

Research Article

## The genesis of rare earth elements in the Senj polymetallic deposit(North of Karaj), evidence for mineralization potential in the central Alborz zone

Ali Bastami<sup>1</sup>, Mohamadreza Hezarhee\*<sup>2</sup>, Abbas Asgari<sup>1</sup>, Mohammad ali Aliabadi<sup>1</sup>

1- Earth Sciences department, Mahallat Branch, Islamic Azad University, Mahallat, Iran

2- Geological survey & mineral exploration of Iran

**Keywords:** *Origin, Rare Earth Elements, Isotope, Senj, Alborz.*

### 1-Introduction

due to the increasing progress of today's technology and the use of rare earth elements and the strategic nature of these elements, as well as the country's industry's need for these elements, the study and exploration of these elements are of great importance. Iran's highest concentrations of rare earth elements are in phosphate and iron-apatite deposits and coal ashes. It is also possible to mention the lower concentration of these elements in bauxite deposits, laterites, and placers. The distribution of these elements in different deposits has been determined based on the studies conducted on these deposits. Still, in the Senj deposit from the central Alborz zone, a new type of mineralization of rare earth elements with significant grades was observed, which can promise the mineralization sector. Widespread in this zone. Scattered intrusive masses in the central Alborz area of late Eocene to Oligocene age (23 to 37 million years), with infiltration in pyroclastic rocks of the Karaj Formation and its equivalent, lead to the occurrence of deposits and various mineral signs with an epithermal nature (vein type). And proximity (skarn) in the central part of the Albers magmatic arc (Ghorrbani et al., 2006; Valizadeh et al., 2007) (Fig. 1). The intrusive volcanic rocks in central Alborz host many metallic and non-metallic ore deposits and traces such as copper, iron, manganese, lead, and zinc and building stones, which are the continuous occurrence of volcanic activities and the subsequent occurrence of various siliceous, phyllic, propylitic and Similarly, it has become a suitable platform for tracking mineral signs (Khoei et al., 2008). This deposit is 60 kilometers west-northwest of Tehran and 15 kilometers north of Kurdan. In this deposit, mineralization in the form of molybdenite, chalcopyrite along with the secondary mineral of cobalt (erythrine), is located at the lower contact point of a flow of monzodiorite, latite, andesite porphyry with thin shale and tuffite sediments of the Eocene layer inside the shale-tuffite deposits. Porphyry latite monzodiorite Sill with a thickness of more than 300 meters and a length of more than 2 kilometers inside the Eocene clastic-meta clastic deposits on the south side of the anticline below the Sill, which is a skarn-like epidotite-chlorite zone with a thickness of several centimeters to more than 0.5 meters.

### 2-Geology of the mining area

Regional faults and folds in the Alborz region have the direction of west-northwest and east-northeast. The Karaj intrusive Sill, which is known as one of the enormous intrusive masses in the region and the primary driver of mineralization in the Senj region, has also been replaced by the west-northwest direction of the Adraan transgression among the pyroclastic rock units of the Karaj Formation. The most extensive outcropping rock units in Senj Mine are the igneous rocks of the Karaj Formation of the Eocene Age. The upper tuff member consists of porphyry tuff and andesite porphyry tuff units as the host of mineralization in the Senj area (Fig. 2) intrusive Sill at the foundation of Karaj Dam, which has a plate-shaped appearance with a thickness of 460 meters and a SW-NE direction of 60 among the igneous units of the formation. Karaj has been replaced. According to Valizadeh (1985), the lithological composition of this intrusive Sill

\* Corresponding author: hezarhee@gmail.com

DOI: 10.22055/aag.2023.41671.2310

Received: 2022-08-27

Accepted: 2023-02-12

from the margin towards the center includes four parts (1) rapid freezing margin (porphyry gabbro), (2) gabbroic part (hyalo-microlitic porphyry) (3) diorite part (granular) ) and (4) the monzonitic section (granular to ophitic), all of which are exposed in the mineral range. As can be seen in the geological map of the mineral area and according to the location of ore formation is in the metasomatism contact zones in the monzonitic to monzodioritic Sill (Fig. 3a) parallel to the igneous rocks and in the host of the tuff rock units. Up to andesite-tuff porphyry has occurred. (Fig. 3b).

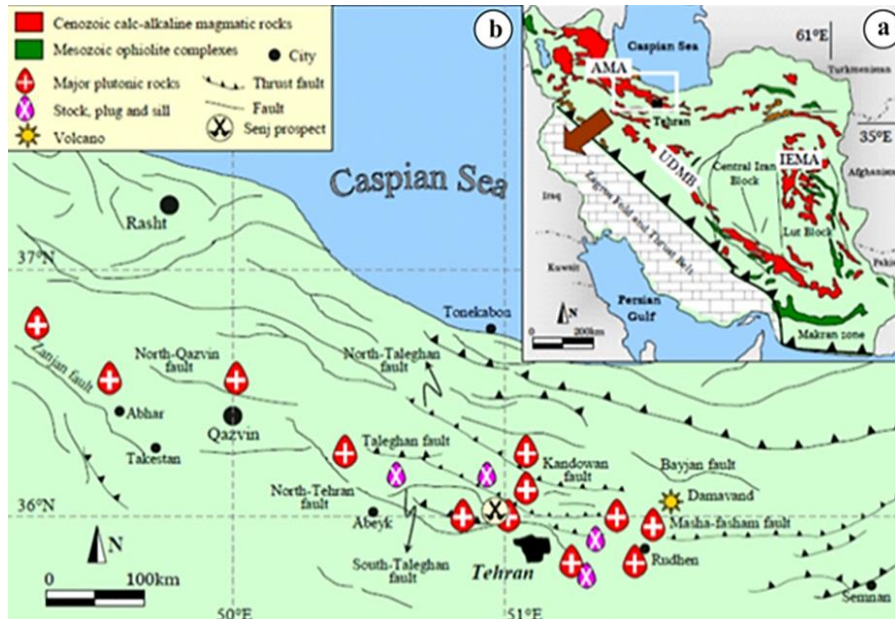


Fig. 1. (a) Tectonomagmatic map of Iran and the location of the Alborz magmatic arc in it (base map from Nogol-Sadat and Almasian, 1993), and (b) Map of faults and distribution of main and secondary intrusive masses in central Alborz (with changes from Valizadeh et al., 2007) and the location of the geometer in it. Abbreviations include Alborz magmatic arc (AMA), Urmia Dokhtar magmatic belt (UDMB), Eastern Iran Magmatic Complex (IEMA)

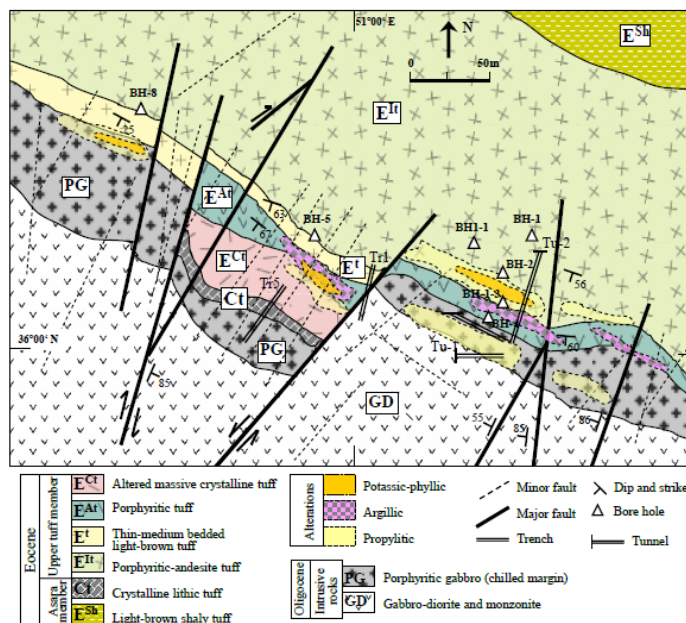


Fig. 2. The simplified geological map of the mineralogical area on a scale of 1:1000, where the location of drilling boreholes, trenches and main faults related to ore production is specified. (with changes from Puchabkavosh 2007).



Fig. 3. (a) Close-up view of monzodiorite unit and (b) The location of the metasomatism contact zone in the monzodiorite Sill with porphyry tuff at the location of the mine's main tunnel.

### 3-Geochemical studies

Lithogenochemical sampling by chip sampling in the form of 4 profiles with profile intervals of 450 to 600 meters in the northeast-southwest direction and with a baseline at an inclination angle of 36 degrees with variable station distances relative to each other and the order of placing the profiles in The heuristic range of the surveyor from east to west, respectively, consists of profile 2-east, profile 1-east, profile 2-west, profile 1-west, all around a hypothetical baseline between profiles 1-west and 1-east along the azimuth Aligned approximately 36 degrees. During this project, 63 stone samples of various stone complications were selected and harvested. (Fig. 4). Studying the genetic relationship of each rock species observed in the region with the discovered mineralization system is another point that will be discussed further by presenting chondritic diagrams.

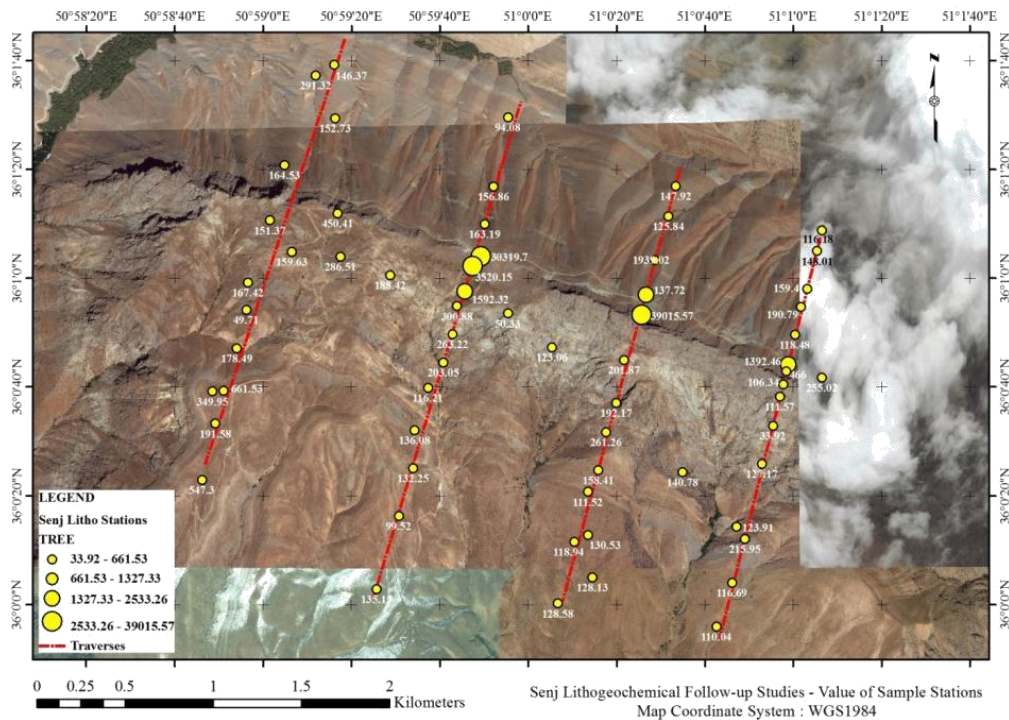


Fig. 4. Dispersion map of the sampling stations of the stone outcrops of the exploratory range of the Senj, in which the total values of rare earth elements are shown in the form of a comparative gradient pattern at the location of each station.

The chondritic diagram of the lithogeochemical samples taken from the study area is presented in Fig. 5. Although it is believed that the intrusive mass is the only phase that provides the content of rare earth elements, the host rock also fed hydrothermal fluids from the point of view of rare earth elements due to its slightly alkaline nature.

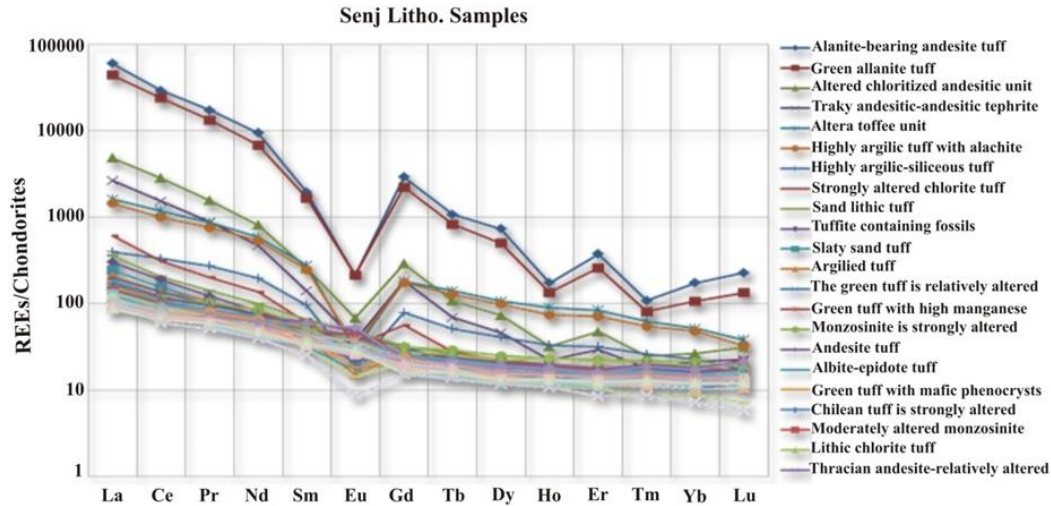


Fig. 5. Spydrogram diagram resulting from the normalization of lithogeochemical samples taken from the exploratory range of Senj concerning the chondritic values provided by McDonough.

