

# ژئوشیمی رسوب آبراهه‌ای: روش اکتشافی بهینه برای بررسی کانه‌زایی مس در گستره چاه رستم، جنوب بیرجند

سمیه مرادی<sup>۱</sup>، مسعود علی‌پوراصل<sup>۲\*</sup> و افشین اکبرپور<sup>۳</sup>

۱. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه پترولوژی و زمین‌شناسی اقتصادی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود
۲. دانشیار، گروه پترولوژی و زمین‌شناسی اقتصادی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود
۳. استادیار، پژوهشکده علوم زمین، سازمان زمین‌شناسی کشور، تهران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۱۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۱۶

## چکیده

گستره اکتشافی چاه رستم در بلوک لوت و در شمال‌غربی نهبندان در جنوب بیرجند واقع است. واحدهای آتشفشانی و آذرآواری ائوسن-الیگوسن با ترکیب آندزیت و آندزیت بازالت پورفیری بخش عمده‌ای از این گستره را پوشش می‌دهند و به‌وسیله سنگ‌های نفوذی و نیمه‌نفوذی ائوسن-پسین-الیگوسن با ترکیب گرانودیوریت، مونزودیوریت، کوارتز دیوریت پورفیری و دایک‌های داسیتی قطع شده‌اند. سیالات گرمایی مربوط به توده‌های نیمه‌نفوذی-نفوذی در کانه‌زایی مس و عناصر همراه در این ناحیه نقش مهمی داشته‌اند. نمونه‌ها از بخش منهای ۸۰ مش رسوبات بستر آبراهه‌ها برداشت شدند و پس از نمایش، برای عنصر طلا با روش فایرایی و تعداد ۲۲ عنصر با استفاده از روش طیف‌سنجی پلاسمای جفت شده القایی نشر نوری تجزیه شده است. تحلیل‌های آماری تک‌متغیره و چندمتغیره داده‌های ژئوشیمیایی رسوب آبراهه‌ای، ناهنجاری‌های عناصر مس، طلا، روی، سرب، مولیبدن، آرسنیک، آنتیموان و منگنز را در گستره چاه رستم نشان می‌دهد. هم‌یافتی ژئوشیمیایی عناصر در نمونه‌های رسوب آبراهه‌ای، بیان از رخداد احتمالی کانه‌زایی‌های مس پورفیری و اپی‌ترمال (به‌ویژه سامانه اپی‌ترمال) در این گستره دارد. مطالعه سنگ‌ژئوشیمیایی نمونه‌های انتخابی از رخنمون‌های سنگی و مغزه‌های حفاری در مناطق ناهنجاری رسوب آبراهه‌ای، قابلیت روش ژئوشیمی رسوب آبراهه‌ای در ثبت هاله‌های ژئوشیمیایی مرتبط با سامانه‌های کانه‌زایی را تأیید می‌کند.

**واژه‌های کلیدی:** جنوب بیرجند، چاه رستم، ژئوشیمی رسوب آبراهه‌ای، کانه‌زایی مس.

## مقدمه

اکتشافات سیستماتیک مواد معدنی شامل مراحل شناسایی، پی‌جویی، اکتشافات عمومی و تفصیلی می‌باشد. روش ژئوشیمی رسوب آبراهه‌ای در مرحله شناسایی و پی‌جویی مواد معدنی محسوب می‌شود. یکی از کاربردهای اساسی این روش، ثبت هاله‌های لیتوژئوشیمیایی ثانویه

\* نویسنده مرتبط: masoodalipour@shahroodut.ac.ir

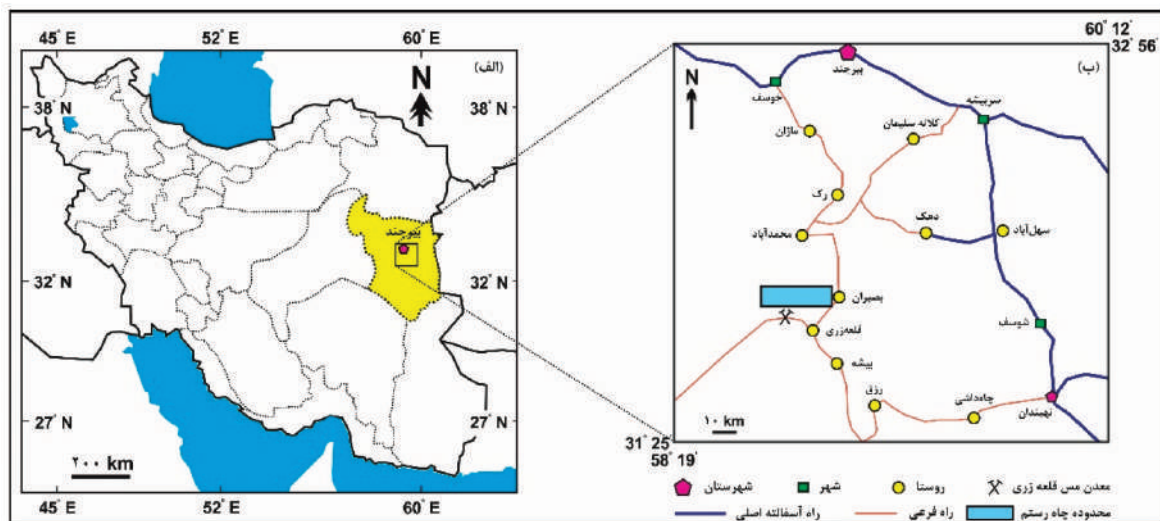
(Malekzadeh Shafaroudi et al., 2015)، مس-طلا پورفیری ماهرآباد (ملک‌زاده شفارودی و کریم پور، ۱۳۹۰)، کانسار طلای شادان در جنوب غرب بیرجند (Yazdi et al., 2023)، کانسار مس چشمه خوری در بلوک لوت (Javidi et al., 2019)، Moghaddam et al., 2019، طلا-قلع هیرد (کریم پور و همکاران، ۱۳۸۶)، مس-مولیبدن رگه‌ای-پورفیری ده سلم و چاه شلغمی (ارجمندزاده، ۱۳۹۰)، چندفلزی ماهور (یونسی و همکاران، ۱۳۹۶) و سرب و روی سه‌چنگی (Malekzadeh Shafaroudi and Karimpour, 2015) مؤید آن است. این رخدادهای کانه‌زایی با ماگماتیسم غنی از پتاسیم ائوسن میانی تا الیگوسن پسین در کمربند ماگمایی شرق ایران مرتبط هستند (Omidianfar et al., 2020). اهمیت بالای مطالعات زمین‌شناسی و اکتشافی در بلوک لوت و وجود آثار کانه زائی مس و عناصر همراه در گستره چاه رستم، استفاده از روش ژئوشیمی رسوب آبراهه‌ای برای ثبت ناهنجاری‌های ژئوشیمیایی مرتبط با سامانه‌های کانه‌زایی را در این گستره ضرورت می‌بخشد.

## روش مطالعه

در این پژوهش، طراحی و برنامه‌ریزی برای برداشت ۳۶ نمونه رسوب آبراهه‌ای در حوضه‌های آبریز انجام شد. نمونه‌های ژئوشیمی آبراهه‌ای از جزء منهای ۸۰ مش رسوبات بستر آبراهه‌ها برداشت شدند. این نمونه‌ها پس از نمایش، برای عنصر طلا با روش غال‌گذاری (F.A.) و تعداد ۲۲ عنصر با استفاده از روش طیف‌سنجی پلاسمای جفت شده القایی نشر نوری (ICP-OES) در آزمایشگاه مطالعات مواد معدنی زرآرما تجزیه شده است. تحلیل‌های آماری تک‌متغیره و چندمتغیره داده‌های ژئوشیمی رسوب آبراهه‌ای در محیط نرم‌افزار IBM SPSS Statistics 21 انجام شده است. بر اساس نتایج پردازش‌های آماری، نقشه‌های ناهنجاری ژئوشیمیایی تک‌عنصری و چندعنصری در محیط نرم‌افزار Arc GIS 10.6 رسم شد و از ترکیب نقشه‌های ژئوشیمیایی رسوب آبراهه‌ای، مناطق امیدبخش معدنی انتخاب شده است. در مرحله کنترل صحرایی ناهنجاری‌های ژئوشیمی رسوب آبراهه‌ای، برای مطالعات سنگ‌ژئوشیمیایی از

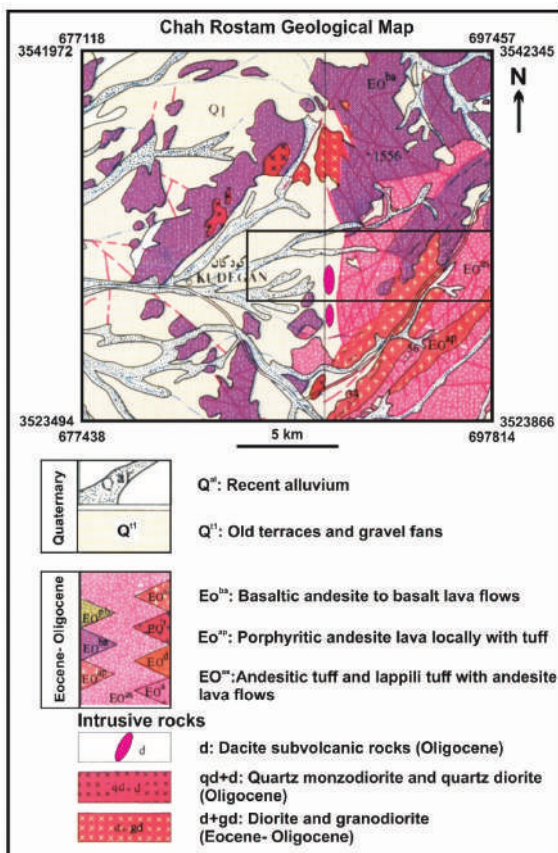
عناصر در محیط پیرامون سامانه‌های کانه‌زایی است. تلفیق یافته‌های ژئوشیمیایی با داده‌های زمین‌شناسی، ژئوفیزیکی، دگرسانی و سنجش از دور برای معرفی پتانسیل‌های کانه‌زایی استفاده می‌شوند (مدبری و همکاران، ۱۴۰۱).

گستره اکتشافی چاه رستم با مساحتی حدود ۴۰ کیلومتر مربع در مختصات جغرافیایی  $34^{\circ} 57' 58''$  تا  $31^{\circ} 06' 55''$  طول شرقی و  $38^{\circ} 53' 31''$  تا  $23' 55''$  عرض شمالی، در نه کیلومتری شمال معدن مس قلعه‌زری، حدود پنج کیلومتری غرب آبادی بصیران، فاصله ۱۰۴ کیلومتری شمال غرب نهبندان در استان خراسان جنوبی واقع است (شکل ۱-الف، ب). مناسب‌ترین راه دسترسی به گستره اکتشافی چاه رستم، جاده قلعه‌زری-بصیران است. گستره چاه رستم بخش کوچکی از چهارگوش زمین‌شناسی ۱:۲۵۰۰۰۰ ده‌سلم (سه‌ندی و همکاران، ۱۳۷۱) و چهارگوش‌های زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ بصیران (بهروزی و همکاران، ۱۳۷۱) و کودکان (بلوریان، ۱۳۸۷) می‌باشد. اکتشافات ژئوشیمیایی سیستماتیک در ورقه‌های ۱:۱۰۰۰۰۰ بصیران و کودکان، ناهنجاری‌های ژئوشیمیایی مس، طلا، سرب، روی و عناصر همراه را در بخش‌هایی از این ورقه‌ها نشان می‌دهد و گستره اکتشافی چاه رستم یکی از مناطق امیدبخش معدنی است (سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۱۳۷۹، ۱۳۸۸). از آنجایی که بر روی ناهنجاری‌های ژئوشیمیایی این ورقه‌ها کنترل‌های صحرایی و چکشی دقیقی انجام نشده است، اکتشافات ژئوشیمیایی رسوب آبراهه‌ای در مقیاس بزرگ‌تر با برداشت تعداد نمونه بیشتر در واحد سطح و کنترل‌های صحرایی با برداشت نمونه‌های سنگ و در نهایت حفر گمانه‌های اکتشافی پتانسیل کانه‌زایی این گستره را آشکار می‌سازد. پهنه مورد بررسی، بخشی از کمان آتشفشانی-نفوذی سنوزویک در بلوک لوت است. این کمربند ماگمایی مستعد شکل‌گیری کانسارهای پورفیری، اسکارن، رگه‌ای چندفلزی، رگه‌ای اپی‌ترمال و ... است. وجود معادن، کانسارها و اندیس‌های شناخته شده مس، طلا، مولیبدن، سرب، روی، آهن و غیره از قبیل معدن مس قلعه‌زری (Karimpour et al., 2005)، کانسارهای طلا-مس پورفیری خویک



شکل ۱. الف) موقعیت گستره اکتشافی چاه رستم در استان خراسان جنوبی، ب) موقعیت جغرافیایی گستره چاه رستم نسبت به شهرهای بیرجند و نهبندان و راه‌های دسترسی به گستره اکتشافی

سن ائوسن-الیگوسن و سنگ‌های نفوذی و نیمه‌نفوذی با ترکیب گرانودیوریت، دیوریت، کوارتز دیوریت، مونزودیوریت و داسیت (ائوسن پسین-الیگوسن) وجود دارد (شکل ۲).



شکل ۲. نقشه زمین‌شناسی گستره اکتشافی چاه رستم (اقتباس شده از نقشه زمین‌شناسی ۱:۲۵۰۰۰ ده سلم (سهندی و همکاران، ۱۳۷۱))

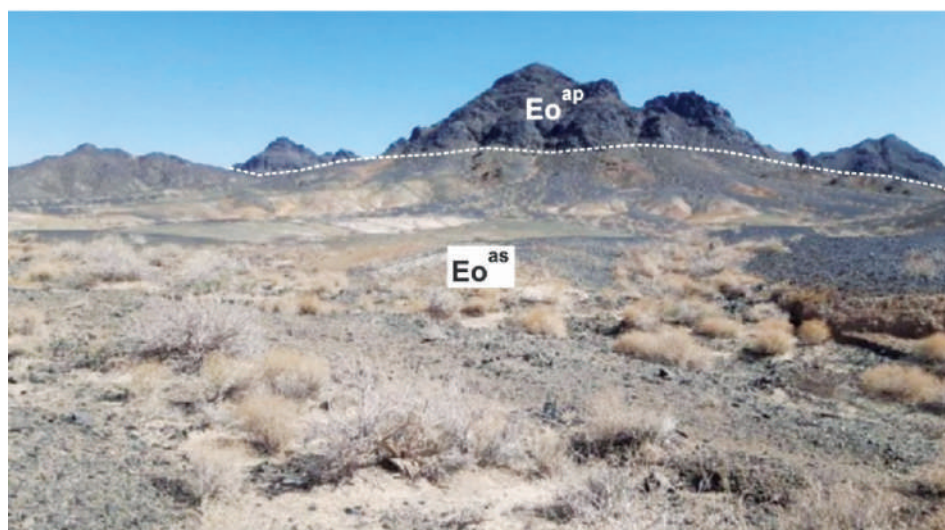
رخنمون کانه‌زائی‌ها و دگرسانی‌ها نمونه‌گیری صورت گرفت. در ادامه، بر اساس یافته‌های ژئوشیمیایی رسوب آبراه‌های و سنگ‌ژئوشیمیایی مرحله اکتشاف چکشی (کنترل ناهنجاری) تعداد چهار گمانه اکتشافی حفر شده است. از مغزه‌های حفاری برای مطالعات سنگ‌نگاری، کانه‌نگاری و سنگ‌ژئوشیمیایی نمونه‌برداری انجام شده است. در نهایت، بر پایه نتایج بررسی‌های ژئوشیمیایی رسوب آبراه‌های، کنترل ناهنجاری و مغزه‌های حفاری، برای ادامه مطالعات در گستره چاه رستم نتیجه‌گیری شده است.

