



Research Article

OPEN ACCESS

Kharazmi Journal of Earth Sciences

Journal homepage <https://gnf.khu.ac.ir>

Whole-rock geochemistry of hydrothermal alterations and its relationship with gold mineralization in the Shourab prospect, Isfahan

Alireza Rezaei Alishahdani¹, Alireza Jafari Rad^{2*}, Zahra Alaminia^{3*}, Mehran Arian⁴, Hemayat Jamali⁵

1, 2, 4. Department of Earth Sciences, SR.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran.

3. Department of Geology, Faculty of Science, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

5. Department of Geology, University of Isfahan, Isfahan, Iran.

Article info

Article history

Received: 4 August 2025

Accepted: 24 September 2025

Keywords:

Hydrothermal Alteration,
Geochemical Anomalies,
IOCG systems, Central Iran.



Abstract

The Shourab prospect, located in the west of Central Iran, exhibits significant hydrothermal alteration and trace element anomalies linked to potential Iron Oxide Copper-Gold systems (IOCG) mineralization. Alteration zones are characterized by chlorite, calcite, quartz, biotite, K-feldspar, albite, actinolite, sericite, and tourmaline, with variable intensities across mafic to felsic volcanic units. Molar element ratio (MER) and alteration indices (AI and CCPI) were employed to quantify alteration processes, revealing progressive alteration from peripheral propylitic zones to core potassic and sodic-calcic assemblages. Spatial geochemical anomalies of elements such as Au, Cu, U, Mo, Ba, Sm, Ce, and La strongly correlate with specific alteration zones. Mineralogical evidence and statistical analysis of lithochemical indices such as iron, potassium, and rare earth element enrichment along with hydrothermal alteration indices, indicate a genetic similarity between this magmatic-hydrothermal system and IOCG type systems. Host rock composition, fluid-rock interaction, and structural controls significantly influenced alteration styles. This work provides a comprehensive framework for identifying hydrothermal footprints of IOCG mineralization in complex volcanic-intrusive terrains and contributes to future exploration strategies in the west Central Iran.

Introduction

The Shourab prospect, within the Anarak zone, is situated approximately 85 km from the Urumieh–Dokhtar magmatic belt, along the western margin of the Central Iran zone. It lies to the northwest of Zavareh (Isfahan Province) and about 20 km to the southeast of the Kuh-Dom gold deposit. The area is characterized by well-developed hydrothermal alteration and related mineralization. This study aims to investigate the alteration zones and their spatial relationship with geochemical anomalies in order to assess the mineral potential of the area. The alteration zones and geochemical characteristics observed in Shourab suggest affinities with Iron Oxide Copper-Gold (IOCG) systems, highlighting the significance of this area for future exploration targeting of similar systems.

Materials and Methods

Following a comprehensive literature review, multiple field campaigns were conducted in the Shourab exploration area at a 1:20,000 scale. Systematic sampling was carried out using a 150 × 150 m grid over various rock types and alteration zones. A total of 372 chip samples were collected and analyzed for 32 major, trace, and rare earth elements (REEs) using ICP-OES. Of these, 142 samples were additionally analyzed for gold using the Fire Assay method at Zar Azma Laboratory in Tehran. Analytical results were processed in ArcGIS, and anomalous thresholds were determined using the Natural Breaks method to generate element concentration (bubble) and cell maps.

Concurrently, 43 samples from altered zones were examined petrographically, and mineralogical analyses

DOI <http://doi.org/10.22034/KJES.2025.11.2.103844>

*Corresponding author: Zahra Alaminia alaminia@um.ac.ir; Alireza Jafari Rad alireza_jafarirad@iau.ac.ir

How to cite this article: Rezaei Alishahdani, A. R., Jafari Rad, A. R., Alaminia, Z., Arian, M., Jamali, H., 2025. Whole-rock geochemistry of hydrothermal alterations and its relationship with gold mineralization in the Shourab prospect, Isfahan. Kharazmi Journal of Earth Sciences 11(2), 289- 316. <http://doi.org/10.22034/KJES.2025.11.2.103844>



BY NC

of six selected samples were conducted using a Philips-Xpert Pro XRD at Zar Azma Laboratory. For diagrammatic interpretations, elemental concentrations were converted from ppm to molar units. Additionally, drilling data from two boreholes (BH-10 in the south and BH-11 in the northwest) were analyzed to better understand subsurface structures and mineralization.

Results and Discussion

Hydrothermal alteration intensity in the Shourab area was evaluated using the Chemical Index of Alteration (CIA), revealing values ranging from 1.8 to 82.2%, with most samples showing weak to moderate alteration. Immobile element diagrams (Zr vs. TiO_2 and Al vs. Ti) confirmed volcanic protoliths with varying degrees of geochemical modification. Alteration was further assessed using molar ratio plots, alteration indices (AI, CCPI, etc.), and mineral assemblages, indicating the presence of potassic, sodic-calcic, and chlorite-carbonate alteration zones.

Elemental enrichment (e.g., Fe, K, Cu, Ba, Au, Mo, U, Ce, and La) shows a strong spatial correlation with alteration types, especially in three geochemically anomalous zones: a NW anomaly aligned with major faults, a southern anomaly over ignimbrites, and a central weak anomaly associated with intrusive contacts. XRD and petrographic studies identified key alteration minerals such as chlorite, sericite, actinolite, tourmaline, garnet, and carbonate phases, supporting multi-stage fluid-rock interaction.

Drill core observations from BH-11 and BH-10 revealed alteration types varying with depth and lithology. The chlorite-sericite-tourmaline assemblage is closely associated with sulfide mineralization and anomalous gold content. Host rock composition strongly influenced alteration style, with mafic rocks showing more pervasive chloritization.

Overall, the alteration patterns, mineral assemblages, trace element geochemistry, and presence of high-temperature alteration zones (e.g., potassic and sodic-calcic) in Shourab show notable similarities with IOCG systems. Despite moderate gold values, the presence of

diagnostic alteration and pathfinder elements supports the interpretation of a complex, multi-stage IOCG-related hydrothermal system in the area.

Conclusions

The study of hydrothermal alterations in the Shourab area reveals that the primary composition of the host rocks and the geochemical characteristics of mineralizing fluids have played a crucial role in determining the type, intensity, and spatial extent of alteration zones. The spatial distribution and mineralogical assemblages including chlorite, albite, potassium feldspar, epidote, muscovite, and calcite, reflect complex fluid-rock interactions between Cl-rich fluids and both felsic and mafic volcanic rocks along progressive thermal gradients, consistent with classical features of Iron Oxide Copper-Gold (IOCG) systems.

Key alteration reactions, such as replacement of K-feldspar by albite, biotite chloritization, and the propylitic alteration of magnetite to hematite, suggest alteration conditions with near-neutral to slightly acidic pH and high chloride activity, typical of the transitional stages from high- to lower-temperature facies in IOCG systems. Moreover, the widespread presence of chlorite and calcite, along with albite and epidote, confirms the involvement of multiple fluid types and the mobilization of metals such as Cu, Fe, and Ag, as well as minor elements like As and Co.

Geochemical alteration indices (CCPI and AI) exhibit significant changes, especially near mineralized centers, indicating strong alteration in the felsic host rocks. The occurrence of potassic-iron alteration zones, alongside iron oxide-rich areas (magnetite \pm hematite), suggests that sodic-calcic and potassic alteration processes were active simultaneously with Cu-Au mineralization, an alteration pattern closely aligned with recognized IOCG models, particularly those in Proterozoic terranes of Australia (Kreiner and Barton, 2017).






In conclusion, the mineralogical, geochemical, and structural data from Shourab provide compelling evidence for multi-stage alteration and multiple fluid sources, bearing strong geochemical similarities to IOCG

systems. Therefore, the Shourab area can be considered a promising exploration target for IOCG-type Au±Cu mineralization.

References

Kreiner, D.C. Barton, M.D., 2017. Sulfur-poor intense acid hydrothermal alteration: A distinctive hydrothermal environment. *Ore Geology Reviews* 88, 174-187.

CRediT authorship contribution statement

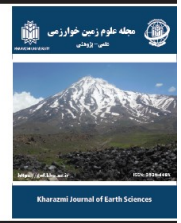
 Alireza Rezaei Alishahdani	Writing – Original Draft, Conceptualization, Methodology, Software, Validation, Formal analysis, Investigation, Resources, Data Curation,
 Alireza Jafari Rad	Conceptualization, Software, Validation, Formal analysis, Writing - Review & Editing, Supervision
 Zahra Alaminia	Conceptualization, Methodology, Software, Validation, Formal analysis, Software, Data Curation, Writing - Review & Editing, Supervision
 Mehran Arian	Writing - Original Draft, Formal analysis
 Hemayat Jamali	Validation, Formal analysis, Writing - Review & Editing



مقاله پژوهشی

دسترسی آزاد

مجله علوم زمین خوارزمی

Journal homepage <https://gnf.khu.ac.ir>

مطالعه ژئوشیمی سنگ کل دگرسانی‌های گرمابی و ارتباط آن با کانه‌زایی طلا در منطقه‌ی اکتشافی شوراب، اصفهان

علیرضا رضائی علیشاهدانی^۱، علی رضا جعفری راد^{۲*}، زهرا اعلمی نیا^۳، مهران آرین^۴، حمایت جمالی^۵

۱، ۲، ۴. گروه زمین شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران.

۳. گروه زمین شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

۵. گروه زمین‌شناسی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران.

چکیده

اطلاعات مقاله

منطقه اکتشافی شوراب، واقع در بخش باختری پهنه ایران مرکزی، شواهد قابل توجهی از دگرسانی‌های گرمابی و ناهنجاری‌های عناصر کمیاب مرتبط با کانی‌سازی احتمالی از نوع ذخایر اکسید آهن طلا دار موسوم به IOCG را نشان می‌دهد. پهنه‌های دگرسانی با مجموعه‌ای از کانی‌ها شامل کلریت، کلسیت، کوارتز، بیوتیت، فلدسپار پتاسیم، آلبیت، اکتینولیت، سریسیت و تورمالین مشخص می‌شوند که با شدت‌های مختلف در واحدهای آتشفشانی مافیک تا فلسیک توسعه یافته‌اند. نسبت‌های مولی عناصر (MER) و شاخص‌های دگرسانی از جمله AI و CCPI برای ارزیابی شدت و نوع دگرسانی به کار گرفته شدند که گویای گذار تدریجی از زون‌های پروپلیتیک پیرامونی به مجموعه‌های پتاسیک و سدیک-کلسیک مرکزی است. ناهنجاری‌های ژئوشیمیایی عناصر Au, Cu, U, Mo, Ba, Ce, Sm و La همبستگی مکانی بالایی با انواع خاصی از دگرسانی‌ها دارند. شواهد کانی‌شناسی و بررسی آماری شاخص‌های لیتوژئوشیمیایی همچون غنی‌شدگی آهن، پتاسیم و عناصر نادر خاکی به همراه شاخص‌های گرمابی، نشانگر تطابق و شباهت این مجموعه ماگمایی-گرمابی با سامانه‌های IOCG است. ترکیب سنگ میزبان، برهم کنش سیال-سنگ و ساختارهای منطقه‌ای تأثیر مهمی بر تنوع دگرسانی‌ها داشته‌اند. این پژوهش چارچوبی جامع برای شناسایی آثار گرمابی مرتبط با کانی‌سازی IOCG در پهنه‌های مجموعه آتشفشانی-نفوذی ارائه داده و می‌تواند راهنمایی مؤثر برای برنامه‌ریزی اکتشافات آینده در غرب ایران مرکزی باشد.

تاریخچه مقاله

دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۱۳

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۰۲

واژه‌های کلیدی

دگرسانی، ناهنجاری‌های ژئوشیمیایی، کانسارهای IOCG، ایران مرکزی.



مقدمه

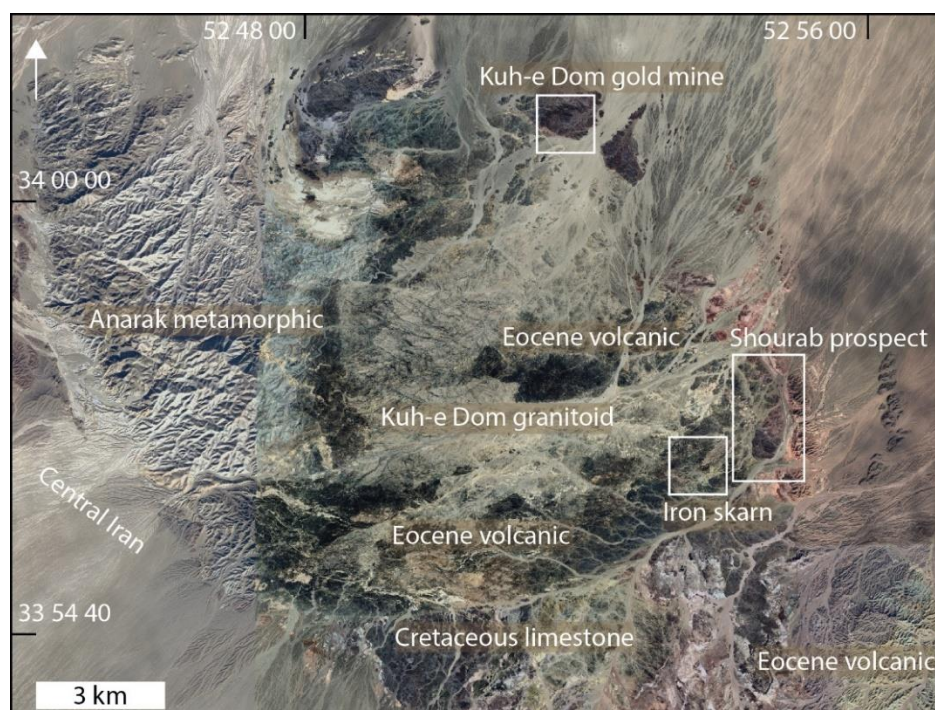
توجه ویژه به عواملی مانند تراکم نمونه‌ها، خطاهای تحلیلی ناشی از داده‌های غیرنرمال، سنسورد و خارج از ردیف است تا از تصمیم‌گیری‌های نادرست در شنا سایی ناهنجاری‌های ژئوشیمیایی جلوگیری شود (Carranza, 2009; Sadeghi et al., 2022). تنوع و پیچیدگی فرآیندهای زمین‌شناسی منجر به تشکیل مجموعه‌های عنصری متفاوتی می‌شود که ارتباط مستقیمی با انواع خاص کانه‌زایی دارند. این مجموعه‌ها می‌توانند به‌عنوان راهنمایی مؤثر در اکتشاف کانسارها مورد استفاده قرار گیرند. پهنه فلزایی انارک به‌عنوان یکی از مناطق معدنی شاخص ایران، میزبان کانی‌سازی‌های ارزشمندی از

دگرسانی‌های گرمابی با تأثیر بر ترکیب شیمیایی سنگ‌ها، قادرند نسبت تبادل سیال به سنگ را به‌خوبی نگه دارند و به‌عنوان شاخصی کلیدی در مطالعات ژئوشیمی به‌منظور بررسی فرآیندهای کانه‌زایی مورد استفاده قرار می‌گیرند (Warren et al., 2007; Byrne et al., 2020; Ebrahimi Fard et al., 2022; Choquette and Kontak, 2023). از سوی دیگر مطالعات ژئوشیمی سنگ کل با تفکیک ناهنجاری‌های واقعی از مقادیر زمینه، ابزاری مؤثر در اکتشاف کانسارها به‌شمار می‌رود. با این حال، تحلیل عددی و آماری داده‌ها نیازمند

DOI <http://doi.org/10.22034/KJES.2025.11.2.103844>*نویسنده مسئول: زهرا اعلمی نیا alaminia@um.ac.ir; علی‌رضا جعفری راد alireza_jafarirad@iau.ac.irاستناد به این مقاله: رضائی علیشاهدانی، ع. ر.، جعفری‌راد، ع. ر.، اعلمی‌نیا، ز.، آرین، م.، جمالی، ح. (۱۴۰۴). مطالعه ژئوشیمی سنگ کل دگرسانی‌های گرمابی و ارتباط آن با کانه‌زایی طلا در منطقه‌ی اکتشافی شوراب، اصفهان. مجله علوم زمین خوارزمی. جلد ۱۱، شماره ۲، صفحه ۲۸۹ تا ۳۱۶. <http://doi.org/10.22034/KJES.2025.11.2.103844>

طلا، آهن و مس در ناحیه کوه‌دم گردید (Sharkovski et al., 1981; Romanko et al., 1984; Shahzeydi et al., 2008;). در ادامه، پژوهش‌های متعددی شامل مطالعات سنگ‌شناسی (Kananian et al., 2014; Sarjoughian et al., 2014; 2015a; Mehrabi et al., 2014; Tale Fazel et al., 2015; Farangi et al., 2023) و سنسنجی (Farangi et al., 2021; Sharkovski, 1981; Sarjoughian et al., 2015b) در این ناحیه صورت گرفته است. مطالعات پیشین، کانه‌زایی محدوده اکتشافی شوراب را مشابه رده ذخایر اکسید آهن طلا دار (IOCG) و همسان با کانسار طلای کوه‌دم طبقه‌بندی کرده‌اند. این استنباط مبتنی بر تحلیل داده‌های دورسنجی و الگوهای دگرسانی، همچنین بررسی زمین‌شیمی و جایگاه تکتونیکی توده‌های نفوذی شرق کمپلکس کوه‌دم بوده است (Farangi et al., 2021; Farangi et al., 2023).