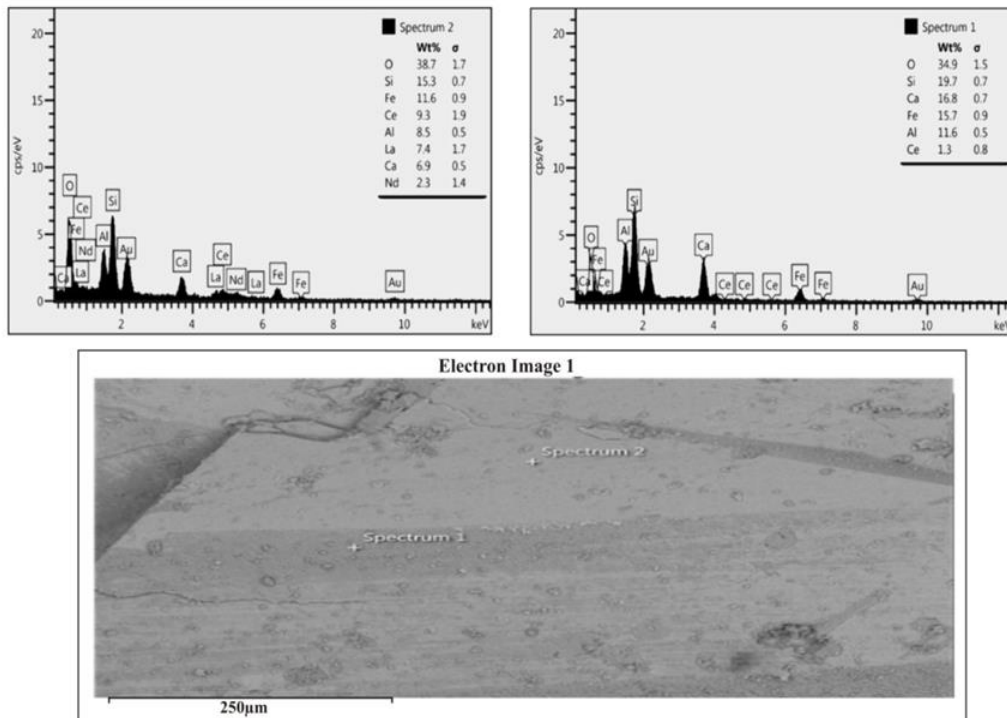


Fig. 6. Schematic of objectives 1 and 2 in the electron microscope (SEM) image of a typical allanite mineral sample obtained from the sample Se-L14 along with the results of point analysis.

#### 4- High-grade mineralogy

Considering some quantitative and qualitative inadequacies in the results of XRD studies, as well as the incidence of high diffraction in the spectral patterns obtained from the two priority samples, Se-L14 and Se-L20, two typical samples were considered. The primary host of rare earth elements in these samples was carefully selected, and a part of it was softened with the help of an opal mortar under strictly controlled and

controlled laboratory conditions to avoid any side contamination, and the XRD results indicated the presence of albite minerals. Epidote was allanite type (Ca, Ce, La, Nd, Y)(Al<sub>2</sub>Fe)(Si<sub>2</sub>O<sub>7</sub>)(SiO<sub>4</sub>)O(OH), calcite and chlorite, and in SEM analysis at the Applied Research Center of Geological and Mineral Exploration Organization of Iran, there were 13 points in total. It was targeted from the typical sample of allanite mineral in high-grade samples (with the total grade of rare earth elements 3.06% and 4.4%, respectively). Point analysis showed that the main minerals of the mineralized part included an allanite phase scattered in The background of other paragenes, especially epidote, is Ca<sub>2</sub>(Al<sub>2</sub>Fe)(SiO<sub>4</sub>)(Si<sub>2</sub>O<sub>7</sub>)O(OH) pistasite type (Fig. 6).

### 5-Investigation of the sulfur isotope in the Senj deposit

Stable isotopes play an essential role in identifying the origin of minerals and determining the type of magmatic-hydrothermal solution. The important stable isotopes used in this regard are <sup>18</sup>O, <sup>34</sup>S-<sup>32</sup>S, D-H, and <sup>12</sup>C-<sup>13</sup>C. Isotopic studies of ore meter on chalcopyrite and molybdenite samples were carried out in the stable isotopes research laboratory of Arak University; a summary of the study method is given below: The isotope ratio mass spectrometer is designed to analyze simple gases such as N<sub>2</sub>, CO, SO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>. to measure <sup>34</sup>Sδ; Elemental Analyzer method was used in combustion mode. In this method, the sulfur in the sample is converted into SO<sub>2</sub> gas after entering the mass spectrometer; By determining the mass ratio of 66 to 64, the <sup>34</sup>Sδ parameter is determined, and SO<sub>2</sub> reference gas pulses were applied to compare the sample with the reference and check the stability of the system. To calibrate the SO<sub>2</sub> reference gas, the IAEA-S-4 standard with the certified value of CDT ‰<sup>34</sup>S = +16.9±0.2δ was analyzed using an elemental analysis device - isotope ratio mass spectrometer (EA-IRMS) in combustion mode. The results of measuring <sup>34</sup>Sδ in samples containing sulfur are reported in the table below. In the comparison of <sup>34</sup>S δ sulfur isotope changes in the Senj deposit with the ore-forming type of sulphide deposits in different porphyry and hydrothermal deposits, it is observed that it is most compatible with magmatic-hydrothermal deposits (Fig. 7).

### 6-Probable type of mineralization in the Senj deposit

The deposit is of hydrothermal type, and according to the characteristics of the mineral matter being highly variable from high-grade veins to intrusive rock, it is of the kind of polymetallic sulphide vein and replacement deposits with scattered texture and stockwork, and the type of mineralization can be any of the above. Uranium-rare earth elements, skarn type deposit of Mary Kathleen in Australia, is an essential and well-known deposit in the world, considered one of the skarns with non-carbonate host rock. The Mary Kathleen deposit has similarities with the IOCG deposits located in nearby areas in the Cloncurry belt of Australia. The mineralization of rare earth elements in the form of pseudo-skarn resulted from metasomatism (Scott, AK & Scott AG, 1985). A comparison of the mineralization type of rare earth elements in the Senj deposit with the large deposits of rare earth elements in the world shows that this deposit has many similarities with the Marie Catlin deposit, and the mineralization of rare earth elements in both of them is pseudo-skarn and as a result of metasomatism.

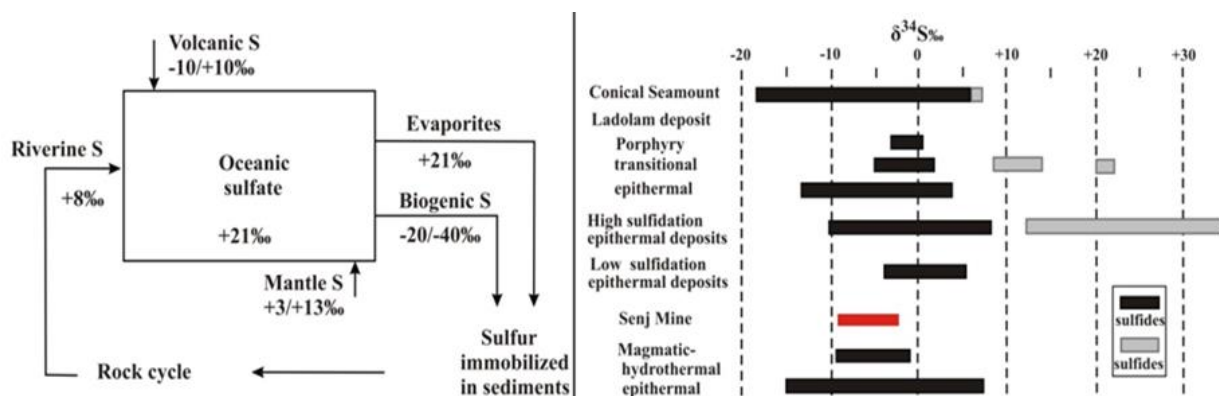


Fig. 7. sulphur <sup>34</sup>S δ isotope changes, the range of δ <sup>34</sup>S sulphur isotope changes in Senj deposit compared with different hydrothermal and porphyry deposits.

## 7-Conclusion

The results of geochemical studies in the Senj deposit indicate the existence of a valuable deposit in terms of mineralization of rare earth elements and base metals. In general, considering the importance of rare earth elements, in the following, we will examine the state of its geochemical concentration in the intrusive mass and the host rock. The concentration of rare earth elements is more favorable in the area of the intrusive Sill with monzogabbroic to monzonitic-sinomonzonitic composition and in the lower area of the Sill. Considering the ability of the ore meter to concentrate rare earth elements, investigating this type of mineralization in the mentioned areas is essential. It is hoped that it will lead to identifying other valuable deposits in this zone.

## 8-References

- Khoei, N., Qurbani, M., TajBakhsh, P., 1999. Copper deposits in Iran, book editing plan. Organization of Geology and Mineral Exploration of the country 64, 421.
- Nogul-Sadat, M.A.A., Almasian, M., 1993. Tectonic map of Iran in 1:100000 scale, Geological Organization of the country.
- Scott, A.K., Scott, A.G., 1985. Geology and genesis of uranium-rare earth deposits at Mary Kathleen, Northwest Queensland. Australasian Institute of Mining and Metallurgy Bulletin and Proceedings 08114-4346, 290(1), 79-89.
- Valizadeh, M.V., Abdulahi, H.R., Sadeghian, M., 2008. Geological Investigations of Main Intrusions of the Central Alborz. Scientific Quarterly Journal of Geosciences 17(67), 182-197. (in Persian) <https://doi.org/10.22071/gsj.2009.57829>

### HOW TO CITE THIS ARTICLE:

Bastami, A., Hezarhee, M., Asgari, A., Aliabadi, M., 2024. The genesis of rare earth elements in the Senj polymetallic deposit (North of Karaj), evidence for mineralization potential in the central Alborz zone. Adv. Appl. Geol. 14(3), 713-736.

DOI: 10.22055/aag.2023.41671.2310

URL: [https://aag.scu.ac.ir/article\\_19693.html](https://aag.scu.ac.ir/article_19693.html)

©2024 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

## خاستگاه عناصر نادر خاکی در کانسار پلی متال سنج (شمال کرج)، شاهدهی بر مستعد بودن کانه‌زایی این

### عناصر در زون البرز مرکزی

علی بستامی

دانشجوی دکتری زمین شناسی اقتصادی، گروه علوم زمین، واحد محلات، دانشگاه آزاد اسلامی، محلات، ایران

محمد رضا هزاره\*

سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور

عباس عسکری

گروه علوم زمین، واحد محلات، دانشگاه آزاد اسلامی، محلات، ایران

محمد علی علی آبادی

گروه علوم زمین، واحد محلات، دانشگاه آزاد اسلامی، محلات، ایران

\* Hezarhee@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۶/۰۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۲۳

### چکیده

باتوجه به پیشرفت روزافزون تکنولوژی امروزی و کاربرد بیش از پیش عناصر نادر خاکی و استراتژیک بودن این عناصر همچنین نیاز صنعت کشور به این عناصر، مطالعه و اکتشاف این عناصر از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد. کانسار پلی متال سنج در ۵۷ کیلومتری شمال غرب شهرستان کرج در استان البرز و در بخش مرکزی کمان ماگمایی البرز واقع شده است. در این منطقه توده ماگمایی از جنس مونزونیت تا مونزودیوریت به سن الیگوسن و در اثر فاز کوهزایی آلپین میانی به صورت سیل درون سنگ‌های آذرآواری توف تا آندزیت-توف پورفیری تزریق شده است که عمده تمرکز کانه‌زایی در زون‌های کنتاکت متاسوماتیسمی در محل همبری آن‌ها است. بررسی‌های ژئوشیمیایی کانسار نشان می‌دهند که میزان عیار تعدادی از عناصر نظیر مولیبدن، مس، طلا و عناصر نادر خاکی بطور استثنائی بالاست. یکی از نکات قابل توجه در این کانسار، ناهنجاری‌های بالای عناصر نادر خاکی سبک (Ce, La) و نیز تا حدی عناصر Y, Th است. غلظت La در نمونه‌های پرعیار از ۴۰۰ ppm تا ۲۳۷۰۰ ppm و Ce از ۴۲۰ تا ۴۲۰ ppm تغییر می‌کند. عناصر نادر خاکی بطور عمده در دو کانی آلانیت و آپاتیت تمرکز یافته است. مقایسه تغییرات ایزوتوپ گوگرد  $\delta^{34}\text{S}$  در کانسار سنج با تیپ کانه‌زایی کانسارهای سولفیدی نشان داد که بیشترین انطباق با کانسارهای آتشفشانی-گرمابی است.

**واژه‌های کلیدی:** خاستگاه، عناصر نادر خاکی، ایزوتوپ، سنج، البرز.

### ۱- مقدمه

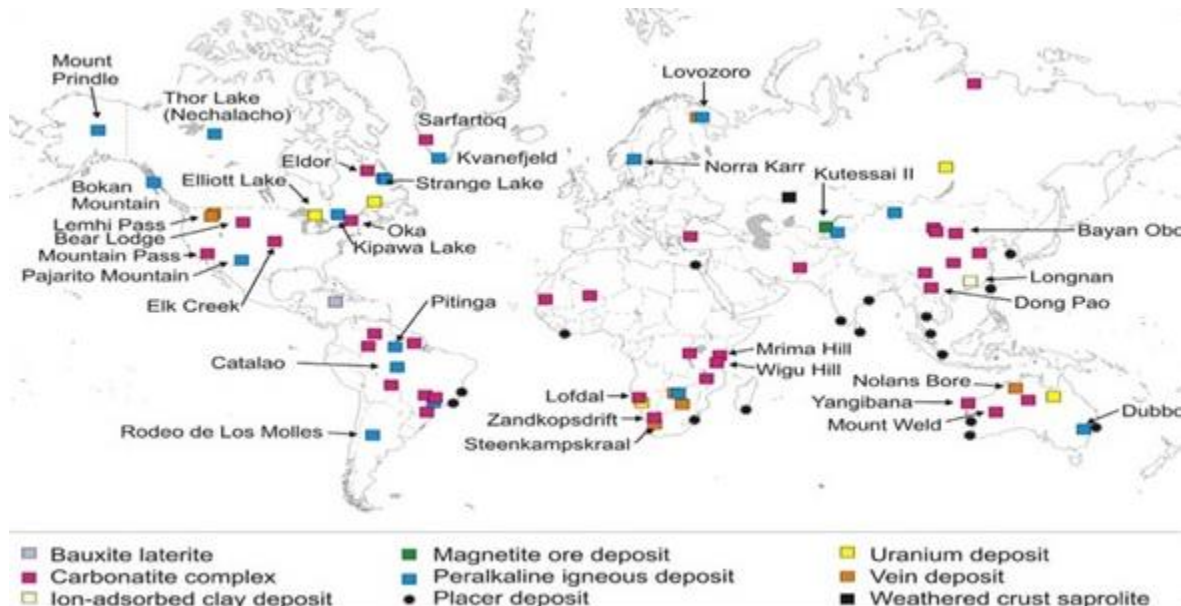
ماسه‌های ساحلی یافت می‌شود. همچنین بیشتر تمرکز عناصر نادر خاکی دنیا در کربناتیت‌ها که در ارتباط با آخرین مرحله سری ماگمایی قرار می‌گیرند، گزارش شده است. سه کانی اصلی دربرگیرنده این عناصر مونازیت و زنونیت و باستانزیت می‌باشد. از ذخایر و منابع مهم عناصر نادر خاکی در جهان می‌توان به کوه‌های پاس در جنوب کالیفرنیا ذخیره بایان اوپو در مرکز مغولستان و کایرونا سوئد اشاره نمود (Samiei Biraq et al., 2014).