## زمین‌شناسی

گستره اکتشافی چاه رستم، در تقسیم‌بندی پهنه‌های زمین‌ساختی ایران در خردقاره ایران مرکزی و بلوک لوت قرار دارد. این گستره در چهارگوش ۱:۲۵۰۰۰ دهسلم (چاهوک) به شماره K9 (سهندی و همکاران، ۱۳۷۱)، چهارگوش‌های زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰ بصیران به شماره ۷۸۵۳ (بهریزی و همکاران، ۱۳۷۱) و کودکان به شماره ۷۷۵۳ (بلوریان، ۱۳۸۷) قرار دارد. بر پایه اطلاعات نقشه‌های زمین‌شناسی ۱:۲۵۰۰۰ و ۱:۱۰۰۰۰ و مشاهدات صحرایی مطالعه حاضر، در گستره اکتشافی چاه رستم رخنمونی از سنگ‌های آتشفشانی و توف‌های آندزیتی، آندزیت بازالتی و بازالت به

(به صورت توده‌های کوچک و دایک) نیز در این واحد سنگی مشاهده می‌شود. گدازه‌های آندزیتی دارای بافت پورفیری با زمینه میکروولیتی است و متشکل از پلاژیوکلاز، آمفیبول، پیروکسن، آلکالی‌فلدسپار و بیوتیت هستند. کانی‌های فرعی و ثانویه این سنگ‌ها عبارت از آپاتیت، کلریت، اپیدوت، کلسیت و کانی‌های کدر است. سنگ‌های آندزیتی در سطح ظاهری رنگ سبز تا خاکستری تیره دارند. در برخی از رخنمون‌ها، آندزیت‌ها دارای بافت مگاپورفیری است و در بردارنده بلورهای درشت پلاژیوکلاز و آمفیبول می‌باشند.

**سنگ‌های آذرآواری:** این واحد سنگی بر روی نقشه زمین‌شناسی با علامت اختصاری EOas نشان داده شده است، که تناوبی از توف و گدازه آندزیتی به سن ائوسن-الیگوسن است (شکل ۲). این واحد که بیش‌تر در شمال شرق روستای متروکه کودکان گسترش دارد بیش‌تر از سنگ‌های آذرآواری نظیر توف و لاپیلی توف با ترکیب آندزیتی تشکیل شده است و دارای میان‌لایه‌هایی از روانه‌های گدازه آندزیتی و به مقدار کمتر گدازه‌های آندزیت بازالتی است (شکل ۳). در موارد اندک سنگ‌های آذرین نیمه‌عمیق با ترکیب آندزیت



شکل ۳. همبری سنگ‌های آذرآواری با ترکیب توف و لاپیلی توف آندزیتی ( $EO^{as}$ ) با گدازه‌های آندزیتی و آندزیت بازالتی ( $EO^{ap}$ ) در گستره چاه رستم (نگاه به سمت شمال شرق)

درشت کانی‌های فرومنیزین (آمفیبول و پیروکسن) توسط کانی‌های ثانویه پر شده است. کانی‌های فرعی این سنگ‌ها شامل آپاتیت و کانی‌های کدر است. کانی‌های ثانویه نیز شامل سریسیت، کلریت، اپیدوت، کانی‌های رسی و کلسیت می‌باشد. این سنگ‌های گدازه‌ای از نظر ژئوشیمیایی در قلمرو سری کالکوالکال غنی از پتاسیم تا شوشونیتی قرار دارند (بلوریان، ۱۳۸۷).

**سنگ‌های آذرین نفوذی و نیمه‌نفوذی:** در این منطقه، سنگ‌های آذرین نفوذی و نیمه‌نفوذی دارای ترکیب گرانودیوریت، دیوریت، کوارتز دیوریت، مونزودیوریت و داسیت می‌باشند. توده‌های مونزودیوریت و کوارتز دیوریت ( $qd+d$ ) در بخش مرکزی گستره چاه رستم رخنمون دارند (شکل ۲). این سنگ‌ها دارای بافت کاملاً گرانولار و درشت بلور است

**گدازه‌های آندزیتی و آندزیت بازالتی:** این واحد سنگی بر روی نقشه زمین‌شناسی با علامت اختصاری  $EO^{ap}$  نشان داده شده است و متشکل از روانه‌های آندزیتی، تراکی آندزیتی، آندزیت بازالتی با بافت پورفیری و به مقدار کمتر توف آندزیتی به سن ائوسن-الیگوسن است (شکل ۲). این روانه‌های گدازه‌ای با لایه‌بندی مشخص در صحرا دیده می‌شوند. شیب لایه‌بندی گدازه‌های این واحد در حدود ۳۰ درجه به سمت جنوب غربی است و به صورت کاملاً هم‌شیب بر روی واحد آذرآواری ( $EO^{as}$ ) قرار می‌گیرند (شکل ۳). نتایج مطالعات سنگ‌نگاری نمونه‌های این واحد نشان می‌دهد، آندزیت‌ها دارای بافت پورفیری است و درشت بلورهای پلاژیوکلاز و آمفیبول در خمیره ریزدانه از پلاژیوکلاز و آلکالی‌فلدسپار حضور دارند. همچنین قالب بلورهای



و اکسیدهای آهن تشکیل شده است. این سنگ‌ها از نظر ژئوشیمیایی در قلمرو سری کالکوالکالن غنی از پتاسیم قرار دارند. سن این استوک و دایک‌های داسیتی الیگوسن گزارش شده است (سهندی و همکاران، ۱۳۷۱؛ بلوریان، ۱۳۸۷).

## طراحی، نمونه‌برداری و تجزیه ژئوشیمیایی نمونه‌های رسوب آبراه‌های

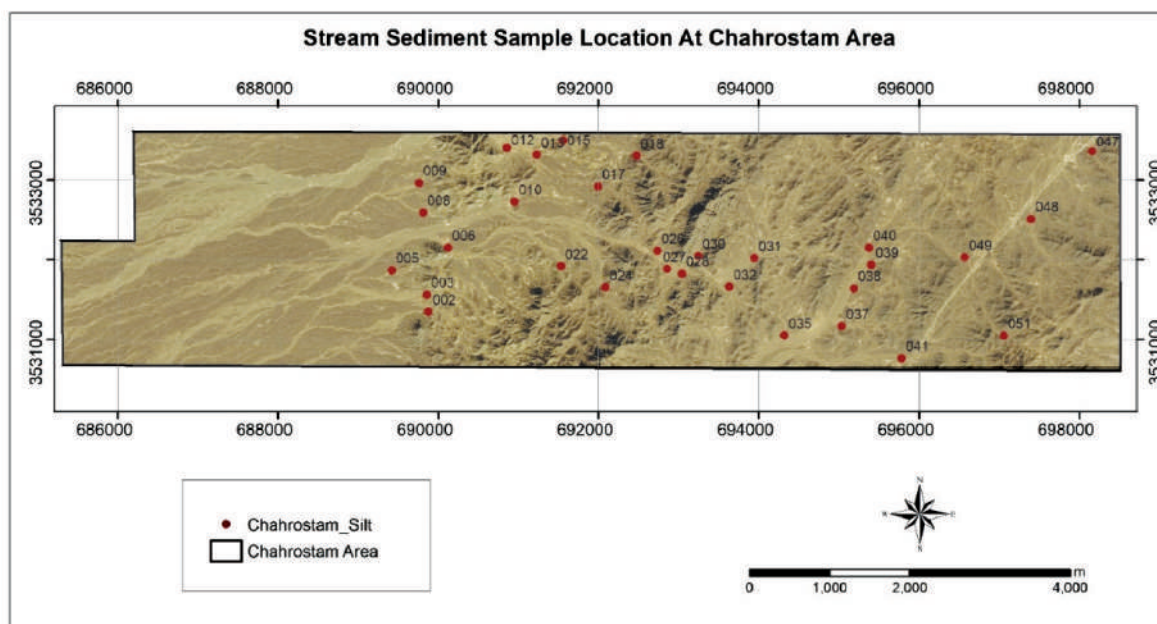
یکی از مراحل مهم و اساسی هر طرح اکتشاف ژئوشیمیایی، طراحی نقاط نمونه‌برداری است و به‌عنوان اساس و پایه مطالعات، بایستی به صورت بهینه انجام گیرد. در این پژوهش، نخست با بررسی نقشه‌های توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰ و تصاویر ماهواره‌ای گستره اکتشافی چاه رستم، حوضه‌های آبریز تکمیل شده است. سپس با استفاده از اطلاعات نقشه زمین‌شناسی منطقه، واحدهای سنگی مستعدکانه‌زایی، توده‌های نفوذی، همبری‌های مهم، دگرسانی‌ها، سامانه‌های گسلی و نقشه ژئومغناطیس هوایی، نمونه‌های رسوب آبراه‌های در حوضه‌های آبریز طراحی شده است. در مجموع، تعداد ۳۶ نمونه رسوب آبراه‌های با تراکم یک نمونه به ازای هر کیلومتر مربع در این گستره تعیین شده است. نقشه موقعیت نمونه‌های رسوب آبراه‌های در محیط نرم‌افزار Arc GIS 10.6 ترسیم شده و مختصات مکانی نقاط نمونه‌برداری استخراج می‌شود. موقعیت نمونه‌های ژئوشیمی رسوب آبراه‌های در گستره چاه رستم در شکل ۴ نشان داده شده است.

به دلیل حساسیت بالای روش‌های ژئوشیمیایی و غلظت‌های پایین عناصر در بخش سیلتی رسوبات آبراه‌های، نمونه انتخابی باید معرف خوبی برای ایستگاه نمونه‌برداری باشد. در گام نخست، محل برداشت نمونه با استفاده از اطلاعات نقشه توپوگرافی و یا با استفاده از دستگاه سامانه موقعیت‌یاب جهانی تعیین می‌شود. در ایستگاه نمونه‌برداری، هر نمونه رسوب آبراه‌ای متشکل از ۲۵ جزء نمونه است و در فاصله حدود ۵۰ متر از محل ایستگاه به سمت بالادست آبراه برداشت می‌شود. جزء نمونه‌ها از بخش‌های غیرفعال واقع در مرکز و نقل آبراه انتخاب می‌شوند. در محل برداشت برای اجتناب از آلودگی‌های احتمالی و حذف مواد آلی بخش

و در سطح رخنمون کمی هوازده هستند. این سنگ‌ها به‌صورت توده‌های کوچک (استوک) در داخل سنگ‌های آتشفشانی تزریق شده‌اند و سنگ‌های پیرامونی را کمی دگرسان کرده‌اند، به‌طوری که تاثیر حرارتی سنگ‌های نفوذی بر سنگ‌های اطراف به‌طور کامل واضح است. این سنگ‌ها از پلاژیوکلاز، آلکالی‌فلدسپار، پیروکسن و بیوتیت تشکیل شده است. کانی‌های فرعی سنگ‌ها آپاتیت، زیرکن و کانی‌های کدر است. این سنگ‌ها از نظر ژئوشیمیایی در قلمرو سری کالکوالکالن غنی از پتاسیم تا شوشونیتی قرار دارند. سن این توده‌ها و استوک‌های نفوذی در چهارگوش‌های زمین‌شناسی ۱:۲۵۰۰۰ ده سلم و ۱:۱۰۰۰۰۰ کودکان الیگوسن گزارش شده است (سهندی و همکاران، ۱۳۷۱؛ بلوریان، ۱۳۸۷). با این وجود، مطالعات سن-سنجی به روش اورانیوم-سرب بر روی کانی زیرکن از سنگ‌های نفوذی مونزونیت و کوارتز مونزونیت در ناحیه کودکان (جنوب بیرجند)، سن‌های تبلور  $40/96 \pm 0/48$  تا  $38/78 \pm 0/78$  میلیون سال (اؤسن-پسن، بارتونین) را برای سنگ‌های نفوذی آشکار می‌سازد (Omidianfar et al., 2020).

توده‌های دیوریت و گرانودیوریتی (d+gd)، در بخش‌های شمال و شمال‌شرق گستره چاه رستم رخنمون دارند (شکل ۲). این سنگ‌ها سالم و غیردگرسان هستند و دارای بافت دانه‌ای می‌باشند. کانی‌های اصلی آن‌ها شامل پلاژیوکلاز، کوارتز، آلکالی‌فلدسپار و هورنبلند است و کانی‌های فرعی و ثانویه آن‌ها از کلریت، اپیدوت، تورمالین و آپاتیت تشکیل شده است. این سنگ‌ها از نظر ژئوشیمیایی در قلمرو سری کالکوالکالن غنی از پتاسیم تا شوشونیتی قرار دارند. سن این توده‌ها و استوک‌های نفوذی اؤسن-پسن الیگوسن گزارش شده است (سهندی و همکاران، ۱۳۷۱؛ بهروزی و همکاران، ۱۳۷۱؛ بلوریان، ۱۳۸۷).

استوک و دایک‌های نیمه‌عمیق داسیتی (d)، واحدهای سنگی دیگر را قطع می‌کنند (شکل ۲). این سنگ‌ها به رنگ روشن با بافت پورفیری و به مقدار کمی دگرسان هستند. کانی‌های اصلی آن‌ها شامل پلاژیوکلاز، هورنبلند و پیروکسن است. زمینه این سنگ‌ها ریزدانه و تا حدودی میکروولیتی است. کانی‌های ثانویه آن‌ها از سربسیت، کلسیت



شکل ۴. نقشه موقعیت مکانی نمونه‌های ژئوشیمی رسوب آبراهه‌ای در گستره اکتشافی چاه رستم

با Zn, Y, V, Sb, Pb, P, Ni, Mo, Mn, Mg, Li, استفاده از روش ICP-OES تجزیه شده است. عنصر طلا نیز به‌طور جداگانه با استفاده از روش غال‌گذاری اندازه‌گیری شده است.

## بحث

### پردازش داده‌های ژئوشیمیایی رسوب آبراهه‌ای

در این پژوهش، پردازش داده‌های ژئوشیمیایی رسوب آبراهه‌ای به ترتیب شامل: بررسی داده‌های سنسورد، تحلیل‌های آماری تک‌متغیره (محاسبه آماره‌های توزیع و رسم نمودارهای هیستوگرام و احتمال توزیع فراوانی عناصر بر پایه داده‌های خام)، شناسایی مقادیر خارج از ردیف و جایگزینی آن‌ها، نرمال‌سازی داده‌ها با استفاده از روش تبدیل لگاریتمی و تحلیل‌های آماری چندمتغیره می‌باشد.