جمله آهن، مس، سرب، روی، اورانیوم، طلا و نیکل است. منطقه شوراب، بخشی از پهنه انارک، در فاصله ۸۵ کیلومتری کمر بند ماگمایی ارومیه-دختر (با پهنای ۱۵۰ کیلومتر) و در مرز باختری پهنه ایران مرکزی قرار دارد. این منطقه در شمال باختری زواره (استان اصفهان) و در ۱۵ کیلومتری جنوب شرق کانسار طلای کوه‌دم واقع شده است (شکل ۱). کانسار کوه‌دم با ذخیره حدود یک میلیون تن و عیار ۱/۰۵ گرم بر تن طلا، از جمله ذخایر شناخته‌شده این پهنه محسوب می‌شود (Farangi, 2022). مطالعات طالع‌فاضل (Tale Fazel, 2014) کمپلکس آذرین کوه‌دم را به‌عنوان بخشی از یک قوس ماگمایی جدا افتاده از کمر بند ارومیه-دختر در پهنه انارک معرفی می‌کند. منطقه شوراب در شرق این کمپلکس (شکل ۱) و در بخش شمالی نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ برگه کوه‌دم قرار دارد. نخستین مطالعات اکتشافی در این منطقه توسط شرکت تکنواکسپورت در سال ۱۹۸۱ انجام شد که منجر به شناسایی نشانه‌های پراکنده کانی‌سازی



شکل ۱- موقعیت محدوده اکتشافی شوراب و کانسار طلای کوه‌دم به همراه واحدهای زمین‌شناسی کمپلکس کوه‌دم بر روی تصویر گوگل ارث، زمینه تصویر در سامانه جغرافیایی WGS84 است.

Fig. 1. The position of the Shourab prospect and Kuh-e Dom gold deposit, along with geological units of the Kuh-e Dom complex on a Google Earth image. The image background is in the WGS84 geographic coordinate system.

ارتباط میان کانی‌شناسی پهنه‌های دگرسانی و داده‌های لیتوژئوشیمیایی می‌تواند نقش کلیدی در درک فرآیندهای کانه‌زایی ایفا کند. مطالعات نشان می‌دهند که تغییرات کانی‌شناختی و الگوی انتقال عناصر در کانسارهای نوع پورفیری و IOCG نه تنها به عنوان شاخص‌های اکتشافی عمل می‌کنند، بلکه تأثیر ترکیب سنگ میزبان بر سیر تکامل دگرسانی نیز آشکار می‌سازند. این پژوهش با تلفیق روش‌های تحلیلی، به بررسی این روابط می‌پردازد. رویکردهای ارائه شده در این مطالعه، از یکسو امکان کمی‌سازی فرایندهای گرمایی را فراهم می‌آورند و از سوی دیگر چارچوبی برای تفسیر فرآیندهای ماگمایی-گرمایی در مقیاس‌های بزرگتر ارائه می‌دهند. از این‌رو این پژوهش با بهره‌گیری از نمونه‌های برداشت‌شده از پهنه‌های دگرسانی منطقه شوراب، به دنبال تحقق اهداف زیر است: (۱) توصیف و دسته‌بندی دگرسانی‌ها بر اساس ویژگی‌های ژئوشیمیایی، (۲) تهیه نمودارهای نسبت مولی عناصر (MER) بمنظور کمی‌سازی تغییرات کانی‌شناسی و ارزیابی انتقال عناصر و فرایندهای دگرسانی، (۳) کاربرد روش‌های تک‌متغیره مبتنی بر توزیع فضایی-فراوانی عناصر کمیاب، (۴) تحلیل و پردازش ناهنجاری‌های ژئوشیمیایی و اعتبارسنجی نتایج با داده‌های صحرائی و آزمایشگاهی. با پیوند زدن کانی‌شناسی پهنه‌های دگرسانی به داده‌های لیتوژئوشیمیایی، می‌توان نشان داد که تغییرات کانی‌شناسی و انتقال عناصر در شناسایی کانسارها اهمیت دارد زیرا ترکیب سنگ میزبان بر کانی‌شناسی دگرسانی تأثیر می‌گذارد. بنابراین این مقاله روش‌ها و رویکردهایی را شرح می‌دهد که در روشن‌شدن ویژگی‌های گرمایی در سیستم‌های ماگمایی-گرمایی مفید خواهد بود.

روش پژوهش

این پژوهش بر اساس داده‌های ژئوشیمیایی ۳۷۲ نمونه سنگ کل از محدوده شوراب (مقیاس ۱:۲۰۰۰۰) انجام شده که در سال ۱۴۰۰ توسط شرکت کوشامعدن جمع‌آوری شدند. نمونه‌برداری به روش خرده‌سنگی با شبکه‌بندی ۱۵۰ × ۱۵۰ متر، از سنگ‌ها و هاله‌های دگرسانی صورت گرفت، اما برخی سلول‌ها به دلیل محدودیت‌های

میدانی فاقد داده بودند. اندازه‌گیری ۳۲ عنصر اصلی، کمیاب و نادر خاکی با دستگاه ICP-OES پس از آماده‌سازی نمونه‌ها با چهار اسید HClO_4 ، HNO_3 ، Hf و HCl صورت گرفته است. از میان این نمونه‌ها، ۱۴۲ مورد علاوه بر تجزیه عناصر یادشده، برای تعیین میزان طلا به روش Fire assay به آزمایشگاه زرآزما تهران ارسال شده است. اگرچه دقت اندازه‌گیری دستگاه برای عناصر نادر خاکی، زیرکونیوم و اورانیوم محدود است داده‌های مربوط به این عناصر صرفاً برای تحلیل الگوی توزیع و پراکندگی در نقشه‌های ژئوشیمیایی مورد استفاده قرار گرفتند. اعتبارسنجی داده‌ها با مقایسه نتایج ICP-OES از ۹ نمونه گمانه BH-11 با نمونه‌های سطحی انجام شده است. در این پژوهش، پس از دریافت نتایج آنالیز، پیش‌پردازش‌های آماری لازم بر روی داده‌ها انجام شد. ابتدا از روش آماری هاکس و وب (Hawkes and Webb, 1962) برای تعیین حدود آستانه‌ی آنومالی بر اساس رابطه $X+2S$ محاسبه و بر غلظت عناصر اعمال شد. با این‌حال، نتایج حاصل از این روش در تفکیک دقیق نواحی آنومالی رضایت بخش نبود و مرز مشخصی میان نواحی غنی‌شده و زمینه فراهم نمی‌کرد. برای بهبود کلاسه‌بندی داده‌ها، از روش بهینه‌سازی جنکس (Jenks Optimization) استفاده شد که با تحلیل توزیع داده‌ها، مرزهای طبیعی بین کلاسه‌ها را تعیین و نقشه‌های ژئوشیمیایی دقیق‌تری ارائه می‌کند. الگوریتم شکست‌های طبیعی، تغییرات چشمگیر در هیستوگرام داده‌ها را به‌عنوان نقاط شکست در نظر گرفته و به این ترتیب مقادیر مشابه را در یک کلاس و مقادیر خارج از ردیف یا با رفتار متفاوت را در کلاسه‌های جداگانه طبقه‌بندی می‌نماید (Shuguang et al., 2015; Saleh, 2024).

به منظور مطالعات سنگ‌نگاری و کانی‌شناسی، بررسی ۴۳ نمونه سطحی و زیر سطحی از پهنه‌های دگرسانی با استفاده از میکروسکوپ نوری ZEISS و شناسایی کانی‌ها در ۶ نمونه دگرسان شده با استفاده از طیف‌سنج پراش پرتوایکس (XRD) مدل Philips-Xpert Pro در آزمایشگاه زرآزما تهران انجام شد. به منظور استفاده از داده‌های ژئوشیمیایی در نمودارهای مولی، مقادیر عناصر از واحد گرم بر تن به

واحد مولی تبدیل شده و محاسبات مولاریته انجام گرفت و نمودارهای تراکم داده‌های ژئوشیمیایی با استفاده از نرم‌افزار ioGAS 8.2 تهیه گردید (شکل ۹). همچنین تحلیل مغزه‌های گمانه‌های BH-10 (واقع در بخش جنوبی) و BH-11 (واقع در بخش شمال‌باختری) با مجموع طول ۶۸۳ متر که در جریان حفاری‌های سال ۱۴۰۲ توسط شرکت زمین‌فناوران انجام شده بود، برای مطالعه دگرسانی، کانه‌زایی و ساختارهای زیرسطحی منطقه مورد استفاده قرار گرفت.

زمین‌شناسی کانسار

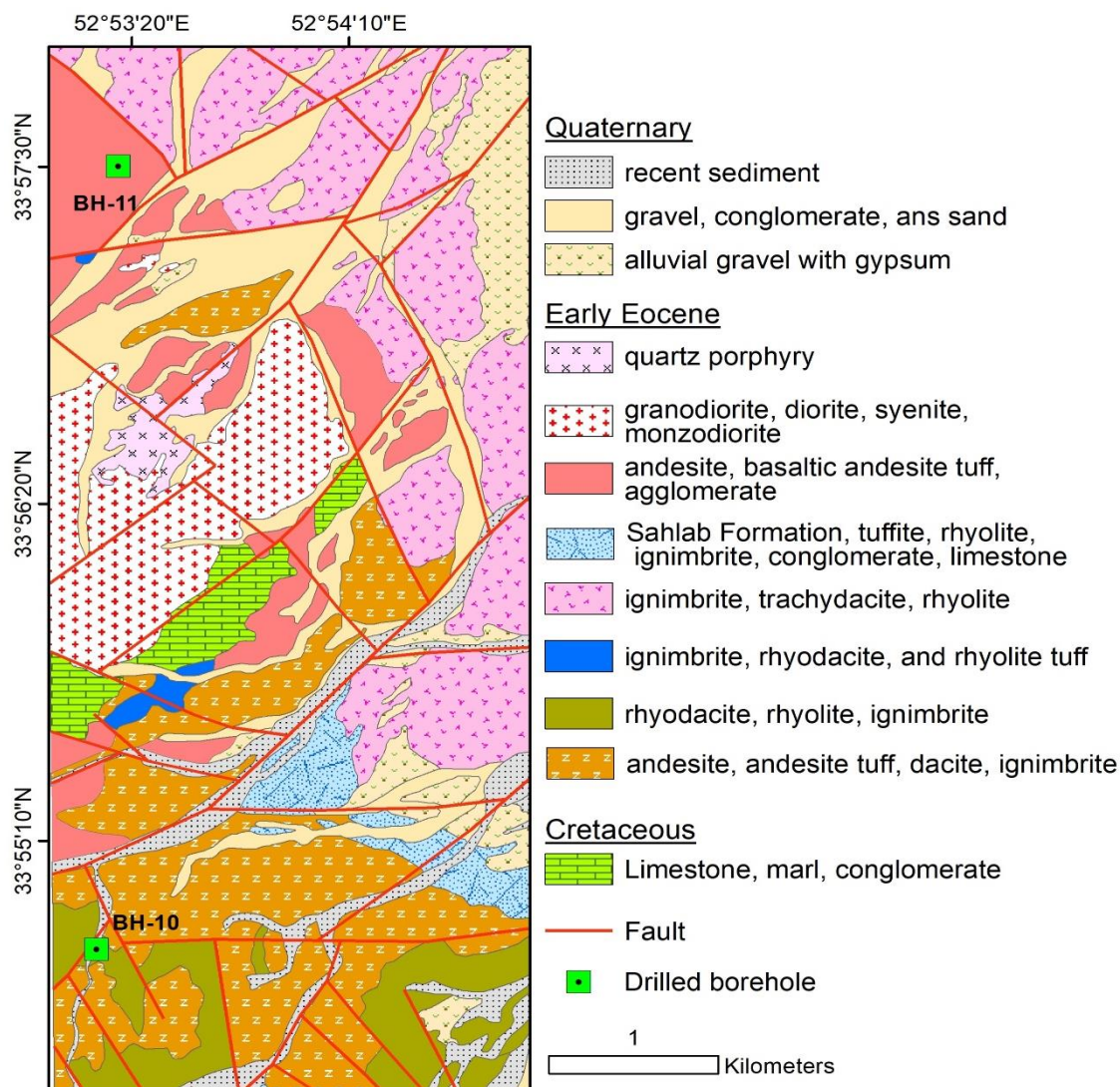
دگرگونه‌های انارک به‌عنوان کهن‌ترین واحدهای سنگی منطقه مشتمل بر شیست سبز، فیلیت، سنگ آهک‌های متبلور و ماسه‌سنگ‌های دگرگون شده با ضخامت کلی بیش از ۱۵۰۰ متر، پی‌سنگ منطقه شوراب را تشکیل می‌دهند (Sharkovski et al., 1981) (شکل ۱). این واحدها به صورت ناپیوسته در زیر نهشته‌های رسوبی کرتاسه قرار داشته و رخنمون‌های محدودی از آنها در بخش‌های شمالی منطقه مشاهده می‌شود. نهشته‌های کرتاسه زیرین با رخساره کربناته پلاتفرمی، شامل ردیف‌های آواری زیرین (۱۵-۱۰ متر)، سازند نقره (ماسه-سنگ‌های سبز تا سرخ، سیلت‌سنگ و کنگلومرا با ضخامت چند ده تا ۵۰۰ متر همراه با میان‌لایه‌هایی از نهشته‌های حاوی فسفیل دریایی) و آهک‌های اوریبتولین‌دار می‌باشد که تحت تأثیر فعالیت‌های ماگمایی بعدی دچار دگرسانی و تغییر در رنگ و ترکیب شده‌اند (شکل ۲-a). واحدهای آذرین ائوسن زیرین به صورت ناپیوسته بر روی نهشته‌های کرتاسه قرار گرفته و در بخش وسیعی از منطقه گسترش یافته‌اند. این سنگ‌های آتشفشانی با رنگ سبز، خاکستری روشن، سفید تا صورتی از نظر ترکیب بسیار متنوع بوده و شامل پهنه‌های ایگنمبریتی، گدازه‌های ریولیتی، داسیتی تا آندزیت و آندزیت بازالتی می‌شوند (شکل ۳). توده گرانیوتئیدی کوه‌دم به‌عنوان مهم‌ترین بخش کمپلکس کوه‌دم، در بخش مرکزی دارای ترکیب اسیدی تا حدواسط بوده و به تدریج در حاشیه به مونزونیت، دیوریت و گابرو تبدیل می‌شود که نشان‌دهنده اختلاط گسترده ماگمایی است (شکل‌های ۱ و ۳). در سن‌سنجی که به

