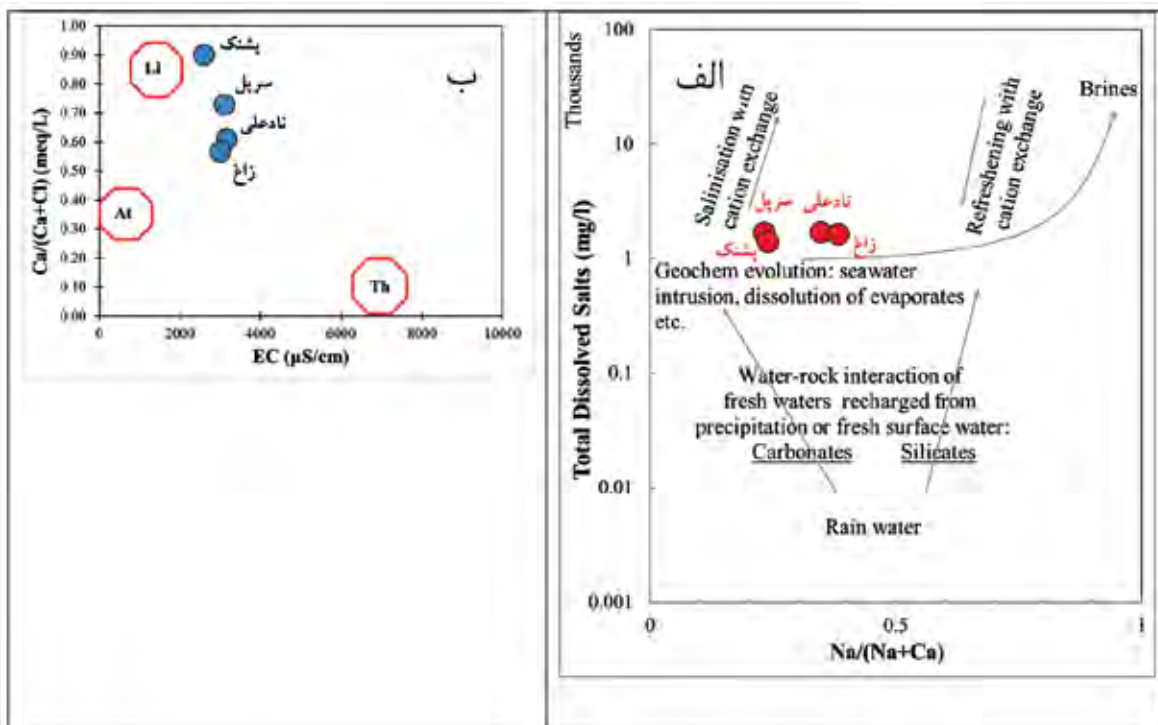
1. Supersaturation
2. Undersaturation

برهمکنش آب با سنگ‌های کربناته و تا حدودی سیلیکاته به‌عنوان مهم‌ترین منبع تأمین عناصر کلسیم و سدیم در این منطقه شناخته می‌شوند. در این زمینه می‌توان به قرارگیری نمونه‌ها در میانه برهمکنش آب-سنگ (کربناته-سیلیکاته) توجه کرد (شکل ۹-الف).

علاوه بر موقعیت نمونه‌ها بر روی نمودار بهینه شده گیبس، نمودار ون ویردام^۱ نیز برای تعیین منشأ ترکیبات شیمیایی موجود در چشمه‌های مورد مطالعه مورد استفاده قرار گرفت (شکل ۹-ب). بر اساس نمودار ون ویردام، آب زیرزمینی را می‌توان در یکی از موقعیت‌های اتمسفری (آب باران)، لیتولوژیک (آب شیرین غنی از کلسیم) و تالاسوتروپیک^۲ (آب دریا) متصور شد (Tanaskovic et al., 2012). به عبارتی در چرخه هیدرولوژیکی، همه نمونه‌های آبی در گستره یکی از این سه نوع منشأ اصلی قرار می‌گیرند. موقعیت نمونه آب چهار چشمه دارای آنالیز کامل شیمیایی بر روی این نمودار (شکل ۹-ب) نشان می‌دهد، لیتولوژی منطقه دارای نقش قابل توجهی در کنترل ترکیب شیمیایی این چشمه‌ها است.

ارزیابی قرار داد (Gibbs, 1970). لازم به ذکر است که در این مطالعه با توجه به اینکه تیپ شیمیایی نمونه‌های مورد مطالعه، بیکربنات کلسیم است، مقدار TDS به‌عنوان ضریبی از EC محاسبه شده است. به همین منظور از رابطه $TDS = \alpha EC$ استفاده شده است که در آن، TDS برحسب mg/l ، EC برحسب $\mu S/cm$ (در ۲۵ درجه سانتیگراد) و α ثابت تبدیل است. مقدار α در دامنه ۰/۵۴ تا ۰/۹۶ تغییر می‌کند. در آب‌های تازه (تیپ بیکربناته کلسیم) این ضریب پایین و هر چه بر املاح آب افزوده می‌شود مقدار α نیز بالاتر می‌رود.

بررسی موقعیت نمونه‌های مورد مطالعه بر روی نمودار بهینه شده گیبس (Amiri and Berndtsson, 2020) نشان می‌دهد که این نمونه‌های در مسیر تکامل اندک ژئوشیمیایی و در راستای شور شدن قرار گرفته‌اند (شکل ۹-الف). با توجه به مقادیر EC نزدیک به هم در این نمونه‌ها، این جایگاه و روند تکاملی بیشتر به دلیل تغییر در نسبت $Na/(Na+Ca)$ رخ می‌دهد. جهت مکانیسم‌های غالب کنترل کننده ترکیب شیمیایی این نمونه‌ها نشان می‌دهد،



شکل ۹. الف) موقعیت نمونه‌های مورد مطالعه بر روی نمودار بهینه شده گیبس (Amiri and Berndtsson, 2020)، ب) نمودار ون ویردام (Tanaskovic et al., 2012)

1. Van Wirdum
2. Thalassotrophic

دو رده آنکوئید و قشرهای بلورین قرار می‌گیرند. نتایج حاصل از مطالعات پتروگرافی و ایزوتوپی نشان می‌دهد، فعالیت‌های بیولوژیکی و باکتریایی مانند جلبک‌های سبز-آبی، دیاتومه‌ها و گاز زدایی سریع چشمه‌های آب گرم در تشکیل سنگ‌رخساره تراورتن‌های مورد مطالعه نقش بسزایی داشته‌اند. به‌منظور ارزیابی کیفی پتانسیل آب چشمه‌های مورد مطالعه در تشکیل نهشته‌های کربناته پارامتر ضریب اشباع‌شدگی لانژلیه (LSI) محاسبه شد. نتایج حاصل از این اندازه‌گیری نشان داد، بیشترین مقادیر ضریب اشباع‌شدگی لانژلیه (LSI) مربوط به چشمه‌های پشنک، نادعلی و زاغ هستند و به ترتیب برابر ۰/۸۶، ۰/۴۵ و ۰/۵۱ است و این حاکی از فوق اشباع بودن این نمونه‌ها از نظر مقدار کربنات کلسیم هستند. نتایج مطالعه حاضر همچنین نشان داد، کمترین مقادیر ضریب اشباع‌شدگی لانژلیه (LSI) مربوط به چشمه سرپل و برابر با ۰/۲۳- است و این به تحت اشباع بودن آب از نظر محتویات کربنات کلسیم اشاره دارد. بنابراین نقش چشمه سرپل در تشکیل نهشته‌های کربناته کمتر از سایر چشمه‌ها است. نمودار بهینه شده گیبس و نمودار ون ویردام نشان دادند، برهمکنش بین آب با سنگ از عوامل اصلی کنترل‌کننده شیمی آب در منطقه هستند.

منابع

- اسکویی، ب. و امیدیان، ص.، ۱۳۹۳. بررسی ساختاری گسل‌های ایرا و نوا در جنوب شرق آتشفشان دماوند با استفاده از روش مغناطیس‌سنجی. مجله فیزیک زمین و فضا، ۲، ۸۳-۹۶.
- امیدیان، ص.، ۱۳۸۶. تعیین جایگاه زمین‌ساختی آتشفشان دماوند بر اساس شواهد ساختاری و ژئوشیمیایی. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده زمین‌شناسی، دانشگاه تهران، ۱۶۷.
- رحمانی جوانمرد، س.، ۱۳۹۰. مطالعه زایش و ژنز تراورتن‌های آب اسک در شرق آتشفشان دماوند با بهره‌گیری از نسبت‌های ایزوتوپی، پتروگرافی و دورسنجی. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده زمین‌شناسی، دانشگاه تهران، ۱۵۸.
- رحیم‌پور بناب، حسین.، ۱۳۸۴. سنگ‌شناسی کربناته، ارتباط دیاژنز و تکامل تخلخل. انتشارات دانشگاه تهران، ۴۸۷.

این مورد بیشتر برای چشمه پشنک مشاهده می‌شود. از سوی دیگر، سه نمونه دیگر شامل سرپل، نادعلی و زاغ چرخه اندکی متفاوت را نشان می‌دهند. به عبارتی دیگر، این نمونه‌ها بین سه بخش اتمسفری، لیتولوژیک و تالاسوتروپیک قرار گرفته و تا حدودی می‌تواند افزایش شوری ناشی از افزایش نرخ آزادسازی و ورود ترکیبات شیمیایی را نشان دهد. این تغییرات به دلیل عدم تعادل بیشتر به دلیل تغییر در توزیع یون‌های کلسیم و کلراید است به ترتیبی که نمونه‌های سرپل، نادعلی و زاغ دارای مقدار کلسیم کمتر ولی کلراید و بیکربنات بیشتری در مقایسه با نمونه تهیه شده از چشمه پشنک دارند. یکی در تحلیل این رفتار هیدروشیمیایی آب چشمه‌ها و یافتن دلیل منطقی برای این تغییر شیمیایی می‌توان از مقدار $\text{HCO}_3 + \text{SO}_4$ استفاده کرد. با توجه به اینکه مجموع غلظت سولفات و بیکربنات بیشتر از پنج میلی اکی والان بر لیتر باشد، علاوه بر انحلال کلسیت و سایر ترکیبات کربناته، برهمکنش آب با سایر تشکیلات را به‌عنوان منشأ ثانویه سولفات و بیکربنات در نظر گرفت. این مورد علی‌رغم اینکه چندان قابل ملاحظه نیست ولی با توجه به تنوع سازندهای رسوبی در منطقه می‌تواند منطقی به نظر برسد.

نتیجه‌گیری

در دامنه‌های جنوب شرقی آتشفشان دماوند (۸۵ کیلومتری شرق تهران واقع در پهنه البرز مرکزی) در منطقه آب اسک، چندین چشمه آهک‌ساز وجود دارد. با فاصله گرفتن از مظهر چشمه‌ها، نهشته‌های ذکر شده را می‌توان از دید رخساره به انواع تراورتن‌های نوع اول با مورفولوژی دهانه و کانالی، تراورتن‌های نوع دوم با مورفولوژی حوضچه‌ای، سدی و آبخاری و تراورتن‌های نوع سوم یا لامینه‌ای تفکیک کرد. بررسی‌های میکروسکوپی، وجود چهار رخساره غیرزیستی شامل تופا، بلورهای بادبزنی-شعاعی، رخساره قشر بلورین و سنگ‌های اسفنجی و همچنین تعداد دو رخساره زیستی شامل رخساره بایندستون استروماتولیتی و گرینستون پلوئیدی را در تراورتن‌های آب اسک نشان می‌دهد. بر اساس مقادیر ایزوتوپ‌های پایدار کربن و اکسیژن، این تراورتن‌ها از دید سنگ‌رخساره در

- Allen, M., Ghassemi, M.R., Shahrabi, M. and Qorashi, M., 2003. Accommodation of late Cenozoic oblique shortening in the Alborz range, northern Iran. *Journal of Structural Geology*, 25, 659-672.
- Allenbach, P. and Shteiger, R., 1966. Geological map of Damavand, scale 1:100 000, 1 sheet. Tehran, Iran: Geological Survey of Iran.
- Amiri, V. and Berndtsson, R., 2020. Fluoride occurrence and human health risk from groundwater use at the west coast of Urmia Lake, Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 13, 921.
- Amiri, V., Bhattacharya, P. and Nakhaei, M., 2021a. The hydrogeochemical evaluation of groundwater resources and their suitability for agricultural and industrial uses in an arid area of Iran. *Groundwater for Sustainable Development*, 12, 100527.
- Amiri, V., Li, P., Bhattacharya, P. and Nakhaei, M., 2021b. Mercury pollution in the coastal Urmia aquifer in northwestern Iran: potential sources, mobility, and toxicity. *Environmental Science and Pollution Research*, 28, 17546-17562.
- Amiri, V., Nakhaei, M., Lak, R. and Li, P., 2021c. An integrated statistical-graphical approach for the appraisal of the natural background levels of some major ions and potentially toxic elements in the groundwater of Urmia aquifer, Iran. *Environmental Earth Sciences*, 80, 1-17.
- Ansari, M.R., 2013. Hydrochemistry of the Damavand Thermal springs, North of Iran. *Life Science Journal*, 10(7s), 866-873.
- Braithwaite, C., 1979. Crystal textures of recent fluvial pisolites and laminated crystalline crusts in Dyfed, South Wales. *Journal Sedimentary Petrology*, 49, 181-194.
- Chafetz, H.S., Wilkinson, B.H. and Love, K.M., 1985. Morphology and composition of nonmarine carbonate cements in near-surface settings: In: Schneidermann, N., and Harris, P.M., eds., Carbonate cements, Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, 36, 337-347.
- Chafetz H.S. and Folk, R.L., 1984. Travertines: depositional morphology and the bacterially constructed constituents. *Journal of Sedimentary Petrology*, 54, 289-316.
- Chafetz, H.S. and Meredith J.C., 1983. Recent travertine pisolites (pisoids) from southeastern Idaho, U.S.A. 450-455. In: Peryt TM (ed) *Coated Grains*. New York, Springer-Verlag, 655.
- Chon, F., 1864. Uber die Entstehung des travertine in der Wasserfallen von Tivoli. *Neues Jahrbuch fur Mineralogie, Geologie und Palaeontologie Abhandlung*, 40, 580-610.
- Cipriani, N., Ercoli, A., Malesani, P. and Vannucci, S., 1972. I travertini di Rapolano Terme. *Memorie della Società Geologica Italiana*, 11, 31-46.
- Domenico, P.A. and Schwartz, F.W., 1990. *Physical and chemical hydrogeology*. John Wiley and Sons, New York, 824.
- Esmaeili-Vardanjani, M., Rasa, I., Amiri, V., Yazdi, M. and Pazand, K., 2015. Evaluation of groundwater quality and assessment of scaling potential and corrosiveness of water samples in Kadkan aquifer, Khorasan-e-Razavi Province, Iran. *Environmental monitoring and assessment*, 187, 1-18.
- Folk, R.L., Chafetz, H.S. and Tiezzi, P.A., 1985. Bizarre forms of depositional and diagenetic calcite in hot-spring travertines, central Italy. In *Carbonate cements*. Edited by N. Schneidermann and P.M. Harris. SEPM (Society of Economic Paleontologists and Mineralogists), Special Publication 36, 349-369.
- Fouke, B.W., Bonheyo G. T., Sanzenbacher B. and Frias-Lopez J., 2003. Partitioning of bacterial communities between travertine depositional facies at Mammoth Hot Springs, Yellowstone National Park, USA. *Canadian Journal Earth Sciences*, 40, 1531-1548.