### بررسی داده‌های سنسورد

داده‌های سنسورد به داده‌هایی گفته می‌شود که مقدار آن‌ها بزرگتر از حد بالای حساسیت دستگاه یا کوچک‌تر از حد پایین حساسیت دستگاه باشند. داده‌های سنسورد زمانی ایجاد می‌شوند که روش‌های تجزیه‌ای به اندازه کافی برای ثبت مقادیر کوچک یک عنصر حساس نیستند و یا اینکه روش تجزیه بسیار حساس است و قابلیت ثبت تمرکز بالای

سطحی رسوبات آبراهه‌ای به ضخامت حدود پنج سانتی‌متر کنار زده شده و از بخش رس-سیلنتی نمونه‌گیری انجام می‌شود. تمامی حجم رسوب ۲۵ جزء نمونه در هر ایستگاه با استفاده از الک شماره ۸۰ مش الک می‌شود. از رسوب زیر الک ۸۰ مش به روش تقسیم‌بخشی حدود ۲۵۰ تا ۳۰۰ گرم رسوب برداشت شده و در کیسه‌های پلاستیکی مناسب بسته‌بندی می‌شود و بر روی کیسه نمونه، شماره سریال نمونه یاد داشت می‌شود. برای هر ایستگاه نمونه‌برداری، مشخصاتی از قبیل رنگ رسوب، دانه‌بندی رسوب، جنس غالب قطعات سنگی سازنده رسوب آبراهه‌ای، اثرات کانه‌زایی و دگرسانی در اجزای رسوبات بستر آبراهه، زمین‌شناسی، دگرسانی و کانه‌زایی پیرامون ایستگاه نمونه‌گیری در دفترچه صحرایی یادداشت می‌شود. در ادامه، حدود ۱۵۰ گرم از رسوب زیر ۸۰ مش برای همگن‌سازی تا اندازه زیر ۲۰۰ مش آسیاب می‌شود. در حدود یک تا پنج گرم از نمونه پودر شده در مخلوط اسید نیتریک و اسید هیدروکلریک (تیزاب سلطانی) در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت یک ساعت حل می‌شود. در اثر این شرایط فازهای جذب سطحی، اکسیدی و سولفیدی عناصر حل می‌شود (تخریب شیمیایی جزئی). در گام نهایی، محلول نمونه‌ها برای عناصر La, Fe, Cu, Cr, Co, Ce, Cd, Ca, As, Al, Ag

داده‌های خام حاصل از تجزیه‌های ژئوشیمیایی پس از بررسی و جایگزینی داده‌های سنسورد، در محیط نرم‌افزار IBM SPSS Statistics 25 برای محاسبه پارامترهای آماری توزیع و رسم نمودارهای ستونی و احتمال فراوانی مورد تحلیل قرار گرفت. مهم‌ترین و جامع‌ترین اطلاعات آماری با محاسبه پارامترهای آماری داده‌های یک جامعه قابل دستیابی است. بنابراین برای اطلاع از میانگین غلظت عناصر، نحوه پراکندگی داده‌ها پیرامون میانگین، نوع تابع توزیع و غیره پارامترهای آماری محاسبه می‌شود. پارامترهای آماری عبارت از میانگین، میانه، مد، انحراف معیار، پراش، چولگی، کشیدگی، کمینه، بیشینه و دامنه داده‌ها می‌باشد. در گستره اکتشافی چاه رستم، پارامترهای آماری برای عناصر بر اساس داده‌های ژئوشیمیایی خام محاسبه شده است و نتایج آن در جدول ۱ ارائه شده است. با بررسی داده‌های پارامترهای آماری می‌توان اطلاعات با ارزشی را در ارتباط با رفتار ژئوشیمیایی، شکل تابع توزیع، تهی‌شدگی، غنی‌شدگی و تمرکز غیرعادی عناصر در جامعه بدست آورد. این ویژگی‌ها از نظر ژئوشیمی اکتشافی برای ارزیابی اهمیت عناصر بسیار سودمند می‌باشد. در ادامه، پارامترهای آماری و ویژگی‌های ژئوشیمیایی برخی از عناصر مهم از قبیل نقره و مس در گستره اکتشافی چاه رستم به اختصار شرح داده می‌شود و برای اطلاع از ویژگی و رفتار ژئوشیمیایی عناصر دیگر به داده‌های جدول ۱ مراجعه شود.

**عنصر نقره (Ag):** مقادیر غلظت نقره در نمونه‌های رسوب آبراهه‌ای گستره چاه رستم از کمینه ۰/۲۲ گرم در تن تا بیشینه ۰/۵۷ گرم در تن تغییر می‌کند و مقدار متوسط آن ۰/۲۹ گرم در تن است. در یک توزیع متقارن (نرمال) مقادیر چولگی و کشیدگی به ترتیب ۰ و ۳ می‌باشد. در آماره‌های توزیع عنصر نقره در گستره چاه رستم مقادیر چولگی و کشیدگی توزیع به ترتیب ۲/۹۱ و ۱۲/۲۰ است. بیان از توزیع غیرمتقارن (لاگ‌نرمال) با تمایل به سمت راست (چولگی مثبت) می‌باشد (جدول ۱). وجود نمونه‌های عیار بالا و با فراوانی اندک در یک جامعه آماری عامل اصلی چولگی توزیع به سمت راست می‌باشد. به‌طور معمول در این نوع از جوامع آماری می‌توان ناهنجاری مثبت عناصر را انتظار داشت. لازم

عناصر را ندارد. وجود نمونه‌های دارای مقادیر سنسورد در یک سری داده ژئوشیمیایی، استفاده از نرم‌افزارهای کاربردی را برای تحلیل‌های آماری، زمین‌آماري و رسم نقشه‌های ناهنجاری با مشکل مواجه می‌سازد. بنابراین قبل از شروع پردازش‌های ژئوشیمیایی باید نمونه‌های دارای مقادیر سنسورد شناسایی و جایگزین شوند. برای جایگزینی و اصلاح داده‌های سنسورد از روش‌های جایگزینی ساده، ترسیمی و بیشترین درست‌نمایی کوهن استفاده می‌شود (حسنی پاک و شرف‌الدین، ۱۳۸۰). در روش جایگزینی ساده، مقادیر کمتر از حد حساسیت دستگاه با ۳/۴ حد حساسیت پایین و مقادیر بیشتر از حد حساسیت دستگاه با ۴/۳ حد حساسیت بالا جایگزین می‌شود. روش جایگزینی ساده زمانی نتایج قابل قبولی خواهد داشت و درصد نمونه‌های دارای مقادیر سنسورد در سری داده‌ها کمتر از ۱۰ درصد کل داده‌ها باشد. در این مطالعه، حد قابل ثبت روش‌های اندازه‌گیری برای عنصر طلا پنج میلی‌گرم در تن، عناصر نقره، آرسنیک، مولیبدن، آنتیموان، کادمیوم و ایتیریم پنج دهم گرم در تن، سرب، کبالت، کروم، مس، لانتانیم، لیتیم، نیکل، سرب، وانادیم و روی یک گرم در تن، منگنز، فسفر و توریم پنج گرم در تن، گوگرد ۵۰ گرم در تن و آلومینیم، کلسیم، آهن و منیزیم ۱۰۰ گرم در تن هستند. در این پژوهش، مقادیر غلظت عنصر طلا در تمامی نمونه‌های رسوب آبراهه‌ای کمتر از پنج میلی‌گرم در تن بوده است و این عنصر از روند پردازش‌های آماری و رسم نقشه‌های ناهنجاری حذف شده است. مقدار غلظت عنصر مولیبدن در نمونه‌های رسوب آبراهه‌ای شماره‌های ۵، ۱۸، ۲۲، ۲۸، ۳۸، ۴۱، ۴۷ و ۵۲ کمتر از پنج دهم گرم در تن هستند و با ۳/۴ حد حساسیت دستگاه (یعنی ۰/۳۷۵) جایگزین شده است. عناصر دیگر فاقد داده سنسورد می‌باشند.

### تحلیل‌های آماری تک‌متغیره

در مطالعات آماری تک‌متغیره، پردازش بر روی مقادیر یک متغیر بدون در نظر گرفتن بقیه متغیرها صورت می‌گیرد. این مطالعات شامل محاسبه پارامترهای آماری و رسم نمودارهای ستونی و احتمال فراوانی است. تمامی

به ذکر است، همیشه ناهنجاری مثبت یک عنصر در یک پهنه دلیل بر وجود کانه‌زایی نیست، برای اینکه در مواردی وجود خطا در نمونه‌برداری، آماده‌سازی و تجزیه ژئوشیمیایی نمونه‌ها، پردازش نادرست، انواع آلودگی‌ها و فرآیندهای سنگ‌ساز سبب ایجاد ناهنجاری‌های بی‌اهمیت می‌شوند. با کنترل صحرایی و نمونه‌برداری از گستره ناهنجاری‌ها می‌توان ناهنجاری‌های مرتبط با کانه‌زایی را از انواع بی‌اهمیت و

دروغین تشخیص داد. نمودارهای ستونی فراوانی و احتمال عنصر نقره نیز همانند داده‌های جدول پارامترهای آماری (جدول ۱)، شکل نامتقارن توزیع و تمایل آن به سمت راست را نشان می‌دهد (شکل ۵-الف، ب). در گستره چاه رستم، میانگین نقره در جامعه رسوب آبراهه‌ای (۰/۲۹ گرم در تن) در مقایسه با متوسط فراوانی پوسته‌ای آن (۰/۰۷۵ گرم در تن) در حدود چهار برابر غنی‌شدگی نشان می‌دهد.

جدول ۱. پارامترهای آماری عناصر بر پایه داده‌های خام ژئوشیمی رسوب آبراهه‌ای در گستره چاه رستم (گرم در تن)

| Statistics-raw data | Ag    | Al      | As    | Ca       | Cd    | Ce    | Co   | Cr    | Cu   | Fe       | La    | Li    | Mg      | Mn    | Mo    | Ni    | P     | Pb   | Sb   | V     | Y     | Zn   |    |
|---------------------|-------|---------|-------|----------|-------|-------|------|-------|------|----------|-------|-------|---------|-------|-------|-------|-------|------|------|-------|-------|------|----|
| Mean                | 0.29  | 21285   | 10.05 | 38074    | 0.19  | 30    | 18   | 59    | 40   | 43089    | 15    | 15    | 13483   | 807   | 0.49  | 52    | 625   | 13   | 0.91 | 160   | 10    | 82   |    |
| Median              | 0.27  | 20640   | 8.90  | 38964    | 0.19  | 31    | 18   | 60    | 39   | 43934    | 15    | 15    | 13268   | 820   | 0.52  | 53    | 621   | 14   | 0.92 | 170   | 10    | 84   |    |
| Mode                | 0.26  | 19223   | 8.00  | 30680    | 0.19  | 31    | 15   | 60    | 39   | 33217    | 15    | 16    | 13448   | 708   | 0.38  | 53    | 609   | 6    | 0.92 | 106   | 10    | 71   |    |
| Std. Deviation      | 0.06  | 1871    | 3.66  | 3313     | 0.01  | 2     | 2    | 6     | 9    | 6498     | 1     | 1     | 1020    | 83    | 0.07  | 3     | 39    | 9    | 0.05 | 39    | 0     | 10   |    |
| Variance            | 0.00  | 3502497 | 13.38 | 10974300 | 0.00  | 3     | 6    | 36    | 87   | 42218580 | 1     | 2     | 1040186 | 6905  | 0.00  | 9     | 1540  | 78   | 0.00 | 1509  | 0     | 95   |    |
| Skewness            | 2.91  | 1.40    | 1.63  | -0.50    | 0.11  | -0.57 | 0.63 | 0.01  | 1.34 | 0.06     | -0.28 | -0.68 | 0.98    | 0.12  | -1.03 | -1.56 | 0.29  | 1.61 | 0.32 | 0.05  | -1.04 | 0.48 |    |
| Kurtosis            | 12.20 | 2.01    | 2.80  | -0.69    | -0.35 | 0.82  | 0.41 | -0.68 | 1.30 | -1.29    | -0.15 | -0.24 | 1.86    | -1.19 | -0.22 | 3.90  | -0.41 | 4.02 | 1.71 | -1.17 | -0.98 | 0.01 |    |
| Range               | 0.35  | 7699    | 17.60 | 12881    | 0.04  | 9     | 10   | 24    | 37   | 21615    | 5     | 5     | 5119    | 288   | 0.24  | 16    | 157   | 41   | 0.27 | 128   | 1     | 41   |    |
| Minimum             | 0.22  | 19223   | 4.50  | 30680    | 0.17  | 25    | 15   | 46    | 30   | 33217    | 12    | 12    | 11302   | 692   | 0.38  | 41    | 554   | 5    | 0.79 | 106   | 9     | 68   |    |
| Maximum             | 0.57  | 26922   | 22.10 | 43561    | 0.21  | 34    | 25   | 70    | 67   | 54832    | 17    | 17    | 16421   | 980   | 0.61  | 57    | 711   | 46   | 1.06 | 234   | 10    | 109  |    |
| Percentiles         | 25    | 0.26    | 19956 | 8.00     | 35284 | 0.18  | 29   | 15    | 54   | 33       | 36047 | 14    | 14      | 12959 | 714   | 0.50  | 51    | 598  | 6    | 0.87  | 118   | 9    | 73 |
|                     | 50    | 0.27    | 20640 | 8.90     | 38964 | 0.19  | 31   | 18    | 60   | 39       | 43934 | 15    | 15      | 13268 | 820   | 0.52  | 53    | 621  | 14   | 0.92  | 170   | 10   | 84 |
|                     | 75    | 0.31    | 22368 | 10.70    | 40395 | 0.20  | 32   | 20    | 64   | 43       | 48659 | 16    | 16      | 13855 | 871   | 0.53  | 54    | 655  | 18   | 0.94  | 189   | 10   | 89 |

