



RESEARCH ARTICLE

10.22067/econg.2026.1182



Assessment of Gold Mineralization Potential along the Khonsar–Aligudarz belt, with Emphasis on the Darreh Sari Area, Using Factor Analysis and Geological Evidence

Mina Shahin¹ , Zahra Alaminia^{2*} , Zohre Hoseinzade³ , Seyed Mohsen Tabatabaei Manesh⁴ , Pouria Mahmoodi⁵

¹ Ph.D. Candidate, Department of Geology, Faculty of Science, University of Isfahan, Isfahan, Iran

² Associate Professor, Department of Geology, Faculty of Science, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

³ Assistant Professor, Department of Mining Engineering, Hamedan University of Technology, Hamedan, Iran

⁴ Professor, Department of Geology, Faculty of Science, University of Isfahan, Isfahan, Iran

⁵ Ph.D. Iran Mineral Production and Supply Company (IMPASCO), Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Article History

Received: 28 July 2026
Revised: 13 September 2026
Accepted: 14 September 2026

Keywords

Gold
factor analysis
geochemistry of stream sediments
Sanandaj–Sirjan Zone
mineralization potential

*Corresponding author

Zahra Alaminia
✉ alaminia@um.ac.ir

ABSTRACT

Assessment of gold mineralization potential in metamorphic terrains requires the application of effective analytical approaches because geochemical patterns are simultaneously influenced by lithological variability, hydrothermal alteration, and structural complexity. In this study, the gold mineralization potential along the Khonsar–Aligudarz belt was evaluated by integrating factor analysis with geological evidence. For this purpose, stream-sediment data from the Golpayegan and Aligudarz 1:100000 geochemical sheets were processed, and inter-element relationships were investigated. The results indicate that factor analysis successfully separated the component related to gold mineralization from the regional lithological background and delineated areas with the highest mineralization potential. Validation of the results through field investigations, petrographic studies, and mineralogical examinations in the Darreh Sari area confirmed the presence of NW–SE trending quartz–hematite–bearing vein–veinlets containing pyrite, pyrrhotite, arsenopyrite, marcasite, chalcopyrite, sphalerite, and galena, as well as iron-, manganese-, and copper-oxide minerals, including hematite, goethite, and, less commonly, magnetite, pyrolusite, and malachite, within Triassic–Jurassic schists and metapelites. The close correspondence between the geochemical anomalies and shear zones and quartz veins indicates that these structures played a major role in channeling mineralizing fluids and concentrating gold. The results of this study indicate that integrating factor analysis with geological information provides an effective approach for reducing uncertainty in regional exploration and prioritizing gold exploration targets in the central Sanandaj–Sirjan Zone and other comparable metamorphic environments.

How to cite this article

Shahin, M., Alaminia, Z., Hoseinzade, Z., Tabatabaei Manesh, S.M. and Mahmoodi, P., 2026. Assessment of Gold Mineralization Potential along the Khonsar–Aligudarz belt, with Emphasis on the Darreh Sari Area, Using Factor Analysis and Geological Evidence. *Journal of Economic Geology*, 18(2): 173–197. (in Persian with English abstract) <https://doi.org/10.22067/econg.2026.1182>



©2026 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.

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Gold, as one of the most important strategic and economic metals, forms within a wide range of hydrothermal and orogenic systems, and delineating prospective zones for its occurrence remains a central objective of mineral exploration. In the central Sanandaj–Sirjan Zone, between Khonsar and Aligudarz, several gold occurrences (e.g., Darreh Sari, Hasan Abad, Reza Abad, Hossein Abad, Koucheri, and Sefidsang) have been documented within Triassic–Jurassic schists and metapelites, typically as quartz vein-veinlets with iron and base-metal sulfides and associated silicification, chloritization, carbonatization, and oxidation. Structural control by brittle–ductile shear zones, combined with hydrothermal fluid–rock interaction, has played a fundamental role in concentrating gold and base metals in this belt. Despite reasonable knowledge of these occurrences' geology and mineralogy, regional evaluation of geochemical dispersion patterns remains challenging, since differential element behavior during weathering and transport produces complex, overlapping anomalies that single-element interpretation cannot reliably resolve.

Stream sediment geochemistry is among the most effective, economical regional exploration methods for detecting concealed mineralization, though its performance depends heavily on data processing. Conventional univariate threshold methods generally fail to reveal complex inter-element relationships or separate signals from different mineralizing systems, whereas multivariate statistics, particularly factor analysis, overcome this limitation by extracting independent geochemical factors and hidden correlations, distinguishing gold-related components from lithological background or polymetallic systems and improving the accuracy of potential maps. Within this framework, the Darreh Sari area, southwest of Golpayegan and southeast of Aligudarz, was delineated as a gold anomaly from stream sediment data; subsequent field work confirmed quartz–hematite veins- veinlets within Triassic–Jurassic schists accompanied by iron and base-metal sulfides, indicating a gold-bearing hydrothermal system. This study integrates stream sediment geochemistry, factor analysis, and field, petrographic, and mineragraphic evidence to

evaluate gold potential along the Khonsar–Aligudarz axis, providing a practical framework for targeted exploration in comparable metamorphic terrains.

Geological setting

The study area lies in the central Sanandaj–Sirjan metamorphic-structural zone, one of Iran's principal metamorphic-magmatic and metallogenic belts, whose evolution is generally attributed to Paleo-Tethys closure and prolonged Neo-Tethyan subduction beneath Central Iran from the Late Triassic to the Cenozoic, accompanied by magmatism, regional metamorphism, and polyphase deformation; an alternative model instead links part of the Mesozoic magmatism to intracontinental rifting. The belt mainly comprises Mesozoic sedimentary–volcanic sequences metamorphosed under greenschist- to amphibolite-facies conditions, producing slate, phyllite, quartzite, schist, amphibolite, and gneiss. In the central sector, Triassic–Jurassic phyllite–schist sequences are cut by numerous shear zones and faults that, with hydrothermal circulation and quartz veining, principally control mineralization.

Materials and methods

Geochemical data from 947 stream sediment samples covering ~1,419 km² across the Golpayegan and Aligudarz 1:100000 sheets (Mohajjel and Eftekhari Nezhad, 1992; Soheili et al., 1992), previously analyzed by inductively coupled plasma spectrometry and archived by the Geological Survey and Mineral Exploration Organization of Iran, were used. Concentrations of Cu, Pb, Zn, Ba, B, Co, Cr, Mn, Ni, Sc, Sr, V, and Y were evaluated via descriptive statistics, frequency and box plots, and factor analysis with varimax rotation on standardized data to extract mineralization-related factors and construct factor-score maps. The previously undocumented Darreh Sari anomaly was investigated over two field campaigns documenting mineralized outcrops, and alteration zones, sampled for petrographic and mineragraphic study; five rock-chip samples from two gold-bearing veins were analyzed for gold grade by Fire Assay.

Results

Stream Sediment Geochemistry Results

Stream sediment concentrations show wide ranges reflecting catchment-scale geochemical

heterogeneity. Co and Ni display the most uniform distributions, consistent with lithological control, whereas B (CV = 73.4%) and Mn (CV = 94.1%) show the greatest dispersion, reflecting hydrothermal alteration or oxide concentration; Pb shows the highest variability among base metals (CV = 59.3%), suggesting local sulfide enrichment. Factor analysis extracted six factors: lithological (Sc–Y–V), mafic (Ni–Cr–Co), mineralization (Pb–Zn–Mn), alteration (B–Ba), carbonate (Sr), and magmatic-hydrothermal (Cu). The mineralization factor-score map shows pronounced anomalies at the Reza Abad, Hasan Abad, and Takht-e Khosrow occurrences, plus a distinct NW–SE-trending anomaly at Darreh Sari matching the vein orientation; all anomalies are confined to the Triassic–Jurassic greenschist unit, confirming its role in mineralization.

At Darreh Sari, local geology comprises Precambrian mica schists with metarhyolite intercalations, Triassic–Jurassic units (marble, black shale, slate, phyllite, schist), granodioritic intrusions, and Quaternary deposits. The intensely fractured, thrust-bounded metamorphic units favored quartz-vein emplacement, while carbonaceous black shales likely supplied sulfur and gold. Gold occurs mainly as two NW–SE-trending silicic veins (~990 m long, ~2 m wide) parallel to host-rock schistosity, locally cut by younger veinlets indicating post-mineralization reactivation. Fire Assay of five samples yielded gold grades of 87, 1051, 2591, and 5256 mg/t east to west along the main vein and 557 mg/t in a subsidiary vein, with the highest grades in the west matching the strongest anomaly and confirming economic mineralization. Mineragraphic study shows abundant multi-generation pyrite and pyrrhotite, accessory arsenopyrite, marcasite, chalcopyrite, sphalerite, and galena as intergrowths and cavity fillings, subordinate early-stage magnetite, and colloform marcasite, consistent with a hydrothermal quartz-vein system corroborating the geochemical model.

Discussion

Gold mineralization at Darreh Sari developed within a Sanandaj–Sirjan segment shaped by Neo-Tethyan convergence, regional metamorphism, and crustal-scale shear zones. Factor analysis effectively separated lithological background (Factors 1, 2) from mineralization-related components (Factors 3, 6), which form discrete anomalies independent of

lithological boundaries and spatially linked to alteration, confirming the superiority of multivariate over single-element interpretation in structurally complex terrains. The close correspondence between anomalies, shear zones, and quartz veins indicates that brittle–ductile structures were the primary conduits for mineralizing fluids, consistent with structural controls documented for the Muteh gold belt and other orogenic systems of the zone. The paragenetic sequence, pyrite and pyrrhotite followed by base-metal sulfides, reflects progressive evolution of a multistage hydrothermal system consistent with orogenic gold models. Carbon-rich host rocks likely contributed sulfur, CO₂, and metals through devolatilization, consistent with models in which organic matter scavenges, transports, and helps precipitate gold via fluid reduction. Surface hematitic staining likely reflects supergene oxidation, yet the coherent anomalies indicate the primary hydrothermal signal survived weathering. These results confirm that multivariate analysis of stream sediment data reveals hydrothermal signals in complex terrains, and that integrating it with structural and remote-sensing data effectively reduces exploration uncertainty and prioritizes drilling targets.

Conclusion

This study demonstrates that factor analysis of stream sediment geochemical data, integrated with geological and mineragraphic evidence, effectively identifies gold-related anomalies in the Darreh Sari area and along the Khonsar–Aligudarz belt. Separating lithological components from hydrothermal signals enabled recognition of genuine mineralization-related anomalies, whose strong correspondence with NW–SE-trending shear zones, quartz veins, and Triassic–Jurassic metamorphic units confirm the key role of structural controls in channeling fluids and concentrating gold. Consistency between geochemical and field/mineragraphic observations validates a structurally controlled hydrothermal model, offering an efficient framework for prioritizing exploration targets and reducing uncertainty in early-stage gold exploration across comparable settings of the Sanandaj–Sirjan Zone.



ارزیابی پتانسیل کانه‌زایی طلا در محور خوانسار- الیگودرز با تأکید بر منطقه دره‌ساری، با استفاده از تحلیل عاملی و شواهد زمین‌شناسی

مینا شاهین^۱، زهرا اعلمی‌نیا^{۲*}، زهره حسین‌زاده^۳، سیدمحسن طباطبایی‌منش^۴، پوریا محمودی^۵

^۱ دانشجوی دکتری، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

^۲ دانشیار، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

^۳ استادیار، گروه مهندسی معدن، دانشکده مهندسی معدن و مواد، دانشگاه صنعتی همدان، همدان، ایران

^۴ استاد، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

^۵ دکتری، شرکت تهیه و تولید مواد معدنی ایران (ایمپاسکو)، تهران، ایران

چکیده

اطلاعات مقاله

ارزیابی پتانسیل کانه‌زایی طلا در مناطق دگرگونی به دلیل تأثیر هم‌زمان تنوع سنگ‌شناسی، دگرسانی‌های گرمایی و پیچیدگی‌های ساختاری بر الگوهای زمین‌شیمیایی، نیازمند به کارگیری روش‌های تحلیلی کارآمد است. در این پژوهش، پتانسیل کانه‌زایی طلا در محور خوانسار- الیگودرز با تلفیق تحلیل عاملی و شواهد زمین‌شناسی مورد ارزیابی قرار گرفته است. برای این منظور، داده‌های رسوب آبراهه‌ای مربوط به برگه‌های زمین‌شیمیایی ۱:۱۰۰۰۰۰ گلاپایگان و الیگودرز پردازش شده و روابط بین عناصر مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که تحلیل عاملی توانسته است مؤلفه مرتبط با کانه‌زایی طلا را از زمینه‌ی سنگ‌شناسی منطقه به خوبی تفکیک کرده و پهنه‌های دارای بیشترین پتانسیل کانه‌زایی را مشخص کند. اعتبارسنجی نتایج از طریق بررسی‌های صحرایی، سنگ‌نگاری و کانی‌شناسی در محدوده دره‌ساری، وجود رگه- رگچه‌های کوارتز- هماتیت‌دار با روند شمال‌غربی- جنوب‌شرقی، حاوی کانی‌های پیریت، پروتیت، آرسنوپیریت، مارکازیت، کالکوپیریت، اسفالریت و گالن و همچنین کانی‌های اکسیدی آهن، منگنز و مس شامل هماتیت، گوتیت و به ندرت مگنتیت، پیرولولزیت و مالاکیت را در شیست‌ها و متاپلیت‌های تریاس- ژوراسیک تأیید می‌کند. انطباق مناسب بی‌هنجاری‌های زمین‌شیمیایی با پهنه‌های برشی و رگه‌های کوارتزی نشان می‌دهد که این ساختارها نقش اصلی را در هدایت سیالات کانه‌زا و تمرکز طلا ایفا کرده‌اند. نتایج این پژوهش بیانگر آن است که تلفیق تحلیل عاملی با اطلاعات زمین‌شناسی، رویکردی مؤثر برای کاهش عدم قطعیت در اکتشاف ناحیه‌ای و اولویت‌بندی اهداف اکتشافی طلا در بخش میانی پهنه‌ی سنندج- سیرجان و سایر محیط‌های دگرگونی مشابه را فراهم می‌آورد.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۵/۰۶

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۶/۲۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۶/۲۳

واژه‌های کلیدی

طلا

تحلیل عاملی

زمین‌شیمی رسوب‌های آبراهه

پهنه سنندج- سیرجان

پتانسیل کانه‌زایی

نویسنده مسئول

زهرا اعلمی‌نیا

alaminia@um.ac.ir ✉

استناد به این مقاله

شاهین، مینا؛ اعلمی‌نیا، زهرا؛ حسین‌زاده، زهره؛ طباطبایی‌منش، سیدمحسن و محمودی، پوریا، ۱۴۰۵. ارزیابی پتانسیل کانه‌زایی طلا در محور خوانسار- الیگودرز با تأکید بر منطقه دره‌ساری، با استفاده از تحلیل عاملی و شواهد زمین‌شناسی. زمین‌شناسی اقتصادی، ۱۸(۲): ۱۷۳-۱۹۷.