- Fouke, B.W., Farmer, J.D., Des Marais, D.J., Pratt, L., Sturchio, N.C., Burns, P.C. and Discipulo, M.K., 2001. Reply-Depositional facies and aqueous-solid geochemistry of travertine-depositing hot springs (Angel Terrace, Mammoth Hot Springs, Yellowstone National Park, USA). *Journal of Sedimentary Research*, 71, 497-500.
- Fouke, B.W., Farmer, J.D., Des Marais, D.J., Pratt, L., Sturchio, N.C., Burns, P.C. and Discipulo, M.K., 2000. Depositional facies and aqueous-solid geochemistry of travertine-depositing hot springs (Angel Terrace, Mammoth Hot Springs, Yellowstone National Park, U.S.A). *Journal of Sedimentary Research*, 70, 565-585.
- Freytet, P. and Plet, A., 1996. Modern freshwater microbial carbonates: The Phormidium stromatolites (Tufa-Travertine) of southeastern Burgundy (Paris basin, France). *Facies*, 34, 219-237.
- Gandin, A. and Capezzuoli, E., 2014. Travertine: distinctive depositional fabrics of carbonates from thermal spring systems. *Sedimentology*, 61, 264-290.
- Gandin, A. and Capezzuoli, E., 2008. Travertine versus calcareous tufa: distinctive petrologic features and related stable isotopes signature. *Italian Journal of Quaternary Sciences*, 21, 125-136.
- Geurts, M.A., Frappier, M. and Tsien, H.H., 1992. Morphogenèse des barrages de travertin de Coal River Springs, Sud-est du territoire du Yukon, *Geographie physique et quaternaire*, 46, 221-232.
- Gibbs, R.J., 1970. Mechanisms controlling world water chemistry. *Journal of Science*, 17, 1088-1090.
- Gonfiantini, R., Panichi, C. and Tongiorgi, E., 1968. Isotopic disequilibrium in travertine deposition. *Earth Planetary Sciences Letter*, 5, 55-58.
- Gruszczynski, M., Kowalski, B.J., Soltyś, R. and Hercman H., 2004. Tectonic origin of the unique Holocene travertine from the Holy Cross Mts.: microbially and abiologically mediated calcium carbonate, and manganese oxide precipitation. *Acta Geologica Polonica*, 54, 61-76.
- Guo, L. and Riding, R., 1998. Hot-spring travertine facies and sequences Late Pleistocene, Rapolano Terme, Italy. *Sedimentology*, 45, 163-180.
- Hassanzadeh, J., Omidian, S. and Davidson, J., 2006. A late Pliocene tectonic switch from transpression to transtension in the Haraz sector of central Alborz: implications for the origin of Damavand volcano. *Philadelphia Annual Meeting, Geological Society of America*, 171-28.
- Inskeep, W.P. and McDermott, T.R., 2005. Geomicrobiology of acid-sulfate-chloride springs in Yellowstone National Park. In: *Geothermal Biology and Geochemistry in Yellowstone National Park* (Eds W.P. Inskeep and T.R. McDermott), 143-162. Montana State University Publications, Bozeman.
- Janssen, A., Swennen, R., Podoor, N. and Keppens, E., 1999. Biological and diagenetic influence in recent and fossil tufa deposits from Belgium, *Sedimentary Geology*, 126, 75-95.
- Jones, B. and Renaut, R.W., 2010. Calcareous spring deposits in continental settings. In: *Continental Settings: Facies, Environments and Processes*. (Eds A.M. Alonso Zarza and L.H. Tanner), Elsevier, Amsterdam. 177-224.
- Kele, S., Demeny, A., Siklosy, Z., Nemeth, T., Maria, T. and Kovacs M.B., 2008. Chemical and stable isotope compositions of recent hot-water travertines and associated thermal waters, from Egerszalók, Hungary: depositional facies and non-equilibrium fractionations. *Sedimentary Geology*, 211, 53-72.
- Kitano, Y., 1962. A study of the polymorphic formation of calcium carbonate in thermal springs with an emphasis on the effect of tempera-

- ture. *Bulletin of the Chemical Society of Japan*, 35, 1980-1985.
- Lippmann, F., 1973. *Sedimentary carbonate minerals*. Springer-Verlag, Heidelberg-New York, 228.
 - Love, K.M. and Chafetz, H.S., 1988. Diagenesis of laminated travertine crusts, Arbuckle Mountains, Oklahoma. *Journal of Sedimentary Research*, 58, 441-445.
 - Mohanty, M. and Das, S., 1997. Microbial signatures in lacustrine and fluvial carbonates; In: Gondwana (Permian) and Holocene examples India. *Facies*, 36, 234-238.
 - Monty, C.L.V., 1976. The origin and development of cryptalgal fabrics. In: Walter, M.R. (Ed.), *Stromatolites. Developments in Sedimentology*, 20, 193-249. Elsevier, Amsterdam.
 - Nelson J., 1990. Experimental investigation of control on cementation on carbonates. *Journal of the Geological Society (London)*, 147, 949-958.
 - Özkul, M., Varol, B. and Alçiçek, M. C., 2002. Depositional environments and petrography of Denizli travertines. *Bulletin of the Mineral Research and Exploration*, 125, 13-29.
 - Pedley, H.M., 1987. The Flandrian (Quaternary) Caerwys tufa, North Wales: an ancient barrage tufa deposit. *Proceedings of the Yorkshire Geological Society*, 46, 141-152.
 - Pentecost, A., 2005b. *Travertine*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 446
 - Pentecost, A., 1995a. The microbial ecology of some Italian hot-spring travertines. *Microbios*, 81, 45-58.
 - Pentecost, A., 1995b. Significance of the biomineralizing microniche in a lyngbya (cyanobacterium) travertine. *Geomicrobiology Journal*, 13, 213-222.
 - Pentecost, A. and Viles, H., 1994. A review and reassessment of travertine classification. *Geographie physique et Quaternaire*, 48, 305-314.
 - Rahmani Javanmard, S., Tutti, F., Omidian, S. and Ranjbaran, M., 2012. Mineralogy and stable isotope geochemistry of the Ab Ask travertines in Damavand geothermal field, Northeast Tehran, Iran. *Central European Geology*, 55, 187-212.
 - Ranjbaran, M., Rahmani Javanmard, S. and Sotohian, F., 2019. Petrography and Geochemistry of Quaternary travertines in the Ab-Ask region, Mazandaran Province-Iran. *Geopersia*, 9, 351-365.
 - Roshanak, R., Zarasvandi, A.R., Pourkaseb, H. and Moore, F., 2018. Investigations on Northern Urmia-Dokhtar travertines and comparison with north Sanandaj-Sirjan travertines using 18O and 13C stable isotopes. *Geosciences Journal*, 27, 143-152 (in Persian with English abstract).
 - Sanders, J.E. and Friedman, G.M., 1967. Origin and occurrence of limestones. In: Chilingar, G.V., Bissel, H.J. and Fairbridge, R.W., (Eds), *Carbonate Rocks*, 169-265.
 - Tanaskovic, I., Golobocanin, D. and Miljevic, N., 2012. Multivariate statistical analysis of hydrochemical and radiological data of Serbian spa waters. *Journal of Geochemical Exploration*, 112, 226-234.
 - Turi, B., 1986. Stable isotope geochemistry of travertines, in: Fritz, P., Fontes, J.Ch. (Eds.), *Handbook of Environmental Isotope Geochemistry*, 2. Elsevier, Amsterdam, 207-238.

تلفیق داده‌های مغناطیس‌سنجی هوابرد و تصاویر ماهواره‌ای برای شناسایی پهنه‌های مستعد کانی‌سازی آهن به کمک نمودارهای پیش‌بینی-مساحت در برگه ۱:۱۰۰۰۰۰ اسفوردی

فردین احمدی^۱، حمید آقاجانی^{۲*} و میثم عابدی^۳

۱. دانشجوی دکتری، گروه مهندسی اکتشاف معدن، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود

۲. دانشیار، گروه مهندسی اکتشاف معدن، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود

۳. استادیار، گروه مهندسی معدن، دانشکده معدن، دانشگاه تهران، تهران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۲/۲۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۶/۱۶

چکیده

در بررسی‌های اکتشافی و تعیین مناطق با پتانسیل بالای کانی‌سازی، استفاده همزمان از لایه‌های مختلف اطلاعاتی نتایج قابل اعتمادتری ارائه خواهد داد. در این تحقیق برای بررسی پتانسیل کانی‌زایی آهن در برگه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ اسفوردی، از داده‌های مغناطیس‌سنجی هوایی و سه نوع تصویر ماهواره‌ای استر، لندست-۸ و سنتینل-۲ استفاده شد. فیلتر بازگشت به قطب، ادامه فراسو ۲۰۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ متر، سیگنال تحلیلی، زاویه تیلت افقی و مشتق قائم اول بر روی داده‌های مغناطیسی اعمال شد. لایه‌های دگرسانی (آرژلیک، فلیک، پروپلیتیک)، نواحی حاوی اکسید آهن و گوسان و خطواره‌ها به وسیله تصاویر ماهواره‌ای استخراج شدند. لایه‌های سیگنال تحلیلی و زاویه تیلت افقی به ترتیب برای شناسایی توده مغناطیسی و ساختارهای مغناطیسی مورد استفاده قرار گرفت. سه لایه استخراج شده از تصاویر ماهواره‌ای به همراه دو لایه ژئوفیزیکی در تحلیل‌ها استفاده شدند. با استفاده از روش فرکتالی مقدار-مساحت و نمودار پیش‌بینی-مساحت و ۲۲ نقطه اندیس و معدن فعال در منطقه مورد مطالعه، وزن این لایه‌ها محاسبه شد. لایه سیگنال تحلیلی با نرخ پیش‌بینی ۷۶ درصد، دارای بیشترین وزن در بین همه لایه‌ها است بدین معنی که با ۲۴ درصد از مساحت اشغال شده، ۷۶ درصد از نهشته‌های آهن بدرستی پیش‌بینی شده است. لایه نهایی پتانسیل‌یابی آهن منطقه مطالعاتی با تلفیق همه لایه‌ها با استفاده از روش همپوشانی شاخص چندکلاسه تهیه شد. این نقشه نقطه عطفی در نرخ پیش‌بینی ۷۸ درصد دارد بدین معنی که وزن آن از تک تک لایه‌ها بیشتر است. بر اساس این نقشه، پتانسیل‌های جدید کانی‌زایی آهن در شرق و جنوب شرق برگه اسفوردی مشاهده می‌شود.

واژه‌های کلیدی: اسفوردی، سنتینل-۲، کانی‌زایی آهن، مغناطیس‌سنجی هوایی، نمودار پیش‌بینی-مساحت.

مقدمه

است. داده‌های ژئوفیزیک هوابرد در مقیاس ناحیه‌ای برداشت می‌شود و اغلب به عنوان ابزاری برای شناسایی تغییرات جانبی لیتولوژی و مناطق با پتانسیل بالای کانی‌سازی استفاده می‌شود. از آنجایی که شدت میدان مغناطیسی کل در هر نقطه متأثر از مواد و ساختارهای مغناطیسی موجود در آن نقطه است، بر پایه تفسیر این نقشه و اعمال فیلترهای مختلف می‌توان به وجود ناهنجاری‌های ساختاری زیرسطحی پی برد (Grauch and Johnston, 2002). در تفسیر داده‌های ژئوفیزیک‌هوایی که به منظور اکتشاف ذخایر معدنی مورد استفاده قرار می‌گیرد، ساختارهای زمین‌شناسی از جمله گسل‌ها یا خطواره‌های پنهان و هم‌چنین نواحی دگرسانی مختلف مورد نظر می‌باشد. بنابراین در تفسیر این داده‌ها که شامل داده‌های مغناطیسی، الکترومغناطیسی و رادیومتری می‌باشد، تشخیص و تعیین محل ساختارهای ذکر شده به عنوان محل‌هایی برای بالا آمدن سیالات کانه ساز و تشکیل کانی‌سازی دارای اهمیت بوده و تفسیر کیفی داده‌ها بیشتر بر روی آنها متمرکز می‌شود. البته ممکن است با توجه به اهداف مختلف موارد دیگری نیز در تفسیر داده‌های ژئوفیزیک‌هوایی مد نظر قرار گیرد که در این موارد نیز باید به پدیده‌ها و عوارض و نیز روش‌هایی که می‌تواند در شناسایی ناهنجاری‌های مورد نظر کمک کند توجه کرد. از آنجایی که استفاده از یک پارامتر ژئوفیزیکی برای رسیدن به هدف مشخص می‌تواند دارای عدم قطعیت بالایی باشد، می‌توان با استفاده از چند پارامتر، این عدم قطعیت را تا حدود زیادی کاهش داد. برای تعیین پهنه‌های با پتانسیل بالای کانی‌سازی، اغلب از تلفیق اطلاعات مختلف و روش‌های وزن‌دهی مانند وزن‌های نشانگر، منطق فازی و رگرسیون منطقی استفاده می‌شود (Bonham-Carter, et al; 1989).

استفاده از روش دورسنجی و تصاویر ماهواره‌ای برای نقشه برداری از مناطق دگرسانی گرمابی، واحدهای سنگی و ویژگی‌های ساختاری مرتبط با انواع کانی‌سازی طی چند دهه گذشته در سراسر جهان بسیار چشمگیر بوده است (Testa et al; 2018 Javed and Wani, 2009).

استفاده بهینه از داده‌های ماهواره‌ای برای اکتشاف مواد

بازارهای بین‌المللی سنگ آهن به دلیل تقاضای زیاد صنایع فولاد، به تازگی مورد توجه بسیاری قرار گرفته است. ظرفیت‌های استخراج معادن در سراسر جهان گسترش یافته و ناحیه بافق در ایران مرکزی، جز پهنه‌های با پتانسیل بالای سنگ آهن به شمار می‌آید. ناحیه معدنی بافق، میزبان کانسارهای مهم «نوع کایرونا» مگنتیت-آپاتیت در کمر بند آتشفشانی کاشمر-کرمان در قلمرو ایران مرکزی است (Daliran and Stosch, 2009; Mohammad Torab, 2008).

در ناحیه ساختاری ایران مرکزی به خصوص در ناحیه بافق، تعداد بسیار زیادی از معادن سنگ آهن وجود دارد. گستره برکه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ اسفوردی به عنوان بخشی از این ناحیه، شامل چندین معدن سنگ آهن مهم است. به عنوان مثال می‌توان معادن: چادرملو، چغارت، سه‌چاهون و میشدوان را نام برد (Sadeghi et al; 2013; Daliran, 1990; Ghorbani, 2013). پیدایش ذخایر مگنتیت-آپاتیت در ناحیه بافق، همچنان به عنوان یک بحث چالش‌برانگیز در بین زمین‌شناسان وجود دارد. البته در این بین مدل‌های مختلفی در این خصوص ارائه شده است (Daliran and Stosch, 2009; Förster et al; 1994).

