



University of Tehran Press

Journal of Environmental Studies

Vol. 49, No. 3, Autumn 2023

Journal Homepage: www.Jes.ut.ac.ir

Print ISSN: 1025-8620 Online ISSN 2345-6922

Geochemistry of Rare Earth Elements, Applications and Environmental Challenges: Intrusive Mass of Songun Copper Mine as a Case Study, Varzaqan, North-West of Iran

Ali Shahi¹, Gholamreza Ghadami², Mohammad Poosti³, Mohammad Fadaeian⁴

1. Department of Geology, Faculty of Science, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran, Email: shahi.phd@hormozgan.ac.ir

2. Department of Geology, Faculty of Science, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran, Email: ghadami@hormozgan.ac.ir

3. Department of Geology, Faculty of Science, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran, Email: m.poosti@hormozgan.ac.ir

4. Department of Geology, Faculty of Science, Payame Noor University, Tehran, Iran, Email: m_fadaeian@pnu.ac.ir

Article Info

Research Article:
Research Paper

Article history:

Received 4 May 2023

Received in revised form

8 September 2023

Accepted 21 September 2023

Publish online 27 September 2023

Keywords:

Cluster analysis diagram, Environmental pollution, Rare earth elements, Songun copper mine, Technological applications.

ABSTRACT

Rare Earth Elements (REEs) include a wide range of technological applications due to their unique catalytic, magnetic, and optical properties. The environmental pollution of REEs has increased significantly as a result of their widespread use. Gadolinite, xenotime, samarskite, euxenite, fergusonite, itrotantalite, itrotungstite, and itrialite are minerals that mainly contain yttrium and HREEs. Bastnasite, monazite, allanite, lumarite, ansilite, parasite, lanthanite, schwinnite, cerite, stylolite, britolite, fluosite, and cerianite are minerals that mainly contain LREE. However, commercial mines around the world mainly extract bastnasite, monazite, and xenotime. This research aims to evaluate the concentration of rare earth elements in the Songun copper mine and their economic and environmental potential. For this purpose, microscopic studies and chemical analyses were performed on the collected samples. Apatite, zircon, carbonate minerals, clay minerals, rutile, sphene, sericite, saursorite, opaque minerals, epidote, limonite, and mullite are among the minerals that have the potential to host rare earth elements in the intrusive mass of Songun copper mine. The average amount of cerium (79 ppm), europium (1.41 ppm), lanthanum (38 ppm), neodymium (29 ppm), and praseodymium (8.47 ppm) in the intrusive mass rocks of Songun copper mine have increased compared to the average amount of crustal rocks. Also, the average amount of dysprosium (2.05 ppm), erbium (1.01 ppm), gadolinium (3.28 ppm), scandium (5.7 ppm), samarium (3.87 ppm), terbium (0.4 ppm), yttrium (7.3 ppm), and ytterbium (0.6 ppm) have decreased compared to Clark's value. REEs include the following important groups based on the cluster analysis diagram: yttrium, ytterbium, erbium, scandium, and terbium; gadolinium, samarium, and dysprosium; neodymium and praseodymium; cerium and lanthanum.

Cite this article: Shahi, A., Ghadami, Gh. R., Poosti, M., Fadaeian, M. (2023). Geochemistry of Rare Earth Elements, Applications and Environmental Challenges: Intrusive Mass of Songun Copper Mine as a Case Study, Varzaqan, North-West of Iran. *Journal of Environmental Studies*, 49 (3), 297- 320.

DOI: <http://doi.org/10.22059/JES.2023.357318.1008397>



© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <http://doi.org/10.22059/JES.2023.357318.1008397>

Extended Summary**Introduction**

Rare earth elements are generally divided into light rare earth elements (LREEs) and heavy rare earth elements (HREEs). HREEs are much less abundant and therefore much more valuable. The proportions of these groups are not distinct, but generally, lanthanum to gadolinium is called LREEs, while terbium to lutetium are called HREEs. Rare earth elements include a huge set of technological applications due to their unique catalytic, magnetic, and optical properties. The consumption of rare earth elements is vital for clean energy applications and for the successful transformation of traditional industrial economies into modern green economies. Recently, the environmental pollution of rare earth elements has increased dramatically due to the wide application of these elements as microelement fertilizers in agricultural production and industry. Songun porphyry copper mine is a part of the Alpine-Himalayan orogenic-metallogenic belt, which extends from the east of Serbia, Bulgaria, Turkey, and Iran to Afghanistan and Pakistan, and corresponds to the porphyry copper belt of the world.

Materials and Methods

Library studies, field observations, and random sampling were carried out from the area and extraction stairs of mine. 40 samples were taken. The rock composition of most samples was granodiorite. Quartz, monzonite, and granite were present in limited quantities among the samples. The studied samples have undergone potassic, sericite, siliceous, clay, and propylitic alterations. Thin and polished sections were prepared at "Grona" company in Tehran, and they were studied in the university laboratory with polarized light microscopes. The appropriately prepared samples were chemically analyzed in the "Zarazma" company laboratory. Using software such as SPSS for processing, statistical interpretation, and analysis of geochemical data, drawing the necessary graphs, and many univariate and multivariate calculations on the database, including linear correlation, cluster analysis, and factor analysis, were among the actions of the next steps based on which the research results were obtained.

Discussion

REE minerals include: gadolinite, xenotime, samarskite, euxenite, fergusonite, itrotantalite, itrotangsite, itrialite, bastnasite, monazite, allanite, luparite, ansilite, lanthanite, schwinite, cerite, stylolite, britolite, fluesite, serianite, fluorapatite, odialite, parisite, sinkisite, kainosite, mosandrite, branrite, talnite and aimorite. However, commercial mines are mainly bastnasite, monazite, and xenotime.

Radioactivity is a common feature of REE mineralization due to the presence of thorium-uranium-containing minerals in alkaline complexes and carbonatites.

Apatite, zircon, carbonate minerals, clay minerals, rutile, sphene, sericite, saursorite, opaque minerals, epidote, limonite, and mullite are among the minerals that have the potential to host rare earth elements in the intrusive mass of Songun copper mine.

The average amount of cerium (79 ppm), europium (1.41 ppm), lanthanum (38 ppm), neodymium (29 ppm), and praseodymium (8.47 ppm) in the intrusive mass rocks of the Songun copper mine have increased compared to the average amount of crustal rocks. Also, the average amount of dysprosium (2.05 ppm), erbium (1.01 ppm), gadolinium (3.28 ppm), scandium (5.7 ppm), samarium (3.87 ppm), terbium (0.4 ppm), yttrium (7.3 ppm), and ytterbium (0.6 ppm) have decreased compared to Clark's value.

The average total amount of rare earth elements is 13.85 ppm. If we consider the total definite reserve of the Songun copper mine to be 1 billion tons, the potential reserve of rare earth elements in the Songun copper mine is 13,850 tons.

The elements lanthanum, cerium, praseodymium, neodymium, europium, and gadolinium, as well as the elements terbium, dysprosium, yttrium, erbium, scandium, samarium, and ytterbium, have a positive correlation coefficient with each other. Rare earth elements include the following two general clusters in the cluster diagram: The first cluster: yttrium, ytterbium, erbium, scandium, terbium, gadolinium, samarium, and dysprosium, which often have common geochemical characteristics. The second cluster is composed of neodymium, praseodymium, cerium, lanthanum, and europium, in which geochemical features close to each other have put them together.

Conclusions

Rare earth elements include a huge set of technological applications due to their unique catalytic, magnetic, and optical properties. Recently, the environmental pollution of rare earth elements has increased dramatically due to the wide application of these elements as microelement fertilizers in agricultural production and industry. Apatite, zircon, carbonate minerals, clay minerals, rutile, sphene, sericite, saursorite, opaque minerals, epidote, limonite, and mullite are among the minerals that have the potential to host rare earth elements in the intrusive mass of Songun copper mine. The average amount of cerium, europium, lanthanum, neodymium, and praseodymium elements in the intrusive mass rocks of the Songun copper mine is increased compared to the average amount of crustal rocks. Also, the average amount of

dysprosium, erbium, gadolinium, scandium, samarium, terbium, yttrium, and ytterbium elements are reduced compared to Clark's value. REEs include the following important groups based on the cluster analysis diagram: Yttrium, Ytterbium, Erbium, Scandium, and Terbium; Gadolinium, Samarium, and Dysprosium; Neodymium and Praseodymium; Cerium and Lanthanum.



ژئوشیمی عناصر نادر خاکی، کاربردها و چالش‌های زیست‌محیطی مطالعه موردی: توده نفوذی معدن مس سونگون، ورزقان، شمال غرب ایران

علی شاهی^۱، غلامرضا قدمی^۲✉، محمد پوستی^۳، محمد فدائیان^۴

۱. گروه زمین‌شناسی، دانشکده‌ی علوم، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران، رایانامه: shahi.phd@hormozgan.ac.ir

۲. گروه زمین‌شناسی، دانشکده‌ی علوم، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران، رایانامه: ghadami@hormozgan.ac.ir

۳. گروه زمین‌شناسی، دانشکده‌ی علوم، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران، رایانامه: m.poosti@hormozgan.ac.ir

۴. گروه زمین‌شناسی، دانشکده‌ی علوم، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران، رایانامه: m_fadaeyan@pnu.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	عناصر نادر خاکی به دلیل خواص منحصر به فرد کاتالیزور، مغناطیسی و نوری آن‌ها مجموعه عظیمی از کاربردهای تکنولوژیکی را شامل می‌شوند. آلودگی زیست‌محیطی REEها در نتیجه کاربرد وسیع آن‌ها به‌طور چشم‌گیری افزایش یافته است. کانی‌های عمدتاً حاوی ایتربیم و HREEها عبارتند از: گادولینیت، زئوتیم، سامارسکیت، یوکسنیت، فرگوسونیت، ایتروتانتالیت، ایتروتانگستیت، ایتربالیت. کانی‌هایی که عمدتاً حاوی LREE هستند عبارتند از: باستانزیت، موناژیت، آلانیت، لوپاریت، آنسیلیت، پاراسیت، لاتتانیت، شوینیت، سریت، استیلولیت، بریتولیت، فلوسریت و سریانیت. با این حال، معادن تجاری در سرتاسر جهان عمدتاً باستانزیت، موناژیت و زینوتیم استخراج می‌کنند. ارزیابی غلظت عناصر خاکی نادر در معدن مس سونگون و پتانسیل بالقوه اقتصادی و زیست‌محیطی آنها، هدف از این پژوهش می‌باشد که برای این منظور، مطالعات میکروسکوپی و آنالیزهای شیمیایی بر روی نمونه‌های برداشت شده انجام شد. بعضی از کانی‌هایی که در توده نفوذی معدن مس سونگون، پتانسیل میزبانی عناصر خاکی نادر را دارند عبارتند از: آپاتیت، زیرکن، کانی‌های کربناتی، کانی‌های رسی، روتیل، اسفن، سربیت، سوسوریت، کانی‌های اپاک، اپیدوت، لیمونیت و مولیت. مقدار میانگین عناصر سربیم (79 ppm)، یورپیم (1.41 ppm)، لاتتانیم (38 ppm)، نئودیمیم (29 ppm) و پرازئودیمیم (8.47 ppm) در سنگ‌های توده نفوذی معدن مس سونگون نسبت به مقدار متوسط سنگ‌های پوسته، افزودگی دارند. هم‌چنین مقدار میانگین عناصر دیسپروزیم (2.05 ppm)، اربیم (1.01 ppm)، گادولینیم (3.28 ppm)، اسکاندیم (5.7 ppm)، ساماریم (3.87 ppm)، تربیم (0.4 ppm)، ایتربیم (7.3 ppm) و ایتربیم (0.6 ppm)، نسبت به مقدار کلارک، کاهش‌دهی دارند. REEها براساس نمودار آنالیز خوشه‌ای، گروه‌های مهم زیر را شامل می‌شوند: ایتربیم، ایتربیم، اربیم، اسکاندیم و تربیم. - گادولینیم، ساماریم و دیسپروزیم. - نئودیمیم و پرازئودیمیم. - سربیم و لاتتانیم.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۲/۱۲	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۶/۱۷	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۶/۳۰	
تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۰۷/۰۵	
کلیدواژه‌ها: آلودگی زیست‌محیطی، عناصر نادر خاکی، کاربردهای تکنولوژیکی، معدن مس سونگون، نمودار آنالیز خوشه‌ای.	

استناد: شاهی، علی؛ قدمی، غلامرضا؛ پوستی، محمد؛ فدائیان، محمد. (۱۴۰۲). ژئوشیمی عناصر نادر خاکی، کاربردها و چالش‌های زیست‌محیطی: مطالعه موردی توده نفوذی معدن مس سونگون، ورزقان، شمال غرب ایران. نشریه محیط‌شناسی، (۳)۴۹، ۳۲۰-۳۲۷.