روش اورانیوم-سرب بر روی بلورهای زیرکن توده‌های گرانیوتئیدی انجام شده به ترتیب سن‌های ۵۳/۹ و ۵۱/۱ میلیون سال برای سنگ‌های حدواسط-مافیک و سنگ‌های فلسیک به‌دست آمده است (Sarjoughian et al., 2015b). دایک‌های متعدد آندزیتی و دولریتی با رنگ سبز خاکستری و دایک‌های اسیدی با ترکیب گرانودیوریت پورفیری، گرانیت پورفیری، کوارتز پورفیری و آپلیت با رنگ روشن با روند‌های خاوری-باختری و شمال‌خاور-جنوب باختری در مجموعه گرانیوتئیدی و سنگ‌های آتشفشانی نفوذ کرده است. دایک‌های اسیدی با ضخامت تقریبی ۵ تا ۶ متر فاقد حاشیه انجماد سریع هستند و به شدت دگرسان شده هستند (شکل ۲-b) و اغلب به موازات یکدیگر برونزد دارند در حالی‌که دایک‌های مافیک با ضخامت کمتر از ۱ متر و در جهات مختلف دیده می‌شوند (Kananian et al., 2011). سن-سنجی دایک‌های اسیدی در منطقه کوه‌دم با روش اورانیوم-سرب در کانی زیرکن توسط سرجوقیان و همکاران (Sarjoughian et al., 2015b)، سن ۴۹/۹ میلیون سال نشان داده است. مطالعات مختلف نشان می‌دهد که فعالیت این توده‌های نفوذی و دایک‌های همراه آنها نقش تعیین‌کننده‌ای در کانی‌زایی منطقه داشته‌اند (Sarjoughian et al., 2015a; Tale Fazel, 2014; Farangi et al., 2023). از دیدگاه زمین‌ساختی، ماگماتیسم منطقه ناشی از گسیختگی صفحه فرورونده در مراحل میانی فرورانش و آغازین برخورد صفحات عربی-اوراسیا بوده است (Farangi et al., 2023). سازند سهلاب با ماهیت تخریبی-رسوبی به‌عنوان جوان‌ترین واحد سنگی ائوسن، نهشته‌های آتشفشانی ائوسن زیرین را می‌پوشاند و بیشترین رخنمون آن در بخش جنوبی محدوده مشاهده می‌شود (شکل ۳). در منطقه شوراب چندین گسل اصلی امتداد لغز با روند شمال‌غربی-جنوب‌شرقی وجود دارد که با زون‌های دگرسانی هم‌راستا هستند. شکستگی‌های فرعی در مجاورت محل تماس توده‌های آذرین با سنگ‌های آتشفشانی فلسیک و بازیک گسترش یافته و بنظر مسیرهای اصلی تزریق سیال بوده‌اند (شکل ۳). گسل‌ها نقش مهمی در کنترل دگرسانی‌ها و حرکت سیالات گرمایی داشته‌اند (شکل ۲-f).



شکل ۲- تصاویر میدانی از سنگ‌های محدوده اکتشافی شوراب، (a) نمای کلی از واحدهای آتشفشانی و نفوذی مجاور سازندهای رسوبی کرتاسه، (b) نمای نزدیک از دایک‌های اسیدی کوارتز پورفیری با دگرسانی آرژیلیک. (c) کانه‌سازی مس (مالاکیت) در سنگ‌های خردشده دیواره ترانشه اکتشافی در امتداد گسل شرقی-غربی در جنوب محدوده. (d) رگه‌های هماتیت در سنگ میزبان گرانودیوریتی. (e) رگه کوارتز-کلریت-پیریت طلا دار از گمانه BH-11 در شمال غرب. (f) کانه‌زایی همراه با رگچه‌های متقاطع تورمالینی سبب دگرسانی سنگ‌ها در تماس با توده نفوذی در بخش شمال باختری شده است.

Fig. 1. Field photographs of rock units from Shourab prospect. a) Panoramic view of volcanic and intrusive units adjacent to Cretaceous sedimentary Formations, b) Close-up view of quartz-porphyry acidic dikes with argillic alteration. c) Copper mineralization (malachite) in fractured rocks of exploration trench wall along fault zone in south area. d) Hematite veins in granodiorite host rock. e) Gold-bearing pyrite-chlorite-quartz vein from drill core BH-11 in the northwest. f) Mineralization associated with cross-cutting tourmaline veins causing rock alteration near the intrusive contact in the northwestern sector.

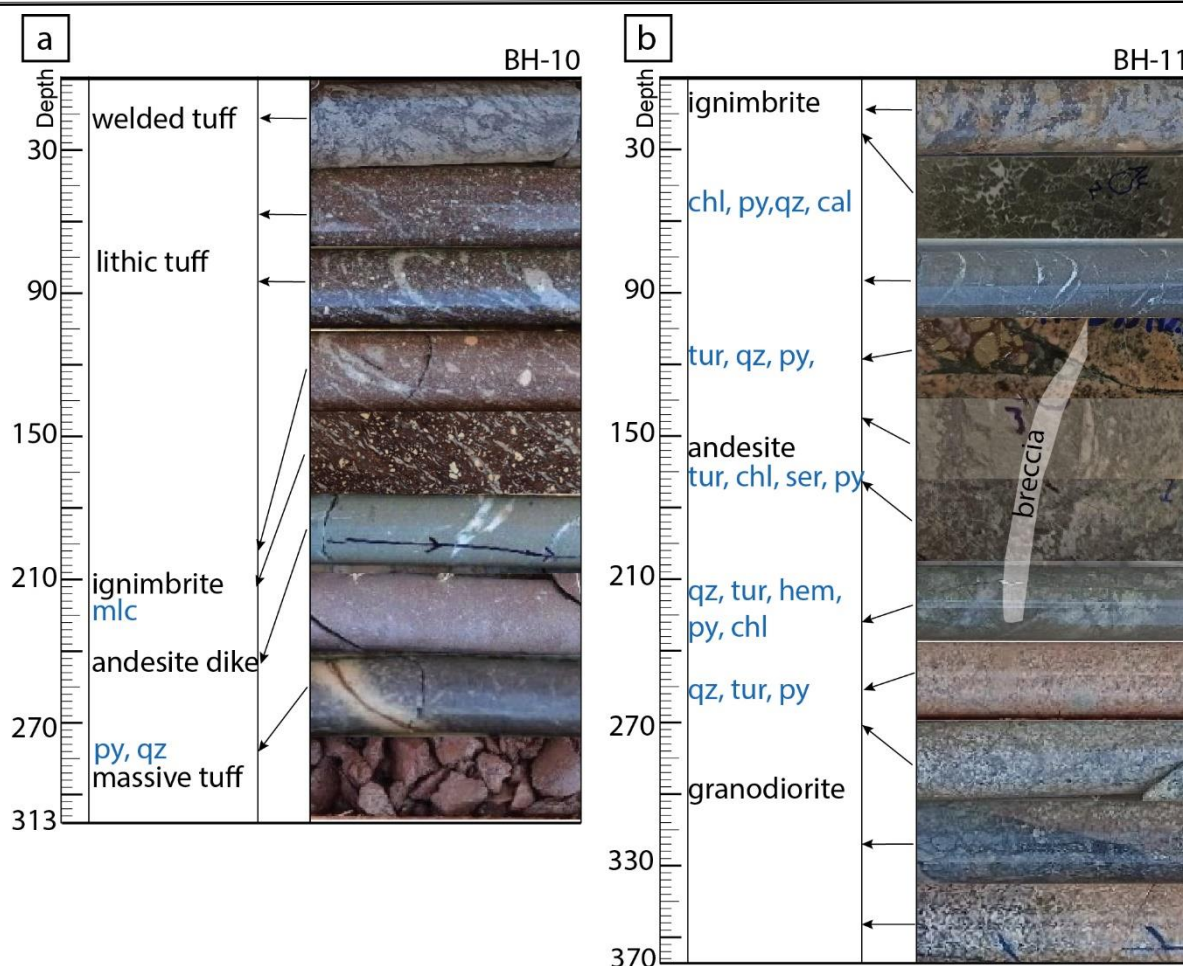


شکل ۳- نقشه زمین‌شناسی محدوده اکتشافی شوراب برگرفته از گزارش اکتشافی نقشه زمین‌شناسی ۱:۲۰۰۰۰ با تغییرات از شرکت پیچاب کانسار (۱۳۹۷).
 Fig. 3. Geological map of Shourab project, taken from 1:20000 scale geologic map exploration report modified after Pichab Kansar company (2017).

دایک آندزیتی با ضخامت ۲ متر، واحد ایگنمبریت را قطع کرده است. گمانه BH-11 از سطح به عمق از توف جوش خورده و ایگنمبریت، تراکیت‌داسیت و تراکیت تشکیل شده است که در اعماق ۱۲۴ و ۱۳۷ متر توسط دایک های فلسیک قطع شده‌اند. سنگ‌های آتشفشانی در عمق ۲۵۵ متر مورد هجوم توده گرانودیوریت دگرسان شده قرار گرفته‌اند (شکل ۴-ب).

مطالعات زمین‌شناسی زیرسطحی

بررسی گمانه BH-10 به طول ۳۱۲/۵ متر در بخش جنوبی منطقه، تغییرات بافتی مشخصی را در واحد آتشفشانی آشکار ساخته است که شامل توف جوش خورده، لیتیک توف ایگنمبریت، ریولیت و ریوداسیت است. این واحد در بخش‌هایی تحت تاثیر فرایند هوازدگی قرار گرفته‌اند و رنگ‌های متنوعی را نشان می‌دهند (شکل ۴-ا). در این گمانه یک



شکل ۴- ستون چینه‌شناسی ساده شده برای گمانه‌های حفاری، (a) BH-10 و (b) BH-11 همراه با کانی‌سازی و دگرسانی در منطقه شوراب. کانی‌های دگرسانی با رنگ آبی نمایش شده‌اند.

Fig. 4. Simplified stratigraphic column for the drill holes. a) BH-11 and b) BH-10 with mineralization and alteration at Shourab. Alteration minerals are shown in blue.

شناسایی شدند (جدول ۱ و شکل‌های ۵ و ۶). توزیع این کانی‌ها نشان‌دهنده وجود چندین فاز دگرسانی در منطقه است. از دیدگاه کانه‌زایی، کانی‌های کلریت، کوارتز و کلسیت با کانی‌سازی طلا همراهی دارند. توزیع کانی‌های تورمالین و گارنت با مناطق دارای پتانسیل کانه‌زایی بیشتر همخوانی دارد. در حالی که کانی سربیسیت بیشتر در مناطق پیرامونی کانه‌زایی مشاهده می‌شوند. این یافته‌های کانی‌شناختی، پایه‌ای مستحکم برای تفسیر الگوهای دگرسانی و ارتباط آن با کانه‌زایی در منطقه شوراب فراهم می‌کند و می‌تواند در برنامه‌های اکتشافی آینده مورد استفاده قرار گیرد.

کانی‌شناسی و ماهیت دگرسانی در منطقه شوراب

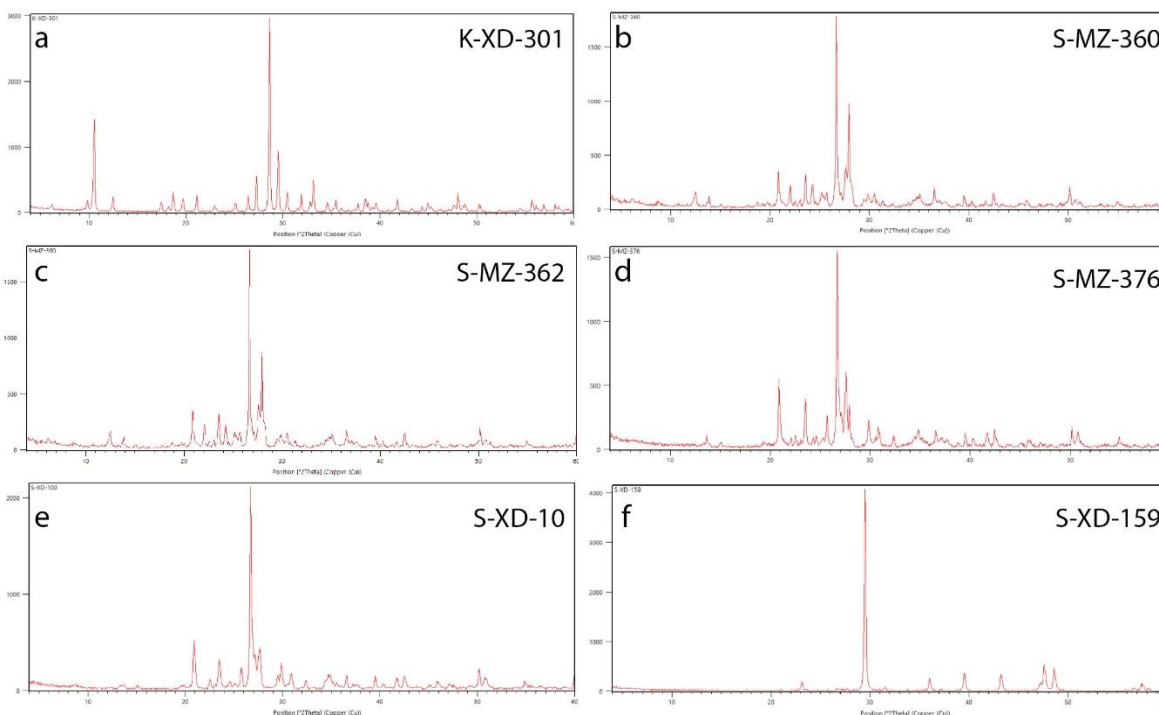
مطالعات سطحی

بر اساس مطالعات صحرایی و بررسی‌های آزمایشگاهی (XRD و سنگ‌نگاری) مجموعه‌ای از کانی‌های دگرسانی در منطقه شوراب شناسایی شده‌اند. کانی‌های اصلی شامل کلریت، کوارتز، کلسیت، سربیسیت، پیریت، مگنتیت و هماتیت هستند که همراه با کانی‌های فرعی مانند آلبریت، بیوتیت، آلکالی فلدسپار مشاهده می‌شوند (شکل ۲-d, e). همچنین کانی‌های اکتینولیت/ترمولیت، کائولینیت/ایلیت به همراه کانی‌های شاخصی مانند تورمالین، گارنت و اپیدوت در منطقه

جدول ۱- نتایج مطالعاتی کانی‌شناسی به روش XRD برای شناسایی کانی‌های دگرسانی در محدوده اکتشافی شوراب

Table 1. Results of mineralogical studies using XRD method for identification of alteration minerals in the Shourab prospect.

Sample ID	major phases	minor and trace phases
K-XD-301	amphibole (actinolite/tremolite), calcite	chlorite
SMZ-360	quartz, albite, orthoclase, chlorite	muscovite, calcite, goethite
SMZ-362	quartz, albite, orthoclase, tourmaline	chlorite, illite/sericite, hematite, calcite, goethite
SMZ-376	quartz, orthoclase	albite, goethite
S-XD-10	quartz, orthoclase	calcite, muscovite/illite, hematite, chlorite
S-XD-159	calcite	quartz, orthoclase, garnet (hydrogrossular)



شکل ۵- شناسایی کانی‌ها در الگوی پراش پرتو ایکس مربوط به دگرسانی‌های محدوده اکتشافی شوراب

Fig. 5. Identification of minerals in the X-ray diffraction pattern related to alteration zones in the Shourab prospect.