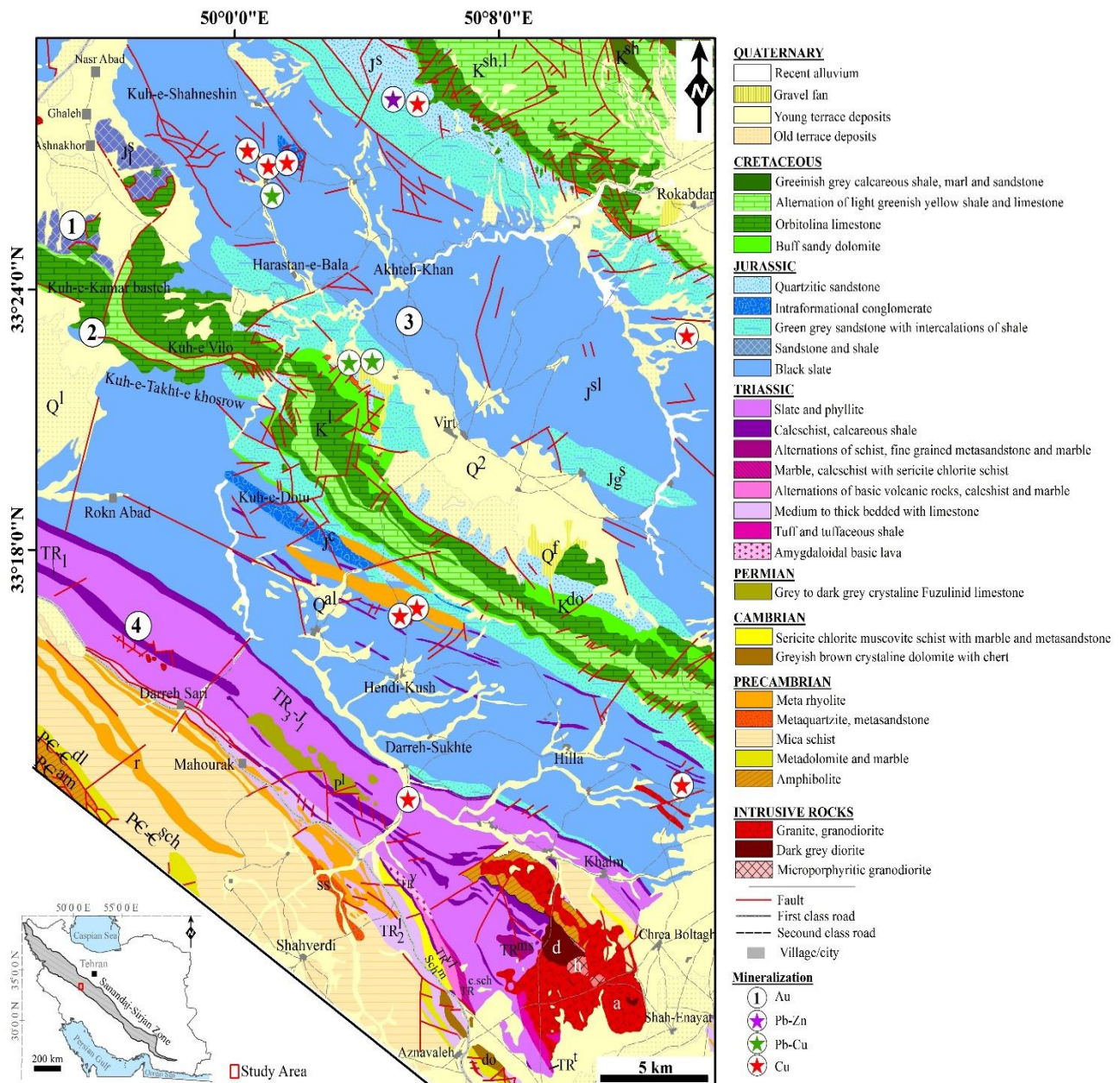
<https://doi.org/10.22067/econg.2026.1182>

مقدمه

طلا به عنوان یکی از مهم‌ترین فلزهای راهبردی و اقتصادی است که در طیف گسترده‌ای از سامانه‌های گرمایی و کوه‌زایی تشکیل می‌شود و شناسایی پهنه‌های مستعد آن همواره یکی از اهداف اصلی اکتشاف‌های معدنی به شمار می‌رود. در بخش میانی پهنه سنج- سیرجان، حذافصل خوانسار- الیگودرز، رخداد‌های متعدد طلا (مانند کانسارهای دره‌ساری، حسن‌آباد، رضا‌آباد، حسین‌آباد، کوچری و سنگ‌سفید) در ارتباط با شیست‌ها و متاپلیت‌های تریاس- ژوراسیک گزارش شده است (شکل ۱) (Moritz et al., 2006; Fazeli Oladi and Zamanian, 2024). این کانه‌زایی اغلب به صورت رگه- رگچه‌های کوارتزی توسعه یافته است و با مجموعه‌ای از سولفیدهای آهن و فلزهای پایه، همراه با دگرسانی‌هایی نظیر سیلیسی شدن، کلریتی شدن، کربناتی شدن و اکسایش، ارتباط نزدیکی دارند. در این منطقه، کنترل ساختاری ناشی از پهنه‌های برشی شکل‌پذیر- شکننده و برهم‌کنش سیالات گرمایی با سنگ‌های دگرگونی، نقش اساسی در تمرکز طلا و فلزهای پایه ایفا کرده است (Goldfarb and Groves, 2015; Sakhdari et al., 2021). با وجود شناخت مناسب از ویژگی‌های زمین‌شناسی و کانی‌شناسی این رخداد‌ها، ارزیابی الگوهای پراکندگی زمین‌شیمیایی طلا و عناصر همراه در مقیاس ناحیه‌ای همچنان با چالش‌هایی روبه‌رو است؛ زیرا رفتار متفاوت عناصر طی هوازدگی، فرسایش، انتقال و تمرکز در رسوب‌های آبراهه، موجب ایجاد الگوهای پیچیده و هم‌پوشان بی‌هنجاری‌های زمین‌شیمیایی می‌شود که تفسیر آنها تنها بر پایه غلظت تک‌عنصری، قابلیت اطمینان محدودی دارد (Hale and Plant, 1994; Fletcher, 1997; Helba et al., 2021).

زمین‌شیمی رسوب‌های آبراهه‌ای، یکی از مؤثرترین و اقتصادی‌ترین روش‌های اکتشاف ناحیه‌ای برای شناسایی کانه‌زایی‌های پنهان محسوب می‌شود؛ اما کارایی آن به نحوه پردازش و تفسیر داده‌های زمین‌شیمیایی وابسته است (Rose et al., 1979; Yilmaz, 2007). اگرچه روش‌های تک‌متغیره متداول برای تعیین آستانه‌های بی‌هنجاری کاربرد گسترده‌ای

دارند، این روش‌ها معمولاً قادر به آشکارسازی روابط پیچیده میان عناصر و تفکیک نشانه‌های ناشی از سامانه‌های مختلف کانه‌زایی نیستند (Tukey, 1997; Schwertman and Silva, 2007). در مقابل، تحلیل‌های آماری چندمتغیره، به ویژه تحلیل عاملی، با استخراج عوامل زمین‌شیمیایی مستقل و شناسایی همبستگی‌های پنهان میان عناصر، امکان تفکیک مؤلفه‌های مرتبط با کانه‌زایی طلا از زمینه‌های زمین‌شیمیایی و یا سامانه‌های پلی‌متال را فراهم می‌کند و دقت نقشه‌های پتانسیل کانه‌زایی را به طور محسوسی افزایش می‌دهند (Carranza, 2008; Sadeghi et al., 2015; Behera and Panigrahi, 2021; Ouchchen et al., 2022). در چهارچوب این مقاله، منطقه دره‌ساری در جنوب‌غربی گلپایگان و جنوب‌شرقی الیگودرز، پس از انجام بررسی‌های زمین‌شیمیایی رسوب‌های آبراهه‌ای، به عنوان یکی از بی‌هنجاری‌های طلا بارزسازی شده است. بررسی‌های صحرایی پی در پی، وجود رگه- رگچه‌های کوارتز- هماتیت‌دار درون شیست‌ها و متاپلیت‌های تریاس- ژوراسیک را همراه با مجموعه‌ای از سولفیدهای آهن و فلزهای پایه تأیید می‌کند که بیانگر یک سامانه گرمایی طلا در منطقه است. این منطقه فرصت مناسبی را فراهم می‌کند تا کارایی داده‌های زمین‌شیمی رسوب‌های آبراهه و تحلیل عاملی در شناسایی بی‌هنجاری‌های طلا و تعیین ارتباط آنها با ویژگی‌های زمین‌شناسی و کانه‌زایی مورد ارزیابی قرارگیرد. از این رو، این پژوهش با تلفیق بررسی‌های صحرایی، سنگ‌نگاری و کانی‌شناسی رگه‌های کانه‌دار، داده‌های زمین‌شیمیایی رسوب‌های آبراهه و تحلیل عاملی، به ارزیابی پتانسیل کانه‌زایی طلا در محور خوانسار- الیگودرز پرداخته است. اهداف اصلی این بررسی شامل شناسایی روابط زمین‌شیمیایی عناصر شاخص، تعیین عوامل کنترل‌کننده توزیع طلا و فلزهای پایه و تهیه نقشه پتانسیل کانه‌زایی بر پایه امتیازهای عاملی و شاخص‌های زمین‌شیمیایی است. نتایج این پژوهش، علاوه بر ارائه درک بهتر از کنترل‌های زمین‌شناسی و زمین‌شیمیایی کانه‌زایی طلا در شیست‌های تریاس- ژوراسیک، می‌تواند چهارچوبی کاربردی برای اکتشاف هدفمند ذخایر طلا در محیط‌های پلی‌متال مشابه ارائه کند.



شکل ۱. پراکنندگی رخدادهای معدنی در محدوده سنگ‌های دگرگونی (شیست‌های تریاس- ژوراسیک)، با اقتباس از برگه‌های زمین‌شناسی یکصد هزار گلیپایگان (Mohajjel and Eftekhari Nezhad, 1992) و الیگودرز (Soheili et al., 1992) در محور خوانسار- الیگودرز. موقعیت چهار رخداد شاخص طلا در این شکل با شماره مشخص شده است: ۱- رضاآباد، ۲- تخت خسرو، ۳- حسن آباد و ۴- دره ساری. مناطق حسین آباد (مس+ طلا) و سنگ سفید با فاصله بیشتر در بخش شرقی و خارج این نقشه قرار دارند.

Fig. 1. Distribution of mineral occurrences within the metamorphic rocks (Triassic-Jurassic schists), adapted from the 1:100,000 Geological map sheets of Golpayegan (Mohajjel and Eftekhari Nezhad, 1992) and Aligudarz (Soheili et al., 1992) in the Khonsar-Aligudarz belt. The locations of four significant gold occurrences are indicated in this figure with the following numbers: 1- Reza Abad, 2- Takht-e Khosrow, 3- Hasanabad and 4- Darreh Sari. The areas of Hossein Abad (Cu+Au) and Sang-Sefid are located farther to the east, outside the extent of this map.

زمین‌شناسی

منطقه مورد بررسی در بخش میانی پهنه دگرگونی- ساختاری سنندج- سیرجان، یکی از مهم‌ترین کمربندهای دگرگونی- ماگمایی و فلززایی ایران، واقع شده است (شکل ۱). تکامل زمین‌شناسی این پهنه اغلب به بسته‌شدن اقیانوس پالئوتیس، گشایش اقیانوس نئوتیس و فرورانش طولانی مدت لیتوسفر اقیانوسی نئوتیس در زیر حاشیه جنوبی ایران مرکزی از اواخر تریاس تا سنوزوئیک نسبت داده می‌شود (Stampfli et al., 1991; Alavi, 1996; Horton et al., 2008; Bagheri and Stampfli, 2008; Alirezaei and Hassanzadeh, 2012; Zanchetta et al., 2013; Madanipour et al., 2018). این فرایند با ماگماتیسم، دگرگونی ناحیه‌ای و دگرشکلی‌های چندمرحله‌ای همراه بوده و به تشکیل کمان ماگمایی مزوزوئیک پهنه سنندج- سیرجان، توسعه زون‌های برشی و تمرکز سامانه‌های گرمایی منجر شده است. با این حال، در سال‌های اخیر، دیدگاه جایگزینی نیز ارائه شده است که بخشی از ماگماتیسم مزوزوئیک این پهنه را حاصل کشش درون‌قاره‌ای و ریف‌ت قاره‌ای می‌داند و سنگ‌های آتشفشانی ژوراسیک- کرتاسه را نیز به فعالیت‌های ریف‌تی نسبت می‌دهد (Azizi and Stern, 2019; Stern et al., 2021). با وجود این، شواهد زمین‌شناسی، دگرگونی و ساختاری موجود، همچنان مدل فرورانش اقیانوس نئوتیس را به عنوان تبیین غالب برای تکامل زمین‌ساختی و فلززایی پهنه سنندج- سیرجان تأیید می‌کنند. سنگ‌های پهنه سنندج- سیرجان اغلب از توالی‌های رسوبی و آتشفشانی مزوزوئیک تشکیل شده‌اند که طی رویدادهای

کوه‌زایی آلپی تحت دگرگونی ناحیه‌ای با شدت‌های متفاوت، اغلب در رخساره شایسته سبز تا آمفیبولیت، قرار گرفته‌اند (Mohajjel and Fergusson, 2000; Shakerardakani et al., 2015; Derikvand, 2022). حاصل این دگرگونی، گسترش مجموعه‌ای از اسلیت، فیلیت، کوارتزیت، میکاشیست و گارنت شایسته، آمفیبولیت، گنیس و سنگ‌های آذرین دگرگون‌شده است که بخش عمده رخنمون‌های پهنه را تشکیل می‌دهند. در بخش میانی پهنه سنندج- سیرجان، توالی‌های تریاس- ژوراسیک شامل فیلیت، شایسته، ماسه‌سنگ‌های دگرگون و میان‌لایه‌های آتشفشانی به وسیله زون‌های برشی و گسل‌های متعدد قطع شده‌اند (شکل ۱). این ساختارها همراه با گردش سیالات گرمایی، دگرسانی و تشکیل رگه‌های کوارتزی و اکسیدهای آهن، نقش اساسی در تمرکز کانه‌زایی طلا و سولفیدهای فلزهای پایه داشته‌اند و از مهم‌ترین عوامل کنترل‌کننده کانه‌زایی در این بخش از کمر بند سنندج- سیرجان به شمار می‌روند.

روش مطالعه

در این پژوهش، از داده‌های زمین‌شیمی ۹۴۷ نمونه رسوب آبراهه، برگه‌های ۱:۱۰۰۰۰۰ زمین‌شیمیایی از پایگاه ملی داده‌های علوم زمین کشور که پیش‌تر در قالب برنامه‌های اکتشافی از سوی سازمان زمین‌شناسی و اکتشاف‌های معدنی کشور به روش طیف‌سنجی پلاسما جفت‌شده القایی تجزیه شده بودند (جدول ۱)، استفاده شده است.

جدول ۱. مؤلفه‌های آماری توصیفی داده‌های زمین‌شیمیایی رسوب‌های آبراهه‌ای در محور خوانسار- الیگودرز. مقادیر عناصر بر حسب گرم در تن گزارش شده است.