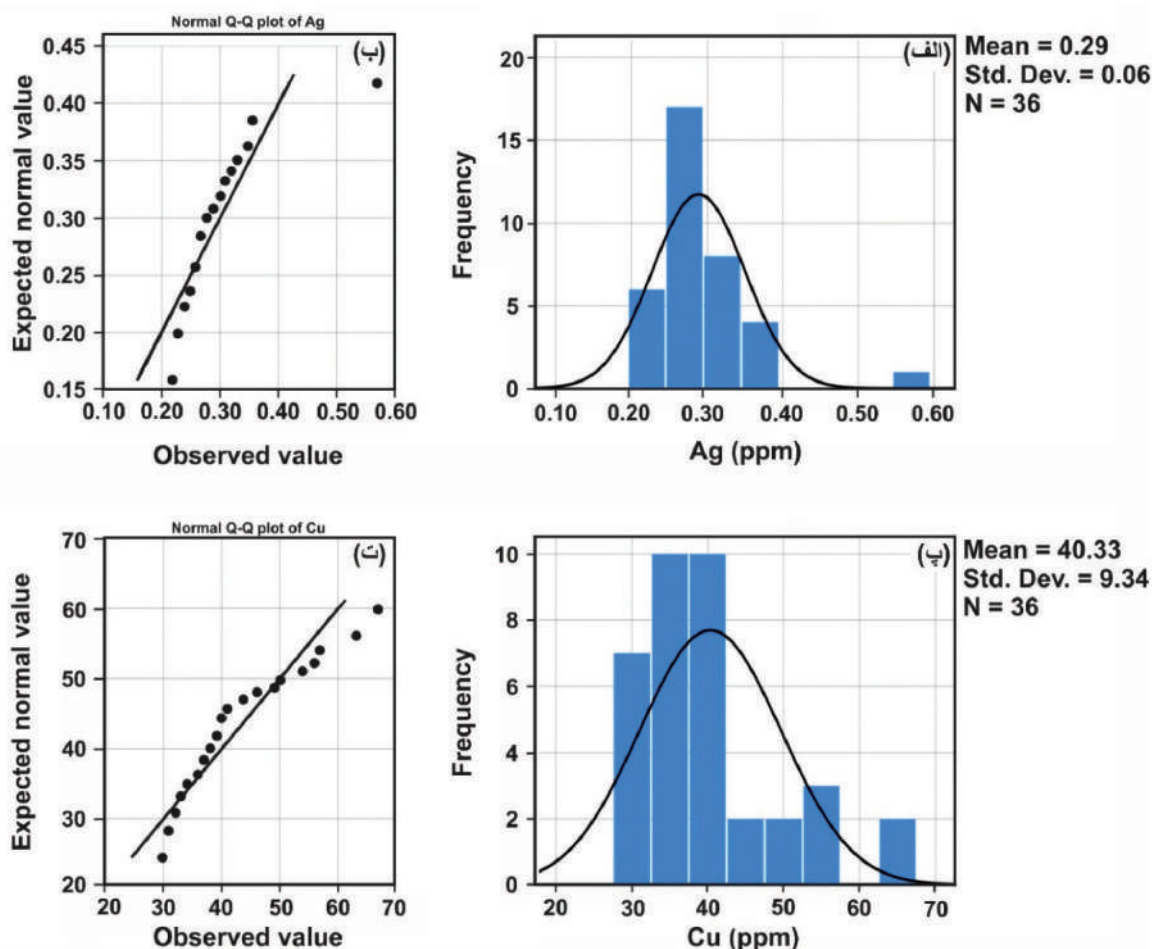
گفته می‌شود. مقادیر خارج از ردیف گاهی به دلیل وجود خطاهای تجربی از قبیل خطا در تجزیه شیمیایی نمونه‌ها ایجاد می‌شود و در مواردی نیز به دلیل ناهمگنی‌های موجود در جامعه داده‌های اکتشافی بروز می‌کند. به‌طوری که وجود مقادیر غلظت بسیار بالا و پایین در سری داده‌های ژئوشیمیایی، مقادیر خارج از ردیف مثبت و منفی را سبب می‌شوند. بنابراین می‌توان گفت نمونه‌های ناهنجار، جامعه مقادیر خارج از ردیف را تشکیل می‌دهند. وجود مقادیر خارج از ردیف شکل تابع توزیع داده‌ها را از حالت نرمال خارج می‌کند و به سمت‌های مقادیر کرانه‌ای منحرف می‌سازد (حسنی پاک و شرف‌الدین، ۱۳۸۰). وجود مقادیر خارج از رده می‌تواند دلالت بر رخداد پدیده‌های زمین‌شناسی خاصی مثل کانه‌زایی یا غنی‌شدگی باشد. از آن جایی که اساس جداسازی ناهنجاری‌ها و تخمین ذخیره در اکتشافات ژئوشیمیایی بر فرض نرمال بودن داده‌ها استوار است و داده‌های ژئوشیمیایی به‌طور طبیعی ماهیت لاگ‌نرمال دارند، از اینرو توصیه می‌شود، نمونه‌های دارای مقادیر خارج از ردیف شناسایی شده و به وسیله مقادیر مناسب جایگزین

عنصر مس (*Cu*): مقادیر غلظت مس در نمونه‌های رسوب آبراهه‌ای گستره چاه رستم از کمینه ۳۰ گرم در تن تا بیشینه ۶۷ گرم در تن تغییر می‌کند و مقدار متوسط آن ۴۰ گرم در تن است. در پارامترهای آماری توزیع عنصر مس در گستره چاه رستم مقادیر چولگی و کشیدگی توزیع به ترتیب ۱/۳۴ و ۱/۳۰ است. بیان از توزیع غیرمتقارن (لاگ‌نرمال) با تمایل کمی به سمت راست (چولگی مثبت) می‌باشد (جدول ۱). وجود نمونه‌های عیار بالا و با فراوانی اندک مس در جامعه آماری عامل چولگی توزیع به سمت راست می‌باشد. نمودارهای ستونی فراوانی و احتمال عنصر مس نیز همانند داده‌های جدول پارامترهای آماری (جدول ۱)، شکل نامتقارن توزیع و تمایل آن به سمت راست را نشان می‌دهد (شکل ۵-پ، ت). در گستره چاه رستم، میانگین مس در جامعه رسوب آبراهه‌ای (۴۰ گرم در تن) نزدیک به متوسط فراوانی پوسته‌ای آن (۵۰ گرم در تن) است.

### شناسایی مقادیر خارج از ردیف و جایگزینی آن‌ها

در مباحث آماری به مقادیری که به‌طور معنی‌داری نسبت به سایر مقادیر اختلاف دارند، مقادیر خارج از ردیف





شکل ۵. الف) نمودار ستونی فراوانی نقره، ب) نمودار احتمال فراوانی نقره، پ) نمودار ستونی فراوانی مس، ت) نمودار احتمال فراوانی مس. این نمودارها بر پایه داده‌های خام ژئوشیمی رسوب آبراهه‌ای رسم شده‌اند و نبود تقارن توزیع‌ها و تمایل آن‌ها به سمت راست آن مشخص است

۰/۵۷ محاسبه می‌شود. بدین ترتیب مقدار میانگین ( $\bar{X}$ ) برابر با ۰/۲۸ و مقدار انحراف معیار ( $S$ ) برابر با ۰/۳۸ می‌باشد. برای تعداد ۳۶ نمونه رسوب آبراهه‌ای بر اساس روش دورفل مقدار پارامتر  $g$  نیز برابر چهار می‌باشد. اگر بر اساس رابطه (۱) مقدار  $XA$  یعنی ۰/۵۷ بزرگ‌تر و یا مساوی مقدار عبارت  $X + (S \times g)$  باشد، مقدار ۰/۵۷ خارج از ردیف است و باید با حد آستانه‌ای مقادیر خارج از ردیف جایگزین شود.

$$XA \geq X + (S \times g) = 0.57 \geq 0.28 + (0.038 \times 4) = 0.57 \geq 0.43 \quad (1)$$

با توجه به اینکه مقدار ۰/۵۷ بزرگ‌تر از مقدار ۰/۴۳ است، پس نتیجه می‌شود که ۰/۵۷ مقدار خارج از ردیف است و باید جایگزین شود. در ادامه، مقدار ۰/۳۶ در نمونه‌های S-31 و S-32 بیش‌ترین مقدار هستند. در این مرحله میانگین و

روش‌های مختلفی برای شناسایی و جایگزینی مقادیر خارج از ردیف وجود دارد و در این تحقیق از روش دورفل استفاده شده است. در روش دورفل حد آستانه‌ای مقادیر خارج از ردیف برای عنصر مورد نظر محاسبه می‌شود و غلظت عنصر در نمونه‌های خارج از ردیف به وسیله حد آستانه‌ای مقادیر خارج از ردیف جایگزین می‌شود (حسنی‌پاک و شرف‌الدین، ۱۳۸۰). به‌عنوان مثال در این پژوهش برای شناسایی نمونه‌های دارای مقادیر خارج از ردیف عنصر نقره، نخست داده‌های ژئوشیمیایی نقره به صورت صعودی مرتب شده است. مقدار ۰/۵۷ گرم در تن در نمونه رسوب آبراهه‌ای شماره S-39 بیش‌ترین مقدار برای عنصر نقره است. برای اثبات اینکه مقدار ۰/۵۷ یک مقدار خارج از ردیف است، میانگین و انحراف معیار جامعه نقره بدون در نظر گرفتن

انحراف معیار جامعه نقره بدون در نظر گرفتن مقادیر ۰/۵۷ و ۰/۳۶ محاسبه می‌شود. بدین ترتیب مقادیر میانگین (X) برابر با ۰/۲۷۶ و انحراف معیار (S) برابر با ۰/۰۳۴ می‌باشد. برای تعداد ۳۶ نمونه رسوب آبراهه‌ای بر اساس روش دورفل مقدار پارامتر  $g$  نیز برابر چهار می‌باشد. اگر بر اساس رابطه (۲) مقدار  $XA$  یعنی ۰/۳۶ بزرگ‌تر و یا مساوی مقدار عبارت  $(X+S \times g)$  باشد، مقدار ۰/۳۶ خارج از ردیف است و باید با حد آستانه‌ای مقادیر خارج از ردیف جایگزین شود.

$$XA \geq X + (S \times g) = 0.36 \geq 0.276 + (0.034 \times 4) = 0.36 \geq 0.41 \quad (2)$$

از آن جایی که مقدار ۰/۳۶ کوچک‌تر از مقدار

برای عنصر نقره در نمونه‌های S-31 و S-32 خارج از ردیف نبوده و نیاز به جایگزینی ندارد. بنابراین حد آستانه‌ای مقادیر خارج از ردیف برای عنصر نقره در این جامعه مقدار ۰/۴۳ است و مقدار ۰/۵۷ در نمونه S-39 با مقدار ۰/۴۳ جایگزین شده است. در این پژوهش، مقادیر خارج از ردیف همانند عنصر نقره، برای سایر عناصر با استفاده از روش دورفل شناسایی شده، جایگزین شده است و نتایج آن در جدول ۲ آورده شده است. لازم به ذکر است که عناصر کلسیم، کادمیم، سرب، کروم، کبالت، آهن، لانتانیم، لیتیم، منگنز، نیکل، فسفر، وانادیم، ایتیم و روی بر اساس روش دورفل فاقد مقدار خارج از ردیف تشخیص داده شده‌اند.

جدول ۲. نمونه‌های دارای مقادیر خارج از ردیف در برخی از عناصر و مقادیر جایگزینی آن‌ها به روش دورفل

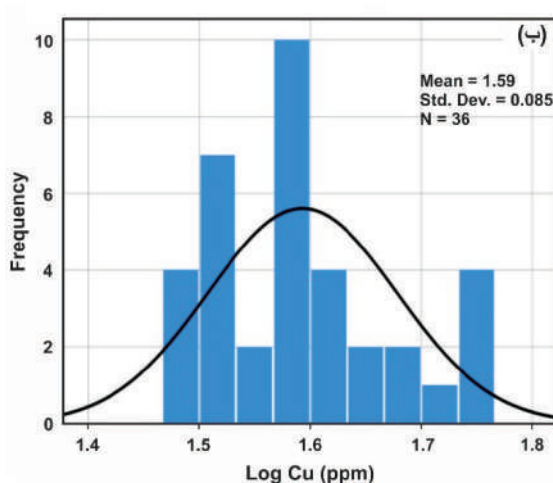
| مقدار جایگزین | شماره نمونه‌های رسوب آبراهه‌ای (مقدار خارج از ردیف بر حسب ppm)         | عنصر |
|---------------|------------------------------------------------------------------------|------|
| ۰/۴۳          | S-39 (0.57 ppm)                                                        | Ag   |
| ۲۴۵۵۰         | S-46 (26922 ppm), S-47 (26316 ppm)                                     | Al   |
| ۱۷/۵          | S-08 (22.10 ppm), S-06 (6.90 ppm)                                      | As   |
| ۵۸            | S-20 (67 ppm), S-8 (63 ppm)                                            | Cu   |
| ۱۴۵۰۰         | S-47 (16421 ppm), S-52 (15738 ppm), S-46 (15676 ppm), S-39 (15074 ppm) | Mg   |
| ۰/۵۷          | S-08 (0.61 ppm)                                                        | Mo   |
| ۳۰            | S-08 (46 ppm)                                                          | Pb   |
| ۰/۹۸          | S-49 (1.06 ppm), S-39 (1.03 ppm)                                       | Sb   |

## نرمال‌سازی داده‌های ژئوشیمیایی رسوب آبراهه‌ای با روش تبدیل لگاریتمی

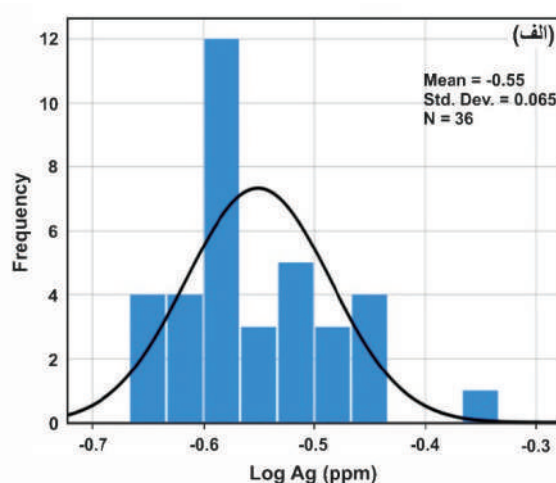
بیشتر جوامع آماری که در پروژه‌های اکتشافی با آن‌ها سر و کار داریم، غیرنرمال هستند و دارای چولگی مثبت می‌باشند. این قبیل جوامع دارای مقادیر عیار بالا در کرانه سمت راست توزیع هستند و به جامعه زمینه یا جامعه با عیار میانگین کانسار اضافه شده‌اند. این مقادیر غیرعادی بالا در واقع ناهنجاری‌ها (در اکتشافات ناحیه‌ای) و یا پیکره‌های کانسنگ پریکار (در اکتشافات عمومی و تفصیلی) را شامل می‌شوند. وجود مقادیر عیار بالا در بین داده‌ها سبب می‌شود تا از یک طرف نتایج غیرواقعی در مورد میانگین عیار جامعه به دست آید و از طرف دیگر برنامه‌ریزی اکتشافی و استخراجی

بهینه غیرممکن شود. از آن جایی که بیشتر روش‌های آماری مورد استفاده در اکتشافات ژئوشیمیایی ناحیه‌ای (مرحله شناسایی و ثبت ناهنجاری‌های ژئوشیمیایی مرتبط با کانه‌زایی) و محلی (تعیین شکل، ابعاد و ارزیابی ذخیره کانسنگ) فرض نرمال بودن توزیع داده‌ها را به همراه دارند، از اینرو این مقادیر غیرعادی عیار بالا به عنوان مقادیر خارج از ردیف شناسایی شده و تصحیح می‌شوند. اگر با شناسایی و تصحیح مقادیر خارج از ردیف توزیع داده‌ها نرمال نشود، در این شرایط می‌توان با استفاده از توابع تبدیل مختلف از قبیل تبدیل لگاریتمی طبیعی، نمودار احتمال لگاریتمی،

گام بعدی با استفاده از روش لگاریتمی، تمامی داده‌ها طوری تبدیل یافته‌اند، که مقادیر تبدیل یافته آن‌ها به توزیع نرمال و مقادیر چولگی و کشیدگی آن‌ها به ترتیب به اعداد صفر و سه نزدیک شود. به عنوان مثال نمودارهای ستونی فراوانی عناصر نقره و مس بر پایه داده‌های تبدیل یافته به روش لگاریتمی در شکل (۶-الف، ب) آورده شده است. به طوری که از این شکل‌ها مشخص است با شناسایی و تصحیح مقادیر خارج از ردیف و تبدیل لگاریتمی، شکل تابع توزیع عناصر نقره و مس به حالت نرمال نزدیک شده است.