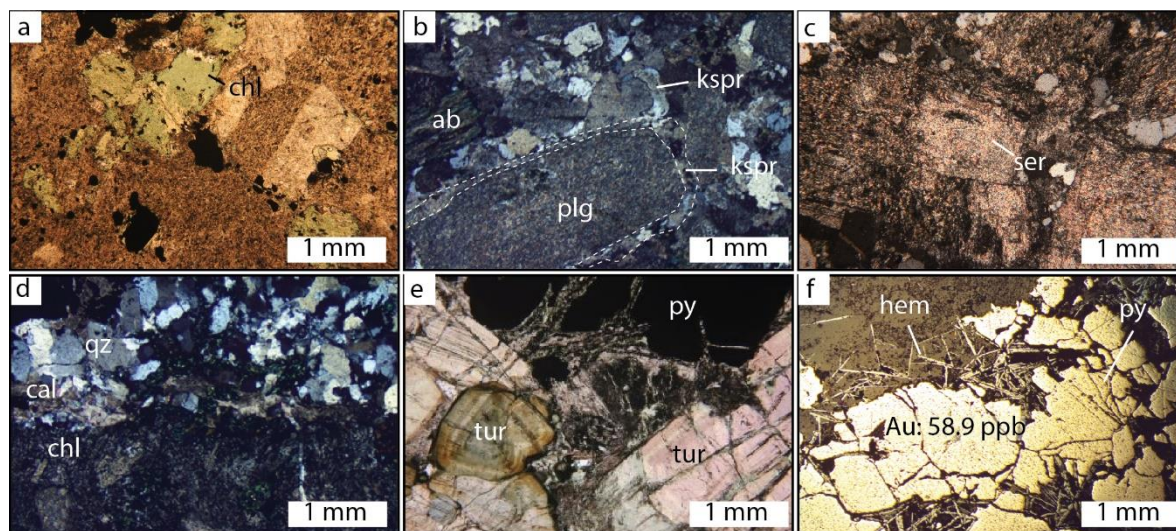
دگرسانی کلریتی و سریسیتی توف‌هاست. در این گمانه از سطح تا عمق دگرسانی از نوع کلریت، کربنات و کوارتز با شدت کم تا متوسط دیده می‌شود. در حالیکه در مرز بین گرانیات و توف از عمق ۱۲۶ تا ۲۲۷ متر دگرسانی شامل کلریت، کربنات، کوارتز و تورمالین همراه با پیریت، کمتر مگنتیت و اسپیکولاریت است. توده نفوذی (عمق ۲۵۸ تا ۳۷۰ متر) دگرسانی سریسیت و کوارتز نشان می‌دهد. ساختارهای رگه/رگچه‌ای و برشی از عمق ۲۴ متر آغاز شده و رگچه‌های متعدد از

مطالعات زیر سطحی

در گمانه BH-10 کانی‌زایی مس بصورت ملاکیت در عمق ۲۱۲ تا ۲۱۷ متری و در امتداد زون‌های خردشدگی گسلی مشاهده شده است که نشان‌دهنده کانه‌زایی تاخیری می‌باشد (شکل ۴-ا). همچنین، یک رگه نازک کوارتز-پیریت اکسید شده در عمق ۲۷۸ متر قابل تشخیص می‌باشد. دگرسانی در این گمانه بیشتر از نوع کربناته و به میزان کمتری سیلیسی می‌باشد. بررسی‌های سطحی اطراف گمانه BH-11، حاکی از

ایفا کرده‌اند، این ساختارها، همراه با شکستگی‌های کششی به عنوان مسیرهای اصلی حرکت سیالات گرمایی عمل کرده‌اند. به عنوان شاهد، بخش‌های با دگرسانی شدید مانند زون‌های کلریتی، سریسیتی و تورمالین‌دار بیشتر در امتداد گسل‌های اصلی و شکستگی‌های مرتبط توسعه یافته‌اند. به ویژه زون‌های پیریت طلا دار، در مغزه BH-11 با شکستگی‌ها و گسل‌های امتداد لغز و گسل‌های عمودی سبب نفوذ توده‌های آذرین و دگرسانی شدید سنگ‌های آتشفشانی شده‌اند. گمانه BH-11 که بیشترین طلا و شدیدترین دگرسانی را نشان می‌دهند در محل تقاطع گسل‌های اصلی با شکستگی‌های فرعی قرار دارند.

کلریت، کوارتز، کلسیت، پیریت، تورمالین و هماتیت در اعماق مختلف مشاهده می‌شود. از عمق ۱۴۰ متر به بعد، رگچه‌های تورمالین-کوارتز-پیریت قابل تشخیص هستند (شکل ۴-ب). پیریت در این گمانه بصورت برشی، رگچه‌ای، شکل‌دار و گرد شده دیده می‌شود. مهم‌ترین دگرسانی‌های مرتبط با کانی‌زایی شامل کلریت، کوارتز، تورمالین، کربنات و پیریت می‌باشد. اگر چه عیارهای طلا در این گمانه بوفور دیده می‌شود اما مقادیر اقتصادی قابل توجهی اندازه‌گیری نشده است (شکل ۶-ف). بررسی‌های انجام شده حاکی از آن است که گسل‌ها نقش کلیدی در کنترل دگرسانی‌های گرمایی و تمرکز کانی‌سازی در منطقه شوراب



شکل ۶- تصاویر میکروسکوپی از نمونه‌های گمانه BH-11. (a) کانی‌های پیروکسن به کلریت تجزیه شده‌اند. (b) آلکالی فلدسپار در اطراف پلاژیوکلازها تشکیل شده است. (c) فلدسپارها سریسیتی شده است. (d) رگه کوارتز-کلسیت-کلریت در توف، (e) منطقه‌بندی در تورمالین که همراه با پیریت تشکیل شده است. (f) پیریت‌های طلا دار از عمق ۱۷۸ متری با عیار ۵۹ میلی‌گرم در تن که اسپیکولاریت را قطع کرده‌اند. مقدار طلا با EPMA اندازه‌گیری شده است.

Fig. 6. Microscopic images of samples from borehole BH-11. a) pyroxene minerals altered to chlorite (chl). b) alkali feldspar (kspr) formed around plagioclase. c) feldspars sericitized (ser), d) quartz-calcite-chlorite vein in tuff, e) zoning in tourmaline associated with pyrite formation, f) gold-bearing pyrites from a depth of 178 m, with a grade of 59 ppb crosscutting specularite. The gold content was measured by EPMA.

و در مقیاس متری گسترش دارند. انواع دگرسانی شناسایی شده عبارتند از: پیش از کانه‌زایی شامل آلبیت، کلریت، اکتینولیت، کوارتز، کلسیت و مگنتیت؛ دگرسانی نزدیک به کانه‌زایی متشکل از بیوتیت، پتاسیم فلدسپار، کوارتز، تورمالین، سریسیت، کلریت و مگنتیت؛ دگرسانی همراه با توده نفوذی شامل سریسیت، کربنات، کوارتز، کلریت، هماتیت و پیریت؛ دگرسانی دور از کانه‌زایی با ترکیب کوارتز،

بر پایه بررسی‌های سطحی، مطالعات مغزه‌های حفاری و بررسی‌های پتروگرافی تکمیلی، پنج نوع مجموعه کانی شناسی مرتبط با دگرسانی در شوراب شناسایی شده‌اند. برخی از این مجموعه‌ها در مقیاس منطقه‌ای و در گستره چند کیلومتری توسعه یافته‌اند و عمدتاً در امتداد ساختارهای اصلی متمرکز هستند (مانند کلریت-کوارتز-کلسیت)، در حالیکه مجموعه‌های مرتبط با کانه‌زایی به صورت موضعی

هماتیت و کربنات. دگرسانی نزدیک به کانه‌زایی معمولاً با رنگ صورتی و خاکستری روشن دیده می‌شود. این نوع دگرسانی بصورت گسترده یا لکه‌ای ظاهر می‌شود و با سریسیت گسترده و حضور موضعی تورمالین مشخص می‌شود. این دگرسانی با پیریت پراکنده همراه است و ضخامت آن با گسترش بیش از ۱۰ متر از مرز پهنه طلا دار گسترش دارد. این نوع دگرسانی در سنگ‌های حدواسط بصورت دگرسانی لکه‌ای یا گسترده کلریتی و در سنگ‌های فلسیک شامل سریسیت، پیریت و کربنات به شکل ضعیف تا متوسط دیده می‌شود. همچنین سیلیسی شدن موضعی، عیار پایین طلا و از بین رفتن بافت‌های اولیه آتشفشانی و نفوذی از مشخصات این زون است. دگرسانی کوارتز-هماتیت بیشتر در سنگ‌های نفوذی فلسیک پس از کانه‌زایی رخ می‌دهد، بنظر با طلا ارتباط ندارد و رنگ آن از نارنجی تا قرمز متغیر است و گاهی با مگنتیت پراکنده همراه است. دگرسانی کربناتی تاخیری نیز فاقد طلا، ضعیف با رنگ زرد کم‌رنگ تا سفید بوده و بصورت گسترده در سراسر کانسار گسترش یافته است. این دگرسانی معمولاً بصورت ثانویه، زون‌های کانه‌دار را قطع کرده و عمدتاً در امتداد مرزهای زمین‌شناسی تمرکز یافته است. دگرسانی پس از کانه‌زایی بر اساس شواهد روابط قطع‌شدگی در رخنمون‌های سطحی و گمانه‌های زیرسطحی شناسایی شده است.

ژئوشیمی پهنه‌های دگرسانی در منطقه شوراب

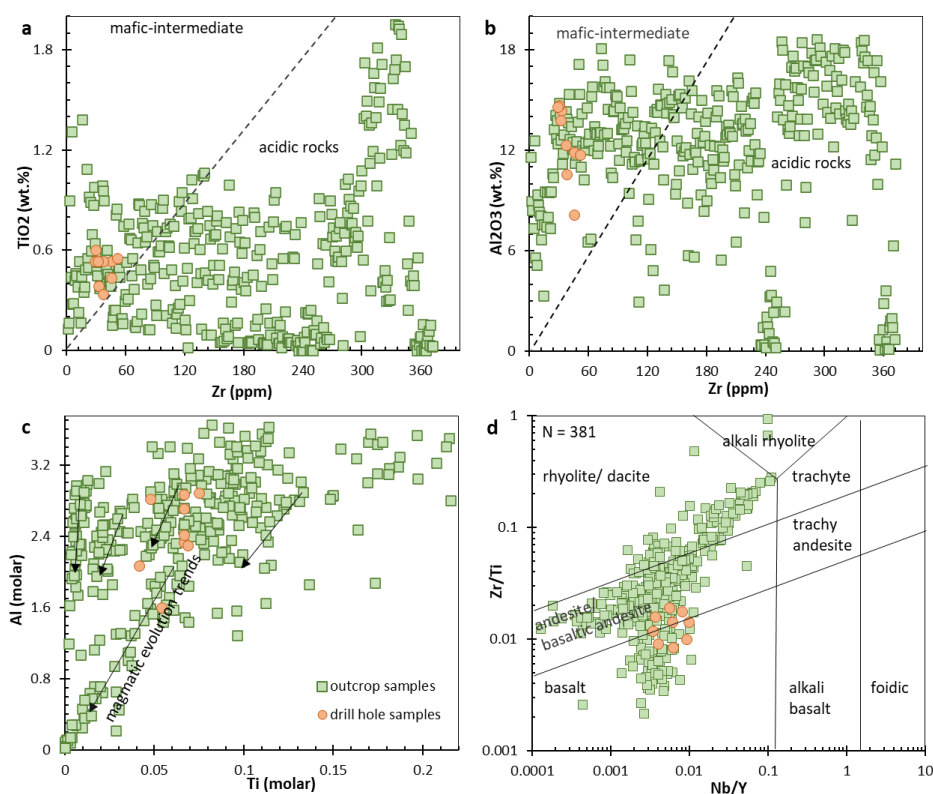
ژئوشیمی عناصر اصلی و کمیاب سنگ‌کل برای تمامی واحدهای سنگی به منظور طبقه‌بندی سنگ‌ها، تعیین وابستگی ماگمایی و ارزیابی نوع و شدت دگرسانی مورد بررسی قرار گرفت (جدول ۲). برای شناسایی ترکیب سنگ اولیه و تفکیک سنگ‌شناختی از

نمودارهای دو متغیره Zr در مقابل TiO_2 و Zr در برابر Al_2O_3 استفاده شده است (شکل ۷-a، b). در این مطالعه، نمونه‌های مرمر و اسکارن از تحلیل حذف شدند و تنها نمونه‌های آتشفشانی مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج نشان می‌دهد نمونه‌های هم‌ژنز از نظر شیمیایی همگن بوده و در گروه‌های خطی نسبتاً منسجمی خوشه‌بندی می‌شوند. در مقابل سنگ‌های اسیدی پراکندگی بیشتری در نمودار نشان می‌دهند (شکل ۷-a، b). از نمودارهای مولی (Grant, 1986; Stanley et al., 1994) عناصر غیر متحرک Al و Ti برای ارزیابی تغییرات عنصری و فرایندهای دگرسانی استفاده شد (Hokka et al., 2024). نمونه‌هایی با پروتولیت و ترکیب اولیه مشابه، الگوی خطی مشخصی را نشان می‌دهند. در مواردی که عناصر طی فرایند دگرسانی، تحرک نداشته باشند روند خطی از مبدا مختصات عبور می‌کند (شکل ۷-c)، از سوی دیگر پروتولیت‌های متفاوت موجب تشکیل روندهای خطی اضافی و الگوهای متمایز می‌شوند (Buschette and Piercey, 2016). چون عناصر Nb، Y، Ti و Zr در برابر فرایندهای دگرسانی و دگرگونی درجه پایین نسبتاً پایدار باقی می‌مانند برای این منظور از نمودارهایی بر پایه عناصر نسبتاً کم‌تحرک در برابر دگرسانی استفاده شد. نمودار دوتایی Nb/Y در برابر Zr/Ti از موثرترین ابزارها برای تمایز سنگ‌شناسی می‌باشد، حتی در شرایطی که نمونه‌ها دارای درجات مختلفی از دگرسانی باشند (Pearce, 1996). نمونه‌ها در پنجره بازالت تا آندزیت‌بازالت و گروه دوم ترکیب داسیتی-ریولیتی تا آلكالی‌ریولیت دارند (شکل ۷-d). ۹ نمونه مربوط به گمانه BH-11 در پنجره آندزیت تا بازالت قرار گرفته‌اند (شکل ۷-d).

جدول ۲- محاسبات آماری مقادیر طلا (میلی‌گرم در تن)، عناصر اصلی و فرعی (گرم در تن) سنگ کل از نمونه‌های شوراب.

Table 2. Summary statistics for selected whole-rock gold (ppb), major, and minor (ppm) element concentrations of Shourab samples.

	Al	K	Na	Ca	Mg	Fe	Au	Ba	Bi	U	Cu	Co	Ni	Sm
Count	381	381	381	381	379	381	142	381	378	381	381	321	381	341
Median	69059	39441	11770	25612	6113	32931	5	623	0.1	2.6	15	10.3	13	3.5
95 percentile	97854	79334	436	>100000	26667	133333	36.6	1706	3.4	6.6	217	38.1	74.6	10.4
St. Deviation	26446	24517	11420	38713	8747	32931	13	706	3.1	2.1	4854	30.1	23.8	6.5
Minimum	566	138	75	500	144	1773	3	7	0.1	0.1	2	1	4	0.0
Maximum	>100000	>100000	52537	>100000	43300	>150000	104	6854	40.1	18.3	>50000	393	185	10.8.8



شکل ۷- نمودارهای عناصر غیرمتحرک در انواع سنگ‌های شوراب، (a) نمودار دوتایی Zr در مقابل TiO_2 و (b) نمودار دوتایی Zr در برابر Al_2O_3 برای تشخیص ترکیب سنگ اولیه استفاده شده است. (c) نمودار Ti در برابر Al، روند تکامل ماگمایی (پیکان سیاه) را در سنگ‌های با کمترین دگرسانی (عبور از مبدا) نشان می‌دهد. پیکان‌های سیاه نشانگر پروتولیت‌های ناهمگن سنگ‌های دگرسان است که از روند خطی اصلی (شرقی-غربی) انحراف دارند. (d) نمونه‌ها در نمودار Nb/Y در برابر Zr/Ti درون دو پنجره بازالت تا آندزیت و داسیت-ریولیت قرار گرفته است (Pearce, 1996). نمونه‌های برداشت شده از سنگ‌های آتشفشانی گمانه BH-11 با دایره‌های نارنجی نمایش داده شده است.