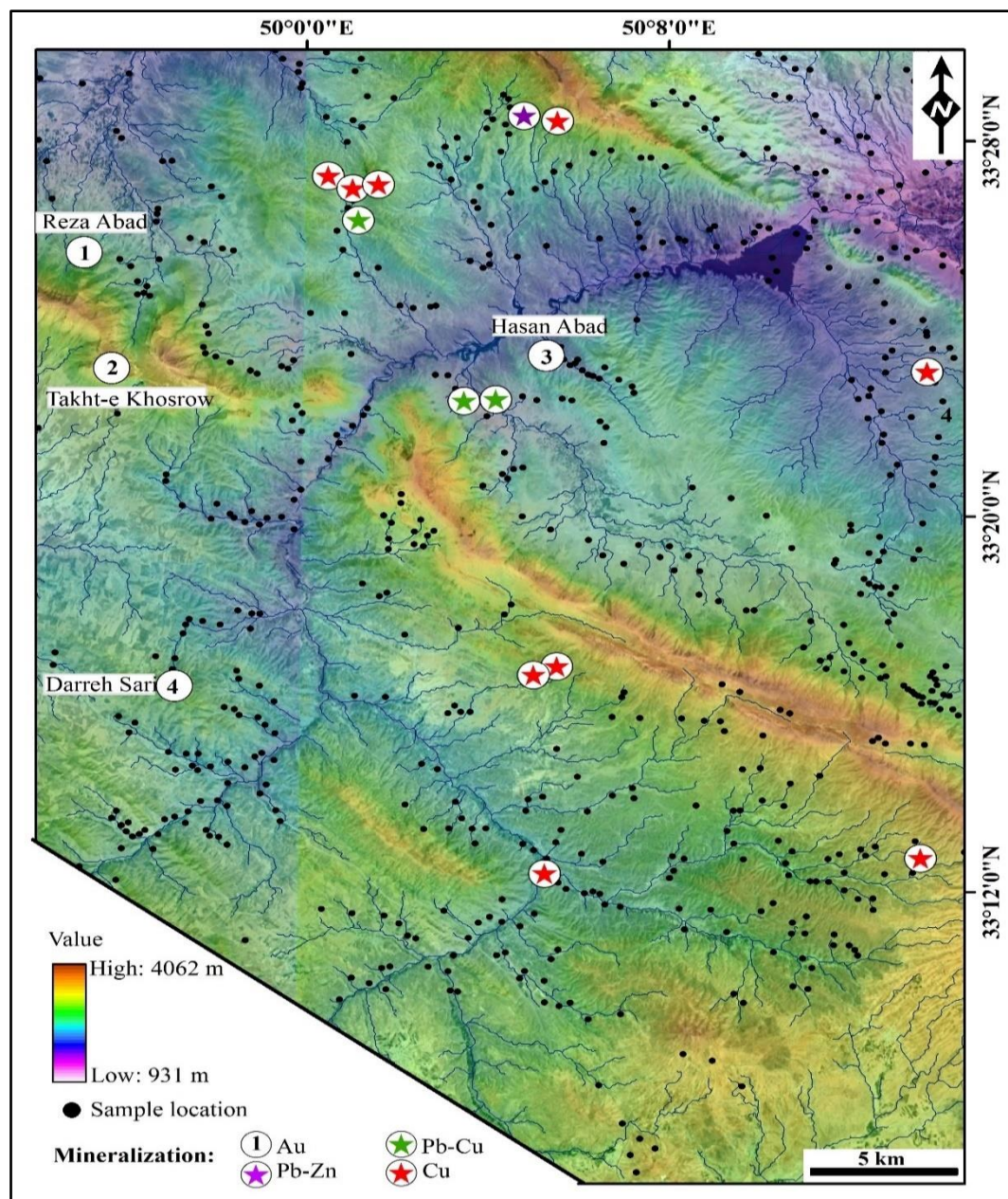
Table 1. Descriptive statistical parameters of stream sediment geochemical data in the Khonsar-Aligudarz belt. Element concentrations are reported in ppm.

Variable	Ba	B	Co	Cr	Cu	Mn	Pb	Zn	Ni	Sc	Sr	V	Y
Minimum	30.0	8.0	9.0	22.0	20.0	0.0	11.0	42.0	26.0	2.0	16.0	19.5	2.5
Maximum	1000.0	1000.0	52.0	540.0	186.0	1690.0	417.0	721.0	209.0	90.0	1000.0	620.0	124.0
Mean	333.4	76.3	23.9	184.1	38.9	403.6	35.2	89.6	74.2	21.1	161.2	136.7	36.2
Std. deviation	123.8	56.0	4.7	78.5	13.1	380.0	20.9	41.2	21.9	10.4	75.9	53.1	16.4
CV %	37.1	73.4	19.5	42.6	33.7	94.1	59.3	46.0	29.6	49.1	47.1	38.8	45.2

CV- Coefficient of Variation values

الیگودرز (Soheili et al., 1992) انتخاب شده‌اند. موقعیت مکانی نمونه‌های رسوب آبراهه بر روی **مدل رقومی ارتفاع** در **شکل ۲** ارائه شده است.

این نمونه‌ها از محدوده‌ای به وسعت حدود ۱۴۱۹ کیلومتر مربع در بخش غربی برگه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ گلیپایگان (Mohajjel and Eftekhar Nezhad, 1992) و بخش شرقی برگه ۱:۱۰۰۰۰۰



شکل ۲. پراکندگی نقاط نمونه‌برداری رسوب‌های آبراهه‌ای و موقعیت رخدادهای معدنی همراه با سنگ‌های دگرگونی (شیست، اسلیت و فلیت‌ها) بر روی نقشه مدل رقومی ارتفاعی در محور خوانسار- الیگودرز

Fig. 2. Distribution of stream sediment sampling locations and mineral occurrences, along with the extent of metamorphic rocks (schist, slate and phylites), overlaid on the Digital Elevation Model in the Khonsar-Aligudarz belt

نتایج به دست آمده از بررسی‌های صحرایی و میکروسکوپی برای ارزیابی میزان انطباق نواحی بی‌هنجاری شناسایی شده با شواهد واقعی کانه‌زایی و تأیید قابلیت تحلیل عاملی در پهنه‌بندی پتانسیل کانه‌زایی طلا مورد استفاده قرار گرفته است. همچنین از دو رگه طلادار، تعداد ۵ نمونه به روش خرده‌سنگی برداشت و برای تعیین عیار طلا به روش Fire Assay به آزمایشگاه کانساران پینالود ارسال شد (جدول ۴).

نتایج زمین‌شیمی رسوب‌های آبراهه آمار توصیفی و توزیع فراوانی عناصر

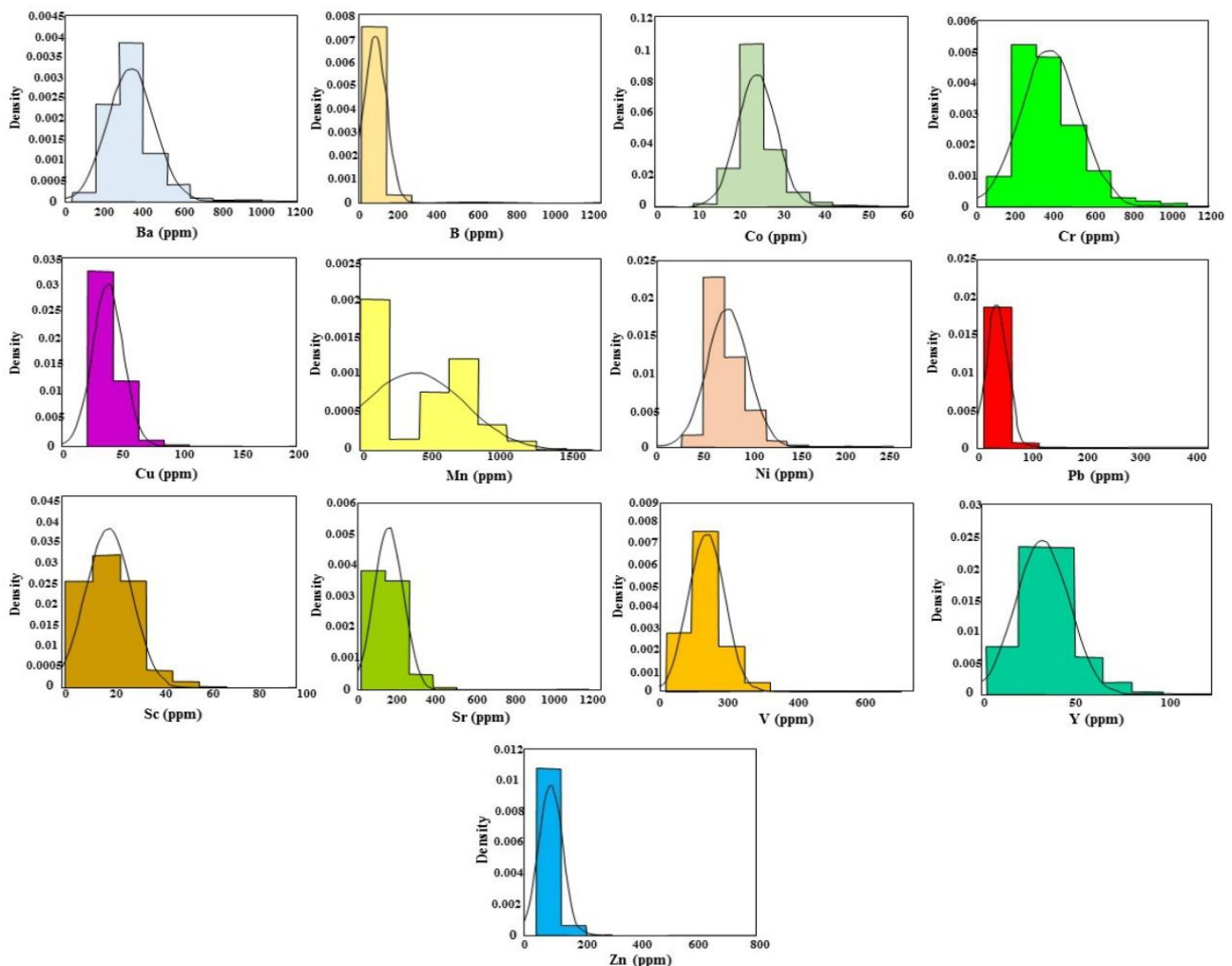
نتایج آمار توصیفی داده‌های زمین‌شیمیایی رسوب‌های آبراهه‌ای در جدول ۱ ارائه شده است. غلظت عناصر مورد بررسی، دامنه تغییرات متفاوتی را نشان می‌دهد که بیانگر ناهمگونی زمین‌شیمیایی در حوضه‌های آبریز منطقه است. این ناهمگونی می‌تواند حاصل تفاوت در ترکیب سنگ‌شناسی و کانی‌شناسی واحدهای منشأ، شدت هوازدگی و فرسایش، فرایندهای انتقال و تمرکز رسوب‌ها و در مقیاس محلی، تأثیر دگرسانی و کانه‌زایی باشد. با توجه به اینکه حوضه‌های آبریز منطقه اغلب از واحدهای دگرگونی تریاس-ژوراسیک، شامل شیست، فیلیت و اسلیت، واحدهای کربناته مرزوتیک و توده‌های نفوذی تغذیه می‌شوند، ترکیب زمین‌شیمیایی رسوب‌های آبراهه‌ای را می‌توان حاصل برهم‌کنش سهم این واحدهای سنگی و فرایندهای ثانویه مؤثر بر آنها در نظر گرفت.

بررسی نمودارهای فراوانی و جعبه‌ای نشان می‌دهند که بخش عمده عناصر دارای توزیع نامتقارن و چولگی مثبت هستند؛ به گونه‌ای که قسمت اصلی نمونه‌ها در محدوده غلظتی پایین تا متوسط متمرکز شده و تعداد محدودی از نمونه‌ها دارای مقادیر بسیار بالاتری هستند (شکل‌های ۳ و ۴). این ویژگی در عناصر باریم، بور، استرانسیم، وانادیوم و به ویژه روی آشکارتر است (شکل ۴). در چنین توزیع‌هایی، مقادیر بالا در دنباله توزیع می‌توانند میانگین را به سمت مقادیر بیشتر سوق دهند.

در این بررسی، غلظت عناصر مس، سرب، روی، باریم، بور، کبالت، کروم، منگنز، نیکل، اسکاندیوم، استرانسیم، وانادیوم و ایتریوم برای ارزیابی پتانسیل کانه‌زایی طلا مورد استفاده قرار گرفته است. در نخستین گام، مؤلفه‌های آمار توصیفی شامل کمینه، بیشینه، میانگین، انحراف معیار و ضریب تغییرات برای تمامی عناصر محاسبه شد تا ویژگی‌های آماری داده‌ها و میزان پراکندگی آنها ارزیابی شود. سپس، برای بررسی شکل توزیع، چولگی و کشیدگی دنباله توزیع، نمودارهای فراوانی ترسیم شدند. همچنین، از نمودارهای جعبه‌ای برای مقایسه میان، دامنه بین چارکی، پراکندگی و شناسایی داده‌های پرت استفاده شد. در نهایت، برای شناسایی همبستگی میان عناصر و استخراج مجموعه‌های زمین‌شیمیایی مرتبط با فرایندهای کانه‌زایی، تحلیل عاملی بر روی داده‌های استاندارد شده انجام شده است. پس از استخراج عوامل اصلی و چرخش آنها به روش واریماکس، عوامل بر اساس بارهای عاملی تفسیر شده‌اند و عامل یا عوامل مرتبط با کانه‌زایی طلا شناسایی شده است. سپس با استفاده از امتیازهای عاملی، نقشه پراکنش عامل کانه‌زا تهیه و نواحی دارای بیشترین پتانسیل کانه‌زایی طلا مشخص شده است (شکل ۵).

برای اعتبارسنجی و ارزیابی درستی نتایج حاصل از تحلیل عاملی و ارزیابی عملکرد آن در پهنه‌بندی پتانسیل کانه‌زایی، منطقه اکتشافی دره‌ساری که در نقشه امتیازهای عاملی دارای روند مشخصی از بی‌هنجاری‌های زمین‌شیمیایی است، به عنوان منطقه هدف انتخاب شد.

این محدوده طی دو مرحله بازدید صحرایی مورد بررسی قرار گرفته است و رخنمون‌های کانی‌سازی، زون‌های دگرسانی و شواهد ساختاری مرتبط با کانه‌زایی برداشت و مستندسازی شده‌اند. از رخنمون‌های شاخص و نیز از دو رگه طلادار، نمونه‌های سنگی برداشت شد. بخشی از این نمونه‌ها برای تهیه مقاطع نازک و نازک-صیقلی انتخاب شدند و با استفاده از میکروسکوپ نوری دو منظوره، بررسی‌های سنگ‌نگاری و کانه‌نگاری بر روی آنها انجام شد.



شکل ۳. نمودار توزیع فراوانی غلظت عناصر در رسوب‌های آبراه‌های در محور خوانسار- الیگودرز. منحنی پیوسته نشان‌دهنده توزیع چگالی داده‌هاست.

Fig. 3. Histograms showing frequency distribution diagrams of element concentrations in stream sediments in the Khonsar-Aligudarz belt. The continuous curve represents the density distribution of the data.

