



تعیین بی‌هنجاری ژئوشیمیایی رسوبات آبراهه‌ای جنوب شرق چادرملو به روش آمار چندمتغیره و چندفرکتالی

فریدون قدیمی*^۱، صادق هاشمی^۲، محمد قمی^۳

۱- دانشیار رسوب‌شناسی، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران

۲- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی اکتشاف معدن، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران

۳- دانشجوی دکتری مهندسی اکتشاف معدن، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

۴- مربی آموزشی، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران

* عهده‌دار مکاتبات: drghadimi@yahoo.com

دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۶/۲، پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۸/۲۰

چکیده

در ۱۸۷ نمونه رسوبات رودخانه‌ای جنوب شرق چادرملو از یزد، غلظت طلا، باریوم، مس، مولیبدن، سرب، قلع، وانادیم، تنگستن، روی، اکسید آهن، اکسید منگنز و اکسید تیتانیم تعیین و در آن، بی‌هنجاری‌های سرب، قلع، روی، اکسید آهن و مس شناسایی شد. به‌منظور تعیین بی‌هنجاری، از روش‌های تحلیل عاملی گام به گام، تحلیل خوشه‌ای و روش فرکتال استفاده شد. نتایج نشان داد که بی‌هنجاری‌ها در بخش شمالی و جنوب شرقی منطقه، حاوی قلع، سرب، روی و اکسید آهن بوده که در سنگ‌های پرکامبرین با تناوبی از ماسه‌سنگ دگرگون‌شده و اسلیت توزیع شده است. بی‌هنجاری در جنوب‌غربی منطقه در سنگ آهک ضخیم‌لایه حاوی روی و در غرب منطقه در ماسه‌سنگ و حاوی مس مشاهده می‌شود.

واژه‌های کلیدی: بی‌هنجاری ژئوشیمیایی، رسوبات آبراهه‌ای، تحلیل عاملی، مدل فرکتال، چادرملو

۱- مقدمه

می‌کند (Zuo et al., 2009). مطالعات زیادی وجود دارد که از روش‌های چندمتغیره برای تحلیل داده‌های ژئوشیمیایی استفاده کرده‌اند. تحلیل عاملی، به‌عنوان یکی از روش‌های چندمتغیره، به‌طور گسترده‌ای برای تفسیر داده‌های ژئوشیمیایی رسوبات رودخانه‌ای استفاده می‌شود (Yousefi et al., 2012). بنابراین به لحاظ نظری، تحلیل عاملی، روش مناسبی برای تحلیل تنوع ذاتی در داده‌های ژئوشیمیایی است (Yousefi et al., 2012). روش‌های فرکتال و چندفرکتالی مانند غلظت-مساحت (Concentration-Area) نیز ابزار مؤثری برای تجزیه جمعیت ژئوشیمیایی پیچیده و مختلط و شناسایی بی‌هنجاری‌های ژئوشیمیایی ضعیف پنهان در درون پس‌زمینه ژئوشیمیایی قوی است (Zuo et al., 2009).

هدف از این بررسی، تلفیق داده‌های ژئوشیمیایی حاصل از نمونه‌برداری رسوبات آبراهه‌ای با رویکرد شناسایی بی‌هنجاری‌های منطقه مورد بررسی و کشف بی‌هنجاری احتمالی، با استفاده از روش‌های آماری (روش چندمتغیره و روش فرکتالی) و بررسی درستی آن و ارائه نقشه‌های پراکندگی بی‌هنجاری در منطقه مورد مطالعه و شناسایی منابع معدنی در محدوده موردنظر و رده‌بندی آنهاست.

۲- موقعیت جغرافیایی منطقه

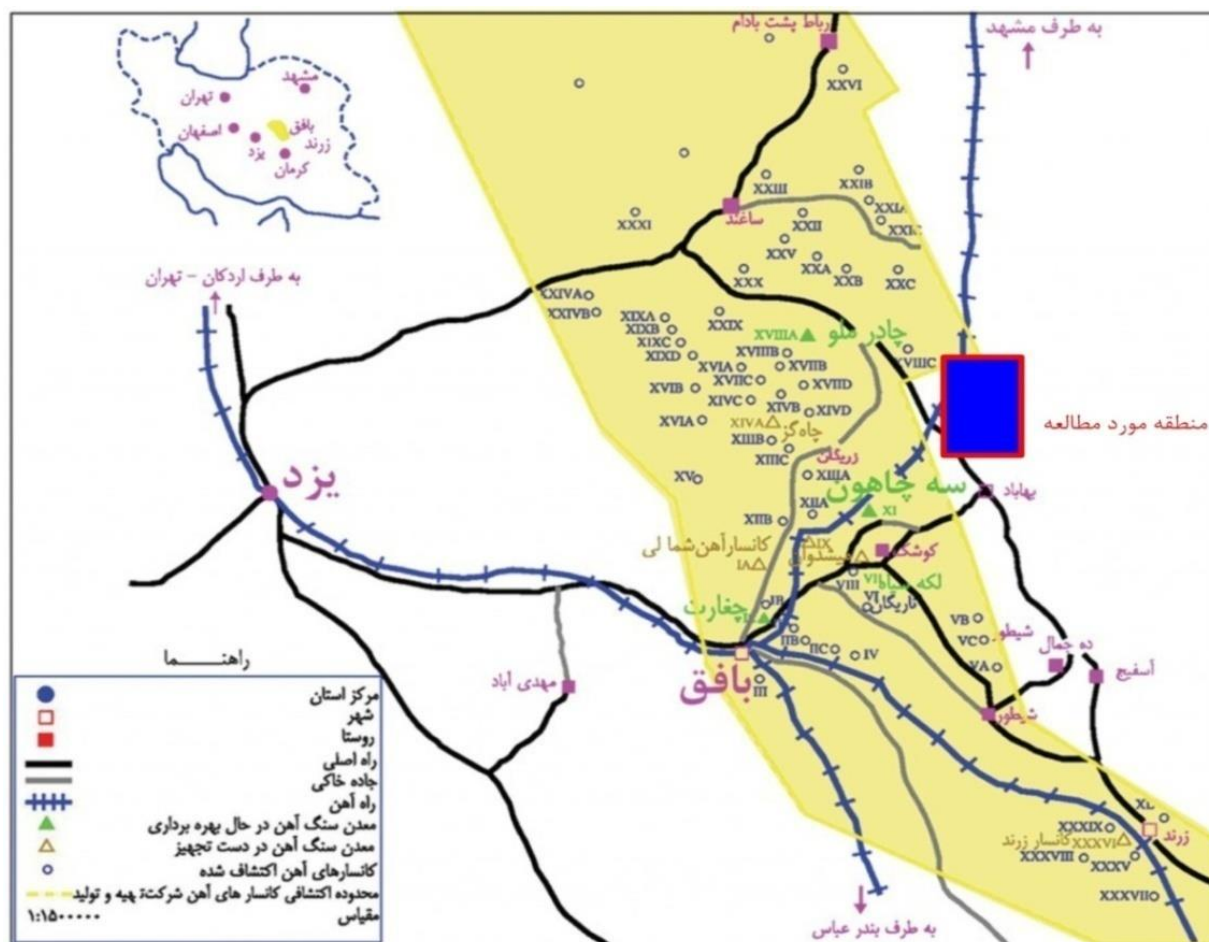
منطقه مورد مطالعه در شرق چادرملو، در مرکز ایران و شرق استان یزد واقع است که در میان طول جغرافیایی شرقی "۵۵°۳۰'۰۰" تا "۰۰°

امروزه اکتشاف ژئوشیمیایی به‌عنوان یکی از روش‌های اکتشاف مواد معدنی در جهان شناخته شده است. هنر اکتشاف با در نظر گرفتن قوانین آمار و احتمالات، کشف و دسترسی به اهداف اکتشافی را آسان‌تر می‌کند (خورشیدوند، ۱۳۹۲). بررسی ژئوشیمیایی رسوبات آبراهه‌ای، به‌عنوان یکی از کارآمدترین روش‌های پی‌جویی، در بیشتر پروژه‌های مهم اکتشافی به‌کار گرفته می‌شود (خورشیدوند، ۱۳۹۲). اکتشافات ژئوشیمیایی رسوبات رودخانه‌ای با هدف شناخت مناطق بی‌هنجاری ژئوشیمیایی عناصر، به دست‌آوردن روابط بین آنها با استفاده از تحلیل همبستگی‌ها، کشف زون‌های کانی‌سازی و معرفی مناطق دارای پتانسیل صورت می‌گیرد. در یک پروژه ژئوشیمی اکتشافی به‌منظور تحلیل داده‌های عناصر مدنظر از روش‌های مختلف تک‌متغیره و چندمتغیره، روش‌های زمین‌آماری، هندسه فرکتال، منطق فازی، تحلیل رگرسیون، تحلیل عاملی، تحلیل خوشه‌ای استفاده می‌شود. محققان تلاش‌های بسیاری به‌منظور پتانسیل‌یابی مواد معدنی به روش‌های مختلف انجام داده‌اند (علی‌نیا و میرمرتضوی، ۱۳۸۳، ابراهیمی و همکاران، ۱۳۸۸ و ۱۳۸۹، افضل و همکاران، ۱۳۸۹، قورچی و کریم‌پور، ۱۳۸۹، Afzal, 2010, Xiao, 2012).

تحلیل داده‌ها با روش چندمتغیره مانند تحلیل عاملی، تحلیل خوشه‌ای، تحلیل ماتریس همبستگی و روش چندفرکتالی (Multifractal method) انجام می‌گیرد. تحلیل داده‌های ژئوشیمیایی با استفاده از روش چندمتغیره، اهمیت نسبی از ترکیب متغیرهای ژئوشیمیایی را ارزیابی

منطقه، جاده معدن سنگ آهن چادرملو است که مجتمع را به جاده اصلی طبس- یزد متصل می‌کند. جاده شوسه از مجتمع سنگ آهن به منطقه مورد بررسی و از آن نقطه به شهر بافق منتهی می‌شود (شکل ۱).