نمودار فینی، تبدیل لگاریتمی سه پارامتری و تبدیل کاکس و باکس، داده‌ها را طوری تبدیل کرد که مقادیر تبدیل یافته آن‌ها دارای توزیع نرمال باشد (حسنی‌پاک و شرف‌الدین، ۱۳۸۰). از خصوصیات یک توزیع نرمال می‌توان چولگی صفر، کشیدگی در حد سه، انطباق سه آماره میانگین، میانه و مد، شکل زنگوله‌ای منحنی توزیع و ... را نام برد. در این پژوهش برای نرمال‌سازی داده‌ها و نزدیک کردن شکل توزیع به حالت نرمال، در گام نخست مقادیر خارج از ردیف شناسایی شده و به وسیله مقادیر مناسب جایگزین شده‌اند (جدول ۲). در



شکل ۶. الف) نمودار ستونی فراوانی نقره، ب) نمودار ستونی فراوانی مس بر پایه داده‌های ژئوشیمی رسوب آبراهه‌ای تبدیل یافته به روش لگاریتمی که به حالت نرمال و متقارن نزدیک شده‌اند

## تحلیل عاملی

عناصر است. در حقیقت، هدف از تحلیل عاملی تشخیص متغیرهای کنترل‌کننده اصلی از متغیرهای کم‌اهمیت است، به طوری که با حداقل تعداد متغیرهای عاملی، بیش‌ترین تغییرپذیری بین داده‌ها را توجیه کرد و سهم نسبی هر یک از متغیرهای عاملی را در توجیه تغییرپذیری مشخص کرد. به تجربه ثابت شده است که تحلیل عاملی، روش مناسبی برای کاهش داده‌ها در اکتشافات ژئوشیمیایی است.

در گستره اکتشافی چاه رستم، تحلیل عاملی بر روی ۲۲ عنصر در ۳۶ نمونه رسوب آبراهه‌ای و براساس داده‌های تبدیل یافته به روش لگاریتمی انجام شده است. در روش عاملی برای ارزیابی درجه اعتبار تحلیل چندمتغیره از آزمون KMO و بارتلت استفاده می‌شود. هر چقدر مقدار KMO

تحلیل عاملی یک روش آماری چندمتغیره برای بررسی و مطالعه همزمان تغییرات متغیرهای مورد بررسی در یک جامعه آماری، انعکاس نحوه تغییرات آن‌ها و روشی برای کاهش تعداد متغیرها است. تحلیل عاملی شامل محاسبه ضرایب همبستگی بین متغیرها، تعیین تعداد عامل‌ها و روش محاسبه آن‌ها، دوران عامل‌ها و اعمال تبدیلاتی خاص بر روی آن‌ها است. مهم‌ترین مسئله در تحلیل عاملی، اصل بیان همبستگی بین مقادیر غلظت عناصر به منظور نمایش الگوی تغییرات همزمان آن‌ها در یک مکان است. هدف‌های اساسی در انجام تحلیل عاملی شامل: الف) محاسبه تمامی عامل‌ها و شناسایی عامل‌های معتبر و ب) تعیین سهم نسبی هر یک از عامل‌ها در به وجود آمدن تغییرات توزیع

به عدد یک نزدیک باشد بیانگر درجه بالای اهمیت تحلیل فاکتوری است. در بررسی حاضر مقدار KMO برابر با ۰/۷۰ محاسبه شده است که اعتبار تجزیه عاملی انجام شده را در حد خوب نشان می‌دهد. در ضمن، در تحلیل عاملی برای اعتبارسنجی، درصد مشارکت هر یک از متغیرها نیز محاسبه می‌شود. اگر میزان درصد مشارکت متغیرها به عدد یک نزدیک‌تر باشد درجه اعتبار کار چندمتغیره بیش‌تر خواهد بود. در این پژوهش، درصد مشارکت برای بسیاری از عناصر بیش از ۰/۸۰ است و برای عناصر نقره، کادمیم و آنتیموان در حدود ۰/۶۰ است و بیان از درجه اعتبار بالای تحلیل فاکتوری است.

بر اساس نتایج تحلیل عاملی، تعداد شش عامل اول، حدود ۸۶ درصد از فراوانی تجمعی جامعه را پوشش می‌دهند و جزء عامل‌های معتبر محسوب می‌شوند. داده‌های جدول ۳ دلالت بر آن دارد که مولفه اول قادر است حدود ۴۳/۴۰ درصد از کل تغییرپذیری را توجیه کند. این مقدار برای مولفه دوم افت دارد و به حدود ۱۸/۶۱ درصد رسیده است. مولفه‌های سوم، چهارم، پنجم و ششم به ترتیب در بردارنده ۶/۸۲، ۶/۴۰، ۵/۸۳ و ۴/۵۸ درصد از کل تغییرپذیری هستند. در مجموع، شش عامل اول توانسته است در حدود ۸۶ درصد فراوانی جامعه را پوشش دهند.

جدول ۳. محاسبه درصد پراش و درصد تجمعی پراش هر یک از عناصر در تحلیل عاملی داده‌های ژئوشیمی رسوب آبراهه‌ای

| Component | Initial Eigenvalues |               |              | Extraction Sums of Squared Loadings |               |              | Rotation Sums of Squared Loadings |               |              |
|-----------|---------------------|---------------|--------------|-------------------------------------|---------------|--------------|-----------------------------------|---------------|--------------|
|           | Total               | % of Variance | Cumulative % | Total                               | % of Variance | Cumulative % | Total                             | % of Variance | Cumulative % |
| 1         | 9.55                | 43.39         | 43.39        | 9.55                                | 43.39         | 43.39        | 8.31                              | 37.78         | 37.78        |
| 2         | 4.09                | 18.61         | 62.00        | 4.09                                | 18.61         | 62.00        | 4.26                              | 19.35         | 57.13        |
| 3         | 1.50                | 6.82          | 68.82        | 1.50                                | 6.82          | 68.82        | 2.04                              | 9.28          | 66.41        |
| 4         | 1.41                | 6.40          | 75.22        | 1.41                                | 6.40          | 75.22        | 1.55                              | 7.04          | 73.44        |
| 5         | 1.28                | 5.83          | 81.05        | 1.28                                | 5.83          | 81.05        | 1.53                              | 6.94          | 80.39        |
| 6         | 1.01                | 4.58          | 85.63        | 1.01                                | 4.58          | 85.63        | 1.15                              | 5.24          | 85.63        |
| 7         | 0.69                | 3.13          | 88.76        |                                     |               |              |                                   |               |              |
| 8         | 0.55                | 2.49          | 91.25        |                                     |               |              |                                   |               |              |
| 9         | 0.51                | 2.30          | 93.56        |                                     |               |              |                                   |               |              |
| 10        | 0.38                | 1.73          | 95.28        |                                     |               |              |                                   |               |              |
| 11        | 0.25                | 1.14          | 96.43        |                                     |               |              |                                   |               |              |
| 12        | 0.22                | 0.99          | 97.41        |                                     |               |              |                                   |               |              |
| 13        | 0.19                | 0.87          | 98.28        |                                     |               |              |                                   |               |              |
| 14        | 0.11                | 0.50          | 98.78        |                                     |               |              |                                   |               |              |
| 15        | 0.10                | 0.44          | 99.22        |                                     |               |              |                                   |               |              |
| 16        | 0.08                | 0.35          | 99.57        |                                     |               |              |                                   |               |              |
| 17        | 0.04                | 0.17          | 99.74        |                                     |               |              |                                   |               |              |
| 18        | 0.03                | 0.12          | 99.86        |                                     |               |              |                                   |               |              |
| 19        | 0.02                | 0.08          | 99.94        |                                     |               |              |                                   |               |              |
| 20        | 0.01                | 0.04          | 99.98        |                                     |               |              |                                   |               |              |
| 21        | 0.00                | 0.02          | 99.99        |                                     |               |              |                                   |               |              |
| 22        | 0.001               | 0.007         | 100          |                                     |               |              |                                   |               |              |

در تحلیل‌های آماری چندمتغیره به روش عاملی، دوران عامل‌ها به دو روش عمود و مایل صورت می‌گیرد. دوران‌های عمودی استقلال میان عامل‌ها را حفظ می‌کنند، در حالی که دوران‌های مایل، عامل‌ها را به هم وابسته می‌سازند. در این پردازش آماری با استفاده از روش وریمکس (دوران متعامد) بر روی ضرایب عاملی دوران صورت گرفت. مقادیر ماتریس شش مولفه معتبر برای ۲۲ عنصر، قبل و بعد از دوران عامل‌ها در جدول ۴ آورده شده است. در ماتریس مولفه‌های چرخش یافته، مقادیر بیش‌تر از ۰/۵۰ به عنوان غنی‌شدگی عنصر و مقادیر کمتر از ۰/۵۰- بیانگر فقیرشدگی عنصر در هر عامل می‌باشد. از این‌رو در جدول ماتریس مولفه‌های چرخش یافته برای هر یک از عامل‌های شش‌گانه عناصر غنی شده مشخص شده است (جدول ۴).



جدول ۴. ماتریس مقادیر مولفه‌ها برای تعداد شش عامل قبل و بعد از دوران عامل‌ها به روش وریمکس

| Component Matrix |          |          |          |          |          |          | Rotated Component Matrix |          |          |          |          |          |          |
|------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|--------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Element          | Factor 1 | Factor 2 | Factor 3 | Factor 4 | Factor 5 | Factor 6 | Element                  | Factor 1 | Factor 2 | Factor 3 | Factor 4 | Factor 5 | Factor 6 |
| Ag               | 0.62     | 0.31     | -0.19    | -0.32    | 0.01     | 0.07     | Ag                       | 0.64     | -0.06    | 0.02     | -0.45    | -0.01    | 0.10     |
| Al               | -0.11    | 0.84     | 0.23     | -0.28    | 0.26     | 0.13     | Al                       | 0.27     | -0.68    | -0.45    | -0.10    | 0.50     | -0.06    |
| As               | 0.57     | -0.15    | 0.15     | 0.20     | -0.63    | 0.11     | As                       | 0.32     | 0.16     | 0.82     | -0.01    | 0.08     | 0.06     |
| Ca               | -0.83    | 0.10     | -0.17    | 0.02     | 0.28     | 0.09     | Ca                       | -0.67    | -0.29    | -0.51    | 0.08     | -0.02    | 0.12     |
| Cd               | 0.42     | 0.24     | -0.24    | 0.51     | -0.20    | 0.19     | Cd                       | 0.35     | -0.28    | 0.42     | 0.13     | -0.31    | 0.36     |
| Ce               | 0.20     | -0.85    | 0.21     | -0.10    | 0.31     | 0.04     | Ce                       | 0.02     | 0.93     | -0.13    | 0.22     | 0.05     | 0.02     |
| Co               | 0.92     | 0.32     | 0.07     | 0.03     | -0.05    | 0.03     | Co                       | 0.92     | -0.06    | 0.28     | -0.09    | -0.02    | 0.05     |
| Cr               | 0.84     | 0.20     | 0.19     | 0.22     | 0.33     | -0.06    | Cr                       | 0.92     | 0.05     | 0.01     | 0.26     | -0.12    | 0.01     |
| Cu               | 0.69     | -0.32    | 0.07     | -0.37    | -0.24    | 0.18     | Cu                       | 0.48     | 0.53     | 0.34     | -0.36    | 0.21     | 0.10     |
| Fe               | 0.96     | 0.19     | -0.08    | 0.00     | 0.08     | -0.06    | Fe                       | 0.94     | 0.08     | 0.18     | -0.14    | -0.19    | 0.05     |
| La               | 0.35     | -0.85    | 0.15     | -0.09    | 0.17     | 0.05     | La                       | 0.11     | 0.94     | 0.05     | 0.13     | 0.01     | 0.05     |
| Li               | -0.44    | 0.10     | 0.68     | -0.24    | -0.27    | 0.36     | Li                       | -0.33    | -0.14    | 0.07     | 0.13     | 0.88     | -0.06    |
| Mg               | -0.30    | 0.80     | 0.35     | -0.05    | -0.13    | 0.10     | Mg                       | 0.01     | -0.80    | -0.07    | 0.04     | 0.50     | -0.13    |
| Mn               | 0.96     | 0.15     | 0.00     | 0.09     | -0.02    | -0.02    | Mn                       | 0.91     | 0.10     | 0.31     | -0.05    | -0.14    | 0.06     |
| Mo               | 0.19     | -0.23    | -0.35    | 0.18     | 0.14     | 0.78     | Mo                       | 0.06     | 0.21     | 0.02     | 0.02     | -0.06    | 0.90     |
| Ni               | -0.12    | -0.21    | 0.55     | 0.68     | 0.24     | 0.11     | Ni                       | -0.05    | 0.09     | 0.04     | 0.93     | 0.10     | 0.05     |
| P                | 0.56     | -0.69    | 0.01     | -0.30    | -0.10    | 0.04     | P                        | 0.28     | 0.84     | 0.24     | -0.23    | 0.02     | 0.03     |
| Pb               | 0.81     | -0.11    | 0.22     | 0.13     | -0.17    | -0.25    | Pb                       | 0.69     | 0.28     | 0.45     | 0.10     | -0.10    | -0.23    |
| Sb               | 0.58     | 0.35     | -0.15    | -0.13    | 0.08     | 0.23     | Sb                       | 0.64     | -0.14    | 0.01     | -0.26    | 0.01     | 0.27     |
| V                | 0.94     | 0.22     | -0.10    | 0.04     | 0.14     | -0.10    | V                        | 0.94     | 0.05     | 0.13     | -0.10    | -0.24    | 0.03     |
| Y                | 0.71     | 0.10     | 0.28     | -0.20    | 0.40     | 0.07     | Y                        | 0.82     | 0.22     | -0.21    | 0.03     | 0.18     | 0.01     |
| Zn               | 0.95     | 0.18     | 0.06     | 0.03     | 0.04     | 0.00     | Zn                       | 0.93     | 0.09     | 0.30     | -0.05    | -0.07    | 0.05     |

سنگ‌زایی مرتبط هستند.

**عامل سه:** در عامل سه عناصر مس، روی، سرب، نقره، آرسنیک، آنتیموان، کادمیم و مولیبدن غنی‌شدگی دارند. در ژئوشیمی اکتشافی از آن‌ها به عنوان عناصر معرف و ردیاب برخی از کانه‌زایی‌ها یاد می‌شود. از مجموعه این عناصر به عنوان ردیاب ژئوشیمیایی برای پی‌جویی و اکتشاف کانسارهای با منشأ ماگمایی-گرمابی و گرمابی از قبیل کانسارهای پورفیری، اسکارن‌ها، رگه‌ای چندفلزی گرمابی و رگه‌ای اپی‌ترمال استفاده می‌شود (حسین زاده و همکاران، ۱۴۰۳). بنابراین همیافتی ژئوشیمیایی عناصر در عامل سه با فرایندهای کانه‌زایی ماگمایی-گرمابی در این گستره ارتباط دارد.