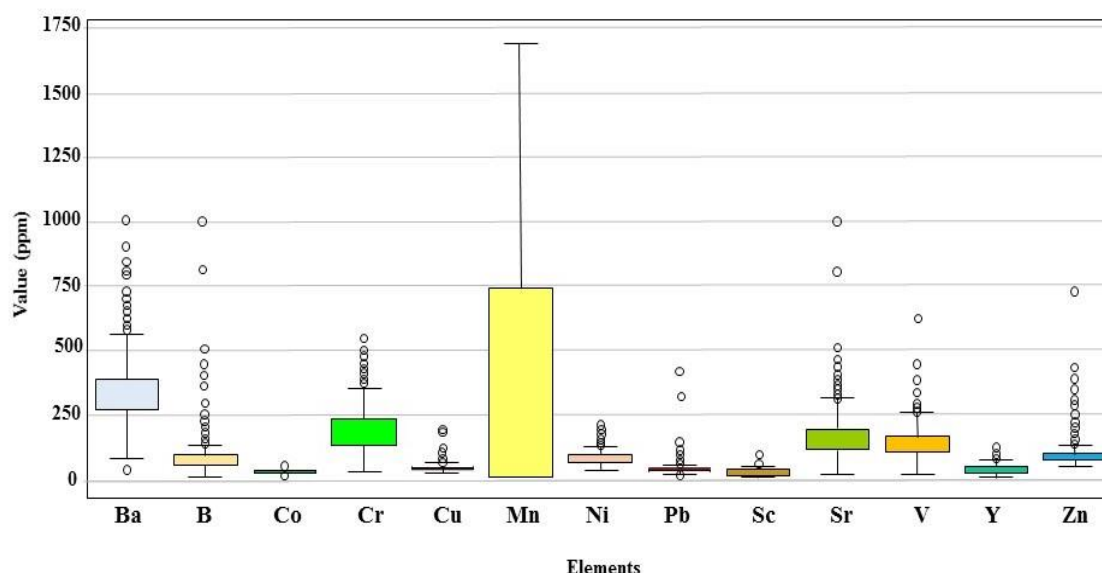
کانی‌های باریم‌دار و یا تمرکز موضعی باریم باشند و برای تعیین منشأ آنها باید با موقعیت مکانی نمونه‌ها و سایر عناصر همراه مقایسه شوند. عنصر بور دارای بیشترین دامنه تغییرات ۸ تا ۱۰۰۰ گرم در تن و ضریب تغییرات بسیار بالا (۷۳/۴ درصد) است که بیانگر رفتار بسیار ناهمگن این عنصر در حوضه آبریز بوده و احتمالاً با فرایندهای دگرسانی گرمابی، حضور کانی‌های رسی یا تمرکز موضعی در امتداد ساختارهای زمین‌شناسی مرتبط است.

عنصر باریم با میانگین ۳۳۳ گرم در تن و دامنه تغییرات ۳۰ تا ۱۰۰۰ گرم در تن، پراکندگی نسبتاً زیادی ($CV = ۳۷\%$) را نشان می‌دهد (شکل ۳). در نمودار جعبه‌ای، بخش عمده داده‌ها در محدوده نسبتاً فشرده‌ای قرار گرفته است؛ اما تعداد قابل توجهی مقدار پرت در بالای چارک سوم مشاهده می‌شود که دامنه بالایی توزیع را گسترش داده است (شکل ۴). این الگو نشان‌دهنده وجود تعداد محدودی نمونه با غلظت Ba بالاتر از جمعیت اصلی است. چنین مقادیری می‌توانند ناشی از تغییرات سنگ مادر، حضور

منابع کانه‌دار محلی را تقویت می‌کند. با وجود دامنه نسبتاً محدودتر، نمودار جعبه‌ای عناصر Cu و Pb چندین مقدار پرت در بخش بالایی توزیع نشان می‌دهند که وجود نمونه‌های دارای غلظت بالاتر از جمعیت اصلی را آشکار می‌کنند (شکل ۴). نمودار فراوانی Zn یک چولگی مثبت مشخص و دنباله‌ای طولانی به سمت غلظت‌های بالا نشان می‌دهد؛ در حالی که نمودار جعبه‌ای روی نیز تعداد زیادی مقدار پرت بالاتر از چارک سوم را آشکار می‌کند (شکل‌های ۳ و ۴). این ویژگی نشان می‌دهد که بخش عمده نمونه‌ها دارای غلظت‌های نسبتاً پایین تا متوسط Zn هستند؛ در حالی که تعداد محدودی نمونه از غنی‌شدگی قابل توجه برخوردارند. چنین الگویی از نظر اکتشافی اهمیت دارد؛ زیرا می‌تواند نشان‌دهنده حضور منابع موضعی Zn یا کنترل‌های زمین‌شناسی و کانی‌شناسی متفاوت در برخی حوضه‌ها باشد. با این حال، این مقادیر بالا تنها در صورت تطابق با شواهد زمین‌شناسی، روابط عنصری و الگوی مکانی می‌توانند به عنوان بی‌هنجاری زمین‌شیمیایی مرتبط با کانه‌زایی تفسیر شوند.

عناصر سازگار کروم، نیکل و کبالت به ترتیب دارای میانگین‌های ۱۸۴، ۷۴ و ۲۴ گرم در تن هستند. مقدار نسبتاً بالای کروم و نیکل نسبت به میانگین پوسته قاره‌ای نشان می‌دهد که بخشی از رسوب‌ها از سنگ‌های غنی از کانی‌های فرومنیزین یا واحدهای دگرگون‌شده منشأ گرفته‌اند؛ در حالی که ضریب تغییرات پایین‌تر کبالت (۱۹/۵ درصد) بیانگر توزیع نسبتاً یکنواخت این عنصر در سطح منطقه است. در مقابل، کروم با ضریب تغییرات ۴۲/۶ درصد تغییرات محسوسی را نشان می‌دهد که می‌تواند ناشی از تغییر سهم واحدهای سنگی مختلف در حوضه‌های آبریز باشد (جدول ۱).

عناصر مس، سرب و روی که از عناصر شاخص در بررسی‌های اکتشافی محسوب می‌شوند، به ترتیب دارای میانگین‌های ۳۸/۹، ۳۵/۲ و ۸۹/۶ گرم در تن هستند. ضریب تغییرات متوسط تا نسبتاً زیاد این عناصر (۳۳/۷ تا ۵۹/۳ درصد) نشان می‌دهد که علاوه بر کنترل سنگ‌شناسی، تمرکز موضعی ناشی از کانه‌زایی یا دگرسانی نیز در توزیع آنها مؤثر بوده است. به ویژه سرب با ضریب تغییرات ۵۹/۳ درصد و بیشترین غلظت ۴۱۷ گرم در تن، از رفتار ناهمگن‌تری نسبت به مس و روی برخوردار است و احتمال وجود



شکل ۴. نمودارهای جعبه‌ای غلظت ۱۳ عنصر در رسوب‌های آبراه‌ای در محور خوانسار- الیگودرز (همه اعداد بر حسب قسمت در میلیون است).

Fig. 4. Box and whisker plots of the concentration of 13 elements in stream sediments in the Khonsar–Aligudarz belt (all numbers are in ppm).

بی‌هنجاری و تعیین اهداف اکتشافی در منطقه مورد بررسی مورد استفاده قرار گیرند.

تحلیل عاملی

تحلیل عاملی یکی از روش‌های آماری چندمتغیره است که به منظور بررسی ساختار واریانس و همبستگی بین مجموعه‌ای از متغیرهای وابسته و تبیین آنها بر اساس تعداد محدودی عامل پنهان به کار می‌رود. به بیان دیگر، این روش تلاش می‌کند داده‌های پیچیده و چندبعدی را از طریق کاهش ابعاد و بیان آنها در قالب چند عامل بنیادی، ساده‌سازی و ساختاردهی کند. در این بررسی، برای شناسایی روابط پنهان و الگوهای مشترک بین عناصر زمین‌شیمیایی، بررسی عوامل کنترل‌کننده توزیع عناصر و تفکیک اثرات سنگ‌شناسی از فرایندهای کانه‌زایی، تحلیل عاملی بر روی داده‌های زمین‌شیمی رسوب‌های آبراهه انجام شده است که از بین آنها، شش عامل اصلی استخراج شد و نتایج آن در **جدول ۲** ارائه شده است. این عوامل بیانگر منشأهای متفاوت عناصر و نقش واحدهای سنگی مختلف در ترکیب زمین‌شیمیایی رسوب‌های هستند.

منگنز بیشترین میزان پراکندگی را در میان عناصر مورد بررسی نشان می‌دهد (۹۴/۱ درصد)؛ به طوری که غلظت آن از مقادیر بسیار پایین تا ۱۶۹۰ گرم در تن متغیر است. شکل نامتقارن نمودار جعبه‌ای منگنز، همراه با دنباله بلند مقادیر بالا، نشان‌دهنده ناهمگنی شدید این عنصر است (**شکل ۴**). این رفتار بیانگر تأثیر شدید شرایط اکسایش- کاهش، تمرکز در اکسیدهای آهن و منگنز و یا حضور زون‌های دگرسانی موضعی است. از این رو، مقادیر بالای منگنز را نمی‌توان به طور مستقیم به کانه‌زایی نسبت داد. همچنین عناصر اسکاندیم، استرانسیوم، وانادیوم و ایتیم دارای ضرایب تغییرات بین ۴۵ تا ۴۹ درصد هستند که نشان‌دهنده تغییرات قابل توجه منشأ سنگی و ترکیب کانی‌شناسی در حوضه‌های مختلف است.

به طور کلی، مقادیر ضریب تغییرات نشان می‌دهد که کبالت و نیکل اغلب تحت کنترل سنگ‌شناسی منطقه قرار دارند؛ در حالی که بور، منگنز و سرب از رفتار بسیار ناهمگن برخوردار بوده و احتمالاً علاوه بر منشأ سنگی، تحت تأثیر فرایندهای گرمایی، دگرسانی و تمرکز کانه‌زایی قرار گرفته‌اند. بنابراین، این عناصر می‌توانند به عنوان شاخص‌های مناسب برای شناسایی نواحی

جدول ۲. ماتریس تحلیل عاملی بر روی داده‌های زمین‌شیمیایی رسوب‌های آبراهه‌ای در محور خوانسار- الیگودرز

Table 2. Factor loading matrix applied to stream sediment geochemical data in the Khonsar-Aligudarz belt

	D1	D2	D3	D4	D5	D6
Ba	0.575	0.034	0.233	0.400	0.279	0.060
B	0.138	-0.056	0.119	0.687	0.016	0.061
Co	0.094	0.653	0.068	-0.136	-0.073	0.365
Cr	0.437	0.694	-0.144	0.239	0.208	-0.086
Cu	0.031	0.206	0.115	0.085	-0.013	0.649
Mn	0.082	-0.171	0.460	0.210	-0.195	-0.013
Ni	0.153	0.852	-0.054	-0.086	-0.131	0.165
Pb	-0.071	-0.020	0.759	0.018	0.125	-0.010
Sc	0.904	0.239	0.016	-0.115	0.068	0.027
Sr	0.196	-0.067	-0.061	0.034	0.657	-0.029
V	0.733	0.302	0.035	0.307	0.152	0.141
Y	0.909	0.049	0.019	0.140	0.069	-0.017
Zn	0.139	0.104	0.688	0.050	-0.119	0.295

سامانه‌های گرمابی محسوب می‌شود و حضور منگنز نیز می‌تواند ناشی از همراهی با اکسیدهای آهن و منگنز یا فرایندهای برون‌زاد باشد. بنابراین این عامل احتمالاً بیانگر عامل کانه‌زایی بوده و می‌تواند به حضور رگه‌های سولفیدی، پهنه‌های دگرسانی یا تمرکز ثانویه عناصر فلزی در منطقه ارتباط داشته باشد.

عامل چهارم با بارهای نسبتاً زیاد بور ($0/687$)، باریم ($0/400$) و وانادیوم ($0/307$) مشخص می‌شود (جدول ۲، عامل D4). غنی‌شدگی عنصر بور معمولاً با سنگ‌های دگرگونی غنی از مواد آلی، سیالات گرمابی و دگرسانی مرتبط است. با توجه به وجود شلیست‌ها، اسلیت‌ها و شیل‌های کربن‌دار در منطقه، احتمالاً این عامل منعکس‌کننده تأثیر سنگ‌های دگرگونی غنی از مواد آلی و آزادشدن بور در طی فرایندهای دگرگونی و یا گردش سیالات است. حضور باریم نیز می‌تواند بیانگر تمرکز باریت یا جذب این عنصر در کانی‌های رسی باشد. بنابراین این عامل را می‌توان به عنوان عامل دگرسانی- رسوبی تفسیر کرد.

عامل پنجم اغلب تحت تأثیر استرانسیم ($0/657$) قرار دارد (جدول ۲، عامل D5). استرانسیم به طور عمده در کانی‌های کربناته، جانشین کلسیم می‌شود. بنابراین این عامل به وضوح منشأ کربناته داشته و بیانگر تأثیر سنگ‌آهک‌های مزوزوئیک در ترکیب رسوب‌های آبراهه است. بارهای پایین سایر عناصر در این عامل نشان می‌دهد که استرانسیم به طور مستقل از سایر فرایندهای زمین‌شیمیایی رفتار کرده و شاخص مناسبی برای سهم واحدهای کربناته در منطقه است.

عامل ششم با بار غالب مس ($0/649$) و بارهای نسبتاً مثبت کبالت ($0/365$) و روی ($0/295$) مشخص می‌شود (جدول ۲، عامل D6). جدایش مس از مجموعه سرب- روی نشان می‌دهد که این عنصر احتمالاً منشأ متفاوتی نسبت به عامل سوم دارد. با توجه به حضور توده‌های نفوذی جوان در منطقه، این عامل می‌تواند بازتاب‌دهنده تأثیر سامانه‌های ماگمایی- گرمابی و یا کانه‌زایی مس مرتبط با توده‌های نفوذی باشد. در صورتی که در بررسی‌های صحرایی آثار دگرسانی، رگه‌های کوارتزی یا کانه‌سازی سولفیدی همراه با

عامل اول دارای بارهای عاملی مثبت و بسیار قوی برای اسکاندیم ($0/904$)، ایتیریم ($0/909$) و وانادیوم ($0/733$) و همچنین بارهای نسبتاً قوی برای باریم ($0/575$) و کروم ($0/437$) است (جدول ۲، عامل D1). فقدان همبستگی قابل توجه این عامل با عناصر شاخص کانه‌زایی نظیر سرب و روی، در کنار انطباق فضایی نقشه پراکندگی بار عامل با رخنمون واحدهای سنگی حوضه آبریز، نشان می‌دهد که این تجمع عنصری بیش از آنکه بازتاب فرایندهای کانه‌زایی باشد، متأثر از تغییرات سنگ‌شناختی و کانی‌شناختی منطقه است. اسکاندیم، ایتیریم و وانادیوم از عناصر نسبتاً کم‌تحرک به شمار می‌روند که در طی فرایندهای هوازدگی و حمل‌ونقل رسوبی، ویژگی‌های زمین‌شیمیایی سنگ منشأ خود را اغلب حفظ می‌کنند؛ از این رو، تمرکز آنها در کانی‌های مقاوم و فرومیزین می‌تواند نشان‌دهنده سهم سنگ‌های دگرگونی و تا حدی توده‌های نفوذی موجود در حوضه آبریز باشد (Madden and Tripp, 1987; Esmailoghli et al., 2021). بر این اساس، عامل D1 را می‌توان به عنوان یک عامل سنگ‌شناسی تفسیر کرد که در درجه اول بیانگر تغییرات ترکیب سنگ مادر در سطح حوضه است.