عملیات مغناطیس‌سنجی از قدیمی‌ترین روش‌های ژئوفیزیکی است که برای فعالیت‌های اکتشافی در زمینه‌های مختلف و به ویژه اکتشاف ذخایر آهن مورد استفاده قرار می‌گیرد. برداشت اصولی و تفسیر صحیح داده‌های مغناطیس‌سنجی در کنار دیگر داده‌های اکتشافی می‌تواند ضمن کاهش هزینه‌ها، اطلاعات ارزشمندی در مورد موقعیت، عمق و ابعاد بخش‌های پنهان ذخایر آهن در اختیار پژوهشگران قرار دهد. در بیشتر یافته‌های جدید اکتشافی، ژئوفیزیک نقش مؤثری در اکتشاف و نمایش ذخایر پنهان در عمق دارد. مطالعات مغناطیس‌سنجی به طور گسترده‌ای برای اکتشاف مواد معدنی در سراسر جهان استفاده می‌شود (Elkhateeb and Abdellatif, 2018; Gaffar, 2015; Murphy, 2007). بی‌هنجاری‌های مغناطیسی تولید شده توسط مناطق غنی از مگنتیت یا تپی‌شدگی مغناطیسی حاصل می‌شود که از سنگ‌های میزبان زمینه قابل تشخیص

در گستره برکه اسفوردی و تصاویر ماهواره‌ای سنتینل ۲، لندست ۸ و استرو به کمک نمودارهای پیش‌بینی-مساحت، نقشه پتانسیل معدنی از مناطق مستعد کانی‌زایی آهن در این برکه تهیه شده است.

زمین‌شناسی گستره مطالعه

ناحیه معدنی بافق-ساغند در مرکز پهنه ایران مرکزی و کمان آتشفشان-پلوتونیک کاشمر-کرمان، بین گسل‌های کوهبنان در شرق و بافق-پشت‌بادام در غرب، قرار دارد. بر اساس نقشه‌برداری زمین‌شناسی و تحقیقات انجام شده، مجموعه سنگ‌های پرکامبرین، کامبرین و کواترن در این ناحیه وجود دارد (مجیدی و همکاران، ۱۳۹۴). تشکیلات پرکامبرین بیشتر در جنوب سه‌چاهون در شمال شرقی بافق ایجاد شده است. از لحاظ ساختاری، این گستره جزء پهنه ایران مرکزی، زیر پهنه بافق-پشت‌بادام است. کهن‌ترین سنگ‌های این گستره مربوط به پرکامبرین است و شامل مجموعه‌هایی از سنگ‌های دگرگونی شیست، گنایس، مرمر و آمفیبولیت می‌باشد. رسوبات ترشیری و کواترنی بیشتر شامل مجموعه‌هایی از کنگلومرا، ماسه سنگ و آبرفت‌های جوان هستند. توده‌های نفوذی موجود در گستره شامل گرانیتهای زیرگان، نارینگان، بهاباد و سینیت اسفوردی و مجموعه‌ای از دایک‌های دیوریتی و گابرویی هستند (Stosch et al; 2011; Torab and Lehman, 2006).

برکه ۱:۱۰۰۰۰۰ اسفوردی در گستره بافق-پشت‌بادام قرار دارد. قدیمی‌ترین واحدهای موجود در این گستره سری ماسه سنگ‌های کوارتزی است. رسوبات این منطقه متعلق به کامبرین بالایی و پرکامبرین پایینی همراه با مقادیر کم ماسه سنگ در رسوبات قدیمی قرار دارند و از دو بخش زیرین و فوقانی تشکیل شده‌اند. بخش زیرین شامل دولومیت، سنگ آهک، شیل و ماسه سنگ، گدازه‌های اسیدی و شیل آهکی است و بخش فوقانی بیشتر کربنات‌ها را شامل می‌شود. کانی‌سازی گرمایی مگنتیت-آپاتیت عمدتاً به عنوان ماده معدنی غالب در این گستره و جایگزینی متاسوماتیک از عناصر خاکی کمیاب و کانی‌سازی اورانیوم اتفاق افتاده

معدنی، به ویژه در اکتشاف کانسارها، شناخت و نقشه‌برداری نواحی دگرسانی مرتبط، کمک شایانی به اکتشاف منابع معدنی زیرزمینی و به ویژه آهن می‌کند. در این روش برای شناسایی هدف، پس از انجام پیش‌پردازش‌ها و تصحیح‌ها از روش‌های مختلفی برای بارزسازی و شناسایی هدف اکتشافی مورد نظر استفاده می‌شود.

استفاده همزمان از فناوری سنجش از دور و ژئوفیزیک‌هوایی در نقشه‌برداری زمین‌شناسی و اکتشاف مواد معدنی بسیار کارآمد خواهد بود (Ranjbar et al; 2004). کلارک (Clark, 2014) در مطالعه خود نشان داده است که دگرسانی‌های هیدروترمال تاثیر زیادی بر روی خواص مغناطیسی سنگ‌ها و الگوی آنومالی‌های مرتبط با آنها دارند. بنابراین برداشت‌های مغناطیس‌سنجی در شناسایی این نوع دگرسانی‌ها و در برخی موارد کانی‌سازی درون آنها مفید خواهد بود. بنابراین استفاده از داده‌های مغناطیس‌هوایی در کنار داده‌های ماهواره‌ای در یک منطقه می‌تواند نقش مهمی در مطالعه ساختارهای سطحی و زیرسطحی در منطقه و ارتباط آنها با عارضه‌های ساختاری اصلی و ناحیه‌ای داشته باشد.

یوسفی و کارانزا (Yousefi and Carranza, 2015) نمودار نرخ پیش‌بینی-مساحت را برای وزن دهی به لایه‌های شاهد توسعه داده‌اند. در این روش از تابع لجستیک به منظور تخصیص امتیاز عضویت فازی به مقادیر پیوسته شواهد مکانی استفاده می‌شود. تابع لجستیک، کل داده‌ها را به یک دامنه محدود [۰-۱] انتقال می‌دهد. مقادیر حاصل شده، محور افقی نمودار را شامل می‌شود. دو محور قائم در نمودار، درصد آنومالی‌های پیش‌بینی شده از اندیس‌ها و نهشته‌های معدنی در منطقه و مساحت متناظر می‌باشد. بر اساس این نمودار میزان درصد آنومالی موجود در منطقه با مساحت متناظر سنجیده می‌شود. محل تلاقی دو منحنی به عنوان نقطه عطف نمودار، بیانگر وزن لایه خواهد بود بدین صورت که هرچه نقطه عطف، مقادیر بالاتری را شامل شود وزن نهایی لایه بیشتر خواهد بود. به عبارتی با مساحت کمتر، مناطق آنومال بیشتری قابل پیش‌بینی است. در همین راستا، در این پژوهش با استفاده از داده‌های ژئوفیزیک هوایرد

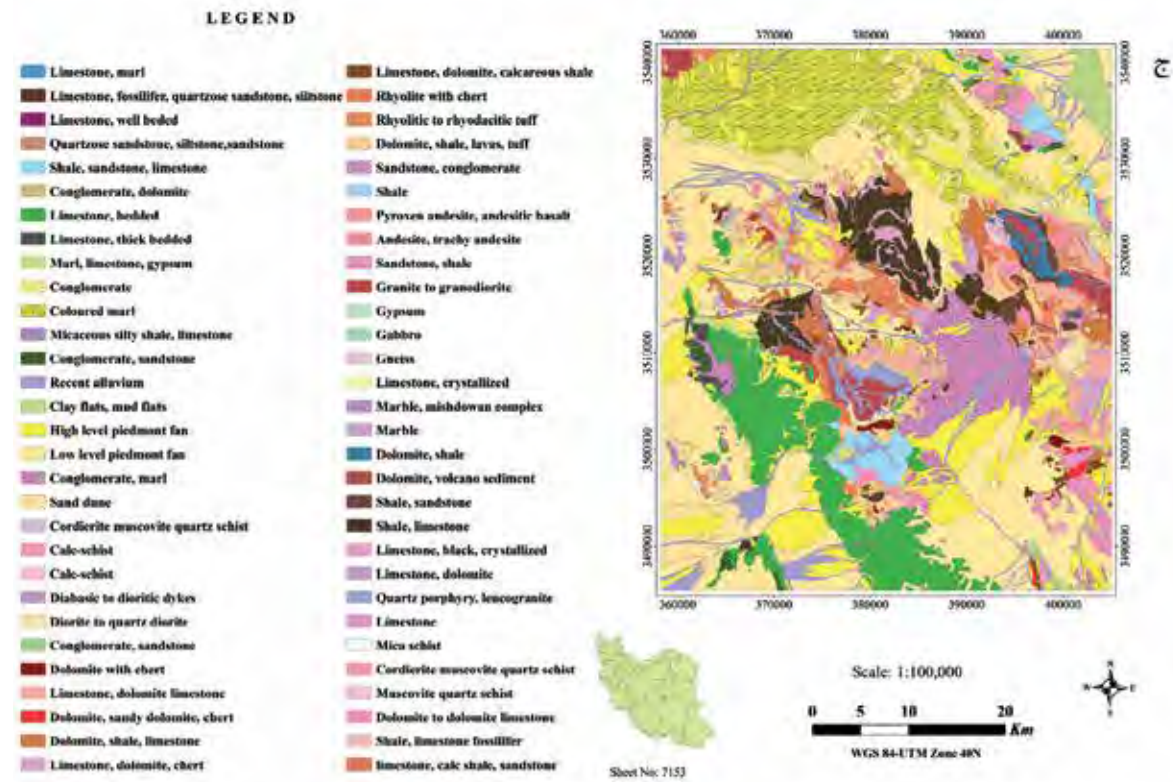
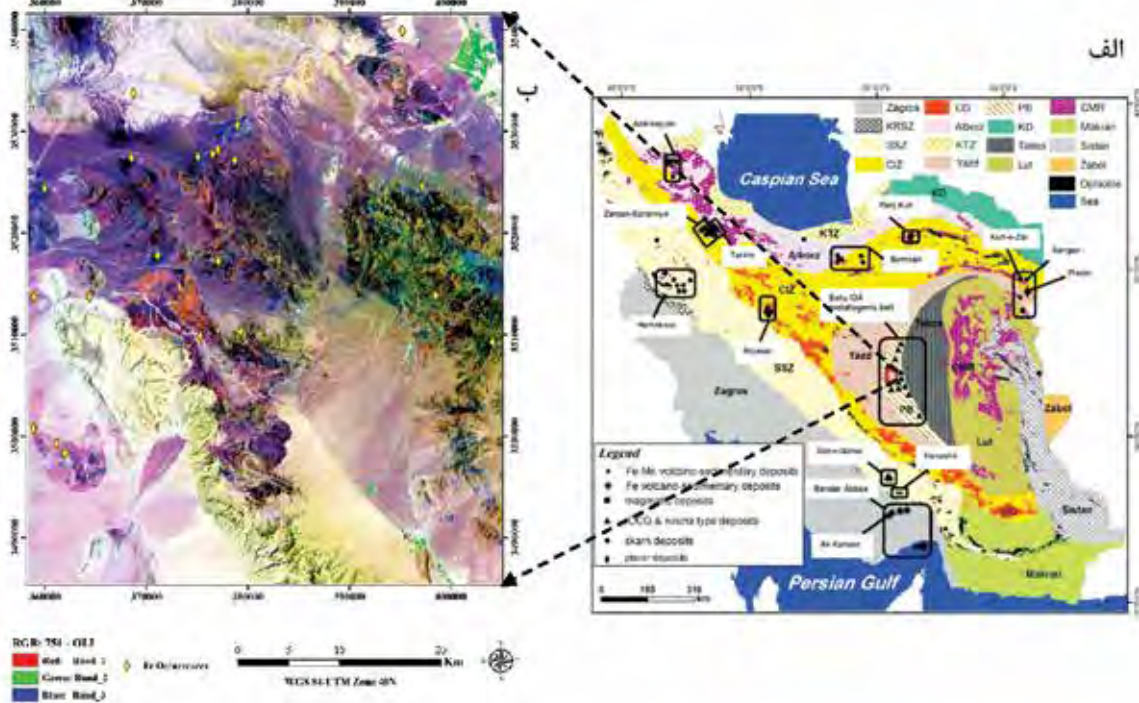
است. ذخایر سنگ آهن این گستره با سنگ‌های آتشفشانی رسوبی و نفوذی‌های درجه بالا همراه است و دارای یک مجموعه معدنی فقیر سولفید از مگنتیت کم تیتانیم (\pm هماتیت) است. در گستره مورد مطالعه، تعداد ۲۲ نهشته و اندیس مرتبط با ذخایر سنگ آهن گزارش شده است (Ghorbani, 2013). اسامی این اندیس‌ها در جدول ۱ آورده شد است. نقشه پراکندگی ذخایر آهن ایران، ترکیب رنگی RGB 751 از تصویر لندست-۸ و نقشه زمین‌شناسی باز تولید شده ۱:۱۰۰۰۰۰ اسفوردی به همراه محل اندیس‌ها و نهشته‌های موجود در این برگه در شکل ۱ نمایش داده شده است. طبق نقشه پراکندگی ذخایر مختلف آهن در

ایران، منطقه مطالعاتی جز ذخایر آهن از نوع IOCG^۱ و کایرونا به شمار می‌رود که این ذخایر به صورت مثلث شکل در این نقشه قابل مشاهده هستند. محدوده برگه اسفوردی نیز به وسیله چهارضلعی قرمز رنگ مشخص شده است (شکل ۱-الف). برای تفکیک لیتولوژی‌های محدوده از ترکیب رنگی کاذب RGB 751 تصویر لندست-۸ استفاده شد. پوشش گیاهی در این تصویر به رنگ سبز نمایان است (شکل ۱-ب). نقشه زمین‌شناسی باز تولید شده در مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ محدوده نیز در شکل ۱-ج آورده شده است. با مشاهده و مقایسه همزمان این نقشه با ترکیب رنگی، می‌توان یک دید بسیار خوب و جامع از شرایط زمین‌شناسی منطقه داشت.

جدول ۱. اسامی اندیس‌های معدنی آهن در منطقه مطالعه

ردیف	نام معدن/آنومالی	زمین‌شناسی منطقه
۱	آنومالی X	ماسه سنگ و شیل/پالئوزوئیک
۲	آنومالی II B	سنگ‌های متاسوماتیک و دگرگون شده/پرکامبرین
۳	آنومالی II C	سنگ‌های متاسوماتیک و دگرگون شده/پرکامبرین
۴	آنومالی IV	سنگ‌های متاسوماتیک و دگرگون شده/پرکامبرین
۵	آنومالی V B	ماسه سنگ و شیل/پالئوزوئیک
۶	آنومالی V C	ماسه سنگ و شیل/پالئوزوئیک
۷	آنومالی V III	گرانیت، ولکانیک و ماسه سنگ/پرکامبرین بالایی-کامبرین پایین
۸	آنومالی XI	ماسه سنگ و شیل/پالئوزوئیک
۹	آنومالی X IIA	سنگ‌های رسوبی ولکانیکی/پرکامبرین-کامبرین
۱۰	آنومالی X IIIA	گرانیت پرفیری/پرکامبرین بالایی
۱۱	چشمه فیروز	دولومیت و اسیدی تا ولکانیکی حد واسط/پرکامبرین بالا-کامبرین پایین
۱۲	چغارت	آلکالی گرانیت، ولکانیک، ماسه سنگ و شیست/پرکامبرین بالا-کامبرین پایین
۱۳	شرق بافق	آلکالی گرانیت، ولکانیک اسیدی، دولومیت و سنگ آهک/پرکامبرین بالا-کامبرین پایین
۱۴	اسفوردی	آلکالی گرانیت، ولکانیک اسیدی، دولومیت و سنگ آهک/پرکامبرین بالا-کامبرین پایین
۱۵	لکه سیاه	آلکالی گرانیت، ولکانیک اسیدی، دولومیت و سنگ آهک/پرکامبرین بالا-کامبرین پایین
۱۶	مشیدوان	آلکالی گرانیت، ولکانیک اسیدی، دولومیت و سنگ آهک/پرکامبرین بالا-کامبرین پایین
۱۷	مبارکه	سنگ‌های دگرگون شده/پرکامبرین
۱۸	نارگون	آلکالی گرانیت، ولکانیک اسیدی، دولومیت و سنگ آهک/پرکامبرین بالا-کامبرین پایین
۱۹	ناریگان	ولکانیک و ماسه سنگ/پرکامبرین بالا-کامبرین پایین
۲۰	شمال سه چانگی ۱	ماسه سنگ و شیل/پالئوزوئیک
۲۱	شمال سه چانگی ۲	ماسه سنگ و شیل/پالئوزوئیک
۲۲	سه چاهون	دیوریت، رسوبی ولکانیکی/پرکامبرین بالا-کامبرین پایین

1. Iron Oxide Copper Gold



شکل ۱. موقعیت و زمین‌شناسی برکه اسفوردی، الف) موقعیت ذخایر مختلف سنگ آهن در ایران (Nabatian, et a; 2015)، ب) ترکیب رنگی کاذب 751 RGB از تصویر لندست-8، ج) نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ باز تولید شده برکه اسفوردی

روش مطالعه

مغناطیسی یعنی جایی که میدان القایی قائم است، منتقل می‌شود زیرا اگر میدان زمین مایل باشد شکل ناهنجاری‌های مغناطیسی که به صورت القایی به وجود آمده‌اند نسبت به منابع به وجود آورنده نامتقارن خواهد بود اما در صورتی که میدان القایی قائم باشد، ناهنجاری‌های به وجود آمده در اثر القای مغناطیسی بر روی منبع خودشان قرار می‌گیرند پس تفسیر داده‌های مغناطیس‌سنجی هوایی به طور معمول بر روی تصاویر مختلف برگردان به قطب صورت می‌گیرد (Elkhateeb et al; 2018, Murphy, 2007).