**عامل چهار:** در عامل چهار عنصر نیکل و تا حدودی کروم غنی‌شدگی دارد و به‌احتمال از سنگ‌های آتشفشانی با ترکیب آندزیت تا آندزیت بازالت تاثیر می‌پذیرند و با فرآیند سنگ‌زایی مرتبط است. عناصر کانسار ساز از قبیل نقره، مس، روی و آنتیموان در این عامل فقیرشدگی دارند و از نظر کانه‌زایی مهم نیست.

**عامل پنج:** این عامل شامل عناصر آلومینیم، منیزیم و لیتیم است. هم‌یافتی ژئوشیمیایی این عناصر نیز از

در ادامه دلایل همیافتی ژئوشیمیایی و غنی‌شدگی عناصر در هر یک از عامل‌ها به‌طور جداگانه توصیف می‌شود:

**عامل یک:** در عامل یک عناصر آهن، منگنز، کروم، کبالت، وانادیم، نیکل و ایتیریم غنی‌شدگی دارند. همیافتی ژئوشیمیایی این عناصر از سنگ‌های آتشفشانی با ترکیب آندزیت، آندزیت بازالت و بازالت و سنگ‌های نفوذی تا نیمه‌نفوذی با ترکیب مونزودیوریت، گرانودیوریت و دیوریت در گستره چاه رستم تاثیر پذیرفته است و با فرآیندهای سنگ‌زایی مرتبط هستند. از آن‌جایی‌که عناصر کانسار ساز از قبیل مس، روی، سرب، نقره، آرسنیک، آنتیموان، کادمیم و مولیبدن نیز در عامل یک غنی‌شدگی دارند، بنابراین این احتمال وجود دارد، بخشی از بودجه عناصر کانسار ساز در سامانه‌های ماگمایی-گرمابی ناحیه چاه رستم از شستشویی گرمابی سنگ‌های آتشفشانی با ترکیب آندزیت، آندزیت بازالت و بازالت تامین می‌شود.

**عامل دو:** این عامل شامل عناصر سریم، لانتانیم، فسفر و ایتیریم است. همیافتی ژئوشیمیایی این عناصر از سنگ‌های آتشفشانی با ترکیب آندزیت و داسیت و سنگ‌های نفوذی تا نیمه‌نفوذی با ترکیب مونزودیوریت، گرانودیوریت و کوارتز دیوریت در گستره چاه رستم تاثیر پذیرفت و با فرآیندهای

نهایت مقدار انتشار عنصر مورد نظر در محیط ناهنجاری با مقدار زمینه محلی و جهانی آن تعیین کننده می‌باشند.

در اکتشافات ژئوشیمیایی سیستماتیک، توزیع فضایی مقادیر غلظت عناصر به صورت نقشه رسم می‌شود.

در گستره اکتشافی چاه رستم پس از پردازش داده‌های ژئوشیمیایی رسوب آبراهه‌ای، مقادیر حد زمینه، حد آستانه‌ای و حد آنومالی برای عناصر مختلف و عامل‌ها (تحلیل چندمتغیره) محاسبه شده است و در گام بعدی نقشه‌های ناهنجاری ژئوشیمیایی در محیط نرم‌افزار Arc GIS 10.6 رسم شده است. در تهیه نقشه‌ها، تعداد نمونه‌ها، توزیع فضایی نمونه‌ها، روش تخمین و ابعاد شبکه تخمین از اهمیت به سزایی برخوردار می‌باشند. در این پژوهش، برای تعیین حدود ناهنجاری‌ها برای رسم نقشه‌ها از روش کلاسیک  $Md+nS$  استفاده شده است و مقادیر  $Md+1S$ ،  $Md+2S$  و  $Md+3S$  به ترتیب برابر با حدود زمینه، آستانه‌ای و آنومالی در نظر می‌گیرند (جدول ۵). در ترسیم نقشه‌های ناهنجاری عناصر و عامل‌ها مقادیر بزرگ‌تر از مقدار  $Md+3S$  به عنوان ناهنجاری درجه یک (رنگ قرمز)، مقادیر  $Md+2S$  تا  $Md+3S$  به عنوان ناهنجاری درجه دو (رنگ زرد)، مقادیر  $Md+1S$  تا  $Md+2S$  به عنوان ناهنجاری درجه سه (رنگ سبز) و مقادیر کمتر از  $Md+1S$  به عنوان زمینه (رنگ آبی) انتخاب شده است. دلیل انتخاب آماره میانه برای جدایش ناهنجاری‌ها به این خاطر است که میانه در مقایسه با میانگین کمتر در اثر مقادیر کرانه‌ای (مقادیر غلظت بزرگ‌تر و کوچک‌تر) موجود در جامعه نمونه‌ها قرار می‌گیرد (حسنی پاک و شرف‌الدین، ۱۳۸۰).

سنگ‌های آتشفشانی با ترکیب آندزیت، داسیت و آندزیت بازالت و سنگ‌های نفوذی تا نیمه‌نفوذی با ترکیب مونزودیوریت، گرانودیوریت و کوارتز دیوریت در گستره چاه رستم تاثیر گرفتند و با فرایندهای سنگ‌زایی مرتبط هستند.

**عامل شش:** در عامل شش عناصر مولیبدن، آنتیموان و کادمیم به مقدار جزئی غنی‌شدگی دارند و از رخداد کانه‌زایی ماگمایی-گرمابی ناحیه چاه رستم تاثیر گرفتند. بنابراین، عامل شش نیز مولفه کانه‌زایی است ولی در مقایسه با عامل سه از درجه اعتبار و اهمیت پایینی برخوردار است.

## رسم نقشه‌های ناهنجاری ژئوشیمیایی رسوب آبراهه‌ای و انتخاب مناطق امیدبخش

هدف پایانی اکتشافات ژئوشیمیایی رسوب آبراهه‌ای در یک منطقه، تهیه نقشه‌های ناهنجاری ژئوشیمیایی برای عناصر مختلف است و نقش ویژه و ارزنده‌ای در تعیین مناطق امیدبخش معدنی دارند. در انتخاب و معرفی مناطق امیدبخش معدنی، عواملی از قبیل طراحی مناسب موقعیت نمونه‌ها، نمونه‌برداری دقیق، آماده‌سازی و روش تجزیه مفید با حد خطای مجاز، داده‌پردازی و روش‌های مناسب رسم نقشه‌ها بسیار بااهمیت هستند. به‌طور کلی در تعریف یک ناحیه ناهنجاری ژئوشیمیایی پارامترهایی همچون تعداد نمونه‌های ناهنجار با انتشار ناهمگون از هر عنصر، روند گسترش ناهنجاری، وسعت ناهنجاری، محل دقیق نمونه‌های ناهنجاری، هم‌پوشانی ناهنجاری‌های ژئوشیمیایی با یکدیگر و با ناهنجاری‌های ژئوفیزیک هوایی، ساختارهای تکتونیکی، گسترش رخساره‌های سنگی محیط ناهنجار و در

جدول ۵. مقادیر حدود زمینه‌ای، آستانه‌ای و ناهنجاری برای ۱۲ عنصر مهم در گستره اکتشافی چاه رستم (مقادیر غلظت بر حسب گرم در تن)

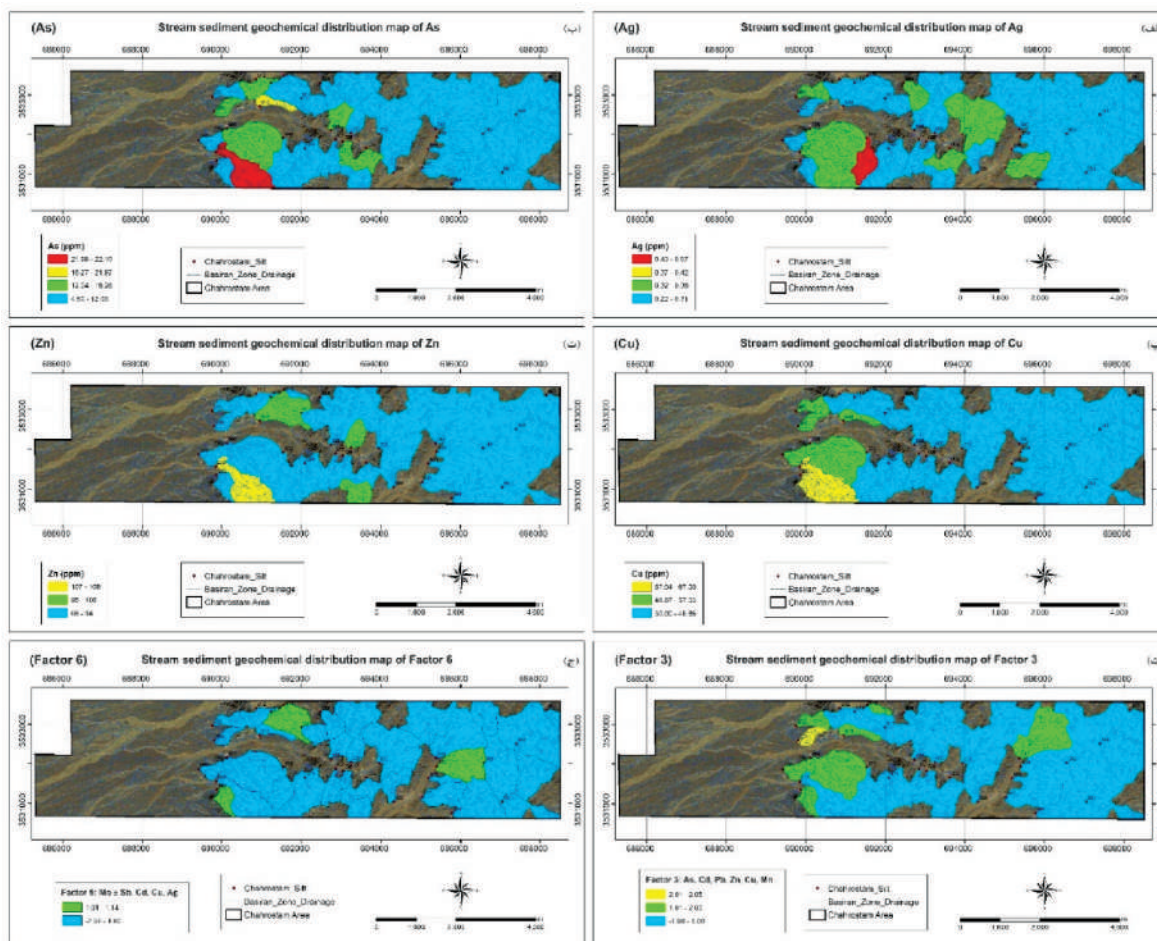
| Ranges | Ag   | As    | Co    | Cr    | Cu    | Fe    | Mn   | Mo   | Ni    | Pb    | Sb   | Zn     |
|--------|------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|-------|-------|------|--------|
| Md+1S  | 0.31 | 12.03 | 20.56 | 65.95 | 46.86 | 51161 | 909  | 0.60 | 55.78 | 25.68 | 0.97 | 94.40  |
| Md+2S  | 0.36 | 16.26 | 23.49 | 73.11 | 57.03 | 59577 | 1007 | 0.70 | 59.27 | 47.09 | 1.01 | 106.09 |
| Md+3S  | 0.42 | 21.97 | 26.83 | 81.03 | 69.42 | 69378 | 1117 | 0.80 | 62.98 | 86.36 | 1.06 | 119.22 |

آهن، منگنز، مولیبدن، نیکل، سرب، آنتیموان و روی) و تعداد شش عامل رسم شده است. با این وجود، در این تحقیق به ارائه نقشه‌های ژئوشیمیایی عناصر مهم از قبیل

در این مطالعه، بر پایه نتایج پردازش‌های آماری تک‌متغیره و چندمتغیره، نقشه‌های ناهنجاری ژئوشیمیایی برای تعداد ۱۲ عنصر (نقره، آرسنیک، کبالت، کروم، مس،

و حوضه‌های بالادست نمونه‌های رسوب آبراهه‌ای شماره‌های ۲۶، ۲۸، ۳۰، ۳۱، ۳۲، ۳۷ که دارای ناهنجاری‌های عنصر نقره، آرسنیک، آنتیموان، روی و فاکتور دو می‌باشند، به‌عنوان ناحیه امیدبخش معدنی شماره دو انتخاب شده است (شکل ۷). در ادامه، برای ارزیابی ناهنجاری‌های ژئوشیمیایی رسوب آبراهه‌ای، در هر دو ناحیه امیدبخش به‌طور همزمان اکتشافات سنگ‌ژئوشیمیایی سیستماتیک سطحی انجام شده است.

