

Geochemical halos of gold and associated elements in Nabijan gold index (SW Kaleibar, NW Iran)

Hemayat Jamali ^{1*}, Tayyebah Mahmoodabadipour ¹ and Hassan Shokohi ²

¹ Department of Geology, Faculty of Science, University of Isfahan, Isfahan, Iran

² Geological Survey and Mineral Exploration, Northwestern Center, Tabriz, Iran

Abstract

The Nabijan ore index located 20 km southwest of Kaleibar city, East Azerbaijan province in the Alborz-Azerbaijan structural zone. Geological rock units outcropping in the area consist of volcano-sedimentary rocks (trachyandesite, andesite, shale and limestone) of the Cretaceous age which intruded by the Oligo-Miocene monzogranite, monzogranodiorite and diorite. These intrusions and related hydrothermal activities caused the Au mineralization in the Cretaceous host rocks, as well as in the monzogranitic intrusion. The mineralization in the monzogranite occurred as silicic stockwork and sheeted veins with pyrite and minor chalcopyrite, sphalerite and galena. The other type of mineralization is skarn, which present as sparse irregular veinlets with less amount of Au in the Cretaceous carbonates. Preliminary estimation of ore reserve shows 320000t reservoir with average of Au grade about 1.37 gr/ton. According to surface and drilling data, two important anomalies determined. One in the contact zone of intrusive rocks with the Cretaceous volcanics and carbonates (skarn zone). In this anomaly, the correlation coefficient index between Au and Cu, Pb, Zn, Ag, and As is low whereas, in the second one which coincides with stockwork mineralization within monzogranite, it is high.

Key words: Geochemical Halos, Gold, Skarn, Stockwork, Nabijan, Northwest of Iran

* h.jamali@sci.ui.ac.ir

پتسرولوژی، سال هشتم، شماره سی ام، تابستان ۱۳۹۶، صفحه ۱۳۹-۱۵۶
تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۸/۲۲ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۱۰/۱۴

هاله‌های زمین‌شیمیایی طلا و عنصرهای همراه در کانسار طلای نبی‌جان (جنوب‌باختری کلیبر، شمال‌باختری ایران)

حمایت جمالی^{۱*}، طیبه محمودآبادی‌پور^۱ و حسن شکوهی^۲
^۱ گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران
^۲ سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی، مرکز شمال‌غرب، تبریز، ایران

چکیده

نشانه معدنی نبی‌جان در ۲۰ کیلومتری جنوب‌باختری شهر کلیبر (استان آذربایجان شرقی) و در پهنه ساختاری البرز - آذربایجان واقع شده است. واحدهای زمین‌شناسی منطقه مجموعه‌ای از سنگ‌های آتشفشانی (تراکی آندزیت تا آندزیت) و رسوبی (شیل و سنگ‌آهک) کرتاسه هستند و توده مونزوگرنیتی، مونزوگرنودیوریتی و دیوریتی نبی‌جان (به سن الیگوسن) درون این سنگ‌ها نفوذ کرده‌اند. در پی نفوذ این توده‌ها و فرایندهای گرمایی، کانه‌زایی طلا در واحدهای کرتاسه و خود توده‌های نفوذی روی داده است. کانه‌زایی در منطقه نبی‌جان بیشتر به صورت رگه-رگچه‌های استوک‌ورک تا صفحه‌ای از کوارتز، همراه با پیریت و اندکی کالکوپیریت، اسفالریت و گالن، در توده مونزوگرنیتی است. گروه دیگر کانه‌زایی از نوع اسکارنی بوده و به صورت رگه-رگچه‌های نامنظم با تراکم کم و عیار کم، در سنگ‌های کربناته کرتاسه روی داده است. بررسی‌های نخستین برای برآورد اندوخته طلا برپایه حفاری‌های انجام‌شده در این گستره، نشان‌دهنده اندوخته سنگ معدنی ۳۲۰۰۰۰ تنی با عیار میانگین برابر ۱/۳۷ گرم در تن طلاست. برپایه حفاری‌های انجام‌شده، دو ناهنجاری مهم طلا در گستره پیچویی شده دیده می‌شود. نخستین ناهنجاری طلا پیامد نزدیکی توده با سنگ‌های رسوبی - آتشفشانی کرتاسه و پهنه اسکارنی است. در این نوع کانه‌زایی همبستگی طلا با عنصرهای مس، سرب، روی، نقره و آرسنیک کم است. ناهنجاری دوم با کانی‌سازی رگچه‌ای در توده مونزوگرنیتی همخوانی دارد که در آن، طلا با عنصرهای مس، سرب، روی، نقره و آرسنیک همبستگی بالاتری دارد.

واژه‌های کلیدی: هاله‌های زمین‌شیمیایی، طلا، اسکارن، استوک‌ورک، نبی‌جان، شمال‌باختری ایران

مقدمه

اکتشافی و راهنمایی برای شناسایی مناطق دارای توان

معدنی کاربرد دارند (Kylie, 2007). انجام بررسی‌های

زمین‌شیمیایی از ابزارهای اکتشافی است که با کمک

پیچویی‌های زمین‌شیمیایی از روش‌های یافتن

اندوخته‌های معدنی است که در بهینه‌سازی هزینه‌های

* h.jamali@sci.ui.ac.ir

Copyright©2017, University of Isfahan. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0>), which permits others to download this work and share it with others as long as they credit it, but they cannot change it in any way or use it commercially.

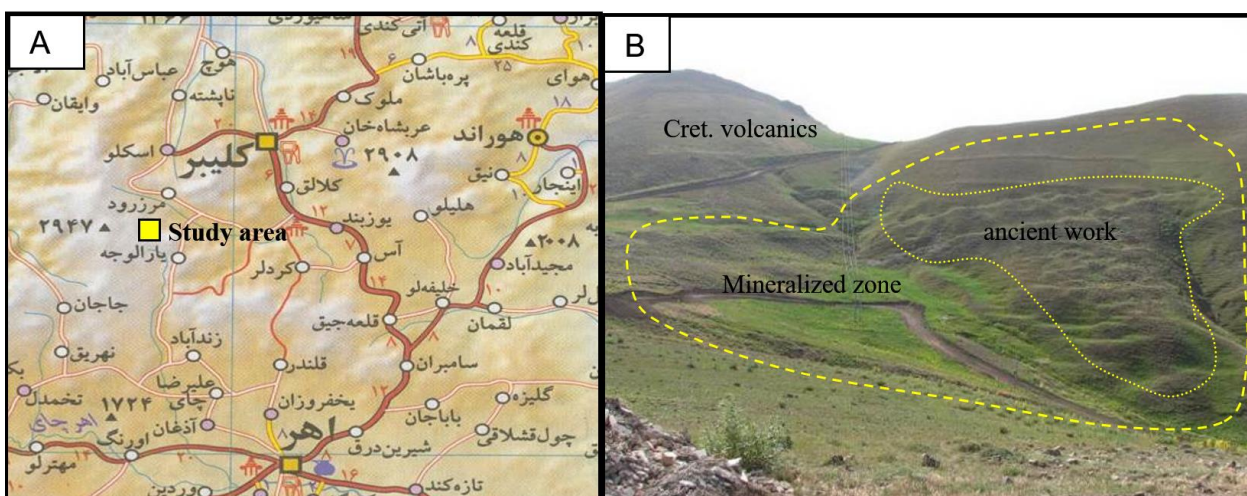
مجموعه آتشفشانی- نفوذی سنوزوییک رخنمون پیدا کرده‌اند. مجموعه سنوزوییک دارای توان بالای کانی‌سازی‌های مس، طلا و مولیبدن بوده و کانسارهایی از نوع پورفیری، اسکارن و اپی‌ترمال در آن شناسایی شده‌اند (Aghazadeh *et al.*, 2011; Jamali, 2012; Richards and Sholeh, 2016). از دیدگاه زمین‌شناسی، سنگ‌های دگرگون‌شده (اسلیت، فیلیت، شیست‌های سبز، آمفیبولیت و متاولکانیک) کلیبر، با سن پیش از ژوراسیک، از کهن‌ترین سنگ‌های پهنه فلززایی ارسباران هستند. رخنمون این سنگ‌ها در شمال شهر کلیبر به صورت تاقدیسی با روند خاوری- باختری است. بیشتر سنگ‌های کرتاسه از رخساره‌های کربناته، همراه با سنگ‌های آتشفشانی هستند. بخش بزرگی از سنگ‌های تشریری از نوع سنگ‌های آذرین درونی و بیرونی است. این سنگ‌ها در پهنه فلززایی ارسباران گسترش بالایی دارند. یک واحد ماسه‌سنگی و یک واحد آهکی (که با ناپیوستگی هم‌شیب روی واحدهای کهن‌تر جای گرفته‌اند) از سنگ‌های پالئوسن هستند. بخش بزرگی از نهشته‌ها و رخساره‌های ائوسن از سنگ‌های آتشفشانی، آذرآواری‌ها و ماسه‌سنگ‌های با سیمان کربناته ساخته شده‌اند. بیشتر توده‌های نفوذی این ناحیه به سن الیگو- میوسن هستند. این گونه فعالیت‌های ماگمایی که در کانه‌زایی منطقه نقش بیشتر و مهمی داشته‌اند، به صورت سنگ‌های آذرین نفوذی، نیمه‌نفوذی و آتشفشانی، همراه با دگرسانی هستند. این سنگ‌ها در پهنه‌ای به درازای ۲۰۰ کیلومتر و پهنای ۳۰ کیلومتر با راستای روند خاوری- باختری رخنمون پیدا کرده و ارتفاعات کمابیش بلندی را پدید آورده‌اند. این ارتفاعات که به نام پهنه ارسباران شناخته می‌شوند (Mehrpartou *et al.*, 1992; Mehrpartou and Khannazer, 1999)، پیامد فرورانش پوسته اقیانوسی نئوتتیس به زیر ایران هستند (Azadi *et al.*, 2015).