در ادامه روند کار، فیلترهای ادامه فراسو ۲۰۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ متری بر روی نقشه برگردان به قطب اعمال شد (شکل‌های ۲-ج تا ۲-پ). هدف از اعمال این فیلترها، از بین بردن یا تضعیف ناهنجاری‌های مغناطیسی با فرکانس بالای سطحی است. سپس برای تشخیص توده نفوذی عمیق و ساختارهای مغناطیسی به ترتیب نقشه سیگنال تحلیلی^۲ (AS) و زاویه تیلت افقی^۳ (TDX) استفاده شد (شکل ۲-ت و ۲-ث). زاویه تیلت افقی بر روی نقشه حاصل از ادامه فراسوی ۱۰۰۰ متر اعمال شد. معادلات مربوط به سیگنال تحلیلی و زاویه تیلت به ترتیب در ادامه آورده شده است. برای یک بی‌هنجاری مغناطیسی، سیگنال تحلیلی در فضای سه‌بعدی به صورت رابطه (۳) تعریف می‌شود (Hsu et al; 1996):

$$A_n(x,y) = \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\frac{\partial}{\partial z} \right)^n G \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(\frac{\partial}{\partial z} \right)^n G \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\left(\frac{\partial}{\partial z} \right)^n G \right] \quad (3)$$

که در آن $A_n(x,y)$ دامنه سیگنال تحلیلی و G ، بی‌هنجاری مغناطیسی است که اندازه آن نیز به راحتی قابل محاسبه است. زاویه تیلت نیز مطابق رابطه زیر تعریف می‌شود (Miller and Singh, 1994):

$$T = \tan^{-1} \left[\frac{\frac{\partial f}{\partial z}}{\sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y} \right)^2}} \right] \quad (4)$$

که در آن، T مقدار زاویه تیلت و f میدان پتانسیل برداشت شده (مغناطیسی یا گرانی) است. مقدار زاویه تیلت و تغییرات زاویه تیلت در بالای توده‌های معدنی و همچنین

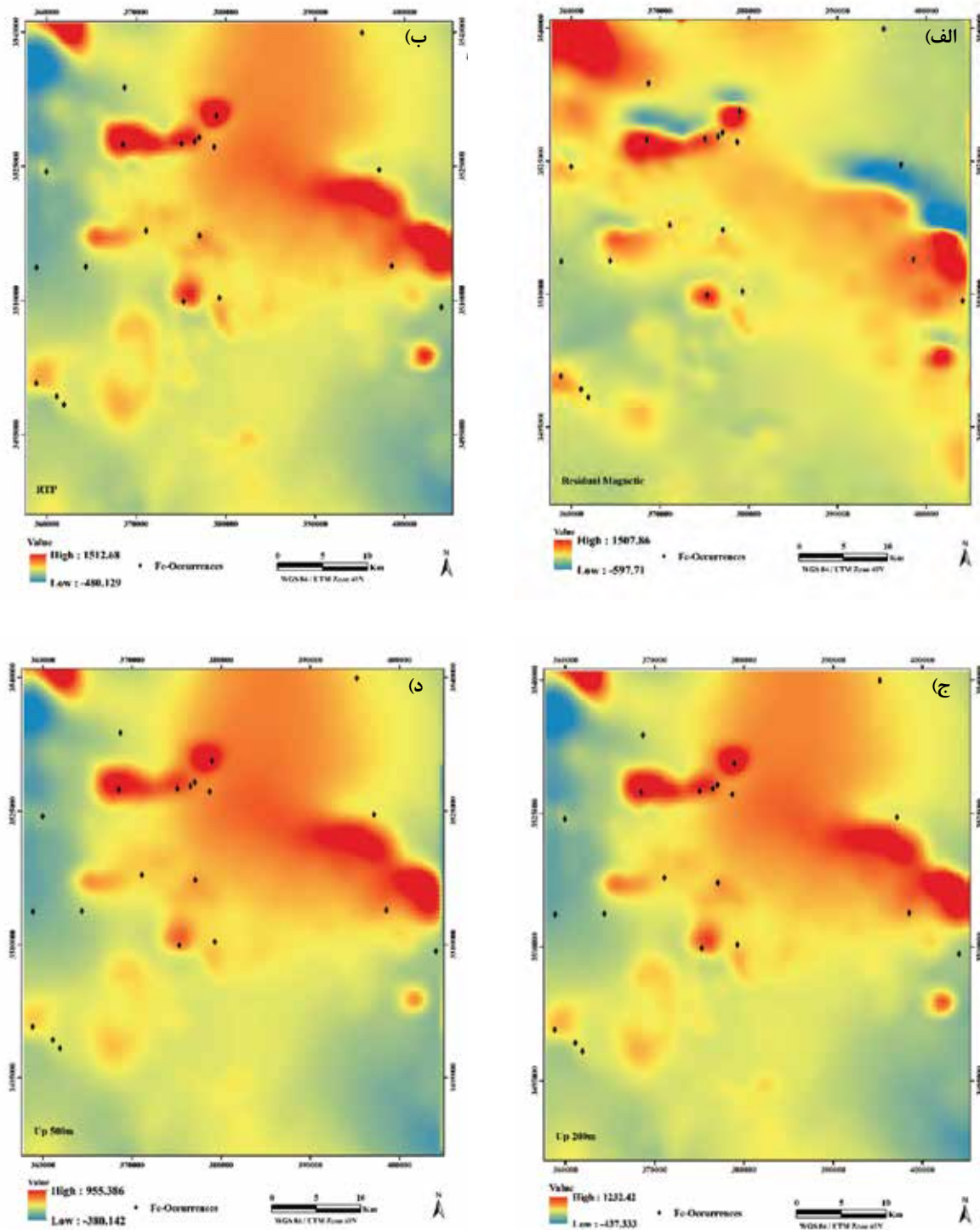
در این پژوهش، از یک روش ترکیبی از تجزیه و تحلیل فرکتالی عیار-مساحت (C-A) و نمودار پیش‌بینی-مساحت (P-A) برای وزن‌دهی و ارزیابی لایه‌های شاخص استفاده شده است. تمامی لایه‌های شاخص با اندازه پیکسلی ۱۰۰ متر در ۱۰۰ متر تهیه شده و مقادیر مکانی در هر نقشه با استفاده از تابع لجستیک پیشنهاد شده توسط یوسفی و کارانزا (Yousefi and Carranza, 2015)، به یک بازه [۰-۱] انتقال یافت. با استفاده از روش فرکتال، حدود آستانه‌ای برای هر لایه به کمک روش مقدار-مساحت مشخص شد. بر اساس نمودارهای فرکتالی حاصل شده، لایه‌های مختلف مجدداً کلاس‌بندی شدند. در ادامه با جانمایی محل آنومالی‌های موجود و تعیین مساحت دربرگیرنده، نمودارهای پیش‌بینی-مساحت برای هر لایه تهیه شد که بر اساس نقطه عطف حاصل شده، وزن هر لایه تعیین شد. از آنجا که هدف، اختصاص وزن به هر شاخص است، نسبت نرخ پیش‌بینی به مساحت اشغال شده مربوطه از طریق معادله زیر تعیین می‌شود:

$$Nd = P_r / O_a \quad (1)$$

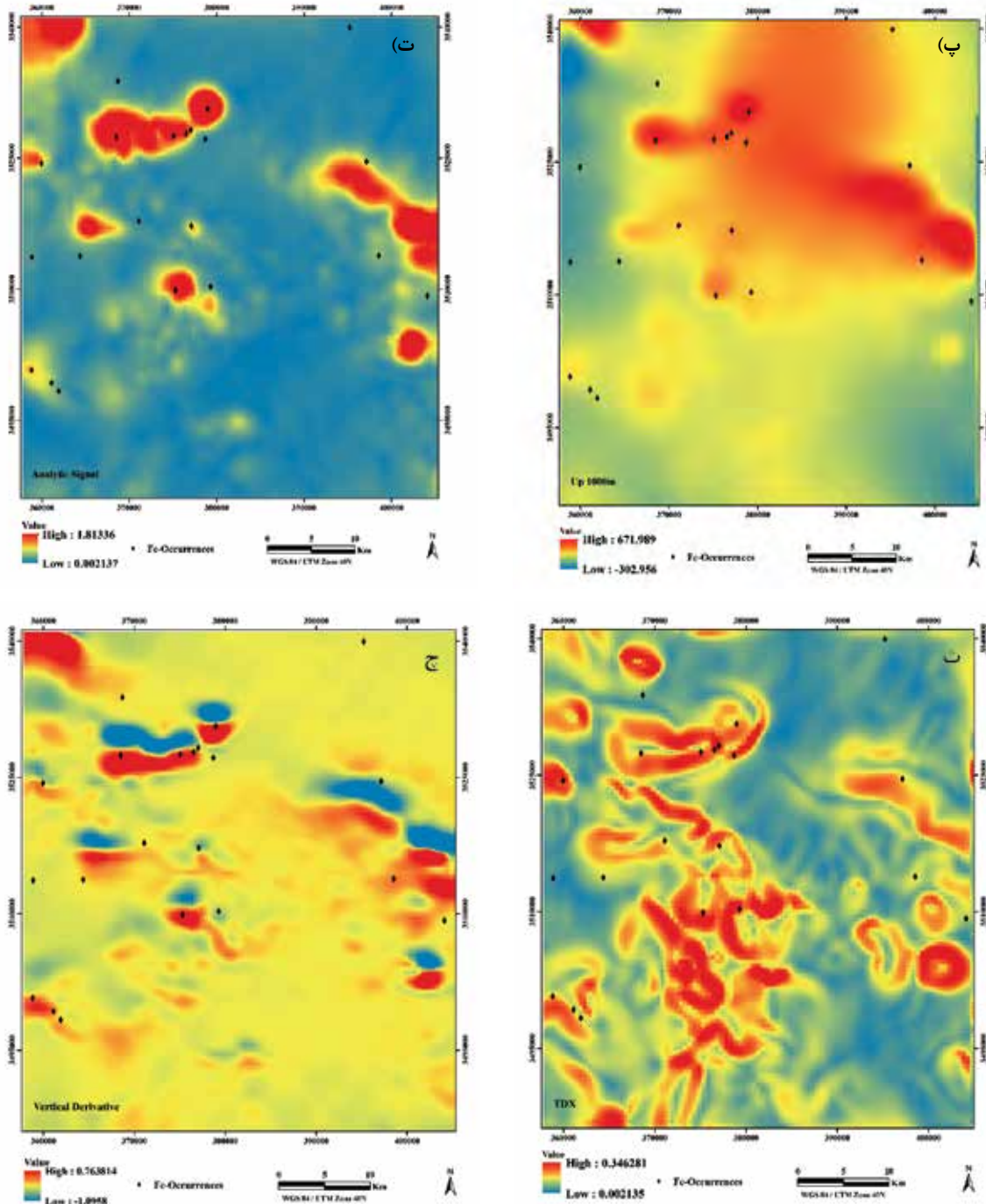
$$W_i = Ln N_d \quad (2)$$

در این روابط، N_d چگالی نرمال شده، P_r نرخ پیش‌بینی و O_a مساحت اشغال شده است که بر اساس نقطه عطف در نمودار P-A استخراج می‌گردد و W_i وزن نهایی است که به هر یک از لایه‌ها اختصاص داده می‌شود. لایه‌های ژئوفیزیکی و تصاویر ماهواره‌ای به صورت جداگانه تهیه و وزن هر کدام به وسیله نمودارهای P-A محاسبه شد. برای بدست آوردن شاخص‌های ژئوفیزیکی، ابتدا داده‌های مغناطیسی‌سنجی هوابرد مورد آنالیز قرار گرفتند. با توجه به نوع داده‌های در اختیار قرار داده شده، داده‌های مغناطیس‌سنجی هوابرد در فرآیندهای بعدی مورد استفاده قرار گرفت. بدین معنی که از داده‌های خام مقدار مغناطیس زمین^۱ (IGRF) کم شده است (شکل ۲-الف). فیلتر کاهش یافته به قطب مغناطیسی^۲ (RTP) بر روی داده‌های باقیمانده مغناطیسی اعمال شد (شکل ۲-ب). با استفاده از این فیلتر، میدان مغناطیسی از یک عرض مغناطیسی که در آن بردار میدان زمین مایل و شیب‌دار است به قطب