عامل دوم با بارهای بسیار بالای نیکل ($0/852$)، کروم ($0/694$) و کبالت ($0/653$) مشخص می‌شود. این سه عنصر از عناصر سازگار هستند و معمولاً در کانی‌های فرومیزین و سنگ‌های مافیک تا اولترامافیک (آمفیولیت و متابازیت) غنی می‌شوند (جدول ۲، عامل D2). با وجود اینکه رخنمون‌های اصلی منطقه شامل شلیست، اسلیت، فلیت، سنگ‌آهک، ماسه‌سنگ و توده‌های نفوذی است، مقادیر بالای این عناصر احتمالاً ناشی از حضور افق‌های غنی از کانی‌های فرومیزین در سنگ‌های دگرگونی، تأثیر توده‌های نفوذی و یا تمرکز مکانیکی کانی‌های سنگین در رسوب‌های آبراهه است. از این رو، این عامل نیز اغلب یک عامل سنگ‌شناسی- کانی‌شناسی محسوب می‌شود.

عامل سوم دارای بارهای غالب سرب ($0/759$)، روی ($0/688$) و منگنز ($0/460$) است (جدول ۲، عامل D3). همبستگی سرب و روی معمولاً یکی از شناخته‌شده‌ترین اثرهای زمین‌شیمیایی

معدنی شناخته شده ناحیه مقایسه شده است (جدول ۱ و شکل ۵). این مقایسه نشان می‌دهد که از میان شش بی‌هنجاری اصلی شناسایی شده، چهار مورد آنها با رخدادهای معدنی پیشین (رضاآباد، حسن آباد، تخت خسرو و دره ساری) هم‌پوشانی مکانی دارند (شکل ۵ و جدول ۳)، که به عنوان نخستین لایه اعتبارسنجی مستقل (بر پایه داده‌های پیشین، نه بازدید جدید) برای کارایی روش تحلیل عاملی در محور خوانسار- الیگودرز عمل می‌کند. در گام بعدی، از میان بی‌هنجاری‌های باقی مانده، منطقه دره ساری که بدون سابقه اکتشافی مدون بود، برای اعتبارسنجی تفصیلی (بازدید صحرائی و کانه‌نگاری) انتخاب شد تا توان این روش در شناسایی اهداف کاملاً جدید نیز محک زده شود.

بی‌هنجاری ۴ (منطقه دره ساری)

زمین‌شناسی و کانه‌زایی

منطقه دره ساری، به عنوان یکی از رخدادهای طلای تازه شناسایی شده در بخش میانی پهنه سهندج- سیرجان، درون توالی‌های دگرگونی مزوزوئیک و در امتداد ساختارهای برشی اصلی این کمربند زمین‌ساختی قرار گرفته است (شکل ۶-۸). این موقعیت ساختاری سبب شده است تا منطقه ویژگی‌های زمین‌شناسی پهنه سهندج- سیرجان از جمله دگرگونی ناحیه‌ای، دگرشکلی چندمرحله‌ای و گردش سیالات گرمایی را به خوبی حفظ کند. در مقیاس محلی، دره ساری از مجموعه‌ای از واحدهای دگرگونی، نفوذی و آبرفتی تشکیل شده است که به ترتیب از قدیم به جدید شامل دگرگونه‌های پرکامبرین، دگرگونه‌های تریاس- ژوراسیک، توده‌های نفوذی گرانودیوریتی به سن پالئوسن (با اقتباس از نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ الیگودرز) و رسوب‌های کواترنری هستند (Mohajjel and Eftekhari Nezhad, 1992; Soheili et al., 1992; Hemmati et al., 2018). حضور واحدهای دگرگونی پرکامبرین در میان توالی‌های مزوزوئیک، بیانگر نقش مؤثر گسل‌های پی‌سنگی در جابه‌جایی و برون‌زد سنگ‌های قدیمی‌تر بوده و شواهدی از فعالیت ساختاری دیرپای این گسل‌ها را در منطقه ارائه می‌دهد (شکل ۱).

توده‌های نفوذی مشاهده شده باشد، این عامل می‌تواند به عنوان عامل ماگمایی- گرمایی تفسیر شود.

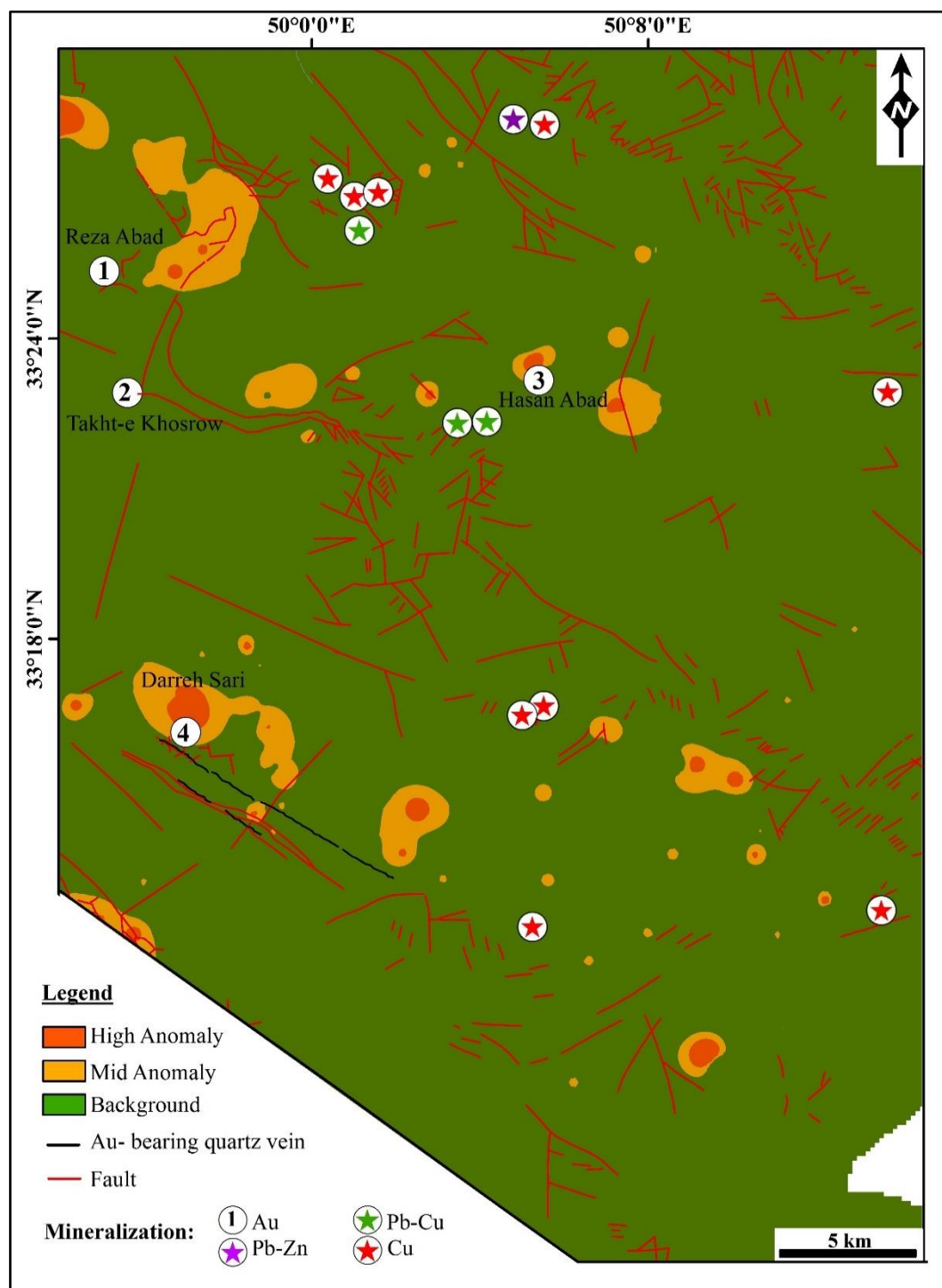
نتایج تحلیل عاملی نشان می‌دهد که در میان شش عامل استخراج شده، عوامل D3 و D6 بیشترین ویژگی‌های مرتبط با کانه‌زایی را نشان می‌دهند. عامل D3 دارای نمرات عاملی نسبتاً بالایی برای سرب، روی و منگنز است؛ در حالی که عامل D6 با بار غالب مس مشخص می‌شود.

هیچ‌یک از این دو عامل ارتباط معناداری با عوامل سنگ‌شناسی D1 و D2، که اغلب تحت تأثیر عناصر اسکاندیم، ایتیریم، وانادیوم، کروم و نیکل قرار دارند و همچنین با عامل مرتبط با سنگ‌های کربناته (D5) نشان نمی‌دهند.

نقشه توزیع نمرات عاملی مربوط به عامل کانه‌زایی در شکل ۵ ارائه شده است. رخدادهای معدنی طلا، سرب- روی، سرب- مس و مس، در محدوده نیمه غربی برکه گلپایگان و نیمه شرقی برکه الیگودرز واقع شده‌اند (شکل ۵). بر اساس این نقشه، بی‌هنجاری‌های زمین‌شیمیایی با تمرکز معناداری در مجاورت رخدادهای طلای رضاآباد، حسن آباد و تخت خسرو قابل مشاهده هستند (شکل ۵). نکته حائز اهمیت، کشیدگی بی‌هنجاری‌ها با روند شمال غرب- جنوب شرق در منطقه دره ساری است که به خوبی با جهت‌گیری دو رگه اصلی طلادار و همچنین روند شیب‌توزیته در منطقه همخوانی دارد (شکل ۷-۸). تمامی بی‌هنجاری‌های شناسایی شده اغلب بر روی واحد دگرگونی شیب‌سبز با سن تریاس- ژوراسیک متمرکز شده‌اند که بیانگر نقش مؤثر این واحد سنگ‌شناسی در کنترل کانه‌زایی منطقه مورد بررسی است.

اعتبارسنجی ناحیه‌ای نتایج تحلیل عاملی در محور خوانسار- الیگودرز

برای اعتبارسنجی ناحیه‌ای نتایج تحلیل عاملی در سطح دو برکه زمین‌شیمیایی ۱:۱۰۰۰۰۰ گلپایگان و الیگودرز، موقعیت مکانی بی‌هنجارهای استخراج شده از نقشه امتیازهای عاملی با رخدادهای



شکل ۵. نقشه توزیع فضایی نمرات عاملی مربوط به عامل کانه‌زایی استخراج شده از تحلیل عاملی داده‌های زمین‌شیمیایی رسوب‌های آبراهه‌ای در محور خوانسار- الیگودرز. این نقشه مناطق دارای پتانسیل بالاتر برای کانه‌زایی طلا را بر اساس ترکیب عناصر شاخص مرتبط با عامل یادشده نشان می‌دهد.

Fig. 5. Spatial distribution map of factor scores for the mineralization factor extracted from factor analysis of stream sediment geochemical data in the Khonsar–Aligudarz belt. This map delineates zones with higher potential for gold mineralization based on the combination of indicator elements associated with the respective factor.

جدول ۳. مقایسه بی‌هنجاری‌های بارزسازی در رسوب‌های آبراهه با رخداد‌های معدنی برگه‌های ۱:۱۰۰۰۰۰ گلیپایگان و الیگودرز

Table 3. Comparison of mineralization anomalies in stream sediments with the occurrence of mineralization in the 1:100000 Golpayegan and Aligudarz map sheets

Anomaly	Location	Mineral occurrence	mineralization	Reference
1	49°55'22''E, 33°25'33''N	Reza Abad	Au-Cu-W	Soheili et al., 1992
2	49°56'03''E, 33°23'12''N	Takht-e Khosrow	Pb-Zn-Au	Soheili et al., 1992
3	50°05'21''E, 33°23'20''N	Hasan Abad	Au	Fazeli Oladi and Zamanian, 2024
4	49°57'08''E, 33°16'10''N	Darreh Sari	Au-Cu	This study

(Tbatabaei Manesh, 2016). اگرچه بر پایه داده‌های سن سنجی انجام‌شده بر روی شیست‌های سبز این ناحیه، این سنگ‌ها با سن $109 \pm 9/2$ میلیون سال، به بخش بالایی کرتاسه پیشین نسبت داده شده‌اند (Rashidnejad-Omran, 2002). این واحدها در میان دو پهنه تراسی هم‌راستا با تراس اصلی زاگرس جای گرفته و به شدت تحت‌تأثیر گسلش و برش‌های زمین‌ساختی قرار دارند (شکل ۱). ناحیه الیگودرز- خوانسار دارای چهار فاز دگرگونی (دیناموترمال، حرارتی، دینامیکی و دگرگونی برگشتی) و سه فاز تغییرشکل D1، D2 و D3 است. توده‌های نفوذی اسیدی در منطقه باعث دگرگونی مجاورتی در متابلیت‌ها شده‌اند و سپس تمامی سنگ‌ها تحت‌تأثیر دگرگونی دینامیکی قرار گرفته و به گرانیت‌های میلونیته تبدیل شده‌اند (Karimi and Tbatabaei, 2016). این روند چندمرحله‌ای دگرگونی و دگرشکلی، با شواهد ساختاری و کانی‌زایی مشاهده‌شده در منطقه دره‌ساری هماهنگی کامل داشته و چهارچوب مناسبی را برای تفسیر تاریخچه زمین‌ساختی کانساری این منطقه فراهم می‌آورد. اگرچه بخشی از این شکستگی‌ها هم‌زمان با کانه‌زایی شکل گرفته و زمینه را برای جای‌گیری رگه- رگچه‌های کوارتزی کانه‌دار فراهم کرده‌اند (Hemmati et al, 2018)؛ ولی شواهد ساختاری نشان می‌دهد که بسیاری از این شکستگی‌ها و پهنه‌های برشی، پس از کانه‌زایی فعال شده‌اند و موجب جابه‌جایی و پراکندگی بخشی

قدیمی‌ترین واحد سنگی منطقه، میکاشیست‌های پرکامبرین با میان‌لایه‌های متاریولیتی است که آثار برگ‌وارگی، موج‌وارگی و بافت‌های لپیدوبلاستیک تا نماتوبلاستیک را نشان می‌دهند. متاریولیت‌ها دارای بافت پورفیری با درشت‌بلورهای کوارتز، پلاژیوکلاز و مسکویت در زمینه‌ای سیلیسی بوده و کشیدگی کانی‌ها، نشان‌دهنده دگرشکلی قابل توجه این واحدهاست. بر اساس پژوهش‌های اخیر، روش سن سنجی U-Pb بر روی زیرکن‌های آواری، میکاشیست‌های گارنت‌دار منطقه گلیپایگان، طیف گسترده‌ای از سنین را نشان می‌دهند که بیانگر منشأ رسوبی آنهاست. شاکراردکانی و همکاران (Shakerardakani et al., 2025)، با بررسی ۳۶۲ دانه زیرکن از سه نمونه میکاشیست گارنت‌دار ناحیه موته- گلیپایگان، دریافتند که فراوان‌ترین جمعیت زیرکن‌های آواری متعلق به دوره ادیاکاران بوده و سنی غالب در حدود ۶۰۰ میلیون سال را نشان می‌دهد (Shakerardakani et al., 2025). واحدهای سنی تریاس- ژوراسیک از نظر سنگ‌شناسی، اغلب از مرمر، شیل‌های سیاه، اسلیت، فیلیت و انواع شیست (شامل شیست سریسیتی، بیوتیت- مسکویت، شیست گارنت‌دار، گارنت- استارولیت‌دار و استارولیت- کیانیت‌دار) تشکیل شده‌اند که با میان‌لایه‌هایی از سنگ آهک و ماسه‌سنگ همراهی می‌شوند. این توالی تحت دگرگونی پیش‌رونده از رخساره شیست سبز تا آمفیبولیت قرار گرفته‌اند (Karimi and

رگچه‌های کوارتزی با روند قطع‌کننده شیستوزیته نیز مشاهده می‌شوند که بیانگر تأثیر ساختارهای متقاطع در تشکیل کانه‌زایی است. رگه اصلی تحت تأثیر نیروهای برشی قرار دارد. برای تعیین عیار طلا، تعداد ۵ نمونه خرده‌سنگی به صورت نظام‌مند از ابتدا تا انتهای رگه اصلی یادشده برداشت شده است (شکل ۶). نتایج بررسی به روش Fire Assay به ترتیب از شرق به غرب نشان‌دهنده عیارهای ۸۷، ۱۰۵۱، ۲۵۹۱ و ۵۲۵۶ میلی گرم در تن طلا در رگه اصلی و عیار ۵۵۷ میلی گرم در تن طلا برای رگه فرعی هستند (جدول ۴). بیشترین عیارهای طلا در بخش غربی رگه است که با بی‌هنجاری شناسایی شده، تطابق خوبی دارد (شکل ۵). این داده‌ها ضمن تأیید حضور کانه‌زایی اقتصادی در محدوده، همخوانی بالای نواحی بی‌هنجار شناسایی شده در نقشه عامل کانه‌زایی با واقعیت‌های صحرایی را اثبات می‌کنند و کارایی روش تحلیل عاملی را در پهنه‌بندی پتانسیل کانه‌زایی طلا مورد تأیید قرار می‌دهند.