۴۵' ۵۵° و عرض جغرافیایی شمالی " ۳۲° ۰۰' ۰۰" تا " ۳۲° ۱۵' ۰۰" قرار گرفته است (شکل ۱). مجتمع سنگ آهن چادرملو که در غرب منطقه و در مجاورت کوه نیزار احداث شده، یکی از بزرگ‌ترین مناطق معدنی سنگ آهن ایران است که رونق خاصی به منطقه داده است. تنها جاده آسفالتی این



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه (مرکز اطلاع‌رسانی شرکت سنگ آهن مرکزی ایران، ۱۳۹۳)

۳- زمین‌شناسی منطقه

فراوانی از جمله گسل‌ها و بلوک‌ها در منطقه وجود دارد که زمینه مناسبی را برای مطالعات اکتشاف مواد معدنی در منطقه ایجاد کرده‌اند. ناحیه مورد مطالعه از نگاه توان معدنی شامل کنسار آهن مگنتیتی چادرملو است که در سنگ‌های آذرین، دگرگونی به طور عمده کراتوفیر، ربولیت، دیوریت، کوارتزیت و شیست قرار دارد. برخی از زمین‌شناسان معتقدند که توده‌های آهن از نوع نفوذی است. عده‌ای نیز به پدیده متاسوماتیسم باور دارند. گروهی نیز به پدیده دگرگونی و متاسوماتیسم معتقدند و سرانجام برخی نیز اعتقاد به رسوبی-آشفشانی بودن آنها دارند (سازمان زمین‌شناسی کشور، ۱۳۸۸). معدن اورانیم ساغند (دوزخ دره) در این محدوده توسط سازمان انرژی اتمی کاوش شده است. کنسارهایی از سرب و روی در واحدهای سنگی پرکامبرین دیده می‌شود. همچنین در مجاورت کنسار آهن چادرملو، آپاتیت دیده می‌شود. کانی‌سازی مس به صورت ملاکیت در رخنمون سنگ‌های قدیمی و به صورت پراکنده به چشم می‌خورد (شکل ۲).

این ناحیه بخشی از حوضه پشت بادام- بافق از حوضه‌های زمین‌ساختی بلوک پشت‌بادام متعلق به پهنه ایران مرکزی است (سازمان زمین‌شناسی کشور، ۱۳۸۸). قدیمی‌ترین واحد منطقه شامل آمفیبولیت، هورنبلند شیست و میکا شیست با سن پرکامبرین است (شکل ۲). سایر واحدهای پرکامبرین شامل مجموعه رسوبی از دولومیت، سنگ آهک، شیل آهکی، کنگلومرا و ماسه‌سنگ است. از واحدهای با سن دونین پسین تا کربنیفر می‌توان مجموعه‌ای از گچ با میان‌لایه‌هایی از سنگ آهک را نام برد. تریاس شامل شیل و لاتریت و ژوراسیک نیز شامل ماسه‌سنگ کوارتزی است. از واحدهای ترشیری می‌توان کنگلومرا، مارن و ماسه‌سنگ (هم‌ارز سازند قم) را نام برد (سازمان زمین‌شناسی کشور، ۱۳۸۸). سنگ‌های نفوذی از جمله گرانیت، دیوریت و گرانودیوریت در منطقه رخنمون دارند. شواهد زمین‌ساختی

۴- روش کار

۴-۱- نمونه‌برداری و تهیه نقشه ESCB

تیزی منحنی توزیع را نشان می‌دهند، در این تحقیق محاسبه شدند (عارف صدیق، ۱۳۹۲). سپس عملیات نرمال‌سازی داده‌ها انجام گرفت. چنانچه منحنی توزیع یک مجموعه از داده مطابق با منحنی توزیع نرمال باشد آن منحنی را یک منحنی نرمال و آن مجموعه داده‌ها را داده‌های نرمال گویند. از خصوصیات یک توزیع نرمال می‌توان کشیدگی در حد ۳ و چولگی صفر، انطباق سه آماره میانگین، میانه و مد و شکل زنگوله متقارن را نام برد. در مرحله اول وضعیت داده‌ها از دیدگاه نرمال‌بودن مشخص شد. در صورت نرمال یا لاگ نرمال بودن تقریبی داده‌ها، تا حد امکان بررسی‌ها به ترتیب بر روی داده‌های خام یا لگاریتم داده‌ها انجام شد. حجم عظیم اطلاعاتی که در چرخه داده‌پردازی‌های ژئوشیمی اکتشافی وارد می‌شود، محققان را بر آن می‌دارد که پس از رومی کردن آنها به راه‌حل‌هایی متوسل شوند که نتیجه آن دستیابی به مناطق پرتانسیل و امیدبخش است. تحلیل نمونه‌های رسوبات آبراهه‌ای می‌تواند بی‌هنجاری‌های مختلف ژئوشیمیایی را نشان دهد.

۵- بحث

۵-۱- تحلیل چندمتغیره

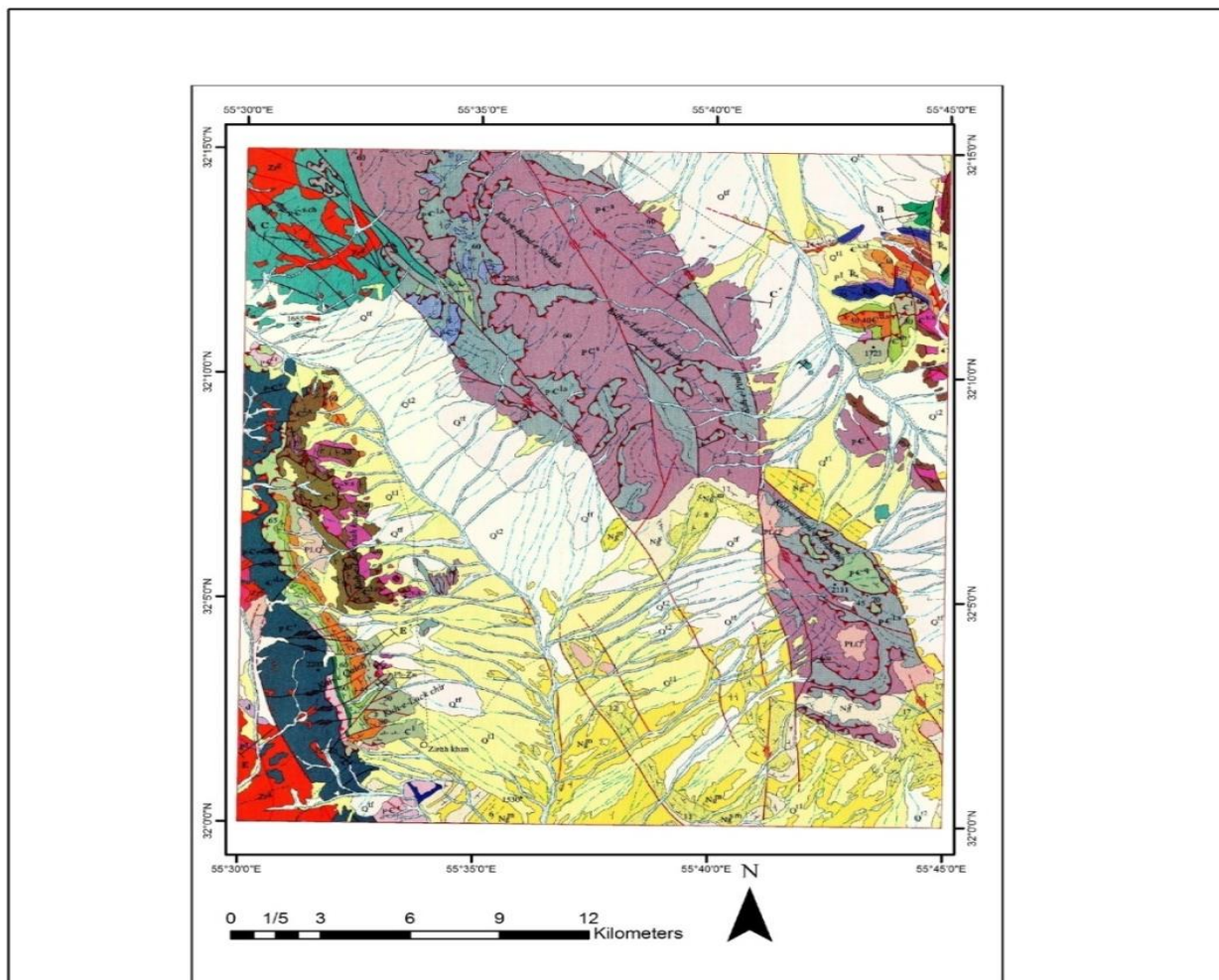
تغییرات میزان عناصر رسوبات آبراهه‌ای همچون طلا، باریم، مس، مولیبدن، سرب، قلع، وانادیم، تنگستن، روی، اکسید آهن، اکسید منگنز و اکسید تیتانیم در تحلیل موضوع مورد توجه است. از آنجا که این تغییرات به طور متقارن توزیع نشده (بجز طلا، مس، سرب، قلع، وانادیم و اکسید منگنز)، از داده‌های لگاریتم آنها برای بهنجارسازی استفاده شد (جدول ۱). افزون بر این، داده‌های همه متغیرها استاندارد شدند. به منظور تعیین روابط میان عناصر و گروه‌های مختلف از تحلیل چندمتغیره گام به گام (Stepwise multivariate analysis) استفاده شد. تحلیل با برنامه آماری STATISTICA انجام گرفت. تحلیل عاملی به‌عنوان روش چندمتغیره، با استفاده از روش مولفه‌های اصلی صورت گرفت که به جای داده‌های اصلی به بررسی وابستگی میان متغیرهای موجود از ماتریس کواریانس و محاسبه ضریب همبستگی می‌پردازد. به عبارت دیگر، ویژه‌مقادیر و ویژه‌بردارهای کواریانس و ضریب همبستگی ماتریس تفسیر می‌شود. در عین حال، به منظور تقویت عامل‌ها، چرخش واریماکس (Varimax rotation) انجام شد. با استفاده از روش وارد (Ward) و تحلیل همبستگی خوشه‌ای، تحلیل خوشه‌ای صورت گرفت و نتایج به‌دست آمده در یک خوشه‌بندی ارائه شد. آمار توصیفی مانند کمینه، میانه، میانگین، و بیشینه برای ۱۲ عنصر مورد استفاده در این مطالعه در جدول ۱ نشان داده شده است.

میانگین مقدار طلا در رسوبات آبراهه‌ای ۰/۶۰، باریم ۸۸، مس ۱۲۹ و مولیبدن ۱ میلی‌گرم/کیلوگرم است. میانگین غلظت سرب، قلع، وانادیم، تنگستن و روی به ترتیب ۲۷، ۲/۶۲، ۲۲۳، ۰/۵۰ و ۷۶ میلی‌گرم/کیلوگرم است. همچنین میانگین غلظت اکسید آهن در رسوبات ۰/۲٪، اکسید منگنز ۰/۱۸ و غلظت اکسید تیتانیم ۰/۶۴ میلی‌گرم/کیلوگرم است.