1. International Geomagnetic Reference Field
2. Reduction to the Pole
3. Analytic Signal
4. Horizontal Tilt Derivative



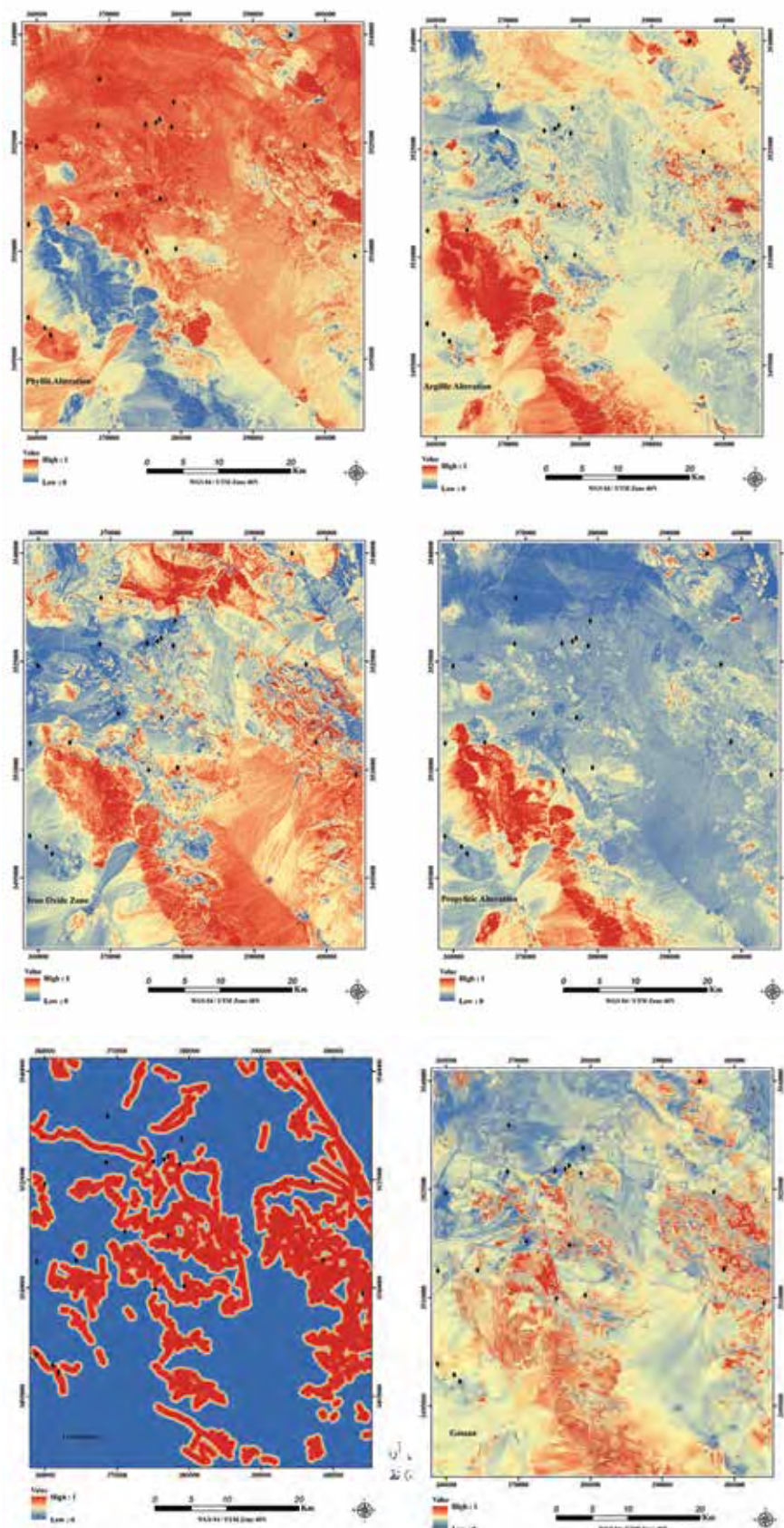
شکل ۲. نتایج پردازش داده‌های مغناطیس‌سنجی هوابرد، (الف) نقشه مغناطیس باقیمانده (R-M)، (ب) نقشه برگردان به قطب (RTP)، (ج) نقشه ادامه فراسو-۲۰۰ متر (۲۰۰m Up)، (د) نقشه ادامه فراسو-۵۰۰ متر (۵۰۰m Up)، (پ) نقشه ادامه فراسو-۱۰۰۰ متر (۱۰۰۰m Up)، (ت) فیلتر سیگنال تحلیلی (A-S)، (ث) زاویه تیلت افقی اعمال شده بر روی ادامه فراسو-۱۰۰۰ متر (TDX)، (ج) فیلتر مشتق قائم (V-D)



ادامه شکل ۲.

به سطوح پردازشی این تصاویر، ابتدا پیش‌پردازش‌های لازم بر روی هر کدام از تصاویر انجام پذیرفت تا آماده انجام پردازش‌های لازم گردند. لایه‌های دگرسانی آرژلیک، فلیک و پروپلیتیک با استفاده از تصویر استر و روش نسب‌بندی تهیه شد (شکل ۳-الف تا ۳-ج). برای این سه دگرسانی، نسبت‌های باندی $4/5$ ، $7+5/6$ و $9+7/8$ به ترتیب مورد استفاده قرار گرفت.

بدون بعد بودن آن مهم‌ترین دلیل کاربرد این فیلتر است. در نهایت نقشه مشتق قائم اول تهیه شد تا جزئیات برجسته‌تر شده و تفکیک بهتری از بی‌هنجاری‌های موجود انجام شود (شکل ۲-ج). لایه‌های دورسنجی نیز با استفاده از سه نوع تصویر ماهواره‌ای استر، سنتینل-۲ و لندست-۸ تهیه شد. با توجه

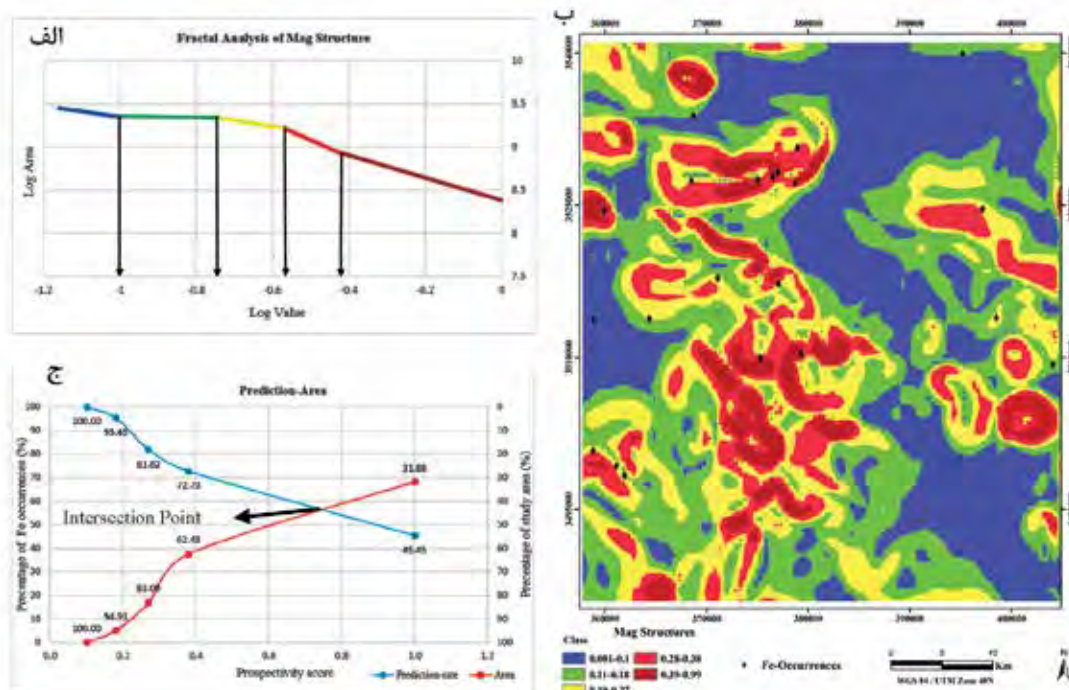


شکل ۳. نتایج پردازش داده‌های ماهواره‌ای، الف) نقشه دگرسانی آرژیلیک، ب) نقشه دگرسانی فیلیک، ج) نقشه دگرسانی پروپیلیتیک، د) نقشه اکسیدهای آهن، پ) نقشه گوسان، ت) نقشه خطواره‌ها

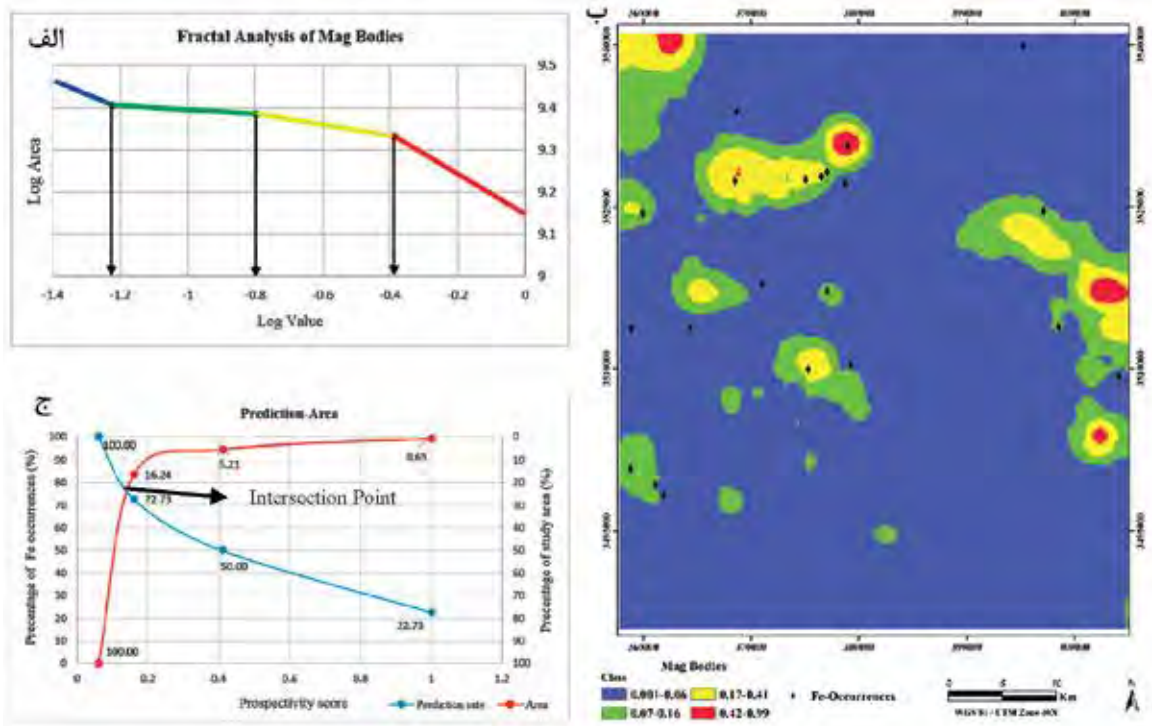
این لایه در شکل ۵-الف، نقشه کلاس‌بندی مجدد در شکل ۵-ب و نمودار پیش‌بینی-مساحت نیز در شکل ۵-ج نمایش داده شده است. با توجه به نمودار پیش‌بینی-مساحت آن، با ۲۴ درصد از مساحت اشغال شده، ۷۶ درصد از آنومالی‌ها توجیه می‌شوند. همین روند برای سه لایه شاهد دورسنجی شامل دگرسانی‌ها (آرژلیک، فلیک و پروپیلیتیک)، اکسیدهای آهن و زون گوسان و خطواره‌ها مورد استفاده قرار گرفت. نتایج مرتبط با این سه لایه به ترتیب در شکل‌های ۶ تا ۸ نشان داده شده است. لایه دگرسانی‌ها شامل پنج کلاس و نقطه عطفی در نرخ پیش‌بینی ۷۰ درصد دارد. لایه اکسیدهای آهن و زون گوسان شامل شش کلاس و نقطه عطفی در نرخ پیش‌بینی ۵۹ درصد دارد. لایه خطواره‌ها شامل پنج کلاس و نقطه عطفی در نرخ پیش‌بینی ۶۰ درصد قرار دارد. طبق این نتایج لایه ساختارهای مغناطیسی با نرخ پیش‌بینی ۵۸ درصد، کمترین وزن و لایه شاهد سیگنال تحلیلی و دگرسانی فلیک به ترتیب با نرخ‌های پیش‌بینی ۷۶ و ۷۰ درصد، دارای بیشترین نرخ‌های پیش‌بینی (کمترین مساحت) هستند. نتایج محاسبه وزن هر لایه و روش‌های مورد استفاده در تهیه هر لایه، در جدول ۲ آورده شده است.

لایه مناطق حاوی اکسید آهن با نسبت باندی ۴/۲ در تصاویر سنتینل-۲ و لندست-۸ تهیه شد (شکل ۳-د). با استفاده از تصویر سنتینل-۲، تهیه لایه‌های زون گوسان و خطواره‌های محدوده مطالعه انجام گرفت. برای تهیه لایه گوسان از نسبت باندی ۱۱/۴ و لایه خطواره‌ها از فیلترگذاری باندی ۴ تصویر سنتینل-۲ استفاده شد. نقشه گوسان در (شکل ۳-پ) و نقشه خطواره‌ها در (شکل ۳-ت) آورده شده است.

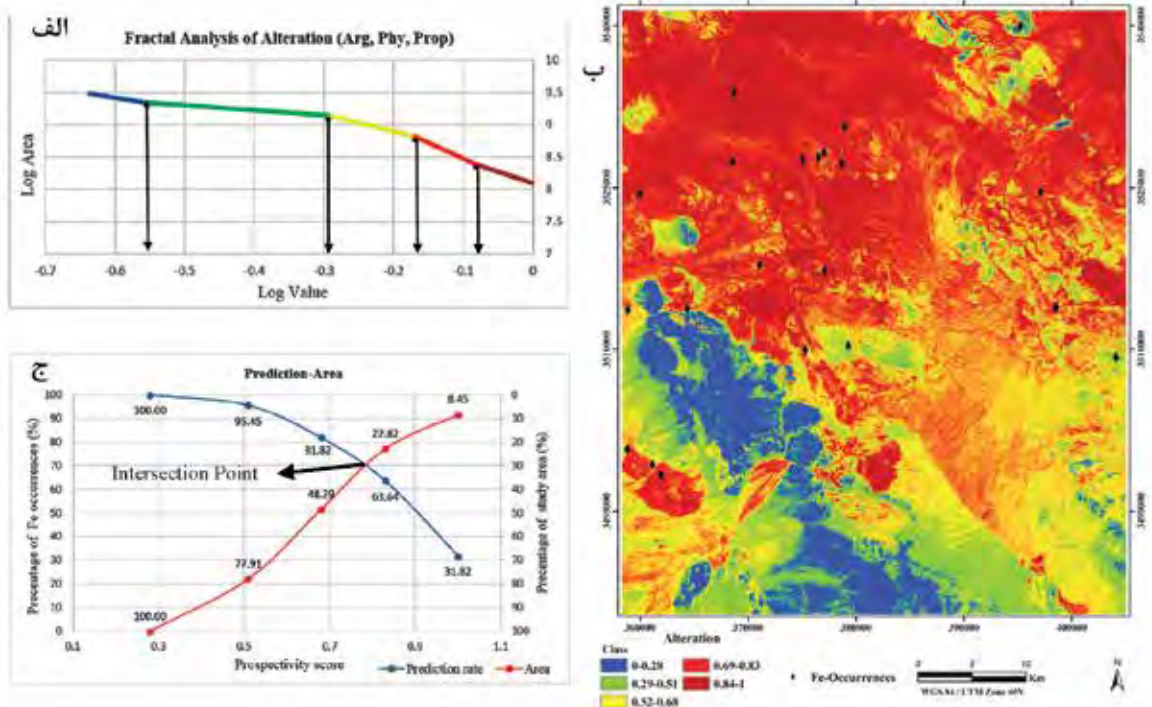
به وسیله روش فرکتالی مقدار-مساحت، لایه‌های مرتبط با کانی‌زایی آهن دوباره کلاس‌بندی شد و به وسیله نمودار پیش‌بینی-مساحت، وزن آنها محاسبه شد. از میان لایه‌های ژئوفیزیکی، نقشه سیگنال تحلیلی برای برآورد حضور توده مغناطیسی در عمق و لایه زاویه تیلت افقی برای برآورد ساختارهای مغناطیسی در نظر گرفته شد. لایه شاهد زاویه تیلت افقی به پنج کلاس تقسیم و نمودار فرکتالی آن در شکل ۴-الف، نقشه کلاس‌بندی در شکل ۴-ب و نمودار پیش‌بینی-مساحت آن در شکل ۴-ج نمایش داده شده است. طبق نقطه عطف این نمودار، با ۴۳ درصد از مساحت اشغال شده، ۵۷ درصد از آنومالی‌ها توجیه می‌شوند. لایه شاهد سیگنال تحلیلی شامل چهار کلاس می‌باشد. نمودار فرکتالی