DOI: <http://doi.org/10.22059/JES.2023.357318.1008397>

DOR: 20.1001.1.10258620.1402.49.3.3.7



مقدمه

عناصر نادر خاکی به‌طور کلی به عناصر خاکی کم‌یاب سبک^۱ (LREEs) و عناصر خاکی کم‌یاب سنگین^۲ (HREEs) تقسیم می‌شوند. نسبت‌های این گروه‌ها متمایز نیست، اما به‌طور کلی لاتانیم تا گادولینیم LREEs نامیده می‌شوند در حالی که تربیم تا لوتیتم HREEs نامیده می‌شوند (Charalampides et al., 2016). طبق گفته وزارت انرژی آمریکا، گروه REE‌های حیاتی شامل پنج عنصر نئودیمیم، یورپیم، تربیم، دیسپروزیوم و ایتربیم است (USDOE, 2011).

کاهش در شعاع یونی در سراسر لاتانیدها با افزایش بار یونی به عنوان «انقباض لاتانید» نامیده می‌شود. انقباض لاتانید بسیاری از ویژگی‌های مشاهده شده برای شیمی REE را کنترل می‌کند. کاهش سیستماتیک در شعاع یونی در سراسر گروه لاتانید دارای دو پیامد مهم است: الف) به میزان بالایی بر شکنش REE‌ها تاثیر می‌گذارد که امکان جداسازی فردی آن‌ها را در محیط‌های زمین‌شناسی و در فرآوری سنگ معدن فراهم می‌کند. ب) خواص شیمیایی و فیزیکی غیرمعمول و مفیدی مانند خواص مغناطیسی و یا نوری منحصر به فرد را به REE‌ها می‌دهد (USDOE, 2011).

عناصر نادر خاکی به‌دلیل خواص منحصر به فرد کاتالیزور، مغناطیسی و نوری آن‌ها مجموعه عظیمی از کاربردهای تکنولوژیکی را شامل می‌شوند و به‌طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرند. به‌عنوان مثال، تمام تلفن‌های همراه و لپ‌تاپ‌ها حاوی عناصر نادر خاکی‌اند. همان‌طور که کشورهای توسعه‌یافته در حال مدرن شدن و گذار به اقتصاد سبز هستند، مصرف عناصر کم‌یاب خاکی برای کاربردهای انرژی پاک به پدیده‌ای روزافزون تبدیل می‌شود و برای تبدیل موفقیت‌آمیز اقتصادهای صنعتی سنتی به اقتصادهای به‌روز سبز حیاتی هستند. چنین فناوری‌های انرژی پاک و مدرن تا جایی بر جوامع امروزی حاکم است که کارشناسان استفاده از عناصر کمیاب خاکی را شاخص اقتصادی قابل توجهی در نظر می‌گیرند (Castor & Hedrick, 2006).

ایزوتوپ‌های رادیواکتیو REE نیمه‌عمر طولانی دارند. این باعث می‌شود که برخی از آن‌ها با محصولات پایدارشان برای مطالعات ژئوشیمیایی و پترولوژیکی، به‌ویژه ^{138}La - ^{138}Ce ، ^{147}Sm - ^{143}Nd و ^{176}Lu - ^{176}Hf بسیار مناسب باشند. آن‌ها به‌طور گسترده در تاریخ‌نگاری سنگ‌ها به‌ویژه سنگ‌های باستانی و دگرگونی‌های درجه بالا استفاده می‌شوند. آن‌ها هم‌چنین در بررسی مشکلاتی مانند اختلاط اقیانوس‌ها، اختلاط ماگما یا آلودگی گوشته زمین توسط سنگ‌های پوسته استفاده می‌شوند (Klaus et al., 2017).

به‌دلیل وجود کانی‌های حاوی توریم-اورانیم در کمپلکس‌های قلیایی و کربناتیت‌ها، رادیواکتیویته یک ویژگی مشترک کانی‌سازی REE است. محتویات توریم و اورانیم موجود در مواد معدنی و ضایعات معدنی یکی از بزرگ‌ترین چالش‌های زیست‌محیطی است که باید در طول استخراج، فرآوری سنگ معدن و بسته‌شدن معدن مدیریت شود. ژئوشیمی توریم و اورانیم بر تعامل آن‌ها با محیط و اثرات زیست‌محیطی ناشی از آن تاثیر می‌گذارد. توریم در اکثر شرایط بسیار نامحلول است. در شرایط اکسیدکننده، اورانیم بسیار محلول است. بنابراین، مسیرهای آبی منتهی به آب‌های سطحی یا زیرزمینی موضوعات اولویت برنامه‌ریزی معدن هستند (Schluep et al., 2009).

اخیراً آلودگی زیست‌محیطی عناصر کم‌یاب خاکی (REE) در نتیجه کاربرد وسیع این عناصر در تولیدات کشاورزی به‌عنوان کودهای ریزعنصر و هم‌چنین در صنعت به‌طور چشم‌گیری افزایش یافته است. بنابراین، چرخه بیوژئوشیمیایی عناصر REE و اثرات اکولوژیکی و زیست‌محیطی آن‌ها به‌شدت مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته است. هوازگی سنگ، یک منبع مهم REE برای یک سیستم اکولوژیکی و یک فرآیند کلیدی در چرخه بیوژئوشیمیایی جهانی REE است (Zhaoliang et al., 2006).

افزایش قیمت‌های REE و هم‌چنین سایر فلزات قابل بازیافت، همراه با آگاهی از مقادیر موجود در دورریختنی‌ها و افزایش تقاضا در سراسر جهان، به مفهوم urban mining «معدن شهری» منجر شده است. استخراج معادن شهری به‌عنوان بازبازی عناصر و ترکیبات از مواد و محصولات زاید و دورریز تعریف می‌شود. لوازم الکترونیکی مصرفی به‌طور فزاینده‌ای مشمول شیوه‌های استخراج معادن شهری می‌شوند و مقدار در دسترس این‌ها برای «معدن شهری» یا بازیافت، روزبه‌روز در حال افزایش است (ICF, 2011).

¹ Light Rare Earth Elements

² Heavy Rare Earth Elements

هدف از این تحقیق، مطالعه مقدار عناصر خاکی نادر در معدن مس سونگون و پتانسیل بالقوه اقتصادی و زیست‌محیطی آنهاست.

جدول ۱. خلاصه‌ای از آلاینده‌ها، تاثیرات زیست‌محیطی، منابع انتشار و فعالیت‌های مرتبط با استخراج، فرآوری و بازیافت عناصر نادر خاکی (Schluep et al., 2009)

فعالیت	منابع انتشار	آلاینده‌های اولیه قابل توجه
معدن کاری (روش‌های روباز و زیرزمینی)	روباره سنگ باطله ذخیره نیمه‌معدنی ذخیره معدنی	رادپولوژیک فلزها آب‌های تحت‌تاثیر معدن / زهکشی اسیدی معدن / زهکشی خنثی یا قلیایی معدن گردوغبار و آلاینده‌های مرتبط
فرآوری	آسیاب کردن / خرد کردن باطله‌ها محبوس کردن باطله‌ها زباله‌های مایع حاصل از فرآوری	گردوغبار رادپولوژیک فلزها تیرگی و کدورت مواد آلی گردوغبار و آلاینده‌های مرتبط
بازیافت	جمع‌آوری برچیدن و جداسازی ضایعات قراضه محل دفن زباله فرآوری	آلاینده‌های حمل و نقل گردوغبار و آلاینده‌های مرتبط ترکیبات آلی فرار فلزها مواد آلی گردوغبار و آلاینده‌های مرتبط دیوکسین‌ها

پیشینه پژوهش

معدن مس پورفیری سونگون قسمتی از کمربند کوه‌زایی - فلززایی آلپ - هیمالیا می‌باشد که از شرق صربستان، بلغارستان، ترکیه و ایران تا افغانستان و پاکستان ادامه دارد. به دلیل ویژگی‌های خاص تکتونیکی و زمین‌شناسی، این منطقه از لحاظ کانی‌زایی مس پورفیری - رگه‌ای از اهمیت زیادی برخوردار است و بر کمربند مس پورفیری دنیا منطبق می‌باشد. کانسارهای مهم ایران مانند مس سونگون (آذربایجان)، مس سرچشمه (کرمان) و دیگر کانسارهای پورفیری ایران در این کمربند آتشفشانی - نفوذی قرار دارند (شکل ۱) (Tabatabai-Rezaei & Aftabi, 2001; Mehrpartou, 1993; Jankovic, 1997; Dixon & Pereira, 1974).

مقادیر کم‌تر از یک برای شاخص‌های زمین‌شیمیایی مانند Th/La و Hf/Sm، Nb/La و غنی‌شدگی LREE نسبت به HREE نشان‌دهنده این است که مهم‌ترین هم‌بافت‌های یونی در سیالات گرمایی هم‌بافت‌های Cl^- هستند. الگوی توزیع REE‌ها به همراه بی‌هنجاری Eu، Ce و Pr در رگه‌های حاوی کانی‌سازی و سنگ‌های دگرسان شده درون‌گیر آن‌ها نشان‌دهنده pH خنثی تا اندکی اسیدی برای سیالات مسؤل دگرسانی و شرایط احیایی محیط تشکیل می‌باشد. هم‌بستگی مثبت بین TiO_2 ، K_2O ، SiO_2 ، Al_2O_3 و Y با REE‌ها دلالت بر نقش کانی‌های سریسیت، ایلیت، کائولینیت، زینوتایم و کانی‌های تیتانیوم‌دار در تمرکز و تثبیت REE‌ها دارد (Jabbarzadeh et al., 2014).

بر اساس روش استخراج گزینشی BCR، عناصر خاکی نادر طی چهار مرحله شامل اجزای متبادل‌پذیر، اجزای احیاء‌شونده، اجزای اکسیدشونده و بخش باقی‌مانده در بخش‌های هوازده مرتبط با کومه‌های سنگ باطله و باطله‌های کانه‌آرایی در مجتمع مس سرچشمه تفکیک شدند. بیشترین تحرک زیست‌محیطی عناصر خاکی نادر مربوط به لایه تبخیری سطح باطله‌های کانه‌آرایی و فازهای تبخیری می‌باشد. فرایند جذب توسط اکسی هیدروکسیدهای آهن و منگنز بر روی غلظت عناصر خاکی نادر تاثیر می‌گذارد؛ به طوری که برای نمونه‌های مربوط به زهاب کومه‌های باطله و باطله‌های اکسیدشده کارخانه تغلیظ جذب خوبی از عناصر خاکی نادر توسط فازهای اکسی هیدروکسیدهای آهن و منگنز در مرحله دوم روش BCR مشاهده گردید. الگوی تفکیک شیمیایی عناصر خاکی نادر که مشخص‌کننده میزان تحرک، جذب و زیست‌دسترس‌پذیری این عناصر می‌باشد، به شدت وابسته به ماهیت نمونه‌ها است. در طی فرایند هوازگی باطله‌های

معذنی و به‌ویژه در طی شرایط اسیدی موجود در زهاب‌های اسیدی بخشی از عناصر خاکی نادر متحرک می‌شوند؛ هر چند فازهای جاذبی مانند اکسی‌هیدروکسیدهای آهن نیز توانایی بالایی در جذب این عناصر نشان دادند (Rashidi & Khorasanipour, 2015).

کارگرانی که با سریم سروکار دارند، مواردی مثل خارش، حساسیت به گرما و آسیب‌های بدنی را تجربه کرده‌اند. حیواناتی که به آنها مقدار زیادی سریم تزریق شده است، به‌علت ضایعه‌های قلبی و وریدی از بین رفته‌اند. یکی از دلایل ایجاد بیماری‌های تنفسی در معادن و کارخانجات بالا بودن غلظت عنصر لانتانیم است. تزریق محلول‌های لانتانیم در حیوانات موجب گلیکوهیمیا، کاهش فشار خون، ضایعات طحال و تغییرات کبدی می‌شود. بعضی از کلریدهای خاکی کمیاب مانند کلرید لانتانیم (LaCl_3) دارای ویژگی‌های ضد انعقادی خون هستند. ترکیبات نئودیمیم موجب آسیب‌های چشم و پوست می‌شود. غلظت بالای نئودیمیم در معدن ضریب ابتلا به بیماری‌های آمبولیسم ریه و سرطان را بالا می‌برد. نمک‌های قابل حل ساماریم موجب سوزش چشم و پوست می‌شود. ذره‌های یوروپیم در محیط موجب بروز آتش‌سوزی و انفجار می‌شود. تماس طولانی‌مدت با مقدار بالای تربیم می‌تواند باعث ایجاد سرطان و انسداد ریه در کارگران و کارمندان معدن شود. ترکیبات این عنصر موجب تحریک چشم و پوست می‌شوند. مقدار بالای دیسپروزیوم در افراد باعث انسداد ریه و سرطان می‌شود. در جانوران آبی لوتتیم باعث آسیب غشای سلولی شده که بر تولیدمثل و عملکرد سیستم عصبی اثر منفی دارد. غلظت بالای ایتربیم در درازمدت منجر به ابتلای کارگران به ناراحتی پوست و چشم می‌شود. پروتیمیم خاصیت رادیواکتیوی بالایی دارد و می‌تواند در طی فرآیند کاهش بتا، اشعه‌ی ایکس از خود منتشر کند. استنشاق طولانی مدت تولید به‌همراه هوا سبب انسداد ریه می‌شود. هولیمیم امکان فعال نمودن متابولیسم را دارد. گادولینیم احتمالاً موجب افزایش متابولیسم می‌شود (Shirazi et al., 2016).

