مجله علوم و فنون هسته‌ای، جلد ۱۰۲، شماره ۴، زمستان ۱۴۰۱

Journal of Nuclear Science and Technology
Vol. 102, No. 1, 2023

تعیین تیپ کانه‌زایی توریم - عناصر نادر خاکی به روش مدل‌سازی شبکه‌ای در کمپلکس چاپدونی-پشت بادام، زون ساختاری ایران مرکزی

محمدباقر احمدخانی[۱و۳]، محمد یزدی[*۱]، مهرداد بهزادی[۱]، خالق خشنودی[۲]، بشیر شکوه سلجوقی[۳]

۱. گروه زمین‌شناسی منابع معدنی و آب، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، صندوق پستی: ۶۹۴۱۱-۱۹۸۳۹، تهران ـ ایران
۲. پژوهشکده چرخه سوخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۸۴۸۶-۱۱۳۶۵، تهران- ایران
۳. سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۱۴۳۹۹۵۵۹۳۳، تهران- ایران

*Email: m-yazdi@sbu.ac.ir

مقاله‌ی پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۴/۲۰ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۸/۲۶

چکیده

کمپلکس چاپدونی- پشت بادام در زون ساختاری ایران مرکزی و در شمال شرق استان یزد واقع شده است. این کمپلکس از مناطق با پتانسیل بالا برای کانی‌سازی توریم - عناصر نادر خاکی در ایران مرکزی به شمار می‌رود. در این پژوهش از روش مدل‌سازی شبکه‌ای برای تعیین تیپ و پتانسیل کانی‌سازی توریم - عناصر نادر خاکی در منطقه مورد مطالعه استفاده شده است. در این زمینه، روش‌های مختلفی مانند ژئوشیمی، ژئوفیزیک دورسنجی، زمین‌شناسی صحرایی و آزمایشگاهی به کار گرفته شده و معیارهای مختلفی برای امتیازدهی در نظر گرفته شده است. بعد از به کارگیری روش‌های فوق و با ایجاد پایگاه اطلاعاتی و ترکیب لایه‌های چندگانه، مدل کانی‌سازی یا تیپ‌های کانساری محتمل تعیین گردیده است. در این پژوهش برای تلفیق لایه‌های اطلاعاتی و مدل‌سازی آن‌ها برای تولید نقشه پتانسیل کانی‌سازی از روش شبکه‌ای استفاده شده است. نتایج به دست آمده برای انواع مدل‌های کانی‌سازی در قالب مدل‌سازی نهایی با هم ترکیب شد و نقشه جامع پتانسیل کانی‌سازی تهیه شد. بر مبنای بررسی‌ها صورت گرفته، تیپ‌های کانی‌سازی مرتبط با گرانیت، متاسوماتیسم و دگرگونی برای توریم - عناصر نادر خاکی در کمپلکس چاپدونی- پشت بادام تعیین گردید. پتانسیل کانی‌سازی توریم - عناصر نادر خاکی در مرکز و جنوب محدوده مورد مطالعه بیش‌تر از سایر نقاط است.

کلیدواژه‌ها: مدل‌سازی، توریم- عناصر نادر خاکی، کمپلکس چاپدونی- پشت بادام، زون ساختاری ایران مرکزی

Determination of Th-REE mineralization type using network modeling in Chapdoni-Posht-e-Badam complex, Central Iranian structural zone

M.B. Ahmad Khani[1,3], M. Yazdi*[1], M. Behzadi[1], Kh. Khoshnoodi[2], B. Shokouh Saljoghi[3]

1. Department of Geology of Minerals and Water Resources, Faculty of Earth Science, Shahid Beheshti University, P.O.Box: 19839-69411, Tehran - Iran
2. Nuclear Fuel Cycle Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, P.O.Box: 11365-8486, Tehran-Iran
3. AEOI, P.O.Box: 1439955933, Tehran-Iran

Research Article

Received 11.7.2021, Accepted 17.11.2021

Abstract

The Chapdoni-Posht-e-Badam complex is located in the Central Iranian structural zone and the northeast of Yazd province. This complex is one of the areas with high potential for thorium-rare earth elements mineralization in Central Iran. In this research, the network modeling method has been used to determine the type and potential of Th-REE mineralization in the study area. Different methods such as geochemistry, geophysics, remote sensing, field observations, and laboratory works have been used, and different criteria have been considered for scoring. After applying the mentioned methods, creating a database, and combining multiple layers, the mineralization model or possible deposit types have been determined. This research uses a network method to integrate different data layers and model them to produce a mineralization potential map. The results obtained for different types of mineralization models were combined in the form of final modeling, and a comprehensive map of mineralization potential was prepared. Finally, mineralization types related to granite, metasomatism, and metamorphism were determined for thorium and rare earth elements in the Chapdoni-Posht-e-Badam complex. The mineralization potential of thorium-rare earth elements in the center and south of the study area is more than in other places.

Keywords: Modeling, Thorium-rare earth elements, Chapedoni-Posht-e-Badam complex, Central Iranian structural zone

۱. مقدمه

پتانسیل‌یابی و تعیین تیپ کانی‌سازی در اکتشاف مواد معدنی به‌خصوص در مرحله مقدماتی را می‌توان گامی بسیار مهم و مؤثر در نظر گرفت. افراد و یا گروه‌های متخصص آشنا به پتانسیل‌یابی روش‌های مختلفی را برای اکتشاف ذخایر معدنی در زمان مطلوب و با صرف هزینه بهینه و برنامه‌ریزی هدفمند و جامع برای شناسایی، ارزیابی و اولویت‌بندی مناطق اکتشافی به کار می‌گیرند. مرحله اکتشاف مقدماتی برای پروژه‌های بزرگ معمولاً این گونه است که اکتشاف بر روی منطقه‌ای وسیع صورت می‌گیرد و با پیشرفت مراحل چندگانه اکتشافی به محدوده‌های کوچک‌تری می‌رسند. این فرایندها اغلب بر اساس اطلاعات زمین‌شناسی، ژئوفیزیک، ژئوشیمی و دورسنجی صورت می‌گیرد. اکتشافات معدنی مستلزم در نظر گرفتن هم‌زمان مجموعه اطلاعات بی‌شماری از داده‌های علوم زمین است که بر اساس مدل‌های کانی‌سازی مورد انتظار، شرایط تشکیل و فلززایی آن‌ها تحلیل می‌شوند [۱]. با پیشرفت سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) و قابلیت بالای آن در ایجاد پایگاه اطلاعاتی و ترکیب لایه‌های چندگانه، مدل‌سازی و تهیه نقشه‌های پیش‌بینی مواد معدنی به طور گسترده برای انواع تیپ‌های کانی‌سازی صورت می‌گیرد. روش‌های اولیه برای مدل‌سازی پتانسیل معدنی در فاصله سال‌های ۱۹۷۲-۱۹۶۵ توسط زمین‌شناسانی با دانش ریاضی از قبیل هریس، سینکلر و وودسوورتث، آگتربرگ و سینگر و دیگران پایه‌ریزی شد [۱]. روش‌های اولیه بر اساس مدل‌سازی داده محور بر اساس همبستگی بین کانسارهای شناخته شده و رخدادهای زمین‌شناسی در مناطق شناخته شده بود که برای تعیین پتانسیل بخش‌های اکتشاف نشده ناحیه یا کم‌تر اکتشاف شده به کار می‌رفت. در سال ۱۹۷۸، دودا و همکاران سیستم کارشناسی دانش‌محور را برای ارزیابی پتانسیل معدنی در مؤسسه تحقیقاتی استنفورد توسعه دادند [۲]. روش‌های دانش محور و داده محور ذکر شده اساس روش‌های مدل‌سازی و توسعه و پیشرفت‌های بعدی روش‌ها شدند. انتخاب روش‌های تلفیق اطلاعات اکتشافی برای تهیه نقشه پتانسیل معدنی به سطح اکتشافات قبلی در ناحیه مورد مطالعه بستگی دارد. علاوه بر این برای اکتشافات مواد معدنی از روش‌های بررسی‌های صحرایی (برداشت‌های لیتولوژی، کانی‌سازی، دگرسانی و ساختاری) و مطالعات فنی (آزمایشگاهی، پردازش داده‌ها و تهیه نقشه و گزارش‌ها) استفاده می‌شود. در واقع مطالعات صحرایی و مطالعات فنی معیارهایی از اکتشاف محسوب می‌شوند که مکمل یک‌دیگر هستند. در این پژوهش برای مطالعه پتانسیل‌یابی و تعیین تیپ‌های محتمل کانه‌زایی توریم - عناصر نادر خاکی (REE) در کمپلکس چاپدونی- پشت بادام از تلفیقی از روش‌های فوق استفاده شده است که نتایج به دست آمده از اعتماد و اعتبار بالاتری برخوردار است.