نقره، آرسنیک، مس، روی و عامل‌های سه و شش اکتفاء شده است (شکل ۷-الف-ج). از تلفیق نقشه‌های ناهنجاری ژئوشیمیایی تک‌عنصری و عاملی، محیط و حوضه‌های بالادست نمونه‌های رسوب آبراهه‌ای شماره‌های سه، هشت، ۱۰، شش، پنج، دو، نه و ۱۲ به‌عنوان نواحی امیدبخش معدنی یک معرفی شده است. در این نواحی، عناصر مس، آرسنیک، نقره، سرب، روی، منگنز، آهن و عامل سه دارای ناهنجاری‌های مرتبه یک تا سه هستند. علاوه بر این محیط



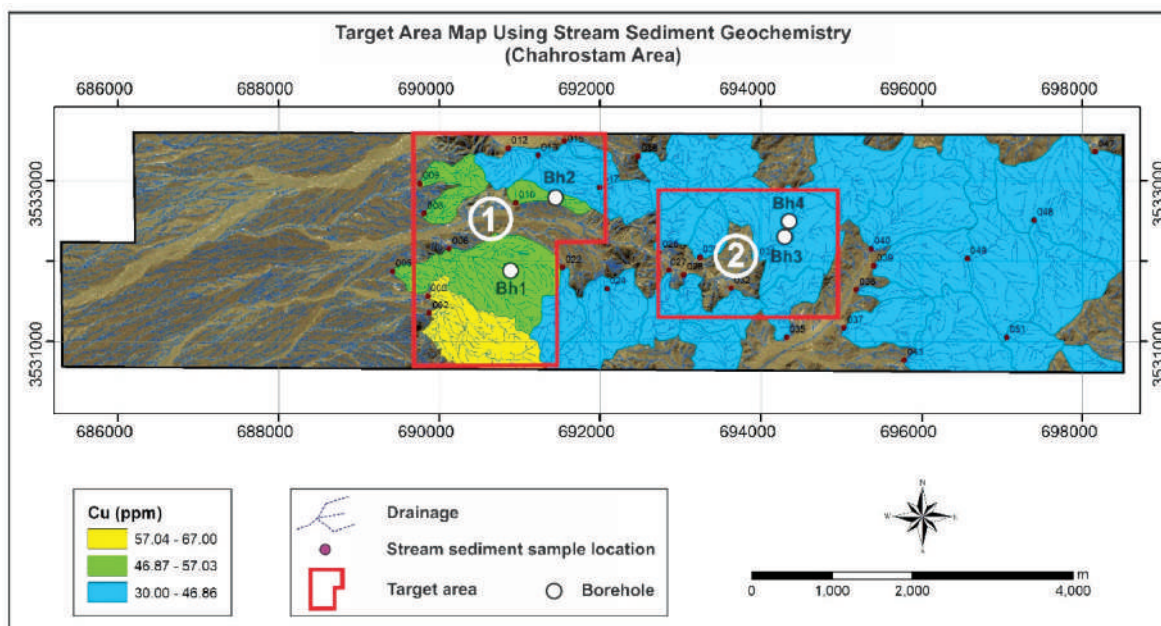
شکل ۷. نقشه‌های توزیع ژئوشیمیایی تک‌عنصری و چندعنصری مهم در بر پایه داده‌های رسوب آبراهه‌ای، (الف نقره، ب آرسنیک، پ مس، ت روی، ث عامل سه و ج عامل شش)

برای ادامه بررسی‌های اکتشافی معرفی شده است. در این دو ناحیه امیدبخش به‌طور همزمان اکتشافات سنگ‌ژئوشیمیایی سیستماتیک سطحی انجام شده است. در مناطق ناهنجاری ژئوشیمی رسوب آبراهه‌ای، تعداد ۳۰۵ نمونه سنگ‌ژئوشیمیایی

## اکتشافات سنگ‌ژئوشیمیایی سیستماتیک سطحی

در گستره چاه رستم، بر اساس پردازش داده‌های ژئوشیمیایی رسوب آبراهه‌ای دو ناحیه امیدبخش معدنی





شکل ۸. نقشه مناطق امیدبخش معدنی بر پایه پردازش داده‌های ژئوشیمیایی رسوب آبراهه‌ای

و عاملی، نواحی امیدبخش برای بررسی‌های زیرسطحی و حفر گمانه‌های اکتشافی آزمایشی انتخاب شده است (شکل ۹).

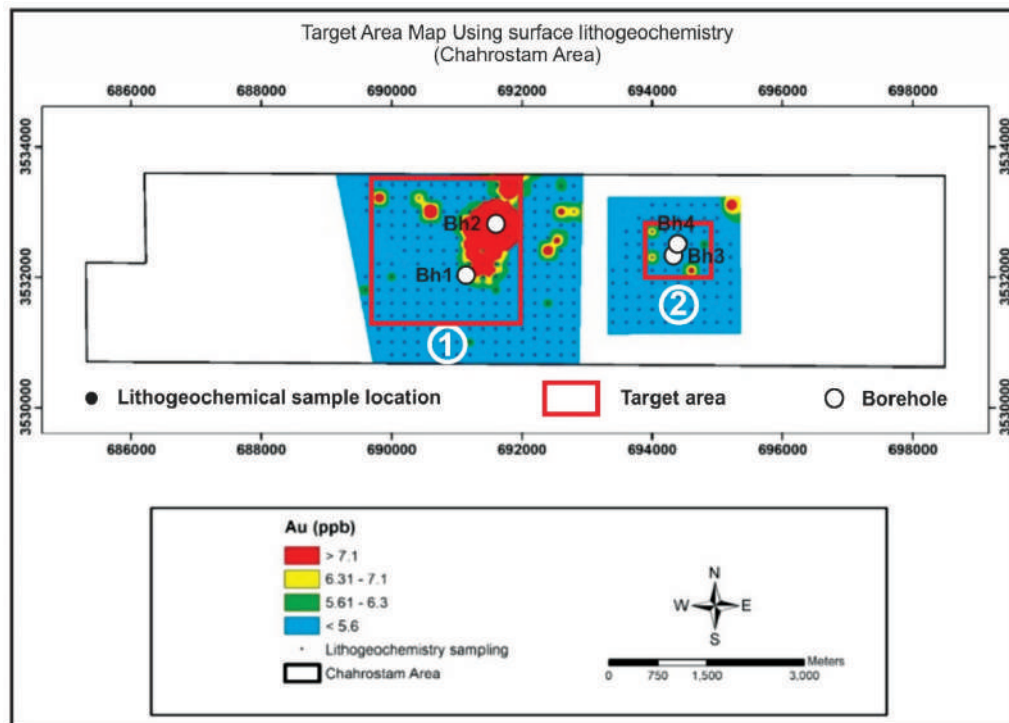
### حفر گمانه‌های اکتشافی برای ارزیابی ناهنجاری‌های ژئوشیمیایی رسوب آبراهه‌ای و سنگ ژئوشیمیایی

در گستره اکتشافی چاه رستم، گمانه‌های اکتشافی آزمایشی در مناطق امیدبخش شماره‌های یک و دو که بر اساس تلفیق یافته‌های زمین‌شناسی، ژئوشیمی رسوب آبراهه‌ای و سنگ ژئوشیمیایی سطحی معرفی شده‌اند، حفر شده است. در منطقه امیدبخش شماره یک، گمانه‌های شماره‌های BH1 و BH2 به ترتیب تا عمق ۲۷۲ و ۶۶ متر و آزمون ۱۸۰ و ۳۰ درجه، و در منطقه امیدبخش شماره دو گمانه‌های شماره‌های BH3 و BH4 به ترتیب تا عمق ۴۶ و ۲۵۹ متر و آزمون ۱۳۵ و ۱۸۰ درجه حفر شده است (شکل‌های ۸ و ۹). در این تحقیق، از چهار گمانه اکتشافی، تعداد ۳۰ نمونه برای تهیه مقاطع نازک و نازک-صیقلی و تعداد ۲۴۹ نمونه برای تجزیه ژئوشیمیایی چندعنصری و طلا برداشت شده است. بر اساس مشاهدات مغزه‌های حفاری و مطالعات سنگ‌نگاری و کانه‌نگاری نمونه‌های

به شکل مربعی و در ابعاد شبکه ۲۰۰ در ۲۰۰ متر طراحی شده است. نمونه‌برداری در هر سلول به روش لپری (قطعه‌ای) هستند. در این روش تعداد ۴۰ تا ۵۰ قطعه کوچک سنگ به ابعاد تقریبی سه تا چهار سانتی‌متر و به وزن کلی حدود سه کیلوگرم از رخنمون واحدهای سنگی انتخاب شده است. تمامی نمونه‌های سنگ پس از خردایش و نرمایش در مخلوط چهار اسید (اسید نیتریک، اسید هیدروکلریک، اسید پرکلریک و اسید هیدروفلوئوریک) حل شده و برای عناصر Ag, Al, As, Ca, Cd, Ce, Co, Cr, Cu, Fe, La, Li, Mg, Mn, Mo, Ni, P, Pb, Sb, V, Y, Zn، با استفاده از روش‌های ICP-OES/MS تجزیه شیمیایی شده است. عنصر طلا نیز به‌طور جداگانه با استفاده از روش غال‌گذاری (F.A.) تجزیه شده است. مقادیر بیشینه غلظت عناصر مهم از قبیل مس، طلا، سرب، روی، مولیبدن، آرسنیک و گوگرد در نمونه‌های سنگ ژئوشیمیایی گستره چاه رستم، به ترتیب ۸۱۵، ۲۵۵، ۴۸۸، ۱۷۹، ۸، ۲۱۵ و ۲۴۰۸ گرم در تن اندازه‌گیری شده است و بیان از غنی‌شدگی قابل ملاحظه مس، طلا و سرب در برخی از نمونه‌های سنگ ژئوشیمیایی دارد. در نهایت، بر پایه پردازش‌های آماری تک‌متغیره و چندمتغیره داده‌های سنگ ژئوشیمیایی و ترسیم نقشه‌های ناهنجاری تک‌عنصری



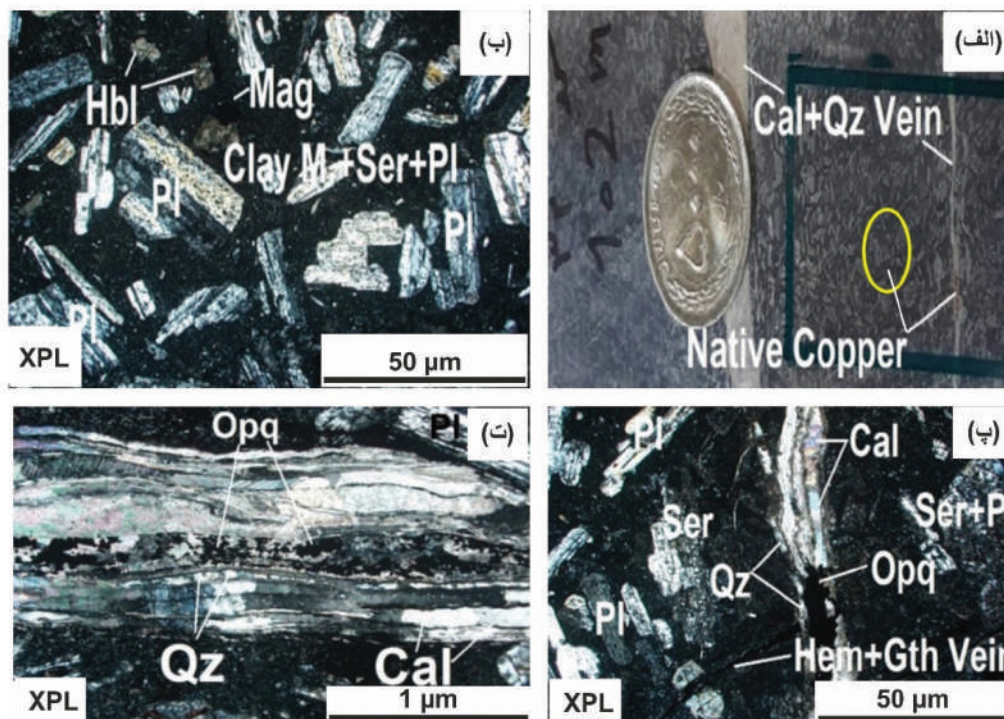
مغزه‌های حفاری، جنس سنگ‌ها بیشتر از نوع آندزیت تا آندزیت-بازالت است و دارای بافت‌های پورفیری با زمینه میکروولیتی، بادامکی و بندرت جریانی و مگاپورفیری می‌باشند. پلاژیوکلاز، هورنبلند، پیروکسن و کانی‌های کدر از ریزبلورهای پلاژیوکلاز قرار گرفتند (شکل ۱۰-الف، ب).



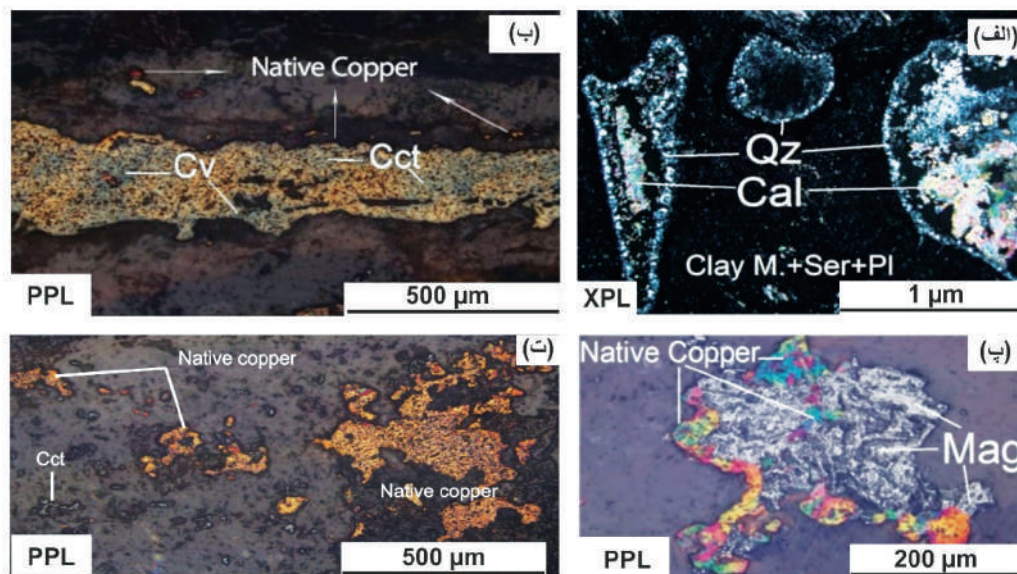
شکل ۹. نقشه مناطق امیدبخش معدنی بر پایه پردازش داده‌های سنگ‌ژئوشیمیایی سطحی

مشاهده می‌شود (شکل ۱۱-ت). مگنتیت‌ها شامل دو نسل هستند، مگنتیت‌های ریزبلور و پراکنده در متن سنگ به احتمال زیاد منشأ ماگمایی دارند (شکل ۱۰-ب) و مگنتیت‌های درشت‌بلور (بیشتر به صورت پر کننده رگه-رگچه‌ها) و هم‌رشدی با مس خالص، حاصل دگرسانی گرمایی دمای بالای کانی‌های آهن-منیزیم‌دار (از قبیل آمفیبول‌ها، پیروکسن‌ها و مگنتیت‌های اولیه) هستند (شکل ۱۰-ت، شکل ۱۱-پ). حفرات سنگ‌های آندزیتی و آندزیت-بازالتی نیز بیشتر با کلسیت، کوارتز و کلریت پر شده است و بافت بادامکی تشکیل داده‌اند (شکل ۱۱-الف). در گمانه‌های ۱ و ۲، آثاری از نفوذی‌های دیوریت در سنگ‌های آندزیتی و آندزیت-بازالتی مشاهده می‌شود. دیوریت‌ها با بافت دانه‌ای دارای کانه‌زایی کالکوپیریت و پیریت هستند.