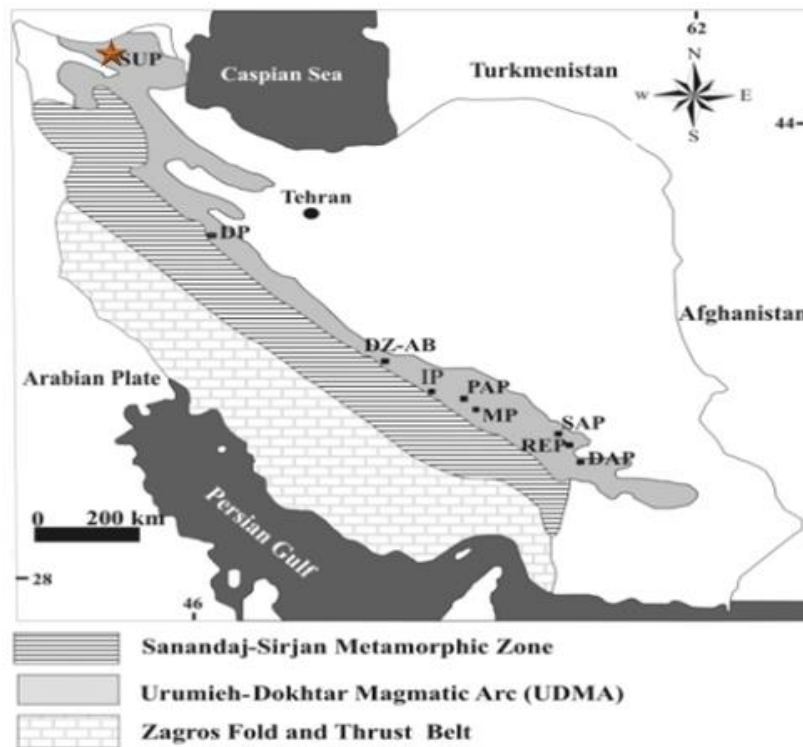
غنی‌شدگی LREEها به دلیل حضور کانی‌های ثانویه میزبان این عناصر مانند کلریت، سریسیت، کانی‌های رسی مثل کائولینیت و ناترولیت و اکسیدهای آهن همانند هماتیت می‌باشد (Fulignati et al., 1999). هم‌بستگی مثبت متوسط تا بالای عناصر نادر خاکی سبک با Al ($0/61$ تا $0/87$) نشان می‌دهد که کانی‌های رسی نقش کنترلی مهمی در توزیع اغلب LREEها داشته‌اند. هم‌بستگی متوسط با عنصر K ($0/34$ تا $0/69$) احتمالاً دلیلی بر جانشینی این عناصر به‌جای K در طی فرآیند سریسیتی شدن است. هم‌چنین هم‌بستگی مثبت با Fe ($0/22$ تا $0/83$) به‌جز Ce و La نشان از نقش کم‌رنگ اکسیدها و هیدرواکسیدهای آهن در تمرکز LREEها در زون‌های دگرسان دارد. تهی‌شدگی جزئی LREEها در بعضی از نمونه‌های دگرسان به‌وسیله لیگاند یونی SO_4^{2-} و در pH پایین رخ می‌دهد. HREEها با Al هم‌بستگی مثبت ($0/61$ تا $0/82$) دارند که می‌تواند ناشی از جذب سطحی توسط کانی‌های رسی باشد. هم‌بستگی مثبت این عناصر با Fe ($0/32$ تا $0/83$) ناشی از جذب سطحی و ترجیحی توسط اکسید آهن است. این عناصر با لیگاندهای CO_3^{2-} ، F^- ، SO_4^{2-} و Cl^- تشکیل کمپلکس داده که باعث افزایش تحرک و انحلال‌پذیری آن‌ها می‌شود (Wood, 2006). طبق Muchangos (2006) با افزایش pH محلول، پایداری کمپلکس‌های HREE بیشتر از کمپلکس‌های LREE است و همین موضوع باعث تفریق LREEها از HREEها می‌شود. به‌طور کلی می‌توان گفت روندهای افزایشی و کاهش‌ی برای اغلب عناصر نادر خاکی ناشی از تغییر شرایط دگرسانی شیمیایی نظیر pH، دما، Eh و لیگاندهای یونی در طی دگرسانی است (Hoseinzadeh et al., 2023; Karakaya, 2009).

زمین‌شناسی منطقه

مجموعه ماگمایی ارومیه- دختر در واقع کمربند آتش‌فشانی- نفوذی ترشیری ایران مرکزی است که تحت عنوان «سهند- بزمان» یا «ارومیه- دختر» نامیده شده است. این کمربند یک کمپلکس خطی نفوذی- خروجی سیالیک (حداقل در بخش‌های جنوب‌شرقی) در طول کمربند کوه‌زایی زاگرس است (بازین و هوبنر، 1969؛ Bazin & Hubner, 1969؛ شهاب‌پور، 1994؛ Shahabpour, 1994). کمربند آتش‌فشانی ارومیه- دختر، مهم‌ترین کمربند فلززایی ایران است و در حقیقت بر کمربند جهانی کوه‌زایی- فلززایی آلپ- هیمالیا، منطبق می‌باشد. این کمربند، معلول فازهای کوه‌زایی آلپی از زمان مزوزوئیک تا اواخر سنوزوئیک است (شهاب‌پور و کرامرز، 1987؛ Shahabpour & Kramers, 1987).

منطقه معدنی سونگون و اهر (آذربایجان)، در انتهای غربی حوزه رسوبی و تکتونیکی البرز قرار دارد و در تقسیم‌بندی ساختاری، جزئی از کمربند ماگمایی سنوزوئیک سهند- بزمان است. این منطقه به‌دلیل مجاورت با انتهای شمال و شمال‌غربی حوزه زاگرس، تحت تاثیر الگوی تکتونیکی و رسوبی شرق ترکیه و قفقاز جنوبی نیز می‌باشد (مشانیر، ۱۳۸۷). رخنمون سنگی پالئوزوئیک در جنوب و شمال آذربایجان،

گسترش لایه‌های مزوزوئیک ولکانیسم بارز از کرتاسه تا عهد حاضر که در محیط‌های دریایی و خشکی به‌وجود آمده‌اند و بالاخره فراوانی سنگ‌های رسوبی و آتش‌فشانی - نفوذی سنوزوئیک، از ویژگی‌های زمین‌شناسی ناحیه‌ای این منطقه است (مشانیر، ۱۳۸۷). در معدن مس پورفیری سونگون، فراوان‌ترین سنگ‌ها، گرانودیوریت و داسیت هستند. به‌مقدار کمتر، اسکارن و داسیت‌اندزیت هم یافت می‌شود. در بین واحدهای سنگی، دیوریت، گرانودیوریت، گرانیت، گدازه‌های بازالتی، تراکی‌اندزیت، اندزیت، داسیت، تراکیت، ایگنبریت و سنگ‌های آذرآواری، فراوان‌ترین سنگ‌ها می‌باشند (Shahi et al., 2012; Shahi & Aftabi, 2013).

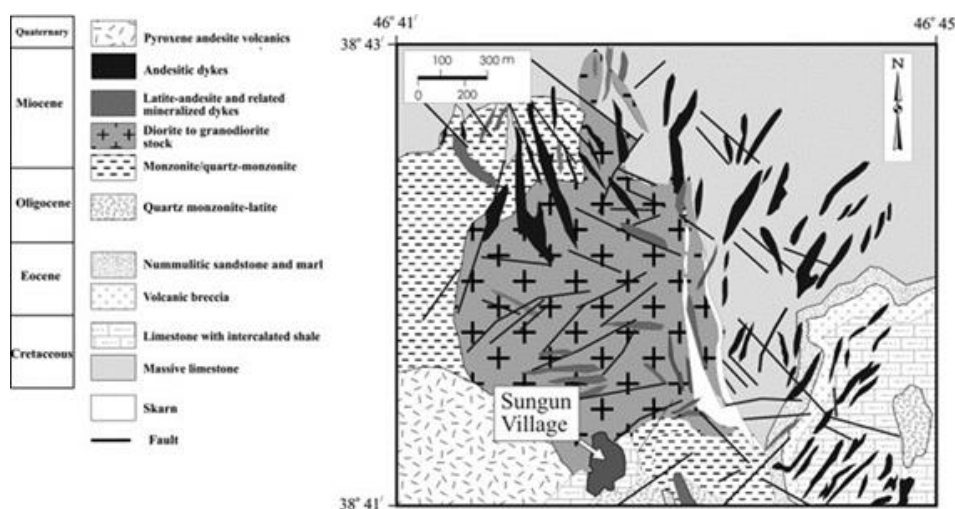


شکل ۱. موقعیت کانسارهای مس پورفیری ایران و کانسار مس پورفیری سونگون در کمر بند ارومیه-دختر (Zarasvandi et al., 2015; Alavi, 2004; Soltani et al., 2014; Talesh Hosseini et al., 2020; Shahi & Aftabi, 2013; Shahi et al., 2023; Mehrpartou, 1993; SU: Sungun, D: Dalli, DZ: Darreh-Zerreshk, AB: (Ali-Abad, I: Iju, PA: Parkam (Sara), M: Meiduk, RE: Reagan, SA: Sarcheshmeh, DA: Daraloo

مهم‌ترین کانی‌ها در کانسار سونگون، کانی‌های سولفیدی شامل پیریت، کالکوپیریت، بورنیت، مولیبدنیت، اسفالریت، گالن و پیروتیت می‌باشند. از جمله کانی‌های سیلیکاتی می‌توان به بیوتیت، آمفیبول، فلدسپار پتاسیم، پلاژیوکلاز (اندزین و الیگوکلاز)، کوارتز، کلریت، سریسیت و اپیدوت اشاره نمود. کانی‌های فرعی شامل مگنتیت، هماتیت، ایلمنیت، روتیل، کلسیت و آپاتیت می‌باشند (شکل ۲) (Tabatabai Rezaei & Aftabi, 2001; Mehrpartou, 1993; Lescuyer & Riou, 1976; Hezarkhani & Williams-Jones, 1998; Hezarkhani et al., 1999).

روش‌شناسی پژوهش

در گام نخست، مطالعات کتابخانه‌ای شامل مراجعه به کتاب‌ها، پایان‌نامه‌ها، رساله‌ها، منابع‌ها و مقاله‌های داخلی و خارجی در ارتباط با موضوع پژوهش انجام شد. نقشه‌های زمین‌شناسی و عکس‌های هوایی و ماهواره‌ای مرتبط با منطقه مورد مطالعه نیز مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار گرفت. در گام بعدی، مشاهدات صحرایی و میدانی از منطقه به‌عمل آمد و برداشت نمونه‌های مورد نیاز به روش تصادفی از منطقه و پله‌های استخراج انجام گرفت. ۴۰ نمونه از موقعیت‌های مشخص شده در شکل (۳) برداشت شد. ترکیب سنگی اکثر نمونه‌ها،



شکل ۲. نقشه زمین شناسی کانسار پورفیری-اسکارن سونگون (Hezarkhani, 2006)