به منظور شناسایی تیپ‌های کانساری، طراحی مدل‌هایی که بتوان از این طریق انواع تیپ‌های کانی‌سازی را با دقت بالا پیش‌بینی کرد در برنامه اهداف پژوهش قرار گرفت. این کار به چند منظور انجام گرفت؛

الف) تسریع و تسهیل در دست‌یابی به اهداف مطالعات تحقیقی- پژوهشی با توجه به وسعت زیاد منطقه (۱۰۰۰ کیلومتر مربع) و صرفه‌جویی در زمان

ب) شناسایی و پتانسیل‌یابی اولیه از منطقه مورد مطالعه

ج) تهیه نقشه‌های تیپ‌های محتمل کانه‌زایی

د) معرفی مناطق دارای اولویت مطالعه و اکتشاف

ه) پیش‌بینی کانی‌سازی و یا غنی‌شدگی انواع عناصر به خصوص کانه‌زایی توریم و عناصر نادر خاکی(REE) و احتمال همراهی این عناصر با تیپ‌های کانی‌سازی تعیین شده.

خوشبختانه در سال‌های اخیر در زمینه عناصر نادر خاکی و توریوم در منطقه، در قالب طرح اکتشافی و یا پژوهشی مطالعاتی صورت گرفته است که منجر به شناسایی و معرفی تعدادی مناطق با پتانسیل بالا گردیده است. در ادامه به برخی از این فعالیت‌ها و مطالعات مهم در منطقه مورد مطالعه (چاپدونی- پشت‌بادام و در مقیاس ناحیه‌ای) پرداخته می‌شود که عبارتند از:

- "مطالعات دفتری- صحرایی جهت شناسایی محدوده‌های امید بخش کانی‌سازی عناصر نادر خاکی در استان یزد" [۳].
- "کانی‌سازی آهن- آپاتیت- عناصر نادر خاکی در منطقه بافق- پشت‌بادام با نگرشی ویژه بر کانسار گزستان" [۴].
- "ارتباط دگر نهادی قلیایی و کانی‌سازی عناصر (Ti, U, Th, REE) در منطقه معدنی ساغند" [۵].
- "مطالعه گرانیت‌های ائوسن نوع S در کمپلکس دگرگونی حلقوی چاپدونی" [۶].
- "پترولوژی آمفیبولیت‌های افیولیت پشت‌بادام و کمپلکس چاپدونی" [۷].
- "بررسی همبستگی فضایی عناصر پرتوزا با ترکیبات آهن و سیلیس به کمک پردازش تصاویر ماهواره‌ای و داده‌های ژئوشیمیایی در منطقه کلوت چاپدونی" [۸].
- "پترولوژی سنگ‌های آتشفشانی ائوسن مناطق سازند و چاپدونی" [۹].
- مطالعه متالوژنی عناصر نادر خاکی" [۱۰].

- "مطالعه کاربرد ژئوشیمی عناصر نادر خاکی" [۱۱].
- "اجرای عملیات اکتشافی فاز شناسایی تکمیلی در منطقه چاپدونی" [۱۲].
- "کانی‌شناسی، ژئوشیمی و ژنز عناصر نادر خاکی در کمپلکس چاپدونی- پشت بادام، ایران مرکزی" [۱۳].
- "مدل‌سازی و تعیین تیپ کانسارهای عناصر نادر خاکی در کمپلکس چاپدونی-پشت بادام" [۱۴].

اغلب فعالیت‌های صورت گرفته در منطقه، مباحثی در زمینه‌های مختلف پترولوژی بوده که در قالب مطالعات پژوهشی دانشگاهی است. در زمینه عناصر نادر خاکی و توریوم اغلب مطالعات پیشین، ناحیه‌ای است. در سال‌های اخیر سازمان انرژی اتمی ایران اکتشافات عناصر پرتوزا در منطقه را تحت پوشش قرار داده است. تحقیق و پژوهش حاضر، به صورت متمرکز بر روی کمپلکس چاپدونی- پشت بادام با محوریت توریوم- عناصر نادر خاکی است که با روش‌های ذکر شده زون‌ها و مناطق دارای پتانسیل را شناسایی و معرفی کرده است.

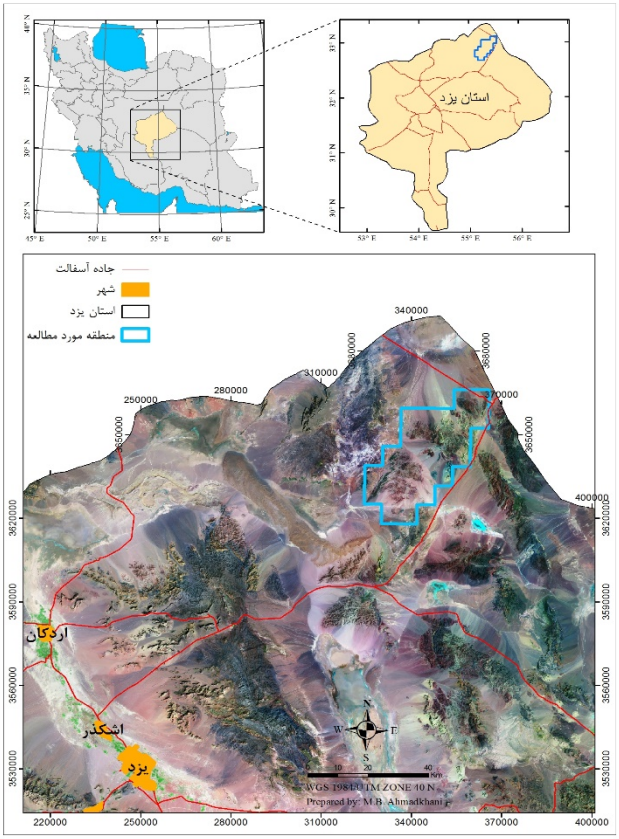
۲. زمین‌شناسی عمومی منطقه

منطقه مورد بررسی (چاپدونی- پشت بادام) در شمال شرق استان یزد و در فاصله ۱۴۰ کیلومتری از مرکز استان و ۱۶۰ کیلومتری از شهر طبس قرار گرفته است.