به‌طور کلی مراحل مختلف اکتشافات ژئوشیمیایی مانند طراحی نمونه‌ها، نمونه‌برداری، تجزیه نمونه‌ها و داده‌پردازی مانند داده‌های زنجیر به‌هم پیوسته هستند و از آنجا که داده‌های حاصل از تجزیه نمونه‌ها در مرحله داده‌پردازی و تعیین نواحی بی‌هنجاری نقشی اساسی برعهده دارند، بنابراین دقت در نمونه‌برداری همچون دیگر مراحل بسیار مهم است (سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور، ۱۳۸۹). در محل نمونه‌برداری ۱۰۰ تا ۲۰۰ گرم از جزء ۴۰ مش رسوب آبراهه‌ای برداشته شد. با توجه به نقشه‌های زمین‌شناسی و توپوگرافی، ۱۸۷ نمونه رسوب آبراهه‌ای از منطقه شرق چادرمو برداشت شد و ۱۲ عنصر باریم، مس، مولیبدن، سرب، قلع، وانادیم، تنگستن، روی، اکسید آهن، اکسید منگنز و اکسید تیتانیم به روش ICP-MS و طلا به روش Fire Assay تجزیه شد. در ژئوشیمی اکتشافی، یکی از متداول‌ترین روش‌های مورد استفاده در اکتشاف، مطالعه رسوبات رودخانه‌ای است. رسوبات رودخانه‌ای را می‌توان به عنوان نماینده‌ای از بیرون‌زدگی سنگ‌ها در حوضه آبریز بالادست نقطه نمونه‌برداری در نظر گرفت (Lahermo, 1996). روش نقشه‌برداری "گستره نمونه‌برداری حوضه آبریز" (Extended Stream Catchment Basin یا ESCB) در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفت (شکل ۳). برای نشان دادن توزیع فضایی از اندازه‌گیری متغیرهای ژئوشیمیایی در رسوبات رودخانه‌ای با در نظر گرفتن تغییرات زمین‌ریخت‌شناسی و الگوهای آب‌نگاری مناطق مورد مطالعه از این نقشه استفاده می‌شود (Spadoni, 2006). این رویکرد در ارتباط با مساحت آماری با هر نمونه و بر این فرض است که غلظت اندازه‌گیری شده در رسوبات رودخانه می‌تواند به‌عنوان مقادیر مرجع و به‌طور میانگین برای این منطقه در نظر گرفته شود. ESCB می‌تواند به‌راحتی با توجه به موقعیت نقاط نمونه‌برداری در شبکه آب‌نگاری و با استفاده از تلاقی بین جریان‌های بالادست به‌عنوان نقطه‌ای به نمایندگی از تغییرات ژئوشیمیایی، این تغییرات را قابل شناسایی کند. مساحت کل منطقه نمونه‌برداری حدود ۵۷۶ km² و با چگالی نمونه‌برداری به‌طور میانگین ۱ نمونه در ۳ km² است.

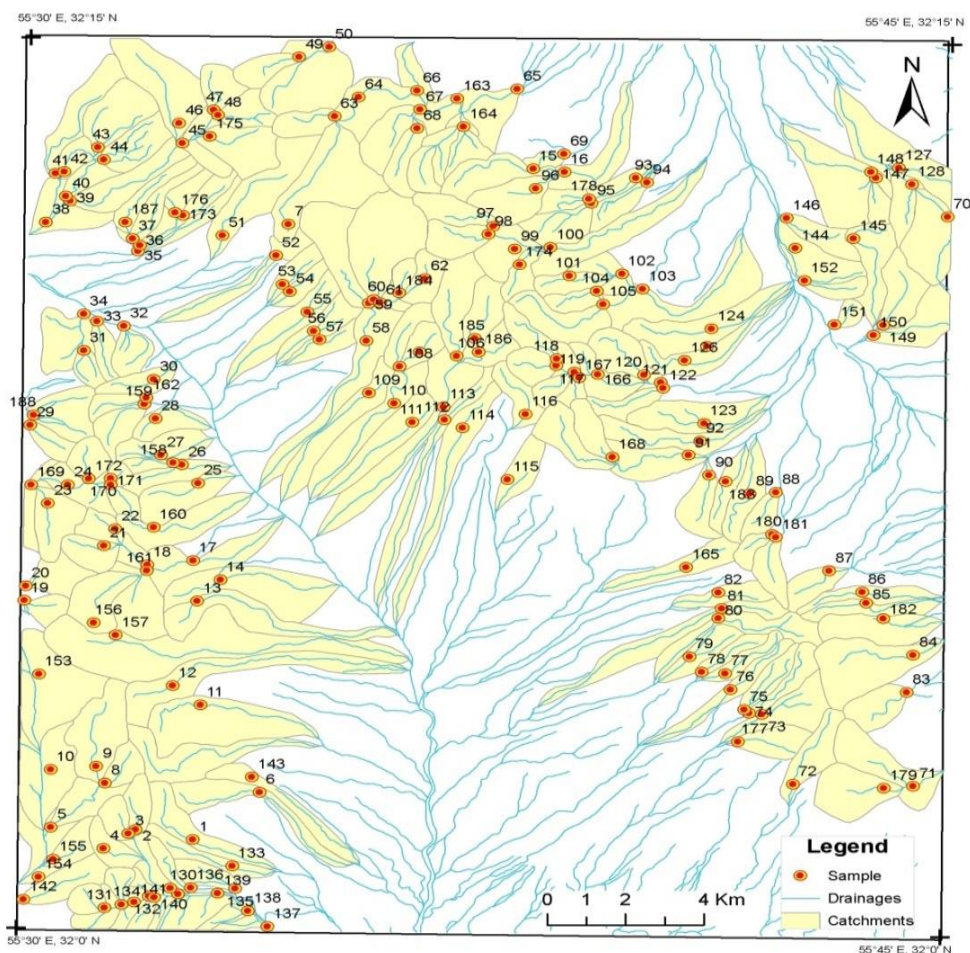
۴-۲- داده‌پردازی ژئوشیمیایی

به‌منظور کنترل دقت تجزیه‌ها و پی‌بردن به کیفیت تکرارپذیری آنها، ۲۰ نمونه تکراری تجزیه و مشخص شد که خطای تجزیه کمتر از ۱۰ درصد است. پارامترهای آماری نحوه پراکندگی داده‌ها را در حول میانگین و تمایل به میانگین، میزان چولگی و کشیدگی جامعه عیار نمونه‌ها و تشابه و تمایز آن با یک توزیع نرمال را به نمایش می‌گذارد. آماره میانگین میزان و چگونگی تمایل به مرکز داده را نشان می‌دهند. آماره‌های انحراف معیار و واریانس معرف نحوه پراکندگی و پراکنش داده‌ها از میانگین هستند. پارامترهای چولگی و کشیدگی که به ترتیب میزان تقارن حول میانگین و



QUATERNARY	Q ^{al}	Qal : Recent alluviums	Qs : Salt flat	<table border="1"> <tr> <td>gr</td> <td>gr : Granit and microgranite</td> </tr> <tr> <td>d</td> <td>d : Dark green diorite to quartz diorite and gabbro</td> </tr> <tr> <td>gd</td> <td>gd : Gray granodiorite</td> </tr> <tr> <td>Zr^g</td> <td>Zr g : Pink to white granite and microgranite (Zarigan granite)</td> </tr> </table>	gr	gr : Granit and microgranite	d	d : Dark green diorite to quartz diorite and gabbro	gd	gd : Gray granodiorite	Zr ^g	Zr g : Pink to white granite and microgranite (Zarigan granite)
	gr	gr : Granit and microgranite										
	d	d : Dark green diorite to quartz diorite and gabbro										
	gd	gd : Gray granodiorite										
Zr ^g	Zr g : Pink to white granite and microgranite (Zarigan granite)											
Q ^{t2}	Q t2 : Younger terraces											
Q ^{tf}	Q tf : Alluvial fan											
Q ^{t1}	Q t1 : Older terraces											
NEOGENE	PLQ ^c	PLQ c : Conglomerate and sandston										
	Ng ^m	Ng m : Alternation of red, green to grey, marl and siltston interbedded with gypsum										
	Ng ^{s.m}	Ng s.m : Alternation of red marl and conglomerate										
	Ng ^c	Ng c : Cream to light brown, conglomerate interbrdded with sandeston										
CAMBRIAN	E ^{s.sl}	E s.sl : Alternation of white to red quartzite with red siltstone										
	E ^{ld}	E ld : Alternation of grey to light brown thin bedded dolomite and limestone, interbedded with green tuff										
	E ^{sd}	E sd : Alternation of red shale and siltston, interbedded with grey dolomite										
	E ^q	E q : White to light pink quartzite										
	E ^s	E s : Pink to light, thick bedded of red silty shale in lower part, interbedded of limestone and quartz arenite in upper part										
	E ^t	E t : Tuff, radiolarite and andesite porphyry										
	E ^{ls}	E ls : Alternation of dark brown thin bedded dolomite and green, fine grain conglomerate, sandstone, tuff and diabase, with medium bedded dolomite in upper part										
	E ^{s.l}	E s.l : Red sandstone in lower part, red to green siltstone, brown dolomite with alternation of green sandeston, tuff and red siltstone in upper part										
	E ^{v.s}	E v.s : Alternation of green, fine grain conglomerate, tuff, tuffaceous siltston, sandstone and tuffaceous sandstone										
	E ^l	E l : Grey to light cream massive to thick bedded limestone										
	E ^{d.s}	E d.s : Alternation of green to brown, thin to medium bedded dolomit and sandestone interbedded with green, fine grain conglomerate, sandstone, siltstone and tuff with brown thin bedded dolomite in upper part										
	E ^{sh}	E sh : Alternation of light cream, thin bedded crystalline limestone, green shaly limestone and thin bedded marly limestone										
	E ^g	E g : Gypsum interbedded with dolomite										
	PE ^d	PE d : Grey, thin bedded limestone and dolomite in lower part, dark brown thin bedded dolomite, brown medium bedded dolomite, interbedded with sandstone and siltstone in upper part										
	PE ^r	PE r : Rhyolite and acidic tuff, interbedded with crystalline limestone in lower part, trachyte, trachy andesite and quartz trachy andesite, agglomerate in upper part										
	PE ^d	PE d : Dark green diabase and tuff	PE m : Marble									
	PE ^s	PE s : Green meta sandestone, slate and slaty tuff, interbedded with thin bedded limestone										
PE ^{s.ch}	PE s.ch : Alternation of grey to dark green micaschist, quartzite chlorite schist, quartzitic schist and phyllite with thin bedded limestone											
PE ^{ls}	PE ls : marble, garnet schist, andalusite, silimanit schist, biotite schist and quartzite											
PE ^q	PE q : Green to white quartzite											
PE ^a	PE a : Amphibolite, hornblende schist and micaschist											
PE ^v	PE v : sphilite, basalt, pillow lava, grey to light brown fine grain limestone, red radiolarie, tuff and tuffaceous sandston											

شکل ۲- نقشه زمین‌شناسی منطقه شرق چادرملو (سازمان زمین‌شناسی و اکتشاف معدنی کشور، ۱۳۸۸)