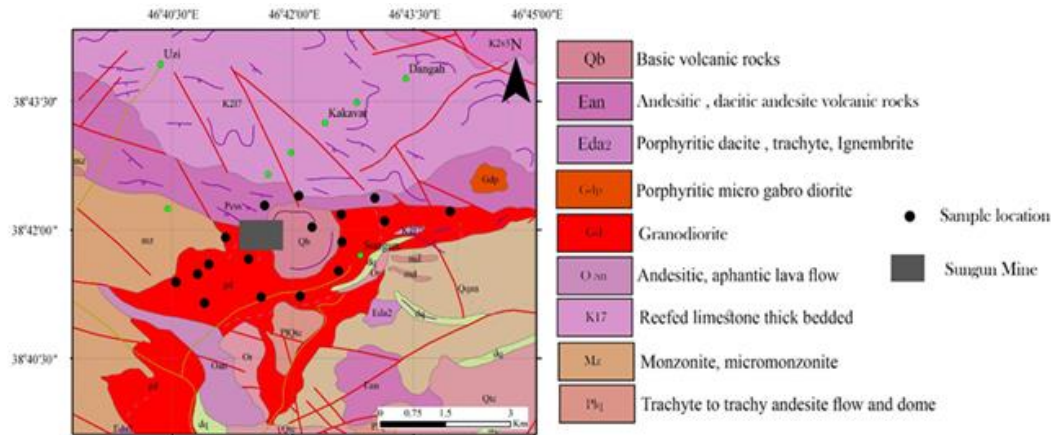
گرانودیوریتی بود. کوارتز مونزونیت و گرانیت به تعداد محدود در بین نمونه‌ها وجود داشت. نمونه‌های مورد مطالعه، دگرسانی‌های پتاسیک، سریسیتی، سیلیسی، رسی و پروپیلیتی را متحمل شده‌اند. در موقع برداشت نمونه‌ها، نکته حایز اهمیت، آلوده نشدن نمونه‌ها می‌باشد، به این خاطر، از دستکش‌های مقاوم پلاستیکی به‌طور جداگانه برای برداشت هر نمونه استفاده شد. به‌منظور تهیه مقاطع و نیز آنالیز شیمیایی، نمونه‌ها مورد بررسی دقیق قرار گرفته و نمونه‌های مناسب انتخاب گردیدند. هر نمونه‌ای درون کیسه‌ی نایلونی مقاوم با استحکام بالا قرار داده شد، برچسب مخصوص بر آن زده شد و شماره‌ای نیز به هر یک اختصاص داده شد. در شرکت «گرونا»ی تهران، مقاطع نازک و صیقلی تهیه شدند و مطالعه بر روی آن‌ها در آزمایشگاه دانشگاه با میکروسکوپ‌های نوری پلاریزان انجام شد. در آزمایشگاه شرکت «زرآما» نمونه‌های مناسبی که آماده شده بودند مورد تجزیه شیمیایی قرار گرفتند. برای آنالیز نمونه‌ها از روش طیف‌سنجی جرمی پلاسمای جفت‌شده‌ی القایی^۱ (ICP-MS) استفاده شد. استفاده از نرم‌افزارهایی چون SPSS برای پردازش، تفسیر و تحلیل آماری داده‌های ژئوشیمیایی، رسم نمودارهای لازم، انجام کارهای آماری متناسب، تهیه نقشه‌ها، تصویرها و جدول‌های عنصری، گروه‌بندی عناصر با توجه به شاخص‌ها و پارامترهای آماری به‌همراه رسم گراف‌های پراکنده‌ی عناصر، محاسبات تک‌متغیره و چندمتغیره زیاد بر روی پایگاه داده‌ها از جمله: هم‌بستگی خطی، آنالیز خوشه‌ای و آنالیزهای فاکتوری، از جمله اقدامات گام‌های بعدی بود که براساس آن‌ها، نتایج تحقیق حاصل شد.

کانی شناسی عناصر خاکی نادر

کربناتیت‌ها از جمله سنگ‌های آذرین هستند که از ماگمای غنی از کربنات به‌جای ماگمای غنی از سیلیس به‌دست می‌آیند و بسیاری از ذخایر REE جهان مرتبط با آن‌ها هستند. کربناتیت‌ها به‌عنوان سنگ‌های آذرین با بیش از ۵۰ درصد کانی‌های کربناته مدال، معمولاً کلسیت و دولومیت، تعریف می‌شوند و به‌طور کلی، دارای بالاترین غلظت REE در بین سنگ‌های آذرین هستند. علاوه بر کربناتیت‌ها، REE‌ها ارتباط ژنتیکی قوی با فرآیندهای آذرین قلیایی، به‌ویژه ماگماتیسیم پرقلیایی دارند. سنگ‌های آذرین پرقلیایی که در آن‌ها نسبت مولکولی اکسید آلومینیوم (Al_2O_3) کمتر از ترکیب اکسید سدیم (Na_2O) و اکسید پتاسیم (K_2O) یعنی $(Al_2O_3 < Na_2O + K_2O)$ است، معمولاً بیشتر از سایر سنگ‌های آذرین با غنی‌سازی در عناصر REE تعریف می‌شوند. ذخایر REE اقتصادی یا بالقوه اقتصادی عمدتاً در محیط‌های زمین‌شناسی زیر رخ می‌دهد: -کربناتیت‌ها -سیستم‌های آذرین پرآلکالین -بلوک‌های مگنتیت-هماتیت ماگمایی -ذخایر اکسید آهن-مس-

1. Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry

طلا^۱ (IOCG) -تجمع زینوتایم -مونازیت در گنیس مافیک -رسوبات رس‌جذب‌یون -رسوبات پلاسما حاوی مونازیت -زینوتایم (Chakhmouradian & Zaitsev, 2012).



شکل ۳. محل‌های نمونه‌برداری در نقشه‌ی زمین‌شناسی معدن مس سونگون (Shahi & Aftabi, 2013; Shahi et al., 2012; Mehrpartou et al., 1992; Mehrpartou, 1993; Mehrpartou, 1996; Shahi et al., 2023)

کانی‌های حاوی عناصر نادر خاکی معمولاً توسط HREE یا LREEها غالب می‌شوند. کانی‌های عمدتاً حاوی ایتیریم و HREEها عبارتند از: گادولینیت، زینوتایم، سامارسکیت، یوکسنیت، فرگسونیت، ایتروتانتالیت، ایتروتانگستیت، ایتریالیت. کانی‌هایی که عمدتاً حاوی LREE هستند عبارتند از: باستانزیت، مونازیت، آلانیت، لوپاریت، آنسیلیت، پاراسیت، لانتانیت، شونیت، سریت، استیلولیت، بریتولیت، فلوسریت و سریانیت. با این حال، معادن تجاری در سرتاسر جهان بیشتر باستانزیت، مونازیت و زینوتایم استخراج می‌کنند (Nawshad et al., 2014). کانی‌های مهم حاوی REE در کانسارهای پرقلیایی می‌توانند به ترتیب فراوانی کلی شامل فلوراپاتیت (آپاتیت غنی از فلور)، اودیالیت، لوپاریت، زینوتایم، مونازیت، گادولینیت، باستانزیت، پاریسیت، سینکیسیت، کاینوسیت، موساندریت، بریتولیت، برانریت، تالیت، آیمرییت و فرگسونیت باشند (Barker & Van Gosen, 2012; Dostal et al., 2014).

در توده‌های پرقلیایی، برخی از رسوبات REE حاوی REEهای شاخص نسبتاً کم‌یاب اما مفید و کانی‌های قلیایی هستند مانند آکمیت (قهوه‌ای/سبز)، آمفیبول‌های قلیایی (آبی/سیاه)، اتودیالیت (صورتی/قرمز)، گادولینیت (سبز/قهوه‌ای-سیاه)، رینکولیت (قهوه‌ای/قرمز/قهوه‌ای زرد) و سودالیت (آبی تیره). به دلیل وجود کانی‌های حاوی توریم- اورانیم در کمپلکس‌های قلیایی و کربنات‌ها، رادیواکتیویته یک ویژگی مشترک کانی‌سازی REE است (Chakhmouradian & Zaitsev, 2012).

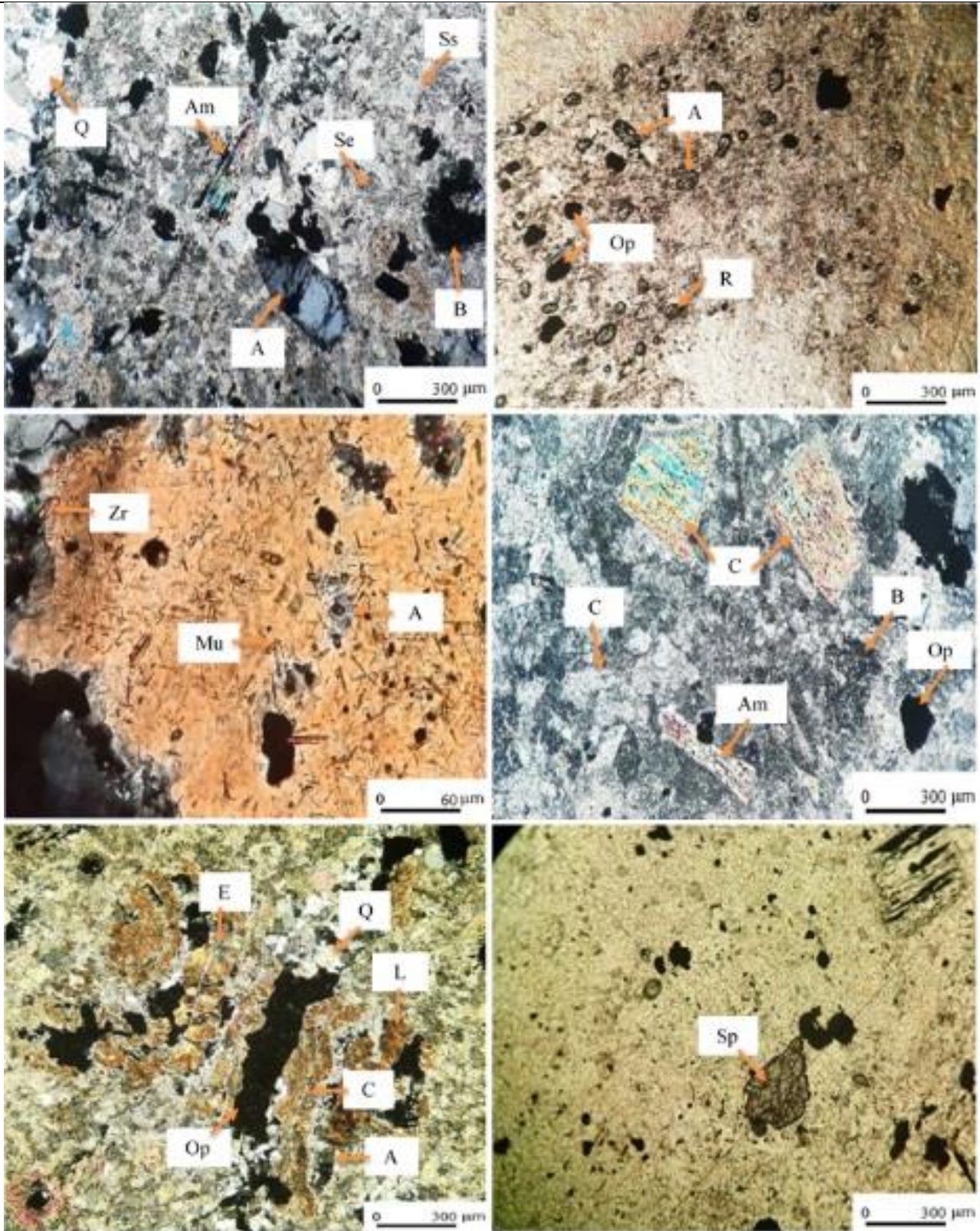
بعضی از کانی‌هایی که در توده نفوذی معدن مس سونگون، پتانسیل میزبانی عناصر خاکی نادر را دارند عبارتند از: آپاتیت، زیرکن، کانی‌های کربناتی، کانی‌های رسی، روتیل، اسفن، سریسیت، سوسوریت، کانی‌های اپاک، اپیدوت، لیمونیت و مولیت (شکل ۵).