عناصر کمیاب هیچگاه به صورت فلزات آزاد در پوسته زمین یافت نمی‌گردند و به‌طور طبیعی در کانی‌هایی که شامل ترکیبی از عناصر کمیاب گوناگون و غیر فلزات هستند یافت می‌شوند.

عناصر نادر خاکی شامل ۱۷ عنصر فلزی در جدول تناوبی می‌باشند. ۱۵ تای آن‌ها در گروه لانتانیدها قرار دارند و دوتای دیگر اسکاندیم و ایتیریم از گروه اول واسطه می‌باشند. عناصر نادر خاکی را به دو دسته عناصر نادر خاکی سبک شامل (La, Ce, Pr, Nd, Sm) و عناصر نادر خاکی سنگین شامل (Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Y) تقسیم‌بندی کرده‌اند (Tyler, 2004). به‌طور کلی عناصر نادر خاکی به لحاظ منشأ و پیدایش در دو تیپ کانی‌سازی اولیه همراه با توده‌های آذرین نفوذی و در رگه‌ها و دایک‌ها و پگماتیت‌ها و کانی‌سازی-ثانوی شامل تل‌ماسه‌ها و پلاسره‌های آواری و ذخایر بازمانده لاتریتی و

و متاسوماتیکی تقسیم می‌شوند (Richardson and Birkett, 1995). ذخایر ماگمایی معمولاً شکل توده آذرین مادر خود را می‌گیرند در صورتی که ذخایر متاسوماتیکی از نظر شکلی محدوده‌ای بین رگه و استوکورک تا زون‌های جانیشینی نامنظم، می‌باشند. همانطور که نقشه توزیع منابع جهانی عناصر نادر خاکی براساس خاستگاه نشان می‌دهد، کربناتیت‌ها بیشترین نوع ذخایر را به خود اختصاص می‌دهند (شکل ۱). در میزان تولید نیز براساس آمار سازمان زمین‌شناسی آمریکا در سال ۲۰۲۰، چین و آمریکا پیشتاز هستند و پس از آن‌ها میانمار، استرالیا و ماداگاسکار در مقام‌های بعدی قرار دارند.

باستنازیت (Bastnaesite)، مونازیت (Monazite) و زینوتیم (Xenotime) سه کانی مهم اقتصادی از بین بیش از ۲۰۰ کانی مهم شناخته شده‌ای هستند که دربردارنده عناصر کمیاب مهم و اصلی هستند. کانی‌های دربرگیرنده عناصر نادر خاکی که دارای اهمیت کمتری می‌باشند شامل: آلانیت (Allanite)، اگزینیت (Euxenite) و لوپاریت (Loparite) می‌باشند. کربناتیت‌ها یا سنگ‌های آذرین حاوی بیش از ۵۰ درصد کربنات، اختصاصاً حاوی میزان بالاتری از عناصر نادر خاکی نسبت به دیگر انواع سنگ‌ها بوده و اصولاً منبع اصلی عناصر نادر خاکی دنیا می‌باشند. ذخایر کربناتیتهای عناصر نادر خاکی به دو نوع ماگمایی



شکل ۱- نقشه توزیع منابع جهانی عناصر نادر خاکی براساس خاستگاه برگرفته از سازمان زمین‌شناسی آلاسکا ۲۰۱۷.

Fig. 1. Distribution map of global sources of rare earth elements by origin Retrieved from Alaska Geological Survey 2017.

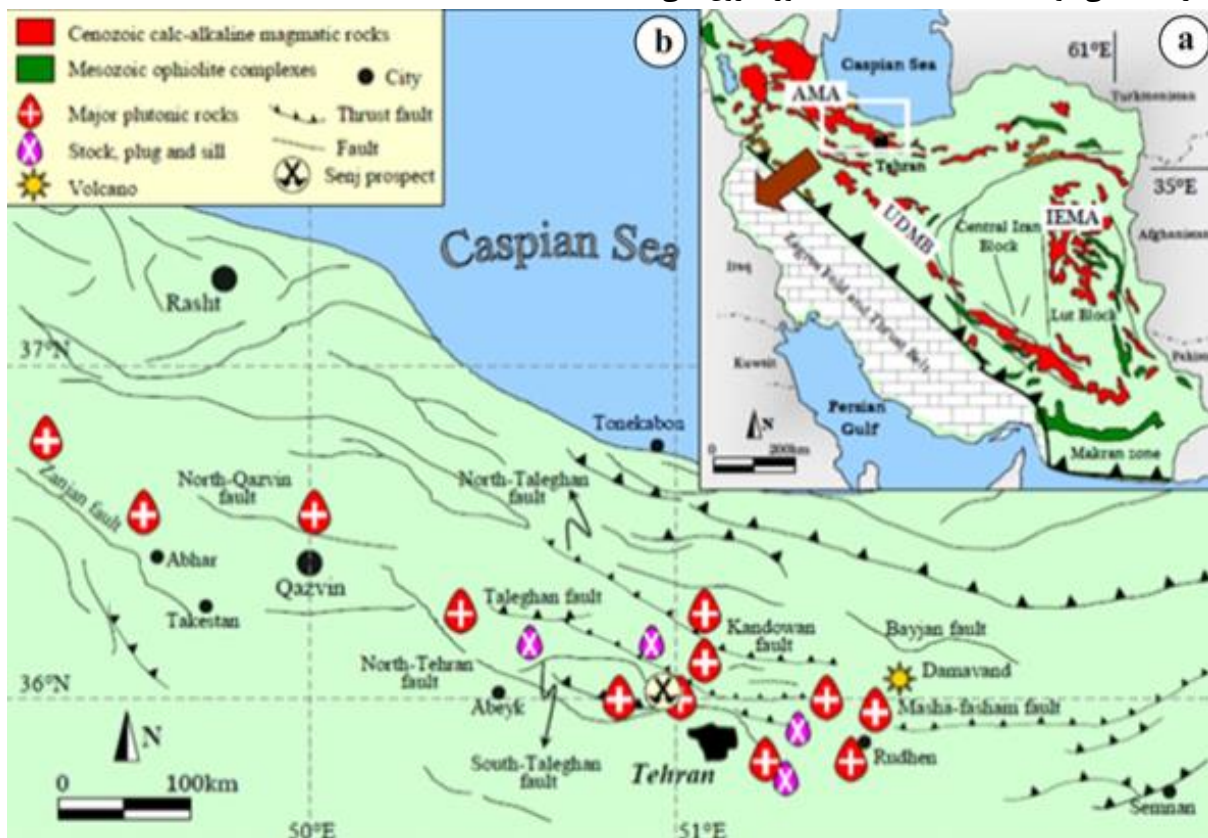
مشاهده شد که می‌تواند نویدبخش کانی‌سازی گسترده این عناصر در این زون باشد. توده‌های نفوذی پراکنده در پهنه البرز مرکزی به سن ائوسن پسین الیگوسن (۲۳ تا ۳۷ میلیون سال)، با نفوذ در سنگ‌های آذرآواری سازند کرج و معادل آن، منجر به رخداد ذخایر و نشانه‌های معدنی مختلفی با ماهیت اپی‌ترمال (نوع رگه‌ای) و مجاورتی (اسکارن)، در بخش مرکزی کمان ماگمایی البرز شده است (Valizadeh et al., 2008) (شکل ۲). سنگ‌های آتشفشانی و توده‌های نفوذی در زون البرز مرکزی میزبان ذخایر و آثار کانه‌زایی فلزی و غیرفلزی متعددی از قبیل

باتوجه به پیشرفت روزافزون تکنولوژی امروزی و کاربرد بیش از پیش عناصر نادر خاکی و استراتژیک بودن این عناصر و همچنین نیاز صنعت کشور به این عناصر، مطالعه و اکتشاف این عناصر از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد. بیشترین تمرکز عناصر نادر خاکی در ایران به ترتیب در کنسارهای فسفات و آهن-آپاتیت و خاکسترهای زغال می‌باشد (Aali et al., 2017). همچنین می‌توان به تمرکز کمتر این عناصر در کنسارهای بوکسیت و لاتریت‌ها و پلاسرها اشاره نمود. براساس مطالعات انجام شده در کنسار سنج از زون البرز مرکزی تیپ جدیدی از کانه‌زایی عناصر نادر خاکی با عیارهای قابل توجهی



به طول چند متر تا بیش از ۵۰ متر در حداقل ۱۰ جایگاه تمرکز دارد و بقیه طول سیل عاری از کانی‌سازی است. به‌صرفه به نظر می‌رسد که کانی‌سازی در ارتباط با نفوذ سیل به داخل نهشته‌های شیلی تشکیل شده که بسیار شبیه کانی‌سازی نوع اسکارن است. سیل مونزودیوریتی توسط یک سری گسل کوچک عرضی به‌میزان ۱ تا چند متر جابجا شده که احتمالاً این فعالیت تکتونیکی در تمرکزهای بعدی و ثانوی کانی‌سازی نقش ایفا نموده‌اند. کانسنگ پرعیار در این کانسار دارای ۱ درصد مس، ۰/۱۹ درصد نیکل، ۱/۵ درصد کبالت، ۱۰۲۰ گرم در تن مولیبدن و بیش از ۱ گرم در تن طلا است (Mofazli, 2014). بعد از انجام بررسی‌های دقیق‌تر بر روی محدوده سنج مشخص گردید که این کانسار علاوه بر مولیبدن دارای آنومالی‌های دیگری از جمله عناصر نادر خاکی می‌باشد.

مس، آهن، منگنز، سرب و روی است که رخداد مداوم فعالیت‌های آتشفشانی و متعاقب آن دگرسانی‌های متنوع سیلیسی، فیلیک، پروپیلیتیک، بستر مناسبی برای ردیابی نشانه‌های معدنی شده است (Khoei et al., 1999). این کانسار در فاصله ۶۰ کیلومتری باختر-شمال‌باختری تهران و ۱۵ کیلومتری شمال کردان قرار دارد. در این کانسار کانی‌سازی به‌صورت مولیبدنیت، کالکوپریت همراه با کانی ثانوی کبالت (اریترین) در محل تماس پائینی یک سیل مونزودیوریت، لاتیت، آندزیت-پورفیری با رسوبات شیلی و توفیتی نازک‌لایه ائوسن در داخل نهشته‌های شیلی-توفیتی قرار گرفته است. سیل مونزودیوریت-لاتیت پورفیری بیش از ۳۰۰ متر ضخامت و طولی بیش از ۲ کیلومتر دارد و در داخل نهشته‌های آواری-آذرآواری ائوسن نفوذ کرده است. ماده معدنی در نقاطی از کل طول سیل (حدود ۲ کیلومتر) دیده می‌شود که ممتد نیست بلکه به‌صورت زون‌هایی



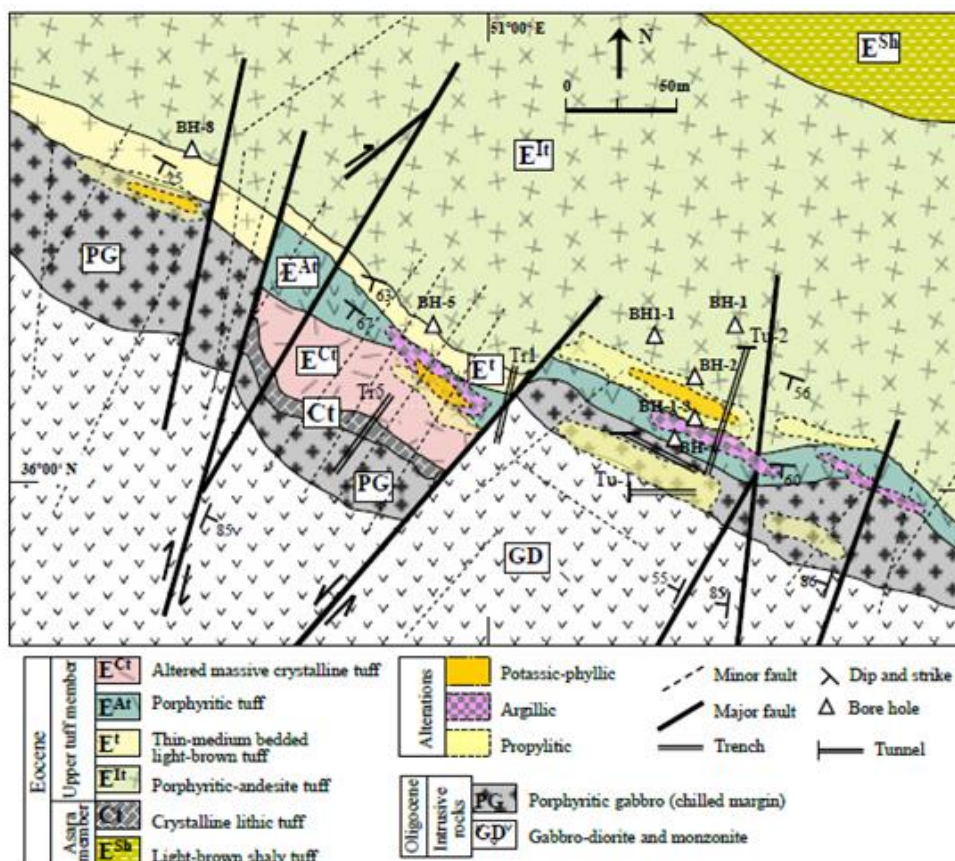
شکل ۲- (a) نقشه تکتونوماگمایی ایران و موقعیت کمان ماگمایی البرز در آن (Nogol-Sadat and Almasian, 1993) و (b) نقشه گسل‌ها و پراکندگی توده‌های نفوذی اصلی و فرعی در البرز مرکزی (Valizadeh et al., 2008) و موقعیت منطقه سنج در آن. حروف اختصاری شامل، کمان ماگمایی البرز (AMA)، کمربند ماگمایی ارومیه دختر (UDMB)، مجموعه ماگمایی شرق ایران (IEMA).