کانی‌های دگرسانی شامل کلریت، سربیسیت، کانی‌های رسی، کلسیت، کوارتز و اکسیدهای آهن هستند. آمفیبول‌ها به کلریت و اکسیدهای آهن دگرسانی نشان می‌دهند، پلاژیوکلازها هم به طور خفیف سربیسیتی شده‌اند و گاهی به کانی‌های رسی تبدیل شده‌اند (شکل ۱۰-ب، پ). سنگ‌های آندزیتی و آندزیت-بازالتی توسط رگه-رگچه‌های کلسیت، کوارتز و اکسیدهای آهن قطع شده است. مس خالص و بندرت کالکوپیریت همراه کلسیت، کوارتز و مگنتیت به صورت رگه-رگچه‌ای مشاهده می‌شوند (شکل ۱۰-پ، ت). کانه‌های مس خالص به طور ضعیف به کالکوسیت و کوولیت جانشینی دارند (شکل ۱۱-ب). رگه‌های کلسیتی-سیلیسی کانه‌دار به نوبه خود توسط رگه-رگچه‌های هماتیت و گوتیت قطع شده‌اند (شکل ۱۰-پ). مس خالص گاهی به صورت دانه‌پراکنده در فضا‌های خالی موجود در متن سنگ نیز



شکل ۱۰. (الف) نمونه مغزه حفاری از آندزیت پورفیری که توسط رگه‌های کلسیتی-سیلیسی دارای مس خالص قطع شده است، (ب) تصویر میکروسکوپی از پلاژیوکلاز، هورنبلند و مگنتیت در زمینه‌ای از ریزبلورهای پلاژیوکلاز، کانی‌های رسی و سریسیت، (پ) تصویر میکروسکوپی از نمونه آندزیت پورفیری که به وسیله رگه‌های کلسیتی-سیلیسی کانه‌دار و رگه‌های هماتی-گوتیتی قطع شده است، (ت) تصاویر میکروسکوپی از رگه کلسیتی-سیلیسی کانه‌دار در سنگ میزبان آندزیت بازالتی دگرسان شده. Cal: کلسیت، Clay M.: کانی‌های رسی، Gth: گوتیت، هورنبلند، Hbl: هماتیت، Mag: مگنتیت، Native Copper: مس خالص، Opq: کانی‌های تیره، Pl: پلاژیوکلاز، Qz: کوارتز، Ser: سریسیت (نشانه‌های اختصاری کانی‌ها از Whitney and Evans, 2010)



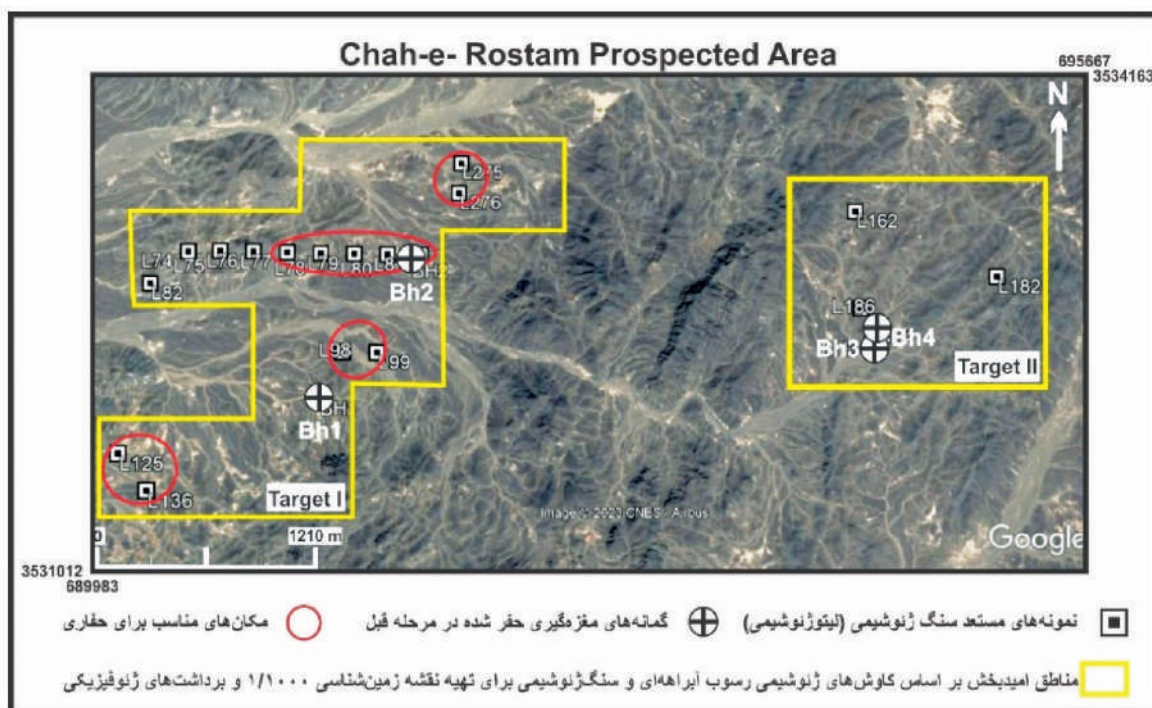
شکل ۱۱. (الف) تصویر میکروسکوپی از پرشدگی حفرات آندزیت پورفیری دگرسان شده به وسیله کلسیت، کوارتز، کلریت و اکسیدهای آهن، (ب) تصویر میکروسکوپی از رگه مس خالص که کانه مس خالص به طور خفیف به کالکوسیت و کوولیت جانشینی دارد، (پ) تصویر میکروسکوپی از هم‌رشدی مس خالص و مگنتیت در داخل رگه‌های کلسیتی-سیلیسی، (ت) تصویری از مس خالص و کالکوسیت در فضاهای خالی سنگ‌های آندزیت بازالتی. Cal: کلسیت، Cct: کالکوسیت، Cv: کوولیت، Clay M.: کانی‌های رسی، Mag: مگنتیت، Native Copper: مس خالص، Pl: پلاژیوکلاز، Qz: کوارتز، Ser: سریسیت (نشانه‌های اختصاری کانی‌ها از Whitney and Evans, 2010)



## نتیجه‌گیری

صحرايي، کانه‌زايی قابل توجهی از مس و عناصر همراه را در رخنمون‌های سنگی این ناحیه نشان نمی‌دهد. با این وجود، بررسی مغزه‌های حفاری وجود مس خالص و به مقدار کم کالکوپیریت را در رگه-رگچه‌های کلسیتی-سیلیسی-اکسید آهنی تایید می‌کند. کانه‌های مس در سامانه‌های رگه‌ای و پرشدگی‌های حفرات سنگ‌ها به وسیله کلسیت، کوارتز، پیریت، مگنتیت و همتایت همراهی می‌شود. سنگ میزبان سامانه‌های کانه‌زایی اغلب سنگ‌های گدازه‌ای-توفی با ترکیب آندزیت تا آندزیت بازالت پورفیری هستند. بر پایه یافته‌های زمین‌شناسی و ژئوشیمی اکتشافی، گستره چاه رستم مستعد کانه‌زایی مس ( $\pm$  طلا) و به احتمال زیاد از نوع اپی‌ترمال است و تصمیم‌گیری درباره پتانسیل اقتصادی کانه‌زایی در این گستره، مستلزم تداوم عملیات اکتشافی است. فعالیت‌های زمین‌شناسی و اکتشافی در گام نخست برای ناحیه امیدبخش شماره یک توصیه می‌شود و در صورت کسب موفقیت اکتشافی در ناحیه یک، ادامه اکتشافات در ناحیه امیدبخش دو توجیه‌پذیر خواهد بود (شکل ۱۲).

تحلیل آماری داده‌های ژئوشیمی رسوب آبراهه‌ای، ناهنجاری‌های ژئوشیمیایی عناصر مس، روی، سرب، نقره، آرسنیک، کادمیم و مولیبدن را در این گستره ثبت شده است. از تلفیق نقشه‌های ژئوشیمیایی تک‌عنصری و چندعنصری (عاملی) رسوب آبراهه‌ای، دو ناحیه امیدبخش برای اکتشافات سنگ‌ژئوشیمی سیستماتیک سطحی معرفی شده است. تحلیل آماری داده‌های سنگ‌ژئوشیمیایی سطحی، ناهنجاری‌های عناصر مس، طلا، روی، سرب، مولیبدن، آرسنیک، آنتیموان و منگنز را در این گستره ثبت شده است. هم‌یافتی ژئوشیمیایی عناصر مذکور بیان از رخداد احتمالی سامانه‌های کانه‌زایی اپی‌ترمال در این ناحیه دارد. در این گستره دگرسانی‌های آرژیلی، کلریتی، سیلیسی، کربناتی و اکسید آهنی وجود دارند. این دگرسانی‌ها در نتیجه تاثیر سیالات گرمایی مربوط به توده‌های نیمه‌نفوذی گرانودیوریتی، مونزودیوریتی و دیوریتی بر سنگ‌های آتشفشانی و آذرآواری ایجاد شده‌اند. مشاهدات



شکل ۱۲. مناطق امیدبخش پیشنهادی برای تداوم عملیات زمین‌شناسی و اکتشافی در گستره چاه رستم بر اساس تلفیق یافته‌های زمین‌شناسی، ژئوشیمی رسوب آبراهه‌ای، سنگ‌ژئوشیمیایی سطحی و حفاری‌های آزمایشی

## سپاسگزاری

نگارندگان مقاله از دانشکده علوم زمین دانشگاه صنعتی شاهرود که بستر و محیط مناسبی را برای انجام این پژوهش آماده کرده‌اند، سپاسگزاری می‌کنند. از مدیریت محترم مهندسين مشاور سامانه کانسار زمین، آقای دکتر موسوی ماکوئی، که با انجام این پژوهش در گستره اکتشافی چاه رستم موافقت کردند و زمینه تجزیه نمونه‌های ژئوشیمیایی رسوب آبراهه‌ای و سنگ ژئوشیمیایی را فراهم کردند، قدردانی می‌شود. از سردبیر و کارشناسان محترم مجله فصلنامه زمین‌شناسی ایران و داوران گرامی که مقاله حاضر را ارزیابی کرده‌اند، تشکر می‌شود.

## منابع

- ارجمندزاده، ر.، ۱۳۹۰. مطالعات کانی‌سازی، ژئوشیمی، سن‌سنجی و تعیین جایگاه تکتونوماگمایی توده‌های نفوذی در اندیس معدنی ده‌سلم و چاه‌شلغمی، بلوک لوت، شرق ایران. رساله دکتری، دانشگاه فردوسی مشهد، ۳۶۹.
- بلوریان، غ.ح.، ۱۳۸۷. نقشه و گزارش زمین‌شناسی کودکان، سری ۱/۱۰۰۰۰۰، شماره ۷۷۵۳، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- بهروزی، ا.، ناصر، خ.ن. و افتخار نژاد، ج.، ۱۳۷۱. نقشه و گزارش زمین‌شناسی بصیران، سری ۱/۱۰۰۰۰۰، شماره ۷۸۵۳، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- حسنی پاک، ع.ا. و شرف‌الدین، م.، ۱۳۸۰. تحلیل داده‌های اکتشافی. انتشارات دانشگاه تهران، ۹۷۱.
- حسین زاده، م.ر.، مغفوری، س.، موید، م.، هادوی چهاربرج، ز.، عامل، ن. و روانخواه، ع.ر.، ۱۴۰۲. زمین‌شناسی، ژئوشیمی و الگوی پراکندگی عناصر در زون‌های دگرسانی نقدوز-زایلیک، زون ماگمایی ارسباران. فصلنامه زمین‌شناسی ایران، ۱۷، ۶۵، ۷۱-۹۰.
- سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۱۳۷۹. اکتشافات ژئوشیمیایی سیستماتیک در ورقه ۱/۱۰۰۰۰۰ بصیران. سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، گزارش داخلی و منتشر نشده.
- سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۱۳۸۸. اکتشافات ژئوشیمیایی سیستماتیک در ورقه ۱/۱۰۰۰۰۰ کودگان. سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، گزارش داخلی و منتشر نشده.
- سهندی، م.ر.، محجل، م.، سهیلی، م.، بربریان، م.، ۱۳۷۱. نقشه زمین‌شناسی چهارگوش ده‌سلم (چاه‌وک)، سری ۱/۲۵۰۰۰۰، شماره K۹، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- غیاثی‌زاده، م.ک.، علی‌پوراصل، م. و مشکانی، س.ا.، ۱۴۰۳. زمین‌شناسی، کانی‌شناسی، ژئوشیمی و الگوی تشکیل کانسار مس (طلا) کوه میل شمال‌خاور ساوه، استان مرکزی. فصلنامه زمین‌شناسی ایران، ۱۸، ۷۰، ۲۹-۵۰.
- کریم‌پور، م.ح.، ملک‌زاده شفارودی، آ.، حیدریان، م.ر. و عسگری، ع.، ۱۳۸۶. کانی‌سازی، دگرسانی و ژئوشیمی منطقه اکتشافی طلا-قلع هیرد، استان خراسان جنوبی. مجله بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران، ۱، ۱۵، ۶۷-۹۰.
- مدبری، س.، آذری‌فر، م.، احمدی، ث.ش. و رئیسی، د.، ۱۴۰۱. تلفیق داده‌های زمین‌شناسی، ژئوشیمیایی، دگرسانی و دورسنجی به منظور معرفی پتانسیل‌های کانه‌زایی در منطقه سربیشه، خراسان جنوبی. فصلنامه زمین‌شناسی ایران، ۱۶، ۶۲، ۷۴-۴۹.
- ملک‌زاده شفارودی، آ. و کریم‌پور، م.ح.، ۱۳۹۰. سن‌سنجی زیرکن به روش اورانیم-سرب در منطقه اکتشافی مس-طلا پورفیری ماهر آباد: شاهدهی بر دوره متالوژنیک ائوسن میانی ذخایر پورفیری در شرق ایران. مجله زمین‌شناسی اقتصادی، ۱، ۳، ۴۱-۶۰.
- یونسی، س.د.، حسین زاده، م.ر. و موید، م.، ۱۳۹۶. کانی‌شناسی کانسار Zn-Cu-(Pb-Bi-Ag) ماهر، باختر ده‌سلم: رهیافتی بر ژنز و نوع کانه‌زایی. فصلنامه علمی علوم زمین، ۲۷، ۱۰۵، ۲۹۵-۳۰۸.
- Javidi Moghaddam, M., Karimpour, M.H., Malekzadeh Shafaroudi, A., Santos, J.F. and Mendes, M.H., 2019. Geochemistry, Sr-Nd isotopes and zircon U-Pb geochronology of intrusive rocks: Constraint on the genesis of the Cheshmeh Khuri Cu mineralization and its link with granitoids in the Lut Block, Eastern Iran. Journal of Geochemical Exploration, 202, 59-76.



- Karimpour, M.H., Zaw, K. and Huston, D.L., 2005. S-C-O isotopes, fluid inclusion micro-thermometry, and the genesis of ore bearing fluids at Qaleh-Zari Fe-Oxide Cu-Au-Ag Mine, Iran. *Journal of Sciences, Islamic Republic of Iran*, 16 (2), 153-168.
- Malekzadeh Shafaroudi, A., Karimpour, M.H. and Stern, C.R., 2015. The Khopik porphyry copper prospect, Lut Block, Eastern Iran: Geology, alteration and mineralization, fluid inclusion, and oxygen isotope studies. *Ore Geology Reviews*, 65 (2), 522-544.
- Malekzadeh Shafaroudi, A. and Karimpour, M.H., 2015. Mineralogic, fluid inclusion, and sulfur isotope evidence for the genesis of Sechangi lead-zinc (-copper) deposit, Eastern Iran. *Journal of African Earth Sciences*, 107, 1-14.
- Omidianfar, S., Monsef, I., Rahgoshay, M., Zheng, J. and Cousens, B., 2020. The middle Eocene high-K magmatism in Eastern Iran Magmatic Belt: constraints from U-Pb zircon geochronology and Sr-Nd isotopic ratios. *International Geology Review*, 62 (1), 1-18.
- Whitney, D.L. and Evans B.W., 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist*, 95, 185-187.
- Yazdi, P., Kananian, A., Raeisi, D. and Modabberi, S., 2023. Geochemistry, petrogenesis and petrology of intrusive rocks in Shadan gold deposit, SW Birjand, Eastern Iran. *Geopersia*, 13 (1), 33-48.