شکل ۴. نمایی از منابع عناصر خاکی نادر (Balaram, 2023; Balaram, 2022)

جدول ۲. نام و فرمول شیمیایی بعضی از کانی‌های مهم REE دار مرتبط با نهنشته‌های عناصر خاکی نادر (Balaram, 2019)

فرمول شیمیایی	کانی
$(Y, Ln, Ca)_2(Al, Fe^{3+})_3(SiO_4)_3(OH)$	آلنیت
$(Ca, Ln)_5(PO_4)_3(F, Cl, OH)$	آپاتیت
$(Ln, Y)(CO_3)F$	باستانزیت
$Na_4(Ca, Ln)_2(Fe^{2+}, Mn^{2+}, Y)ZrSi_8O_{22}(OH, Cl)_2$	اودیالیت
$(Ln, Y)NbO_4$	فرگوسونیت
$CaZrSi_2O_7$	گیتینسیت
$Y_2(SiO_4)(CO_3)$	لیموریت
$Ca_2(Y, Ln)_2Si_4O_{12}(CO_3).H_2O$	کاینوسیت
$(Ln, Na, Ca)(Ti, Nb)O_3$	لوپاریت
$(Ln, Th)PO_4$	مونازیت
$(Na, Ca)_3Ca_3Ln(Ti, Nb, Zr)(Si_2O_7)_2(O, OH, F)_4$	موساندریت
$Ca(Ln)_2(CO_3)_3F_2$	پاریسیت
$(Ca, Na, Ln)_2Nb_2O_6(OH, F)$	پیروکلر
$(Ca, Ln)_4Na(Na, Ca)_2Ti(Si_2O_7)_2(O, F)_2$	رینکولیت
$Na_{14}(Ln)_6MnFe_2(Zr, Th)(Si_6O_{18})_2(PO_4)_7.3H_2O$	استین استروپین
$Ca(Ln)(CO_3)_2F$	سینکیسیت
YPO_4	زینوتايم
$(Zr, Ln)SiO_4$	زیرکن



شکل ۵. تصاویر میکروسکوپی مقاطع نازک نمونه‌های مورد مطالعه از کانی‌هایی که می‌توانند میزان عناصر خاکی نادر باشند (Ap: Apatite, Rt: Rutile, Opq: Opaque mineral, Ser: Sericite, Ssr: Saussurite, Amp: Amphibole, Qz: Quartz, Bt: Biotite, Cb: Carbonate mineral, Cm: Clay mineral, Zrn: Zircon, Mul: Mullite, (Spn: Sphene, Ep: Epidote, Lm: Limonite)

یافته‌های پژوهشی

مقدار میانگین عناصر سریم، یوروپیم، لانتانیم، نئودیمیم و پرازئودیمیم در سنگ‌های توده نفوذی معدن مس سونگون مطابق جدول مقادیر آماری (جدول ۳)، نسبت به مقدار متوسط سنگ‌های پوسته، افزودگی دارند. هم‌چنین مقدار میانگین عناصر دیسپروزیوم، اربیوم، گادولینیم، اسکاندیم، ساماریوم، تریبیم، ایتربیوم و ایتربیوم، نسبت به مقدار کلارک، کاهش‌دهنده دارند. عناصر نادر خاکی معمولاً با یکدیگر هم‌بستگی مثبت دارند ولی در یک تقسیم‌بندی مطابق جدول ضریب هم‌بستگی پیرسون (جدول ۴)، لانتانیم، سریم، پرازئودیمیم، نئودیمیم، یوروپیم و گادولینیم، دارای ضریب هم‌بستگی مثبت با همدیگرند. ضریب هم‌بستگی Ce با Gd (۰/۹۳)، La با Nd (۰/۹۵) و Pr با Nd (۰/۹۶)، Nd با Pr (۰/۹۵) و با Gd (۰/۹۸)، زیاد و قابل توجه است. ضریب هم‌بستگی عناصر تریبیم، دیسپروزیوم، ایتربیوم، اربیوم، اسکاندیم، ساماریوم و ایتربیوم، با یکدیگر مثبت است که ضریب هم‌بستگی Dy با Tb: ۰/۹۲، Y با Nd: ۰/۹۵، Er با Y: ۰/۹۶، Tb با Yb: ۰/۹۱ و Yb با Y: ۰/۹۱، Tb با Sm و Yb با Y: ۰/۹۶، زیاد می‌باشد.

عناصر خاکی نادر بر اساس شکل ۶ (نمودار آنالیز خوشه‌ای)، دو خوشه کلی زیر را شامل می‌شوند که هر کدام نیز به زیرخوشه‌هایی قابل تقسیم می‌باشند: خوشه اول: ایتربیوم، ایتربیوم، اربیوم، اسکاندیم، تریبیم، گادولینیم، ساماریوم و دیسپروزیوم که اغلب ویژگی‌های ژئوشیمیایی مشترک دارند و به دو زیرخوشه زیر تقسیم می‌شوند: زیرخوشه اول: ایتربیوم، ایتربیوم، اربیوم، اسکاندیم و تریبیم. زیرخوشه دوم: گادولینیم، ساماریوم و دیسپروزیوم که دو گروه زیر را در بر می‌گیرد: گروه اول: گادولینیم و ساماریوم. گروه دوم: دیسپروزیوم. خوشه دوم: نئودیمیم، پرازئودیمیم، سریم، لانتانیم و یوروپیم که ویژگی‌های ژئوشیمیایی نزدیک به هم آن‌ها را کنار هم قرار داده است و دو زیرخوشه زیر را شامل می‌گردد: زیرخوشه اول: نئودیمیم، پرازئودیمیم، سریم و لانتانیم که قابل تقسیم به دو گروه زیر می‌باشد: گروه اول: نئودیمیم و پرازئودیمیم. گروه دوم: سریم و لانتانیم. زیرخوشه دوم: یوروپیم که ویژگی‌های خاص ژئوشیمیایی آن نیز همین امر را تایید می‌کند.

برای این که میزان افزودگی یا کاهش عناصر را در سنگ‌های توده نفوذی معدن مس سونگون ارزیابی کنیم، از مقدار متوسط سنگ‌های پوسته به عنوان مقادیر مرجع در محاسبات استفاده گردید. نسبت مقادیر عناصر در هر نمونه ژئوشیمیایی از سنگ‌های منطقه به مقادیر مرجع، میزان افزایش یا کاهش عناصر را منعکس می‌کند (جدول ۵). عناصر اسکاندیم، دیسپروزیوم، اربیوم، گادولینیم، ساماریوم، تریبیم، ایتربیوم و ایتربیوم، کاهش‌دهنده را نشان می‌دهند. عناصر یوروپیم، لانتانیم، نئودیمیم و پرازئودیمیم، دارای افزودگی یا کاهش‌دهنده معنی‌داری نمی‌باشند.

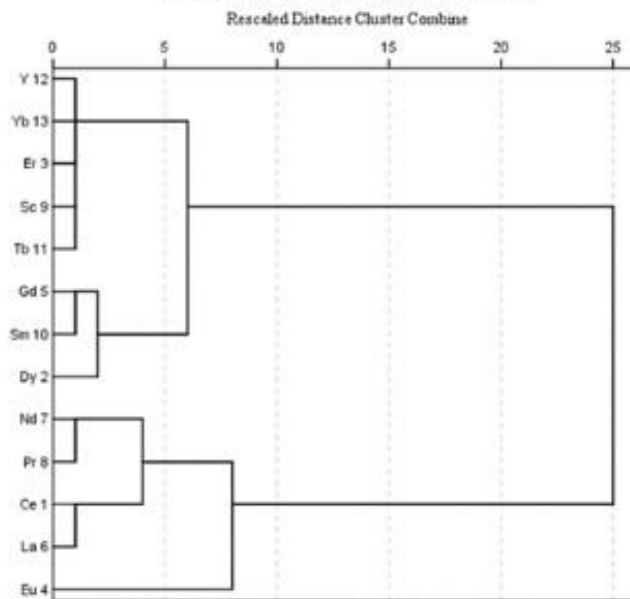
جدول ۳. خلاصه مقادیر آماری عناصر نادر خاکی در سنگ‌های توده نفوذی معدن مس سونگون و مقایسه‌ی غلظت آن‌ها با کلارک (برحسب (EPA, 2012; Kumari et al., 2015; Levinson, 1980) (ppm

گرانودیوریت	کلارک	بیشینه توده نفوذی (گرانیتیویدی دگرسان شده)	کمینه توده نفوذی (گرانیتیویدی دگرسان شده)	میانگین توده نفوذی (گرانیتیویدی دگرسان شده)
۳۶	۳۰	۶۰	۱۴	۲۸
۴۰	۶۰	۱۳۷	۳۰	۷۹
۸/۵	۶/۷	۱۳/۱۸	۳/۴۸	۸/۴۷
۲۶	۲۷	۴۴	۱۴	۲۹
۶/۸	۵/۳	۷/۹۶	۱/۴۱	۳/۸۷
۱/۲	۱/۳	۳/۲۱	۰/۷۷	۱/۴۱
۷/۴	۴	۴/۶۷	۱/۸۰	۳/۲۸
۱/۳	۰/۷	۱	۰/۲	۰/۴
۳/۲	۳/۸	۵/۸۶	۱/۰۵	۲/۰۵
۱۰	۱۶	۱۲/۹	۴	۵/۷
۳۰	۳۰	۲۹/۴	۳/۱	۷/۳
۴/۸	۲/۱	۲/۹۵	۰/۴۹	۱/۰۱
۳/۶	۲	۲/۵	۰/۲	۰/۶

جدول ۴. ضریب همبستگی بین عناصر نادر خاکی در سنگ‌های توده‌ی نفوذی معدن مس سونگون

	Ce	Dy	Er	Eu	Gd	La	Nd	Pr	Sc	Sm	Tb	Y	Yb
Ce	۱												
Dy	۰/۱۸۶	۱											
Er	۰/۱۸۱	۰/۹۹۱	۱										
Eu	۰/۳۷۸	۰/۸۰۰	۰/۷۵۸	۱									
Gd	۰/۹۳۲	۰/۴۹۴	۰/۴۸۱	۰/۶۲۴	۱								
La	۰/۹۵۳	۰/۱۹۷	۰/۲۰۶	۰/۳۷۱	۰/۸۷۳	۱							
Nd	۰/۸۷۰	۰/۵۷۲	۰/۵۵۰	۰/۶۸۳	۰/۹۷۶	۰/۷۹۸	۱						
Pr	۰/۹۶۰	۰/۳۵۷	۰/۳۴۵	۰/۵۳۰	۰/۹۸۲	۰/۸۹۰	۰/۹۵۴	۱					
Sc	-۰/۰۶۶	۰/۸۵۰	۰/۸۵۱	۰/۶۳۴	۰/۲۱۸	-۰/۰۲۶	۰/۳۲۱	۰/۱۰۰	۱				
Sm	۰/۵۸۳	۰/۸۰۹	۰/۷۷۶	۰/۹۲۴	۰/۸۱۴	۰/۵۳۹	۰/۸۷۳	۰/۷۳۸	۰/۵۹۵	۱			
Tb	۰/۵۰۶	۰/۹۱۵	۰/۹۰۸	۰/۸۵۸	۰/۷۵۹	۰/۴۸۳	۰/۸۱۷	۰/۶۶۱	۰/۷۲۷	۰/۹۴۴	۱		
Y	-۰/۰۵۷	۰/۹۴۵	۰/۹۵۶	۰/۶۶۴	۰/۲۴۳	۰/۰۱۷	۰/۳۲۴	۰/۰۹۵	۰/۸۸۶	۰/۶۱۵	۰/۷۷۱	۱	
Yb	-۰/۱۳۴	۰/۸۸۹	۰/۹۰۷	۰/۵۲۳	۰/۱۵۸	-۰/۰۶۱	۰/۲۳۸	۰/۰۲۰	۰/۸۴۷	۰/۴۹۹	۰/۶۸۷	۰/۹۶۱	۱

Dendrogram using Average Linkage (Between Groups)



شکل ۶. نمودار آنالیز خوشه‌ای عناصر نادر خاکی در سنگ‌های توده‌ی نفوذی معدن مس سونگون

ضریب غنی‌شدگی^۱ (EF) عناصر مورد نظر با مبنا قرار دادن مقادیر متوسط سنگ‌های پوسته زمین (مرجع)، طبق رابطه زیر محاسبه گردید. $EF = \frac{(\text{غلظت آلومینیم در نمونه}) / (\text{غلظت عنصر در نمونه})}{(\text{غلظت آلومینیم در کلارک}) / (\text{غلظت عنصر در کلارک})}$ (جدول ۶ و شکل ۷). در این محاسبه از عنصر آلومینیم به‌عنوان عنصر نرمال‌کننده استفاده شد. آلومینیم از عناصری است که تاثیر کمتری را از فرآیندهای انسان‌زاد می‌گیرد. البته آلومینیم، اسکاندیم و ... می‌توانند به‌عنوان عنصر مرجع، مورد استفاده قرار گیرند.