بررسی‌های کانه‌نگاری

بررسی‌های صحرایی در منطقه دره‌ساری نشان می‌دهد که کانه‌زایی طلا اغلب به صورت رگه‌های سیلیسی هم‌راستا با ساختارهای برشی و شیستوزیته سنگ‌های دگرگونی تریاس- ژوراسیک رخ داده است (شکل ۷-A و B). بررسی‌های کانه‌نگاری بر روی مقاطع نازک- صیقلی نشان می‌دهد که رگه‌های کوارتز حامل کانی‌سازی سولفیدی بوده و پیریت و پیروتیت فراوان‌ترین کانه سولفیدی در این رگه‌هاست که به صورت بلورهای نیمه‌شکل‌دار تا بی‌شکل و توده‌ای در نسل‌های مختلف در متن رگه‌های کوارتزی مشاهده می‌شوند (شکل ۷-B و C). علاوه بر آن آرسنوپیریت، مارکازیت، کالکوپیریت، اسفالریت و گالن نیز به عنوان کانه‌های سولفیدی فرعی حضور دارند که اغلب به صورت بین‌رشدی، جانشینی و پرکننده فضاها بین دانه‌ای با پیریت و پیروتیت دیده می‌شوند (شکل ۷-E و F). جانشینی پیریت توسط هماتیت با بافت داربستی نیز نشان‌دهنده

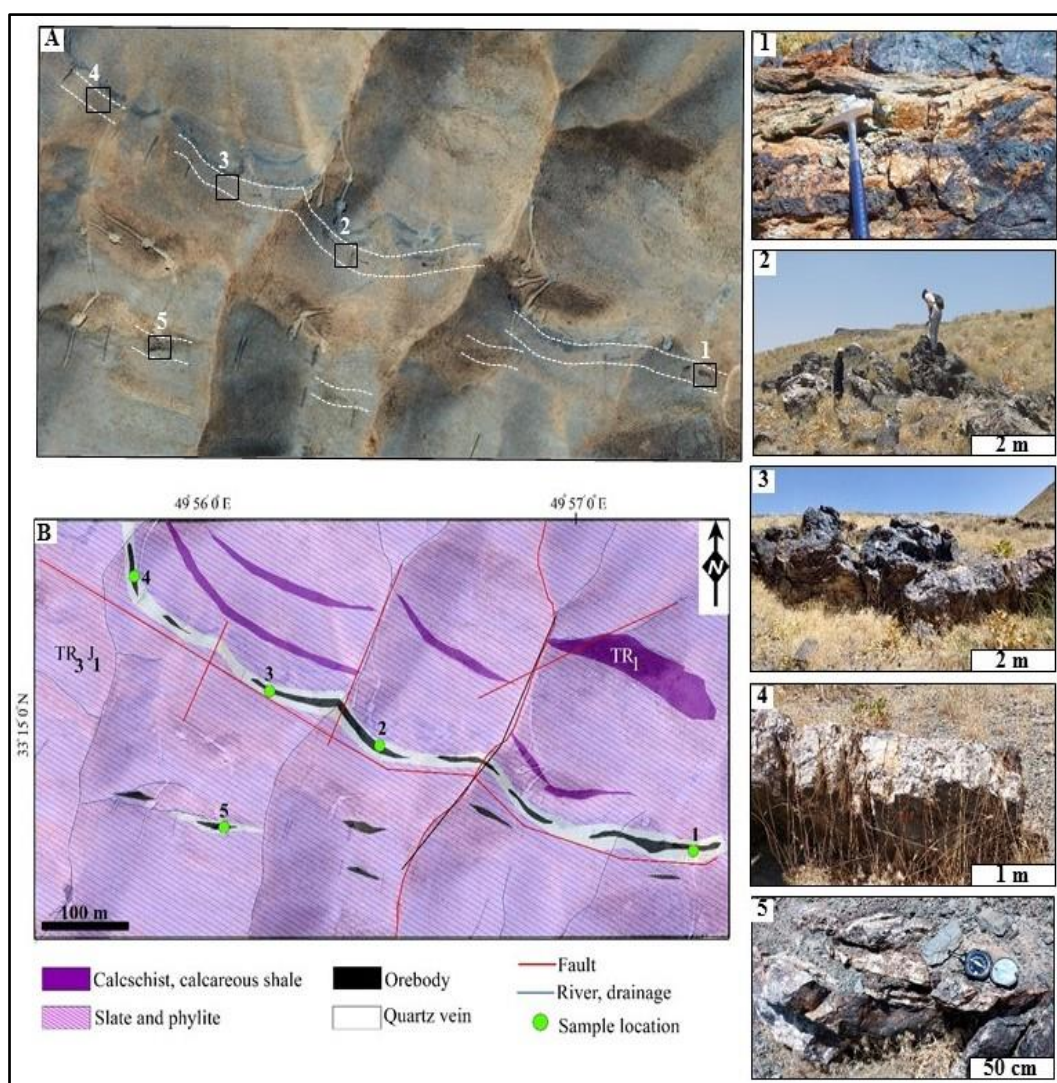
از رگه‌های کانه‌دار شده‌اند. این پدیده با الگوی ارائه‌شده برای کانسارهای طلای کوه‌زایی در مناطقی با تاریخچه زمین‌ساختی پیچیده، نظیر پهنه‌های برشی پس از دگرگونی، همخوانی دارد (Groves et al., 2020).

بررسی‌های میکروسکوپی در شیست‌های میزبان، حضور کانی‌های مسکویت، سریست، کوارتز، فلدسپات، کمتر بیوتیت و کانی‌های کدر را با بافت‌های گرانوبلاستیک، پورفیروبلاستیک و لپیدوبلاستیک نشان می‌دهد؛ در حالی که شیل‌های سیاه غنی از مواد آلی کربن‌دار (شکل ۷-D) و سولفیدهای پراکنده، احتمالاً یکی از منابع گوگرد و طلا در سامانه گرمایی منطقه محسوب می‌شوند. برون‌زدهای محدود گرانودیوریتی در بخش غربی منطقه دره‌ساری دارای بافت میکروگرانولار تا پورفیری و ترکیب کانی‌شناسی شامل کوارتز، پلاژیوکلاز، میکروکلین و مسکویت، همراه با مقادیر فرعی موناژیت و زیرکن هستند. این سنگ‌ها تحت تأثیر دگرسانی گرمایی کوارتز- سریست- کربنات- کلریت قرار گرفته‌اند. از سوی دیگر، ویژگی‌های سنگ‌نگاری این توده‌ها با گرانیتوئیدهای ژوراسیک الیگودرز و اُچستان، با بازه سنی ۱۶۰ تا ۱۷۲ میلیون سال و ماهیت نوع I کالک‌آلکان پتاسیم بالا (Tabatabaei Manesh et al., 2011; Esna- Ashari et al., 2012)، شباهت قابل توجهی دارد. این تشابه می‌تواند بیانگر ارتباط آنها با یک رویداد ماگمایی مشترک باشد. با این حال، تعیین قطعی سن و خاستگاه توده‌های نفوذی دره‌ساری نیازمند داده‌های مستقل سن‌سنجی و زمین‌شیمیایی است.

کانه‌زایی طلا در منطقه مورد بررسی اغلب به صورت دو رگه سیلیسی با روند شمال‌غرب- جنوب‌شرق و موازی تا تقریباً موازی با جهت شیستوزیته سنگ‌های دگرگونی تریاس- ژوراسیک توسعه یافته است (شکل ۶-A و B). این رگه‌ها در سطح زمین با رنگ سیاه تا قهوه‌ای تیره همراه آغشتگی‌های هماتیته را به وضوح نشان می‌دهد. طول هریک از این رگه‌ها در حدود ۹۹۰ متر و پهنای متوسط آنها ۲ متر برآورد شده است. هرچند رگه‌های اصلی یادشده موازی با شیستوزیته قرار دارند؛ اما در اطراف آنها رگه-

گرمابی مرتبط با رگه‌های کوارتزی است. انطباق این شواهد صحرایی و کانه‌نگاری با بی‌هنجاری‌های استخراج‌شده از تحلیل عاملی، اعتبار مدل زمین‌شیمیایی ارائه‌شده را تأیید کرده است و نشان می‌دهد که عامل کانه‌زایی حاصل از تحلیل عاملی، توانایی مناسبی در شناسایی نواحی دارای پتانسیل کانه‌زایی طلا در منطقه مورد بررسی دارد.

بخش برون‌زاد کانه‌زایی است (شکل ۷-G). مگنتیت نیز به صورت بلورهای نیمه‌شکل‌دار در مجاورت پیریت به صورت فرعی مشاهده شده است که بیانگر هم‌یافت آن با مراحل اولیه کانه‌زایی است (شکل ۷-H). کانی مارکازیت دارای بافت‌های کلوفرمی است (شکل ۷-I و J). این مجموعه کانیایی و روابط بافتی میان سولفیدها نشان‌دهنده تشکیل کانه‌زایی در یک سامانه



شکل ۶. A: نمایش رگه کوارتز طلادار با روند شمال‌غرب- جنوب‌شرق در تصویر ساس‌پلنت از منطقه دره ساری و B: شکل شماتیک از رگه اصلی کوارتز به همراه محل‌های نمونه‌برداری برای بررسی عیار طلا در منطقه دره ساری (۱-۵)

Fig. 6. A: Display of gold- bearing quartz vein with a northwest-southeast trend in the Sasplanet image of Darreh Sari area, and B: Schematic diagram of the main quartz vein along with sampling locations for gold grade assessment in the Dareh Sari area (1-5)

جدول ۴. نتایج Fire Assay طلا در منطقه دره ساری. مقادیر برحسب ppb است.

Table 4. Fire Assay analysis results for the Darreh Sari area. The values are in (ppb).

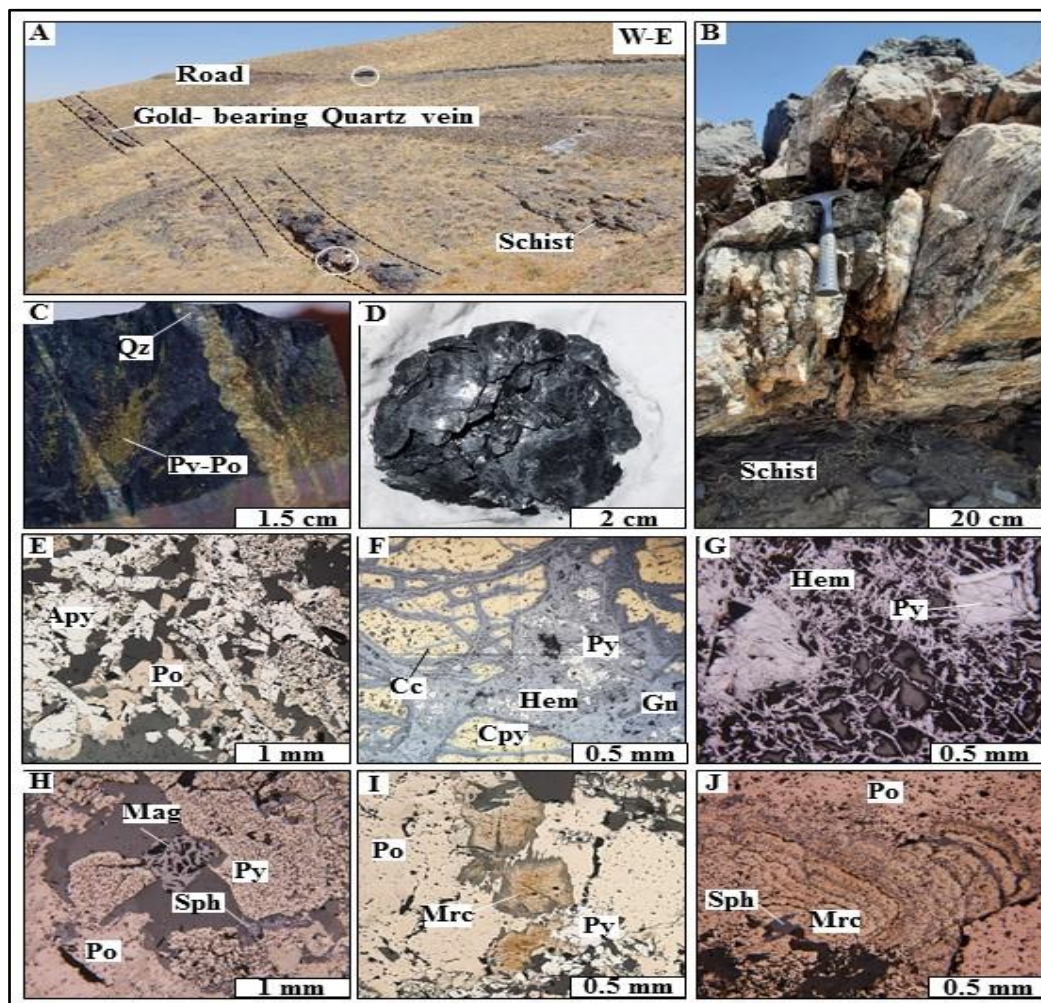
Sample No.	1	2	3	4	5
grade	87	1051	2591	5256	577