شکل ۳- استفاده از روش ESCB در منطقه شرق چادرمولو

جدول ۱- خلاصه آمار داده‌های غلظت عناصر در رسوبات آبراهه‌ای منطقه چادرمولو یزد

متغیر	میانگین	میانانه	حداقل	حداکثر	چارک پایین	چارک بالا	چولگی (داده‌های خام)	چولگی (داده‌های لگاریتمی)	بهترین اطلاعات
Au	۰/۶۱	۰/۶۰	۰/۳۰	۱/۱۰	۰/۵۰	۰/۷۰	۰/۳۳	-۰/۳۴	داده‌های خام
Ba	۹۲۷	۸۸۹	۴۵۳	۲۱۲۷	۸۵۱	۹۵۱	۳/۸۴	۱/۹۲	داده‌های لگاریتمی
Cu	۱۲۹	۱۲۹	۶۱	۱۸۶	۱۱۹	۱۴۲	-۰/۲۸	-۰/۹۳	داده‌های خام
Mo	۱/۰۷	۱/۰۰	۰/۵۵	۲/۹۰	۰/۸۵	۱/۳۰	۱/۸۰	۰/۳۶	داده‌های لگاریتمی
Pb	۲۷	۲۷	۱۴	۳۵	۲۵	۲۹	-۰/۳۰۰	-۰/۸۷	داده‌های خام
Sn	۲/۶۴	۲/۶۲	۰/۵۰	۴/۷۴	۲/۰۸	۳/۰۹	۰/۲۱	-۱/۴۰	داده‌های خام
V	۲۲۳	۲۲۳	۱۰۷	۳۲۶	۲۰۶	۲۰۵۱	-۰/۲۹	-۰/۹۴	داده‌های خام
W	۰/۵۲	۰/۵۰	۰/۵۰	۰/۷۶	۰/۵۰	۰/۵۰	۲/۶۹	۲/۵۱	داده‌های لگاریتمی
Zn	۷۸	۷۶	۲۸	۱۵۷	۶۹	۸۴	۱/۴۴	۰/۲۰	داده‌های لگاریتمی
Fe ₂ O ₃	۴/۴۳	۴/۰۹	۲/۰۵	۱۵/۱۲	۳/۷۴	۴/۵۹	۴/۳۲	۲/۱۹	داده‌های لگاریتمی
MnO	۰/۱۸	۰/۱۸	۰/۰۸	۰/۲۵	۰/۱۶	۰/۱۹	-۰/۲۸	-۱/۰۲	داده‌های خام
TiO ₂	۰/۶۶	۰/۶۴	۰/۱۴	۱/۵۹	۰/۵۵	۰/۷۳	۱/۲۴	-۱/۰۲	داده‌های لگاریتمی

عامل در مرحله دوم در جدول ۳ نشان داده شده است. عامل ۱ نشان‌دهنده مس، سرب، قلع، وانادیم و اکسید منگنز، عامل ۲ مرتبط با باریم، تنگستن، روی، اکسید آهن و اکسید تیتانیم است. برای مرحله سوم، مولیبدن به دلیل همبستگی بسیار کم حذف شد (جدول ۴).

جدول ۳- تحلیل در مرحله دوم

(بارگذاری‌های پرننگ متعلق به عوامل انتخاب‌شده بر اساس آستانه از ۰/۷۰)

متغیر	عامل ۱	عامل ۲
LogBa	۰/۱۰	۰/۸۷
Cu	-۰/۹۲	-۰/۲۸
LogMo	-۰/۵۵	۰/۰۷۹
Pb	۰/۸۲	۰/۳۴
Sn	۰/۸۶	۰/۴۳
V	-۰/۹۸	-۰/۰۲
LogW	۰/۱۵	۰/۹۲
LogZn	۰/۱۵	۰/۹۲
LogFe ₂ O ₃	۰/۰۷	۰/۸۴
MnO	-۰/۹۱	-۰/۲۶
LogTiO ₂	۰/۴۰	۰/۸۳
مقادیر ویژه	۶/۴۰	۲/۵۴
مجموع - واریانس	۵۸/۲۱	۲۳/۱۵
درصد تجمعی	۵۸/۲۱	۸۱/۳۶

بدیهی است در این مرحله تمام عناصر یا در عامل ۱ و یا در عامل ۲ همبستگی بالای ۰/۷ داشته‌اند بنابراین عملیات متوقف می‌شود. از سوی دیگر، مقدار واریانس تحلیل عاملی در عامل ۱ از ۵۳/۴۴ درصد در مرحله اول به ۵۸/۲۱ درصد در مرحله دوم و به ۶۲/۹۸ درصد در مرحله سوم افزایش می‌یابد، همچنین این مقدار در عامل ۲ از ۲۱/۵۴ درصد در مرحله اول به ۲۳/۱۵ درصد در مرحله دوم و به ۲۴/۱۲ درصد در مرحله سوم افزایش می‌یابد که امیدبخش است. از سوی دیگر عامل ۱ دارای همبستگی منفی و مثبت است که خود نیز حکایت از دو منشأ دارد، منشأ اول شامل عناصر مس، وانادیم و اکسید منگنز و منشأ دوم شامل عناصر سرب و قلع است. بنابراین، در تحلیل عاملی گام به گام سه منشأ تفکیک شد (شکل ۴).

به منظور تعیین منشأ عناصر از تحلیل عاملی (Factor analysis) برای استخراج عامل‌ها استفاده شد. افزون بر این، از چرخش عامل‌های واریانس استفاده شد (Kaiser, 1958). سپس، با استفاده از تحلیل عاملی سه مرحله برای استخراج اجزا تعیین شد (Yousefi et al., 2012). در مرحله اول، تحلیل چرخش قطعات، دو عامل هر یک با ویژه‌مقدار بزرگ‌تر از ۱ به دست آمد (جدول ۲). دو عامل ۹۸/۷۴ درصد از واریانس مجموعه داده‌های اصلی را توضیح می‌دهند. بیشترین واریانس در مجموعه داده‌های اصلی در عامل ۱ (۴۴/۵۳ درصد) است که با وجود مس، مولیبدن، سرب، قلع، وانادیم و اکسید منگنز مشخص می‌شوند. عامل دوم حدود ۵۴/۲۱٪ از واریانس را توضیح می‌دهد و مربوط به عناصر باریم، تنگستن، روی، اکسید آهن و اکسید تیتانیم است (جدول ۲).

جدول ۲- تحلیل مرحله اول

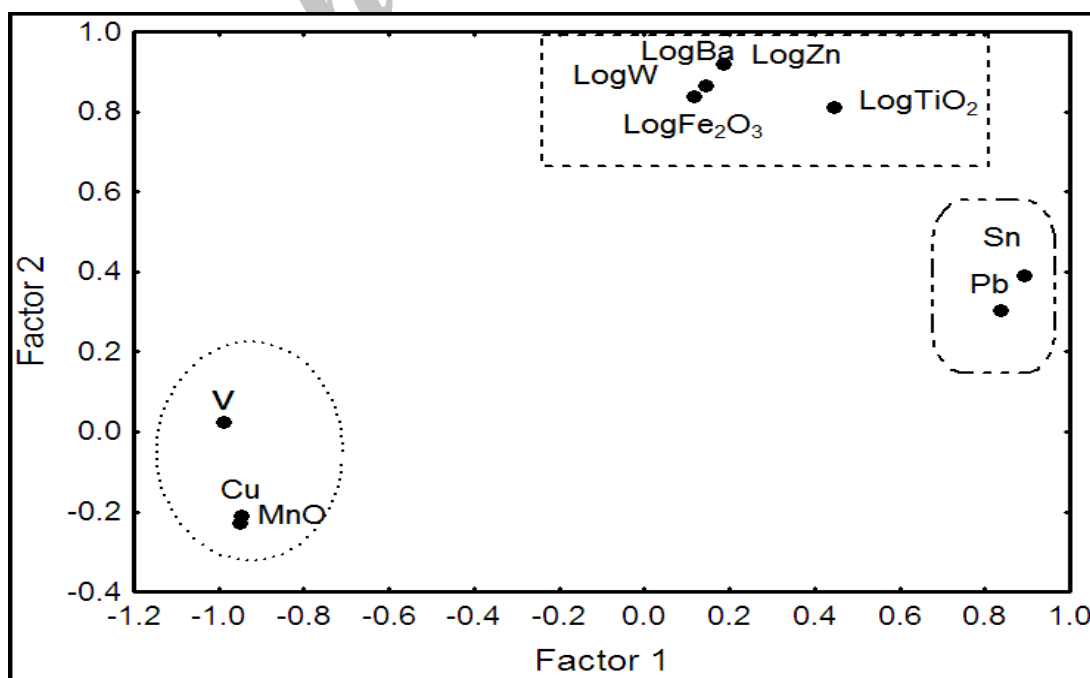
(بارگذاری‌های پرننگ متعلق به عوامل انتخاب‌شده بر اساس آستانه از ۰/۷۰)

متغیر	عامل ۱	عامل ۲
Au	۰/۰۷	-۰/۲۵
LogBa	۰/۱۵	۰/۸۶
Cu	-۰/۹۳	-۰/۲۳
LogMo	-۰/۷۴	۰/۱۰
Pb	۰/۸۴	۰/۲۸
Sn	۰/۸۸	۰/۳۸
V	-۰/۹۸	۰/۰۲
LogW	۰/۲۰	۰/۹۱
LogZn	۰/۲۰	۰/۹۰
LogFe ₂ O ₃	۰/۱۲	۰/۸۳
MnO	-۰/۹۳	-۰/۲۱
LogTiO ₂	۰/۴۵	۰/۸۰
مقادیر ویژه	۶/۴۱	۲/۵۸
مجموع - واریانس	۵۳/۴۴	۲۱/۵۴
درصد تجمعی	۵۳/۴۴	۷۴/۹۸

برای افزایش شدت بی‌هنجاری باید تعداد نمونه‌های غیرعادی در رسوبات کاهش یابد. به منظور دستیابی به این داده‌ها طلا به دلیل همبستگی ضعیف و کمتر از ۰/۷ هم در عامل ۱ و هم در عامل ۲، حذف شد. سپس نتایج حاصل از تحلیل عاملی در مرحله اول از داده‌های ژئوشیمیایی باقی‌مانده برای محاسبه نمرات عاملی در مرحله دوم برای هر نمونه استفاده شد. چرخش عاملی ماتریس و طرح عامل در فضا برای تحلیل