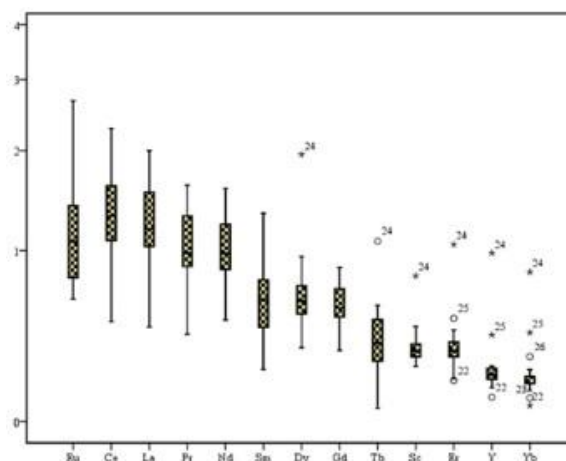
¹ Enrichment Factor

جدول ۵. نسبت افزودگی (+) یا کاهشیدگی (-) عناصر نادر خاکی در سنگ‌های توده‌ی نفوذی معدن مس سونگون نسبت به مقدار کلارک

عنصر	Ce	Dy	Er	Eu	Gd	La	Nd
افزودگی یا کاهشیدگی نسبت به کلارک	+۱/۳۲	-۱/۴۶	-۲/۷۷	+۱/۱۸	-۱/۶۵	+۱/۲۷	+۱/۰۴
عنصر	Pr	Sc	Sm	Tb	Y	Yb	
افزودگی یا کاهشیدگی نسبت به کلارک	+۱/۰۳	-۲/۸۱	-۱/۵۵	-۲/۲۵	-۴/۱۱	-۵	

جدول ۶. بیان کیفی مقادیر ضریب غنی‌شدگی (Muller, 1979)

مقادیر کمی ضریب غنی‌شدگی	تفسیر کیفی
$EF < 3$	غنی‌شدگی پایین
$EF > 3$	غنی‌شدگی متوسط
$EF = 5 - 20$	غنی‌شدگی زیاد
$EF = 20 - 40$	غنی‌شدگی خیلی زیاد
$EF > 40$	غنی‌شدگی به شدت زیاد

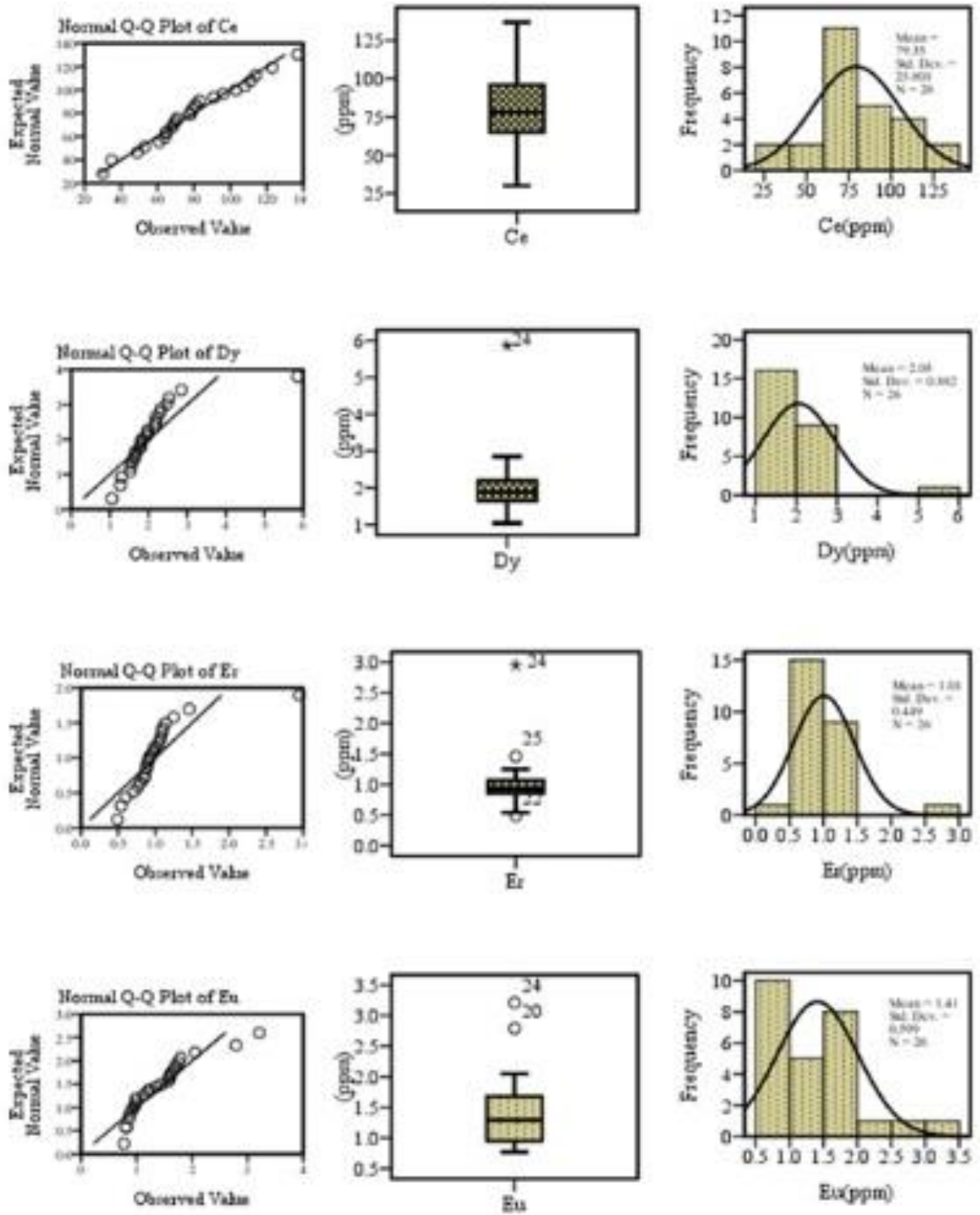


شکل ۷. نمودار لگاریتمی جعبه‌ای فاکتور غنی‌شدگی عناصر نادر خاکی در مقایسه با مقدار متوسط سنگ‌های پوسته"

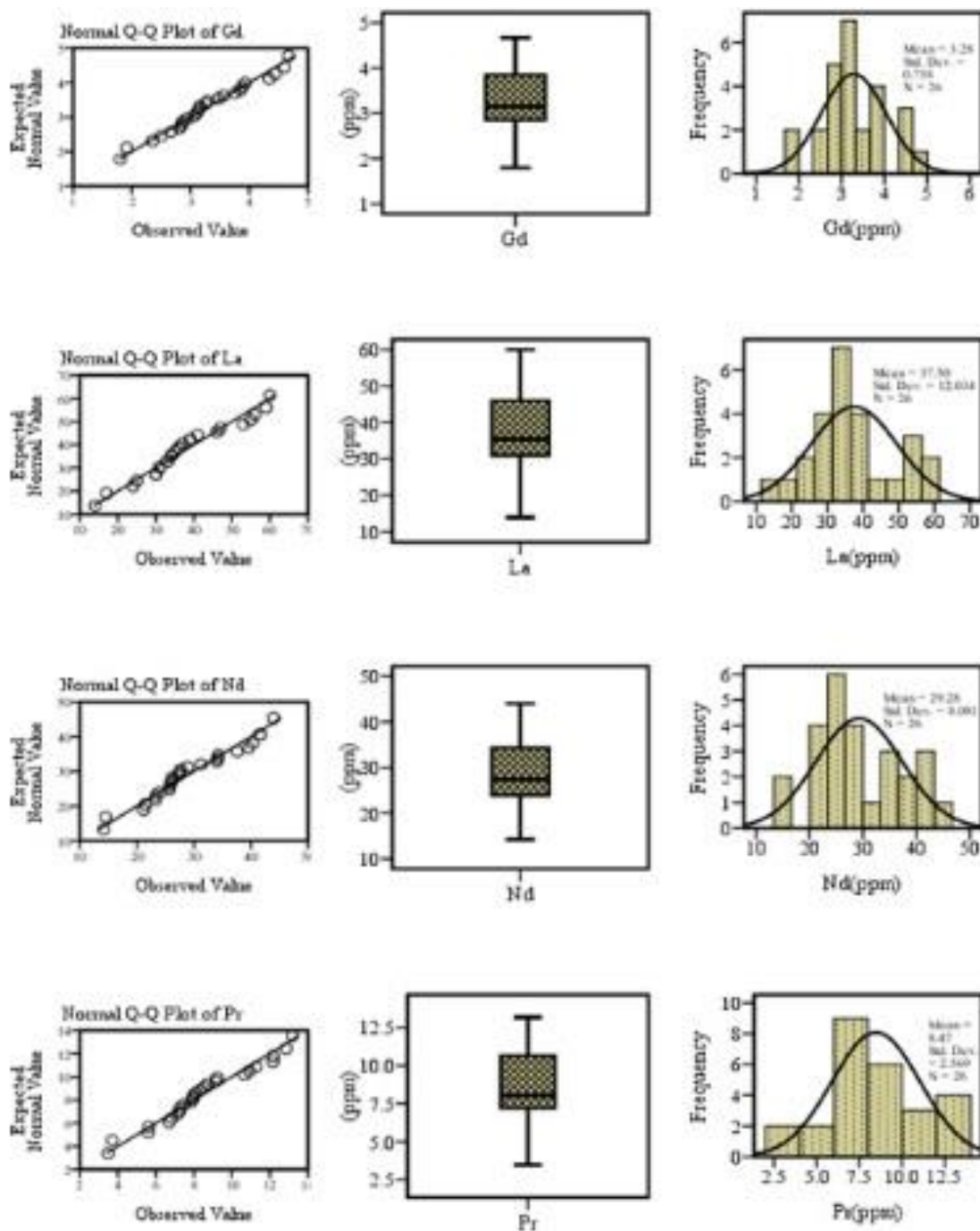
عناصر سرییم، یوربیم، لانتانیم، نئودیمیم و پرازئودیمیم، دارای ضریب غنی‌شدگی کمتر از ۳ می‌باشند و بقیه عناصر REE هم فقیرشدگی را نشان می‌دهند. نمودارهای ستونی، جعبه‌ای و Q-Q Plot (شکل‌های ۸ تا ۱۰)، غنی‌شدگی نسبی عناصر Ce، Eu، La، Nd و Pr (اغلب LREEها) و فقیرشدگی بقیه عناصر نادر خاکی (اغلب HREEها) را در سنگ‌های توده نفوذی معدن مس سونگون، نشان می‌دهند. چولگی مثبت عناصر در نمودارهای ستونی و پراکنش مقادیر عناصر در اطراف خط رگرسیون نمودار Q-Q Plot در مورد عناصر Sc، Eu، Er، Dy، Yb و Y، حکایت از توزیع آماری غیرعادی محیط دارند.

بحث

انقباض لانتانید و کاهش سیستماتیک در شعاع یونی در سراسر گروه لانتانید از ویژگی‌هایی است که بر شکنش REEها تاثیر می‌گذارد و خواص شیمیایی و فیزیکی غیرمعمول و مفیدی مانند خواص مغناطیسی و یا نوری منحصر به فرد را به REEها می‌دهد. از ویژگی‌های دیگر عناصر خاکی نادر داشتن نیمه‌عمر طولانی ایزوتوپ‌های رادیواکتیو REE می‌باشد که باعث می‌شود برای مطالعات ژئوشیمیایی و پترولوژیکی مناسب باشند.



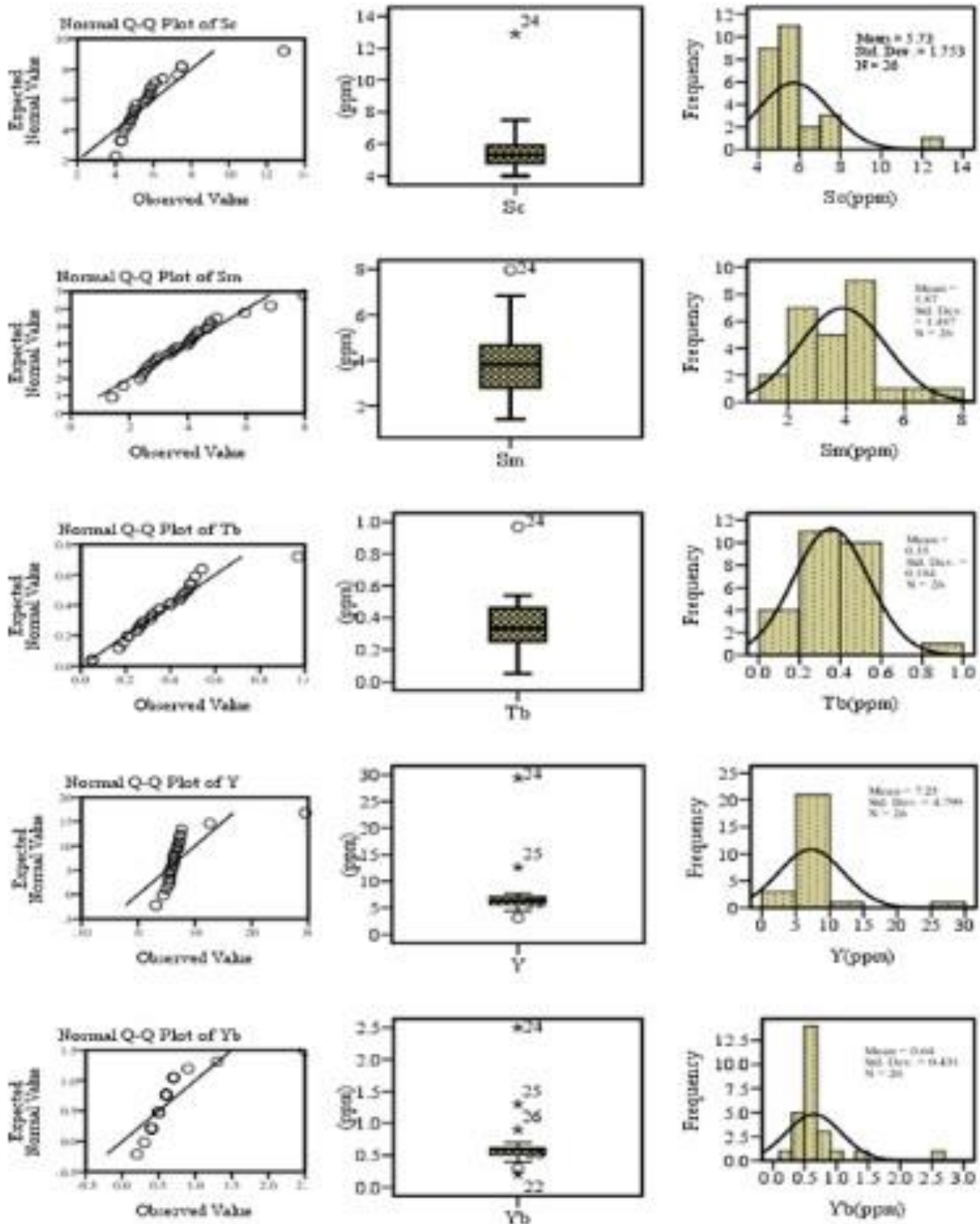
شکل ۸. نمودار ستونی، جبهه ای و Q-Q Plot سربیم، دیسپروزیم، اربیم و یوربیم



شکل ۹. نمودار ستونی، جعبه‌ای و Q-Q Plot گادولینیم، لانتانیم، نئودیمیم و پرازئودیمیم

محیط‌های زمین‌شناسی کربناتیت‌ها، سیستم‌های آذرین پراکالین، بلوک‌های مگنتیت-هماتیت ماگمایی، ذخایر اکسید آهن-مس-طلا (IOCG)، تجمع زینوتایم-موناژیت در گنیس مافیک، رسوبات رس‌جذب‌یون و رسوبات پلاسر حاوی موناژیت-زینوتایم، ذخایر عمده REE اقتصادی یا بالقوه اقتصادی هستند.