Fig. 2. (a) tectonomagmatic map of Iran and the location of the Alborz magmatic arc in it (Nogol-Sadat and Almasian, 1993), and (b) Map of faults and distribution of main and secondary intrusive masses in central Alborz (Valizadeh et al., 2008) and the location of the geometer in it. Abbreviations include, Alborz magmatic arc (AMA), Urmia Dokhtar magmatic belt (UDMB); Eastern Iran Magmatic Complex (IEMA).

۲- زمین شناسی منطقه معدنی

بطور عمده در محدوده البرز گسل های طولی در راستای شمال باختری-جنوب خاوری و گسل های عرضی در راستای شمال خاوری-جنوب باختری می باشند (Elyas-Zadeh et al., 2009). سیل نفوذی کرج که به عنوان یکی از بزرگترین توده های نفوذی منطقه و عامل اصلی محرک کانی سازی در منطقه سنج شناخته می شود، به موازات ناودیس آدرانبا در راستای غرب-شمال غرب در میان واحدهای سنگی آذرآواری سازند کرج جایگزین شده است (Tale Fazel et al., 2014). بطور کلی گسترده ترین واحدهای سنگی رخنمون یافته در محدوده معدن سنج متعلق به سنگ های آذرآواری سازند کرج به سن ائوسن است. عضو توف بالایی متشکل از واحدهای توف و آندزیت-پورفیری به عنوان میزبان کانی سازی در منطقه سنج هستند

(شکل ۳). بر اساس مطالعات قبلی (Valizadeh et al., 2008) ترکیب سنگ شناختی سیل نفوذی بنیان سد کرج که با ظاهر بشقابی شکل در میان واحدهای آذرآواری سازند کرج جایگزین شده است از حاشیه به سمت مرکز شامل چهار بخش (۱) حاشیه انجماد سریع (گابروپورفیری)، (۲) بخش گابرویی (هیالو-میکرولیتیک پورفیری)، (۳) بخش دیوریتی (گرانولار) و (۴) بخش مونزونیتی (گرانولار تا افیتیک) است؛ که همه این بخش ها نیز در محدوده معدنی رخنمون دارد. همانطور که در نقشه زمین شناسی محدوده معدنی و باتوجه به موقعیت تونل ها، گمانه ها و ترانسه های اکتشافی پیاداست، عمده تمرکز کانه زایی در زون های کنتاکت متاسوماتیسمی در محل همبری سیل مونزونیتی تا مونزودیوریتی موازی با سنگ های آذرآواری و در میزبان واحدهای سنگی توف تا آندزیت پورفیری رخ داده است (Hayatolghelbi, 2011) (شکل ۴).



شکل ۳- نقشه زمین شناسی ساده شده محدوده معدنی سنج در مقیاس ۱:۱۰۰۰ که در آن محل حفاری گمانه ها، ترانسه ها و گسل های اصلی مرتبط با کانه زایی مشخص شده است (Pichab, 2007).

Fig.3. The simplified geological map of the mineralogical area on a scale of 1:1000, where the location of drilling boreholes, trenches and main faults related to ore production is specified.(Pichab, 2007).



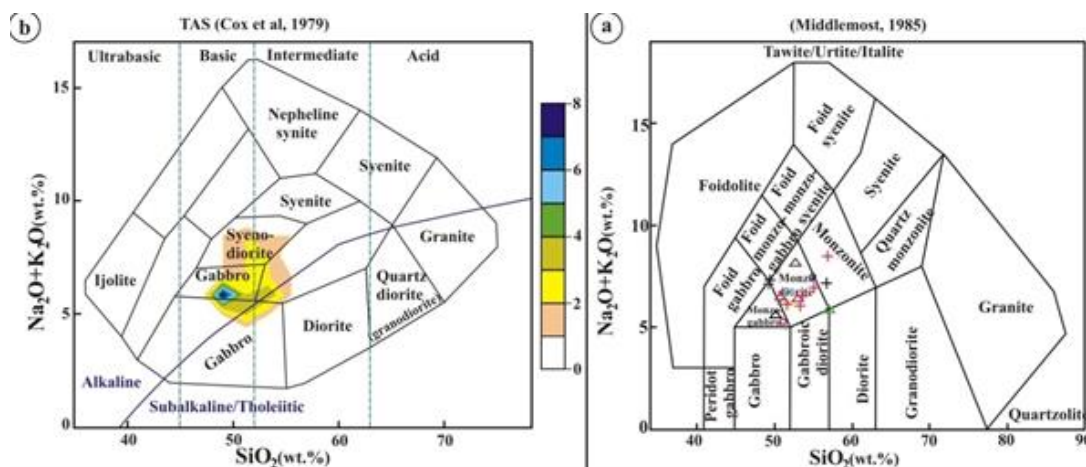
شکل ۴- (a) نمای نزدیک از واحد مونزودیوریتی و (b) محل همبندی زون کنتاکت متاسوماتیسمی در سیل مونزودیوریتی با توف پورفیری در محل تونل اصلی معدن.

Fig. 4. (a) Close-up view of monzodiorite unit, and (b) The location of the metasomatism contact zone in the monzodiorite sill with porphyry tuff at the location of the mine's main tunnel.

### ۳- ژئوشیمی توده نفوذی و سنگ میزبان

توده نفوذی در این محدوده بخشی از توده نفوذی بنیان سد کرج به حساب می‌آید و نقش توده مذکور در کانی‌سازی غیرقابل انکار است. حتی اگر محلول‌های گرمابی حامل کانه‌ها بطور مستقیم در ارتباط با فعالیت‌های پس از نفوذ ماگما و محلول‌های گرمابی منشعب از این توده در اعماق زیاد نباشند، احتمال اختلاط آن‌ها وجود دارد و دست‌کم این توده در حکم یک موتور حرارتی نقش خود را ایفا نموده است. طبق رده‌بندی براساس درصد وزنی سیلیس در مقابل عناصر آلکالن (Middlemost, 1985)

(1985)، سنگ‌های توده نفوذی در محدوده مونزوگابرو و نزدیک به گابرو دیوریت، مونزونیت و مونزودیوریت قرار گرفته‌اند (شکل ۵a) که با نتایج مطالعات مقاطع نازک مطابقت دارد و حاکی از یک روند تفریقی در توده نفوذی است. طبق رده‌بندی به روش TAS (Cox et al., 1979)، نمونه‌های سنگ‌های دلریتی و حاشیه انجماد سریع و گابرویی در محدوده گابرویی و نمونه مونزودیوریت در محدوده سینودیوریت و نمونه مونزونیتی در محدوده سینیتی قرار می‌گیرد (شکل ۵b) همچنین طبق خط جداکننده قلمروی آلکالن و ساب‌آلکالن (Miyashiro, 1974)، همه نمونه‌ها در وضعیت آلکالن قرار می‌گیرند.



شکل ۵- (a) نمودار سیلیس در مقابل عناصر آلکالن (Middlemost, 1985) و (b) نمودار TAS (Cox et al., 1979).

Fig. 5. (a) The SiO<sub>2</sub> vs. Na<sub>2</sub>O+ K<sub>2</sub>O diagram (Middlemost, 1985), and (b) TAS diagram (Cox et al., 1979).

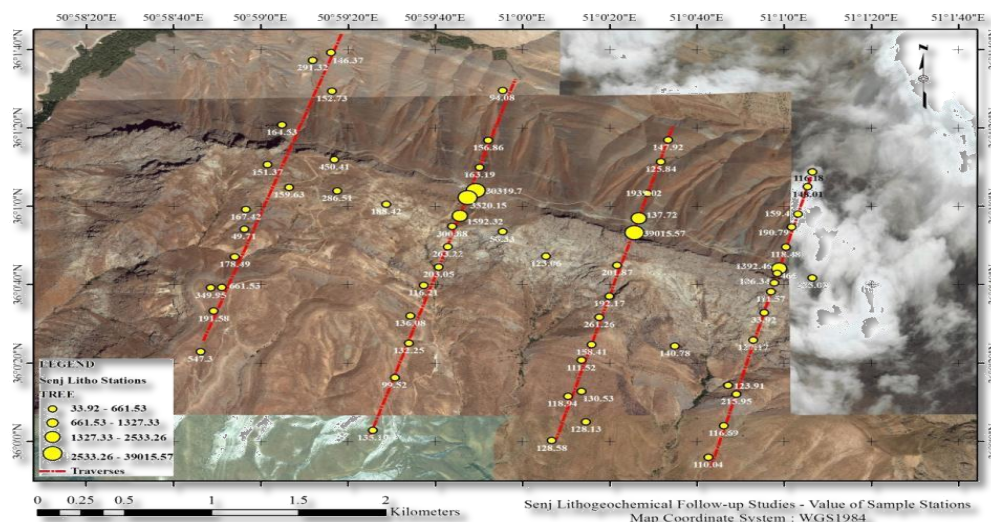
#### ۴- مطالعات ژئوشیمی

نمونه برداری لیتوژئوشیمیایی به شیوه گزینشی لبپری (Chip Sampling) در قالب ۴ پروفیل با فواصل پروفیلی ۴۵۰ تا ۶۰۰ متر در جهت شمال شرقی- جنوب غربی با فواصل ایستگاهی متغیر نسبت به یکدیگر بوده و ترتیب قرارگیری پروفیل‌ها در محدوده اکتشافی سنج از شرق به غرب به ترتیب عبارتست از: پروفیل ۲- شرقی، پروفیل ۱- شرقی، پروفیل ۲- غربی، پروفیل ۱- غربی. مبنای تعیین جهت پروفیل‌ها به گونه‌ای بود که میزان زمینه عناصر کمیاب در سنگ میزبان در کمر بالا و پایین کنای- سازی نیز مشخص گردد. در طی این پروژه تعداد ۶۳ عدد نمونه سنگی از عارضه‌های سنگی مختلف برونزد یافته در محدوده انتخاب و برداشت گردید (شکل ۶).

#### ۴-۱- روش نمونه برداری لیتوژئوشیمیایی و آنالیز دستگاهی از محیط‌های سنگی

در محدوده سنج، نمونه‌ها در ارائه یک تقسیم بندی کلی از واحدهای سنگی مختلف (سنگ درونگیر) و رگه‌های حائز کانی‌سازی اقتصادی (کانسنگ) برداشت گردیده‌اند. نیاز به یادآوری نیست که در این میان، حداکثر تنوع کمی و کیفی مربوط به نمونه‌های اخذ شده از سنگ درونگیر است که طیف وسیعی از لیتولوژی‌های مافیک تا اسیدی قلیایی را شامل می‌شود. نمونه برداری سنگی (لیتوژئوشیمیایی) از نوع لبپری در

حوضه‌های آبریز مستعد صورت پذیرفته است و در این مرحله در هر ایستگاه حداقل ۵۰۰ گرم نمونه لبپری از رخنمون واحدهای برونزد یافته برداشت گردید. نمونه‌گیری به نحوی صورت گرفته که تا حد امکان بتواند معرف توده میزبان خود باشد؛ بدین منظور، پس از مشخص شدن رخنمون هدف و پیش از اخذ نمونه، ترجیحاً پیمایشی در شعاع ۴ متری محل نمونه برداری و بر روی توده صورت گرفته و نمونه نهایی از ترکیب نمونه‌هایی حاصل شده که از پیمایش مساحت بافر ۴ متری اطراف هر ایستگاه اخذ گردیده است. نقشه پراکندگی ایستگاه‌های نمونه برداری از رخنمون‌های سنگی محدوده اکتشافی سنج که در آن‌ها مقادیر مجموع عناصر نادر خاکی به شکل الگوی گرادیان مقایسه‌ای در محل هر ایستگاه در شکل ۶ آمده است. در جدول ۱ نیز موقعیت ایستگاه‌های نمونه برداری و توصیف ماکروسکوپی نمونه‌های برداشت شده آورده شده است. طراحی پروفیل‌ها در همه موارد به گونه‌ای بوده است که از واحدهای به ظاهر سالم و بی‌ارتباط با توده آغاز شود و سپس با عبور از بخش‌های نفوذی و ثبت حداکثر تغییرپذیری زون همبری در هر دو حاشیه، مجدداً به بستر واحدهای درونگیر بازگردد. مطالعه ارتباط ژنتیکی هر یک از گونه‌های سنگی مشاهده شده در منطقه با سیستم کانی‌سازی‌های کشف شده نکته دیگری است که در ادامه و با ارائه نمودارهای کندریتی بدان‌ها پرداخته می‌شود.



شکل ۶- نقشه پراکندگی ایستگاه‌های نمونه برداری از رخنمون‌های سنگی محدوده اکتشافی سنج که در آن‌ها مقادیر مجموع عناصر نادر خاکی به شکل الگوی گرادیان مقایسه‌ای در محل هر ایستگاه آمده است.

Fig. 6. Dispersion map of the sampling stations of the stone outcrops of the exploratory range of the Senj in which the total values of rare earth elements are shown in the form of a comparative gradient pattern at the location of each station.

جدول ۱- جدول توصیف، مختصات و نتایج مجموع عناصر نادر خاکی در نمونه‌های لیتوژئوشیمیایی برداشت شده از محدوده اکتشافی سنج.