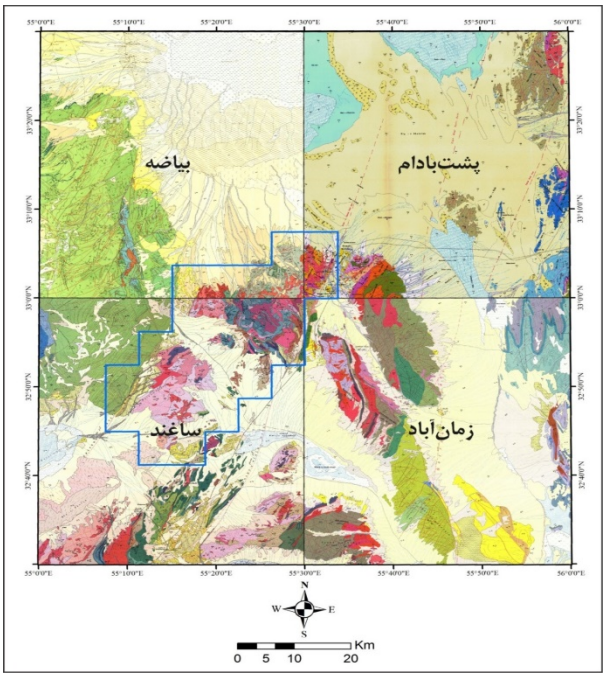
شکل ۱ راه‌های ارتباطی و موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

محدوده مورد مطالعه بخشی از برگه‌های زمین‌شناسی ۱:۱۰۰،۰۰۰ ساغند، بیاضه و پشت‌بادام است که بخش عمده‌ای از محدوده در برگه ساغند واقع شده است (شکل ۲) و از نظر جایگاه زمین‌شناسی در زون ساختاری خرد قاره ایران مرکزی قرار دارد (شکل ۳). واحدهای سنگی منطقه شامل سنگ‌های دگرگونی، آذرین و رسوبی است. بر اساس نقشه‌های مذکور بیش‌تر رخنمون‌های سنگی موجود در منطقه را مجموعه دگرگون شده چاپدونی و پشت‌بادام به سن پرکامبرین تشکیل می‌دهند که شامل گنایس، میگماتیت، آمفیبولیت، میکاشیست و سنگ‌های آتشفشانی به همراه مرمر است که در رخساره شیست سبز تا آمفیبولیت دگرگون شده‌اند.

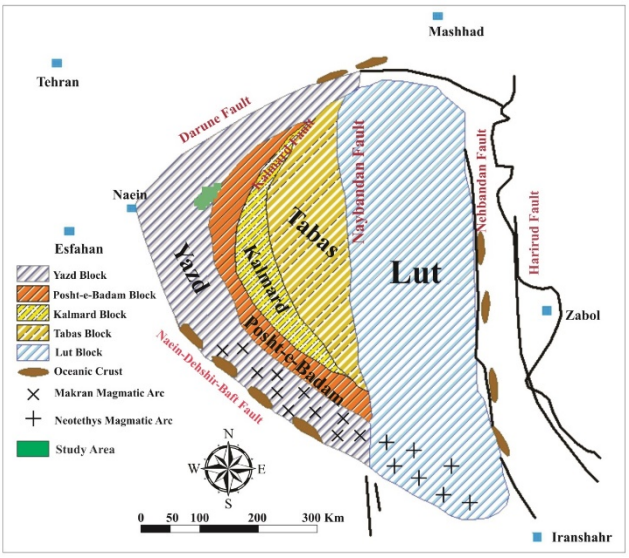
واحدهای سنگی به سن کرتاسه در این ناحیه شامل واحدهای رسوبی شامل کنگلومرا، ماسه‌سنگ، شیل و آهک است. در داخل این سنگ‌ها توده‌های نفوذی متعددی مشاهده می‌شود که شامل توده‌های دیوریتی، کوارتزدیوریتی- گرانودیوریتی و گرانیتی است [۱۵].



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی و نقشه راه‌های دسترسی به منطقه مورد مطالعه.



شکل ۲. موقعیت محدوده مورد مطالعه بر روی ورقه‌های ۱:۱۰۰۰۰۰ ساغند، پشت‌بادام، بیاضه و زمان آباد [۱۵، ۱۷، ۱۸، ۱۹].



شکل ۳. موقعیت محدوده مورد مطالعه در زون خرد قاره ایران مرکزی (آقانباتی، ۱۳۸۵) [۱۶].

۳. روش انجام پژوهش

در این پژوهش از داده‌های دورسنجی (مطالعات دگرسانی)، زمین‌شناسی (سنگ‌شناسی، ساختاری، دگرسانی و کانی‌سازی)، ژئوشیمی، ژئوفیزیک (رادیومتری زمینی و هوابرد و مغناطیس‌سنجی) به همراه نتایج مطالعات آزمایشگاهی استفاده شده است. بعد از گردآوری داده‌های لازم و پردازش آن‌ها، لایه‌های اطلاعاتی موجود در نرم‌افزار GIS امتیازدهی شده و مراحل مدل‌سازی صورت می‌گیرد. در این پژوهش برای تعیین عیار توریم و عناصر نادر خاکی از روش آنالیز ICP-MS (آزمایشگاه شرکت زر آزما) و برای مطالعات کانی‌شناسی از روش پراش اشعه مجهول (XRD) استفاده گردید و مطالعه مقاطع نازک با استفاده از میکروسکوپ پلاریزان (آزمایشگاه سازمان انرژی اتمی ایران) انجام شد.

۴. بحث و نتایج

۱.۴ انواع مدل‌سازی

پیشرفت‌های اخیر در زمینه مدل‌های اکتشافی و سیستم‌های تصمیم‌گیری، توانایی کمی‌سازی اطلاعات نقشه‌ها را مهیا ساخته است [۲۰]. بر اساس نحوه توزیع کانسارها و اطلاعات چندگانه زمین‌شناسی، ژئوفیزیک، ژئوشیمی و دورسنجی، پیش‌بینی منابع معدنی نه تنها برای مختصر نمودن تکوین زمین‌شناسی و نظریه‌های متالوژنی ناحیه، بلکه برای اثبات مدل‌های اکتشاف ناحیه‌ای انجام می‌شود [۲۱]. در منطقه مورد مطالعه تاکنون داده‌های چشمگیری در ارتباط با کانه‌زایی توریم - عناصر نادر خاکی که بتواند پایه بررسی‌های آماری تلفیق داده قرار گیرد تولید نشده است و از این‌رو تولید و تلفیق داده در این منطقه می‌تواند صورت گیرد. با این وجود استفاده از برخی موارد مشابه تلفیق داده در سایر نقاط ایران می‌تواند کارساز باشد و در صورتی که روش بررسی در دسترس باشد می‌تواند راهنمایی برای تلفیق داده‌ها باشد.

پس از جمع‌آوری اطلاعات، یکپارچه‌سازی و پردازش داده‌ها، لایه‌های اطلاعاتی باید تلفیق شوند. برای این منظور لازم است با توجه به مدل مفهومی تشکیل کانسارهای مورد انتظار، کیفیت اطلاعات موجود (صحت و درستی داده‌ها)، مقیاس کاری و شرایط زمین‌شناسی کانسارهای شناخته شده منطقه، لایه‌های اطلاعاتی مورد نظر به عنوان معیارهای مؤثر در شناسایی کانی‌سازی انتخاب شود. هر لایه اطلاعاتی با توجه به نوع مدل تعریف شده برای کانی‌سازی خاص، دارای اهمیت و اعتباری ویژه‌ای است که در محاسبات کمی مربوط به پتانسیل‌یابی کانی‌سازی، وزن معیار نامیده می‌شود. چهار روش اصلی برای وزن‌دهی معیارها وجود دارند [۲، ۲۲، ۲۳] که عبارتند از:

- روش‌های دانش محور: در مدل‌های دانش محور، یک یا گروهی کارشناس اهمیت و وزن اطلاعات را تعیین می‌کنند [۲۴].
- روش‌های داده محور: در مدل‌های داده محور، وزن لایه‌ها و اطلاعات با استفاده از خود کانسارها و رخدادهای شناخته شده منطقه مورد مطالعه تعیین می‌شوند [۲۴].
- روش‌های ترکیبی: شامل استفاده ترکیبی از دو روش هم‌زمان در فرایند مدل‌سازی است که از آن جمله می‌توان به روش‌های وزن‌های نشان‌گر فازی [۲۵]، شبکه عصبی [۲۴] و شاخص هم‌پوشانی داده محور [۲۲] اشاره کرد.
- روش‌های لجستیک پایه: در روش‌های لجستیک پایه نه تنها از نظر مستقیم کارشناسی در تخصیص وزن استفاده نمی‌گردد، بلکه حتی از موقعیت فضایی اندیس‌های شناخته شده نیز استفاده نمی‌شود.