بحث

کانه‌زایی طلای دره‌ساری در بخشی از پهنه سهندج- سیرجان رخ داده است که تحول آن تحت تأثیر هم‌گرایی اقیانوس نئوتیس، دگرگونی ناحیه‌ای، دگرشکلی چندمرحله‌ای و توسعه زون‌های برشی پوسته‌ای بوده است (Mohajjel and Fergusson, 2000; Babaahmadi et al., 2021). در چنین محیطی، ترکیب زمین‌شیمیایی رسوب‌های آبراهه‌ای حاصل برهم‌کنش عوامل متعددی از جمله ترکیب سنگ منشأ، آزادسازی و بازتوزیع عناصر طی فرایندهای دگرگونی، انتقال آنها توسط سیالات گرمایی و تمرکز مجدد عناصر در امتداد ساختارهای مناسب و نفوذپذیر است. از این‌رو، تفکیک نسبی مؤلفه‌های ناشی از زمینه و سنگ‌شناسی از مؤلفه‌های احتمالی مرتبط با کانه‌زایی و دگرسانی گرمایی، برای تفسیر الگوهای زمین‌شیمیایی و شناسایی بی‌هنجاری‌های کانه‌زایی اهمیت اساسی دارد. در این پژوهش، این تفکیک با استفاده از تحلیل عاملی و بررسی الگوی فضایی نمرات عاملی انجام شد. نتایج نشان داد که عوامل D1 و D2، با توجه به بارهای غالب عناصر شاخص سنگ‌شناسی و الگوی پراکندگی منطقه‌ای آنها، اغلب بیانگر کنترل سنگ‌شناسی و تغییرات زمینه زمین‌شیمیایی هستند. در مقابل، عوامل D3 (Pb- Zn- Mn) و D6 (Cu) دارای استقلال نسبی از عوامل سنگ‌شناسی بوده و نمرات عاملی بالای آنها به صورت بی‌هنجاری‌های موضعی و مجزا، بدون انطباق مشخص با مرز واحدهای سنگی، ظاهر می‌شوند. افزون بر این، هم‌پوشانی فضایی این بی‌هنجاری‌ها با نواحی دارای شواهد دگرسانی گرمایی، تفسیر آنها را به عنوان مؤلفه‌های زمین‌شیمیایی محتمل مرتبط با کانه‌زایی تقویت می‌کند. بنابراین، الگوی مشاهده‌شده نشان می‌دهد که تغییرات Zn, Pb,

Mn و Cu در رسوب‌های آبراهه‌ای برگه‌های ۱:۱۰۰۰۰۰ گلیپایگان و الیگودرز را نمی‌توان فقط به تغییرات سنگ‌شناسی و ترکیب سنگ منشأ نسبت داد و احتمالاً فرایندهای گرمایی و کانه‌زایی نیز در شکل‌گیری این الگوها نقش داشته‌اند. همچنین، نتایج تحلیل عاملی نشان می‌دهد که اگرچه بخش مهمی از تغییرات زمین‌شیمیایی تحت تأثیر تنوع سنگ‌شناسی منطقه قرار دارد؛ اما مؤلفه مرتبط با کانه‌زایی طلا به خوبی از زمینه سنگ‌شناسی قابل تفکیک است. این موضوع در مناطق دگرگونی پهنه سهندج- سیرجان اهمیت ویژه‌ای دارد؛ زیرا تغییرات ترکیب سنگ‌های دگرگون‌شده و آزادسازی عناصر طی دگرگونی می‌تواند موجب ایجاد بی‌هنجاری‌های زمین‌شیمیایی غیرمرتبط با کانه‌زایی شود. بنابراین، موفقیت تحلیل عاملی در جداسازی مؤلفه‌های گرمایی از زمینه زمین‌شیمیایی نشان می‌دهد که روش‌های چندمتغیره نسبت به تفسیر تک‌عنصری، قابلیت بالاتری در شناسایی سامانه‌های کانه‌دار در محیط‌های پیچیده دگرگونی دارند.

یکی از مهم‌ترین نتایج این پژوهش، انطباق بسیار مناسب بی‌هنجاری‌های زمین‌شیمیایی با زون‌های برشی، گسل‌های امتدادلغز و رگه‌های کوارتزی است. این همبستگی نشان می‌دهد که ساختارهای شکننده- شکل‌پذیر نقش اساسی در هدایت سیالات کانه‌زا، ایجاد فضاهای باز و تمرکز طلا داشته‌اند. این الگوی ساختاری با ویژگی‌های گزارش شده برای کمرند طلادار موته نیز همخوانی دارد؛ به گونه‌ای که کانه‌زایی طلا اغلب در ارتباط با زون‌های برشی و رگه‌های کوارتزی توسعه یافته در سنگ‌های دگرگونی رخ داده است (Kouhestani et al., 2014).



شکل ۷. A: نمای کلی رگه کوارتزی طلا دار در منطقه دره‌ساری با روند شمال غرب- جنوب شرق که با شیستوزیته سنگ‌های میزبان گسترش یافته است، **B:** نمای نزدیک از رگه کوارتزی کانه‌دار که مرز مشخصی با سنگ‌های دگرگونی میزبان دارد و توسط رگه‌ی کوارتز نسل بعدی قطع شده است، **C:** نمونه دستی از رگچه‌های سولفیدی شامل پیریت و پیروتیت که رگه کوارتزی را قطع کرده‌اند، **D:** شیل‌های غنی از مواد آلی. تصویرهای میکروسکوپی در نور انعکاسی (**E-J**). **E:** آرسنوپیریت‌های لوزوجهی با بافت دانه پراکنده در کنار پیریت و پیروتیت، **F:** هماتیته شدن و کالکوسیت در اطراف کالکوپیریت، جانشینی پیریت توسط هماتیت و گوتیت و همچنین سرزیتی شدن گالن را نشان می‌دهد که بیانگر فرایندهای اکسایش و دگرسانی سوپرژن است، **G:** جانشینی پیریت توسط هماتیت با بافت دندریتی، **H:** مجموعه کانی‌های فلزی شامل پیریت، مگنتیت، پیروتیت و اسفالریت که به صورت هم‌یافت در رگچه کانه‌دار حضور دارند، **I:** پیروتیت در اطراف مارکازیت و **J:** بافت کلوفرمی کانی مارکازیت. علائم اختصاری از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است. (**Apy:** آرسنوپیریت، **Cc:** کالکوسیت، **Cpy:** کالکوپیریت، **Gn:** گالن، **Hem:** هماتیت، **Mag:** مگنتیت، **Mrc:** مارکازیت، **Po:** پیروتیت، **Py:** پیریت، **Qz:** کوارتز و **Sph:** اسفالریت).

Fig. 7. A: General view of a gold-bearing quartz vein in the Darreh Sari area, with a north-west- southeast trend, developed parallel to the foliation of the host rocks, **B:** Close-up view of the mineralized quartz vein, showing a sharp contact with the surrounding metamorphic rocks and cut by a later-generation quartz veinlet, **C:** Hand specimen of sulfide veinlets, including pyrite and pyrrhotite, which cross-cut the quartz vein, **D:** Organic-rich shales. Reflected-light photomicrographs (**E-J**). **E:** Euhedral to subhedral arsenopyrite crystals with a disseminated texture, occurring alongside pyrite and pyrrhotite, **F:** Hematization and chalcocite surrounding chalcopyrite, together with replacement of pyrite by hematite and goethite, as well as sericitization of galena, indicating oxidation and supergene alteration processes, **G:** Replacement of pyrite by hematite, exhibiting a dendritic texture, **H:** Assemblage of metallic minerals including pyrite, magnetite, pyrrhotite, and sphalerite, present as a paragenetic association within the mineralized veinlet, **I:** Pyrrhotite surrounding marcasite, and **J:** Colloform texture of marcasite. Abbreviations after Whitney and Evans (2010) (**Apy:** arsenopyrite, **Cc:** chalcocite, **Cpy:** chalcopyrite, **Gn:** galena, **Hem:** hematite, **Mag:** magnetite, **Mrc:** marcasite, **Po:** pyrrhotite, **Py:** pyrite, **Qz:** quartz, and **Sph:** sphalerite).

چنین الگویی با مدل ارائه‌شده برای کانسارهای طلای کوه‌زایی پهنه سسندج- سیرجان کاملاً همخوانی دارد؛ به گونه‌ای که علی‌یاری و همکاران (Aliyari et al., 2012) نیز پهنه‌های برشی عمیق و گسل‌های مرتبه اول و دوم را مهم‌ترین کنترل‌کننده‌های جای‌گیری ذخایر طلای زرتروشت، قلقله، کرویان، قباقلوچه و خرابه معرفی کرده‌اند. توسعه رگه‌های کوارتز موازی با شistosozite و حضور رگه‌های متقاطع (شکل ۷-A و B) در منطقه دره‌ساری نیز بیانگر آن است که کانه‌زایی احتمالاً طی چندین مرحله فعالیت زمین‌ساختی، بازشدگی مجدد شکستگی‌ها و تزریق مکرر سیالات گرمابی رخ داده است. این ویژگی از شاخص‌های شناخته‌شده سامانه‌های طلای کوه‌زایی در کمربندهای دگرگونی به شمار می‌رود (Aliyari et al., 2014).

همراهی طلا با پیریت، پیروتیت، اسفالریت و گالن نیز بیانگر تکامل تدریجی یک سامانه گرمابی چندمرحله‌ای است (Mehrabi et al., 2012). در مدل‌های پذیرفته‌شده طلای کوه‌زایی (Groves et al., 2020; Goldfarb and Pitcairn, 2023)، سولفیدهای آهن نخستین کانی‌های ته‌نشین شده محسوب می‌شوند و با کاهش تدریجی دما، افت فشار و تغییر شرایط اکسایش- کاهش سیال، سولفیدهای فلزهای پایه و در نهایت طلا رسوب می‌شوند. این مجموعه کانی‌شناسی با هم‌یافت گزارش‌شده برای بسیاری از کانسارهای طلای کوه‌زایی شمال سسندج- سیرجان، از جمله قلقله و قباقلوچه، شباهت قابل‌توجهی دارد. علاوه بر این، هماتیتی‌شدن سطحی رگه‌ها احتمالاً حاصل اکسایش سولفیدهای اولیه در مراحل برون‌زاد است. با این حال، انطباق کامل بی‌هنجاری‌های زمین‌شیمیایی با رخداد‌های واقعی طلا نشان می‌دهد که نشانه اولیه سیال گرمابی همچنان در رسوب‌های آبراهه حفظ شده و توسط فرایندهای هوازگی به طور کامل محو نشده است.

سنگ‌های دگرگونی تریاس- ژوراسیک نیز نقش تعیین‌کننده‌ای در تمرکز کانه‌زایی داشته‌اند. نقش سنگ‌های دگرگونی به عنوان میزبان رگه‌های کوارتز- سولفیدی در کمربند طلادار موه نیز

گزارش‌شده است که بیانگر اهمیت این واحدها در تمرکز کانه‌زایی طلای کوه‌زایی در بخش مرکزی پهنه سسندج- سیرجان است (Abdollahi et al., 2009; Sakhdari et al., 2021; Sadati et al., 2022). این واحدها علاوه بر رفتار مکانیکی مناسب برای تشکیل پهنه‌های برشی و شبکه‌های شکستگی، به ویژه در بخش‌های غنی از شیل‌های کربن‌دار و افق‌های حاوی مواد آلی، می‌توانند طی واکنش‌های دگرگونی منبع مناسبی برای آزادسازی گوگرد، CO₂ و بخشی از فلزهای باشند. بر اساس مدل‌های نوین (Groves et al., 2020; Goldfarb and Pitcairn, 2023)، مواد آلی در سه مرحله در تشکیل کانسارهای طلای کوه‌زایی نقش دارند: ۱- غنی‌سازی اولیه طلا در رسوب‌های دیرینه، هم‌زمان با تشکیل پیریت دیاژنتیکی، ۲- انتقال طلا به صورت کمپلکس‌های هیدروکربنی و نانوذرات کلوئیدی طی دگرگونی و ۳- ته‌نشینی طلا از طریق احیای سیال توسط مواد آلی باقی‌مانده در سنگ میزبان، هم‌زمان با رسوب گرافیت. چنین فرایندی با مدل متامورفیک سیالات کانه‌زا در کانسارهای طلای کوه‌زایی سسندج- سیرجان سازگار است؛ مدلی که بر اساس آن، سیالات حاصل از آب‌زدایی و دگرگونی سنگ‌های رسوبی (به ویژه آنهایی که حاوی مواد آلی هستند) در امتداد زون‌های برشی عمیق مهاجرت کرده و در محل‌های کاهش فشار و افزایش نفوذپذیری، رگه‌های کوارتز- سولفیدی را همراه با کربنات و کلریت تشکیل داده‌اند. با توجه به اهمیت این موضوع، بررسی شواهد صحرایی مانند وجود لایه‌های کربن‌دار و یا تجمع‌های گرافیتی در واحدهای شیل سیاه منطقه (شکل ۷-D)، می‌تواند نقش این مواد را در کانه‌زایی منطقه مورد بررسی به وضوح نشان دهد.

از دیدگاه اکتشافی، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که داده‌های زمین‌شیمی رسوب‌های آبراهه، هنگامی که با روش‌های آماری چندمتغیره تحلیل شوند، قادرند نشانه‌های گرمابی را، حتی در محیط‌های دارای زمینه سنگ‌شناسی پیچیده آشکار سازند. اعتبارسنجی نتایج با اندیس‌های طلای شناخته‌شده و انطباق آنها با

شواهد زمین‌شناسی و کانه‌شناسی، رویکردی کارآمد برای شناسایی بی‌هنجاری‌های مرتبط با کانه‌زایی طلا در منطقه دره‌ساری و محور خوانسار- الیگودرز است. با جداسازی مؤلفه‌های سنگ‌شناسی از نشانه‌های گرمایی، این روش امکان تشخیص بی‌هنجاری‌های واقعی ناشی از فعالیت سیالات کانه‌زا را فراهم کرده است. انطباق بالای این بی‌هنجاری‌های طلا با پهنه‌های برشی شمال‌غرب- جنوب‌شرق، رگه‌های کوارتزی و سنگ‌های دگرگونی تریاس- ژوراسیک، نقش کلیدی ساختارهای زمین‌شناسی را در هدایت سیالات و تمرکز طلا تأیید می‌کند. همچنین، همخوانی نتایج با مشاهدات صحرایی و کانه‌نگاری، مدل کانه‌زایی گرمایی ساختار کنترل را در این منطقه معتبر می‌سازد. بنابراین، رویکرد تلفیقی ارائه‌شده می‌تواند به عنوان الگویی مؤثر برای اولویت‌بندی اهداف اکتشافی و کاهش عدم قطعیت در مراحل نخستین اکتشاف، به ویژه در مناطق هم‌ساخت با پهنه سندج- سیرجان، مورد استفاده قرار گیرد.

تعارض منافع

هیچ گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

قدردانی

این مقاله برگرفته از بخشی از رساله دکتری نویسنده نخست است که با حمایت معاونت پژوهشی دانشگاه اصفهان به انجام رسیده است. همچنین از شرکت تهیه و تولید مواد معدنی (ایمپاسکو) به دلیل همکاری و حمایت مالی در اجرای این پژوهش، صمیمانه قدردانی می‌شود.

ساختارهای کنترل‌کننده کانه‌زایی، نشان می‌دهد که این رویکرد نه تنها در شناسایی ذخایر شناخته‌شده موفق بوده است؛ بلکه برای تعیین اهداف اکتشافی جدید در امتداد محور خوانسار- الیگودرز نیز قابلیت بالایی دارد. در این راستا، تلفیق تحلیل عاملی با داده‌های زمین‌شناسی، ساختاری و محصولات سنجش از دور می‌تواند چهارچوبی مؤثر برای کاهش عدم قطعیت در مراحل اولیه اکتشاف و اولویت‌بندی اهداف حفاری در پهنه سندج- سیرجان فراهم کند. در مجموع، شواهد زمین‌شناسی، ساختاری، کانه‌شناسی و زمین‌شیمیایی این پژوهش از مدلی حمایت می‌کنند که در آن سیالات کانه‌ساز، در طی هم‌گرایی و دگرشکلی ناحیه‌ای (Karimi and Tabatabaei Manesh, 2016)، در امتداد زون‌های برشی عمیق گردش کرده و با تمرکز در ساختارهای شکننده- شکل‌پذیر و میلونیتی‌شده، موجب تشکیل رگه- رگچه‌های کوارتز- سولفیدی طلا در سنگ‌های دگرگونی تریاس- ژوراسیک شده‌اند. این مدل نه تنها با ویژگی‌های کانسارهای طلای کوه‌زایی معرفی‌شده در پهنه سندج- سیرجان از جمله کمربند طلا دار موه- آستانه، مطابقت دارد (Kouhestani et al., 2014)؛ بلکه چهارچوب مفهومی مناسبی را برای تفسیر بی‌هنجاری‌های زمین‌شیمیایی و طراحی برنامه‌های اکتشاف طلا در سایر بخش‌های این کمربند فلز زایی فراهم می‌آورد.