شکل ۴. نقشه شاهد ساختارهای مغناطیسی، (الف) نمودار تمام لگاریتمی مقدار-مساحت، (ب) نقشه کلاس‌بندی شده ساختارهای مغناطیسی بر اساس نمودار فرکتالی، (ج) نمودار پیش‌بینی-مساحت

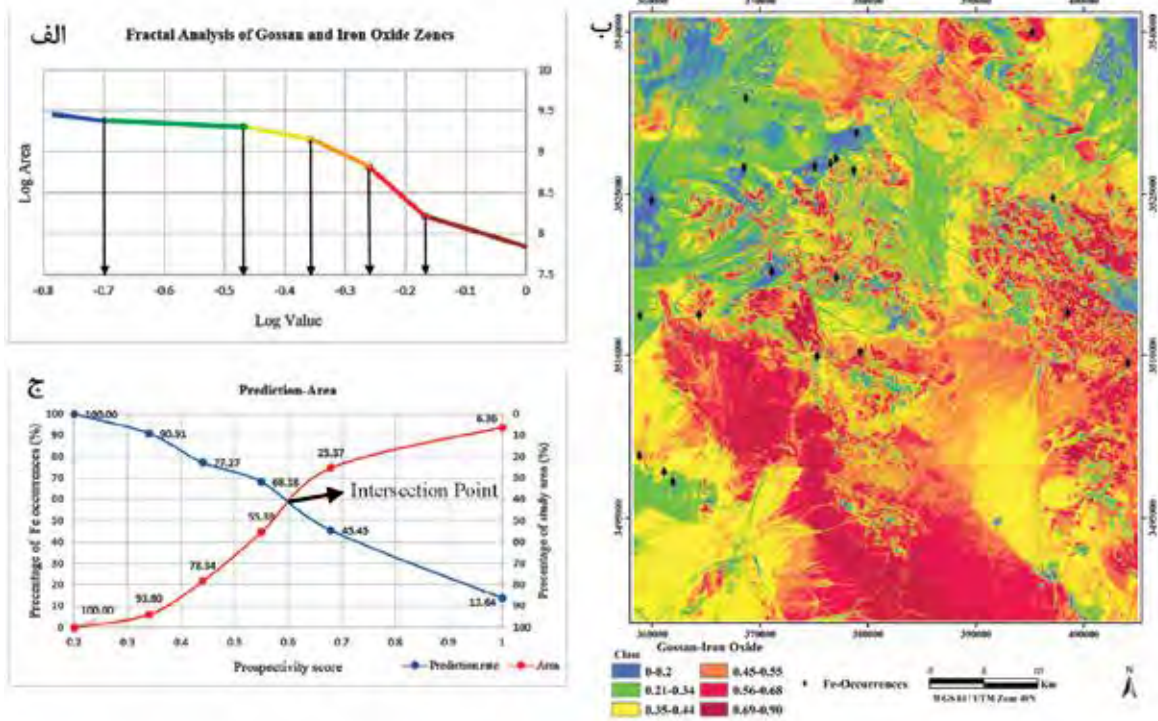


شکل ۵. نقشه شاهد سیگنال تحلیلی، الف) نمودار تمام لگاریتمی مقدار-مساحت، ب) نقشه کلاس بندی شده سیگنال تحلیلی بر اساس نمودار فرکتالی، ج) نمودار پیش بینی-مساحت

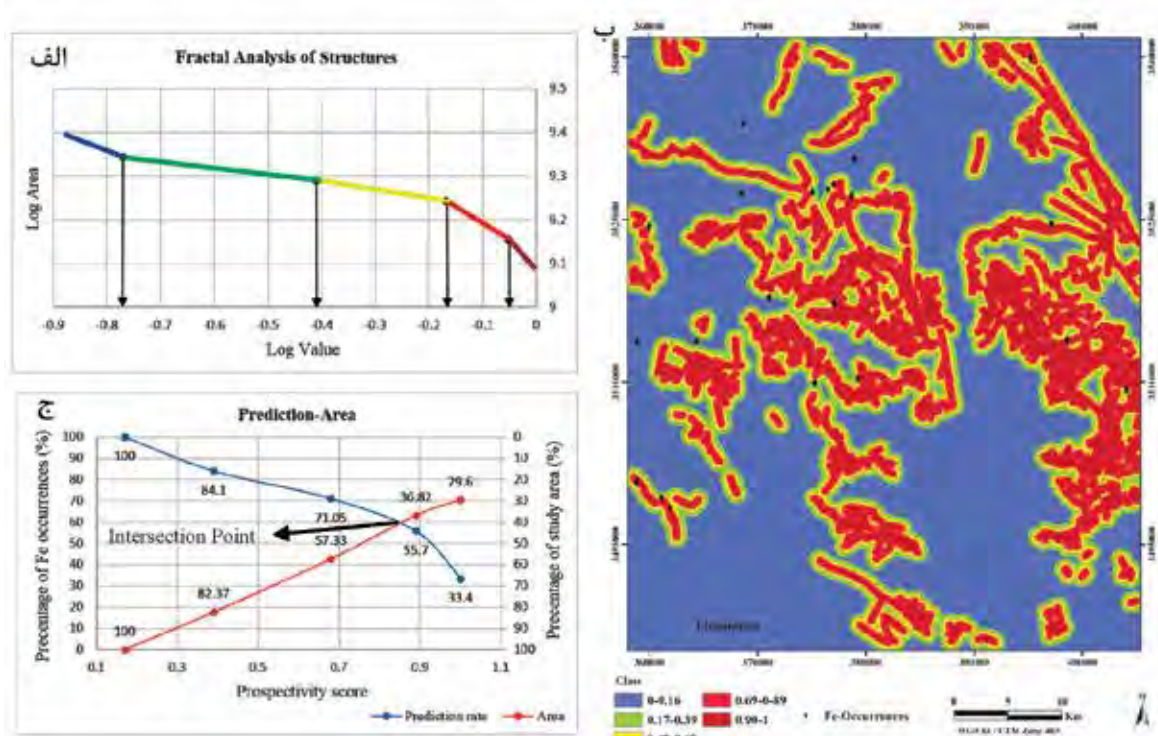


شکل ۶. نقشه شاهد دگرسانی ها، الف) نمودار تمام لگاریتمی مقدار-مساحت، ب) نقشه کلاس بندی شده دگرسانی ها بر اساس نمودار فرکتالی، ج) نمودار پیش بینی-مساحت

تلفیق داده‌های مغناطیس‌سنجی هوابرد و تصاویر ماهواره‌ای برای شناسایی پهنه‌های ...



شکل ۷. نقشه شاهد زون اکسید آهن و گوسان، الف) نمودار تمام لگاریتمی مقدار-مساحت، ب) نقشه کلاس‌بندی شده اکسیدهای آهن و گوسان بر اساس نمودار فرکتالی، ج) نمودار پیش‌بینی-مساحت



شکل ۸. نقشه شاهد خطواره‌ها، الف) نمودار تمام لگاریتمی مقدار-مساحت، ب) نقشه کلاس‌بندی شده خطواره‌ها بر اساس نمودار فرکتالی، ج) نمودار پیش‌بینی-مساحت

جدول ۲. لایه‌های شاهد استفاده شده و وزن محاسبه شده هرکدام به وسیله نمودار پیش‌بینی-مساحت

نوع داده	لایه	روش	نرخ پیش‌بینی	مساحت	چگالی نرمالایز شده	وزن
مغناطیس هوابرد	توده مغناطیسی	سیگنال تحلیلی	۷۶	۲۴	۳/۱۷	۱/۱۵۳
	ساختارهای مغناطیسی	زاویه تیلت افقی	۵۸	۴۲	۱/۳۸	۰/۳۲۳
استر	دگرسانی‌ها	نسبت‌بندی، آنالیز مؤلفه‌های اصلی	۷۰	۳۰	۲/۳۳	۰/۸۴۶
سنتینل ۲، لندست ۸	اکسید آهن و گوسان	نسبت‌بندی، آنالیز مؤلفه‌های اصلی	۵۹	۴۱	۱/۴۴	۰/۳۶۴
سنتینل ۲	خطواره‌ها	فیلتر برای	۶۰	۴۰	۱/۵	۰/۴

روش، مقدار فازی شده هر نقشه در وزن به دست آمده آن لایه ضرب می‌شود و سپس مجموع این مقادیر بر مجموع وزن‌های به دست آمده تقسیم می‌شود.

پس از فازی‌سازی نقشه نهایی، لایه نهایی به کمک روش فرکتال، به پنج زیر گروه تفکیک شد. بر اساس این نمودار نقشه کلاس‌بندی ترسیم شد و در نهایت نمودار پیش‌بینی-مساحت برای این لایه رسم شد. طبق این نمودار با ۲۲ درصد از مساحت اشغال شده، می‌توان ۷۸ درصد از انومالی‌ها را توجیه کرد با توجه به اعداد به دست آمده از مساحت اشغال شده و نرخ پیش‌بینی، چگالی نرمالایز شده برای لایه تلفیقی، برابر با ۳/۵۴۵ بدست می‌آید و وزن این لایه، ۱/۲۶۵ خواهد بود. بنابراین لایه نهایی دارای وزن بیشتری از تک تک لایه‌ها می‌باشد. نتایج مربوط به نقشه تلفیق شده نهایی در شکل ۹ آورده شده است. نمودار فرکتالی در شکل ۹-الف، نقشه تلفیقی فازی شده در شکل ۹-ب، نمودار پیش‌بینی-مساحت در شکل ۹-ج و نقشه کلاس‌بندی مجدد در شکل ۹-د نمایش داده شده است.

بازدید صحرائی

برای ارزیابی و صحت‌سنجی نتایج، بررسی میدانی از نواحی با پتانسیل بالا صورت پذیرفت. در این راستا تمرکز بر جنوب‌شرق گستره مطالعه می‌باشد که به عنوان مناطق با پتانسیل بالایی معرفی می‌شود که اندیس معدنی در آن گستره مشاهده نمی‌شود. در طی این عملیات بخش‌های مختلفی مورد بازدید قرار گرفت که آثار و شواهد زمین‌شناسی گوناگون ثبت و در شکل ۱۰ آورده شده است. در شکل ۱۰-الف ساختارهای خطی و گسل‌خوردگی شدید مشاهده

همان‌طور که از وزن‌های بدست آمده مشخص است، لایه توده مغناطیسی با ضریب ۱/۱۵۳، بالاترین وزن را به خود اختصاص داده است و پس از آن وزن بدست آمده از دگرسانی (فیلیک) جلب توجه می‌کند. دلیل آن می‌تواند در ارتباط با آبکافت پلاژیوکلاز و تبدیل به سرسیت باشد (Sepehrirad, et al; 2018 Heidarian, et al; 2017). به همین دلیل این دگرسانی ارتباط تنگاتی با کانی‌زایی تیپ کایرونا دارد. البته دگرسانی‌هایی همچون کلریتی و پتاسیک نیز در ارتباط با این نوع کانی‌زایی می‌باشند.

نقشه زاویه تیلت نیز که برای نمایش ساختارهای مغناطیسی استفاده شد وزنی معادل ۰/۳۲۳ دارد. برای لایه‌های اکسید آهن و گوسان مقدار ۰/۳۶۴ بدست آمده است و خطواره‌ها وزن ۰/۴ را به خود اختصاص داده‌اند. این لایه‌ها بر حسب وزنی که برای هر لایه بدست آمده است وارد فرآیند تلفیق برای تهیه نقشه پتانسیل معدنی شدند.

تهیه نقشه پتانسیل معدنی

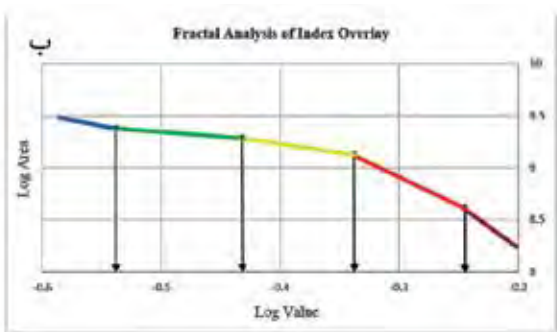
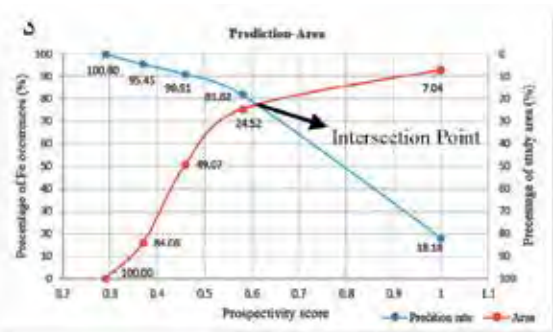
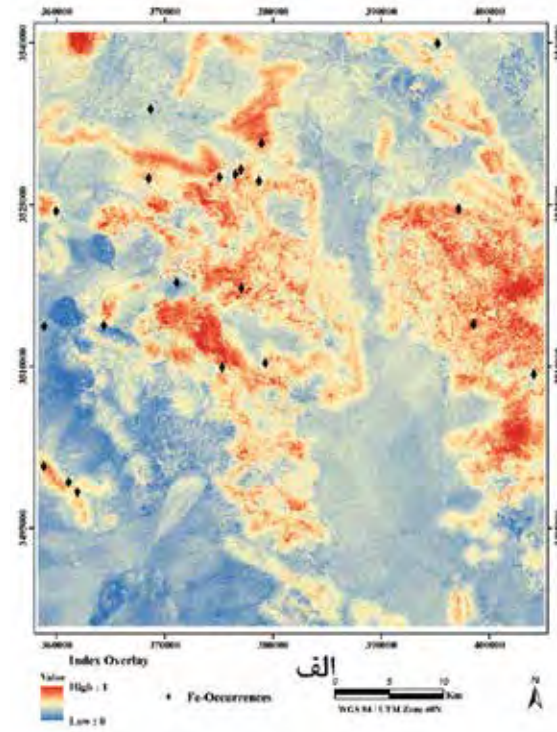
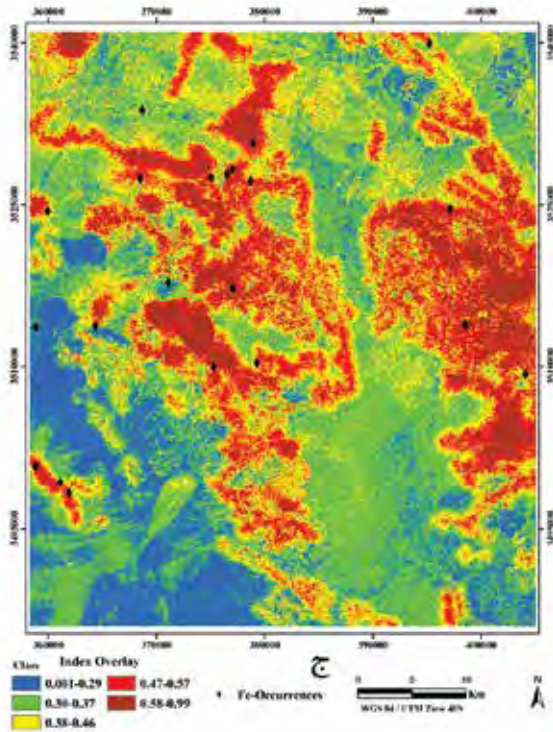
برای تلفیق لایه‌های اطلاعاتی، روش‌های مختلفی وجود دارد که بر حسب روش‌های وزن‌دهی و روش‌های مدلسازی مختلف می‌توان از آنها استفاده کرد (Bonham-Carter, 1994; Carranza, 2016). در اینجا از روش همپوشانی شاخص برای انجام تلفیق لایه‌های شاهد استفاده شد.