مدل‌سازی تیپ‌های کانساری یا کانی‌سازی شامل ۳ مرحله می‌شود [۲۶]:

- مدل‌سازی مفهومی ذخایر کانی‌زایی هدف و شناسایی نقشه‌های شاهد ورودی
- پردازش پایگاه داده اکتشافی مناسب در محیط GIS برای استخراج نقشه‌های شاهد مناسب
- تلفیق نقشه‌های پیش‌بینی با استفاده از مدل‌های ریاضی، داخل یا بیرون از GIS

در این پژوهش برای تلفیق لایه‌های اطلاعاتی و مدل‌سازی آن‌ها برای تولید نقشه و تعیین تیپ‌های محتمل کانساری و تعیین مناطق دارای پتانسیل از روش شبکه‌ای استفاده شده است. بر اساس مدل زایشی تیپ‌های کانه‌زایی توریم- عناصر نادر خاکی مورد انتظار در منطقه، مدل ژنتیکی و معیارهای اکتشافی تیپ‌های مورد انتظار، شناسایی شدند و به روش دانش محور و با نظر کارشناسی، امتیازدهی صورت گرفت.

۲.۴ مدل‌سازی شبکه‌ای

روش شبکه‌ای یک روش مدل‌سازی دانش محور است. لایه‌ها به صورت برداری وارد محیط GIS شده و با توجه به شعاع تأثیر تعریف شده احتمالی برای هر لایه، امتیاز لایه مربوطه به آن اختصاص می‌یابد. ابتدا لایه‌ها با توجه به شعاع تأثیر تعریف شده تولید و وزن‌دار می‌گردند. سپس نقشه‌های شاهد مربوطه تولید شده و با استفاده از هم‌پوشانی ساده تلفیق می‌شوند. مزیت اصلی این روش سادگی و قابل فهم بودن مدل است که موجب می‌شود کارشناسان مختلف بتوانند به صورت کاربردی از آن استفاده نمایند. مزیت دیگر روش پرهیز از پیچیدگی و دخالت محاسبات آماری در فرایندهای زمین‌شناسی است.

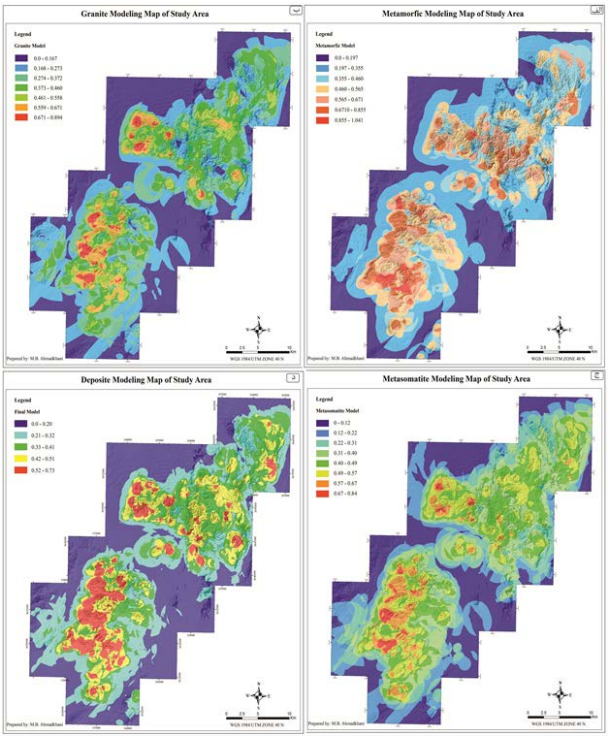
برای تعیین تیپ‌های کانی‌سازی و محدوده‌های دارای پتانسیل بالا و اولویت‌دار برای پیمایش بهینه و مؤثر در منطقه، اولین اقدام، جمع‌آوری داده‌ها و شکل‌دهی لایه‌های اطلاعاتی مربوط به منطقه بوده است. داده‌هایی که تاکنون جمع‌آوری و استفاده شده است شامل داده‌های ژئوفیزیکی، ژئوشیمیایی، زمین‌شناسی، دورسنجی، زمین‌ساختی، توپوگرافی و داده‌های در ارتباط با اندیس‌های کانی‌سازی است. بعد از پردازش و تفسیر تمامی لایه‌های پوششی منطقه مورد مطالعه و تأیید این لایه‌ها در قالب پایگاه اطلاعاتی ذخیره شده و آماده استفاده به عنوان لایه‌های ورودی مدل‌سازی گردیده است. لایه‌های موجود بر اساس تیپ‌های کانساری مورد نظر، مدل مفهومی و ژنتیکی آن تیپ، حجم و مقیاس کار انتخاب شده است. ابتدا با توجه به تعریف مدل مفهومی تیپ‌های کانساری توریم- عناصر نادر خاکی مورد انتظار در منطقه، معیارهای لازم تعیین و روش مدل‌سازی انتخاب می‌گردد. تعیین معیارها بر اساس حجم و مقیاس کار است.

۳.۴ تعیین معیارها و امتیازدهی

اولین عامل که شاید مهم‌ترین و مؤثرترین فاکتور به‌عنوان شاهد بر رخداد کانه‌زایی در منطقه چاپدونی- پشت بادام مطرح می‌باشد، بررسی‌های زمین‌شناسی بوده است. تمامی احتمالات کانی‌سازی توریم- عناصر نادر خاکی بر پایه مطالعات زمین‌شناسی منطقه و تجزیه و تحلیل داده‌های استخراج شده و هم‌چنین بر اساس تقسیم‌بندی‌های کانساری صورت گرفته است. جمع‌بندی که در نهایت صورت گرفته است از این قرار است که احتمال رخداد کانی‌سازی توریم- عناصر نادر خاکی با تیپ‌های؛ ۱) مرتبط با گرانیت، ۲) گرانیت- گنایس متاسوماتیتی شده، ۳) سنگ‌های دگرگونی (گنایس- شیست)، وجود دارد و از ارزش مطالعاتی و اکتشافی برخوردار است. لذا طبق اصول مدل‌سازی، تعیین معیارهای مناسب قابل استفاده و امتیازدهی، مهم‌ترین فعالیت‌های این مرحله هستند. با استفاده از مدل مفهومی تعریف شده برای تیپ‌های مورد انتظار منطقه مورد مطالعه و مقایسه با کارهای انجام شده قبلی جدول معیارها و امتیازدهی آن‌ها تعیین شد تا نسبت به معرفی محدوده‌های پتانسیل‌دار به روش شبکه‌ای اقدام شود.

۴.۴ تلفیق لایه‌ها و مدل‌سازی

در روش شبکه‌ای، پس از تهیه نقشه‌های شاهد، این نقشه‌ها برای به دست آوردن مناطق اولویت‌دار اولیه تلفیق می‌گردند. با توجه به عدم پوشش کامل داده‌های ژئوشیمی برای کل منطقه، فرایند تلفیق دو بار صورت گرفته است. اول برای مناطق دارای پوشش اطلاعات ژئوشیمی و با در نظر گرفتن نقشه‌های شاهد ژئوشیمیایی و دوم برای مناطق فاقد پوشش اطلاعات ژئوشیمیایی و بدون لحاظ نمودن نقشه‌های ژئوشیمیایی، تلفیق صورت گرفته و نتایج در کنار هم نشان داده شده است. سپس با توجه به حداکثر امتیاز ممکن کسب شده که از جداول معیارها و وزن‌دهی به دست می‌آید، مقادیر دو منطقه دارای پوشش و فاقد پوشش ژئوشیمی استاندارد شدند تا قابل قیاس با هم گردند. به این ترتیب که امتیازات کسب شده بر حداکثر امتیاز ممکن تقسیم می‌گردد و بازه‌ای از صفر تا یک به پلی‌گون‌های تلفیق شده در کل منطقه داده می‌شود و نتیجه آن نقشه پتانسیل کانی‌سازی کل ناحیه برای تیپ‌های کانساری مورد انتظار است (شکل ۴).



شکل ۴. الف، ب، ج) به ترتیب شامل نقشه مدل‌سازی پتانسیل کانی‌سازی تیپ دگرگونی، گرانیتی، متاسوماتیت و د) نقشه مدل‌سازی نهایی مناطق پتانسیل‌دار به روش شبکه‌ای برای کانی‌سازی توریم- عناصر نادر خاکی را نشان می‌دهد.

