شدت بخشی به هاله های ژئوشیمیایی رسوبات آبراهه‌ای با استفاده از شناسایی و حذف مرحله‌ای عامل‌های غیر پیشگو به منظور افزایش موفقیت اکتشاف – مطالعات موردی: کانی‌سازی‌های فلورین و مس

مهیار یوسفی [۱*]، ابوالقاسم کامکار روحانی [۲] و مسعود علیپور [۳]

[۱] استادیار، گروه معدن، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران
[۲] دانشیار، دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه شاهرود، شاهرود، ایران
[۳] استادیار، دانشکده علوم، دانشگاه شاهرود، شاهرود، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۰۶/۲۷ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۰۴/۱۷

چکیده

ژئوشیمی رسوبات آبراهه‌ای یکی از روش‌های مؤثر برای شناسایی ذخایر معدنی به‌ویژه در مراحل اولیه اکتشاف است. در مواردی که بر روی یک کانی‌سازی مشخص پی‌جویی صورت می‌گیرد، بیشتر از تجزیه و تحلیل‌های چندمتغیره مانند تحلیل عاملی برای استنتاج بهترین عوامل (فاکتورهای) پیشگو، از میان عناصر ردیاب و معرف کانی‌سازی مورد جستجو، استفاده می‌شود. چگونگی استنتاج و انتخاب بهترین عامل معرف کانی‌سازی مورد جستجو هنوز مسئله‌ای بحث‌برانگیز است که موجب انتشار مقالات زیادی در این زمینه شده است. در مقاله حاضر روشی جدید با عنوان تجزیه و تحلیل عاملی مرحله‌ای که در واقع روش بهبودیافته تحلیل عاملی معمولی برای تولید نقشه‌های پراکندگی ژئوشیمیایی می‌باشد، ارائه شده است. در روش تحلیل عاملی مرحله‌ای ابتدا عناصر غیر معرف شناسایی و حذف شده، سپس مهم‌ترین و مؤثرترین عوامل پیشگو شناسایی می‌شوند. کاربرد این روش سبب شدت بخشی به هاله‌های ژئوشیمیایی شده و واریانس تشریح شده توسط هر عامل نیز افزایش یافته است. همچنین کاربرد تجزیه و تحلیل عاملی مرحله‌ای موجب بهبود نرخ پیش‌بینی ذخایر معدنی و در نتیجه افزایش موفقیت اکتشاف شده است. در مطالعه حاضر کارایی بهتر روش بهبودیافته تحلیل عاملی مرحله‌ای نسبت به تحلیل عاملی معمولی، با اجرای آن بر روی داده‌های ژئوشیمیایی ۲ منطقه متفاوت و برای ۲ کانی‌سازی نوع مختلف، به اثبات رسیده است. در این مناطق کاربرد روش تحلیل عاملی مرحله‌ای موجب افزایش مجموع واریانس تحت پوشش عامل پیشگوی کانی‌سازی و همچنین افزایش نرخ پیش‌بینی اندیس‌های معدنی شده است. بنابراین موفقیت اکتشاف افزایش یافته است. همچنین با کاربرد تحلیل عاملی مرحله‌ای، انطباق بیشتری میان بی‌هنجاری‌های ژئوشیمیایی و سنگ میزبان کانی‌سازی به‌دست آمده است.

کلیدواژه‌ها: افزایش موفقیت اکتشاف، تحلیل عاملی مرحله‌ای، عوامل معرف، هاله ژئوشیمیایی.