پس از تهیه همه لایه‌های شاهد (ژئوفیزیکی و دورسنجی)، برای تهیه نقشه پتانسیل مطلوب، لایه‌های توده مغناطیسی، ساختارهای مغناطیسی، دگرسانی‌ها، اکسیدهای آهن-زون گوسان و خطواره‌ها باهم تلفیق شدند. برای تلفیق این لایه‌ها از روش همپوشانی شاخص استفاده شد. در این

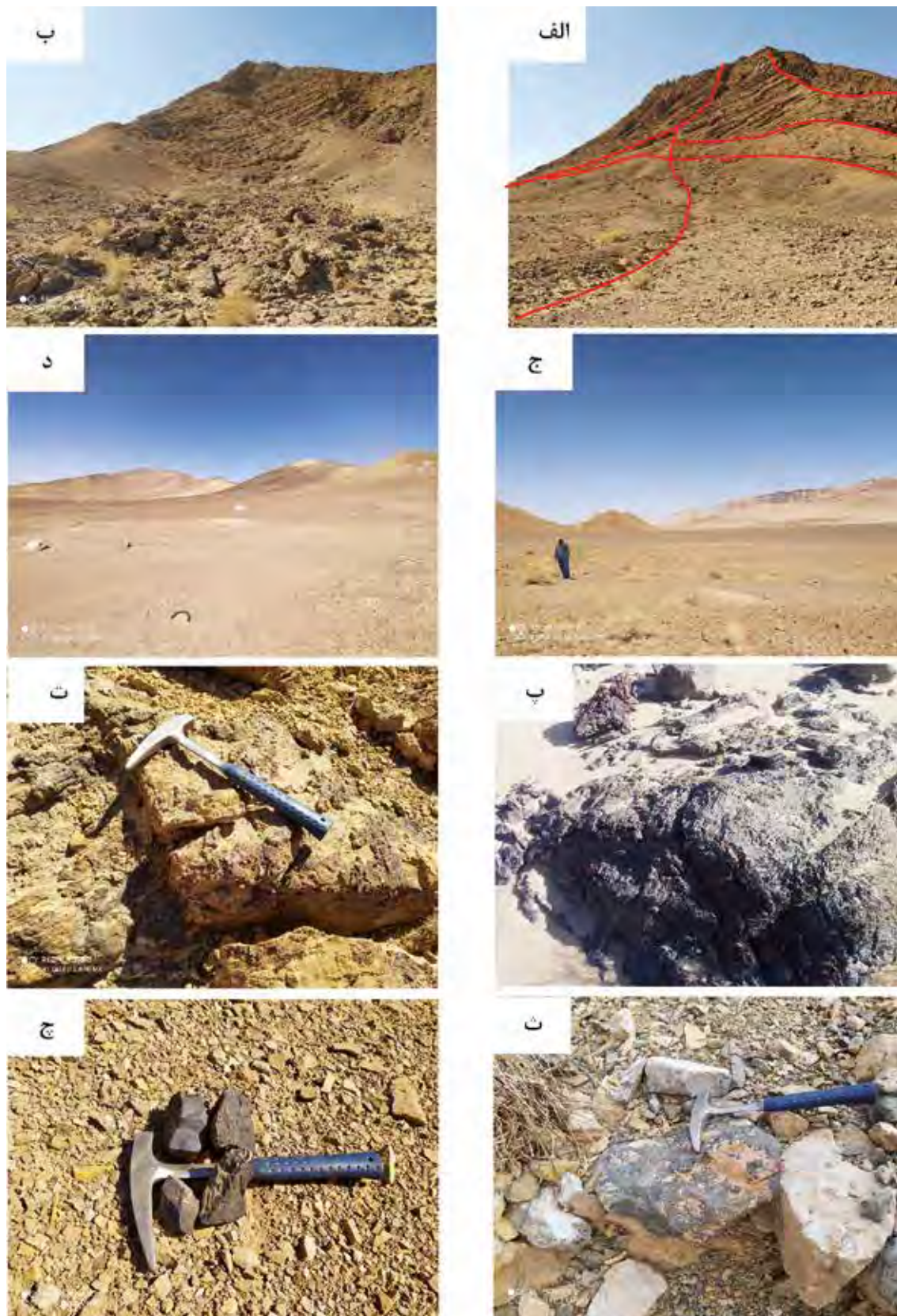
تلفیق داده‌های مغناطیس‌سنجی هوابرد و تصاویر ماهواره‌ای برای شناسایی پهنه‌های ...

می‌دهد. در شکل ۱۰-ت حضور اولوژیت در سنگ میزبان کربناتی مشاهده می‌شود که در بخش‌های مختلف این قضیه اتفاق افتاده است. در شکل ۱۰-ث واریزه نسبتاً بزرگ سنگ آهن در رسوبات نمایش داده شده است که البته علی‌رغم صرف زمان زیاد، رخنمونی یافت نشد و با توجه به وسعت محدوده نیاز به بررسی‌های بیشتر خواهد داشت. نمونه‌های ماکروسکوپی برداشت‌شده در شکل ۱۰-ج نشان داده شده است.

می‌شود. شکل ۱۰-ب حضور توده‌های نفوذی را نشان می‌دهد. کربنات‌ها یکی از فراوان‌ترین واحدهای سنگی در گستره مطالعاتی می‌باشد که طبق تحقیقات مختلف در برخی نواحی نیز در ارتباط با کانی‌سازی هستند. کربنات‌های جنوب‌غرب محدوده با روند شمال‌غرب به جنوب‌شرق در شکل ۱۰-ج نمایش داده شده است. در شکل ۱۰-د محل حفر گمانه یکی از آنومالی‌های محدوده آورده شده است. شکل ۱۰-پ اکسیدهای آهن و هماتیته شدن را نشان



شکل ۹. نقشه تلفیق شده همه لایه‌های شاهد، الف) نقشه نهایی تلفیقی فازی شده، ب) نمودار لگاریتمی فرکتال مقدار-مساحت لایه نهایی تلفیق شد، ج) نقشه کلاس‌بندی لایه نهایی تلفیق شده، د) نمودار پیش‌بینی-مساحت لایه نهایی تلفیق شده



شکل ۱۰. بررسی‌های میدانی. الف) گسل خوردگی شدید در منطقه، ب) واحدهای نفوذی، ج) واحدهای کربناتی جنوب غرب برکه اسفوردی، د) نمایی از آنومالی‌ها و حفر گمانه اکتشافی، پ) اکسیدهای آهن، ت) حضور اولوئیت در سنگ میزبان کربناتی، ث) واریزه سنگ آهن در رسوبات جنوب شرق گستره مطالعاتی، چ) نمونه‌های سنگ آهن برداشت شده در بخش جنوب شرق برکه اسفوردی

نتیجه‌گیری

اسفوردی، این نواحی مشاهده می‌شوند که به رنگ قهوه‌ای تیره قابل شناسایی هستند. این نواحی به عنوان اولویت‌های اکتشافی و بررسی‌های میدانی مدنظر قرار گرفتند. در نقشه نهایی تلفیق شده، با ۲۲ درصد از مساحت دربرگیرنده می‌توان ۷۸ درصد از آنومالی‌ها را توجیه کرد. به عبارتی وزن لایه نهایی حاصل از تلفیق همه لایه‌ها، از تک تک لایه‌ها بیشتر است.

در بررسی‌های میدانی نیز شواهد حاکی از احتمال بالای کانی‌زایی در این ناحیه به چشم می‌خورد. با انجام بررسی‌های زمین‌شناسی و مقایسه آن با اندیس‌ها و نهشته‌های قبلی، می‌توان واحدهای ریولیتی، ریوداسیتی، دولومیت‌های آهکی و مناطق حضور مارن را با پتانسیل‌ترین نواحی برای کانی‌زایی احتمالی دانست که این موضوع از مهمترین کلیدهای اکتشافی در محدوده می‌باشد. به کمک نقشه نهایی تلفیقی و در نظر گرفتن واحدهای مستعد کانی‌زایی در محدوده، شناسایی نواحی با پتانسیل و امیدبخش جدید بسیار محتمل خواهد بود.

سپاسگزاری

بدین وسیله از مجموعه معدنی روی خان خاتون و به ویژه جناب آقای دکتر ناصر رحمانی و مهندس حمید رستمی‌پور به دلیل همکاری و همراهی در انجام عملیات صحرایی سپاسگزاری می‌شود. همچنین از سازمان زمین‌شناسی کشور به دلیل در اختیار قرار دادن بخشی از داده‌های این پژوهش تشکر به عمل می‌آید.

منابع

- مجیدی، س.ا.، لطفی، م. و امامی، م.ه.، ۱۳۹۴. ژنز کانسارهای اکسید آهن-آپاتیت: بر پایه مطالعه آپاتیت‌های پهنه بافق-ساغند، ایران مرکزی. فصلنامه علمی-پژوهشی علوم زمین، ۲۷(۱۰۵)، ۲۳۳-۲۴۴.

- Bonham-Carter, G.F., Agterberg, F.P and Wright, D. F., 1989. Weights of evidence modeling: A new approach to mapping mineral potential. In Statistica Application in the Earth Sciences, Geology Survey of Canada, 171-183.

- Bonham-Carter, G.F. 1994. Geographic

یکی از مزیت‌های سنجش از دور در مطالعات زمین‌شناسی، پوشش وسیع گستره مورد مطالعه است که اطلاعات بسیار سودمندی از الگوهای ساختاری را ارائه می‌دهد. گسل‌ها و شکستگی‌ها، ساختارهایی هستند که به خوبی بر روی تصاویر ماهواره‌ای شناسایی می‌شوند. از طرفی پردازش داده‌های مغناطیس‌هوایی اطلاعات با ارزشی برای تحلیل عوارض زیر سطحی به دست می‌دهد. از جمله رخساره‌های قابل شناسایی با استفاده از داده‌های مغناطیسی هوایی می‌توان به تعیین محل و گسترش عمقی توده‌های نفوذی پنهان، مناطق دگرسانی، مناطق برشی، شکستگی‌های پی‌سنگی و در کل بررسی وضعیت زمین‌ساختی و مطالعه ارتباط آن با کانه‌زایی اشاره کرد. لذا در این پژوهش با تلفیق و تحلیل داده‌های مغناطیس‌هوایی و تصاویر ماهواره‌ای از سه سنجنده مختلف، به بررسی وضعیت ساختاری و ارتباط آن با کانه‌زایی پرداخته شد. با استفاده از اندیس‌ها و نهشته‌های معدنی موجود، وزن‌دهی به لایه‌های شاهد صورت پذیرفت که با این کار به نوعی اعتبارسنجی نیز صورت پذیرفته است. نتایج این پژوهش در مقایسه با کارهای مشابه قبلی، این مزیت را داراست که علاوه بر استفاده از سه سنجنده در تهیه لایه‌های مختلف، از محل اندیس‌های معدنی بهره برده شده است و این امر اعتبار نتایج را افزایش خواهد داد. در این بین تصاویر سنتینل ۲ در به نقشه آوردن مناطق اکسید آهن و زون‌های گوسان قابلیت بالایی داشته و به طور کلی در بررسی‌های مرتبط با کانی‌زایی آهن بسیار مؤثر واقع می‌شود. استفاده از نمودارهای پیش‌بینی-مساحت در مقایسه با روش‌های وزن‌دهی مرسوم، ریسک ناشی از خطای کارشناسی را در بر نداشته و وزن‌های بدست آمده قابل اعتمادتر خواهند بود. در این راستا با استفاده از توجیه مساحت اشغال شده به وسیله آنومالی‌ها، اقدام به تهیه وزن لایه‌ها شده است.

نتایج نهایی نیز بسیار منطبق بر حضور این نقاط در گستره است. به علاوه بخش‌های جدیدی به عنوان نواحی جدید با پتانسیل بالای کانی‌سازی آهن شناسایی شد. طبق این نقشه، در شرق، جنوب شرق و شمال‌غربی برگه

- Information Systems for Geoscientists: Modelling with GIS, New York Pergamon/Elsevier, 398.
- Carranza, E. J. M. and Laborde, A. G. 2016. Data-driven predictive modeling of mineral prospectivity using random forests. A case study in Catanduanes Island (Philippines). *Natural Resources Research*, 25, 35-50.
 - Clark, D. A., 2014. Magnetic Effects of Hydrothermal Alteration in Porphyry Copper and Iron-Oxide Copper-gold Systems: A Review. *Tectonophysics*, 624-625, 1, 46-65. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2013.12.011>.
 - Daliran, F., Stosch, HG., and Williams PJ., 2009. A review of the Early Cambrian magmatic and metasomatic events and their bearing on the genesis of the Fe oxide-REE-apatite deposits (IOA) of the Bafq district, Iran. In Williams P (Ed.): *Smart Science for Exploration and Mining*. 10th SGA Biennial, Townsville, 623-625.
 - 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. Ph.D. thesis, Heidelberg, Heidelberg Geowissenschaftliche Abhandlungen 37, 248 .
 - Elkhateeb, S. O. and Abdellatif, M. A. G., 2018. Delineation potential gold mineralization zones in a part of Central Eastern Desert, Egypt using Airborne Magnetic and Radiometric data. *NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics*, 7(2), 361-376.
 - Elkhateeb, S. O., Eldosouky, A. M. and Aboelabas, S., 2018. Interpretation of Aeromagnetic Data to Delineate Structural Complexity Zones and Porphyry Intrusions at Samr El Qaa Area, North Eastern Desert, Egypt. *International Journal of Novel Research in Civil Structural and Earth Sciences*. 5, Issue 1, 1-9.
 - Förster, H. and Jafarzadeh, A., 1994. The Bafq mining district in Central Iran—a highly mineralized Infracambrian volcanic field. *Economic Geology*, 89, 1697-1721.
 - Gaafar, I. M., 2015. Integration of geophysical and geological data for delimitation of mineralized zones in Um Naggat area, Central Eastern Desert, Egypt. *NRIAG Journal of Astronomy*.
 - Ghorbani, M., 2013. *Economic geology of Iran*. 581. Berlin: Springer.
 - Grauch, V. J. S. and Johnston, C. S., 2002. Gradient window method: A simple way to isolate regional from local horizontal gradients in potential-field gridded data: 72nd Annual International Meeting, Society of Exploration Geophysicists.
 - Heidarian, H., Alirezaei, S., and Lentz, D. R., 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.
 - Hsu, S. K., Sibuet, J. C, and Shyu, C. T., 1996. High-resolution detection of geologic boundaries from potential anomalies, An enhanced analytic signal technique, *Geophysics*, 61, 373-386.
 - Javed A, and Wani MH., 2009. Delineation of groundwater in Kakund watershed, Eastern Rajasthan using remote sensing and GIS techniques. *Journal of Geol Soc India* 73,2, 229-236.
 - Miller, H.G. and Singh, V., 1994. Potential field tilt – a new concept for location of potential field sources. *Journal of Applied Geophysics*. 32, 213- 217.
 - Mohammad Torab, F., 2008. *Geochemistry and metallogeny of magnetite-apatite deposits of the Bafq Mining District, Central Iran*. Doctoral Thesis, Faculty of Energy and Economic Sciences Clausthal University of Technology.
 - Murphy, B. S., 2007. Airborne geophysics and the Indian scenario. *J. Ind. Geophysics Un-*

ion, 11, 1, 1-28.

- Nabatian, G., Rastad, E., Neubauer, F., Honarmand, M., and Ghaderi, M., 2015. Iron and Fe-Mn mineralisation in Iran: implications for Tethyan metallogeny. *Australian Journal of Earth Sciences*, 62, 2, 211-241.