گادولینیت، زینوتايم، سامارسکیت، یوکسنیت، فرگوسونیت، ایتروانتالیت، ایتروتانگسیت، ایتربالیت، باستانزیت، مونازیت، آلانیت، لوپاریت، آنسیلیت، لانتانیت، شوینیت، سریت، استیلولیت، بریتولیت، فلوسریت، سریانیت، فلورآپاتیت، اودیالیت، پاریسیت، سینکیسیت، کاینوزیت، موساندريت، برانزیت، تالیت و آیمریت از جمله کانی‌های REE دار می‌باشند. با این حال، باستانزیت، مونازیت و زینوتايم، معادن تجاری و اقتصادی عمده می‌باشند.



شکل ۱۰. نمودار ستونی، جعبه‌ای و Q-Q Plot اسکاندیم، ساماریم، تریم، ایتربیم و ایتربیم

یکی از چالش‌های زیست‌محیطی عناصر خاکی نادر این است که رادیواکتیویته یک ویژگی مشترک کانی‌سازی REE می‌باشد که آن هم به دلیل وجود کانی‌های حاوی توریم- اورانیم در کمپلکس‌های قلیایی و کربناتیت‌ها است. بسیار نامحلول بودن توریم در اکثر شرایط و بسیار محلول بودن اورانیم در شرایط اکسیدکننده، باعث چالش‌های زیست‌محیطی در مسیرهای آبی منتهی به آب‌های سطحی یا زیرزمینی در مناطق معدنی مرتبط با عناصر نادر خاکی می‌شود.

یکی دیگر از چالش‌های زیست‌محیطی عناصر کم‌یاب خاکی، چرخه بیوژئوشیمیایی عناصر خاکی نادر و اثرات اکولوژیکی و زیست‌محیطی آن‌ها در نتیجه کاربرد وسیع این عناصر در تولیدات کشاورزی به‌عنوان کودهای ریزعنصر و هم‌چنین در صنعت می‌باشد چرا که یک منبع مهم عناصر نادر خاکی برای یک سیستم اکولوژیکی و یک فرآیند کلیدی در چرخه بیوژئوشیمیایی جهانی آن‌ها، هوازدهی سنگ است.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

آپاتیت، زیرکن، کانی‌های کربناتی، کانی‌های رسی، روتیل، اسفن، سربستیت، سوسوریت، کانی‌های اپاک، اپیدوت، لیمونیت و مولیت از جمله کانی‌هایی هستند که در توده نفوذی معدن مس سونگون، پتانسیل میزبانی عناصر خاکی نادر را دارند.

مقدار میانگین عناصر سربیم (79 ppm)، یوروپیم (1.41 ppm)، لانتانیم (38 ppm)، نئودیمیم (29 ppm) و پرازئودیمیم (8.47 ppm) در سنگ‌های توده نفوذی معدن مس سونگون مطابق جدول مقادیر آماری نسبت به مقدار متوسط سنگ‌های پوسته، افزودگی دارند. هم‌چنین مقدار میانگین عناصر دیسپروزیم (2.05 ppm)، اریبیم (1.01 ppm)، گادولینیم (3.28 ppm)، اسکاندیم (5.7 ppm)، ساماریم (3.87 ppm)، تربیم (0.4 ppm)، ایتربیم (7.3 ppm) و ایتربیم (0.6 ppm)، نسبت به مقدار کلارک، کاهش‌دهی دارند.

مقدار متوسط کل عناصر خاکی نادر 13.85 ppm است که اگر کل ذخیره قطعی معدن مس سونگون را ۱ میلیارد تن در نظر بگیریم، ۱۳۸۵۰ تن ذخیره بالقوه عناصر خاکی نادر در معدن مس سونگون می‌باشد.

عناصر نادر خاکی معمولاً با یکدیگر هم‌بستگی مثبت دارند ولی در یک تقسیم‌بندی مطابق جدول ضریب هم‌بستگی پیرسون، لانتانیم، سربیم، پرازئودیمیم، نئودیمیم، یوروپیم و گادولینیم، دارای ضریب هم‌بستگی مثبت با همدیگرند. ضریب هم‌بستگی عناصر تربیم، دیسپروزیم، ایتربیم، اریبیم، اسکاندیم، ساماریم و ایتربیم، با یکدیگر مثبت است.

عناصر خاکی نادر بر اساس نمودار آنالیز خوشه‌ای، گروه‌های مهم زیر را شامل می‌شوند: - ایتربیم، ایتربیم، اریبیم، اسکاندیم و تربیم. - گادولینیم، ساماریم و دیسپروزیم. - نئودیمیم و پرازئودیمیم. - سربیم و لانتانیم.

پیشنهاد می‌گردد به‌خاطر اهمیت زیست‌محیطی برخی عناصر از جمله عناصر نادر خاکی و نزدیکی ذخیره‌گاه زیست‌کره ارسباران با تنوع اکولوژیکی، زیستی، گیاهی، جانوری و چشم‌اندازهای بکر طبیعی، فعالیت‌های معدن‌کاری همواره مورد پایش زیست‌محیطی قرار گیرند. مدیریت صحیح، کارآمد و پویای زیست‌محیطی به‌صورت مستمر اعمال شود تا مبادا غفلت گردیده و فعالیت‌های معدن‌کاری از مسیر توسعه پایدار، منحرف شود و نیز مطالعه جامعی در چرخه ژئوشیمیایی محیط‌های مختلف منطقه اعم از آب، خاک، رسوب، گردوغبار، سنگ، گیاه، جانور و انسان با محوریت زمین‌شناسی پزشکی صورت گیرد.

تشکر و قدردانی

نویسندگان بر خود لازم می‌دانند از امور تحقیق و توسعه مجتمع مس سرچشمه و مجتمع مس سونگون به‌خاطر حمایت‌های مالی و فکری، قدردان و سپاسگزار باشند.

منابع

Alavi, M. (2004). Regional Stratigraphy of the Zagros Fold-Thrust Belt of Iran and Its Proforeland Evolution. American Journal of Science, 304, 1-20.

- Anders, E. and Grevesse, N. (1989). The Abundances of the Elements: Meteoritic and Solar. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 53, 197-214.
- Balaram, V. (2019). Rare earth elements: A review of applications, occurrence, exploration, analysis, recycling, and environmental impact. *Geoscience Frontiers*, 10, 1285-1303.
- Balaram, V. (2022). Rare Earth Element Deposits—Sources, and Exploration Strategies. *J. Geol. Soc. India*, 98, 1210–1216.
- Balaram, V. (2023). Potential Future Alternative Resources for Rare Earth Elements: Opportunities and Challenges. *Minerals*, 13, 425.
- Barker, J. C., Van Gosen, B. S. (2012). Alaska's rare earth deposit and resource potential. *Mining Engineering*, 64, 20–32.
- Bazin, D., Hubner, H. (1969). Copper deposits in Iran: *Geol. Surv. of Iran, Rep. No. 13*, 232 p.
- Cabanis, B. and Lacolle, M. (1989). Le diagramme La/10- Y/15- Nb/8: un outil pour la discrimination des series volcaniques et la mise en evidence des processus de melange et/ ou de contamination crustale. *C. R. Acad. Sci. II*, 309, 2023- 2029.
- Cao Xinde, Wang Xiaorong and Zhao Guiwen. (2000). Assessment of the bioavailability of rare earth elements in soils by chemical fractionation and multiple regression analysis. *Chemosphere*, 40, 23–28.
- Castillo, P.R., Rigby, S.J., and Solidum, R.U. (2006). Origin of high field strength element enrichment in volcanic arcs: geochemical evidence from the Sulu Arc. *Southern Philippines, Lithos*, 1552, 44 p.
- Castor, SB, Hedrick, JB. (2006). Rare Earth Elements, In: *British Geological Survey. Natural Environment Research Council*, pp: 1-5.
- Chakhmouradian, A.R., and Zaitsev, A.N. (2012). Rare earth mineralization in igneous rocks—Sources and processes: *Elements*, v. 8, no. 5, p. 347–353.
- Charalampides, G., Vatalis, K., Karayannis, V. and Baklavariadis, A. (2016). Environmental defects and economic impact on global market of rare earth metals. *20th Innovative Manufacturing Engineering and Energy Conference, Materials Science and Engineering* 161.
- Dilioha II and Onwualu-John JN. (2016). The Economic Potentials of the Rare Earth Elements in the Basaltic Rocks of Ameta. *Southern Benue trough Nigeria, Journal of Environmental & Analytical Toxicology*.
- Dixon, C.J., Pereira, J. (1974). Plate tectonics and mineralization in the Tethyan region: *Mineral. Deposita*, V. 9, pp. 185 – 198.
- Dostal, Jaroslav, Kontak, Daniel J., Karl, Susan M. (2014). The Early Jurassic Bokan Mountain peralkaline granitic complex (southeastern Alaska): Geochemistry, petrogenesis and rare-metal mineralization. *Lithos*, 202-203, 395-412.
- EPA. (1995). "Historic Hardrock Mining: The West's Toxic Legacy". United States Environmental Protection Agency, 908-F-95-002.
- EPA. (2012). Rare Earth Elements: A Review of Production, Processing, Recycling, and Associated Environmental Issues. R-12/572.
- Foley F., Norman J., Pearson N. J., Rushmer T., Turner S. and Adam J. (2013). "Magmatic evolution and magma mixing of Quaternary adakites at Solander and little Solander Islands, New Zealand". *J. Petrol.*, 54, 1-42.
- Fulginitis P.s Gioncadas A. and Sbranas A.s. (1999). Rare element (REE) behaviour in the alteration facies of the active magmatic-hydrother- mal system of Vulcano (Aeolian Islandss Italy). *Journal of Volcanology and Geothermal Researchs*, 88, 325-342.
- Geol. Soc. Lond. (2011). Rare earth elements. A briefing note by the Geological Society of London.
- Gill, J.B. (1981). *Orogenic Andesites and Plate Tectonics*. Berlin, Springer-Verlag, 358p.
- Harris, N. B. W., Pearce, J. A. & Tindle, A. G. (1986). Geochemical characteristics of collision zone magmatism. *Geological Society Special Publication* 19: 67-81.
- Harris, N. B. W. & Inger, S. (1992). Trace element modelling of pelite-derived granites. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 110: 46-56.
- Hawkesworth, C.J., Hergt, J.M., Ellam, R.M., and McDermott, F. (1991). Element fluxes associated with subduction related magmatism. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 335, 393-405.
- Henderson, Paul. (1984). General geochemical properties and abundances of the rare earth elements. chap. 1 of Henderson, Paul, ed., *Rare earth element geochemistry*: Amsterdam, Netherlands, Elsevier, *Developments in Geochemistry series*, v. 2, p. 1–32.
- Hezarkhani, A. (2006). Petrology of the intrusive rocks within the Soungoun Porphyry Copper Deposit. *Azerbaijan, Iran, Journal of Asian Earth Sciences*, V. 28, pp. 409 – 422.
- Hezarkhani, A., Williams-Jones, A.E. (1998). Controls of alteration and mineralization in the Soungoun porphyry copper deposit. *Iran: evidence from fluid inclusions and stable isotopes: Econ. Geol.*, V. 93, pp. 651 – 670.