۵.۴ ترکیب نهایی مدل‌سازی‌ها

بعد از تهیه نقشه‌های تلفیق، هدف نهایی به دست آوردن نقشه جامع مدل‌سازی برای منطقه بوده است. به این ترتیب که ابتدا نقشه‌های تلفیق برای انواع تیپ‌های کانساری محتمل به صورت جداگانه تهیه شد و مناطق مستعد برای آن تیپ کانساری مشخص گردید و به این صورت دیدی نظری از پتانسیل تیپ کانساری احتمالی در منطقه به دست آمد. در نهایت نیاز به نقشه جامع از پتانسیل کانی‌سازی برای تمام تیپ‌های کانساری وجود دارد که نشان‌دهنده مناطق اولویت‌دار کانی‌سازی برای انجام عملیات اکتشافی باشد. به این منظور نتایج تلفیق به دست آمده برای انواع مدل‌های کانساری در قالب مدل‌سازی نهایی با هم ترکیب شده و نقشه جامع به دست آمده است. در این مدل نهایی محدوده‌هایی که در نرمال‌سازی هر تیپ مقادیر با ارزش ۰٫۵ به بالا کسب کردند در ترکیب نهایی مدل‌سازی مورد استفاده قرار گرفته‌اند (شکل ۴، د). در نقشه تلفیق نهایی مناطق دارای پتانسیل برای کانی‌سازی توریم- عناصر نادر خاکی بر اساس اولویت مشخص گردیده است (شکل ۴، د). در مراحل بعدی اکتشاف با در نظر گرفتن سایر معیارهای لازم به همراه نقشه جامع تلفیق می‌تواند کمک شایانی در شناسایی هر چه بهتر و پی‌جویی‌های مؤثر از منطقه داشته باشد.

۶.۴ کنترل مناطق اولویت‌بندی نقشه‌های مدل‌سازی

به طور کلی برای اکتشافات مواد معدنی دو روش اساسی در پیش گرفته می‌شود. یکی از این روش‌ها، مطالعات صحرایی و برداشت‌های زمین‌شناسی مورد نیاز در منطقه مورد مطالعه و دیگری مطالعات و فعالیت‌های فنی و آزمایشگاهی است که به دنبال فعالیت‌های صورت گرفته از برداشت‌های صحرایی انجام می‌پذیرد. صحت و درستی و قابل اعتماد بودن نتایج به دست آمده از مطالعات فنی (آزمایشگاهی، پردازش داده‌ها و تهیه نقشه و گزارش‌ها)، با صحت و درستی و قابل اعتماد بودن نتایج به دست آمده از مطالعات صحرایی (برداشت‌های لیتولوژی، کانی‌سازی، دگرسانی، رادیومتری و ساختاری)، ارتباط تنگاتنگی وجود دارد. در واقع مطالعات صحرایی و مطالعات فنی مکمل یک‌دیگر هستند.

در منطقه مورد مطالعه (کمپلکس چاپدونی- پشت بادام) که به لحاظ دارا بودن پتانسیل بالای حضور توریم- عناصر نادر خاکی مورد توجه واقع شده، فعالیت‌های پژوهشی و اکتشافی شروع به کار گردیده و عملیات اجرایی و برنامه‌های کاربردی در این محدوده مطابق با قوانین و اصول اکتشافات معدنی پیش رفته است [۱۲]. در وهله اول، در فاز شناسایی، فعالیت‌هایی از قبیل گردآوری اطلاعات و بررسی مطالعات پیشین از منطقه، بررسی نقشه‌های زمین‌شناسی ۱:۱۰۰،۰۰۰ منطقه، تهیه انواع تصاویر ماهواره‌ای، تهیه انواع نقشه‌های دورسنجی (ساختاری، دگرسانی، نقشه‌های ژئوفیزیکی هوابرد منطقه)، تهیه و تفسیر و پردازش داده‌های تجزیه شده منطقه شامل اطلاعات مربوط به تجزیه با دستگاه‌هایی مثل ICP-MS و مطالعات میکروسکوپی و ماکروسکوپی نمونه‌های سنگی و کانی‌شناسی منطقه صورت گرفته است. همگام با انجام این فعالیت‌ها در این مرحله (فاز شناسایی)، اقدام به مطالعه و برداشت‌های زمین‌شناسی صحرایی (ساختاری (بررسی گسل‌ها)، نمونه‌برداری، دگرسانی (آرژیلیک، سیلیسی، پروپلیتیک و پدیده متاسوماتیتی شدن)، واحدهای سنگ‌شناسی) گردیده است که نتایج آن در قالب نقشه‌ها (نقشه مدل‌سازی و نقشه انواع تیپ‌های محتمل کانی‌سازی) ارایه شده است.

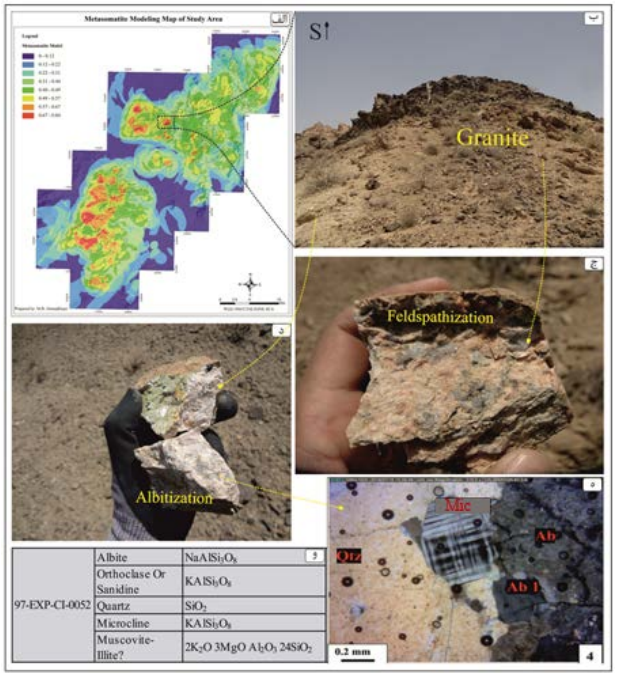
در ادامه به بررسی نتایج به دست آمده از مطالعات فنی پرداخته شده و برخی مناطق دارای اولویت تعیین شده با روش‌های مدل‌سازی، با بازدیدهای صحرایی کنترل گردیده تا صحت، درستی و قابل اعتماد بودن نقشه‌های مدل‌سازی مورد

ارزیابی قرار گیرد. در این زمینه به سه مدل از تیپ‌های کانی‌سازی متاسوماتیت، گرانیتی و دگرگونی طی بازدید صحرایی مورد ارزیابی قرار گرفته به تصویر کشیده شده است (شکل‌های ۵، ۶ و ۷).

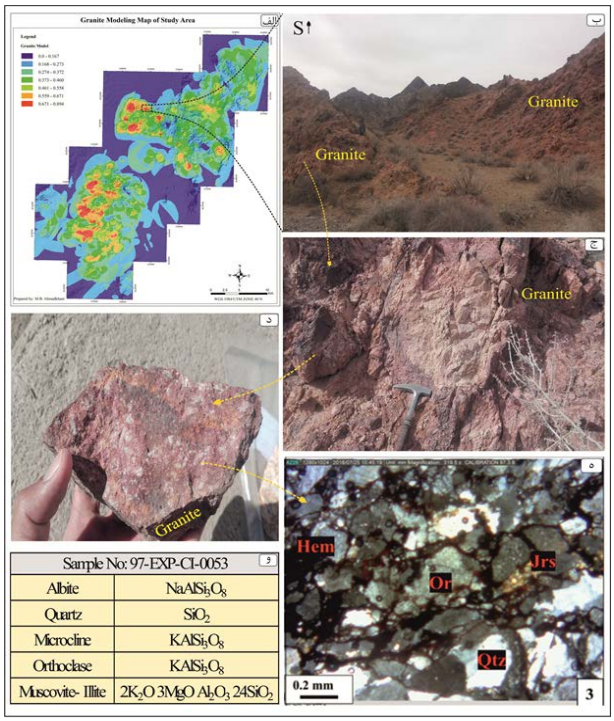
نتایج اولیه کنترل مناطق پتانسیل‌دار نقشه‌های مدل‌سازی و مطالعات مقدماتی زمین‌شناسی حاکی از آن است که مناطق تعیین شده دارای اولویت بالا غنی شدگی عناصر هدف (REE و Th) را نشان می‌دهد و این غنی شدگی با نقشه‌های مدل‌های کانی‌سازی هم‌خوانی دارد. در شکل‌های ۵، ۶ و ۷ کنترل صحرایی و زمین‌شناسی نقشه‌های مدل‌سازی بررسی و نتایج آن به تصویر کشیده شده است. در جدول ۱ نتایج برخی از نمونه‌های تجزیه شده ارایه شده است.