***نویسنده مسئول:** مهیار یوسفی
E-mail: M.Yousefi.Eng@gmail.com

۱– پیش‌گفتار

یکی از روش‌هایی که در مراحل اولیه اکتشاف در شناسایی مناطق امیدبخش به‌طور مؤثری استفاده می‌شود، ژئوشیمی رسوبات آبراهه‌ای است. یکی از مسائل این روش، ارزیابی میزان معرف بودن یک نمونه، برای پیش‌بینی نوع کانی‌سازی است؛ در این حالت به منظور شناسایی نواحی امیدبخش یک نوع ماده معدنی خاص، پرسش این است که بهترین ترکیب عناصر ردیاب و معرف برای پی‌جویی چیست؟ برای پاسخ به این سؤال بیشتر از تحلیل‌های چندمتغیره استفاده می‌شود (Halfpenny & Mazzucchelli, 1999; Chandrajith et al., 2001; Grunsky et al., 2009). تجزیه و تحلیل عاملی (فاکتوری) یکی از روش‌های تجزیه و تحلیل چند متغیره است که به طور گسترده‌ای در اکتشافات ژئوشیمیایی رسوبات آبراهه‌ای به منظور شناسایی مناطق و نواحی امیدبخش کانی‌سازی استفاده می‌شود (Borovec, 1996; Reimann et al., 2002; Kumru & Bakac, 2003; Helvoort et al., 2005; Sun et al., 2009). با وجود استفاده گسترده از تحلیل عاملی، این روش هنوز بحث برانگیز و پرسش‌هایی در مورد آن مطرح است. Reimann et al. (2002) و همچنین Helvoort et al. (2005) و پرسش‌هایی را در مورد استفاده از تحلیل عاملی مطرح کردند. تعدادی از این پرسش‌ها در ادامه آمده است ۱) چند عامل معرف باید استخراج شود؟ ۲) کدام عناصر باید در هر عامل وجود داشته باشند؟ ۳) چگونه تعداد زیادی نقشه تک‌عنصری می‌توانند در قالب تعداد کمی نقشه عاملی (کاهش تعداد متغیرها) نمایش داده شوند؟ (Reimann et al., 2002; Helvoort et al., 2005). ۴) چگونه می‌توان با کاربرد تحلیل عاملی موفقیت اکتشافات ژئوشیمیایی رسوبات آبراهه‌ای را افزایش داد؟ در مطالعه حاضر با ارائه و به‌کارگیری روش جدید تجزیه و تحلیل عاملی مرحله‌ای به برخی پرسش‌ها در مورد استفاده از تحلیل عاملی در اکتشافات ژئوشیمیایی رسوبات آبراهه‌ای پاسخ داده و افزون بر این، روش ارائه شده موجب شدت بخشی به هاله‌های ژئوشیمیایی و تولید نقشه ژئوشیمی بهبودیافته شده است. به منظور بارزسازی بهتر و اعتبارسنجی روش ارائه شده از داده‌های حاصل از تجزیه شیمیایی نمونه‌های رسوب آبراهه‌ای در ورقه‌های ۱/۱۰۰۰۰۰ ساردویه و بافت در استان کرمان برای پی‌جویی کانی‌سازی مس (مطالعه موردی کانی‌سازی فلزی) و از داده‌های ژئوشیمیایی ورقه ۱/۱۰۰۰۰۰ پل‌سفید در استان مازندران برای پی‌جویی کانی‌سازی فلورین (مطالعه موردی کانی‌سازی غیرفلزی) استفاده شده است. همچنین به منظور اجرای تحلیل‌ها، با توجه به نوع و کیفیت داده‌های موجود در منطقه ساردویه – بافت از نتایج تجزیه عناصر Au, Mo, Zn, Pb, Ag, As, Sb و Cu و در منطقه پل سفید از نتایج تجزیه عناصر Au, Mo, Zn, Pb, Ba, Ag, As, Cu, Ni, Sn, Cr, V, Mn, Sr, Bi, W, Sb و Co استفاده شده است. افزون بر این در منطقه ساردویه و بافت از تعداد ۳۲ اندیس شناخته شده مس موجود و در منطقه پل‌سفید از محل رخنمون‌های سنگ میزبان کانی‌سازی به عنوان نمونه‌های آزمون و اعتبارسنجی روش‌های معرفی شده بهره گرفته شده است. گفتنی است که استفاده از نقشه درون‌یابی شده (منحنی‌های میزان) در مطالعه حاضر به علت نمایش بهتر تغییرات شدت بی‌هنجاری‌ها به منظور مقایسه نتایج بوده است در غیر این صورت نمایش بی‌هنجاری‌ها به صورت نمادین یا تعیین حوزه بالادست، نتایج بهتر و واقع‌بینانه‌تری به‌دست می‌دهد.