آن، پراکندگی و فراوانی عنصرهای اصلی، فرعی و کمیاب در توده‌های سنگی بررسی شده و بی‌هنجاری‌ها شناخته می‌شوند. بررسی ترکیب و پراکندگی هاله‌های زمین‌شیمیایی نخستین، در پیجویی کانی‌سازی‌های پنهان سودمند است (Venkataraman *et al.*, 2000).

در این مقاله، با بررسی تغییرات ژرفایی و سطحی هاله‌های عنصرهای گوناگون و روابط ژنتیکی میان عنصرها، تلاش شده است تا نوع کانی‌سازی‌ها (رگچه‌ای در توده نفوذی و اسکارنی در سنگ‌های مجاور) شناسایی شود. در این راستا، بررسی‌های آماری داده‌های زمین‌شیمیایی برپایه روش‌های آماری تک‌متغیره و چندمتغیره (مانند: تجزیه و تحلیل خوشه‌ای و تجزیه و تحلیل مولفه‌های اصلی) به کار برده شدند. هدف از بررسی‌های انجام‌شده، شناسایی ناهنجاری‌های طلا و عنصرهای همراه، ارزیابی مقدار آنها در سنگ‌های گوناگون و همچنین، ارزیابی وابستگی و همبستگی میان عنصرها در زمینه شناسایی نوع کانی‌سازی در منطقه است.

زمین‌شناسی عمومی

کانسار طلای نبی‌جان در ۲۰ کیلومتری جنوب‌باختری شهر کلیبر (در طول جغرافیایی خاوری ۴۸°۴۶' تا ۴۷°۳' و عرض جغرافیایی شمالی ۳۸°۴۶' تا ۳۸°۴۵') جای دارد (شکل ۱). بررسی‌های نخستین برای برآورد اندوخته طلا برپایه حفاری‌های انجام‌شده در این گستره، نشان‌دهنده اندوخته سنگ معدنی ۳۲۰۰۰۰ تنی با عیار میانگین ۱,۳۷ گرم در تن طلاست (Shokohi, 2004). در پهنه‌بندی‌های زمین‌شناسی و ساختمانی ایران، این منطقه در پهنه البرز باختری- آذربایجان و پهنه فلززایی ارسباران جای دارد. در پهنه فلززایی ارسباران، سنگ‌های دگرگونی با سن پیش از ژوراسیک، واحدهای رسوبی- آتشفشانی کرتاسه پسین و



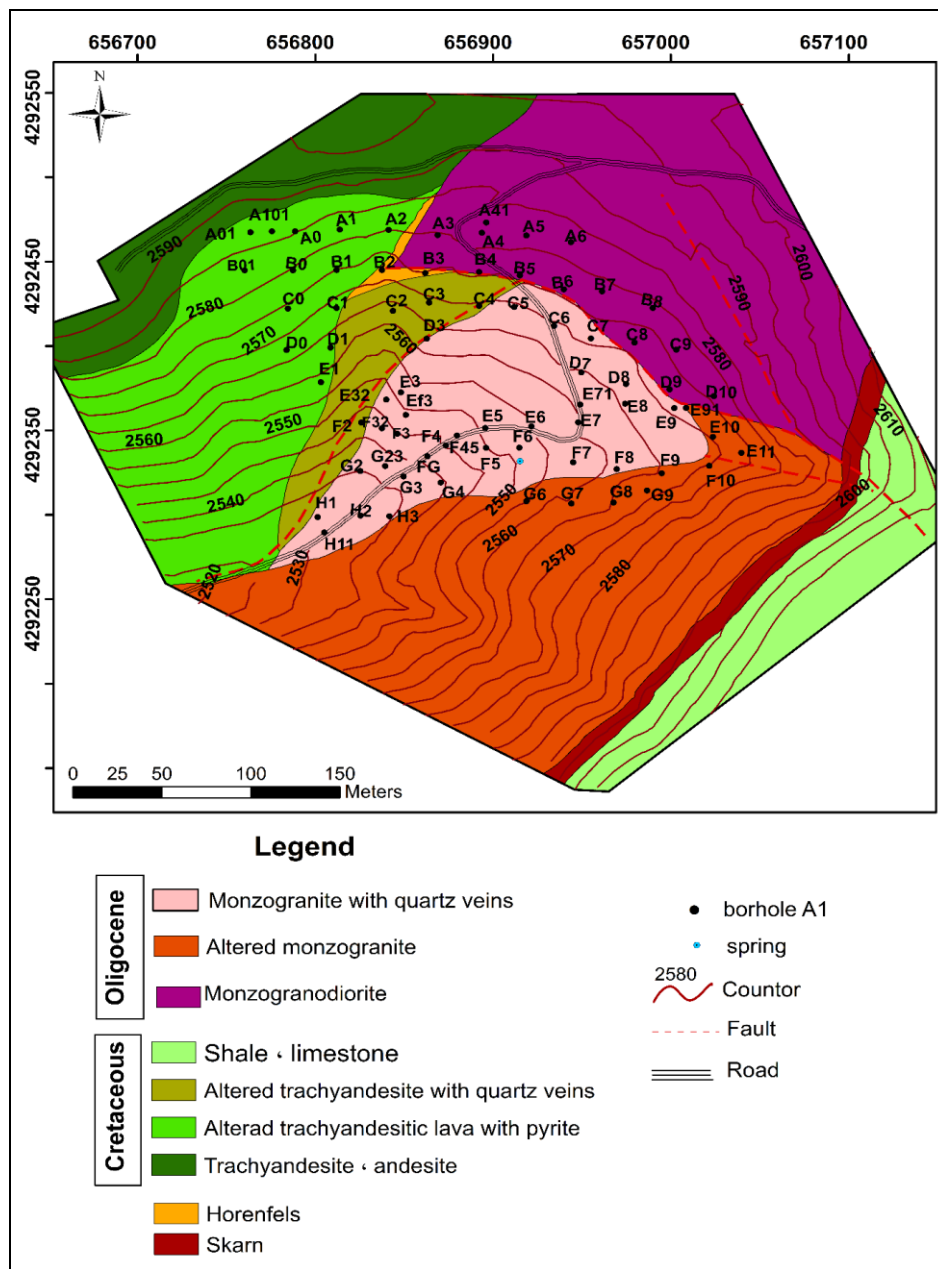
شکل ۱- A) جایگاه جغرافیایی و راه‌های دسترسی به محدوده پیجویی شده کانسار طلای نبی‌جان (جنوب‌باختری کلیبر)؛ B) نمایی از محدوده پیجویی شده (دید رو به جنوب‌خاوری) (به نشانه‌های معدنکاری‌های پیشین توجه شود)

زمین‌شناسی محدوده کانسار

گدازه‌های تراکی‌آندزیتی کرتاسه در شمال و شمال‌باختری از واحدهای سنگی محدوده کانسار نبی‌جان (شکل ۲) هستند. این سنگ‌ها با واحدهای رسوبی (شیل و آهک) کرتاسه پوشیده شده‌اند. گدازه‌های کرتاسه در بخش باختری محدوده پیجویی شده بسیار دگرسان شده‌اند و مقدار بالایی کانی پیریت دارند. این پیریت‌ها در سطح بسیار اکسیده شده و رنگ این گدازه‌ها را (به‌ویژه در سطح) به سرخ تا قهوه‌ای تغییر داده‌اند. این تغییر رنگ که پیامد هوازدگی است، در مغزه‌های حفاری از سطح به ژرفا نیز دیده می‌شود. گدازه‌های کرتاسه در محل برخورد با توده آذرین، در مرکز محدوده اکتشافی، دارای رگچه‌های فراوان کوارتز و آنومالی‌هایی از مس (به‌صورت ملاکیت و آزوریت در سطح و کالکوپیریت در ژرفا) هستند. شیل‌های کرتاسه (مجموعه‌ای از سنگ‌های شیل، مارن و سنگ‌آهک) در جنوب‌خاوری نقشه ۱:۱۰۰۰، به‌صورت محدود، رخنمون دارند. مرز این واحد با توده نفوذی الیگوسن (با ترکیب مونزوگرنایت تا مونزوگرانودیوریت) به‌صورت پهنه اسکارنی درآمده است. این پهنه اسکارنی

شامل کانی‌های گارنت، پیروکسن، اپیدوت، کلریت، کلسیت و کوارتز همراه با مقداری مگنتیت، پیریت، کالکوپیریت، اسفالریت و گالن است. بخش بزرگی از منطقه پیجویی، توده نفوذی مونزوگرنایتی نبی‌جان است که سنگ میزبان کانی‌سازی بوده و محلول‌های گرمایی آن را بسیار دگرسان کرده‌اند. این توده دارای رگچه‌های فراوان کوارتز و کانی‌های سولفیدی (مانند: پیریت و کالکوپیریت) است و در بخش جنوبی محدوده، این توده بسیار هوازده و آرنیتی شده است (Shokohi, 2004).