Fig. 7. Immobility diagrams for Shourab rock types, a) binary plot of Zr vs. TiO_2 and b) Zr vs. Al_2O_3 , used to determine the protolith composition of . c) Ti vs. Al (molar) diagram; reveals magmatic evolutionary trends (black arrow) in the least-altered rocks (passing through the origin). Black arrows represent heterogeneous protoliths deviating from the main E-W linear trend. d) samples plotted on the Nb/Y vs. Zr/Ti diagram (Pearce, 1996) fall within the basalt-andesite and dacite-rhyolite fields. BH-11 borehole volcanic samples are marked by orange circles.

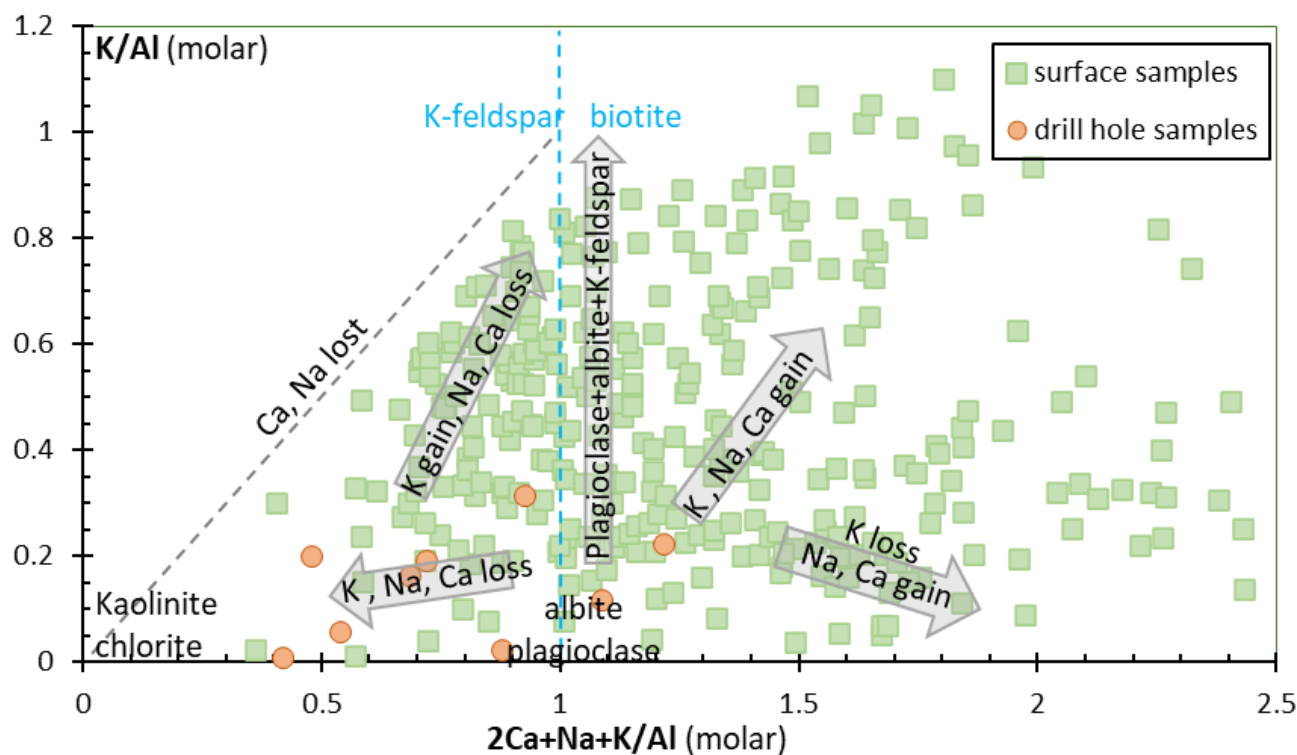
شاخص‌های دگرسانی

شدت دگرسانی در منطقه شوراب با استفاده از شاخص شیمیایی دگرسانی (CIA) ارزیابی شده است که از نسبت‌های مولکولی محاسبه می‌شود. این شاخص به صورت $CIA = Al_2O_3 / (Al_2O_3 + Na_2O + K_2O + CaO)$ تعریف می‌شود (Fedo et al., 1995). دامنه تغییرات CIA در نمونه‌های سطحی منطقه شوراب بین ۱/۱ تا ۸۲/۲ درصد و در نمونه‌های گمانه BH-11 بین ۵۶ تا ۸۰ درصد متغیر است. افزایش این شاخص بیانگر حذف عناصر متحرک در طی فرایندهای دگرسانی است. توزیع نمونه‌ها در نمودار سه‌تایی $K_2O, CaO + Na_2O, Al_2O_3$ (Nesbitt and Young, 1984) و تحلیل هیستوگرام CIA نشان می‌دهد که بیشتر نمونه‌ها دارای دگرسانی ضعیف تا متوسط (۶۰-۳۵٪) هستند. این پدیده عمدتاً در مرز توده‌های نفوذی با سنگ‌های آتشفشانی و امتداد گسل‌های اصلی منطقه مشاهده می‌شود. شدت دگرسانی در نزدیکی توده‌های نفوذی، به طور محلی افزایش یافته است. میزان هوازدگی با شاخص $MIA = 2 \times (CIA - 50)$ محاسبه شد (Voicu et al., 1996) که نتایج آن، هوازدگی ۰/۱ تا ۳۲/۲ درصدی را برای منطقه نشان می‌دهد.

ترکیب شیمیایی و نوع دگرسانی

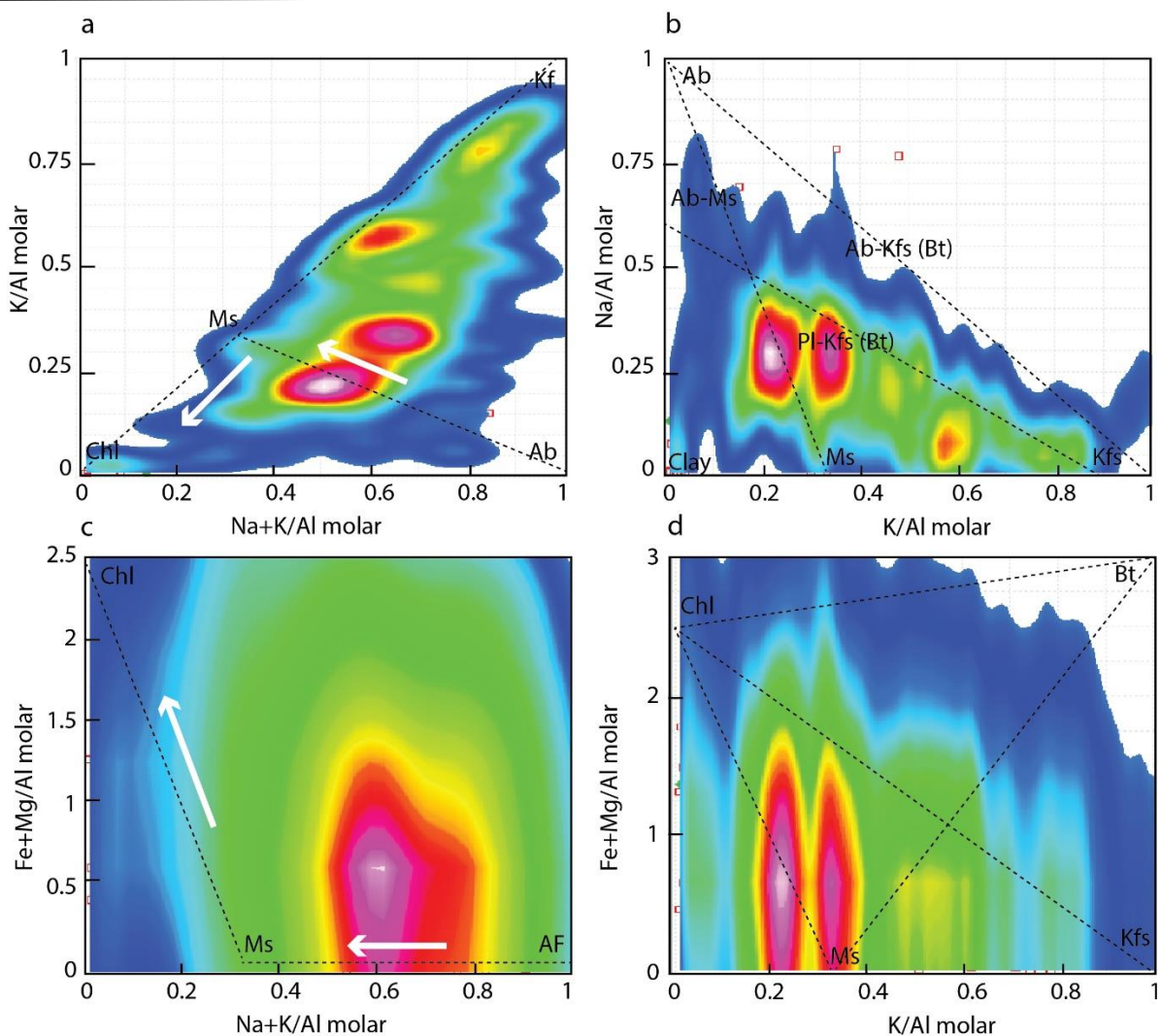
مطالعات سنگ‌نگاری و ژئوشیمیایی نشان می‌دهد که نمونه‌های منطقه تحت تاثیر انواع مختلف دگرسانی قرار گرفته‌اند. برای ارزیابی درجه متاسوماتیسم پتاسیم، کلسیم، سدیم، آهن و منیزیم، نمونه‌ها در نمودار $2Ca+Na+K/Al$ در برابر K/Al مورد تحلیل قرار گرفتند (شکل ۸).

نتایج حاکی از آن است که بر اساس مدل گراهام و همکاران (Graham et al., 1995) نمونه‌های دگرسان شده شوراب مقادیر $2Ca+Na+K/Al$ بین ۰/۴ تا بیش از ۲ دارند، در حالی که نسبت K/Al در آن‌ها در محدوده ۰/۰۱ تا ۱/۲ متغیر است. نسبت مولی K/Al برای نمونه‌های دارای فلدسپار و بیوتیت ۱ و برای میکای پتاسیم‌دار ۰/۳۳ است. نمونه‌هایی با نسبت مولی K/Al کمتر از ۰/۲ تا ۰/۳۳ حاوی کائولینیت یا کلریت آلومینیوم‌دار می‌باشند (Warren et al., 2007) (شکل ۸). بیشترین نمونه‌های برداشت شده از گمانه BH-11 دگرسانی از نوع کلریتی نشان می‌دهند که عناصر پتاسیم، سدیم و کلسیم را از دست داده‌اند (شکل ۸). بقیه نمونه‌ها تحت تاثیر سایر دگرسانی‌ها قرار گرفته‌اند. تحلیل نمودار تراکمی نسبت‌های مولاری $Na+K/Al$ در برابر K/Al نشان می‌دهد که نمونه‌هایی با بالاترین نسبت K/Al بیانگر دگرسانی پتاسیک هستند (تمرکز در نزدیکی محور عمودی)، نمونه‌هایی با مقادیر میانی نشانگر دگرسانی سربستی و کمترین مقادیر K/Al از نوع دگرسانی کلریتی می‌باشند (شکل ۹-a). بیشترین تراکم نمونه‌ها در محدوده کانی مسکویت-آلبیت و در امتداد پتاسیم فلدسپار و کلریت قابل مشاهده است (شکل ۹-a). بررسی نمودار K/Al در برابر Na/Al نشان می‌دهد که تمرکز نمونه‌ها عمدتاً در محدوده کانی‌های مسکویت، آلکالی فلدسپار و تاحدودی کانی‌های رس قرار دارد (شکل ۹-b). همچنین در نمودار $Na+K/Al$ در مقابل $Fe+Mg/Al$ تراکم نمونه‌ها در محدوده آلکالی فلدسپار مسکویت مشاهده شده و روندی به سمت کلریت نشان می‌دهد (شکل ۹-c). در نمودار K/Al در برابر $Fe+Mg/Al$ نیز بیشترین تراکم نمونه‌ها میان مسکویت و کلریت متمرکز است (شکل ۹-d).



شکل ۸- نمودار نسبت مولار $2Ca+Na+K/Al$ به K/Al بر اساس مدل گراهام و همکاران (Graham et al., 1995) با اندکی تغییرات. موقعیت نمونه‌های منطقه شوراب نشان‌دهنده غنی‌شدگی بیشتر نمونه‌های دگرسان از عناصر پتاسیم، کلسیم و سدیم است.

Fig. 8. Molar ratio diagram of $2Ca + Na + K/Al$ vs. K/Al based on the model of Graham et al. (1995) with minor modifications. The position of Shourab samples indicates that altered samples exhibit enrichment in sodium, calcium, and potassium.

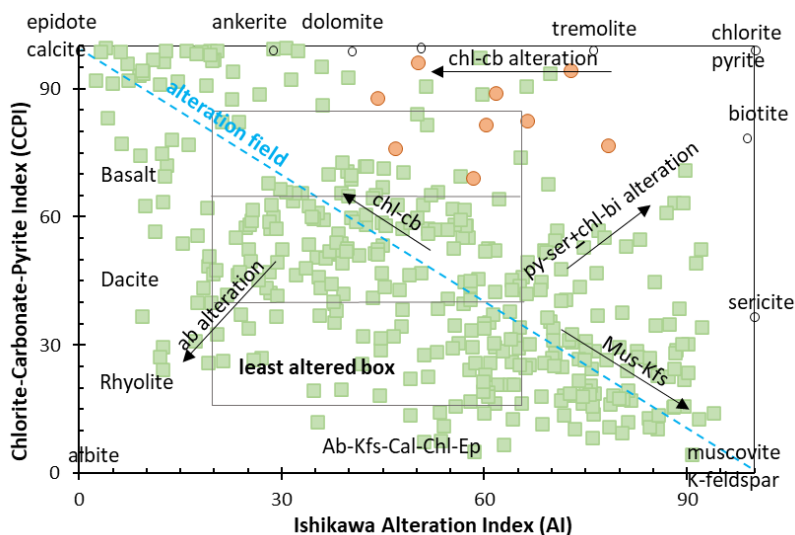


شکل ۹- نمودارهای تراکم داده‌های نسبت‌های مولاری ژئوشیمیایی، رنگ‌ها از آبی تا قرمز-سفید بیانگر افزایش تراکم نمونه‌های پلات شده هستند. a) $Na+K/Al$ در برابر K/Al ؛ پیکان‌های سفید روند تغییر ترکیب از آلبیت به مسکویت و از مسکویت به سوی کلریت را نشان می‌دهند. b) تغییرات K/Al در مقابل Na/Al بر اساس مدل فابریس و همکاران (Fabris et al., 2015)، اغلب نمونه‌ها در قلمرو پلاژیوکلاز-پتاسیم فلدسپار و بیوتیت قرار گرفته‌اند. موقعیت نمونه‌های منطقه شوراب نشان‌دهنده غنی‌شدگی بیشتر پتاسیم نسبت به سدیم است. c) تغییرات $Na+K/Al$ در برابر $Fe+Mg/Al$ ؛ فلش‌های سفید روند تغییر از آلکالی فلدسپار به سمت مسکویت و سپس کلریت را نشان می‌دهند. d) نسبت K/Al در برابر $Fe+Mg/Al$. تراکم نمونه‌ها بیشتر در قلمرو مسکویت، پتاسیم فلدسپار و کلریت مشاهده می‌شود. اختصاری کانی‌ها: Kf- پتاسیم فلدسپار، Chl- کلریت، Ms- مسکویت، AF- آلکالی فلدسپار، Bt- بیوتیت، Pl- پلاژیوکلاز.