جدول ۴- تحلیل در مرحله سوم

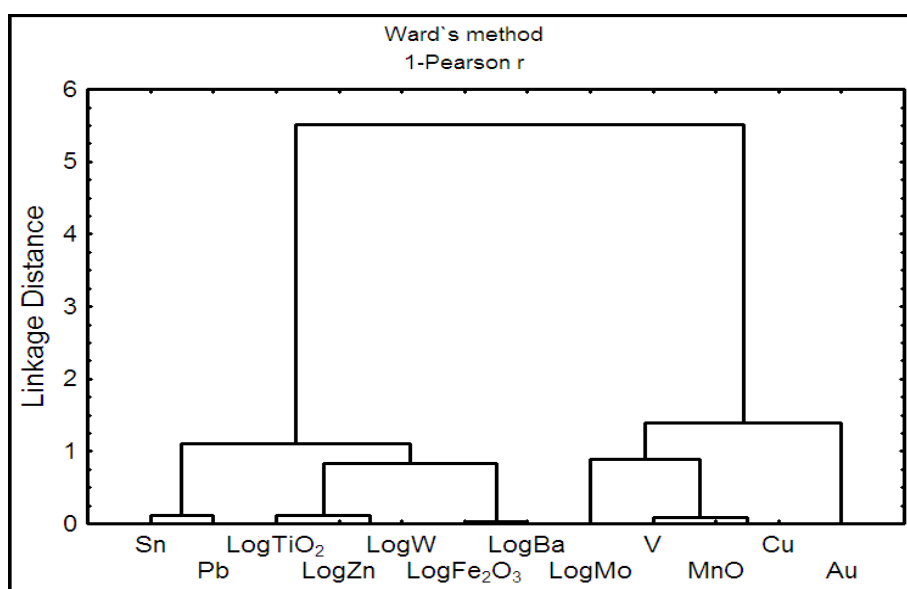
متغیر	عامل ۱	عامل ۲
LogBa	۰/۱۴	۰/۸۶
Cu	-۰/۹۴	-۰/۲۳
Pb	۰/۸۲	۰/۳۰
Sn	۰/۸۹	۰/۳۸
V	-۰/۹۸	۰/۰۲
LogW	۰/۱۸	۰/۹۱
LogZn	۰/۱۸	۰/۹۱
LogFe ₂ O ₃	۰/۱۱	۰/۸۳
MnO	-۰/۹۴	-۰/۲۱
LogTiO ₂	۰/۴۴	۰/۸۱
مقادیر ویژه	۶/۲۹	۲/۴۱
مجموع - واریانس	۶۲/۹۸	۲۴/۱۲
تجمعی درصد	۶۲/۹۸	۸۷/۱۰



شکل ۴- طرح عاملی در چرخش فضایی در مرحله سوم تحلیل عاملی گام به گام

در نتیجه، از طریق تحلیل عاملی گام به گام به موجب آن عناصر شاخص داده‌ها و کل واریانس مرتبط با حذف عنصری هر عامل افزایش را نشان می‌دهد. به منظور آشکار ساختن رابطه بین عناصر از دیگر روش‌های تحلیل چندمتغیره مانند تحلیل خوشه‌ای و ماتریس همبستگی استفاده شد. با استفاده از روش وارد و تحلیل همبستگی خوشه‌ای ضرایب پیرسون

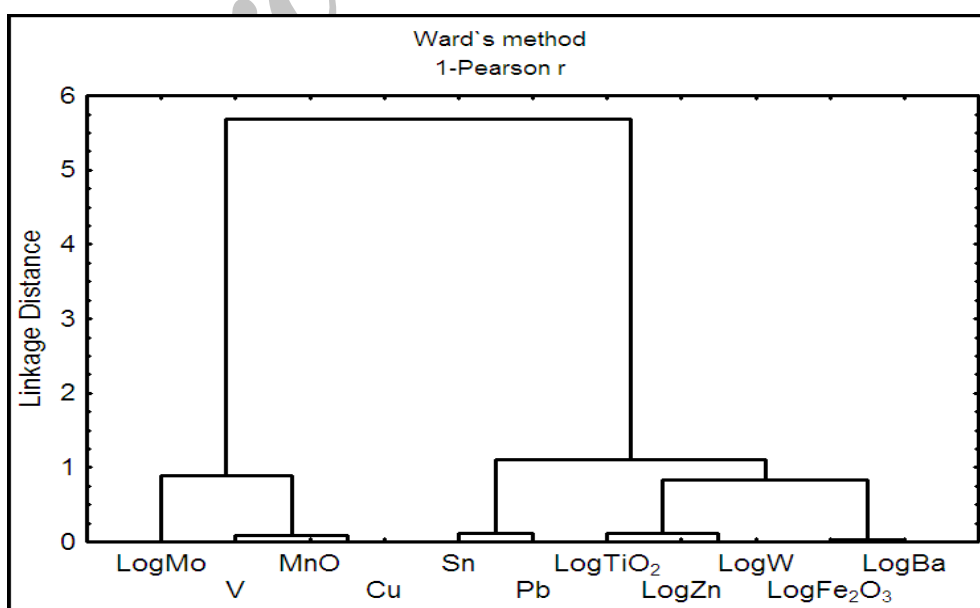
(تحلیل خوشه‌ای) انجام شد و نتایج به دست آمده به صورت نمودار خوشه-ای ارائه شد. نتایج حاصل از تحلیل خوشه‌ای در این مرحله شامل گروه‌های متعددی است که عمدتاً شبیه به اولین مرحله تحلیل عاملی گام به گام است (شکل ۵).



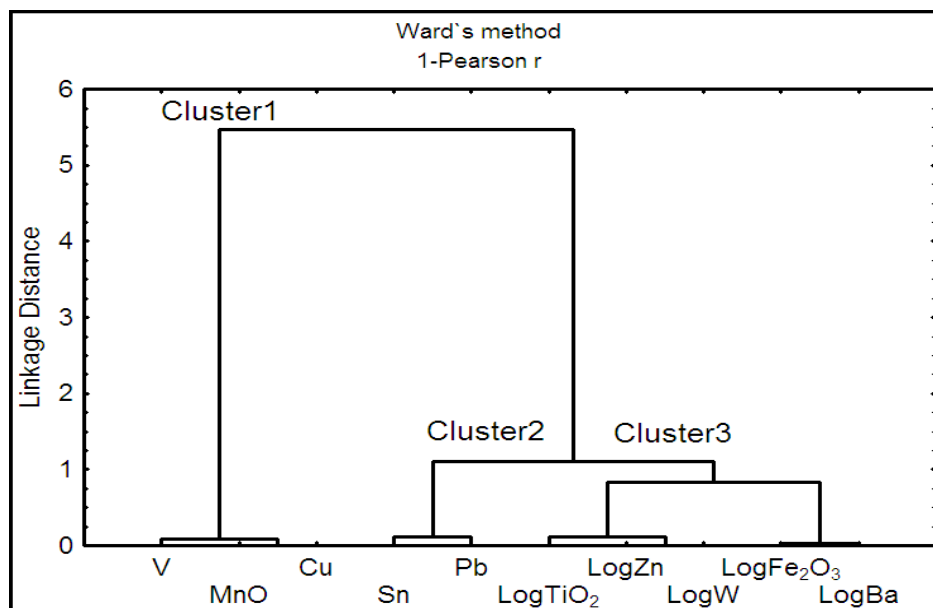
شکل ۵- خوشه‌بندی از عناصر در مرحله اول

مرحله دوم از تحلیل خوشه‌ای، شبیه به مرحله دوم تحلیل فاکتوری گام به گام است (شکل ۶). همچنین مرحله سوم از تحلیل خوشه‌ای، شبیه مرحله سوم تحلیل فاکتوری گام به گام است (شکل ۷). گروه اول از وانادیوم، اکسید منگنز و مس، گروه دوم متشکل از عناصر قلع و سرب و

گروه سوم متشکل از اکسید تیتانیم، روی، تنگستن، اکسید آهن و باریم است. ضمناً نتایج حاصل از تحلیل فاکتوری در سومین مرحله از تجزیه و تحلیل فاکتوری گام به گام با تحلیل همبستگی مطابقت دارد (جدول ۵).



شکل ۶- خوشه‌بندی از عناصر در مرحله دوم



شکل ۷- خوشه‌بندی از عناصر در مرحله سوم

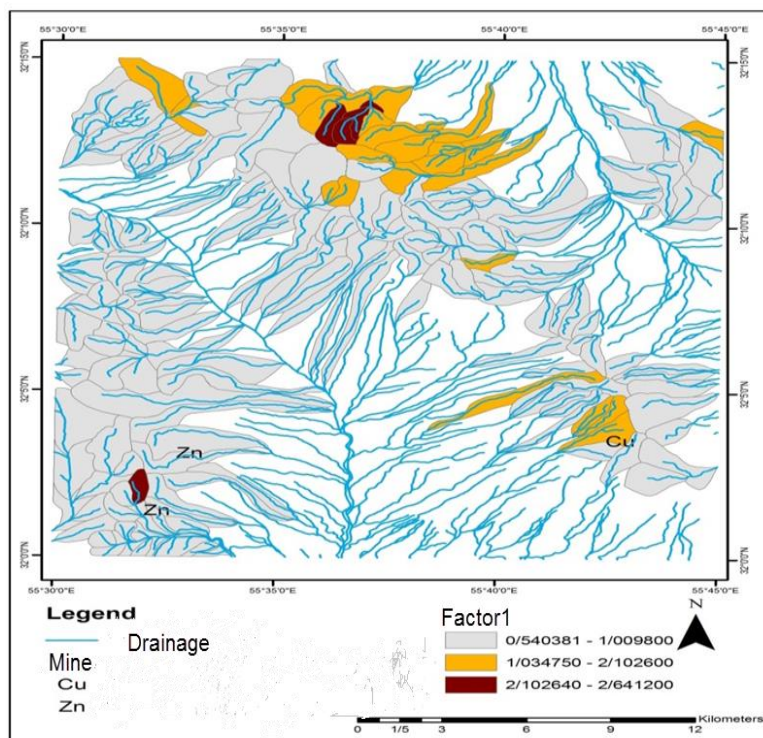
جدول ۵- ضریب همبستگی عناصر در مرحله سوم

	Au	LogBa	Cu	LogMo	Pb	Sn	V	LogW	LogZn	LogFe ₂ O ₃	MnO	LogTiO ₂
Au	1/00											
LogBa	-۰/۱۵	۱/۰۰										
Cu	-۰/۰۴	-۰/۳۸	۱/۰۰									
LogMo	-۰/۰۳	-۰/۰۳	-۰/۳۷	۱/۰۰								
Pb	-۰/۰۳	-۰/۳۰	-۰/۷۸	-۰/۴۰	۱/۰۰							
Sn	-۰/۰۳	-۰/۵۲	-۰/۹۳	-۰/۳۷	-۰/۸۸	۱/۰۰						
V	-۰/۰۱	-۰/۱۲	-۰/۹۳	-۰/۴۴	-۰/۸۱	-۰/۸۷	۱/۰۰					
LogW	-۰/۱۸	-۰/۶۷	-۰/۳۶	-۰/۰۷	-۰/۴۹	-۰/۴۹	-۰/۱۷	۱/۰۰				
LogZn	-۰/۱۷	-۰/۶۶	-۰/۳۵	-۰/۰۷	-۰/۵۰	-۰/۴۸	-۰/۱۷	-۰/۱۰	۱/۰۰			
LogFe₂O₃	-۰/۱۴	-۰/۹۶	-۰/۳۶	-۰/۰۱	-۰/۲۴	-۰/۵۰	-۰/۱۰	-۰/۶۲	-۰/۶۱	۱/۰۰		
MnO	-۰/۰۴	-۰/۳۷	-۰/۱۰	-۰/۳۶	-۰/۷۵	-۰/۹۱	-۰/۹۳	-۰/۳۴	-۰/۳۳	-۰/۳۵	۱/۰۰	
LogTiO₂	-۰/۱۱	-۰/۶۳	-۰/۵۹	-۰/۱۶	-۰/۶۸	-۰/۶۶	-۰/۴۱	-۰/۹۱	-۰/۹۲	-۰/۵۷	-۰/۵۷	۱/۰۰