۲– روش مطالعه

در این مطالعه ابتدا تحلیل عاملی و سپس با شناسایی و حذف مرحله به مرحله عناصر

غیرمعرف (با توجه به خروجی هر مرحله از تحلیل عاملی)، تحلیل عاملی مراحل بعد اجرا شده است. در پایان با مقایسه نتایج دو روش تحلیل عاملی معمولی و تحلیل عاملی مرحله‌ای، اثبات شده که تحلیل فاکتوری مرحله‌ای روشی بهبودیافته است.

۳- مناطق مورد مطالعه و کانی‌سازی

منطقه مورد مطالعه پل‌سفید با مساحت حدود ۲۵۰۰ کیلومتر مربع در بخش خاوری پهنه البرز مرکزی قرار گرفته است (شکل ۱- الف). این بخش از البرز پتانسیل بالایی برای پی‌جویی ذخایر فلورین دارد. این ذخایر با عنوان ذخایر جنوب استان مازندران شناخته می‌شوند. موقعیت نمونه‌های برداشت‌شده رسوب آبراهه‌ای از برگه پل‌سفید در شکل ۱- ب نشان داده شده است. منطقه مورد مطالعه ساردویه - بافت با مساحت حدود ۵۰۰۰ کیلومتر مربع در بخش جنوب خاوری پهنه ارومیه- دختر قرار دارد (شکل ۱- الف). این پهنه پتانسیل بالایی برای اکتشاف ذخایر مس دارد. اهمیت این پهنه توسط پژوهشگران بسیاری (مانند Boomeri et al., 2009; Hezarkhani, 2006 a, b; Ranjbar et al., 2004; Tangestani & Moore, 2002; Atapour & Aftabi, 2007) تأیید شده است. در شکل ۱- ج موقعیت نمونه‌های برداشت‌شده از منطقه ساردویه- بافت نشان داده شده است.

۴- تجزیه و تحلیل عاملی مرحله‌ای

هدف از تحلیل فاکتوری تعیین متغیرهای کنترل‌کننده اصلی در میان یک سری داده‌های ژئوشیمیایی یا به عبارت دیگر یافتن کمترین تعداد متغیرهایی است که بیشترین تغییرات دیده شده را در میان سری داده‌ها پوشش و ابعاد داده‌ها را کاهش دهد. فرض اساسی در این روش، وجود ارتباط میان متغیرهاست که این ارتباط در قالب یک عامل در یک مدل فرضی نمود می‌یابد. در بیشتر موارد در پردازش داده‌های ژئوشیمیایی رسوبات آبراهه‌ای، از آنجایی که در نقشه‌های تک‌متغیره ژئوشیمیایی عناصر مورد بررسی (حاصل از اجرای تحلیل‌های تک‌متغیره)، محل بی‌هنجاری‌های عناصر مختلف در برخی نواحی منطبق و در برخی نواحی متفاوت است، این نقشه‌ها نمی‌توانند برای بررسی الگوی پراکندگی عناصر به‌ویژه در پی‌جویی برای یک ماده معدنی با نوع مشخص به‌گونه‌ای مطلوب مورد استفاده قرار گیرند. بنابراین انتخاب بهترین نواحی پایانی در این حالت مشکل است. به همین منظور از تحلیل‌های چند متغیره مانند تحلیل عاملی استفاده می‌شود. مانند بسیاری از روش‌های آماری، تحلیل عاملی نسبت به داده‌های غیر نرمال حساس است. بنابراین باید طبیعت توزیع داده‌ها کنترل شود. در مجموعه داده‌های ژئوشیمیایی ناحیه‌ای عموماً تغییرات داده‌ها از منحنی نرمال پیروی نمی‌کنند (Reimann & Filzmoser, 2000). از این‌رو ابتدا توزیع داده‌ها باید به نرمال (تا حد ممکن) تبدیل شود. در مطالعه حاضر از تبدیل لگاریتمی برای انتقال داده‌ها به حالت نرمال و همچنین از روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی برای استنتاج عامل‌ها استفاده شده است. افزون بر این از آنجا که یک عامل چند متغیر را کنترل می‌کند روش‌هایی وجود دارند که بدون تغییر میزان اشتراک، تفسیر عوامل را ساده‌تر می‌سازد. این روش‌ها همان دوران عوامل هستند. در مطالعه حاضر از روش واریماکس (Varimax) برای دوران داده‌ها استفاده شده است (Kaiser, 1958).