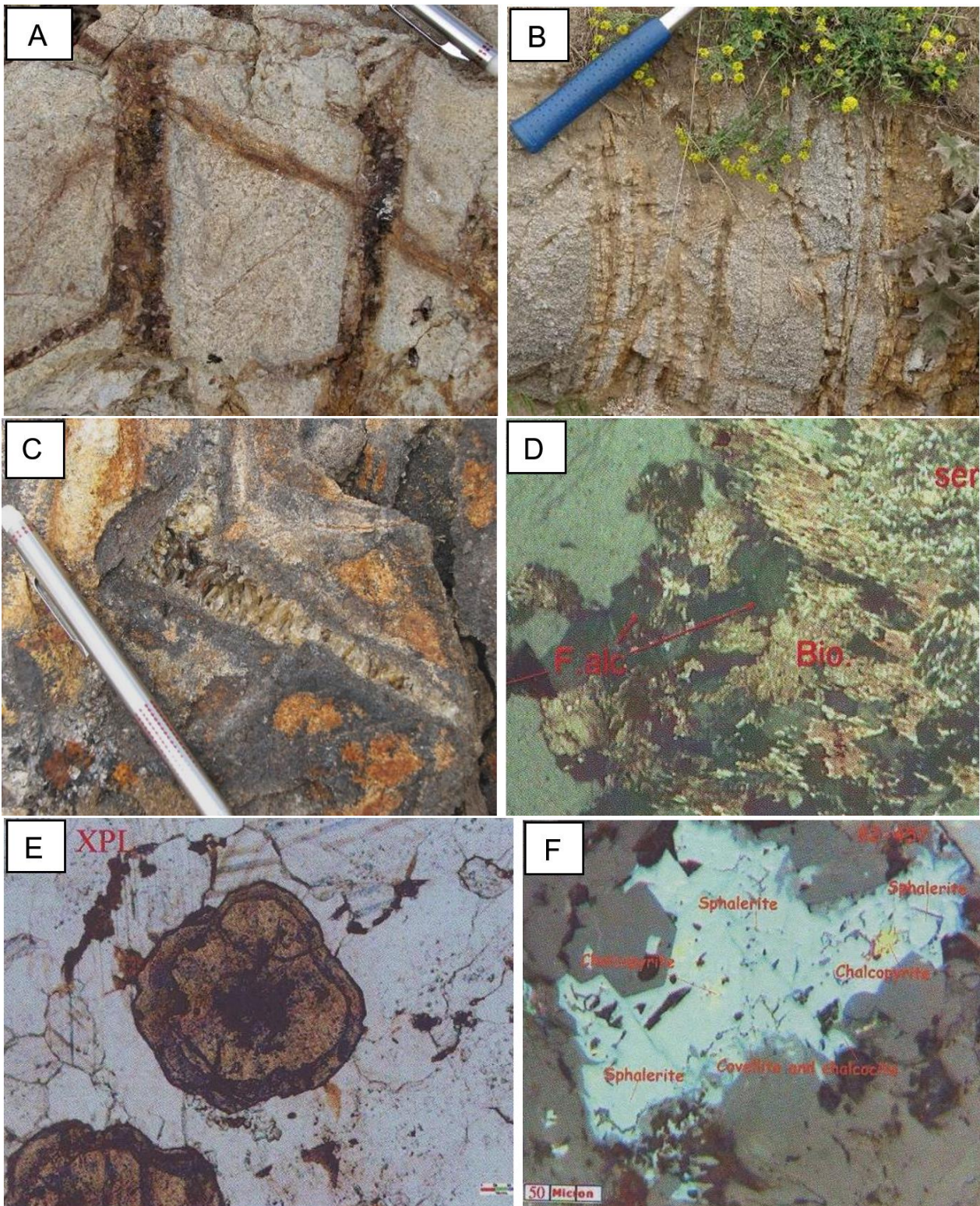
در محدوده این کانسار، Yazdani و همکاران (۲۰۱۶) افزون‌بر توده‌های اسیدی، توده‌هایی با ترکیب بازیک (دیوریت تا گابرو) را نیز گزارش کرده‌اند. برپایه بررسی آنها، توده‌های نفوذی نبی‌جان در پهنه فرورانش و در جایگاه پس از برخورد قاره‌ای پدید آمده‌اند. برپایه شرایط آب و هوایی و ریخت‌شناسی منطقه، واحدهای سنگی و پهنه کانه‌دار دچار هوازدگی شدید شده و لایه بسیار ستبری از رسوب‌های دامنه‌ای، با عیار بالای طلا (تا ۵ گرم در تن) روی آنها را پوشانده است.



شکل ۲- نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰ منطقه نبی‌جان در جنوب‌باختری کلیدر (شمال‌باختری ایران) (با تغییراتی پس از Shokohi, ۲۰۰۴)

بیشتر از توده نفوذی کانه‌دار است. پتاسیک ضعیف، سربیسیتیک، آرژیلیک ضعیف (شاید با خاستگاه ثانویه) و سیلیسی شدن از پهنه‌های دگرسانی هستند که در آنها کوارتز به صورت رگچه‌های متقاطع، حفره‌های پرشده (دروزی) و رگچه‌های صفحه‌ای نیمه‌موازی (sheeted vein) دیده می‌شود (شکل ۳).

کانه‌های کانسار نبی‌جان (پیریت، کالکوپیریت، مگنتیت، اسفالریت و گالن) و فراورده‌های هوازگی آنها (کولین، مالاکیت، گوتیت و هماتیت)، با طلا همراه بوده و به صورت رگچه‌ها و حفره‌های پرشده از کوارتز-سولفید (در توده مونزوگرانیته) و یا به صورت نامنظم در پهنه اسکارنی دیده می‌شوند (شکل ۳). مقدار مگنتیت و اسفالریت در پهنه اسکارنی



شکل ۳- تصویرهای صحرایی و میکروسکوپی از کانساز نبی‌جان (شمال‌باختری کلیبر): (A) نمایی از کانی‌سازی استوک‌ورک؛ (B) نمایی از کانی‌سازی رگچه‌های صفحه‌ای نیمه‌موازی (sheeted vein)؛ (C) نمایی از کانی‌سازی حفره‌های پر شده با کوارتز؛ (D) دگرسانی پتاسیک-فیلیک در توده مونوزوگرانیته؛ (E) گارنت با منطقه‌بندی؛ (F) مجموعه کالکوپیریت و اسفالریت در اسکارن نبی‌جان (عکس‌های میکروسکوپی از Baniadam (۲۰۰۵) برگرفته شده‌اند)

کمابیش ناهنجاری ندارند. برای تحلیل و تفسیر داده‌های زمین‌شیمیایی و نیز پراکندگی آماری عنصرها در منطقه بررسی شده، نرم‌افزارهای بسیاری (مانند: SPSS، Excel، Minitab، GIS) به کار رفت. با به‌کارگیری این نرم‌افزارها، نمودارهای فراوانی، نمودارهای پراکنشی، جدول ضریب‌های همبستگی، نمودارهای خوشه‌ای، نقشه‌های زمین‌شیمیایی و زمین‌شناسی رسم شدند. پیش از رسم نمودارها باید از بهنجاری بودن آنها اطمینان داشت؛ از این رو، چولگی داده‌ها به دست آورده شد و چون چولگی بیشتر از ۰/۵ بود، داده‌ها بهنجاری شدند (Hassani Pak and Sharafoddin, 2011). برپایه داده‌های تجزیه‌ای به دست آمده، دو ناهنجاری طلا در واحدهای اسکارنی و توده نفوذی مونوزوگرانیته شناسایی شدند. هر کدام از این ناهنجاری‌ها جداگانه بررسی شد. در پایان، نقشه‌های زمین‌شیمیایی عنصرهای گوناگون (تک‌عنصری و هاله‌های مرکب) در سه ژرفای گوناگون تهیه شده و روند تغییر فراوانی عنصرها با افزایش ژرفا بررسی شد.

پردازش‌های آماری

یکی از هدف‌های اصلی در بررسی‌های زمین‌شیمیایی، کشف الگوهای زمین‌شیمیایی غیرعادی یا آنومالی‌های زمین‌شیمیایی است که پیامد کانی‌سازی یاد شده باشند. بررسی آماری داده‌های زمین‌شیمیایی نشان می‌دهد که پراکندگی آماری عنصرها در طبیعت ناهنجار بوده و دارای چولگی مثبت و یا منفی است. چنانچه این کشیدگی به سمت راست بوده و چولگی مثبت باشد نشان‌دهنده فرایندهای دگرسانی و کانسارسازی است؛ اما اگر کشیدگی به سمت چپ بوده و چولگی منفی باشد نشان‌دهنده فرایندهای

در برابر سیستم‌های مس پورفیری، دگرسانی در این کانسار شدت و گسترش کمتری دارد و محدود به پهنه کانه‌دار است. افزون‌بر کانی‌سازی استوکورک، کانی‌سازی اسکارن و رگه‌های سیلیسی نیز در سنگ‌های دربرگیرنده (با سن کرتاسه) روی داده است. کانی‌سازی اسکارنی در کنار توده آذرین جای دارد؛ اما رگه‌های سیلیسی که ذخیره اندکی هم دارند، در فاصله دورتری از توده‌های آذرین درونی دیده می‌شوند (Baniadam, 2005).