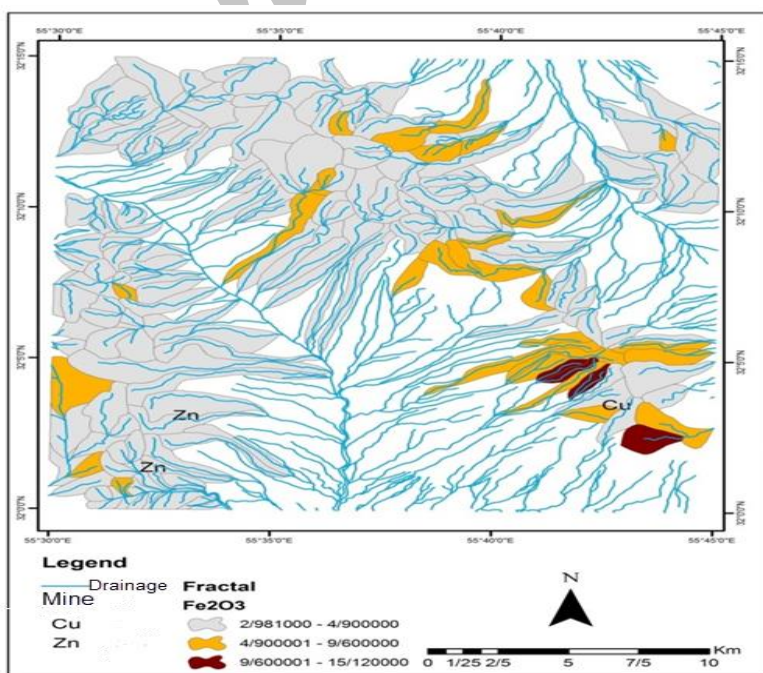
با توجه به وزن هر عامل در روش تحلیل عاملی، نقشه‌های بی‌هنجاری شدند (شکل ۸).
 حاصل از تحلیل عاملی در ARC GIS رسم و مناطق بی‌هنجار مشخص با توجه به نتایج حاصل از روش عاملی در عامل ۱، بیشترین محدوده از

نظر بی‌هنجاری در شمال منطقه مورد مطالعه دیده می‌شود. همچنین در جنوب شرقی منطقه، منطبق با رخداد معدنی مس، بی‌هنجاری احتمالی دیده می‌شود. محدوده کوچکی در بخش جنوب‌غربی منطقه منطبق با معدن متروکه سرب و روی نیز دارای بی‌هنجاری است. لازم به ذکر است که

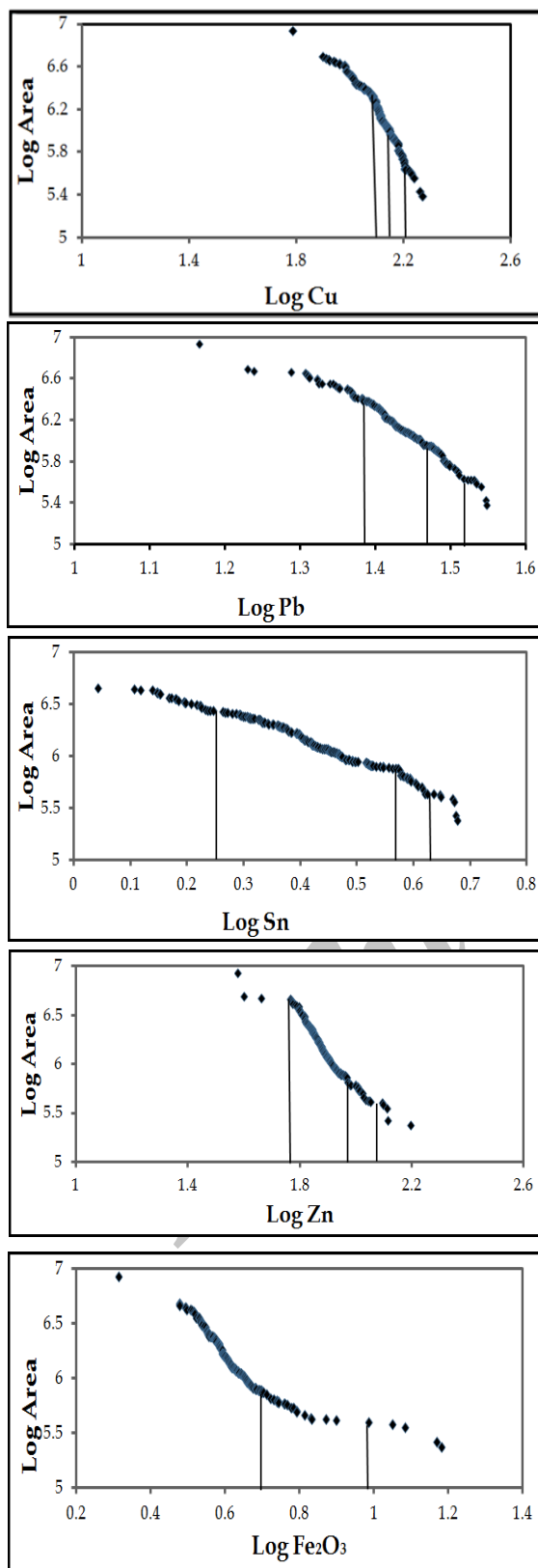
عامل ۱ دارای دو منشأ شامل الف) قلع و سرب (ب) مس، وانادیم و اکسید منگنز است. در عامل ۲ بی‌هنجاری‌ها از پراکندگی بیشتری برخوردار است (شکل ۹).



شکل ۸- نقشه توزیع عناصر مربوط به فاکتور یک



شکل ۹- نقشه توزیع عناصر مربوط به عامل ۲



شکل ۱۰- نمودار غلظت- مساحت مس، سرب، قلع، روی و اکسید آهن

روی در جنوب غربی منطقه و نزدیکی معدن متروکه سرب و روی نیز

این عامل در جنوب شرق منطقه، بی‌هنجاری نشان می‌دهد که منطبق با رخداد معدنی مس است. جنوب غرب منطقه منطبق با معدن متروکه سرب و روی نیز دارای بی‌هنجاری، اما با پراکندگی بیشتری است. با مقایسه نقشه‌های حاصل از روش عاملی و نقشه زمین‌شناسی منطقه، بی‌هنجاری‌ها در بخش شمال و جنوب شرقی منطقه در واحدهای زمین‌شناسی PE^S و PE^{LS} ، و در بخش جنوب غربی منطقه در واحدهای زمین‌شناسی PE^V و PE^I ، همچنین در غرب در واحدهای ES و EV^S قرار می‌گیرند.

۵-۲- تحلیل فرکتالی

روش‌های فرکتال به طور مشابه به مؤلفه‌های جداگانه می‌پردازد، اما به‌طور کلی نیاز به انواع توزیع‌های خاص است. در روش غلظت- مساحت (Concentration-Area)، توزیع فضایی از مشاهدات در نظر گرفته می‌شود. اگر p منطقه از ارزش غلظت بیشتر از p در یک نقشه خطوط از داده‌های فضایی است، سپس p یک تابع نزولی بر حسب p است. اگر v نشان‌دهنده یک مقدار آستانه باشد، معادله زیر را می‌توان به صورت تجربی بر داده‌ها اعمال کرد:

$$A(p \leq v) \propto p^{-a1}; A(p > v) \propto p^{-a2}$$

اگر طرح $A(p \geq p)$ در برابر $\log-\log$ قرار گیرد طرح خطی است، آنگاه تمام داده‌ها متعلق به یک جامعه واحد و توزیع فرکتال ساده است. اگر با این حال، قطعه را بتوان با چند قطعه خط راست تقسیم کرد، آنگاه توزیع چندفرکتالی است و نقطه از حد شکست بین بخش‌های مختلف خط راست که مجموعه‌ای جداسازی می‌آید. بیشترین تفاوت آشکار بین ابعاد فرکتال، جدایی میان مجموعه‌ها است. روابط غلظت- مساحت در روش چندفرکتالی با اختصاص منطقه نفوذ به هر نقطه نمونه‌برداری و جمع تمام مناطق عنصری به‌دست می‌آید. این روش برای غلظت‌های مختلف عناصر تکرار شد. در اینجا فقط تعدادی از جمله نمودارهای مس، سرب، قلع، روی و اکسید آهن ارائه شده است (شکل ۱۰). بر اساس روش فرکتال، چندین مقدار برای مس، سرب، قلع، روی و اکسید آهن به‌دست آمد. در هر شکل دو نقطه شکست به‌عنوان بی‌هنجاری (احتمالی و قطعی) وجود دارد. بی‌هنجاری قطعی مس ۱۶۷ و سرب ۳۳ میلی‌گرم/کیلوگرم است. غنی‌سازی قلع ۴/۴ و روی ۱۲۳ میلی‌گرم/کیلوگرم است. بی‌هنجاری قطعی برای اکسید آهن حدود ۹/۶ درصد است. ضمناً نقشه‌های بی‌هنجاری عناصر موردنظر براساس روش فرکتال نیز تهیه شد (شکل ۱۰). با توجه به نقشه‌های حاصل از روش فرکتال و انطباق آنها با نقشه زمین‌شناسی، سرب و قلع در شمال منطقه در واحد زمین‌شناسی PE^S و در جنوب شرقی منطقه، منطبق بر رخداد معدنی مس در واحدهای زمین‌شناسی PE^S و PE^{LS} دارای بی‌هنجاری است. همچنین این دو عنصر در روش تحلیل عاملی در عامل ۱ به‌عنوان یک منشأ و در یک گروه قرار می‌گیرند که این خود نشان‌دهنده تطبیق دو روش و نیز تأیید روش تحلیل عاملی و روش فرکتال در منطقه است. روی نیز در شمال و جنوب شرقی منطقه (در حدود رخداد معدنی مس) و در واحدهای زمین‌شناسی PE^S و PE^{LS} دارای بی‌هنجاری است (شکل ۱۱).