جدول ۱. نتایج تجزیه ICP-MS تعدادی از نمونه‌های منطقه مورد مطالعه (نتایج تجزیه بر حسب PPM است)

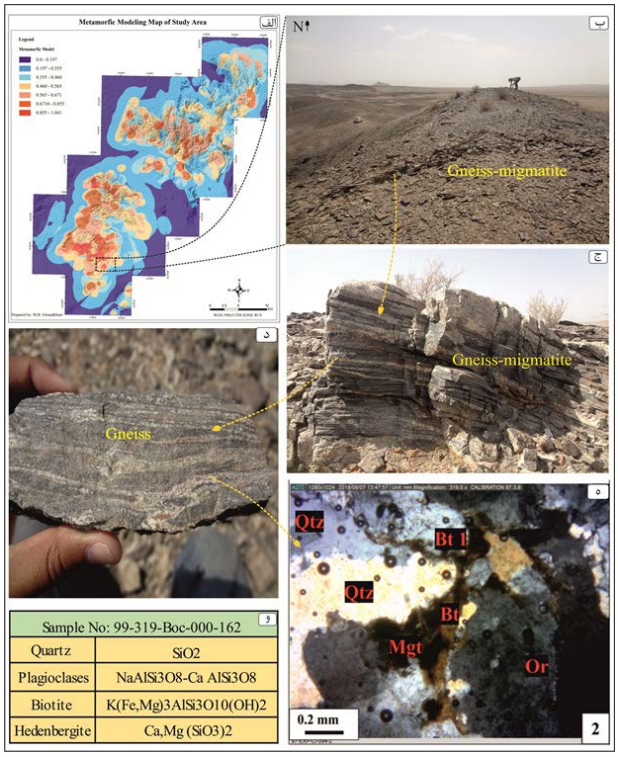
سنگ‌شناسی	Th	Total REE	Yb	Y	Tm	Tb	Sm	Sc	Pr	Nd	Lu	La	Gd	Eu	Er	Dy	Ce	شماره نمونه
گرانیت	۸۰۹٫۰۶	۹۶۸۴٫۲	۱۱٫۶	۸۳٫۸	۱٫۷۵	۹٫۵۹	۲۹۷٫۴۱	۱۶٫۸	۵۳۷٫۱۴	۱۷۵۹٫۱	۱٫۶۹	۲۳۹۵	۱۲۷٫۷۱	۵٫۴۷	۱۴٫۹۳	۴۱٫۲۴	۴۳۸۱	96-EXP-CI-۰۲۱
گرانیت- گنیس	۱۲۹۶٫۱	۷۳۴۰٫۸	۱۶	۳۳۶٫۹	۳٫۳۹	۲۱٫۵۱	۲۶۰٫۷۶	۵٫۳	۳۴۶٫۳۳	۱۳۰۴٫۵	۲٫۴۱	۱۵۵۴	۱۹۷٫۳۴	۴٫۹۸	۳۴٫۲۳	۱۰۴٫۱۵	۳۱۴۹	99-۳۱۹-BOC-۰۰۰-۰۲۲۵
گرانیت	۱۲۸۸٫۵	۵۸۲۳٫۹	۹٫۵	۹۶٫۶	۱٫۸۵	۵٫۳۶	۶۹٫۶۲	۱۵٫۲	۲۵۴٫۲۴	۶۷۵	۱٫۴۷	۱۹۳۱	۶۴٫۰۸	۱۰٫۷۸	۱۴٫۷۲	۳۰٫۴۸	۲۶۴۴	97-EXP-CI-۰۶۷
متاسوماتیک گنیس	۶۷۹٫۵۵	۴۴۰۲٫۱	۳٫۲	۳۷	۰٫۵۲	۲٫۲۴	۳۷٫۳۷	۳	۱۷۳٫۰۷	۴۲۹٫۹	۰٫۵۱	۱۵۲۶	۳۱٫۲۲	۸٫۳۶	۴٫۰۳	۱۰٫۶۳	۲۱۲۵	96-EXP-CI-۰۱۶
گنیس	۷۳۵٫۳۷	۴۳۶۰٫۸	۴۸٫۸	۵۹۲٫۷	۸٫۲۴	۱۶٫۹۷	۱۳۳٫۰۹	۸٫۷	۱۶۵٫۳۲	۵۸۷٫۴	۷٫۳۶	۸۴۸	۱۱۲٫۳	۱٫۶۹	۵۹٫۵۳	۱۱۲٫۷۱	۱۶۵۸	99-۳۱۹-BOC-۰۰۰-۰۲۲۳
گرانیت- گنیس	۴۲۱٫۰۱	۴۱۰۸٫۴	۱۳٫۲	۱۸۷٫۵	۲٫۲۳	۷٫۴۶	۸۵٫۱۹	۴۰٫۶	۱۷۷٫۳۴	۵۶۴٫۵	۱٫۸۷	۱۰۲۱	۷۰٫۶۹	۱٫۲۶	۱۸٫۲۶	۴۱٫۲۶	۱۸۷۶	96-EXP-CI-۰۱۳
گرانیت	۸۲٫۱۹	۴۰۷۶٫۶	۲۷٫۴	۲۳۹٫۹	۴٫۴۴	۱۷٫۸۷	۱۸۸٫۸۹	۲۰٫۷	۱۹۳٫۶۹	۷۰۰٫۹	۳٫۴۱	۷۰۱	۱۳۱٫۵۲	۶٫۸۲	۳۷٫۱۳	۹۹٫۹۷	۱۷۰۳	96-EXP-CI-۰۲۲
متاسوماتیک گنیس	۳۲۵٫۶	۳۲۵۶٫۸	۷٫۵	۱۳۱٫۱	۱٫۵۴	۸٫۳۷	۸۸٫۲۵	۱۴٫۲	۱۱۶٫۷۳	۴۲۰٫۴	۱٫۰۴	۴۷۴	۸۴٫۷۷	۲٫۳۷	۱۴٫۷۹	۴۳٫۷۲	۹۴۸	97-EXP-CI-۰۸۸
متاسوماتیک گرانیت	۴۲۱٫۸۹	۳۲۵۲٫۳	۱۵٫۸	۲۲۱٫۲	۳٫۲	۹٫۳۵	۶۹٫۵۱	۶۶	۱۰۲٫۶۷	۳۲۴٫۷	۲٫۳۳	۴۵۸	۷۵٫۳۱	۱٫۲۶	۲۷٫۲۲	۶۰٫۱۷	۸۷۵	97-EXP-CI-۰۶۴
شیست میگماتیت	۱۳۷۲٫۹	۲۲۲۰٫۵	۱۲۷٫۲	۱۳۶۱٫۲	۲۱٫۱	۱۷٫۵۷	۲۳٫۴۵	۲۲٫۵	۱۳٫۱۳	۵۵٫۴	۱۶٫۹۵	۵۴	۵۴٫۱	۶٫۷۳	۱۴۰٫۷	۱۸۳٫۴۸	۱۲۳	99-۳۱۹-BOC-۰۰۰-۰۱۶۱
میگماتیت	۱۱۱۴٫۱	۲۰۴۸٫۸	۱۰۲٫۳	۱۲۷۱٫۴	۱۸٫۹۷	۱۹٫۸۸	۲۵٫۷۹	۱۸٫۶	۹٫۷۲	۴۳٫۴	۱۳٫۷۲	۴۲	۶۴٫۶۵	۹٫۴	۱۲۸٫۰۴	۱۹۰٫۹۵	۹۰	99-۳۱۹-BOC-۰۰۰-۰۱۶۸
متاسوماتیک گرانیت	۴۲٫۴۹	۱۸۸۴٫۲	۱۰٫۲	۸۸٫۷	۱٫۶۹	۵٫۸۲	۶۹٫۳۳	۱۸٫۵	۹۳٫۴۳	۳۳۴٫۵	۱٫۳۶	۳۶۴	۴۵٫۹۶	۴٫۱۶	۱۳٫۰۵	۳۲٫۵۹	۸۱۱	96-EXP-CI-۰۱۹
گرانیت	۱۸۴٫۶۴	۱۸۰۵٫۹	۶٫۷	۹۳٫۲	۱٫۲۳	۳٫۶۷	۳۹٫۵۲	۳۶٫۸	۷۷٫۲۸	۲۵۰٫۶	۰٫۹۴	۴۴۹	۳۳٫۲۲	۰٫۹۳	۹٫۵۵	۲۱٫۳	۷۸۲	96-EXP-CI-۰۱۱
میگماتیت	۱۹۳۳٫۴	۱۷۲۷٫۷	۹۶٫۶	۱۰۰۲٫۳	۱۷	۱۴٫۹۶	۲۵٫۶۴	۱۷٫۷	۱۵٫۱۸	۶۲	۱۳٫۱۳	۶۴	۵۰٫۸۴	۹٫۴۸	۱۰۷٫۰۳	۱۴۶٫۷۹	۱۳۰	99-۳۱۹-BOC-۰۰۰-۰۱۶۷
میگماتیت	۱۶۹۵٫۴	۱۷۶۹٫۳	۳۵٫۵	۵۶۳٫۸	۷٫۳	۱۴٫۲۴	۹۴٫۹۵	۱۲٫۲	۴۳٫۸	۲۰۱	۴٫۷۶	۱۷۲	۸۲٫۲۸	۱۴٫۰۲	۵۶٫۴۵	۱۰۸٫۰۳	۳۵۹	99-۳۱۹-BOC-۰۰۰-۰۱۷۱
گنیس	۳۷۰٫۲۸	۱۵۲۶٫۳	۳٫۱	۷۷٫۷	۰٫۷۷	۵٫۵۷	۵۹٫۶۵	۱٫۵	۷۵٫۴	۲۷۵٫۴	۰٫۴۹	۳۲۲	۶۰٫۸۵	۱٫۹۱	۸٫۲۸	۲۷٫۶۶	۶۰۶	97-EXP-CI-۰۸۷
میگماتیت	۹۵۸۱٫۸	۱۰۸۸٫۴	۳۴٫۶	۳۹۵٫۶	۶٫۱۹	۹٫۵۵	۳۹٫۰۹	۳۴٫۸	۲۴٫۳۵	۱۰۴٫۷	۵٫۰۱	۹۲	۴۵٫۳۲	۹٫۱	۴۱٫۴۶	۷۱٫۶۲	۱۷۵	99-۳۱۹-BOC-۰۰۰-۰۱۶۹
گرانیت	۳۳۶٫۲۱	۱۰۶۹٫۴	۳٫۳	۱۸٫۴	۰٫۵۲	۱٫۲	۱۹٫۵۳	۱۰٫۴	۵۲٫۰۴	۱۳۹٫۶	۰٫۶	۲۶۳	۱۱٫۳۶	۰٫۷۱	۳٫۰۹	۶٫۶۴	۵۲۹	96-EXP-CI-۰۱۴
گرانیت	۲۲۹٫۶۲	۱۰۱۶٫۶	۶٫۴	۴۰٫۳	۰٫۹۷	۱٫۴	۱۷٫۳۱	۲۱٫۱	۴۶٫۴۱	۱۱۹٫۳	۰٫۹۴	۲۳۸	۱۰٫۸۱	۱٫۲۲	۶٫۱۲	۹٫۲۹	۴۹۷	96-EXP-CI-۰۲۰
گرانیت- گنیس	۷٫۲	۹۱۶٫۹	۳۰٫۹	۳۴۵٫۹	۴٫۷۱	۸٫۲	۳۹٫۹۴	۲۷	۳۰٫۸۸	۱۰۶٫۶	۴٫۲۱	۴۴	۴۹٫۳۸	۱۱٫۵۳	۳۳٫۷۷	۵۷٫۹۲	۱۳۲	96-EXP-CI-۰۲۴
میگماتیت- شیست	۱۸۲۸٫۹	۷۴۴٫۷	۲۶	۲۸۵٫۶	۴٫۲۵	۵٫۷۱	۱۹٫۲	۱۹٫۴	۱۴٫۱۸	۵۴٫۹	۳٫۴۲	۷۲	۲۶٫۶۵	۵٫۰۴	۲۸٫۴۵	۴۶٫۹۲	۱۳۳	99-۳۱۹-BOC-۰۰۰-۰۱۶۰
متاسوماتیک گرانیت-گنیس	۲۳۳۵٫۲	۷۱۳٫۹	۱۲٫۴	۱۸۰	۳٫۲۵	۳٫۹۹	۲۸٫۴۹	۱۵٫۴	۲۱٫۴	۸۷٫۶	۱٫۸۹	۸۲	۲۷٫۰۸	۵٫۲۵	۲۲٫۶۳	۴۰٫۵	۱۸۲	98-۳۱۹-BOC-۰۰۰-۰۰۹۲
گرانیت-گنیس	۱۸۳٫۶۴	۶۹۰٫۰	۱٫۲	۱۶٫۵	۰٫۲۶	۰٫۸۱	۱۰٫۲۷	۴٫۶	۲۹٫۸۶	۸۶٫۷	۰٫۲۱	۲۰۸	۸٫۷۱	۱٫۴۳	۲٫۱۲	۴٫۳۳	۳۱۵	97-EXP-CI-۰۹۰
متاسوماتیک گرانیت-گنیس	۲۴٫۳۴	۵۹۳٫۹	۱٫۲	۱۵٫۹	۰٫۳	۰٫۹۳	۱۲٫۴۲	۶٫۲	۳۱٫۶۹	۹۸٫۲	۰٫۲	۱۷۵	۹٫۰۴	۱٫۸۷	۲٫۱۹	۴٫۷۶	۲۳۴	98-۳۱۹-BOC-۰۰۰-۰۱۰۷