روش انجام پژوهش

برای بررسی زمین‌شیمیایی و عیارسنجی طلا و عنصرهای همراه، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور عملیات حفاری در محدوده‌ای به بزرگی ۳۰۰×۲۰۰ متر و به فاصله‌های ۲۵ متر از یکدیگر انجام داد. شمار ۷۴ چاهک اکتشافی (با متراژ کل ۹۵۱ متر) با دستگاه دریل واگن حفر شد. بیشترین ژرفای چاهک‌ها ۲۷ متر و کمترین آنها ۲ متر است. از هر دو یا سه متر ژرفای گمانه یک نمونه تهیه شد. هر نمونه را پس از بیرون‌آوردن از چاهک حفاری، در همانجا همگن کرده و سپس نزدیک به ۱۰ کیلوگرم از آن را به‌عنوان نمونه اصلی برداشت کردند. در مجموع ۴۲۱ نمونه (۱۸۰ نمونه از بخش اسکارنی و ۲۴۱ نمونه از بخش رگچه‌ای) از این چاهک‌ها برداشت و برای تجزیه فرستاده شدند. نمونه‌ها با روش جذب اتمی در آزمایشگاه سازمان زمین‌شناسی کشور تجزیه شدند (Shokohi, 2004). بررسی اولیه داده‌های تجزیه‌ای به دست آمده نشان داد که بیشترین تمرکز طلا و عنصرهای دیگر در سنگ‌های مونوزوگرانیته دارای رگچه‌های کوارتز و پیریت روی داده است و توده‌های مونوزودیوریتی

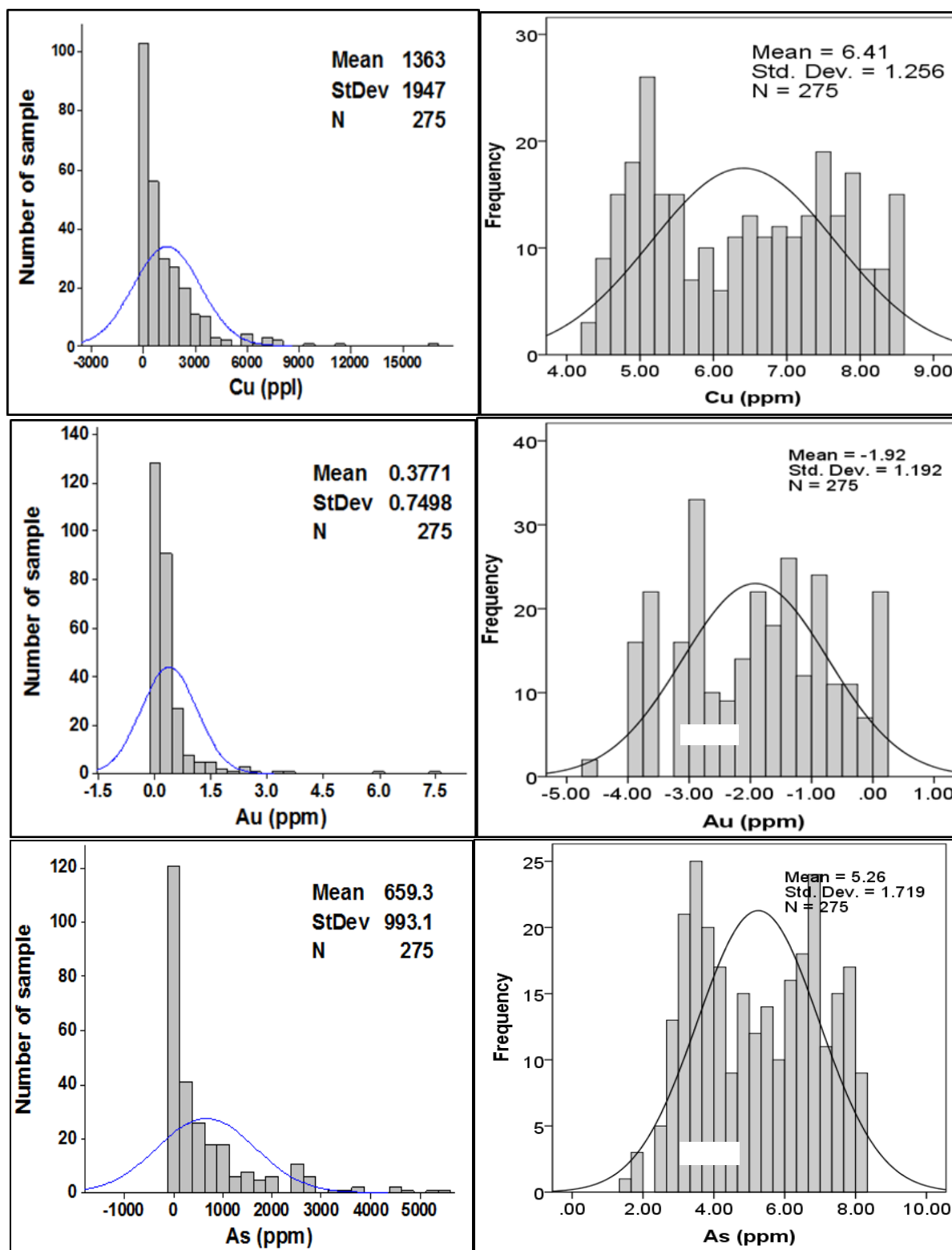
رده، جامعه آماری به پراکندگی هنجار بسیار نزدیک شد؛ اما هنوز تا هنجار شدن به شکل واقعی فاصله بسیاری داشت. در این شرایط، با به‌کاربردن توابع تبدیل گوناگون (Reiman and Flizmoser, 1997; Miesch, 2000)، پراکندگی داده‌ها تا اندازه‌ای به پراکندگی هنجار تبدیل شد. دربارهٔ عنصرهایی که پراکندگی آنها پس از حذف داده‌های خارج از رده به هنجار نزدیک نشد، داده‌ها به روش تبدیل لگاریتمی ساده و روش پارامتر سه‌متغیره ($z = \ln(x + \alpha)$) بهنجارسازی شدند. در این تبدیل‌ها تلاش شد تا جای ممکن به سرشت اصلی داده‌ها آسیبی وارد نشود. پس از بهنجارسازی داده‌ها، برای بهتر شناختن چگونگی پراکندگی عنصرهای بهنجارشده، نمودار فراوانی آنها (شکل‌های ۴ و ۵)، با به‌کارگیری پارامترهای آماری به‌دست‌آورده‌شده برای داده‌های هنجار عنصرها، رسم شده و این روش آزموده شد.

برآورد حد آستانه‌ای، مقادیر زمینه و آنومالی

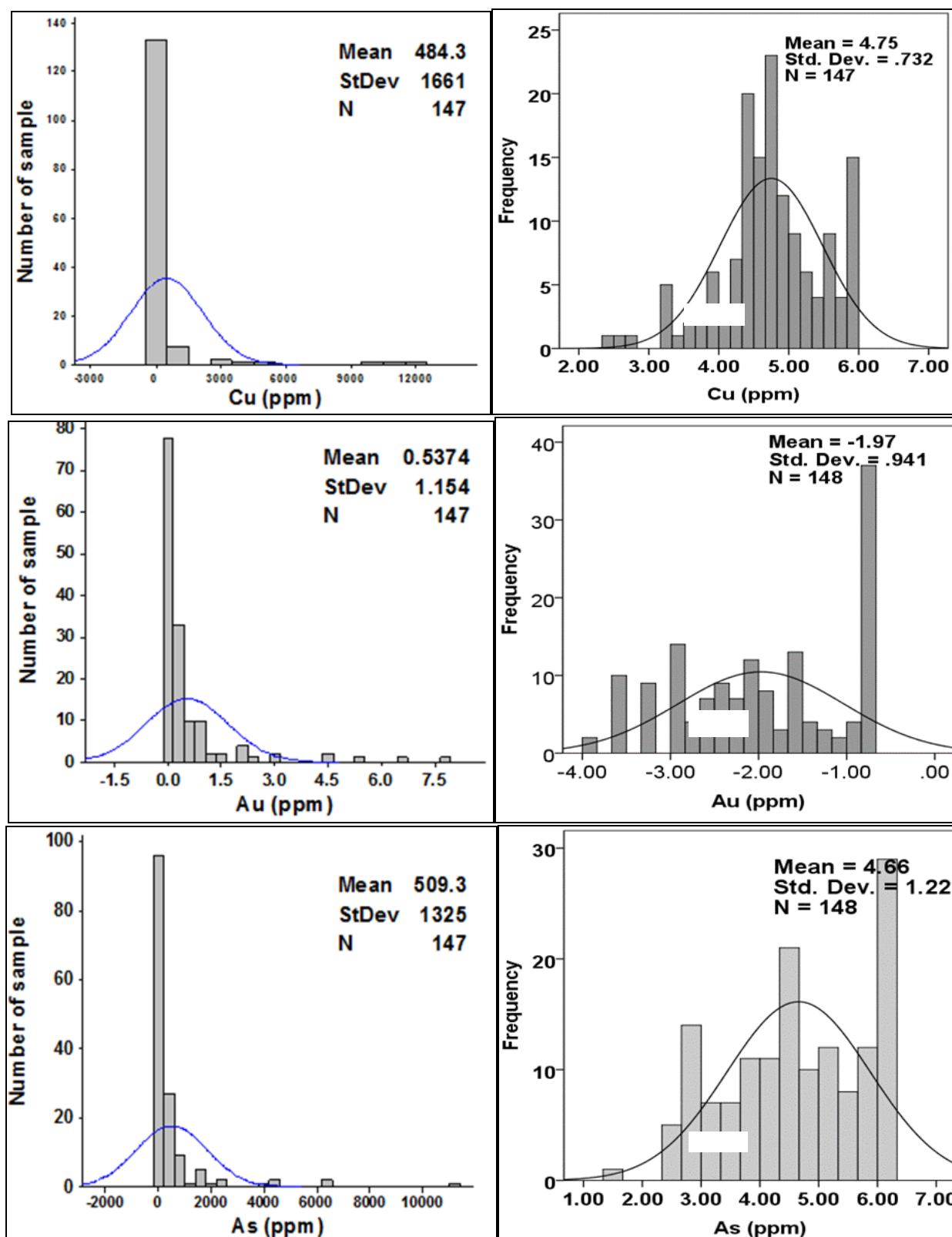
به‌طور معمول، کلید پردازش داده‌های زمین‌شیمیایی، ارزیابی حد آستانه‌ای در پی جدایش ناهنجاری از زمینه و در پایان شرح مناطق ناهنجار و چه‌بسا کانی‌سازی‌شده است (Deng et al., 2010). معمولاً داده‌های معدنی آمیخته‌ای از دو جامعه زمینه و ناهنجاری (در مقیاس ناحیه‌ای) یا باطله و کانسنگ (در مقیاس معدنی) هستند (Ghannadpour et al., 2013). روش‌های جداسازی آنومالی از زمینه دو دسته هستند: ساختاری و غیرساختاری. در اینجا روش‌های غیرساختاری به‌کار برده شده‌اند. در روش‌های غیرساختاری تنها به مقادیرهای اندازه‌گیری‌شده برای هر نمونه پرداخته می‌شود و جایگاه فضایی نقاط نمونه‌برداری بررسی نمی‌شود.