Fig. 9. Density plots of geochemical molar ratios. Colors from blue to red–white represent increasing density of plotted samples. a) $Na+K/Al$ versus K/Al ; white arrows indicate compositional trends from albite to muscovite and from muscovite toward chlorite. b) K/Al versus Na/Al (Fabris et al., 2015); most samples plot within the plagioclase, K-feldspar and biotite fields. The position of Shourab samples indicates that altered samples exhibit enrichment in potassium to sodium. c) $Na+K/Al$ versus $Fe+Mg/Al$; white arrows show the trend from alkali feldspar toward muscovite and then chlorite. d) K/Al versus $Fe+Mg/Al$; sample density is mainly concentrated in the muscovite, K-feldspar, and chlorite fields. Abbreviations: Kf- K feldspar, Chl- chlorite, Ms- muscovite, Af- alkali feldspar, Bt- biotite, Pl- plagioclase.

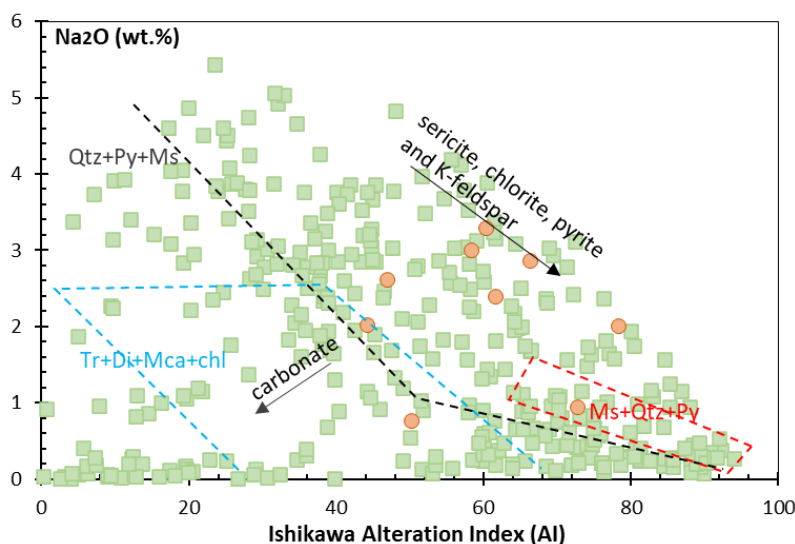
فلدسپار بر روی نمودار، بخشی از نمونه‌ها با افزایش پیش‌رونده به سوی دگرسانی کلریت-کربنات (در گوشه بالا سمت چپ نمودار) و بخشی دیگر به سوی دگرسانی اپیدوت-کربنات (در گوشه بالا سمت راست نمودار) متمایل شده‌اند که با شواهد سنگ‌نگاری همخوانی دارد (شکل ۱۰). سایر نمونه‌ها به سمت راست و پایین نمودار کشیده شده‌اند که با شواهد میکروسکوپی و کانی‌شناسی نیز هماهنگی دارد و نشان‌دهنده حضور و افزایش کانی‌های دگرسانی کلریت، سریسیت و پتاسیم‌فلدسپار می‌باشد (شکل ۱۰). بررسی تغییرات AI در برابر Na₂O نشان‌دهنده همبستگی منفی و تپه‌شدگی سدیم با پیشرفت دگرسانی در تعدادی از نمونه‌هاست (شکل ۱۱). تعدادی به سمت روند کربنات متمایل شده‌اند که نشان‌دهنده وجود متاسوماتیسم کربنات در منطقه است. این نمونه‌ها مقادیر شاخص دگرسانی ایشیکاوا را کاهش می‌دهند. برعکس، تغییرات AI در برابر K₂O همبستگی مثبت معناداری را نشان می‌دهد که بیانگر غنی‌شدگی پتاسیم با پیشرفت دگرسانی می‌باشد. بنابراین بیشتر نمونه‌ها روند کاهش Na₂O و افزایش شدید K₂O را نشان می‌دهند که معرف دگرسانی سریسیتی و تخریب فلدسپارهای سدیمی مرحله اول دگرسانی است (شکل ۹-a، b). نمونه‌های گمانه BH-11 دگرسانی از نوع کلریت-کربنات-سریسیت-پیریت نشان می‌دهند. این نتایج به وضوح نشان می‌دهد که سنگ‌های منطقه تحت تاثیر فرایندهای دگرسانی با شدت‌های مختلف قرار گرفته‌اند و انواع مختلفی از دگرسانی در منطقه قابل تشخیص است (شکل ۱۰).

شاخص‌های دگرسانی مورد استفاده برای عناصر متحرک شامل شاخص ایشیکاوا $AI = [100 (K_2O + MgO)] / (K_2O + MgO + Na_2O + CaO)$ (Ishikawa et al., 1976)، شاخص کلریت-کربنات-پیریت $CCPI = [100 (MgO + FeO)] / (MgO + FeO + Na_2O + [MgO \text{ بر اساس مدل (Large et al., 2001), شاخص کلریت } (MgO + Fe_2O_3 / (MgO + Fe_2O_3 + 2CaO + 2Na_2O)] + Fe_2O_3)$ ، شاخص سریسیت $[K_2O / (K_2O + Na_2O)]$ بر اساس (Saeki and Date, 1980) و شاخص هاشیگوشی $[Fe_2O_3 / (Fe_2O_3 + MgO)]$ بر اساس (Hashiguchi, 1983) می‌باشد. شاخص ایشیکاوا در نمونه‌ها بین ۲/۵ تا ۹۳/۹ درصد، کلریت-کربنات-پیریت در محدوده ۴/۴ تا ۹۹/۷ درصد، شاخص سریسیت در دامنه ۳ تا ۹۸، شاخص کلریت از ۲/۶ تا ۲۵/۹ و شاخص هاشیگوشی مقادیر ۳۷ تا ۹۹ می‌باشد. شاخص AI برای کمی-سازی شدت دگرسانی کلریت-سریسیت بر اساس عناصر اصلی سازنده سنگ‌ها طراحی شده است. این شاخص شامل عناصر افزوده شده (مانند پتاسیم و منیزیم) در برابر عناصر از دست‌رفته و یا افزوده شده (مانند پتاسیم، منیزیم، کلسیم و سدیم) است (Large et al., 2001). از آنجا که شاخص ایشیکاوا در محاسبه دگرسانی کربناته و تفکیک دگرسانی-های کلریتی و سریسیتی از یکدیگر ناتوان است، از شاخص CCPI هم استفاده می‌شود. در نمودار جعبه‌ای دگرسانی CCPI-AI (Large et al., 2011; Large, 2025) نیمی از نمونه‌ها دگرسانی ضعیفی دارند و عمدتاً از جنس ریولیت، داسیت و کمتر بازالت هستند (شکل ۱۰). با توجه به مکان کانی‌های کلریت، کلسیت، بیوتیت، سریسیت و پتاسیم



شکل ۱۰- نمودار جعبه‌ای AI در برابر CCPI (بر اساس Large et al., 2001) نشان‌دهنده تغییرات ترکیبی بین سنگ‌های آتشفشانی با کم‌ترین دگرسانی و دگرسان شده در منطقه شوراب. مجموعه کانی‌های دگرسان گرمایی مطابق با طرح طبقه‌بندی لارج و همکاران (Large et al., 2001) بوده و نشان‌دهنده ترکیبات و فرایندهای چندگانه دگرسانی است. شاخص دگرسانی AI (Ishikawa et al., 1976). علامت اختصاری کانی‌ها: Cb- کربنات، Chl- کلریت، Ser- سربیسیت، Bi- بیوتیت.

Fig. 10. CCPI–AI alteration box plot (Large et al., 2001) showing composition variations between least altered and altered volcanic rock samples from the Shourab prospect. Hydrothermal alteration mineral assemblages follow the classification scheme of Large et al. (2011), indicating multiple alteration compositions and processes. AI = alteration index (Ishikawa et al., 1976). Abbreviations: Cb- carbonate, Chl- chlorite, Ser- sericite, and Bi- biotite.



شکل ۱۱- نمودار AI در مقابل Na_2O نشان‌دهنده شدت دگرسانی برای انواع اصلی دگرسانی‌های شیمیایی در منطقه شوراب. علائم اختصاری کانی‌ها: Cb- کربنات، Chl- کلریت، Di- دیوپسید، Mca- میکا، Ms- مسکویت، Py- پیریت، Qtz- کوارتز، Ser- سربیسیت، Tr- ترمولیت.

Fig. 11. Na_2O vs. AI plot showing alteration intensity for principal chemical alteration types in the Shourab area. Abbreviations: Chl = chlorite, Di = diopside, Mca = mica, Ms = muscovite, Py = pyrite, Qtz = quartz, Tr = tremolite. Abbreviations: Cb = carbonate, Chl = chlorite, Py = pyrite, Ser = sericite.

ارتباط بین دگرسانی و عناصر کانه‌ساز

پس از طبقه‌بندی انواع دگرسانی، روابط بین هر مجموعه دگرسانی و عناصر اقتصادی کلیدی ارزیابی شد. نتایج تجزیه شیمیایی نمونه‌ها نشان‌دهنده تغییرات قابل توجه در غلظت عناصر فلزی است. محتوای آهن در محدوده شوراب، ۱۷۷۳ گرم بر تن تا بیش از ۱۰ درصد و پتاسیم با غلظت‌های بین ۱۳۸ گرم در تن تا بیش از ۱۰ درصد متغیر است، در حالی که مس از ۲ گرم بر تن تا بیش از ۵ درصد تغییر می‌کند (جدول ۲). طلا با دامنه ۵ تا ۱۰۴ میلی‌گرم بر تن، باریم ۷ تا ۶۸۵۴ گرم در تن، آلومینیوم ۵۶۶ تا بیش از ۱۰ درصد و سدیم از کمتر از ۱۰۰ تا ۵۲۵۳۷ گرم در تن اندازه‌گیری شده‌اند. سایر عناصر شامل نقره (تا ۲۳۳/۵ گرم در تن)، مولیبدن (تا ۲۸۹ گرم بر تن)، سرب (تا ۳ درصد)، روی (تا ۴۷۵۳ گرم بر تن)، گوگرد (تا ۳ درصد)، بیسموت (تا ۴۰/۱ گرم در تن)، کبالت (تا ۱۷۹/۴ گرم در تن)، نیکل (تا ۱۸۵ گرم بر تن)، لیتیم (تا ۲۳۱ گرم در تن) سریم (تا ۱۶۴۵ گرم در تن)، لانتانیم (تا ۶۸۰ گرم بر تن) و فسفر (تا ۳۵۵۲ گرم بر تن) نیز تغییرات محتوایی قابل توجهی نشان می‌دهند. در بیشتر نمونه‌ها، مقادیر بیسموت زیر حد تشخیص بود. در دو نمونه غنی از آهن و گوگرد از بخش شمالی منطقه غلظت‌های بالای بیسموت (۱۹/۵ و ۴۰/۱ گرم بر تن) اندازه‌گیری شده است. لازم به ذکر است که با وجود اجرای شبکه‌بندی سلولی (شکل‌های ۱۲ تا ۱۴)، به دلیل عدم پیوستگی کامل داده‌ها، توزیع مکانی غلظت عناصر در نقشه‌های نمادین حسابی نیز نمایش شده است (شکل‌های ۱۲ تا ۱۴). بررسی نقشه‌های ژئوشیمیایی عناصر پتاسیم، سدیم، اورانیوم، طلا، مس، نقره، مولیبدنیوم، تنگستن، نیکل، بیسموت، آهن،

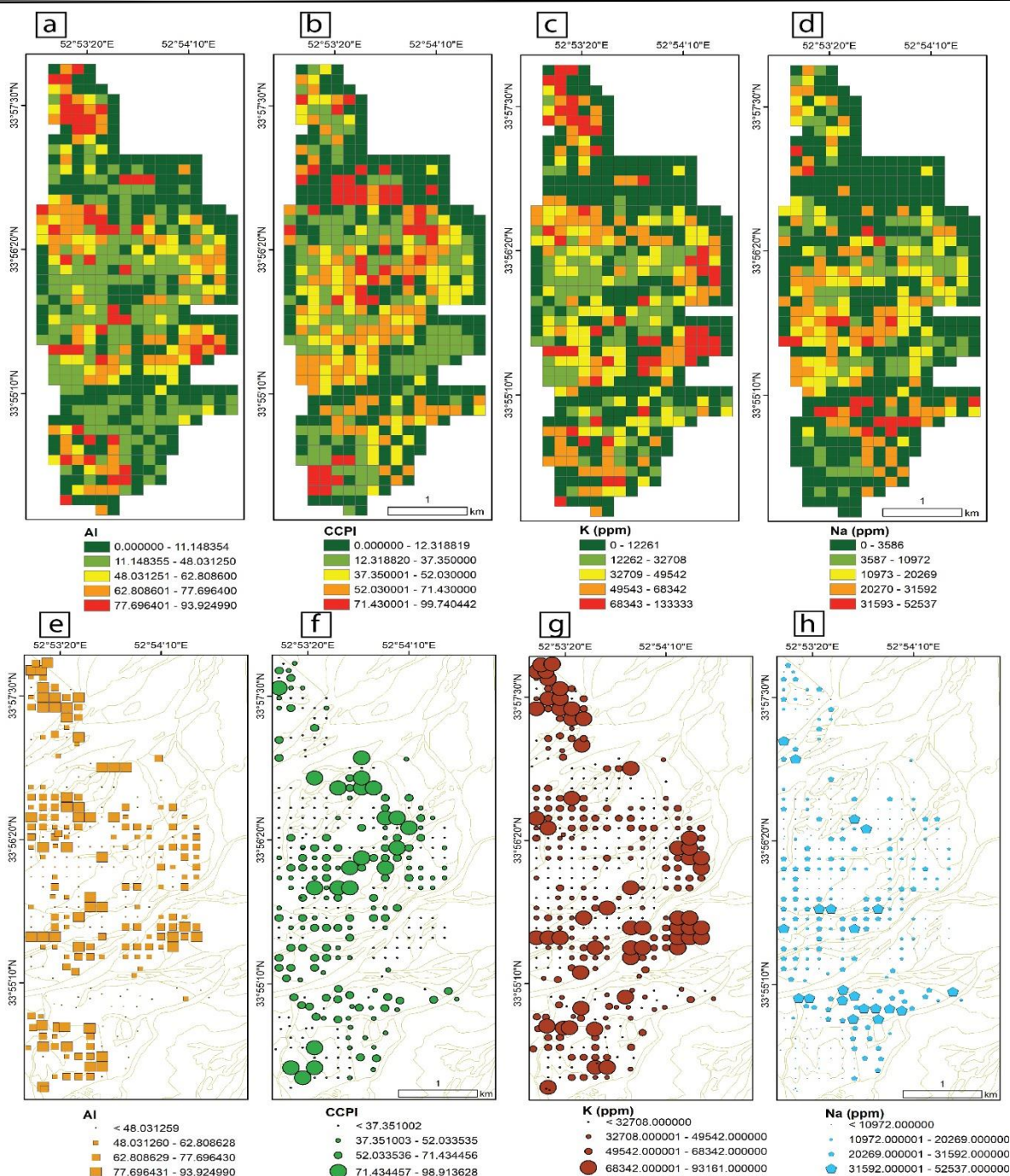
وانادیوم، ساماریوم، باریوم، سریم و قلع الگوهای توزیع مکانی مشخصی را نشان می‌دهند (برخی عناصر نمایش داده نشده است).

ناهنجاری شمال‌باختری: همپوشانی مقادیر بالای شاخص AI با غلظت‌های بالای پتاسیم، طلا، اورانیوم، مولیبدن، تنگستن، آهن، وانادیوم، باریوم و عناصر نادر خاکی با روند گسل اصلی (شمال‌باختر- جنوب‌خاور) همخوانی دارد و با دگرسانی کلریت، کوارتز، کلسیت و تورمالین همپوشانی دارد (شکل‌های ۱۲ تا ۱۴).