Table 1. Table of description, coordinates and Results of total rare earth elements of lithogeochemical samples taken from the exploratory range of Senj.

sample code	description	ΣREE	latitude	Longitude	sample code	description	ΣREE	latitude	Longitude
Se-L01	Green tuff with high manganese staining	232	3984973	498227	Se-L33	Highly argillic tuff with malachite	1511	3985310	501474
Se-L02	Andesite tuff	213	3985401	498347	Se-L34	Monzosinite is strongly altered	248	3985635	501545
Se-L03	Albite epidote tuff	196	3985772	498410	Se-L35	Relatively altered monzosinite	203	3985738	501582
Se-L04	Chilean tuff is strongly altered	192	3985948	498658	Se-L36	Monzogabbro-monzodiorite	188	3986319	500835
Se-L05	Highly argillic tuff	187	3986125	498535	Se-L37	Slightly altered monzosinite	188	3985951	501635
Se-L06	Thracian andesite is relatively older	196	3986704	498907	Se-L38	Sinite	152	3986069	501663
Se-L07	Green tuff with lamellar phenocrysts of amphibole	183	3987008	498899	Se-L39	Monzonite is highly altered	141	3985197	501445
Se-L08	Epidote tuff	118	3984450	499266	Se-L40	monzonite	152	3985477	501512
Se-L09	Strongly altered andesite tuff	173	3984720	499346	Se-L41	Highly argillic-siliceous tuff	147	3985126	501427
Se-L10	strongly altered chlorite tuff	484	3986164	498918	Se-L42	Highly argillic tuff with malachite	318	3986947	498795
Se-L11	Argillized tuff	235	3985320	499519	Se-L43	Monzosinite is strongly altered	199	3986438	498619
Se-L12	Sand lithic tuff	342	3985639	499595	Se-L44	Moderately altered monzosinite	64	3985619	498404
Se-L13	Altera toffee unit	1721	3985722	499639	Se-L45	Epidote tuff	441	3985156	498210
Se-L14	Green tuff	30474	3985922	499732	Se-L46	Highly argillic-siliceous tuff	704	3985160	498274
Se-L15	Green tuff with mafic phenocrysts	200	3986103	499752	Se-L47	Strongly altered andesite tuff	598	3984654	498152
Se-L16	lithic chlorite tuff	213	3986318	499803	Se-L48	strongly altered chlorite tuff	184	3984937	499356
Se-L17	Altered chloritized andesite unit	3579	3985867	499684	Se-L49	Argillized tuff	149	3985176	499434

ادامه جدول ۱

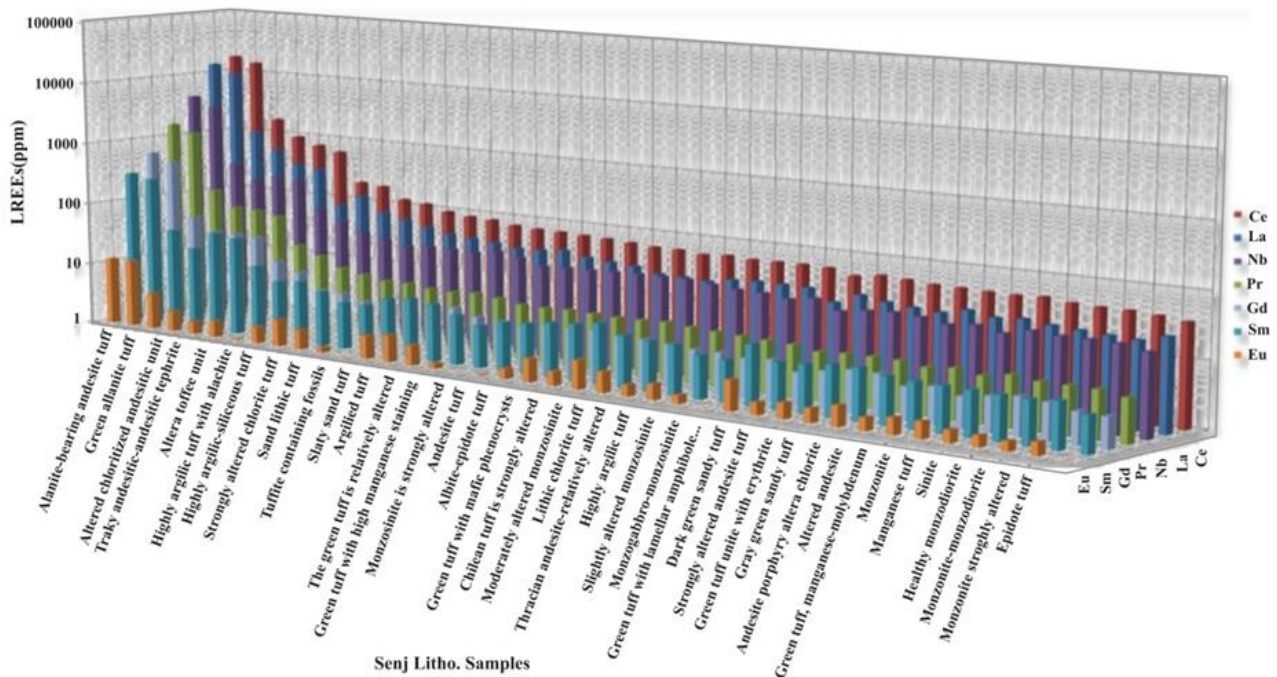
Se-L18	Green tuff	160	3983954	500168	Se-L50	Sand lithic tuff	302	3985479	499572
Se-L19	Green tuff	149	3984304	500262	Se-L51	Altar unit	138	3986709	499887
Se-L20	Andesite tuff	39220	3985630	500647	Se-L52	Green tuff	239	3985091	500499
Se-L21	Limestone	291	3984924	500440	Se-L53	Green tuff with mafic phenocrysts	202	3984710	500397
Se-L22	Relatively lighter green tuff	246	3985333	500542	Se-L54	lithic chlorite tuff	179	3984342	500339
Se-L23	Porphyry andesite	161	3986149	500793	Se-L55	Altered chloritized andesite unit	165	3985406	500135
Se-L24	Monzodiorite	146	3984587	500339	Se-L56	Green tuff unit with erythrin coating	45	3984961	501387
Se-L25	Traky andesite-andesite-tephrite	1986	3985967	500697	Se-L57	Green tuff	177	3984102	500365
Se-L26	Sandy tuff	171	3985725	500673	Se-L58	Andesite tuff	186	3984036	499140
Se-L27	Monzonite - monzodiorite	146	3983824	501066	Se-L59	Limestone	98	3985598	499885
Se-L28	Tuff	144	3984073	501156	Se-L60	Green tuff is relatively lighter	180	3984699	500873
Se-L29	Sandy tuff	248	3984319	501228	Se-L61	Andesite porphyry altera chlorite	234	3985815	499217
Se-L30	Altered andesite	159	3984389	501181	Se-L62	Healthy monzodiorite	318	3985918	498937
Se-L31	Gray sand lithic tuff	162	3984746	501325	Se-L63	Tuff	297	3985235	501665
Se-L32	Highly argillic-siliceous tuff	517	3985271	501461					

است؛ از این رو داده‌های لیتوژئوشیمیایی به دست آمده از این زون را با سطح اعتماد بالایی می‌توان به کار گرفت.

#### ۴-۲- تحلیل ژئوشیمیایی نتایج آنالیز دستگاهی از محیط‌های سنگی

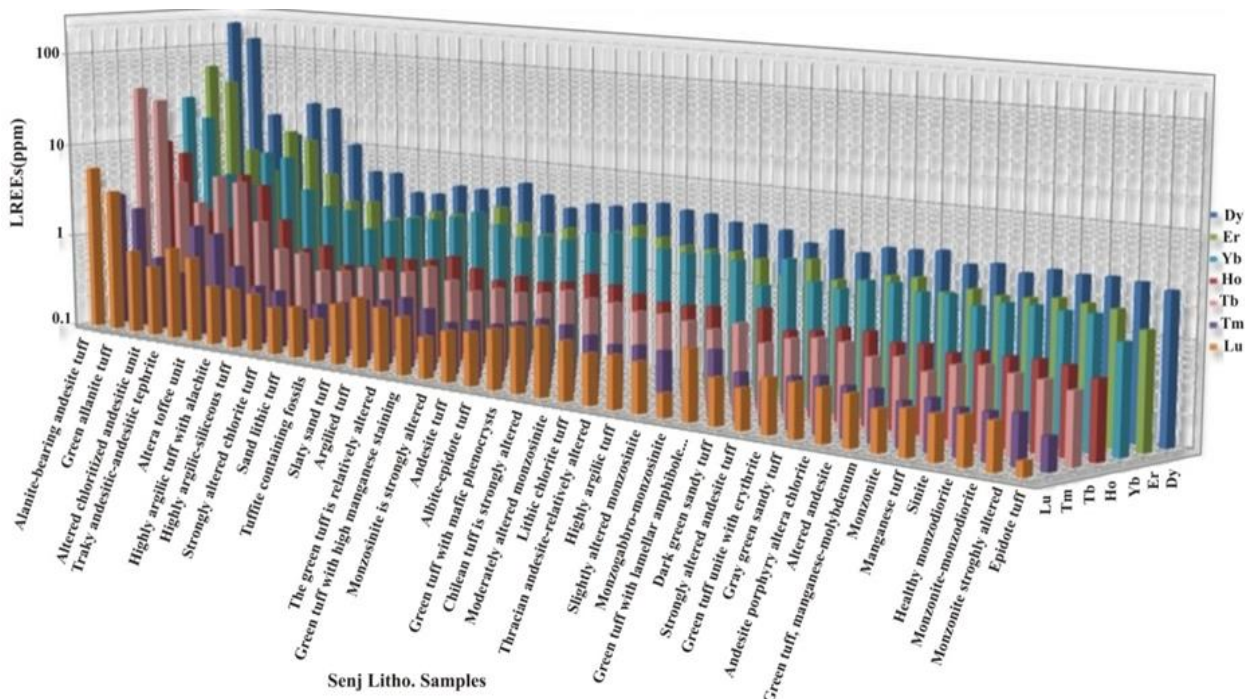
هیستوگرام روند تغییرات عناصر نادر خاکی سبک در قالب شکل ۷ و عناصر نادر خاکی سنگین در قالب شکل ۸ برای ۲۵ عدد نمونه لیتوژئوشیمیایی برداشت شده از محدوده سنج حسب نوع نمونه آورده شده است.

نمونه‌های ارسالی به آزمایشگاه، برای یک بسته آنالیز ۵۳ عنصری مشتمل بر عناصر نادر، نادر خاکی، فلزات واسطه سبک و سنگین و ۶ عنصر فلزات پایه به کمک تکنیک آنالیز-ICP MS با استفاده از دستگاه Perkins در مرکز پژوهش‌های کاربردی سازمان زمین‌شناسی مورد تجزیه قرار گرفته‌اند. بررسی نتایج حاصل از آنالیز ۲ نمونه لیتوژئوشیمیایی شاهد براساس روش تامپسون و هوارث (Thompson and Howarth, 1976) در نظر گرفته شده برای این پهنه خاکی از صحت و دقت بسیار مطلوب (۹۲٫۴٪) نتایج گزارش شده توسط آزمایشگاه



شکل ۷- هیستوگرام روند تغییرات عناصر نادر خاکی سبک در نمونه‌های لیتوژئوشیمیایی برداشت شده از محدوده اکتشافی سنج (مقیاس داده‌ها لگاریتمی در پایه نپرین).

Fig. 7. The histogram of the changes in light rare earth elements in the lithochemical samples taken from the exploratory range of Senj (logarithmic data scale at the base of Nepriane).



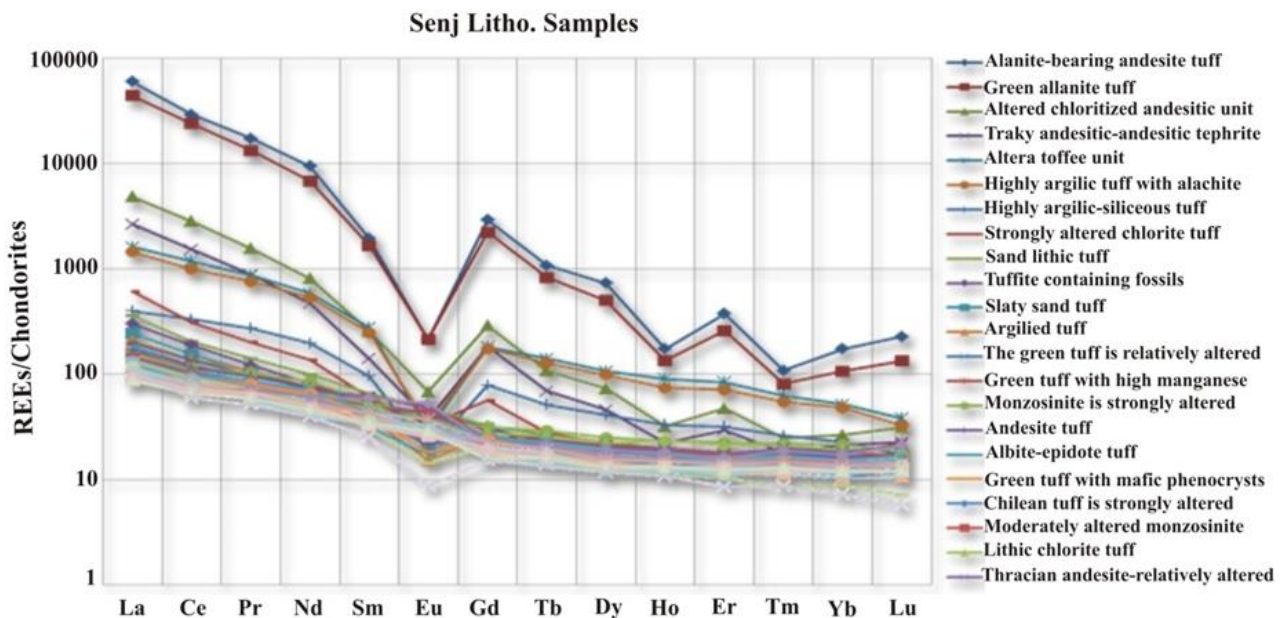
شکل ۸ - هیستوگرام روند تغییرات عناصر نادر خاکی سنگین در نمونه‌های لیتوژئوشیمیایی برداشت شده از محدوده اکتشافی سنج (مقیاس داده‌ها لگاریتمی در پایه نپرین).

Fig. 8. Histogram of changes in heavy rare earth elements in lithochemical samples taken from the exploratory range of Senj (logarithmic data scale based on Neperian).

تغذیه سیالات هیدروترمال از دیدگاه عناصر نادر خاکی نقش داشته است.

در گراف کندریتی حاصل از بخش کانی‌سازی (شکل ۹) غنی‌شدگی نسبتاً چشمگیری از گونه‌های عناصر نادر خاکی سبک نسبت به عناصر نادر خاکی سنگین دیده می‌شود. در اغلب نمونه‌ها شاهد تهی‌شدگی Eu هستیم که این امر به دلیل خارج شدن این عنصر در اثر واپاشی فلدسپات‌ها در نتیجه فرآیند دگرسانی است. این در حالی است که در بخش مرتبط با سیستم عقیم از کانی‌سازی Eu از خود تمایلی برای تحرک پذیری نشان نمی‌دهد. همانگونه که در گراف شکل ۹ دیده می‌شود شاهد غنی‌شدگی ۱۰ برابری عناصر نادر خاکی سنگین و ۱۰۰ برابری عناصر نادر خاکی سبک نسبت به مقادیر کندریتی هستیم از این گذشته، میزان غنی‌شدگی عناصر نادر خاکی سبک نسبت به عناصر نادر خاکی سنگین در حدود ۱۰ برابر است که با میزان غنی‌شدگی متعارف آن‌ها در گونه‌های سنگی نفوذی و آتشفشانی مرتبط با نواحی پشت قوسی و تصادمی قاره‌ای همخوانی دارد (Altherr et al., 2000).