- Hezarkhani, A., Williams-Jones, A.E., Gammons, C.H. (1999). Factors controlling copper solubility and chalcopyrite deposition in the Soungoun porphyry copper deposit. Iran: Mineralium Deposita, V. 34, pp. 770 – 783.
- Hoseinzadeh, Mohammad Reza, Maghfouri, Sajjad, Moayed, Mohsen, Hadavi Chaharborj, Zahra, Amel, Nasir. (2023). Geology, geochemistry and distribution pattern of elements in alteration zones of Naqduz-Zaylik, Arasbaran magmatic zone. Iranian Journal of Geology, N. 65.
- ICF. (2011). Literature Review of Urban Mining Activities and E-Waste Flows. Prepared for the U.S. Department of Energy, Office of Intelligence and Counterintelligence, International Coaching Federation, January 21.
- Jabbarzadeh, Zohreh, Hoseinzadeh, Mohammad Reza, Moayed, Mohsen, Faramarzi, Rozgar. (2014). Geochemistry Investigation of secondary and rare elements (rare earth) in the mineralization vein of base metals in Yaraloujeh area (northwest of Ahar-East Azerbaijan). Iranian Journal of Geology, N. 37, 45 – 61.
- Jamshidi, Khadije, Ghasemi, Habibollah. (2015). Petrology, geochemistry and petrogenesis of North Bashtin adakitic domes. Sabzevar, Ph.D. Thesis University of Shahrood, 262 p.
- Jankovic, S. (1997). The Carpatho – Balkanides and adjacent area: a sector of the Tethyan Eurasian metallogenic belt. Mineralium Deposita, V. 32, pp. 426 – 433.
- Justin Paul & Gwenette Campbell. (2011). Investigating Rare Earth Element Mine Development in EPA Region 8 and Potential Environmental Impacts. EPA Document-908R11003.
- Kadkhodai Arab, F., Sadeghian, M. (2016). Stratigraphical position and petrogenesis of the Neogene basalts in west of Ahmad - Abad - Khartooran (SE Shahrood). Master's thesis, Shahrood University of Technology, 151 p.
- Karakaya N. (2009). REE and HFS element behaviour in the alteration facies of the ErenlerDagl Volcanics (Konyas Turkey) and kaolinite occurrence. Journal of Geochemical Exploration, 101, 185-208.
- Keppler H. (1996). "Constraints from partitioning experiments on the composition of subduction zone fluids". Nature, 380, 237-240.
- Klaus J. Schulz, John H. DeYoung, Jr., Robert R. Seal II, and Dwight C. Bradley. (2017). Critical Mineral Resources of the United States—Economic and Environmental Geology and Prospects for Future Supply. U.S. Geological Survey.
- Kogarko, L.N., Williams, C.T., and Woolley, A.R. (2006). Compositional evolution and cryptic variation in pyroxenes of the peralkaline Lovozero intrusion. Kola Peninsula, Russia: Mineralogical Magazine, v. 70, no. 4, p. 347–359.
- Kumari, Archana, Panda, Rekha, Kumar Jha, Manis, Kumar, J. Rajesh, Lee, Jin Young. (2015). Process development to recover rare earth metals from monazite mineral: A review. Minerals Engineering, 79, 102-115.
- Lescuyer, J.L., Riou, R. (1976). Geologie de La region de Mianeh (Azerbaijan), Contribution del etude du volcanism Tertiaire del Iran. These 2eme cycle, Grenoble, 234 p.
- Levinson, A.A. (1980). Introduction to exploration geochemistry. Second Edition, Applied Publishing Company Ltd., 924 p.
- Mahmoudi, Shahriar, Khajaei, Ali Mohammad. (2019). Petrogenesis and tectonic setting of young adakitic volcanic rocks in Hasanabad, Zarashak valley. southwest of Yazd, IRQUA., V. 5, N. 1.
- Martin, H. (1986). Effect of steeper Archean geothermal gradient on geochemistry of subduction-zone magmas. Geology, 14: 753–756.
- Martin, H., Smithies, R. H., Rapp, R., Moyen, J. F., Champion, D. (2005). "An overview of adakite, tonalite-trondhjemite-granodiorite (TTG), and sanukitoid: re-lationships and some implications for crustal evolution". Lithos. Vol. 79, pp. 1–24.
- McDonough, W. F., & Sun, S.-S. (1995). The Composition of the Earth. Chemical Geology, 120, 223-253.
- McKay, G.A. (1989). Partitioning of rare earth elements between major silicate minerals and basaltic melts. chap. 3 of Lipin, B.R., and McKay, G.A., eds., Geochemistry and mineralogy of rare earth elements: Washington, D.C., The Mineralogical Society of America Reviews in Mineralogy series, v. 21, p. 45–77.
- Mehrpour, M. (1993). Contributions to the geology, geochemistry, ore genesis and fluid inclusion investigation on Soungoun Cu – Mo porphyry deposit. North-west of Iran, Doctoral thesis, Hamburg University, 245 p.
- Mohammadi, Fatemeh, Ebrahimi, Mohammad and Mokhtari, Mir Ali Asghar. (2016). Petrology and geochemistry of Homijan granitoid and associated felsic rocks. (SW Bahabad, Central Iran), GeoSciences, V. 25, N. 98, p. 223-236.
- Moshanir. (2008). Environmental risk assessment studies in Songun copper complex. First stage, Report No. 6434, 91 p.
- Muchangoss A. C.s. (2006). The mobility of rare earth and other elements in process of alteration of rhyolitic rocks to bentonite (Lebombo Volcanic Mountainous Chains Mozambique). Journal of Geochemical Explorations, 88, 300-303.
- Muller, G. (1979). Schwermetalle in den sedimentaen des Rheins- Veranderungen seit 1971, Umsch. Wiss. Tech, V. 79, pp. 778 – 783 (with English abstract).

- Nasr Esfahani, Ali Khan, Shojaei, Behafarin. (2012). Petrology and genesis of Vash granitoid, NW Natanz (Isfahan). *Petrology*, No. 8, p. 99-114.
- Nawshad Haque, Anthony Hughes, Seng Lim, Chris Vernon. (2014). Rare Earth Elements: Overview of Mining, Mineralogy, Uses, Sustainability and Environmental Impact.
- Nicholson, K. N., Black, P. M., Hoskin, P. W. O., Smith, I. E. M. (2004). Silicic volcanism and back-arc extension related to migration of the late Cenozoic Australian-Pacific plate boundary. *Journal of volcanic and geothermal research* 131: 295 – 306.
- Pang Xin, Li Decheng, An. (2002). Application of rare-earth elements in the agriculture of China and its environmental behavior in soil. *Environ. Sci. Pollut. R.* 9, 143–148.
- Pearce, J.A. (1982). Trace element characteristics of lavas from destructive plate boundaries. In: Thorpe, R.S. (ed.), *Andesites: Orogenic Andesites and Related Rocks*, Jon Wiley and Sons, New York, 525-548.
- Pearce, J.A. (1983). The role of sub-continental lithosphere in magma genesis at destructive plate margins. In: Hawkesworth, C.J., Norry, M.J. (eds.), *Continental Basalts and Mantle Xenoliths*, Shiva, Nantwich, 230–249.
- Pearce, J.A. (2008). Geochemical fingerprinting of oceanic basalts with applications to ophiolite classification and the search for Archean oceanic crust. *Lithos*, 100, 14- 48.
- Pearce, J. A., Harris, N. B. W. and Tindle, A. G. (1984). Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *Journal of Petrology*, 25: 956-983.
- Rashidi, Sara, Khorasanipour, Mahdi. (2015). Chemical separation of rare earth elements in mining and ore dressing tailings of Sarcheshmeh copper mine using BCR selective extraction method. The 2th international specialized congress of Earth Sciences, Tehran, Iran.
- Rollinson, H.R. (1993). *using geochemical data: Evaluation, presentation, And interpretation: Exess*, England, Longman scientific and The chemical, 325 pp.
- Ross, P.S., Bedard, J.H. (2009). Magmatic affinity of modern and ancient subalkaline volcanic rocks determined from trace-element discriminant diagrams. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 46, 823-839.
- Sadeghi, Ali, Sadeghian, Mahmood. (2009). Petrology and geochemistry of granitoidic plutons, Sheshtamad (South Sabzevar). Master's thesis, Shahrood University of Technology, 184 p.
- Schandl, E.S. and Gorton, M. P. (2002). Application of high field strength elements to discriminate tectonic setting in VMS environment. *Economic Geology*, 97(3): 629-642.
- Schluep, M., C. Hagelueken, R., Kuehrc, F., Magalinic, C., Maurerc, C., Meskersb, E., Muellera, F., Wang. (2009). Recycling- from e-waste to resources. United Nations Environment Programme & United Nations University.
- Shahabpour, J. (1994). Post mineralization breccia dikes from the SarCheshmeh porphyry copper deposit, Kerman, Iran: *Exploration and Mining Geology*, V. 3, pp. 39 – 43.
- Shahabpour, J., Kramers, J.D. (1987). Lead isotope data from the Sarcheshmeh porphyry copper deposit, Iran, *Mineralium Deposita*, V. 22, pp. 275 – 281.
- Shahi, Ali, Aftabi, Alijan, Esmaeilzadeh, Esmat, mazaheri, nader, Sheikhfakhradini, Sara. (2012). Environmental impact assessment of heavy metals in the waste rocks of Soungoun mine. 31st meeting of earth sciences, Tehran, Iran.
- Shahi, Ali, Aftabi, Alijan. (2013). Investigation on the toxic and heavy elements in waste rocks at Soungoun porphyry copper mine. Master's thesis, Shahid Bahonar University of Kerman, 316 p.
- Shirazi, Aref, Hezarkhani, Ardeshir, Shirazi, Adel. (2016). Investigating of environmental and biological effects of rare earth elements with a special focus on industrial and mining pollution. The 8th National Conference & Exhibition on Environmental Engineering, Tehran, Iran.
- Soltani, Fatemeh, Afzal, Peyman, Asghari, Omid. (2014). Delineation of alteration zones based on Sequential Gaussian Simulation and concentration-volume fractal modeling in the hypogene zone of Sungun copper deposit, NW Iran. *Journal of Geochemical Exploration*, 140, 64-76.
- Srivastava, R.K., and Singh, R.K. (2004). Trace element geochemistry and genesis of Precambrian sub-alkaline mafic dikes from the central Indian craton: evidence for mantle metasomatism, *Journal of Asian Earth Sciences*, 23, 373-389.
- Sun, S.S. and McDonough, W.F. (1989). Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts: Implications for Mantle Composition and Processes. In: Saunders, A.D., Norry, M.J., Eds., *Magmatism in the Ocean Basins*. Geological Society, London, Special Publications, 42, 313-345.
- Tabatabai-Rezaei, M.D., Aftabi, A. (2001). Geochemical investigation on the exploratory significance of litho-geochemical halos in Soungoun porphyry (copper-molybdenum)-skarn (copper-silver-gold) mine, Ahar, Azerbaijan. Master's thesis in Economic Geology, Shahid Bahonar University, Kerman, 400 p.
- Talesh Hosseini, Sajjad, Asghari, Omid, Pahlavani, Parham. (2020). A hybrid approach to model the dykes in Sungun porphyry copper deposit using Dempster-Shafer theory. *Arabian Journal of Geosciences*, 1279, 1-20.

- Thompson, R. N. (1982). "Magmatism of the British Tertiary volcanic province". *Scottish Journal of Geology*, Vol. 18: 49-107.
- USDOE. (2010). "Critical Materials Strategy". United States Department of Energy.
- USDOE. (2011). "Critical Materials Strategy". United States Department of Energy.
- Wilson M. (1989). *Igneous petrogenesis a global tectonic approach*. Department of earth science, University of leeds. 466 p.
- Wood D. A.s. (2006). Rare element systematic of acidic maters from the Taupo volcanic zone. *Newzealand Journal of Geochemical explorations*, 99, 424-427.
- Xiaoyue Du & T. E. Graed. (2011). *Uncovering the Global Life Cycles of the Rare Earth Elements*. Center for Industrial Ecology, School of Forestry and Environmental Studies, Yale University, New Haven CT 06511.
- Xinde, Cao, Xiaorong, Wang, and Guiwen, Zhao. (2000). Assessment of the bioavailability of rare earth elements in soils by chemical fractionation and multiple regression analysis. *Chemosphere* 40, 23–28.
- Zarasvandi, Alireza, Rezaei, Mohsen, Sadeghi, Martiya, Lentz, David, Adelpour, Mansour, Pourkaseb, Hooshang. (2015). Rare earth element signatures of economic and sub-economic porphyry copper systems in Urumieh–Dokhtar Magmatic Arc (UDMA), Iran. *Ore Geology Reviews*, V. 70, 407 – 423.
- Zhaoliang Song, Congqiang Liu, Guilin Han, Zhongliang Wang, Zhaozhou Zho, Cheng Yang. (2006). Enrichment and Release of Rare Earth Elements during Weathering of Sedimentary Rocks in Wujiang Catchments. *Southwest China, Journal of Rare Earths* 24, 491–496.