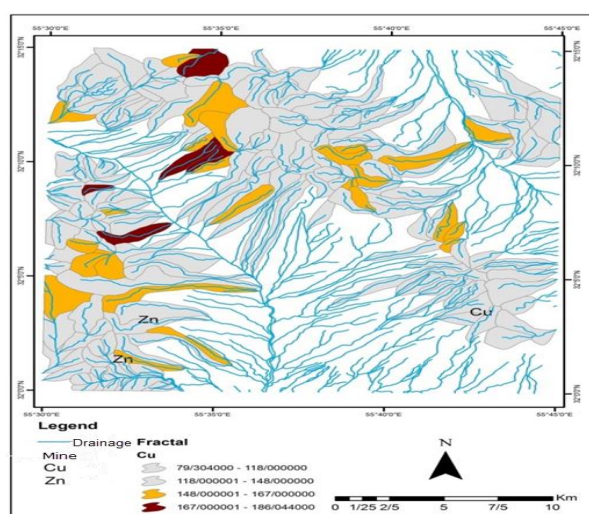
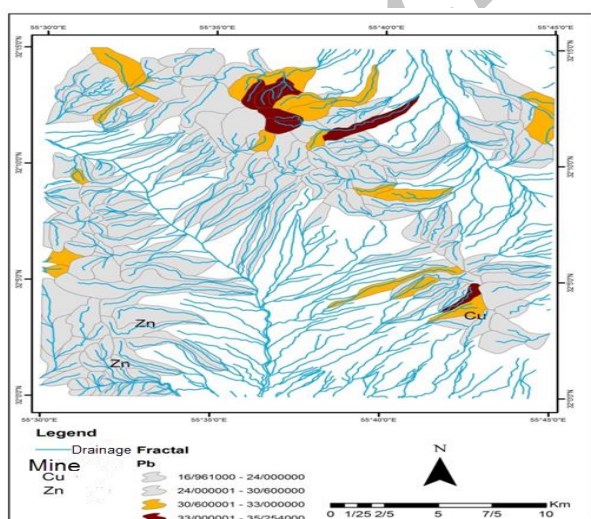
چینه‌شناسی مانند الف) تناوب ماسه‌سنگ دگرگون‌شده، اسلیت و توف اسلیتی با درون‌لایه‌هایی نازک از سنگ آهک دگرگون‌شده است. شدت دگرگونی در آنها در حد رخساره شیست سبز بوده و براساس مطالعاتی که در کوه پلو انجام شده، سن آن پرکامبرین پسین تعیین شده است. ب) مجموعه‌ای از سنگ‌های دگرگونی شامل مرمر، آندالوزیت شیست، سیلیمانیت شیست، بیوتیت شیست، گارنت شیست و کوارتزیت که شدت دگرگونی در این مجموعه از باختر به خاور به تدریج کاسته می‌شود. رخنمون آن را در کوه چاه‌محمد و کوه‌بند مزرون می‌توان دید. رخساره دگرگونی در این مجموعه در حد رخساره سیلیمانیت است. در داخل این مجموعه دایک‌هایی از جنس میکروگابرو که آنها هم در حد رخساره آمفیبولیت دگرگون شده‌اند دیده می‌شود (ج) محدوده جنوب‌غربی که منطبق بر سنگ آهک ضخیم‌لایه تا توده‌ای به رنگ خاکستری است. این مجموعه سنگی را با توجه به شواهد فسیلی و رخساره‌ای موجود، هم‌ارز سازند عقدا نسبت می‌دهند. د) محدوده غربی منطبق بر ماسه‌سنگ صورتی درشت‌دانه و ضخیم‌لایه است که در بخش‌های زیرین دارای میان‌لایه‌هایی از شیل سیلتی سرخ رنگ است. در بخش بالایی این واحد درون‌لایه‌هایی نازک از سنگ آهک و کوارتزآرنایت سفید نیز دیده می‌شود. بر فراز این مجموعه چندین متر کنگلومرا با خمیره ماسه‌ای و قطعات گردشده سیاه‌رنگ سیلیسی که ستبرایی حدود ۱۵ تا ۲۰ متر دارد، قرار می‌گیرد. همچنین شامل مجموعه‌ای رسوبی، آذرآوری و آتشفشانی است که شامل تناوبی از کنگلومرای ریزدانه، توف سیلتی، توف، ماسه‌سنگ و توف ماسه‌ای به رنگ سبز است که گدازه‌هایی از جنس بازالت نیز در آنها دیده می‌شود.

دارای بی‌هنجاری بوده که منطبق بر واحد زمین‌شناسی E^1 است. بی‌هنجاری اکسید آهن در جنوب‌شرقی منطقه (نزدیک به رخداد معدنی مس) در واحدهای زمین‌شناسی PE^S و PE^{LS} دیده می‌شود. بی‌هنجاری‌های اکسید آهن و روی، در روش فرکتال تطابق زیادی به‌ویژه در جنوب‌شرقی منطقه دارند. با توجه به اینکه اکسید آهن و روی در روش تحلیل عاملی در عامل ۲ به‌عنوان یک منشأ مشخص شده، بنابراین نشان‌دهنده تطبیق مناسب دو روش و نیز تأیید روش تحلیل عاملی و روش فرکتال در منطقه است. مس دارای بی‌هنجاری پراکنده بوده و در شمال منطقه در واحدهای PE^S و PE^{LS} و غرب منطقه در واحدهای $E^{V,S}$ و E^S دارای بی‌هنجاری است.

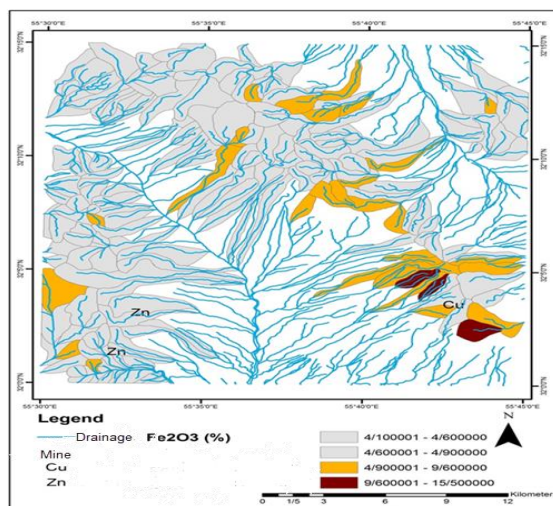
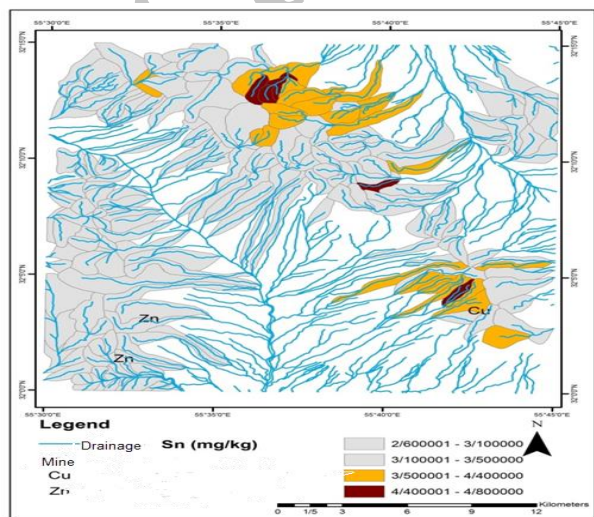
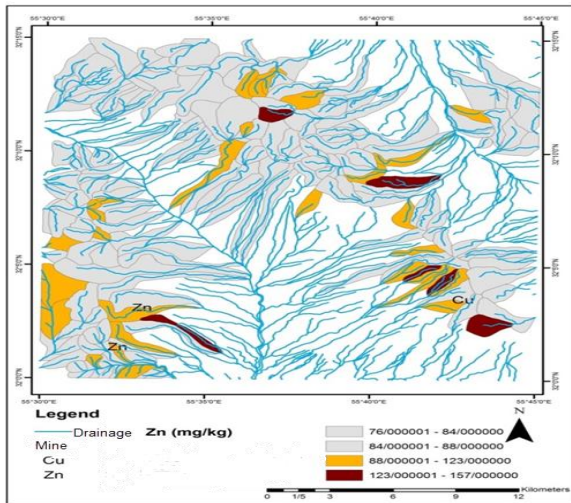
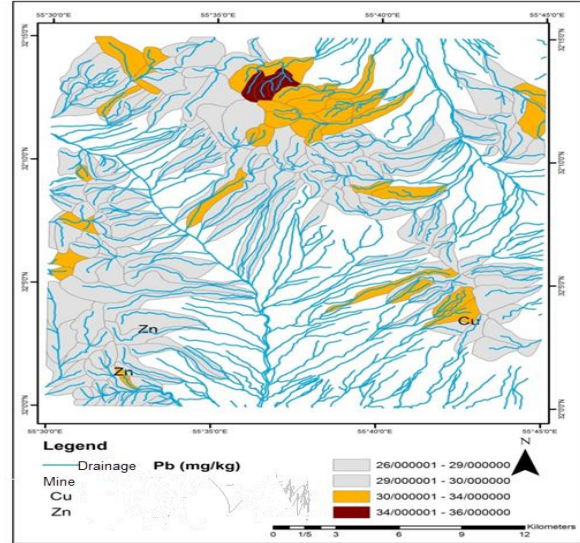
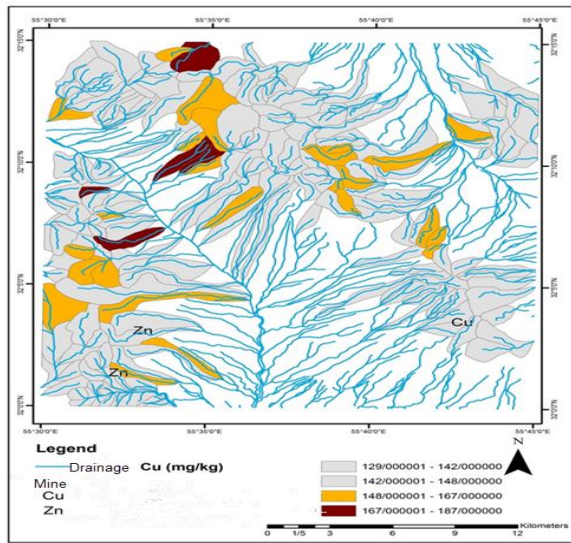
۵-۳- روش کلاسیک

نقشه توزیع مس، سرب، قلع، روی و اکسید آهن بر اساس مقادیر $0.99/5$ ، $0.99/5$ ، 0.84 ، 0.75 ، 0.5 ، 0.25 و حداقل مقدار تعیین شد (شکل ۱۲). سرب و قلع دارای توزیع مشابه و عمدتاً در شمال منطقه بی‌هنجاری دارند. روی عمدتاً در شرق و مس نیز در غرب و شمال غرب منطقه بی‌هنجاری نشان می‌دهد. توزیع بی‌هنجاری اکسید آهن در سمت جنوب‌شرق منطقه است.