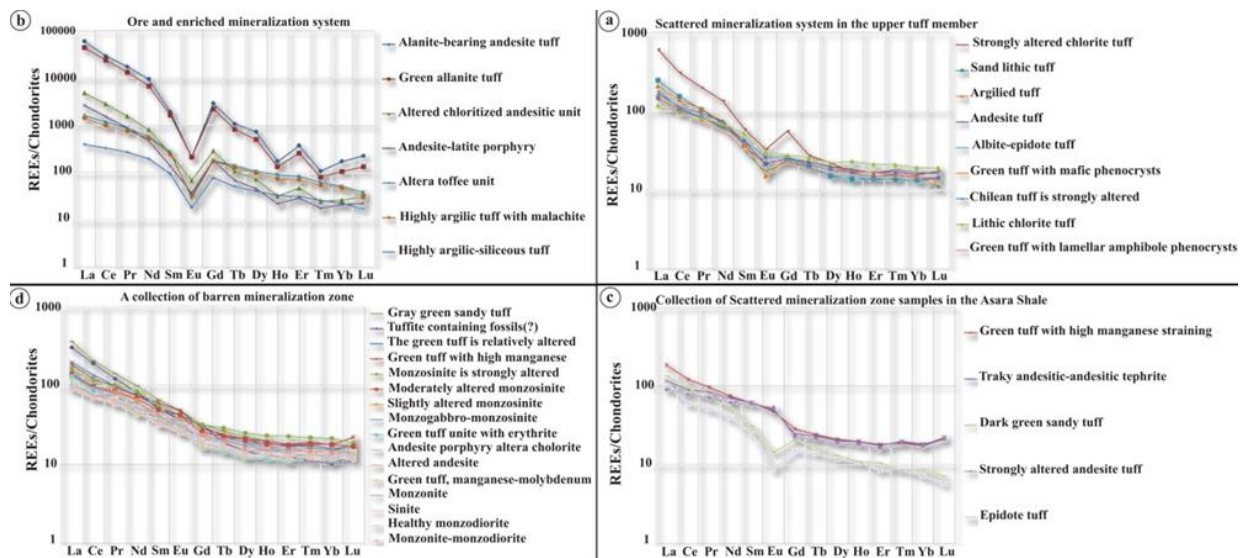
داده‌های حاصل از مطالعات لیتوژئوشیمیایی از آنجاکه نمونه‌ها از پهنه‌ای وسیع با حداکثر تنوع ژئوشیمیایی برداشت می‌گردند در بسیاری موارد می‌تواند موجب سردرگمی و یا گمراهی مفسر گردد. از دگرسو، در امر تفسیر این داده‌ها، همواره این نیاز احساس می‌شود که به نحوی بتوان مشابهت‌های ژنتیکی نمونه‌های مختلف را استنباط و سپس ارتباط آن‌ها را با آن دسته از نمونه‌هایی که در آن‌ها شاهد بروز اشکال اقتصادی کانی‌سازی عناصر نادر خاکی هستیم استنباط نمود. چالش آن هنگام آغاز می‌شود که عملاً چگونه می‌توان بین ماهیت ژنتیکی این طیف وسیع از سنگ‌ها و رگه‌های ماده معدنی کشف شده ارتباطی برقرار کرد؟ پاسخ این سؤال در میراث ژنتیکی نهفته است که توسط عناصر نادر خاکی در دل این توده‌ها به میراث مانده است. در این تحقیق نیز بدین منظور، از تکنیک‌های بهنجارسازی و یا اصطلاحاً نرمال‌سازی در برابر کندریت‌ها بهره گرفته شد. در نمودار کندریتی (McDonough and Sun, 1995)، نمونه‌های لیتوژئوشیمیایی اخذ شده از محدوده مطالعاتی در قالب شکل ۹ ارائه گردیده است. اگرچه گمان بر این است که توده نفوذی تنها فاز تأمین کننده محتوای عناصر نادر خاکی می‌باشد ولی سنگ میزبان نیز به سبب ماهیت اندک آلکالن خود تا حدودی در



شکل ۹- نمودار اسپایدرگرام حاصل از بهنجارسازی نمونه‌های لیتوژئوشیمیایی برداشت شده از محدوده اکتشافی سنج نسبت به مقادیر کندریتی (McDonough and Sun, 1995).

Fig. 9. Spidrogram diagram resulting from the normalization of lithochemical samples taken from the exploratory range of Senj with respect to the chondritic values provided (McDonough and Sun, 1995).





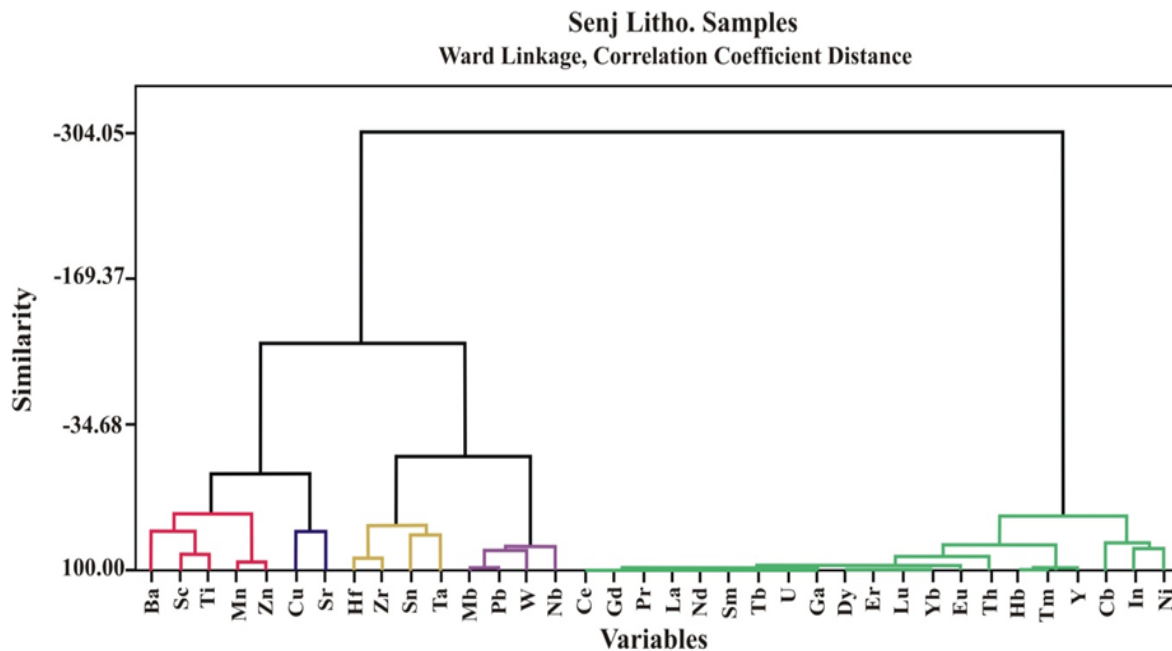
شکل ۱۰- اسپایدرگرام‌های عناصر نادر خاکی مرتبط با: (a) سیستم کانی‌سازی پراکنده در عضو توف بالایی از سازند کرج، (b) سیستم کانی‌سازی کانساری و غنی‌شده، (c) سیستم کانی‌سازی پراکنده در عضو سوم سازند کرج (شیل آسارا) و (d) مرتبط با سیستم عقیم از کانی‌سازی. Fig. 10. Spidergrams of rare earth elements associated with, (a) scattered mineralization system in the upper tuff member of Karaj Formation, (b) ore and enriched mineralization system, (c) Collection of scattered mineralization zone samples in the Asara Shale Member of Karaj Formation (Asara Shale) and (d) A collection of barren mineralization zone samples.

از نتایج این نمونه‌ها (مجموعه نمونه‌های زون کانی‌سازی کانساری که پیش از این بدان‌ها پرداخته شد) برای آنالیز خوشه‌ای چندمتغیره استفاده شد. به منظور استنباط نوع ارتباط فاز کانی‌سازی فلزات پایه با عناصر نادر خاکی و نیز عناصر نادر خاکی با یکدیگر از روش Ward و برای صحت‌سنجی از روش ارتباط مقادیر میانگین (Average Linkage) بهره گرفته شده است. همچنانکه در شکل ۱۱ دیده می‌شود، مجموعه عناصر نادر خاکی و رسته فلزات پایه در دو خوشه‌ی کاملاً متمایز جای گرفته‌اند. کانی‌سازی فلزی غالب که به صورت همزاد (سن-ژنتیک) عمل نموده شامل اکسیدهای آهن و تیتانیوم بوده و پاراژنز مانیتیت+هماتیت+ایلمنیت را در برمی‌گیرد و ندرتاً سولفورهای دیگر شامل: مولیبدنیت، پیریت و گالن نیز وجود دارد. کانی‌سازی عناصر نادر خاکی به صورت دیرزاد (اپی‌ژنتیک) عمل نموده است. این الگو به‌خوبی مؤید آنست که فاز کانی‌سازی عناصر نادر خاکی در مرحله‌ای کاملاً جداگانه از فلزات پایه روی داده است؛ گو اینکه مطابقت مشاهدات صحرائی نشان‌دهنده این نکته است که سیستم‌های کانی‌سازی هر یک از این دو (مجموعه عناصر نادر خاکی و رسته فلزات پایه) در دو موقعیت جغرافیایی کاملاً متمایز از یکدیگر جای گرفته‌اند.

واحد شیلی آسارا که در دامنه جنوبی دره سنج برونزد دارد از دیدگاه کانی‌سازی‌های مرتبط با عناصر نادر خاکی و حتی فلزات پایه Cu، Mo و Au از اهمیت چندانی برخوردار نیستند (Fazel et al., 2014). در الگوهای کندریتی این نمونه‌ها (شکل ۱۰c) نیز، اگرچه هیچ‌گونه شمایل امیدوارکننده‌ای مبنی بر بروز کانی‌سازی یا نابهنجاری معنی‌داری در این ارتباط دیده نمی‌شود و حتی در مورد نمونه‌های به‌شدت اپیدوتی‌شده شاهد تهی‌شدگی نسبی نیز هستیم اما با این حال، تشابه الگوهای این واحد با واحدهای عضو توف بالایی نشان از انتخاب صحیح عنوان فوق برای زون کانی‌سازی دارد. در این نمونه‌ها نیز عناصر نادر خاکی سبک و عناصر نادر خاکی سنگین نسبت به کندریت به ترتیب تا ۱۰ و ۱۰۰ برابر غنی شده‌اند و میزان غنی‌شدگی عناصر نادر خاکی سبک نسبت به عناصر نادر خاکی سنگین در حدود ۹ برابر است که این کاهش به سبب تهی‌شدگی نسبی برخی گونه‌های سبک در نتیجه فرآیندهای دگرسانی سوپرژن و حرارتی در این ناحیه است.

### ۵- بررسی اثرات پاراژنتیکی عناصر در زون کانی‌سازی کانساری

به منظور بررسی اثر همیافتی عناصر نادر خاکی و نیز فلزات پایه در سیستم‌های متاسوماتیسمی مشاهده شده در محدوده سنج،



شکل ۱۱- گراف آنالیز خوشه‌ای متغیری به روش Ward برای رسته عناصر نادر خاکی و فلزات پایه نمونه‌های لیتوژئوشیمیایی به دست آمده از زون کانی‌سازی کانساری در محدوده اکتشافی سنج.

Fig. 11. Ward's variable cluster analysis graph for the range of rare earth elements and base metals of lithogeochemical samples obtained from the ore mineralization zone in the exploratory range of Senj.

بیشتری نشان داده است. از سویی دیگر، فاز جنبی نیز در این میان وجود دارد که ضمن تمرکز گونه‌های استراتژیک و سبک به Th علاقه وافری دارد. در نتیجه مطالعات مینرالوژیکی صورت گرفته مشخص گردید، فاز کانی‌شناسی اصلی عناصر نادر خاکی آلانیت Ce است. این و کانی میزبان اصلی عناصر نادر خاکی سبک و میانه به حساب می‌آید و در عین حال برای تمرکز U و Th از استعداد قابل قبولی برخوردار است. همچنین در مطالعات میکروسکوپی صورت گرفته، ادخال‌هایی از زیرکن در فازهای بیوتیتی دیده شده است که علاوه بر اینکه در تمرکز عناصر نادر خاکی سبک و Th و به شکلی ضعیف‌تر U از استعداد خوبی برخوردارند، به نظر می‌رسد با تکمیل شدن فاز جانشینی Th به جای Zr در سیستم بلوری گاهاً به تورت نیز تبدیل شده باشند که این یافته به دلیل فوق‌العاده کوچک بودن ادخال‌ها و مشابه بودن سیستم بلوری و رفتار انکساری دو کانی یاد شده به شکل میکروسکوپی قابل اثبات نیست. دست کم در بررسی‌های اولیه حضور آن قابل بررسی بیشتر است و به نظر می‌رسد علت بروز این ناهنجاری در الگوهای Th و U این موضوع باشد. نکته دیگری که در این گراف بسیار جالب توجه است، اثر همیافتی ۳ عنصر Ni، Co و In با مجموعه عناصر نادر خاکی است که امری