ناهنجاری جنوبی: تمرکز عناصر سدیم، آهن و وانادیوم با روند گسل اصلی (خاوری- باختری) همخوانی دارد و بر روی سنگ‌های ایگنمبریت و پیروکلاستیک قرار گرفته‌اند (شکل‌های ۱۲ و ۱۴).

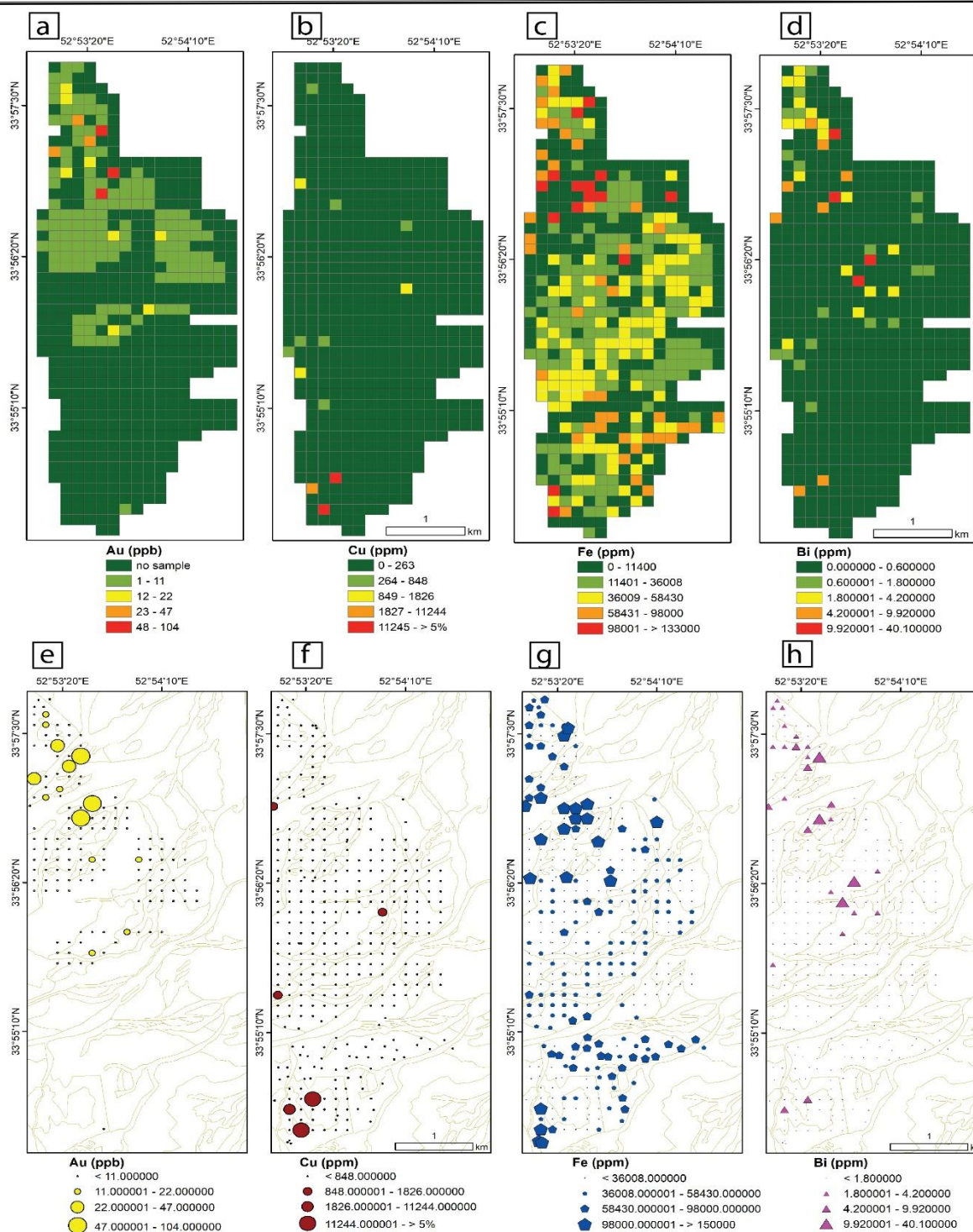
ناهنجاری مرکزی: با شدت ضعیف متمایل به غرب منطقه بوده و رفتار مشابه در ناهنجاری عناصر پتاسیم، سدیم، اورانیوم، آهن، نیکل، وانادیوم، قلع و بیسموت دارد و با دگرسانی ضعیف سریسیت/ایلیت مطابقت دارد. این ناهنجاری با توده‌های نفوذی و سنگ‌های فلسیک آرژیلیکی می‌تواند ارتباط داشته باشد (شکل ۳).

این الگوهای توزیع مکانی به وضوح نشان‌دهنده ارتباط بین انواع دگرسانی و تمرکز عناصر اقتصادی در منطقه مورد مطالعه است. نتایج بیانگر آن است که فرایندهای گرمایی نقش مهمی در کانه‌زایی منطقه ایفا کرده‌اند. توزیع عناصری چون سدیم، پتاسیم، مولیبدنیوم، مس، طلا، اورانیوم و عناصر نادر خاکی بر روی نقشه‌های ژئوشیمیایی پراکندگی عناصر، همراستایی با گسل را نشان می‌دهد. این همراستایی بیانگر نقش قوی کنترل‌کننده ساختاری در تغلیظ عناصر معدنی است.



شکل ۱۲- a-d) نقشه‌های سلولی غلظت عناصر پتاسیم و سدیم بر حسب ppm همراه با نقشه‌های شاخص CIA و CCPI در منطقه شوراب. نقشه‌های حبابی پراکندگی مقادیر e) AI، f) CCPI، g) پتاسیم و h) سدیم به همراه مرزهای واحدهای زمین‌شناسی.

Fig. 12. a-d) Cell-based concentration maps of potassium and sodium (in ppm), along with CIA and CCPI index maps in the Shourab area. Distribution bubble maps of e) AI, f) CCPI, g) potassium, and h) sodium concentrations, overlaid with geological unit boundaries.



شکل ۱۳- a-d) نقشه‌های سلولی غلظت عناصر طلا، مس، آهن و بیسموت در منطقه شوراب. نقشه پراکندگی حبابی مقادیر (e طلا، f مس، g آهن و h بیسموت) به همراه مرزهای واحدهای زمین‌شناسی.

Fig. 13. a-d) Cell-based concentration maps of gold, copper, iron, and bismuth in the Shourab area. Distribution bubble maps of e) gold, f) copper, g) iron, and h) bismuth concentrations overlain on geological unit boundaries.



شکل ۱۴- (a-d) نقشه‌های سلولی غلظت عناصر باریم، اورانیوم، سریم و ساماریوم در منطقه شوراب. نقشه حبابی پراکندگی مقادیر (e) باریم، (f) اورانیوم، (g) سریم و (h) ساماریوم به همراه مرزهای واحدهای زمین‌شناسی.

کنترل سنگ میزبان بر کانی‌شناسی و ترکیب سنگ دگرسان شده

ترکیب شیمیایی اولیه سنگ میزبان و نسبت سیال به سنگ، نقش تعیین‌کننده‌ای در نوع و شدت دگرسانی دارند و نقش بسزایی در توانایی پیش‌بینی محصولات دگرسانی در اکتشاف کانسارها دارد. در منطقه شوراب، دگرسانی کلریتی در سنگ‌های مافیک نسبت به سنگ‌های آتشفشانی فلسیک شدت و گسترش بیشتری دارد که ناشی از عدم تعادل شیمیایی بیشتر سنگ‌های مافیک و سیالات دگرسانی می‌باشد (Berger and Velde, 1992). حضور اندک اپیدوت نیز می‌تواند به دلیل شرایط شیمیایی سیال، از جمله فعالیت بالای CO_2 باشد که مانع از پایداری این کانی در سیستم $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-Fe}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$ می‌شود (Bird and Spieler, 2004). در دگرسانی سدیک-کلسیک، واکنش تبادل یونی بین فلدسپار پتاسیم و آلپیت در حضور سیال کلردار و مسیر حرارتی پیشرونده، نقش اساسی دارد (شکل ۶-b) (Dilles and Einaudi, 1992). این واکنش با کاهش K و افزایش محلی Na در ترکیب سنگ دگرسان شده همراه است. حذف K نیز می‌تواند ناشی از کلریتی شدن بیوتیت باشد، که منجر به آزادسازی پتاسیم و فراهم کردن آن برای تشکیل فلدسپار پتاسیم در مراحل بعدی می‌شود (شکل ۱۲-g، h). به علاوه، آلپیتی شدن معمولاً با حذف عناصر Fe، Cu و Ag همراه است که در دماهای بالا به کمک سیالات کلردار، حلالیت بیشتری دارند (Hemley and Hunt, 1992). همچنین عناصر Ba و Rb در طول آلپیتی شدن از سنگ حذف می‌شوند و استنباط می‌شود که این عناصر در درجه اول از پتاسیم فلدسپار آذرین مشتق شده‌اند (Heier, 1962). این تغییرات شیمیایی در ساز و کار دگرسانی IOCG رایج است (Williams et al., 2005) (جدول ۳). کانی کلسیت تحت تأثیر افزایش pH سیال و گازدایی CO_2 رسوب می‌کند. در مجموعه دگرسانی کلریت-میکای سفید، کانی کلسیت به صورت پرکننده شکستگی‌ها حضور دارد. واکنش‌های هیدرولیز فلدسپار که باعث تولید میکای سفید و کوارتز می‌شوند، یون H^+ مصرف می‌کنند

و در نتیجه موجب افزایش نهشتگی کلسیت می‌شوند. جدایش فازی CO_2 از یک فاز فرار ماگمایی در مراحل نهایی دگرسانی، با حضور کلسیت در سنگ‌های دگرسان شده در اطراف مراکز سامانه‌های ماگمایی-هیدروترمالی همخوانی دارد. منشأ احتمالی Ca برای تشکیل کلسیت می‌تواند Ca آزاد شده از کلریتی شدن هورنبلند در زون‌های پروپلیتیک، Ca حاصل از آلپیتی شدن اپیدوت و Ca آزاد شده از رخساره‌های کلریت-میکای سفید باشد. در طی گذار از دگرسانی‌های دمای بالا (پتاسیک، سدیک-کلسیک) به رخساره‌های دمای پایین (کلریت-میکای سفید، پروپلیتیک)، جدایش فازی CO_2 و رسوب کلسیت افزایش می‌یابد. این تغییرات می‌تواند در نتیجه کاهش فشار و دگرسانی سیالات از منشأ متفاوت رخ دهد (Reed, 1997).

با استفاده از نسبت عناصر نسبتاً بی‌تحرك، چندین گروه سنگی در منطقه شوراب شناسایی شده‌اند که دگرسانی‌های متعددی را تجربه کرده‌اند. مجموعه دگرسانی اصلی کوارتز + بیوتیت + سربست + پیریت نشان‌دهنده ترکیب فلسیک سنگ میزبان است، در حالی که مجموعه‌های فرعی کوارتز + پیریت \pm مسکوویت، ترکیب ریولیتی با غنی‌شدگی در SiO_2 و کاهش نسبی در CaO، Na_2O و K_2O را نشان می‌دهند. شاخص‌های CCPI و AI به خوبی تغییرات دگرسانی را آشکار می‌کنند؛ به طوری که افزایش این شاخص‌ها به سمت مرکز کانی-سازی مشاهده می‌شود (Large et al., 2001) مقادیر بالای AI نشان‌دهنده زون‌های غنی از کلریت است (شکل ۱۲-a).

ارتباط با مدل IOCG

دگرسانی‌های مشاهده شده در شوراب به‌ویژه از نوع کوارتز-کلریت-کربنات، پتاسیک، سدیک-کلسیک با ویژگی‌های شناخته‌شده کانسارهای IOCG تطابق دارند (جدول ۳) (Day et al., 2016; Storey and Smith, 2017; Melfou et al., 2023; Hohl et al., 2024). دگرسانی پتاسیک-آهن که با حضور گسترده فلدسپار پتاسیم، بیوتیت، مگنتیت و همتایت همراه است، مشابه الگوهای رایج در IOCG بوده و می‌تواند تا صدها متر در سنگ‌های دیواره گسترش

غیرعادی عناصر ردیاب IOCG مانند La, Ce, U, Ba, Ag, Au, Cu, Sm, Ni, Co, Mo و W مشاهده شد. با این حال، عناصر Bi و Sb در تمام مجموعه‌ها به صورت غیرتفکیک شده یافت شده‌اند و به تنهایی به عنوان شاخص اختصاصی کانسارهای IOCG در منطقه شوراب قابل استناد نیستند. در مجموع، دگرسانی‌های مختلف منطقه شوراب شامل پتاسیک، سدیک-کلسیک و کوارتز-کلریت-کلسیت، در کنار ژئوشیمی عناصر کمیاب و شاخص‌های دگرسانی، شواهد محکمی برای ارتباط سیستم دگرسانی با نوع IOCG ارائه می‌دهند (Skirrow and Walshe, 2002). ترکیب سنگ میزبان، نقش مهمی در توسعه این دگرسانی‌ها دارد، اما غلظت‌های بالا از عناصر کلیدی و مجموعه‌های کانی‌شناسی خاص، حاکی از تأثیر سیالات گرمایی مرتبط با یک سامانه IOCG پیچیده و چند مرحله‌ای است.

یابند (شکل‌های ۱۲-g و ۱۳-g). اگرچه در نواحی دورتر از نهشته، افتراق بین دگرسانی پتاسیک حاصل از فرایندهای ماگمایی اولیه و گرمایی IOCG دشوار است، اما ترکیب عناصر کمیاب و شاخص‌های دگرسانی به تمایز این دو کمک می‌کند. دگرسانی پروپلیتیک که با قرمزی موضعی، اکسید شدن مگنتیت و حضور کلسیت همراه است، نیز یکی از ویژگی‌های جانبی IOCG محسوب می‌شود. نقش سیالات کلردار در آزادسازی فلزات از سنگ‌های مافییک و دگرسانی آلبیتی-کلریتی، شباهت زیادی با فرایندهای اولیه در سیستم‌های IOCG دارد. در شوراب، دگرسانی کلریت، کوارتز و کلسیت به همراه مقدار اندکی سربیسیت، شرایط سیال با pH خنثی تا کمی اسیدی را در زمان کانی‌سازی نشان می‌دهد، که با مدل‌های شناخته شده IOCG تطابق دارد. در نمونه‌های شوراب، غنی‌شدگی

جدول ۳- مقایسه یافته‌های این پژوهش با کانسارهای نوع IOCG

Table 3. Comparison of the findings of this study with typical IOCG-type deposits.

ویژگی	کانسار شوراب	سامانه‌های IOCG
سنگ میزبان	سنگ‌های آتشفشانی و توده‌های نفوذی اسیدی تا حدواسط	سنگ‌های ولکانیکی حدواسط تا اسیدی توده‌های نفوذی اسیدی
دگرسانی غالب	کلریتی، پتاسیک-اکسید آهن، سدیک-کلسیک، سربیسیتی	سدیک-کلسیک، پتاسیک-اکسید آهن و کلسیک
کانی‌های دگرسانی شاخص	آلکالی‌فلدسپار، آلبیت، کلریت، آمفیبول، تورمالین، مگنتیت و هماتیت	آلبیت، کلریت، بیوتیت، آمفیبول، مگنتیت و هماتیت
الگوی دگرسانی	زونال با تمرکز بر حاشیه گسل‌ها	زونال یا لکه‌ای با تمرکز بر ساختارها
نوع کانه‌زایی مرتبط	طلا، اکسید آهن	مس، طلا، اورانیوم و عناصر نادر خاکی
شواهد ژئوشیمیایی	غنی‌شدگی REE, K, Fe و نسبت بالای K/Th	غنی‌شدگی REE, Fe و نسبت بالای K/Th
دمای تشکیل تخمینی	دمای بالا تا متوسط	Ce/LREE دمای بالا تا متوسط

توزیع مکانی و کانی‌شناسی مجموعه‌های دگرسانی شامل کلریت، آلبیت، فلدسپار پتاسیم، مسکویت، اپیدوت و کلسیت، نشانگر برهم‌کنش پیچیده بین سیالات حاوی کلر و سنگ‌های آتشفشانی

نتیجه‌گیری

بررسی دگرسانی‌های گرمایی در منطقه شوراب نشان می‌دهد که ترکیب اولیه سنگ میزبان و ویژگی‌های شیمیایی سیالات معدنی نقش تعیین‌کننده‌ای در نوع، شدت و گسترش زون‌های دگرسانی داشته‌اند.