ویژه‌ای مانند تهی‌شدگی عنصرها در پی فرایندهای فروشست است. چنانچه منحنی پراکندگی آماری داده‌های زمین‌شیمی حالت متقارن و زنگوله‌ای شکل داشته باشد، نشان‌دهنده نبود ارتباط با پدیده‌های دگرسانی، کانسارسازی و ... است (Rose et al., 1979). در این میان، مقادیر پرعیار اهمیت بیشتری دارند و می‌توان گفت که این مقادیرها، همان بی‌هنجاری‌ها (در مقیاس ناحیه‌ای) و یا پیکره‌های کانسنگ پرعیار (در مقیاس محلی) هستند (Filzmoser and Hron, 2008). از آنجایی که پارامترهای فراوانی در پیدایش یک کانسار و پیدایش تابع پراکندگی عیار آن مؤثر است، پس چه‌بسا نوع تابع پراکندگی عیار، یک تابع هنجار ساده نباشد؛ از این‌رو، شاید نتوان به یک پراکندگی فراوانی دست یافت (Reimann et al., 2002).

هیستوگرام‌های عنصرهای گوناگون که برای داده‌های خام رسم شده‌اند (شکل‌های ۴ و ۵)، چولگی به‌سمت راست نشان می‌دهند و این می‌تواند نشانهٔ ناهنجاری داده‌ها باشد؛ از این‌رو، داده‌ها بهنجارسازی شدند. این کار برای ده عنصر انجام شد؛ اما در شکل‌های ۴ و ۵، تنها سه عنصر مهم Cu، Au و As نشان داده شده‌اند. روش‌های گوناگونی برای بهنجارسازی توابع پراکندگی پیشنهاد شده است. مهم‌ترین آنها تبدیل لگاریتمی سه پارامتری، تبدیل کاکس و باکس، به‌کارگیری نمودار احتمال لگاریتمی و به‌کارگیری نمودار فینی هستند (Hassani Pak and Sharafoddin, 2011). از آنجایی که بیشتر روش‌های آماری برپایه بهنجاربودن تابع پراکندگی داده‌ها است، داده‌ها باید با یک روش مناسبی بهنجار می‌شدند؛ از این‌رو، در این پژوهش از تبدیل لگاریتمی بهره گرفته شد. پس از جایگزینی مقادیرهای خارج از



شکل ۴- هیستوگرام پراکندگی فراوانی واحد سنگی مونوزوگرانیت در منطقه نیی‌جان (شمال‌باختری ایران) (نمودارهای سمت چپ با داده‌های خام رسم شده‌اند و چولگی همگی به سمت راست است. نمودارهای سمت راست، با داده‌های بهنجار شده رسم شده‌اند. نمودارهای فراوانی عنصرهای رسم شده برای داده‌های بهنجار نشان‌دهنده پراکندگی کم و چولگی کم هستند)



شکل ۵- هیستوگرام پراکندگی فراوانی بخش‌های اسکارنی در منطقه نی‌جان (شمال‌باختری ایران) (نمودارهای سمت چپ با داده‌های خام رسم شده‌اند و چولگی همگی به سمت راست است. در سمت راست، نمودارها با داده‌های بهنجار رسم شده‌اند)

ناهنجاری ممکن و مقادیرهای بزرگ‌تر از $3S+\bar{X}$ به نام ناهنجاری احتمالی رده‌بندی شوند (Hassani Pak and Sharafoddin, 2011). از این‌رو، پس از بهنجارسازی مقدار عنصرها و حذف داده‌های بی‌هنجار، مقدار حدآستانه و ناهنجاری برای عنصرهای گوناگون در هر کدام از کانه‌زایی‌های اسکارنی و رگچه‌ای جداگانه به دست آورده شدند (جدول‌های ۱ و ۲). برای نمونه، در واحد مونوزوگرانیته، مقادیرهای بیشتر از $2S+\bar{X}$ که ناهنجاری عنصرها را نشان می‌دهد برای عنصر طلا برابر با ۱/۲۵ ppm است؛ اما برای واحد اسکارنی، این مقدار برابر با ۰/۹۸ ppm است. بیشترین آنومالی طلا هم مربوط به واحد مونوزوگرانیته است. از آنجایی که نمونه‌های تجزیه شده از مناطق کانه‌زایی هستند و مقدار برخی عنصرها بالاست، پس مقادیرهای زمینه نیز بالاتر از حد انتظار به دست آمده و می‌توان گفت که مقادیرهای زمینه به دست آمده از نوع محلی هستند.

در روش آمار کلاسیک برپایه انحراف از معیار، مقدار زمینه از حد آستانه جدا می‌شود. مقادیرهای بیشتر از یک حد آستانه‌ای، برای عنصرها ناهنجاری به‌شمار می‌آیند. این حد برابر است با بالاترین مقدار زمینه طبیعی که مقادیرهای بالاتر از آن، ناهنجاری و کمتر از آن، زمینه هستند. بسته به مقدار داده‌ها، هدف‌های اکتشافی، میزان شناخت از محدوده بررسی شده و عوامل اقتصادی، چندین روش برای ارزیابی این مقادیرها پیشنهاد شده است.

در بررسی‌های زمین‌شیمیایی برای ارزیابی مقدار زمینه معمولاً مقادیری که با $S+\bar{X}$ همخوانی دارند و برای ارزیابی حد آستانه‌ای مقادیری که با $2S+\bar{X}$ همخوانی دارند برگزیده می‌شوند. به گفته دیگر، مقادیرهای بزرگ‌تر از $\bar{X}+2S$ می‌توانند ناهنجاری به‌شمار آیند. مقادیرهای میان $2S+\bar{X}$ و $3S+\bar{X}$ می‌توانند

جدول ۱- مقادیرهای زمینه، حدآستانه و ناهنجاری در واحد کانه‌دار مونوزوگرانیته در منطقه نی‌جان (شمال‌باختری ایران)

Elements	Au	Cu	Pb	Zn	Ag	Mn	W	As	Sb	Bi
X+S	0.87	2152.8	702.81	524.6	19.45	8.41	15.9	1251.2	117.25	20.87
X+2S	1.25	3214.5	1103.5	625.1	29.59	12.51	22.51	2145.6	198.34	25.41
X+3S	2.87	4521.4	1412.56	625.5	41.87	15.92	30.63	3098.2	231.54	29.94

جدول ۲- مقادیرهای زمینه، حدآستانه و ناهنجاری در پهنه اسکارنی در منطقه نی‌جان (شمال‌باختری ایران)

Elements	Au	Cu	Pb	Zn	Ag	Mn	W	As	Sb	Bi
X+S	0.64	2252.9	719.8	639.1	20.21	9.36	16.6	1448.5	137.1	23.57
X+2S	0.98	3574.2	1133.7	642.6	32.39	13.56	13.56	2314.9	215.3	27.07
X+3S	1.32	4895.4	1547.6	646.2	44.57	17.76	17.76	3181.2	293.5	30.57

اندازه‌گیری شده در مجموعه‌هایی از داده‌های منفرد است (Rollinson, 1993). برای به‌دست‌آوردن ضریب همبستگی به روش پیرسون، پراکندگی داده‌ها باید بهنجار باشد (Wellmer,

ضریب‌های همبستگی چندگانه عنصرها

ضریب همبستگی، ارتباط و وابستگی متغیرهای گوناگون را نشان می‌دهد. به‌طور کلی، همبستگی سنجشی از شدت وابستگی دو متغیر

داده‌ها به‌نجار شده و سپس ضریب همبستگی پیرسون به کار برده شد. داده‌های به‌دست‌آمده در جدول‌های ۳ و ۴ آورده شده‌اند.