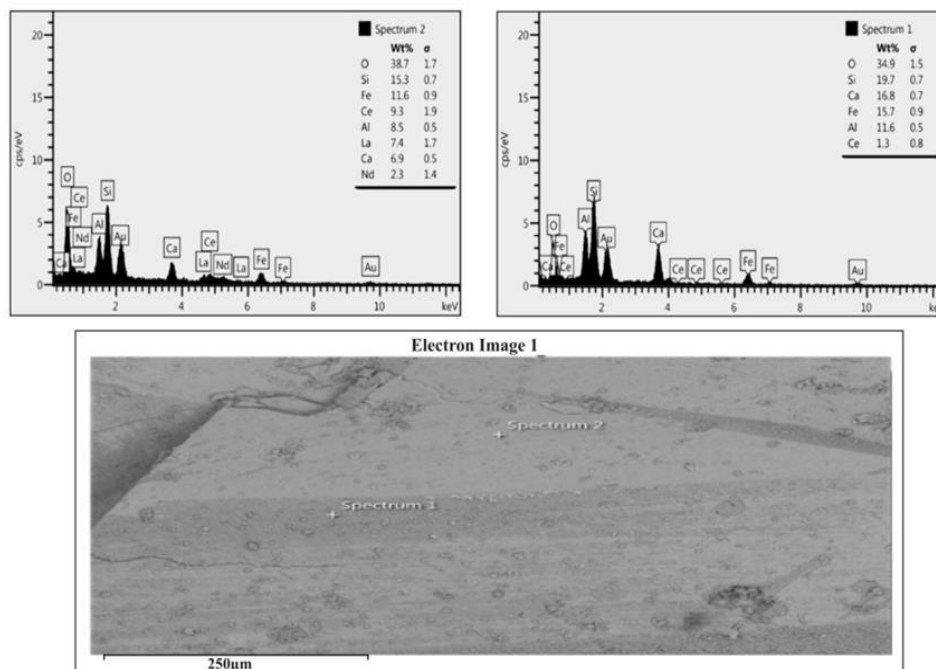
نخستین ویژگی این خوشه، جداشدن دو عنصر Th و U از یکدیگر در این خوشه است. نظر به رژیم دما پایین کانی‌سازی (باتوجه به الگوی پاراژنزی کانی‌ها و نیز لاغری بودن توده‌های نفوذی و جایگیری نیمه عمیق آن‌ها) و تفاوت تحرک پذیری دو عنصر U و Th در شرایط فشاری-دمایی -pH چنین محیطی، این رفتار کاملاً قابل توجیه است. Th در مقایسه با U در محیط‌های اکسیدان تبیل تر است و لذا از U جدا می‌شود (Hawkes and Webb, 1962). توجیه دیگری که در جنب نظریه فوق ارائه می‌شود، مونومینرال نبودن فاز میزبان این دو عنصر است. بدان معنا که در نتیجه سلسله مطالعات مینرالوژیکی که تاکنون صورت گرفته است، به خوبی میدانیم که آلانیت، زیرکن و آپاتیت سه فاز کانی‌شناسی اصلی هستند که این دو عنصر را در نمونه‌ها میزبانی می‌کنند. تفاوت تمایل هر یک از کانی‌های فوق برای میزبانی U و Th سبب مغشوش شدن الگوها و کاهش قابل توجه ضریب همبستگی دو عنصر می‌گردد که نتیجه آن بروز چنین الگویی در مدلسازی‌های چند متغیره می‌باشد. توزیع ناهمگون عناصر نادر خاکی سبک، میانه و سنگین در کنترل عنصر U و سپس سرپرستی کل مجموعه به توسط Th نشان می‌دهد، فاز کانی‌شناسی اصلی میزبان عناصر نادر خاکی به تمرکز U تمایل

کانی‌های آلانیت، اپیدوت نوع آلانیت  $(Ca, Ce, La, Nd, Y)(Al_2Fe)(Si_2O_7)(SiO_4)O(OH)$ ، کلسیت و کلریت بود و در بررسی روش SEM در مرکز پژوهش‌های کاربردی سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور در مجموع ۱۳ نقطه از نمونه تیپیک کانی آلانیت در نمونه‌های پرعیار (با عیار مجموع عناصر نادر خاکی به ترتیب ۰.۳٪ و ۰.۴٪) مورد هدف‌گیری و آنالیز نقطه‌ای قرار گرفت که نتایج نشان داد که کانی‌های اصلی بخش کانه‌دار شامل یک فاز آلانیتی پراکنده در زمینه سایر پارازنرها بخصوص اپیدوت نوع پیستازیت  $Ca_2(Al_2Fe)(Si_2O_7)(SiO_4)O(OH)$  است (شکل ۱۲). مطالعاتی نیز بر روی مقاطع نازک جهت مطالعات کانی‌شناسی عناصر نادر خاکی صورت پذیرفت نیز حاکی از حضور یک سنگ میکرومونزونیت‌پورفیری تا حدی آلانیتی، کلریتی و اپیدوتی شده با بافت میکروگرانولار بعنوان سنگ میزبان است که آلانیت‌های درشت بلور که از حاشیه با پیستازیت همراه هستند، در کنار بلورهای بیوتیت دیده می‌شوند. آپاتیت نیز بصورت مقاطع طولی و عرضی در بین بلورهای پلاژیوکلاز و همچنین درون بلورهای بیوتیت و آلانیت دیده می‌شود (شکل ۱۳).

عجیب به نظر می‌رسد. کانی‌سازی‌های دو عنصر یادشده صرفاً به شکل‌های اریترین و آنابرژیت در محدوده به‌رؤیت رسیده که از دیدگاه اقتصادی پتانسیل ویژه‌ای را به‌نمایش نگذارده‌اند، اما مشاهده این همیافتی می‌تواند ما را به دو کلید اکتشافی رهنمون سازد؛ نخست آنکه نظر به اینکه این دو عنصر با گونه‌های مافیک منطقه در ارتباط هستند، لذا مونوزوگابروهای موجود در این ناحیه احتمالاً از ماهیتی آلكالی برخوردارند و تأمین‌کننده اصلی محتوای عناصر نادر خاکی سیستم متاسوماتیسمی در بخش‌های کانی‌سازی شده می‌باشند.

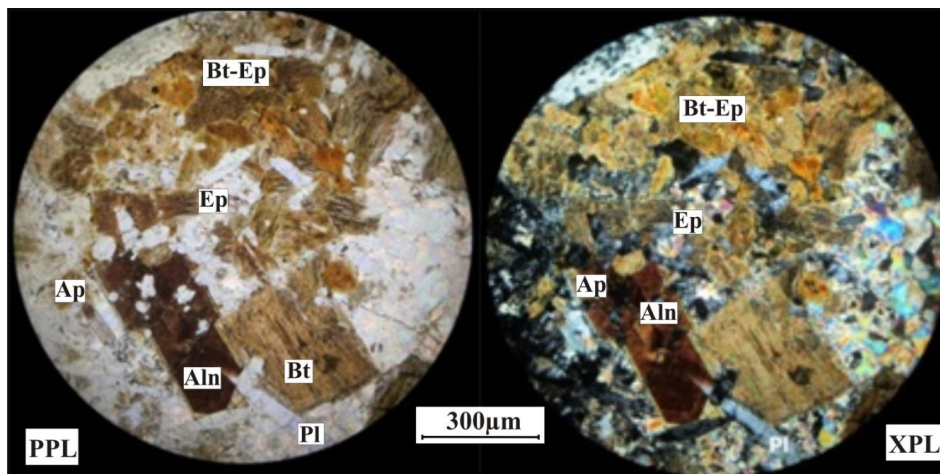
#### ۶- کانی‌شناسی بخش پرعیار

نظریه برخی نارسایی‌هایی که چه از نظر کمی و چه از لحاظ کیفی در نتایج مطالعات XRD وجود دارد و نیز بروز پراش بالا در الگوهای طیفی به‌دست‌آمده از دو نمونه حائز اولویت Se-L14 و Se-L20، دو نمونه تیپیک گمان میرفت میزبان اصلی عناصر نادر خاکی در این نمونه‌ها باشد به‌دقت انتخاب و بخشی از آن به کمک هاون اوپالی در شرایط کاملاً دقیق و نظارت‌شده آزمایشگاهی، به‌نحوی که از بروز هرگونه آلودگی جنبی جلوگیری شود نمایش گردید که نتایج XRD حاکی از حضور



شکل ۱۲- شمای اهداف ۱ و ۲ در تصویر میکروسکوپ الکترونی (SEM) نمونه کانی تیپیک آلانیت به‌دست‌آمده از نمونه Se-L14 به‌همراه نتایج آنالیز نقطه‌ای.

Fig. 12. Schematic of objectives 1 and 2 in the electron microscope (SEM) image of a typical allanite mineral sample obtained from the sample Se-L14 along with the results of point analysis.



شکل ۱۳- مجموعه‌ای از بلورهای آلنیت باهمراهی بلورهای آپاتیت در درون آن. همراهی بیوتیت و اپیدوت در کنار یکدیگر در مرکز.  
 Fig. 13. A set of allanite crystals with apatite crystals inside. Association of biotite and epidote next to each other in the center.

به‌منظور اندازه‌گیری  $\delta^{34}\text{S}$ ؛ روش آنالیز عنصری (Elemental Analyzer) در مد احتراق مورد استفاده قرار گرفت. در این روش سولفور موجود در نمونه به گاز  $\text{SO}_2$  تبدیل شده و پس از ورود به دستگاه اسپکترومتر جرمی؛ با تعیین نسبت جرم‌های  $^{34}\text{S}$  به  $^{32}\text{S}$  پارامتر  $\delta^{34}\text{S}$  تعیین می‌گردد. جهت مقایسه نمونه با مرجع و بررسی پایداری سیستم، پالس‌های گاز مرجع  $\text{SO}_2$  اعمال شد. به‌منظور کالیبراسیون گاز مرجع  $\text{SO}_2$ ، استاندارد IAEA-S-4 با مقدار گواهی شده  $\delta^{34}\text{S} = \text{‰CDT} + 16.9 \pm 0.2$  استفاده از دستگاه آنالیز عنصری-اسپکترومتر جرمی نسبت ایزوتوپی (EA-IRMS) در مد احتراق آنالیز شد (جدول ۲).

#### ۷- بررسی ایزوتوپ گوگرد در کانسار سنج

ایزوتوپ‌های پایدار نقش مهمی در شناسایی منشأ مواد معدنی و تعیین نوع محلول گرمایی-ماگمایی دارند. مهمترین ایزوتوپ‌های پایدار که در این خصوص کاربرد دارند عبارتند از:  $^{12}\text{C}$ - $^{13}\text{C}$ ،  $^{18}\text{O}$ - $^{34}\text{S}$ - $^{32}\text{S}$ ، D-H مطالعات ایزوتوپی کانسار سنج بر روی نمونه‌های کالکوپیریت و مولیدنیت در آزمایشگاه تحقیقاتی ایزوتوپ‌های پایدار دانشگاه اراک انجام شد که در ادامه خلاصه‌ای از روش مطالعه آورده شده‌است: دستگاه اسپکترومتر جرمی نسبت ایزوتوپی برای آنالیز گازهای ساده مانند  $\text{N}_2$ ،  $\text{CO}$ ،  $\text{SO}_2$ ،  $\text{H}_2$ ،  $\text{CO}_2$  طراحی شده‌است.

جدول ۲- نتایج حاصل از اندازه‌گیری  $\delta^{34}\text{S}$  در نمونه‌های حاوی سولفور.

Table 2. The results of measuring  $\delta^{34}\text{S}$  in samples containing sulphur.

Sample name	Number of repetitions	$\delta^{34}\text{S}\text{‰(CDT)}$
Standard		True Value: $+16.9 \pm 0.2$
IAEA-S-4	-	
Sample 1	3	Obtained Value: $+16.31 \pm 0.16$
Chalcopyrite	3	$-4.19 \pm 0.17$
Sample2	3	$-9.87 \pm 0.20$
molybdenite		
device type	Isotopic ratio spectrometry-elemental analysis in combustion mode	

خاکی در کانسنگ استخراجی از این کانسار در حدود ۲/۶٪ و میزان ذخیره حدود ۹۰۰۰۰۰۰ تن بوده است. این کانسار در سنگ‌های کالک‌سیلیکاته گارنت‌دار و در مجاورت یک توده نفوذی آلکالی‌گرانیتی واقع شده است. کانه‌های اصلی حاوی عناصر نادر خاکی اورانیوم، آلانیت و آپاتیت هستند. کانسار ماری‌کاتلین (Mary Kathleen Deposit) دارای تشابهاتی با کانسارهای IOCG واقع در مناطق مجاور در کمربند کلونکوری (Cloncurry) استرالیا نیز هست (Derrick, 1977). کانی-سازی عناصر نادر خاکی به صورت شبه اسکارنی و در نتیجه متاسوماتیسم به وجود آمده است (Scott and Scott, 1985). در مقایسه کانسار ماری‌کاتلین و کانسار سنج تشابهاتی وجود دارد که عبارتند از:

کانی‌سازی عناصر نادر خاکی در هر دو کانسار به صورت زون‌های بدون قاعده هندسی و عدسی‌هایی از آلانیت تشکیل شده است و بیشتر از ۸۵٪ عناصر نادر خاکی از نوع سبک (La و Ce) هستند که در آلانیت تمرکز یافته اند.

کانی‌سازی عناصر نادر خاکی به صورت شبه اسکارنی و در نتیجه متاسوماتیسم به وجود آمده است. در اسکارنی ماری-کاتلین، عقیده بر این است که در دو مرحله تشکیل اسکارنی در دو فاز زمانی مختلف و تحرک مجدد عناصر به وسیله محلول‌های گرمایی در فاز دوم، عامل غنی‌شدگی عناصر نادر خاکی بوده است. در مورد کانسار سنج نیز باتوجه به روابط صحرایی و حفاری‌های اکتشافی تصور بر این است که این نوع کانی‌سازی در مجاورت توده نفوذی و در نتیجه سازوکار مشابه با آنچه گفته شد (دگرگونی مجاورتی و متعاقب آن، متاسوماتیسم گرمایی در چند مرحله و تحرک مجدد عناصر در نتیجه گسلش) به وجود آمده است.

کانی‌سازی سولفیدی در هر دو کانسار به صورت عدسی‌های بی‌قاعده و بدون نظم هندسی و پراکنده و گاه به صورت پرعیار ظاهر شده است و نوع کانی‌های سولفیدی مشابه است. علیرغم تشابهاتی که ذکر شد، تفاوت‌هایی نیز از نظر کانی‌شناسی دگرسانی، سنگ‌شناسی و سن تشکیل بین دو کانسار وجود دارد.