بازتاب‌دهنده درجه بالای دگرسانی در سنگ‌های میزبان فلسیک است. همچنین، وجود مجموعه‌های دگرسانی پتاسیک در کنار زون‌های غنی از اکسید آهن (مگنتیت \pm هماتیت) نشان می‌دهد که فرایند دگرسانی پتاسیک با کانی‌سازی مس-طلا مرتبط بوده‌اند؛ الگویی که به خوبی با مدل‌های شناخته‌شده IOCG به‌ویژه در نهشته‌های پروتروزوییک استرالیا همخوانی دارد (Kreiner and Barton, 2017). در نهایت، داده‌های کانی‌شناسی، ژئوشیمیایی و ساختاری در منطقه شوراب، شواهد قوی از دگرسانی چندمرحله‌ای و منشأ سیالات چندگانه را ارائه می‌دهند که از نظر ویژگی‌های زمین‌شیمیایی، شباهت زیادی با سامانه‌های IOCG دارند. بنابراین، منطقه شوراب می‌تواند به عنوان یک هدف بالقوه برای اکتشاف ذخایر IOCG با کانی‌سازی طلا \pm مس مورد توجه قرار گیرد.

References

- Berger, G., Velde, B., 1992. Chemical parameters controlling the propylitic and argillic alteration process. *European Journal of Mineralogy* 4(6), 1439-1454.
- Bird, D.K., Spieler, A.R., 2004. Epidote in geothermal systems. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry* 56(1), 235-300.
- Buschette, M.J., Piercey, S.J., 2016. Hydrothermal alteration and lithogeochemistry of the Boundary volcanogenic massive sulphide deposit, central Newfoundland, Canada: *Canadian Journal of Earth Sciences* 53, 506-527.
- Byrne, K., Lesage, G., Gleeson, S.A., Piercey, S.J., Lypaczewski, P., Kyser, K., 2020. Linking mineralogy to lithogeochemistry in the Highland Valley Copper district: Implications for porphyry copper footprints. *Economic Geology* 115(4), 871-901.
- Carranza, E.J.M., 2009. Geochemical anomaly and mineral prospectivity mapping in GIS. *Handbook of Exploration and Environmental Geochemistry* 11, Elsevier, 368 p.
- Choquette, B., Kontak, D.J., 2023. Geologic and Geochemical Features of the World-Class Archean Windfall Intrusion-Related Au Deposit, Abitibi Subprovince, Canada. *Economic Geology* 118(5), 999-1029.
- Day, W.C., Slack, J.F., Ayuso, R.A., Seeger, C.M., 2016. Regional geologic and petrologic framework for iron oxide \pm apatite \pm rare earth element and iron oxide copper-

فلسیک و مافیک در طی مسیرهای حرارتی پیشرونده بوده و با ویژگی‌های کلاسیک سیستم‌های IOCG همخوانی دارد. واکنش‌های کلیدی مانند جایگزینی فلدسپار پتاسیم با آلبیت، کلریتی-شدن بیوتیت و دگرسانی پروپیلیتیک مگنتیت به هماتیت، نشانگر محیط دگرسانی با pH نسبتاً خنثی تا کمی اسیدی و غنی از کلر هستند که معمولاً در مراحل گذار از رخساره‌های دمای بالا به رخساره‌های دمای پایین‌تر در سامانه‌های IOCG مشاهده می‌شوند. علاوه بر آن، حضور گسترده کلریت و کلسیت، همراه با آلبیت و کمتر اپیدوت، تأییدکننده‌ی نقش سیالات متنوع و نیز انتقال عناصر فلزی مانند Cu, Fe, Ag و همچنین عناصر فرعی As و Co است. شاخص‌های ژئوشیمیایی CCPI و AI، به‌ویژه در زون‌های نزدیک به مرکز کانی‌سازی، تغییرات قابل‌توجهی را نشان می‌دهند که

- gold deposits of the Mesoproterozoic St. Francois Mountains terrane, southeast Missouri, USA. *Economic Geology* 111(8), 1825-1858.
- Dilles, J.H., Einaudi, M.T., 1992. Wall-rock alteration and hydrothermal flow paths about the Ann-Mason porphyry copper deposit, Nevada; a 6-km vertical reconstruction. *Economic Geology* 87(8), 1963-2001.
- Ebrahimi Fard, H., Ghasemi Siani, M., Tabbakh Shabani, A., Nazarian, M., Karimi Shahraki, B., 2022. Mineralogy and mineral chemistry of alteration zone in order to determine the tectonic settings and mineralization characteristics in the Choreh-Nab iron deposit (Western Alborz). *Kharazmi Journal of Earth Sciences* 8 (2), 164-211
- Fabris, A.J., van der Wielen, S., Keeping, T., Gordon, G., 2015. Geochemical footprints of IOCG deposits beneath thick cover: insights from the Olympic Cu-Au Province, South Australia. In 27th International Geochemical Exploration Symposium, Tucson, Arizona USA.
- Farangi, S., 2022. Investigation of formation and origin of mineralizing fluids in the Shourab Cu-Fe district, northeast of Ardestan., Msc. Thesis, University of Isfahan, Isfahan, Iran.
- Farangi, S., Ahmadirouhani R., Alaminia Z., 2021. Investigation of iron occurrence using Landsat 8, ASTAR and Sentinel 2 satellites remote sensing techniques in the NE Zavareh, Isfahan. The 13th national conference and the

- first international conference of the Economic Geology association of Iran, Lorestan university (in Persian).
- Farangi, S., Alaminia Z., Vahedi M., Sadeghisorkhani H., 2023. Investigation of iron occurrence by geophysics, geochemistry, and tectonic setting of granitoids of the East of Kuh-e Dom, Central Iran, *Scientific Quarterly Journal of Geosciences* 33(2), 1-24. doi: 10.22071/gsj.2023.361759.2032.
- Fedo, C.M., Wayne Nesbitt, H., Young, G.M., 1995. Unraveling the effects of potassium metasomatism in sedimentary rocks and paleosols, with implications for paleoweathering conditions and provenance. *Geology* 23(10), 921-924.
- Graham, I.J., Cole, J.W., Briggs, R.M., Gamble, J.A., Smith, I.E.M., 1995. Petrology and petrogenesis of volcanic rocks from Taupo volcanic zone: A general overview: *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 68, 59-88.
- Grant, J.A., 1986, The isocon diagram; a simple solution to Gresens' equation for metasomatic alteration: *Economic Geology* 81, 1976-1982
- Hashiguchi, H., 1983. Practical application of low Na₂O anomalies in footwall acid lava for delimiting promising areas around the Kosaka and Fukazawa kuroko deposits, Akita Prefecture, Japan, in *Kuroko and related volcanic massive sulphide deposits. Economic Geology Monograph* 5, 387-394.
- Hawkes, H.E., Webb, J.S., 1962. *Geochemistry in mineral exploration.*
- Heier, K.S., 1962. Trace elements in feldspars—a review. *Norsk Geologisk Tidsskrift* 42(2), 415-454.
- Hemley, J.J., Hunt, J.P., 1992. Hydrothermal ore-forming processes in the light of studies in rock-buffered systems; II, Some general geologic applications: *Economic Geology* 87, 23-43.
- Hohl, M., Steadman, J.A., Cloutier, J., Cooke, D.R., 2024. Paragenetic and geological setting of the Starra iron oxide copper-gold deposits, Mount Isa Inlier, Queensland, Australia: constraints on IOCG deposit models. *Australian Journal of Earth Sciences* 71(4), 513-537.
- Hokka, J., Leväniemi, H., Leskelä, T., 2024. Hydrothermal alteration and geochemical proximity indicators to ore at the Metsämönttu Zn-Pb-Cu-Au-Ag deposit, Uusimaa belt, southern Finland. *Journal of Geochemical Exploration* 262, 107491.
- Ishikawa, Y., Sawaguchi, T., Iwaya, S., Horiuchi, M., 1976. Delineation of prospecting targets for Kuroko deposits based on modes of volcanism of underlying dacite and alteration haloes. *Mining geology* 26(136), 105-117.
- Kananian, A., Sarjoughian F., Ahmadian J., 2011. Effective Processes in Evolution of Kuh-e Dom Plutonism, NE Ardestan, the using of Geochemical and Isotopic Evidence, *Scientific Quarterly Journal of Geosciences* 21(81), 191-200. doi: 10.22071/gsj.2011.54383.
- Kananian, A., Sarjoughian F., Nadimi A., Ahmadian J., Ling W., 2014. Geochemical characteristics of the Kuh-e Dom intrusion, Urumieh-Dokhtar Magmatic Arc (Iran): Implications for source regions and magmatic evolution. *Journal of Asian Earth Sciences* 90, 137-148. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2014.04.026>.
- Kreiner, D. C., Barton, M. D., 2017. Sulfur-poor intense acid hydrothermal alteration: A distinctive hydrothermal environment. *Ore Geology Reviews* 88, 174-187.
- Large, R.R., 2025. Simple graphical tools to understand the relationship between porphyry composition, hydrothermal alteration, mineralogy and copper-gold grades in porphyry copper deposits. *Ore Geology Reviews* 106581.
- Large, R.R., Bull, S.W., Maslennikov, V.V., 2011. A carbonaceous sedimentary source-rock model for Carlin-type and orogenic gold deposits. *Economic Geology* 106(3), 331-358.
- Large, R.R., Gemmell, J.B., Paulick, H., Huston, D.L., 2001. The alteration box plot: A simple approach to understanding the relationship between alteration mineralogy and litho-geochemistry associated with volcanic-hosted massive sulfide deposits. *Economic geology* 96(5), 957-971.
- Mehrabi, B., Tale Fazel, E., Tabbakh Shabani, A., 2014, Whole Rock Geochemical Techniques for Discrimination of Hydrothermal Alteration of the Kuh-e Dom Fe-Cu (\pm Au) prospect, Central Iran. *Advanced Applied Geology* 4(1), 58-74
- Melfou, M., Richard, A., Tarantola, A., Villeneuve, J., Carr, P., Peiffert, C., Mercadier, J., Dean, B., Drejning-Carroll, D., 2023. Tracking the origin of metasomatic and ore-forming fluids in IOCG deposits through apatite geochemistry (Nautanen North deposit, Norrbotten, Sweden). *Lithos* 438, 106995.
- Nesbitt, H.W., Young, G.M., 1984. Prediction of some weathering trends of plutonic and volcanic rocks based on thermodynamic and kinetic considerations. *Geochimica et cosmochimica acta* 48(7), 1523-1534.

- Pearce, J.A., 1996. A user's guide to basalt discrimination diagrams: Geological Association of Canada, Short Course Notes 12, 79–113.
- Reed, M.H., 1997. Hydrothermal alteration and its relationship to ore fluid composition, in Barnes, H.L., ed., *Geochemistry of hydrothermal ore deposits*: New York, Wiley, 303–365.
- Romanko, E., Kokorin, Y.U., Krivyakin, B., Susov, M., Morozov, L., Sharkovski, M., 1984. Outline of metallogeny of Anarak area (Central Iran): Technoexport. Report. TE/No. 19, 143 p.
- Sadeghi, B., Cohen, D., Müller, D., 2022. May. Improved decision-making in geochemical sampling based on both frequency and Bayesian frameworks. In EGU General Assembly Conference Abstracts (pp. EGU22-14).
- Saeki, Y., Date, J., 1980. Computer application to the alteration data of the footwall dacite lava at the Ezuri Kuroko deposits, Akita prefecture. *Mining Geology* 30(162), 241-250.
- Saleh, M., 2024. Evaluation of Jenks natural Breaks clustering algorithm for Changepoint identification in streaming sensor data. *IEEE Sensors Letters*.
- Sarjoughian, F., Kananian, A., Ahmadian, J., 2014. Compositional Zoning in Feldspars of the Kuh-e Dom Intrusive Rocks, *Scientific Quarterly Journal of Geosciences* 24(93), 133-146. doi:10.22071/gsj.2014.43554.
- Sarjoughian, F., Kananian, A., Ahmadian, J., Murata, M., 2015a. Chemical composition of biotite from the Kuh-e Dom pluton, Central Iran: implication for granitoid magmatism and related Cu–Au mineralization. *Arabian Journal of Geosciences* 8, 1521-1533. <https://doi.org/10.1007/s12517-013-1242-5>.
- Sarjoughian, F., Kananian, A., Esna-Ashari, A., Ahmadian, J., 2015b. U-Pb Zircon Dating of Kuh-e Dom Intrusion, its Dikes and Enclaves, *Scientific Quarterly Journal of Geosciences* 24(95), 145-154. doi: 10.22071/gsj.2015.42422.
- Shahzeydi, M., Moayyed, M., Moazzen, M., Ahmadian, J., 2008. Mineralogy, thermobarometry and magmatic series of volcanic rocks in Kuh-e Dom, Ardestan. *Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy* 16(3), 485-504. (In Persian). <http://ijcm.ir/article-1-630-fa.html>.
- Sharkovski, M., Filichev, I., Selivanov, E., 1981. Geological map of Kuh-e Dom, scale 1:100000. Geological Survey of Iran.
- Shuguang, Z., Kefa, Z., Yao, C., Jinlin, W., Jianli, D., 2015. Exploratory data analysis and singularity mapping in geochemical anomaly identification in Karamay, Xinjiang, China. *Journal of Geochemical Exploration* 154, 171-179.
- Skirrow, R.G., Walshe, J.L., 2002. Reduced and oxidized Au-Cu-Bi iron oxide deposits of the Tennant Creek inlier, Australia: An integrated geologic and chemical model. *Economic Geology* 97(6), 1167-1202.
- Stanley, C.R., Madeisky, H.E., Lentz, D.R., 1994. Lithochemical exploration for hydrothermal ore deposits using Pearce element ratio analysis. Alteration and alteration processes associated with oreforming systems. Geological Association of Canada, Short Course Handbook 11, 193-211.
- Storey, C.D., Smith, M.P., 2017. Metal source and tectonic setting of iron oxide-copper-gold (IOCG) deposits: Evidence from an in situ Nd isotope study of titanite from Norrbotten, Sweden. *Ore Geology Reviews* 81, 1287-1302.
- Tale Fazel, E., 2014. The tectonomagmatic setting and ore-forming fluid composition of Kuh-e Dom Fe(±Cu-Au-Bi-Ag) prospect, Anarak metallogenic complex. PhD thesis in Kharazmi university of Tehran. (in Persian)
- Tale Fazel, E., Mehrabi, B., Tabbakh Shabani, A.A., 2015. Kuh-e Dom Fe–Cu–Au prospect, Anarak metallogenic complex, Central Iran: a geological, mineralogical and fluid inclusion study. *Mineralogy and Petrology* 109(1), 115-141, <http://doi:10.1007/s00710-014-0354-2>.
- Voicu, G., Bardoux, M., Jébrak, M., Voicu, D., 1996. Normative mineralogical calculations for tropical weathering profiles. Geological Association of Canada and Mineral Association of Canadian Program with Abstract 21.
- Warren, I., Simmons, S.F., Mauk, J.L., 2007. Whole-rock geochemical techniques for evaluating hydrothermal alteration, mass changes, and compositional gradients associated with epithermal Au-Ag mineralization. *Economic Geology* 102(5), 923-948.
- Williams, P.J., Barton, M.D., Johnson, D.A., Fontboté, L., De Haller, A., Mark, G., Oliver, N.H., Marschik, R., 2005. Iron oxide copper-gold deposits: Geology, space-time distribution, and possible modes.