شکل ۵. الف) نقشه مدل‌سازی کانی‌سازی تیپ متاسوماتیت، ب، ج و د) تصاویری از توده گرانیتی متاسوماتیتی شده در منطقه، ه) تصویری از آلبیتی شدن سنگ میزبان در مقطع میکروسکوپی (آلبیت=Ab، کوارتز=Qtz، میکروکلین=Mic)، و) نتایج تجزیه XRD از سنگ میزبان متاسوماتیتی شده.



شکل ۶. الف) نقشه مدل‌سازی کانی‌سازی مرتبط با گرانیت‌ها، ب، ج و د) تصاویری از توده گرانیتی دگرسان شده در منطقه، ه) تصویری از سنگ میزبان در مقطع میکروسکوپی (اورتوز=Or، هماتیت=Hem، کوارتز=Qtz، جاروسیت=Jrs)، و) نتایج تجزیه XRD از سنگ میزبان گرانیتی.



شکل ۷. الف) نقشه مدل‌سازی کانی‌سازی مرتبط با دگرگونی‌ها، ب، ج و د) تصاویری از سنگ میزبان دگرگونی گنیس- میگماتیت در منطقه، ه) تصویری از سنگ میزبان در مقطع میکروسکوپی (اورتوز=Or، بیوتیت=Bt، کوارتز=Qtz، مگنتیت=Mag)، و) نتایج تجزیه XRD از سنگ میزبان دگرگونی.