1997). اگر چنین نباشد، آنگاه می‌توان داده‌ها را به‌گونه‌ای تبدیل کرد که پراکندگی داده‌های تبدیل‌شده، به‌نجار شود. در این پژوهش، نخست

جدول ۳- ضریب‌های همبستگی عنصرها در مونوزوگرانیت نی‌جان (شمال‌باختری ایران) (ضریب‌هایی که با نمادهای «» و «» نشان داده شده‌اند، به‌ترتیب در سطح اعتماد ۹۹ و ۹۵ درصد معنی‌دار هستند)

Au	1									
Cu	0.812 ''	1								
Pb	0.532 ''	0.631 ''	1							
Zn	0.218''	0.249''	0.172''	1						
Ag	0.368''	0.441''	0.426''	0.530 ''	1					
Mn	0.696 ''	0.519 ''	0.516 ''	0.286''	0.324''	1				
W	0.543 '	0.331''	0.104	0.041	0.111	0.053	1			
As	0.606 ''	0.424''	0.468''	0.404''	0.517 ''	0.539 ''	0.164''	1		
Sb	0.664 ''	0.584 ''	0.594 ''	0.255''	0.432''	0.411''	0.146'	0.618 ''	1	
Bi	0.127''	0.226''	0.202''	0.159'	0.394''	0.108''	0.127'	0.231''	0.159''	1
	Au	Cu	Pb	Zn	Ag	Mn	W	As	Sb	Bi

جدول ۴- ضریب‌های همبستگی عنصرها در پهنه اسکارنی نی‌جان (شمال‌باختری ایران) (ضریب‌هایی که با نمادهای «» و «» نشان داده شده‌اند، به‌ترتیب در سطح اعتماد ۹۹ و ۹۵ درصد معنی‌دار هستند)

Au	1									
Cu	0.332''	1								
Pb	0.368''	0.063	1							
Zn	0.232''	0.659 ''	0.562 ''	1						
Ag	0.390''	0.377''	0.407 ''	0.454 ''	1					
Mn	0.446 ''	0.403 ''	0.342''	0.290''	0.311''	1				
W	0.183'	-0.039	0.542 ''	-0.072	0.511''	0.008	1			
As	0.666 ''	0.187'	0.354''	0.390''	0.455 ''	0.437 ''	0.080	1		
Sb	0.597 ''	-0.039	0.492 ''	0.329''	0.263''	0.537 ''	0.205'	0.625 ''	1	
Bi	0.196'	0.259''	0.045	-0.040	0.227''	0.256''	0.017	0.236''	-0.049	1
	Au	Cu	Pb	Zn	Ag	Mn	W	As	Sb	Bi

قوی تری نسبت به واحدهای اسکارنی داشته و شامل دو خوشه هستند که در خوشه اول عنصرهای طلا، مس، سرب، آرسنیک، آنتیموان، منگنز و تنگستن جای می گیرند و در خوشه دوم دو عنصر روی و نقره جای دارند. عنصر بیسموت هم دارای کمترین همبستگی با عنصرهای دیگر است. در واحدهای اسکارنی، سه گروه جداگانه دیده می شوند:

در گروه اول، طلا، آنتیموان، آرسنیک و منگنز جای می گیرند که همبستگی بالایی دارند. در این گروه آنتیموان و آرسنیک در یک خوشه جای گرفته و دارای کمترین فاصله هستند. این دو عنصر همبستگی بالایی با عنصر طلا و منگنز نشان می دهند.

در گروه دوم، نقره، تنگستن و سرب هستند که همبستگی بالایی از خود نشان می دهند.

گروه سوم شامل عنصرهای روی و مس است و همبستگی کمتری نشان می دهد. عنصر بیسموت دارای کمترین همبستگی با دیگر عناصر است و با عنصر طلا کمترین همبستگی را دارد. این دو عنصر در دو سر پایانی دو شاخه اصلی نمودار جای گرفته اند. این پدیده می تواند نشان دهنده همبستگی منفی این دو عنصر در شرایط کانه زایی باشد.

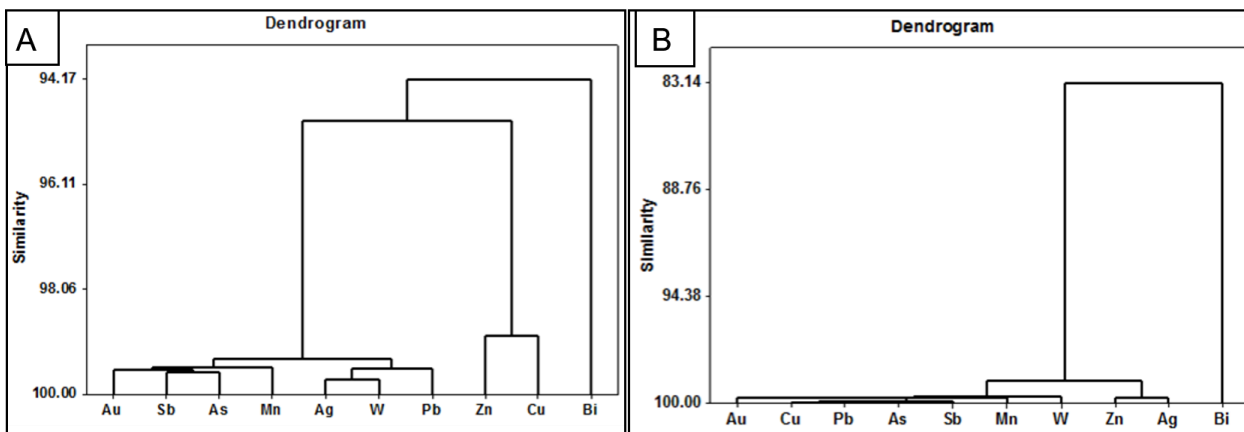
همبستگی بالای عنصر طلا با عنصرهای مس، تنگستن، آرسنیک، و آنتیموان می تواند نشانه ای از کانسارهای طلای مرتبط با توده های نفوذی (intrusion related gold deposit) باشد که زمین دماسنجی، ساخت و بافت، نوع دگرسانی ها و نوع سنگ میزبان نیز درستی این نکته را نشان می دهد.

در توده موزوگرنیتی، عنصر طلا با عنصرهایی مانند مس، سرب، منگنز، تنگستن، آرسنیک و آنتیموان، همبستگی بالایی نشان می دهد؛ اما با عنصرهای روی، نقره و بیسموت همبستگی کمتری دارد. در واحد اسکارنی، عنصر طلا با آنتیموان، آرسنیک و منگنز همبستگی بالایی نشان می دهد؛ اما با عنصرهای دیگر همبستگی خوبی ندارد. همراهی یا همبستگی بالای عنصرهای طلا و منگنز در هر دو توده موزوگرنیتی و اسکارنی می تواند پیامد جذب سطحی طلا با اکسیدهای منگنز باشد.

همبستگی گروهی عنصرها (نمودار درختی)

هدف از تجزیه و تحلیل نمودارهای خوشه ای، دست یافتن به ملاکی است که برپایه آن بتوان متغیرها و یا نمونه ها را برپایه تشابه هرچه بیشتر درون گروهی (همه متغیرهای یک گروه خاص در میان خودشان همبستگی بالایی دارند) و اختلاف بیشتر میان گروهی (متغیرهای هر گروه با گروه دیگر همبستگی کمی دارند) بهتر رده بندی کرد (Rencher, 2001). این ویژگی کمک می کند تا بتوان متغیرها و نمونه ها را به صورت خوشه هایی که بیشترین تشابه ممکن در درون خود و بیشترین اختلاف را در میان خود دارند، رده بندی کرد (Hassani Pak and Sharafoddin, 2011). تجزیه و تحلیل خوشه ای با برقراری ارتباط میان مجموعه ای از متغیرهای به ظاهر بی ارتباط، به شناخت یک مدل فرضی میان آنها و به کاهش ابعاد متغیرها می پردازد (Anderson, 2003).