با نگاهی بر نتایج سلسله مطالعات کانی‌شناسی صورت گرفته مبرهن است که عناصر نادر خاکی در محدوده کانسار سنج در آلانیت و آپاتیت تمرکز یافته‌اند. از این لحاظ کانسار سنج را می‌توان با کانسار ماری‌کاتلین در استرالیا تطبیق داد. در

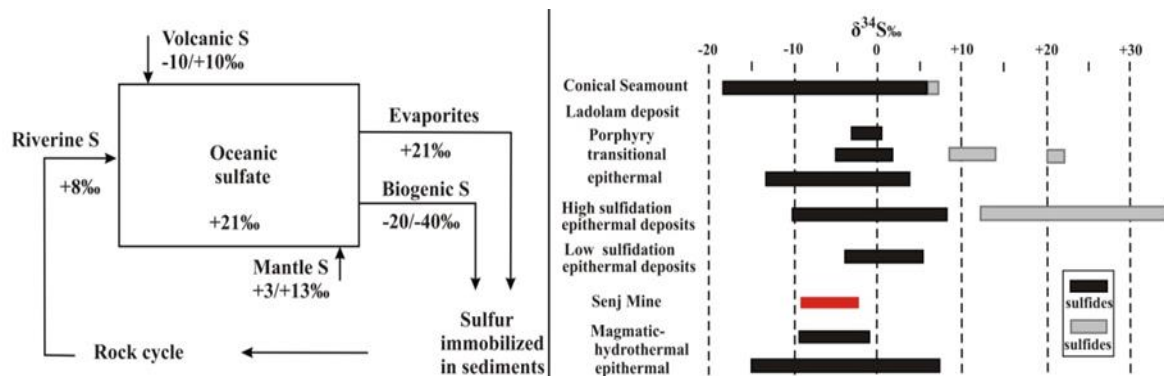
در مطالعات ایزوتوپی استاندارد که برای گوگرد در نظر گرفته شده است، گوگردی است که در تروویلیت (Fes) شهاب-سنگ آهنی دیابلو کانپون در آریزونا آمریکا است که در این شهاب‌سنگ میزان  $\delta^{34}\text{S}$  برابر صفردر نظر گرفته شده است و  $\delta^{34}\text{S}$  در یک نمونه نشان‌دهنده تغییراتی است که از زمان ورود به پوسته زمین در آن ایجاد شده است (Ohmoto and Rye, 1979). زمانی که تغییرات ایزوتوپ گوگرد را در چرخه سنگ‌ها مطالعه می‌کنیم، مشاهده می‌شود که در سنگ‌های آتشفشانی تغییرات  $\delta^{34}\text{S}$   $\pm 10\%$  است. اگر تغییرات  $\delta^{34}\text{S}$  صفر یا نزدیک به آن باشد گوگرد دارای منشأ ماگمایی است. غنی‌شدن  $\delta^{34}\text{S}$  نیز نشان‌دهنده این نکته است که گوگرد از آب دریا و یا تبخیری‌ها منشأ گرفته است.

در مقایسه تغییرات ایزوتوپ گوگرد  $\delta^{34}\text{S}$  در کانسار سنج با تیپ کانه‌زایی کانسارهای سولفیدی در کانسارهای پورفیری و هیدروترمال مختلف مشاهده می‌شود که بیشترین انطباق با کانسارهای آتشفشانی-گرمایی است (شکل ۱۴).

#### ۸- تیپ محتمل کانه‌زایی در ناحیه سنج

با عنایت به کلیه موارد فوق کانسار مورد بحث بطور قطع نمی‌تواند از یک منشأ و یا مربوط به یک فاز کانه‌زایی باشد و در نتیجه تخصیص یک مدل واحد و قطعی کانساری برای آن تا این مرحله و با این داده‌ها غیرمنطقی است اما آنچه که مسلم می‌باشد این است که کانسار از نوع گرمایی بوده و باتوجه به صفات تغییرپذیری شدید ماده معدنی از رگه‌های پرعیار به سمت سنگ درونگیر از نوع کانسارهای چند فلزی سولفیدی رگه‌ای و جانیشینی با بافت پراکنده و استوک‌ورکی است و تیپ کانی‌سازی می‌تواند هریک از موارد فوق باشد. باتوجه به تشابهات زیادی که عنوان شد و ارتباط شناخته شده کانسارهای فوق با کانسارهای پورفیری، این احتمال وجود دارد که کانسار سنج پتانسیل تبدیل شدن به کانسارهای پورفیری را در عمق بیشتر داشته باشد. کانسار تیپ اسکارنی اورانیوم-عناصر نادر خاکی ماری-کاتلین در استرالیا یک کانسار مهم و شناخته شده در دنیا است که جزء اسکارنی‌های با سنگ میزبان غیرکربناتی محسوب می‌شود. این کانسار در چندین مقطع زمانی با هدف استخراج اورانیوم مورد بهره‌برداری قرار گرفته و هم‌اکنون از دیدگاه استخراج عناصر نادر خاکی مورد توجه قرار گرفته است. از این کانسار تاکنون در حدود ۲۰۰۰۰۰ تن REO (عمدتاً اکسید عناصر نادر خاکی سبک) استخراج شده است. عیار عناصر نادر

جدول ۳ درصد عناصر در آلانیت‌های کانسار ماری کاتلین با کانسار سنج مقایسه شده‌اند و تشابه زیادی بین ترکیب آلانیت مشاهده می‌شود (Ohmoto and Rye, 1979).



شکل ۱۴- تغییرات ایزوتوپ گوگرد  $\delta^{34}\text{S}$  محدوده تغییرات ایزوتوپ گوگرد  $\delta^{34}\text{S}$  در کانسار سنج با مقایسه با کانسارهای مختلف هیدروترمال و پورفیری.

Fig. 14. Sulphur  $\delta^{34}\text{S}$  isotope changes, the range of  $\delta^{34}\text{S}$  sulphur isotope changes in Senj deposit with comparison with different hydrothermal and porphyry deposits.

جدول ۳- مقایسه درصد عناصر در آلانیت‌های کانسار ماری کاتلین با کانسار سنج

Table 3. Comparison between the percentages of rare earth elements in the allanites of Sanj deposit with Mary Kathleen Deposit.

chemical mixture	Percentage of elements in Marycatlin allanite	The percentage of elements in the allanite meter
$\text{Al}_2\text{O}_3$	17.80%	11.6%
$\text{SiO}_2$	35.24%	32.2%
$\text{CaO}$	14.47%	9.6%
$\text{FeO}$	14.01%	19.3%
$\text{La}_2\text{O}_3$	6.31%	11.1%
$\text{Ce}_2\text{O}_3$	9.75%	16.2%

## ۹- نتیجه گیری

۱۰۰ برابری عناصر نادر خاکی سبک نسبت به عناصر نادر خاکی سنگین است. در مورد پتانسیل اقتصادی این سیستم‌ها در حال حاضر نمی‌توان با قطعیت اظهار نظر کرد اما آنچه واضح است اینکه نظریه شواهد پاراژنتیکی و کانی‌شناختی این سیستم‌ها که عمدتاً از نوع رخسارهای دگرگونی مجموعه شیست‌سبز مشتمل بر آلینیت- اپیدوت- کلریت می‌باشند. میزان عناصر نادر خاکی فاز فسفات در قیاس با فاز سیلیکاته بسیار ناچیز است. قطعاً سنگ همبر در فراهم آوردن شرایط لازم برای بروز

نتایج حاصل از مطالعات ژئوشیمی در کانسار سنج نشان‌دهنده وجود ذخیره‌های ارزشمند از لحاظ کانی‌سازی مجموعه عناصر نادر خاکی و فلزات پایه است. یکی از نکات قابل توجه در این کانسار، ناهنجاری‌های بالای عناصر نادر خاکی سبک (Ce, La) و نیز تاحدی عناصر Y, Th است و مقادیر مجموع عناصر نادر خاکی مشاهده شده و الگوهای تغییرات غلظتی نیز در هیستوگرام‌های عیاری نشان داده شده حاکی از تمرکز بیش از

شمال قزوین و گرانودیوریت طارم سفلی می‌باشند. پس می‌توان براساس قرارگیری آن‌ها در منطقه البرز مرکزی به احتمال زیاد وجود یک ماگمای اولیه و عظیم را که منشأ تمامی این توده‌ها می‌باشد را در زیر لیتوسفر منطقه البرز مرکزی محتمل دانست و باتوجه به استعداد کانسار سنج در تمرکز عناصر نادر خاکی بررسی این تیپ از کانه‌زایی در مناطق ذکر شده قابل اهمیت بوده و امید است به شناسایی ذخایر ارزشمند دیگری منجر شود.

#### قدردانی

این مقاله حاصل بخشی از فعالیت‌های پژوهشی لازم برای اخذ درجه دکتری نویسنده اول از دانشگاه آزاد اسلامی واحد محلات می‌باشد. نویسندگان صمیمانه از سردبیر و داوران محترم مجله زمین شناسی کاربردی پیشرفته که با نظرات سازنده خود باعث افزایش کیفیت مقاله شدند، سپاسگزاری می‌نمایند.

کانی‌سازی از محلول‌های حامل مؤثر بوده است. به نظر می‌رسد واحدهای مونزونیتی- سینومونونیتی تا حداکثر گابرویی که در نقش موتور حرارتی برای سیستم کانی‌سازی ایفای نقش می‌نمایند در خلال سردشدن تدریجی خود محلول‌های غنی از عناصر نادر خاکی را آزاد نموده‌اند. به نظر می‌رسد بتوان با آشکارسازی وضعیت توسعه دگرسانی پیروپلیتیک در ناحیه بتوان به کلیدی از زون‌های تمرکز کانی‌سازی دست یافت. سیستم کانی‌سازی تا حد زیادی در کنترل ناهنجاری‌های ساختمانی و تکتونیکی موجود در منطقه بوده است. اگر توده‌های موجود در منطقه البرز مرکزی در زمان ترشیری را بررسی کنیم توده‌های نفوذی و عمده این منطقه از شرق به غرب شامل گابروی مبارک‌آباد، مجموعه نفوذی رودهن، سینیت لواسان، گرانودیوریت قصر فیروزه، توده نفوذی بنیان سد کرج در منطقه مورد مطالعه و مونزوگرانیت علم‌کوه و مونزوگابرو شمال طالقان، مونزودیوریت جنوب طالقان، مونزوگابرو شرق و

#### مراجع

- Aali, A.A., Shirazi, A., Shirazy, A., Khakmardan, Sh., Nazerian, H., 2017. A review of the mineralization of rare earth elements in Iran. *International Journal of Science and Engineering Applications* 11(8), 92-99. <https://doi.org/10.7753/IJSEA1108.1001>
- Altherr, R., Holl, A., Hegner, E., Langer, C., Kreuzer, H., 2000. High-potassium, calcalkaline, I-type plutonism in the European Variscides: northern Vosges (France) and northern Schwarzwald (Germany). *Lithos* 50, 51-73. [https://doi.org/10.1016/S0024-4937\(99\)00052-3](https://doi.org/10.1016/S0024-4937(99)00052-3).
- Cox, K.G., Bell, J.D., Pankhurst, R.J., 1979. *The Interpretation of Igneous Rocks*. George Allen & Unwin. <https://doi.org/10.1007/978-94-017-3373-1>
- Derrick, G.M., 1977. Metasomatic history and origin of uranium mineralization at Mary Kathleen, northwest Queensland. *BMR Journal of Australian Geology and Geophysics* 2(2), 123-130.
- Elyas-Zadeh, R., Mohajjel, M., Farahani, B., Jafari, S.R., 2009. New Structural Evidence of Alborz Fault (North Qom), Evidence for Transfer of Inversion from Central-west Alborz Faults to the Same Oriented Faults in South Alborz. *Geoscience Quarterly* 83, 13-22. (in Persian) <https://doi.org/10.22071/gsj.2012.54511>.
- Hawkes, H.E., Webb, J.E., 1962. *Geochemistry in mineral exploration*. Harper & Row, New York. <https://doi.org/10.1097/00010694-196304000-00016>.
- Hayatolghheibi, M., 2011. Mineralogy, geochemistry and fluids involved in Sanj copper-molybdenum deposit (North of Karaj), master's thesis, Kharazmi University, Tehran, 170.
- Iran Minerals Production and Supply Corporation (IMPASCO), 2009. Report on drilling operation in Sanj polymetallic deposit (Tehran province). Ministry of Mines and Metals, Republic Islamic of Iran (unpublished), 440. (in Persian)
- Khoei, N., Qurbani, M., TajBakhsh, P., 1999. Copper deposits in Iran, book editing plan. *Organization of Geology and Mineral Exploration of the country* 64, 421.
- Mcdonough, W.F., Sun, S.S., 1995. The composition of the earth. *Chemical Geology* 120 (3-4), 223-253. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(94\)00140-4](https://doi.org/10.1016/0009-2541(94)00140-4)
- Middlemost, E.A.K., 1985. Naming materials in the magma/igneous rock system. *Earth-Sciences Reviews* 37, 215-224. [https://doi.org/10.1016/0012-8252\(94\)90029-9](https://doi.org/10.1016/0012-8252(94)90029-9)
- Miyashiro, A., 1974. Volcanic rock series in island arcs and active continental margins. *American Journal of Science* 274(4), 321-355. <https://doi.org/10.2475/ajs.274.4.321>

- Mofazli, S., 2014. Petrogenesis of Sanj molybdenum mine and investigation of its accompanying elements, 21st meeting of Earth Sciences, Organization of Geology and Mineral Explorations of Iran.
- Nogul-Sadat, M.A.A., Almasian, M., 1993. Tectonic map of Iran in 1:100000 scale, Geological Organization of the country.
- Ohmoto, H., Rye, R.O., 1979. Isotopes of sulphur and carbon, in Barnes, H.L., ed., Geochemistry of hydrothermal ore deposits, second edition: New York, John Wiley and Sons, Inc 509-567.
- Pichab, K., 2007. Detail exploration report of Senj Mo mine. Ministry of Mines and Metals, Republic Islamic of Iran (unpublished), 201 P. (in Persian)
- Richardson, D.G., Birkett, T.C., 1995. Carbonatite-Associated Deposits. oaresource.library.carleton.ca. <https://doi.org/10.1130/DNAG-GNA-P1.541>
- Samiei Biraq, A., Meshkini, M., Barzin, A., 2014. Rare Earth Elements (General, Exploitation and Market), First Edition, Academic Jihad Publications, Amir Kabir Industrial Unit, Tehran.
- Scott, A.K., Scott, A.G., 1985. Geology and genesis of uranium-rare earth deposits at Mary Kathleen, Northwest Queensland. Australasian Institute of Mining and Metallurgy Bulletin and Proceedings 08114-4346, 290(1), 79-89.
- Tale Fazel, E., Mehrabi, B., Zamanian, H., Hayatalghybi, M., 2014. Pressure-temperature condition and hydrothermal-magmatic fluid evolution of the Cu-Mo Senj deposit, Central Alborz: fluid inclusion evidence. Journal of Economic Geology 8(2), 431-455. (in Persian) <https://doi.org/10.22067/ECONG.V8I2.36877>.
- Thompson, M., Howarth, R.J., 1976. Duplicate analysis in geochemical practice (2 parts). Analyst 101, 690-709. <https://doi.org/10.1039/an9760100690>
- Tyler, G., 2004. Rare earth elements in soil and plant systems - A review. Plant Soil 267(1-2), 191- 206. <https://doi.org/10.1007/s11104-005-4888-2>.
- Valizadeh, M.V., Abdulahi, H.R., Sadeghian, M., 2008. Geological Investigations of Main Intrusions of the Central Alborz. Scientific Quarterly Journal of Geosciences 17(67), 182-197. (in Persian) <https://doi.org/10.22071/gsj.2009.57829>