۵. نتیجه‌گیری

در این پژوهش برای تلفیق لایه‌های اطلاعاتی و مدل‌سازی آن‌ها برای تولید نقشه پتانسیل و تعیین تیپ‌های محتمل کانی‌سازی از روش شبکه‌ای استفاده شده است. نتایج تلفیق به دست آمده برای انواع مدل‌های کانساری در قالب مدل‌سازی نهایی با هم ترکیب شده و نقشه جامع پتانسیل کانی‌سازی به دست آمده است. در نقشه تلفیق نهایی مناطق دارای پتانسیل برای کانی‌سازی یا غنی شدگی توریم- عناصر نادر خاکی بر اساس اولویت مشخص گردید. بر مبنای مطالعات صورت گرفته، تیپ‌های کانی‌سازی مرتبط با گرانیت، گرانیت- گنایس متاسوماتیت شده و سنگهای دگرگونی (گنایس- شیست) برای عناصر نادر خاکی و توریم در کمپلکس چاپدونی- پشت بادام به‌ویژه در مرکز و جنوب غرب منطقه مورد مطالعه محرز بوده و از ارزش مطالعاتی و اکتشافی بالایی برخوردار است. بعد از تعیین تیپ و پتانسیل‌یابی شبکه‌ای، برخی مناطق دارای اولویت تعیین شده با روش‌های مدل‌سازی، با بازدیدهای صحرایی و زمین‌شناسی کنترل گردید تا صحت، درستی و قابل اعتماد بودن نقشه‌های مدل‌سازی مورد ارزیابی قرار گیرد. در این زمینه نتایج بررسی‌ها نشان داد که میزان توریم براساس نتایج آنالیز شیمیایی بین ۷٫۲ تا ۹۵۸۱٫۷ پی پی ام و عناصر نادر خاکی از ۵۹۳٫۹ تا ۹۶۸۴٫۲ پی پی ام است و غنی شدگی این عناصر در منطقه را نشان می‌دهد و با مناطق پتانسیل‌دار نقشه‌های مدل‌سازی تیپ‌های کانساری تعیین شده هم‌خوانی دارد.

تشکر و قدردانی

این پژوهش با حمایت سازمان انرژی اتمی ایران انجام شده است. نویسندگان این مقاله از مدیران و کارشناسان این سازمان به دلیل حمایت‌های بی‌دریغ فنی و مالی‌شان سپاسگزاری می‌نمایند.

مراجع

1. C. Moon, M. Whateley, A. Evans, *Introduction to Mineral Exploration*, Blackwell, Oxford, 498 (2000).
2. K. Pazand, A. Hezarkhani, *The use of the weights-of-evidence modeling technique to predictive porphyry Cu potential mapping in Ahar–Arasbaran zone*, Iran (2013).
3. Geological Survey of Iran and the Ministry of Industry, *Mines and Trade, Exploration of rare earth elements (REEs) in Iran (second phase)*, Technical and field studies to identify promising areas of mineralization of rare earth elements in Yazd province, 926 (2015).
4. H. Jamali, *Iron-apatite-rare earth mineralization in Bafgh-Posht-Badam region with a special focus on Gazestan deposit, the first specialized seminar on rare earth elements*, Geological Survey of Iran (2011).
5. S. Deymar, M. Behzadi, M. Yazdi, M.R. Rezvanianzadeh, *Alternative institutional interaction and mineralization of elements (Ti, U, Th, REE) in Saghand mine area*, Central Iran, Journal of Economic Geology (2018).
6. Z. Zakipour, Gh. Torabi, *Study of Eocene type S granites in the Chapdoni ring metamorphic complex* (northeast of Yazd province, Central Iran) (2015).
7. Z. Mokhtari, Q. Torabi, *Petrology of Almond ophiolites and Chapdoni complex* (northeast of Yazd province), Master Thesis, University of Isfahan (2012).
8. Sh. Ansari, Y. Ghanbari, *Investigation of spatial correlation of radioactive elements with iron and silica compounds by processing satellite images and geochemical data in Kalout Chapdoni region*, (2011).
9. Z. Qarachahi, Q. Torabi, *Petrology of Eocene volcanic rocks in the Formation and Chapdoni regions* (Yazd province), Master Thesis, University of Isfahan (2010).

10. M.A. Mokhtari, *Posht-e-Badam metallogenic block (Central Iran):A suitable zone for REE mineralization*, Central European Geology, **58/3**, 199-216 (2015), DOI: 10.1556/24.58.2015.3.1.
11. M.A. Mokhtari, Gh. Hossein Zadeh, M. Emami, *Genesis of iron-apatite ores in Posht-e-Badam Block (Central Iran) using REE geochemistry*, Indian Academy of Sciences, J, Earth Syst, Sci, **122(3)**, 795-807 (2013).
12. Atomic Energy Organization of Iran, *Carrying out exploration operations of supplementary reconnaissance phase in Chapdoni area*, (2018).
13. M.B. Ahmad Khani, *Mineralogy, geochemistry and genesis of rare earth element in Chapedoni-Poshtbadam complex*, Central Iran, PHD Thesis, Shahid Beheshti University of Tehran (2018).
14. M.B. Ahmad Khani, M. Behzadi, M. Yazdi, K. Khoshnoudi, B.S. Saljoghoui, *Modeling and determining the type of rare earth element deposits in Chapdoni-Posht Badam complex*, *the 12 conference of the Iranian Economic Geological Society* (2020).
15. A.R. Babakhani, J. Majidi, *Geological map of iran*, Saghand 1:100000 Series (1999).
16. S.A. Aghanabati, *Geology of Iran*, Tehran, Geological Survey of Iran (2006).
17. M.H. Nabavi, A. Hoshmandzadeh, *Geological map of iran*, Bayazeh 1:100000 Series (2000).
18. A. Haghipor, *Geological map of iran*, Posht-e-badam 1:100000 Series (1977).
19. A.R. Babakhani, A. Porlatifi, *Geological map of iran*, Zaman Abad 1:100000 Series (1999).
20. M.H. Tangestani, F. Moore, *The use of Dempster–Shafer model and GIS in integration of geoscientific data for porphyry copper potential mapping, north of Shahr-e- Babak*, Iran. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, **4**, 65–74 (2002).
21. W. Gongwen, C. Jianping, *Mineral Resource Prediction and Assessment of Copper Multi-mineral Deposit Based on GIS Technology in the North of Sanjiang Region*, China. Earth Science Frontiers, **15**, 27–32 (2008).
22. M. Yousefi, E.J.M. Carranza, *Data-Driven Index Overlay and Boolean Logic Mineral Prospectivity Modeling in Greenfields Exploration*, Natural Resources Research, (2014). DOI: 10.1007/s11053-014-9261-9.
23. M. Yousefi, E.J.M. Carranza, *Fuzzification of continuous-value spatial evidence for mineral prospectivity mapping*, Computers & Geosciences, **74**, 97-109 (2015).
24. A. Porwal, E. Carranza, M. Hale, *A hybrid neuro-fuzzy model for mineral potential mapping*, Math Geol, **36(7)**, 803–826 (2004).
25. Q.M. Cheng, Z.J. Chen, A. Khaled, *Application of fuzzy weights of evidence method in mineral resource assessment for gold in Zhenyuan district*, Yunnan Province, China. Earth Sci J China Univ Geosci, **32(2)**,175–184 (2007).
26. A. Porwal, E.J.M. Carranza, *Introduction to the Special Issue: GIS-based mineral potential modelling and geological data analyses for mineral exploration*, Ore Geology Reviews, **71**, 477-483 (2015).

COPYRIGHTS
©2021 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers.

استناد به این مقاله
محمدباقر احمدخانی، محمد یزدی، مهرداد بهزادی، خالق خشنودی، بشیر شکوه سلجوقی (۱۴۰۱)، تعیین تیپ کانه‌زایی توریم - عناصر نادر خاکی به روش مدل‌سازی شبکه‌ای در کمپلکس چاپدونی-پشت بادام، زون ساختاری ایران مرکزی، ۱۰۲، ۱۳۲-۱۴۰

DOI: 10.24200/nst.2022.1476 **Url**: https://jonsat.nstri.ir/article_1503.html