همان طور که در شکل ۶ دیده می شود، عنصرها در واحد موزوگرنیتی همبستگی

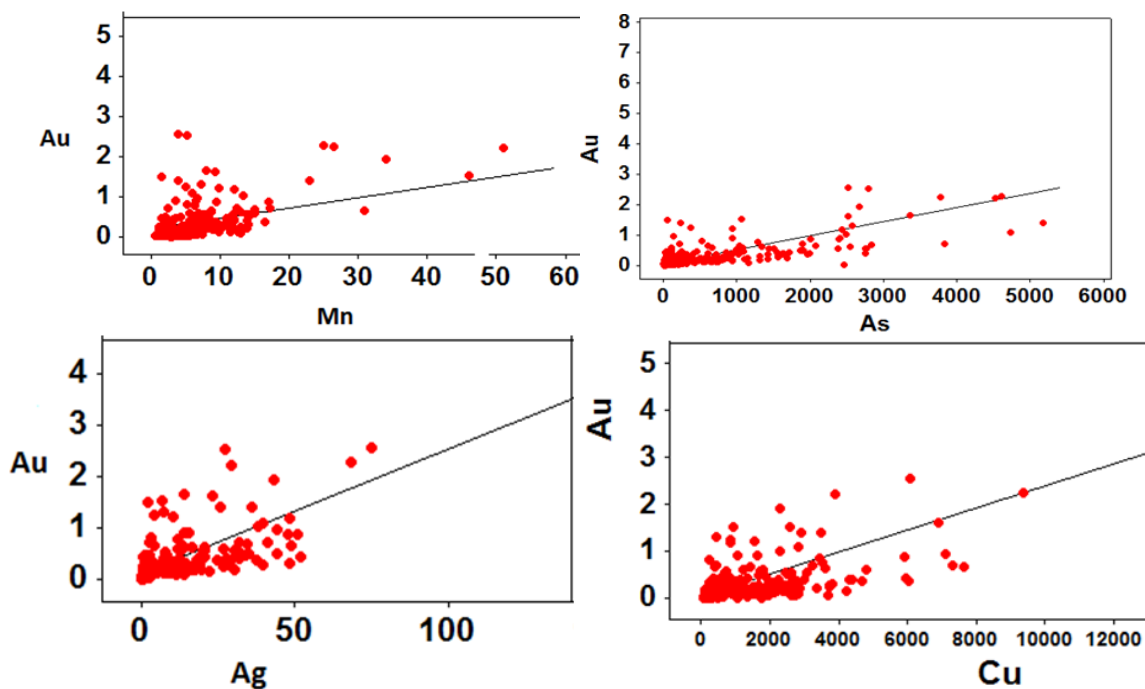


شکل ۶- نمودار خوشه‌ای (دندوگرام) برای نمونه‌های حاصل از: (A) توده مونزوگرانیته؛ (B) اسکارنی (منطقه نی‌جان (شمال‌باختری ایران)

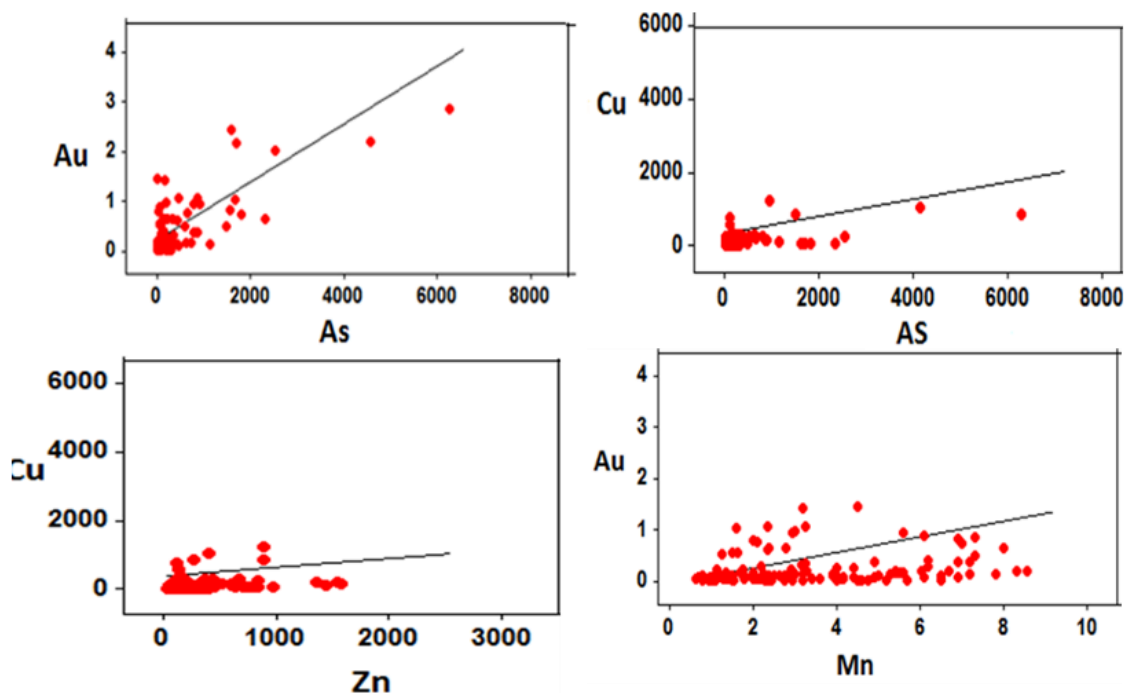
رسم شده است. این نمودارها همبستگی بالای طلا با این عنصرها را نشان می‌دهد. برای واحدهای اسکارنی، نمودارهای پراکنش طلا در برابر عنصرهای آرسنیک و منگنز، همچنین، مس در برابر روی و آرسنیک رسم شده‌اند. طلا و آرسنیک بیشترین همبستگی را نشان می‌دهند؛ اگرچه همبستگی میان عنصرهای دیگر نیز مثبت است.

نمودار پراکنش همبستگی‌های دوگانه عنصرها

برای ارزیابی نوع رابطه میان متغیرها، نخست باید میزان وابستگی آنها را اندازه گرفت. نمودار پراکندگی عنصرها برای ده عنصر در برابر یکدیگر رسم شده است. برخی از آنها در شکل‌های ۷ و ۸ نمایش داده شده‌اند. برای توده مونزوگرانیته، مقدار عنصر طلا در برابر مس، آرسنیک، نقره و منگنز



شکل ۷- نمودار پراکندگی عنصرها (بر پایه ppm) در توده مونزوگرانیته نی‌جان (شمال‌باختری ایران)



شکل ۸- نمودار پراکندگی عنصرها (بر پایه ppm) در توده‌های اسکارنی نی‌جان (شمال‌باختری ایران)

دوم (که در واقع همان ناهنجاری مربوط به واحدهای اسکارنی شده در جنوب منطقه است)، خود را نشان می‌دهد. با افزایش ژرفا، بر شدت آن افزوده می‌شود؛ اما از شدت ناهنجاری بخش مونوزوگرانودیوریتی کم می‌شود.

ناهنجاری نقره با توده مونوزوگرانیته همخوانی دارد و در بخش اسکارنی، هیچ ناهنجاری از آن دیده نمی‌شود. عنصرهای مس و منگنز در سطح، تنها در بخش مونوزوگرانیته ناهنجاری نشان می‌دهند و در واحدهای اسکارنی شده ناهنجاری ندارند؛ اما به‌سوی بخش‌های ژرف‌تر، ناهنجاری در واحدهای اسکارنی شده نیز پدیدار می‌شود. در واحدهای اسکارنی شده، عنصر سرب، چه در سطح و چه در ژرفا، از خود ناهنجاری نشان نمی‌دهد؛ اما ناهنجاری آن در واحد مونوزوگرانیته در سطح گسترش بیشتری دارد. در واحدهای اسکارنی، عنصر آنتیموان در سطح یک ناهنجاری ضعیف