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که کاربرد تحلیل عاملی بر روی داده‌های زمین‌شیمیایی رسوب‌های آبراهه، همراه با تلفیق آن با

References

- Abdollahi, M.J., Karimpour, M.H., Kheradmand, A. and Zarasvandi, A.R., 2009. Stable isotopes (O, H, and S) in the Muteh gold deposit, Golpaygan area, Iran. *Natural Resources Research*, 18: 137–151. <https://doi.org/10.1007/s11053-009-9091-3>
- Alavi, M., 1996. Tectono-stratigraphic synthesis and structural style of the Alborz Mountain system in Northern Iran. *Journal of Geodynamics*, 21(1): 1–33. [https://doi.org/10.1016/0264-3707\(95\)00009-7](https://doi.org/10.1016/0264-3707(95)00009-7)
- Alirezaei, S. and Hassanzadeh, J., 2012. Geochemistry and zircon geochronology of the Permian A-type Hasanrobat granite, Sanandaj-Sirjan belt: A new record of the Gondwana break-up in Iran. *Lithos*, 151: 122–134. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2011.11.015>
- Aliyari, F., Rastad, E., Goldfarb, R.J. and Sharif, J.A., 2014. Geochemistry of hydrothermal alteration at the Qolqoleh gold deposit, northern Sanandaj-Sirjan metamorphic belt, northwestern Iran: Vectors to high-grade ore bodies. *Journal of Geochemical Exploration*, 140: 111–125. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2014.01.007>
- Aliyari, F., Rastad, E. and Mohajjel, M., 2012. Gold deposits in the Saanandaj-Sirjan zone: orogenic gold deposits or intrusion-related gold system? *Resource Geology*, 62(3): 296–315. <https://doi.org/10.1111/j.1751-3928.2012.00196.x>
- Azizi, H. and Stern, R.J., 2019. Jurassic igneous rocks of the central Sanandaj-Sirjan zone (Iran) mark a propagating continental rift, not a magmatic arc. *Terra Nova*, 31(5): 415–423. <https://doi.org/10.1111/ter.12404>
- Babaahmadi, A., Davoudian, A.R. and Mohajjel, M., 2021. Transpression in the Sanandaj-Sirjan zone (Zagros Orogen, Iran) during the Jurassic and Early Cretaceous: Evidence from the north Shahrekord shear zone. *Journal of Structural Geology*, 149: 104387. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2021.104387>
- Bagheri, S. and Stampfli, G.M., 2008. The Anarak, Jandaq and Posht-e-Badam metamorphic complexes in central Iran: New geological data, relationships and tectonic implications. *Tectonophysics*, 451(1–4): 123–155. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2007.11.047>
- Behera, S. and Panigrahi, M.K., 2021. Gold prospectivity mapping in the Sonakhan Greenstone Belt, Central India: A knowledge-driven guide for target delineation in a region of low exploration maturity. *Natural Resources Research*, 30(6): 4009–4045. <https://doi.org/10.1007/s11053-021-09962-x>
- Carranza, E.J.M., 2008. Geochemical anomaly and mineral prospectivity mapping in GIS. V. 11. Elsevier, Amsterdam, 368 pp. Retrieved September 27, 2026 from <https://www.sciencedirect.com/handbook/handbook-of-exploration-and-environmental-geochemistry/vol/11/suppl/C>
- Derikvand, S., 2022. Strain pattern and vorticity analysis in the transpressional Kamandan area within the Sanandaj-Sirjan Metamorphic Belt, Iran. *Journal of Structural Geology*, 158: 104595. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2022.104595>
- Esmailoghli, S., Tabatabaei, S.H., Carranza, E.J.M., Hosseini, S. and Deville, Y., 2021. Spatially-weighted factor analysis for extraction of source-oriented mineralization feature in 3D coordinates of surface geochemical signal. *Natural Resources Research*, 30(6): 3925–3953. <https://doi.org/10.1007/s11053-021-09933-2>
- Esna-Ashari, A., Tiepolo, M., Valizadeh, M.V., Hassanzadeh, J. and Sepahi, A.A., 2012. Geochemistry and zircon U–Pb geochronology of Aligoodarz granitoid complex, Sanandaj-Sirjan zone, Iran. *Journal of Asian Earth Sciences*, 43(1): 11–22. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2011.09.001>
- Fazeli Oladi, A. and Zamanian, H., 2024. Invers modeling and interpretation of magnetic and geoelectrical data in the gold area of Hassan abad (south of Golpayegan). *Advanced Applied Geology*, 14(2): 556–577. <https://doi.org/10.22055/aag.2024.44283.2393>
- Fletcher, W.K., 1997. Stream sediment geochemistry in today's exploration world. *Exploration Geochemistry*, (32): 249–260. Retrieved September 22, 2026 from <https://www.semanticscholar.org/paper/Stream-Sediment-Geochemistry-in-Today-s-World-Fletcher/4cecf9ee97c7effd1df13b9cf77c3450b435898e>
- Goldfarb, R.J. and Groves, D.I., 2015. Orogenic gold: Common or evolving fluid and metal sources through time. *Lithos*, 233: 2–26. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2015.07.011>

- Goldfarb, R.J. and Pitcairn, I., 2023. Orogenic gold: is a genetic association with magmatism realistic? *Mineralium Deposita*, 58(1): 5–35. <https://doi.org/10.1007/s00126-022-01146-8>
- Groves, D.I., Santosh, M., Deng, J., Wang, Q., Yang, L. and Zhang, L., 2020. A holistic model for the origin of orogenic gold deposits and its implications for exploration. *Mineralium Deposita*, 55(2): 275–292. <https://doi.org/10.1007/s00126-019-00877-5>
- Hale, M. and Plant, J.A., 1994. *Handbook of Exploration Geochemistry. Drainage geochemistry*, V. 6. ELSEVIER Amsterdam, 766 pp. Retrieved September 22, 2026 from <https://www.sciencedirect.com/handbook/handbook-of-exploration-geochemistry/vol/6/suppl/C>
- Helba, H.A., Khalil, K.I., El-Farnawany, H.M. and El-Raghy, S.A., 2021. Stream sediment geochemical exploration for gold in Central Eastern Desert, Egypt: Application of the concentration-number fractal model, factor analysis, and geochemical mineralization probability index. *Geochemistry*, 81(4): 125811. <https://doi.org/10.1016/j.chemer.2021.125811>
- Hemmati, O., Tabatabaei Manesh, S.M. and Nadimi, A.R., 2018. Deformation mechanism of Darreh Sari metapelites Sanandaj- Sirjan zone, Iran. *Geotectonic*, 52(2): 281–296. <https://doi.org/10.1134/S0016852118020024>
- Horton, B.K., J., Hassanzadeh, D.F., Stockli, G.J., Axen, R.J., Gillis, B., Guest, A., Amini, M.D., Fakhari, S., Zamanzadeh, M. and Grove, M., 2008. Detrital zircon provenance of Neoproterozoic to Cenozoic deposits in Iran: Implications for chronostratigraphy and collisional tectonics, *Tectonophysics*, 451(1–4): 97–122. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2007.11.063>
- Karimi, S. and Tabatabaei Manesh, S.M. 2016. Textural relations, P-T path, polymetamorphism and also geodynamic significance of metamorphic rocks of the Aligudarz- Khansar region, Sanandaj- Sirjan zone, Iran. *Petrology*, 24(1): 100–115. <https://doi.org/10.1134/S086959111506003X>
- Kouhestani, H., Rashidnejad Omran, N., Rastad, E., Mohajjel, M., Goldfarb, R.J. and Ghaderi, M., 2014. Orogenic gold mineralization at the Chah Bagh deposit, Muteh gold district, Iran. *Journal of Asian Earth Sciences*, 91: 89–106. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2014.04.027>
- Madanipour, S., Yassaghi, A., Ehlers, T.A. and Enkelmann, E., 2018. Tectonostratigraphy, structural geometry and kinematics of the NW Iranian Plateau margin: insights from the Talesh Mountains, Iran. *American Journal of Science*, 318(2): 208–245. <https://doi.org/10.2475/02.2018.02>
- Madden, D.J. and Tripp, R.B., 1987. Geochemical signatures of mineral deposits and rock types as shown in stream sediments from the Chugach and Prince William terranes, Anchorage Quadrangle, southern Alaska. U.S. Geological Survey, Open-File Report, Report No. 87–131. 8 pp. <https://doi.org/10.3133/ofr87131>
- Mehrabi, B., Tale Fazel, E. and Shahabifar, M., 2012. Ore mineralogy and fluid inclusions constraints on genesis of the Muteh gold deposit (western Iran). *Geopersia*, 2(1): 67–90. <https://doi.org/10.22059/jgeope.2012.24802>
- Mohajjel, M. and Eftekhari Nezhad, J., 1992. Geological map of Golpayegan, scale 1:100,000. Geological Survey of Iran.
- Mohajjel, M. and Fergusson, C.L., 2000. Dextral transpression in Late Cretaceous continental collision, Sanandaj-Sirjan zone, western Iran. *Journal of Structural Geology*, 22(8): 1125–1139. [https://doi.org/10.1016/S0191-8141\(00\)00023-7](https://doi.org/10.1016/S0191-8141(00)00023-7)
- Moritz, R., Ghazban, F. and Singer, B.S., 2006. Eocene gold ore formation at Muteh, Sanandaj-Sirjan tectonic zone, Western Iran: a result of late-stage extension and exhumation of metamorphic basement rocks within the Zagros Orogen. *Economic geology*, 101(8): 1497–1524. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.101.8.1497>
- Ouchchen, M., Boutaleb, S., Abia, E.H., El Azzab, D., Miftah, A., Dadi, B., Echogdali, F.Z., Mamouch, Y., Pradhan, B., Santosh, M. and Abioui, M., 2022. Exploration targeting of copper deposits using staged factor analysis, geochemical mineralization prospectivity index, and fractal model (Western Anti-Atlas, Morocco). *Ore Geology Reviews*, 143: 104762. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2022.104762>
- Rashidnejad-Omran, N., 2002. Petrology and geochemistry of the volcano-sedimentary and plutonic rocks of the south of the Delijan, concentration on gold mineralization. Ph.D. Thesis, Tarbiat Moddares University, Tehran, Iran. 160 pp

- Rose, A.W., Hawkes, H.E. and Webb, J.S., 1979. *Geochemistry in Mineral Exploration*. Academic Press, London, 637 pp.
- Sadati, S.N., Nourian Ramsheh, Z. and Yazdi, M., 2022. Genesis and nature of ore-forming fluids in the Senjedeh gold mine, Central Iran; using microthermometry study. *Advanced Applied Geology*, 11(4): 753–769.
<https://doi.org/10.22055/AAG.2020.28994.1961>
- Sadeghi, M., Billay, A. and Carranza, E.J.M., 2015. Analysis and mapping of soil geochemical anomalies: Implications for bedrock mapping and gold exploration in Giyani area, South Africa. *Journal of Geochemical Exploration*, 154: 180–193.
<https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2014.11.018>
- Sakhdari, M., Behzadi, M., Yazdi, M., Rachidnejad-Omran, N. and Sadeghi Naeini, M., 2021. Geology, Mineralization and Geochemistry of Au in the Godar Sorkh area, Muteh region, Sanandaj-Sirjan zone. *Journal of Economic Geology*, 13(2): 245–265. (in Persian with English abstract)
<https://doi.org/10.22067/econg.v13i2.85427>
- Schwertman, N.C. and de Silva, R., 2007. Identifying outliers with sequential fences. *Computational statistics and data analysis*, 51(8): 3800–3810.
<https://doi.org/10.1016/j.csda.2006.01.019>
- Shakerardakani, F., Neubauer, F., Masoudi, F., Mehrabi, B., Monfaredi, B. and Friedl, G., 2015. Tectonic history of the central Sanandaj-Sirjan zone, Iran: Potentially Permian to Mesozoic polymetamorphism and implications for tectonics of the Sanandaj-Sirjan zone. *Geophysical Research Abstracts*, 17: 2015-6474. Retrieved September 22, 2026 from <https://unsalzberg.elsevierpure.com/en/publications/tectonic-history-of-the-central-sanandaj-sirjan-zone-iran-potenti-2/>
- Shakerardakani, F., Xiao, W., Shafaii Moghadam, H. and Li, X., 2025. Cadomian Magmatism in the Muteh–Golpaygan Area, Iran: Insights into Crustal Growth and Tectono-Magmatic Evolution. *Minerals*, 15(3): 201.
<https://doi.org/10.3390/min15030201>
- Soheili, M., Jafarian, M.B. and Abdollahi, M.R., 1992. Geological map of Aligudarz, scale 1:100,000. Geological Surver of Iran.
- Stampfli, G., Marcoux J. and Baud, A., 1991. Tethyan margins in space and time. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 87(1–4): 373–409.
[https://doi.org/10.1016/0031-0182\(91\)90142-E](https://doi.org/10.1016/0031-0182(91)90142-E)
- Stern, R., Shafaii Moghadam, H., Pirouzi, M. and Mooney, W., 2021. The geodynamic evolution of Iran. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 49: 9–36.
<https://doi.org/10.1146/annurev-earth-071620-052109>
- Tabatabaei Manesh, S.M., Mirlohi, A.S. and Movahedi, M., 2011. Petrology and mineral chemistry of Ochestan granitoids (south of Mahallat, Markazi province). *Petrological Journal*, 2(7), 51-74. Retrieved September 22, 2026 from <https://www.magiran.com/paper/997901/petrology-and-mineral-chemistry-of-ochestan-granitoids-south-of-mahallat-markazi-province?lang=en>
- Tukey, J., 1997. More honest foundations for data analysis. *Journal of Statistical Planning and Inference*, 57(1): 21–28.
[https://doi.org/10.1016/S0378-3758\(96\)00032-8](https://doi.org/10.1016/S0378-3758(96)00032-8)
- Whitney, D.L. and Evans, B.W., 2010. Abbreviations for Names of Rock-Forming Minerals. *American Mineralogist*, 95(1): 185–187.
<https://dx.doi.org/10.2138/am.2010.3371>
- Yilmaz, H., 2007. Stream sediment geochemical exploration for gold in the Kazdag Dome in the Biga Peninsula, Western Turkey. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 16(1): 33–55. Retrieved October, 2011 from <https://journals.tubitak.gov.tr/earth/vol16/iss1/3/>
- Zanchetta, S., Berra, F., Zanchi, A., Bergomi, M., Caridroit, M., Nicorab, A. and Heidarzadeh, G., 2013. The record of the Late Paleozoic active margin of the Palaeotethys in NE Iran: constraints on the Cimmerian orogeny. *Gondwana Res*, 24(3–4): 1237–1266.
<https://doi.org/10.1016/j.gr.2013.02.013>