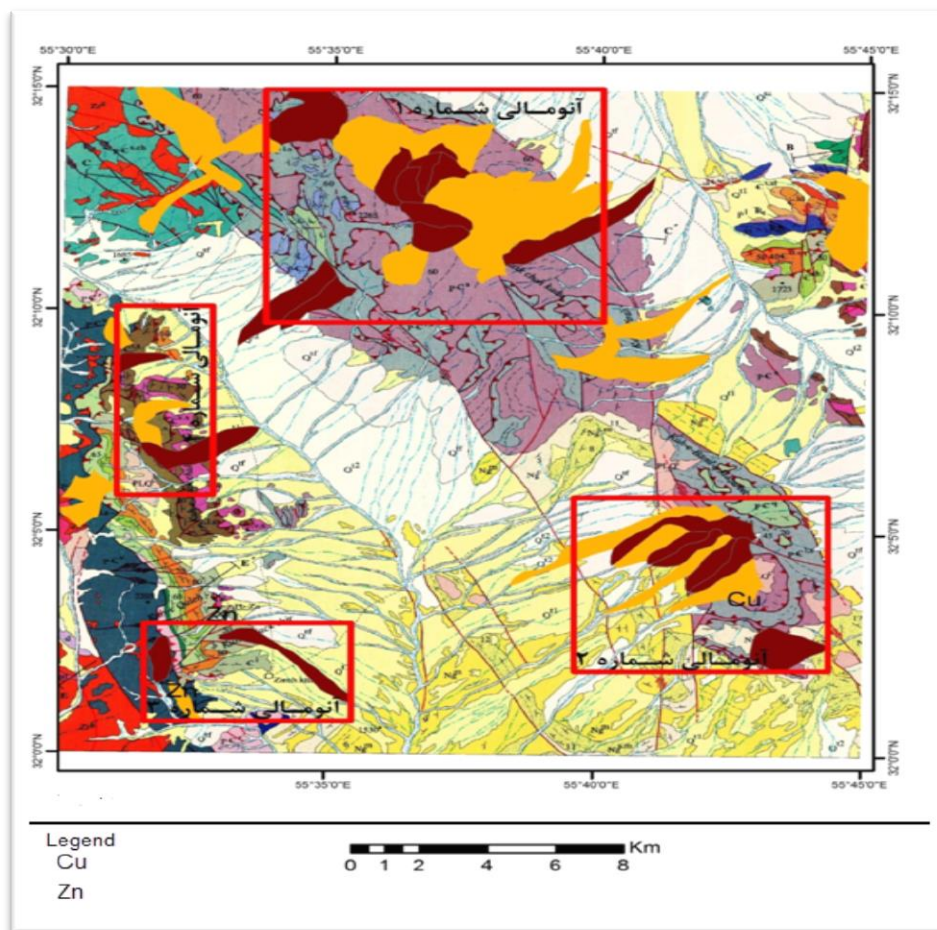
با مقایسه آنومالی به روش‌های تحلیل عاملی، فرکتال و کلاسیک مشخص شد که سه روش، بی‌هنجاری‌های مشابهی را نشان می‌دهند. بر این اساس، چهار محدوده به‌عنوان مناطق امیدبخش معرفی شدند. الف) محدوده شمالی، ب) محدوده جنوب‌شرقی که هر دو محدوده منطبق بر دو واحد



شکل ۱۱- نقشه توزیع مؤلفه سرب، قلع، روی، مس و اکسید آهن بر اساس روش فرکتالی



شکل ۱۲- نقشه توزیع مس، سرب، قلع، روی و اکسید آهن به روش کلاسیک



شکل ۱۳- نقشه بی‌هنجاری‌های شرق چادرملو (برای راهنمای نقشه به شکل ۲ مراجعه شود)

نظر گرفته شود. مقایسه نقشه‌های بی‌هنجاری و زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه نشان داد، چهار ناحیه را می‌توان به‌عنوان مناطق امیدبخش معرفی کرد. محدوده شمالی با بی‌هنجاری قلع و سرب، محدوده جنوب‌شرقی با بی‌هنجاری روی و اکسید آهن، محدوده جنوب‌غربی با بی‌هنجاری روی، محدوده غربی با بی‌هنجاری مس، مناطق اکتشاف مورد بررسی را می‌توان به‌عنوان مناطق امیدبخش برای اکتشاف مقدماتی در نظر گرفت.

با توجه به بی‌هنجاری‌های حاصل از سه تحلیل عاملی، فرکتال و روش غلظت و همپوشانی سه روش یادشده، چهار ناحیه به‌عنوان مناطق امیدبخش معرفی شدند. بی‌هنجاری شماره ۱ با قلع و سرب در شمال منطقه، بی‌هنجاری شماره ۲ با روی و اکسید آهن در جنوب شرقی منطقه، بی‌هنجاری شماره ۳ با روی در جنوب‌غربی منطقه و بی‌هنجاری شماره ۴ با مس در غرب منطقه منطبق است (شکل ۱۳).

مراجع

ابراهیمی، ن.، رسا، ا.، شیخ‌ذکریایی، ج. و افضل، پ.، ۱۳۸۹، "کاربرد روش فرکتالی عبار- محیط برای جدایش آنومالی‌های ژئوشیمیایی از حد زمینه در رسوبات آبراهه‌ای، مطالعه موردی منطقه زاجکان، طارم، زنجان" مجله علوم پایه دانشگاه آزاد اسلامی، سال بیستم، شماره ۷۷، صفحات ۸۹-۱۰۶.
 ابراهیمی، ن.، رسا، ا.، براتی، ب. و شیخ‌ذکریایی، ج.، ۱۳۸۸، "پتانسیل‌یابی عناصر فلزی (به ویژه مس و طلا) در محدوده ۱:۲۵۰۰۰ زاجکان شمال زنجان" فصل‌نامه زمین، سال چهارم، شماره ۳، صفحات ۱-۱۲.
 افضل، پ.، خاکزاد، ا.، معارفوند، پ.، رشیدنژاد عمران، ن. و فداکار القلندیس، ی.، ۱۳۸۹، "استفاده از روش فرکتالی عبار- حجم در جدایش زون‌ها در

از بررسی ماتریس همبستگی، می‌توان به نسبت بالای همبستگی بین قلع، سرب، همبستگی باریم، تنگستن، روی، اکسید آهن و اکسید تیتانیم اشاره کرد. همچنین اکسید منگنز، مس و وانادیم دارای همبستگی بالایی هستند. تحلیل عاملی گام به گام و تحلیل خوشه‌ای حاکی از دو عامل در داده‌ها است. عامل ۱ شامل سرب، قلع، مس، وانادیم و منگنز، عامل ۲ نیز دربردارنده روی، اکسید آهن، اکسید تیتانیم، باریم و تنگستن بوده که واریانس کل این عوامل ۸۷/۱۰ درصد است. در تهیه نقشه توزیع عناصر، مقدار بی‌هنجاری با استفاده از روش چندفرکتالی نشان داد که این روش می‌تواند یک روش جایگزین، که معمولاً برای تعیین ارزش زمینه است، در

- Afzal, P., 2010, "Geochemical anomaly separation by multifractal modeling in Kahang (Gor Gor) porphyry system, Central Iran", *Journal of Geochemical Exploration* 104, P. 34-6.
- Kaiser, H. F., 1958, "The varimax criterion for analytic rotation in factor analysis", *Psychometrika*, 23:P.187-200.
- Lahermo, L., 1996, "Geochemical Atlas of Finland:" Part 3. *Environmental Geochemistry-Stream Waters and Sediments. Geological Survey of Finland, Espoo*, P.60.
- Spadoni, M., 2006, "Geochemical mapping using a geomorphologic approach based on catchments", *Journal of Geochemical Exploration*, 90(3): P.183-196.
- Xiao, F., 2012, "Singularity mapping and spatially weighted principal component analysis to identify geochemical anomalies associated with Ag and Pb-Zn polymetallic mineralization in Northwest Zhejiang, China", *Journal of Geochemical Exploration* 122, P. 90-100.
- Yousefi, M., 2012, "Geochemical mineralization probability index (GMPI): A new approach to generate enhanced stream sediment geochemical evidential map for increasing probability of success in mineral potential mapping", *Journal of Geochemical Exploration* 115, P.24-35.
- Zuo, R., 2009, "Application of a hybrid method combining multi level fuzzy comprehensive evaluation with asymmetric fuzzy relation analysis to mapping prospectivity", *Ore Geology Reviews* 33 F.P. 35(1): P.101-108.
- کانسارهای پورفیری " فصلنامه علوم زمین، سال بیستم، شماره ۷۸، صفحات ۱۶۷-۱۷۲.
- خورشیدوند، م.، ۱۳۹۲، "پتانسیل‌یابی مواد معدنی در برگه ۱:۵۰۰۰۰ چاهوک (منطقه بافق) با استفاده از تلفیق داده‌های اکتشافی " پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی اراک، ۱۵ صفحه.
- قورچی روکی، م. و کریم‌پور، م.، ۱۳۸۹، "کاربرد تحلیل مولفه‌های اصلی در شناسایی آنومالی‌های ژئوشیمیایی در ناحیه فیض‌آباد، شمال شرق ایران" نخستین همایش انجمن زمین‌شناسی اقتصادی ایران، صفحات ۲۴۱-۲۴۷.
- عارف صدیق، م.، ۱۳۹۲، "تعیین آنومالی ژئوشیمیایی رسوبات آبراهه‌ای منطقه دلیجان با استفاده از آنالیز مولفه‌های اصلی " پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی اراک، ۱۶۷ صفحه.
- علی‌نیا، ف. و میرمرتضوی، م. ا.، ۱۳۸۳، "اکتشافات ژئوشیمیایی شمال تکاب" کنفرانس مهندسی معدن، ۱۲ صفحه.
- سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور، ۱۳۸۹، "راهنمای عملیات صحرایی نمونه‌برداری مواد رسوبی رودخانه‌ها و مخازن سدها" انتشارات ۸۵/۰۰/۱۶۷ (نشریه شماره ۳۴۹).
- سازمان زمین‌شناسی و اکتشاف معدنی کشور، ۱۳۸۸، "نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ چادرملو".
- مرکز اطلاع‌رسانی شرکت سنگ آهن مرکزی ایران، ۱۳۹۳،
www.icioc.ir