- Ranjbar, H., Shahriari, H., and Honarmand, M., 2004. Integration of ASTER and airborne geophysical data for exploration of copper mineralization. A case study of Sar Cheshmeh area. In *Proceedings of 20th congress, International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Istanbul*. 12-13.

- Sadeghi, B., Khalajmasoumi, M., Afzal, P., Moarefvand, P., Yasrebi, A. B., Wetherelt, A., and Ziazarifi, A., 2013. Using ETM+ and ASTER sensors to identify iron occurrences in the Esfordi 1: 100,000 mapping sheet of Central Iran. *Journal of African Earth Sciences*, 85, 103-114.

- Sepehrirad, R., Alirezaei, S. and Azimzadeh, A. M., 2018. Hydrothermal alteration in the Gazestan magnetite-apatite deposit and comparison with other Kiruna-type iron deposits in the

Bafq district, Central Iran. *Journal of Geoscience*, 27, 108, 257-268.

- 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. *Miner Deposita*, 46, 9-21.

- Testa, F.J., Villanueva, C., Cooke, D.R. and Zhang, L. 2018. Lithological and hydrothermal alteration mapping of epithermal, porphyry and tourmaline breccia districts in the Argentine Andes using ASTER imagery. *Remote sensing*, 10, 2, 203; doi:103390/rs10020203.

- Torab, F. M. and Lehmann B., 2006. Iron oxide-apatite deposits of the Bafq district, Central Iran. An overview from geology to mining. *World of Mining-Surface and Underground*, 58, 355-362.

- Yousefi, M. and Carranza, E. J. M., 2015. Prediction-area (P-A) plot and C-A fractal analysis to classify and evaluate evidential maps for mineral prospectivity modeling. *Computers and Geosciences*, 79, 69-81.

Karst geology of carbonate rocks mass in Abegarm area, south of Qazvin province

Armani, P.¹, Karimi, M.² and Tajabadi, M.³

1. Associate Professor, Department of Geology, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran

2. M.Sc. Islamic Azad University, North Tehran Branch, Iran

3. Ph.D. Groundwater, Qazvin Regional Water Company, Iran

Received: 29 June 2021

Accepted: 30 October 2021

Abstract

Understanding the geological phenomena created by dissolution can be a great help in understanding karst systems. Hence, geology is usually the first step in studying the karstification process. Abegarm is located in the Central Iran structural zone and includes the Formations of the Paleozoic, Mesozoic and Cenozoic eras. The most important carbonate formations in Abegarm are Soltanieh, Ruteh, Elika, Lar and Qom formations. In this study, karstification potential was investigated after field work and sampling of carbonate rock units and comparing them in terms of the development of karst landforms. Sampling of karst springs in both dry and wet periods, as well as measurement of EC, pH and temperature on the ground were performed. Remote sensing studies were performed by ILWIS software on Landsat satellite images for isolation and calculation of the area of carbonate formations. AqQa software was used to review and interpret the findings of chemical analyses and Phree Qc software was used to model water chemistry. The most important karst landforms in the region include karrens, vugs, caves, and karst springs. Based on the combination of field studies and remote sensing data, the intensity of karstification in the Abegarm area graded from high to low, include: Qom, Soltanieh, Lar and Cretaceous formations. Based on karst development classification, Abegarm karstification is merokarst (incomplete) and shallow; and based on the karst cycle classification it is classified as juvenile to young.

Keywords: Central Iran, South of Qazvin, Landforms, Karstification, Hydrochemistry.

Plant macrofossiles of the Laleband formation (Late Triassic), Ramsar coal-bearing region, Northern Iran

J. Saadatnejad¹

1. Petroleum Geology Office, Exploration Directorate, National Iranian Oil Company

Received: 19 December 2021

Accepted: 15 March 2022

Abstract

The Shemshak Group is well-exposed in Ramsar coal-bearing region and consists of four formations; Ekrsar, Laleband, Kalariz and Javaherdeh. The Laleband Formation lies conformably and gradationally on top of Ekrsar formation and its upper contact is conformable and sharp under Kalariz formation. It contains scattered plant macrofossils of Norian-Rhaetian age. The studied section contains well-preserved and scattered plant macrofossils belonging to three orders as Equisetales, Filicales and Pinales. Based on the occurrence of *Neocalamites* sp. cf. *N. carcinoides*, *Dictyophyllum* sp. cf. *D. exile*, *Clathropteris meniscoides* and *Cycadocarpidium erdmani* and stratigraphic position of fossil bearing layers, Late Norian-Early Rhaetian age is suggested for the studied beds.

Keywords: Laleband formation, Plant Macrofossils, Ramsar coal-bearing region, Late Triassic.

Mineralogy, geochemistry, and fluid inclusion characteristics of the Madanjoo skarn iron deposit, Sangan mining district, NE Iran

Fotovat Jami, M.¹ and Alipour-Asll, M.²

1. M.Sc. Graduate, Department of Petrology and Economic Geology, Faculty of Earth Sciences, Shahrood University of Technology

2. Associate Professor, Department of Petrology and Economic Geology, Faculty of Earth Sciences, Shahrood University of Technology

Received: 20 December 2021

Accepted: 15 March 2022

Abstract

The Madanjoo prospect is one of the eastern anomalies in the Sangan mining district. This area is located in the eastern part of the Cenozoic Alborz volcanic-plutonic arc. The geology of the area includes Jurassic shaly sandstone, lime mudstone, and sandstone, Upper Cretaceous limestone and dolomitic limestone, and Upper Eocene tuff and lava flow sequences, Middle Eocene skarn rocks, and Quaternary sediments. The most important occurrence in the Madanjoo area is the penetration of ferrous fluids into terrigenous and carbonate formations, skarnization, and iron mineralization, which is characterized by the presence of magnetite and calcsilicates minerals. based on type and frequency of calcsilicates, The skarn zones include olivine-pyroxene-garnet skarn, garnet-pyroxene skarn, garnet skarn, pyroxene-wollastonite-magnetite skarn, magnetite skarn, phlogopite skarn, tremolite-actinolite skarn, and epidote skarn. Iron mineralization occurred as massive, banded, vein-veinlets, breccia, and disseminated forms mostly in the Upper Cretaceous limestone and dolomite rocks and along NE-SW fault zone trend. Magnetite is the main ore mineral accompanied with pyrite, chalcopyrite, pyrrhotite, and secondary iron minerals. The composition of the Madanjoo garnet, pyroxene, and olivine are andradite-grossular (mostly andradite), diopside-hedenbergite (mostly diopside), and forsterite, respectively. Thermobarometry study based on pyroxene chemistry show that pyroxenes crystallized in temperature range of 458-689 °C, pressure of 2.21 kb, and depth range of 1-2.5 km. Three main paragenetic stages of skarn formation and ore deposition were recognized in the Madanjoo deposit: (1) a prograde stage developed with prograde garnet and pyroxene forming at 330° to 410 °C with a fluid salinity between 33 to 58 wt.% NaCl equivalent, (2) a retrograde garnet, tremolite- actinolite, and calcite which formed at 120° to 300 °C with fluid salinity of 16 to 49 wt.% NaCl equivalent, and (3) a post-ore stage with calcite and minor quartz veins that developed at 95° to 190 °C with salinity range of 2 to 15 wt.% NaCl equivalent. Possible iron ore formation mechanisms include: fluid mixing, boiling, and dilution with meteoric waters along with decreasing temperature. Finally, the Madanjoo iron mineralization is introduced as a magnesian exoskarn iron deposit.

Keywords: Magnesian iron skarn, Geochemistry, Mineralogy, Madanjoo, Fluid inclusion, Sangan mining district.

Integration of Geological, Geochemical, Alteration and Remote Sensing Data to Introduce the Mineralization Potentials in the Sarbisheh area, South Khorasan

Modabberi, S.¹, Azarifar, M.², Shamsoddin Ahmadi S.³ and Raeisi, D.^{4,5}

1. Associate Professor, School of Geology, College of Science, University of Tehran, Tehran, Iran
2. M.Sc. Student, School of Geology, College of Science, University of Tehran, Tehran, Iran
3. M.Sc. Graduate, School of Geology, College of Science, University of Tehran, Tehran, Iran
4. Postdoctoral Researcher, School of Geology, College of Science, University of Tehran, Tehran, Iran
5. Karand Sadr Jahan Mines and Mining Industries Company

Received: 20 December 2021

Accepted: 15 March 2022

Abstract

Sarbisheh area is located in the west of Sarbisheh and southeast of Birjand, South Khorasan province. This area is located in the Birjand ophiolite melange zone and is a part of the northern part of the Iranshahr-Birjand metallogenic belt. The lithological units in this area include ophiolite melange, flysch facies sediments, pyroclastic rocks and Quaternary sediments. Geochemical studies of stream sediments and identification of geochemical indicators of mineral resources in the region were performed using the results of geochemical analysis and principal component analysis. Remote sensing studies were performed on the ASTER and Landsat satellite images using color composite, selective principal component analysis (crusta) on the Landsat 8 satellite imagery to identify the alteration zones. The lineaments of the region were drawn using the high-pass filter method of the ASTER satellite image and the Google image. Finally, by creating layers of geological units, geochemical data, alteration and lineament and integrating them with fuzzy method, areas with potential mineralization of nickel, chromium, cobalt, copper, lead, zinc and magnesite were identified.

Keywords: Mineral potential, Data composition, Principal component analysis, Alteration, Fuzzy logic.

An investigation on sedimentary facies and hydrochemistry characteristics of carbonate deposits in the Ab-e Ask region, Southeast of Damavand volcano

Rahmani Javanmard, S.¹, Ranjbaran, M.² and Amiri, V.³

1. Visiting Professor, Department of Geography, Institution of Higher Education, Aleshtar, Lorestan, Iran

2. Associate Professor, Department of Geology, Faculty of Sciences, University of Tehran, Tehran, Iran

3. Assistant Professor, Department of Geology, Faculty of Sciences, Yazd University, Yazd, Iran

Received: 20 December 2021

Accepted: 15 March 2022

Abstract

Calcareous springs of Ab-e Ask are located 85 km northeast of Tehran, in the southern range of the Damavand volcano. Microscopic studies represent the existence of four abiotic and two microbialite facies in the Ab-e Ask travertines. The travertines are the main deposit types of these springs. Based on sedimentation sequence and lithofacies these travertines are categorized as first type (vent and channel), second type (pound, dam, and cascade), and third type (laminated) travertines. On a $\delta^{18}\text{O}$ versus $\delta^{13}\text{C}$ plot (VPDB), these travertines are plotted in the oncooid and crystalline crust lithofacies fields. These facies show the character of hydrothermal spring and set the spring in the thermogenic group. Positive values of the Langelier Saturation Index (LSI) for Pashnak, Nadaali, and Zagh springs indicate that these water samples are supersaturated with respect to calcium carbonate, which leads to considerable sedimentation around the springs. In contrast, a negative LSI value at the Sare Pole spring indicates the water is undersaturated with respect to calcium carbonate. Therefore, this spring has a lesser role in travertine deposition compared to the other springs. Also, the position of the samples on the modified Gibbs and Van Wirdum diagrams, suggests that the interaction of water with carbonate and to some extent silicate rocks is considered as the most important source of Ca and Na.

Keywords: Ab-e Ask, Carbon and oxygen stable isotopes, Thermogene travertines, Sedimentary facies, Hydrochemistry.

Integration of airborne magnetic and satellite imagery data to identify potential zones of iron occurrences using the prediction-area plot in the Esfordi area

Ahmadi, F.¹, Aghajani, H.² and Abedi, M.³

1. Ph.D. Student, Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

2. Associate Professor, Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

3. School of Mining Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

Received: 16 May 2021

Accepted: 7 September 2021

Abstract

The use of different geospatial layers in the exploration and determination of the mineralization zones, will lead to more reliable results. In this study, the investigation of iron mineralization zones was done using airborne magnetic data and three types of satellite images (i.e. ASTER, Landsat-8 and Sentinel-2) in the Esfordi area. The reduced-to-pole filter, the upward continuation at altitudes of 200, 500 and 1000 meters, the analytic signal, the horizontal tilt angle, and the first vertical derivative were then employed on airborne magnetometry data. Argillic, phyllic and propylitic alterations, iron oxide and gossan zones and structural lineaments were extracted through satellite imagery data processing. The analytical signal and horizontal tilt angle indicators were used as the main geophysics footprints to identify the magmatic intrusions and geological lineaments, respectively. In addition, three satellite imagery indicators were used in final identification of iron-bearing zones. The weight of each layer was calculated by simultaneous analyses of the concentration-area fractal curve, the prediction-area plot, and the use of 22 Fe-bearing occurrences in the studied region. Note that the analytical signal layer with the prediction rate of 76 % has the highest weight among all layers. In other words, this layer has occupied 24% of the study area as favorable zones by which 76% of the known Fe occurrences are delineated. Iron ore potential map was prepared from integration of all geospatial indicators through the weighted multi-class index overlay method. The generated map has an intersection point with a prediction rate of 78% which has higher weight than the other individual indicators. According to this map, new iron mineralization potentials are observed in the east and southeast of the Esfordi area.

Keywords: Airborne magnetic, Esfordi, Iron mineralization, Sentinel-2, P-A plot.



Vol. 16, No. 62, Summer 2022

License Holder:

Research Institute of Applied Sciences (ACECR)

Editorial Director:

Dr. Khodaei, K., Assistant Professor - Research Institute of Applied Sciences

Editor in Chief:

Dr. Adabi, M.H., Professor - Shahid Beheshti University

Assistant Editor:

Dr. Nassery, H.R., Professor - Shahid Beheshti University

Editorial Board:

Dr. Adabi, M.H., Professor - Shahid Beheshti University

Dr. Nassery, H.R., Professor - Shahid Beheshti University

Dr. Rezaei, M.R., Professor - Curtin University of Australia

Dr. Raeisi, E., Professor - Shiraz University

Dr. Saeedi, A., Associate Professor - Geological Survey of Iran

Dr. Ghazban, F., Professor - Tehran University

Dr. Fatemi Aghda, S.M., Professor - Kharazmi University

Dr. Gharshi, M., Associate Professor - Geological Survey of Iran

Dr. Ghavidel, M., Professor of Institute of Petroleum Engineering - Tehran University

Dr. Moore, F., Professor - Shiraz University

Dr. Mousavi Harami, R., Professor - Ferdowsi University Mashhad

Dr. Mirzaei, S., Professor - Research Institute of Applied Sciences (ACECR)

Dr. Vossoughi Abedini, M., Associate Professor - Shahid Beheshti University

Dr. Kohandel, A., Associate Professor - Research Institute of Applied Sciences (ACECR)

Manager: Hatefi, R., Assistant Professor - Research Institute of Applied Sciences

Executive Director: Esmaili, E.

Editors: Dr. Nassery, H.R. and Faezi, N.

Designer: Ansari, A.

Published: Summer 2022

Print: Peydayesh Printing complex

Print address: No. 22, 16 Azar Avenue, Keshavariz Boulevard, Tehran, Iran

Office address: Shahid Beheshti University, Evin, Tehran, Iran, P.O.Box. 196151171

Tel: +98(21)29902594-22431933-4

E-mail: zaminshenasiiran@yahoo.com

Website Journal: Journal.rias.ac.ir

Website: www.rias.ac.ir

This Quarterly Review of Science-Research to Number 3/309 and History 16 April 2008 from the Ministry of Science, Research and Technology.

This journal is indexed in the following sites:

<http://www.isc.gov.ir>; <http://www.srlst.com>; <http://www.sid.ir>; <http://www.magiran.com>