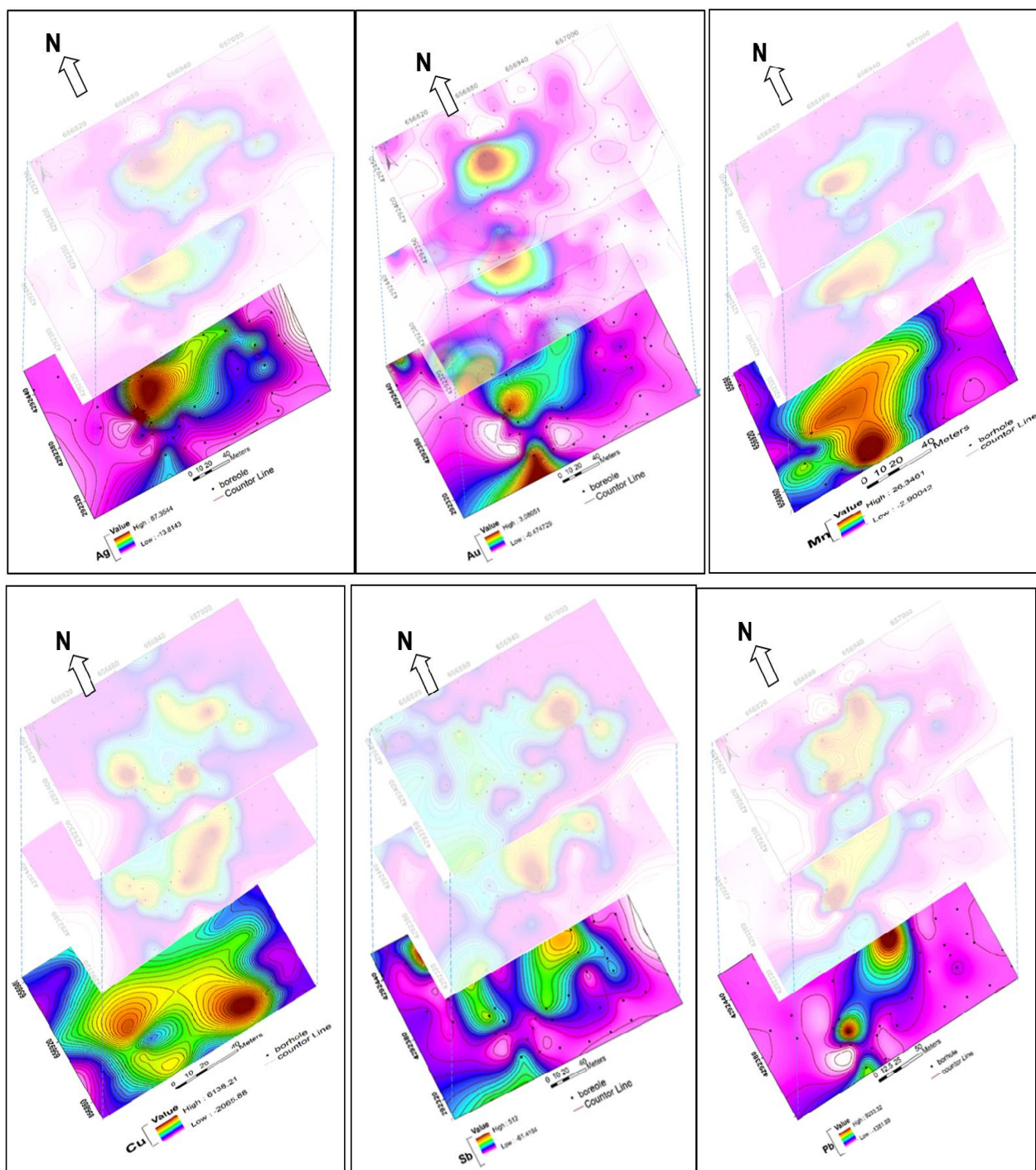
نقشه‌های زمین‌شیمیایی

نمایش داده‌ها و اطلاعات به‌صورت تصویری به درک وابستگی میان اجزای موجود در آن و تعبیر و تفسیر داده‌های به‌دست‌آمده و در پایان، طراحی بهینه فاز بعدی کمک می‌کند. در موارد بسیاری، نخست باید داده‌ها و اطلاعات را به‌صورت نقشه درآورد تا بتوان به‌آسانی ارتباط اجزا را دریافت. برپایه نمونه‌برداری‌های انجام‌شده و داده‌های به‌دست‌آمده از تجزیه نمونه‌ها، نقشه‌های تک‌عنصری برای عنصرهای گوناگون در سه ژرفا (ژرفای ۰-۲ متر، ۲-۴ متر و ۴-۶ متر) رسم شد (شکل ۹). سپس این نقشه‌ها برپایه ژرفا روی هم گذاشته شدند (overlay) تا افزون‌بر تغییرات جانبی، تغییرات عیار در ژرفا نیز بررسی شود.

در شکل ۹، در سطح زمین، تنها یک ناهنجاری طلا دیده می‌شود که مربوط به واحد مونوزوگرانیته است؛ اما با افزایش ژرفا، ناهنجاری

مونوزوگرانیتهی دارای ناهنجاری بیشتری در سطح است و به‌سوی ژرفا از شدت آن کاسته می‌شود.

نشان می‌دهد که با افزایش ژرفا، شدت ناهنجاری آن بیشتر می‌شود. این عنصر در واحد سنگی



شکل ۹- نقشه‌های زمین‌شیمی تک‌عنصری در سه ژرفای گوناگون (۱ تا ۲، ۲ تا ۴ و ۴ تا ۶ متری) برای عنصرهای Au، Ag، Cu، Mn، Pb و Sb (منطقه نبی‌جان، شمال‌باختری ایران)

نتیجه‌گیری

بالای آرسنیک، آنتیموان و منگنز با طلا در هر دو توده موزوگرانیته و اسکارنی، این عنصرها می‌توانند ردیاب طلا در این منطقه دانسته شوند. تا ژرفایی که اکسیدهای آهن و منگنز و رگچه‌های فراوان کوارتز دیده می‌شوند، ناهنجاری طلا بالاست و می‌توان گفت هوازگی عاملی برای انباشته شدن طلا در بخش‌های سطحی کانسار بوده است.

سپاس‌گزاری

نگارندگان بر خود لازم می‌دانند از سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور برای در اختیار گذاشتن داده‌های تجزیه نمونه‌ها و نیز همکاری در کارهای صحرایی سپاس‌گزاری کنند. همچنین، از خانم مریم صالحی برای همکاری در کارهای نرم‌افزاری و رسم نقشه‌های زمین‌شیمیایی تشکر می‌کنند. نگارندگان از داوران گرامی مجله، برای پیشنهاد نکته‌های ارزشمندشان که به پربرتر شدن مقاله کمک کرده سپاس‌گزار هستند.

برپایه پراکندگی طلا و عنصرهای همراه آن در منطقه نبی‌جان، در واحدهای گوناگون سنگی (موزوگرانیته و واحدهای اسکارنی) و برپایه بررسی پراکندگی عنصرها و روابط همبستگی آنها می‌توان واحدهای سنگی را از یکدیگر شناسایی کرد. بیشترین ناهنجاری طلا مربوط به واحد موزوگرانیته و اسکارنی است. در واحد موزوگرانیته، بیشترین شدت ناهنجاری در سطح است و با افزایش ژرفا از شدت آن کاسته می‌شود؛ اما در واحدهای اسکارنی با افزایش ژرفا، شدت ناهنجاری بیشتر می‌شود. در واحد موزوگرانیته عنصرهای Au، As، Sb، Mn، Cu، Pb و W دارای بیشترین همبستگی هستند؛ اما در واحد اسکارنی عنصر طلا با As، Sb و Mn بیشترین همبستگی را نشان می‌دهد. در بخش‌های اکسیدشده سرخ‌رنگ که دارای کانی‌های مس هستند و با رگچه‌های کوارتزی همراهی می‌شوند، طلا ناهنجاری بیشتری نشان می‌دهد. برپایه همبستگی

منابع

- Aghazadeh, M., Castro, A., Badrzadeh, Z. and Vogt, K. (2011) Post-collisional polycyclic plutonism from the Zagros hinterland: The Shaivar Dagh plutonic complex, Alborz belt, Iran. *Geological Magazine*, Cambridge University Press, 1–29.
- Anderson, T. (2003) *An introduction to multivariate statistical analysis*. 3rd Edition, Wiley, New York.
- Azadi, E., Rahgoshay, M., Alirezaei, S. and Emami, M.H. (2015) Geochemistry and petrogenesis of the volcanic rocks in the central part of Bozghush ranges, northwest of Iran. *Petrology* 24: 1-22 (in Persian).
- Baniadam, F. (2005) Study of geology and genesis of Au-Cu mineralization in the Nabijan exploratory area, Kaleibar. MSc Thesis, Institute of Earth Science, Geological Survey of Iran, Iran (in Persian).

- Deng, J., Wang, Q., Yang, L., Wang, Y., Gong, Q. and Liu, H. (2010) Delineation and explanation of geochemical anomalies using fractal models in the Heqing area, Yunnan Province, China. *Journal of Geochemical Exploration* 105: 95-105.
- Filzmoser, P. and Hron, K. (2008) Outlier detection for compositional data using robust methods. *Mathematical Geosciences* 40: 233-248.
- Ghannadpour, S. S., Hezarkhani, A. and Farahbakhsh, E. (2013) An Investigation of Pb Geochemical Behavior Respect to Those of Fe and Zn Based on k- Means Clustering Method. *Journal of Tethys* 1: 291-302.
- Hassani Pak, A. and Sharafoddin, M. (2011) Interpretation of geochemical data. Tehran University Publication, Tehran (In Persian).
- Jamali, H. (2012) Metallogenic zonation and their tectono-magmatic control in Ahar-Arasbaran magmatic belt, NW Iran. PhD Thesis, Kharazmi University, Tehran, Iran (in Persian).
- Kylie, P. (2007) Application of litho-geochemistry to gold exploration in the St Ives goldfield, Western Australia. *Exploration Environment Analysis* 2: 99-108.
- Mehrpour, M. and Khannazer, N. (1999) Geological quadrangle map 1:100000 of Kaleibar. Geological Survey of Iran, Tehran.
- Mehrpour, M., Aminifazl, A. and Radfar, J. (1992) Geological quadrangle map 1:100000 of Varzghan. Geological Survey of Iran, Tehran.
- Miesch, A. T. (1977) Log-transformation in geochemistry. *Mathematical Geology* 9: 191-194.
- Reimann, C. and Filzmoser, P. (2000) Normal and lognormal data distribution in geochemistry: death of a myth, Consequences for the statistical treatment of geochemical and environmental data. *Environmental Geology* 39: 1001-1014.
- Reimann, C., Filzmoser, P. and Garrett R. (2002) Factor analysis applied to regional geochemical data: problems and possibilities. *Journal of Applied Geochemistry* 17: 185-206.
- Rencher, A. (2001) *Methods of multivariate analysis*. 2nd Edition, John Wiley and Sons, New York.
- Richards, J. P. and Sholeh, A. (2016) The Tethyan tectonic history and Cu-Au metallogeny of Iran. Society of Economic Geologists, Inc. Special Publication 19: 193-212.
- Rollinson, H. R. (1993) *Using geochemical data: Evaluation, presentation, interpretation*. 1st Edition, Longman Scientific and Technical, London.
- Rose, A. W., Hawkes, H. E. and Webb, J. S. (1979) *Geochemistry in mineral exploration*. Academic press, London.
- Shokohi, H. (2004) Report of gold exploration in the north of Nabijan village. Internal Report, Geological Survey of Iran (In Persian).
- Venkataraman, G., Abu Madhavan, B., Ratha, D. S. and Sinharoy, S. (2000) Spatial modeling for base-metal mineral exploration through integration of geological data-sets. *Journal of Natural Resources Research* 9: 27-42.

- Wellmer, F. W. (1997) *Statistical Evaluations in Exploration for Mineral Deposits*. Springer-Verlag, Berlin.
- Yazdani, M., Ahangari, M., Jahangiri, A. and Shokoei, H. (2016) Petrology and geochemistry of Nabijan gabbroic and dioritic plutons (south west Kaleibar, NW Iran): an implication for post-collision magmatism. *Petrology* 26: 1-22 (in Persian).