۴-۱. اجرای تحلیل عاملی مرحله‌ای و استخراج ترکیب پیشگوی کانی‌سازی مس

در مورد داده‌های ژئوشیمیایی منطقه ساردویه- بافت، پس از آماده‌سازی و تبدیل داده‌ها به جوامع تقریباً نرمال از یک تحلیل عاملی دو مرحله‌ای، به عنوان یک روش جدید، برای استنتاج ترکیب ژئوشیمیایی پیشگوی کانی‌سازی، استفاده شده است. در مرحله اول، تحلیل عاملی به طور آشکاری ۳ عامل را بر پایه ترکیب شیمیایی نمونه‌ها معرفی کرد. ماتریس چرخش‌یافته این مرحله در جدول ۱ آمده است. در این جدول حد ۰/۶ به عنوان آستانه جداسازی عامل‌ها در نظر گرفته شد و افزون بر این به منظور آشکارسازی بهتر عامل‌های استنتاج‌شده، نمودار پراکندگی نسبی عناصر در فضای چرخش‌یافته نیز رسم شده که در شکل ۲ نشان داده شده است.

همان‌گونه که دیده می‌شود پس از انجام تجزیه عاملی، طبق جدول شماره ۱، سه عامل معرفی شد. عامل اول شامل ۲ عنصر Ag و Sb عامل دوم شامل ۲ عنصر Pb و Zn و عامل سوم شامل عناصر Cu و Au است. در جدول ۲ نیز واریانس تحت پوشش هر عامل در تحلیل عاملی مرحله اول آمده است.

استفاده از تحلیل عاملی محاسبه یک مقدار منفرد را برای هر عامل ممکن می‌سازد. برای نمونه به جای تحلیل دو نقشه جدا برای عناصر Ag و Sb، یک رابطه خطی (فاکتور) میان دو عنصر تولید شده و یک نقشه با عنوان نقشه امتیاز عاملی رسم می‌شود. همان‌گونه که در شکل ۲ دیده می‌شود میان عناصر Ag و Sb و همچنین بین عناصر Pb و Zn نزدیکی و همبستگی وجود دارد ولی میان دو عنصر Cu و Au همبود کاملی وجود ندارد. بر پایه جدول ۲، واریانس تشریح شده به وسیله ۳ عامل اول، دوم و سوم به ترتیب برابر ۴۳/۲۶ و ۲۱/۸۲ و ۱۳/۴۳ است. به علت حضور عناصر معرف، عامل سوم (Cu و Au) بهترین ترکیب پیشگوی کانی‌سازی مس پورفیری است. بنابراین محل‌هایی که دارای امتیاز عاملی بالایی از عامل سوم باشند، می‌توانند به عنوان مناطق امیدبخش طبقه‌بندی شوند. همچنین عامل‌های اول و دوم نیز به علت حضور عناصر ردیاب می‌توانند برای پی‌جویی مس (به‌ویژه از نوع پورفیری) مفید باشند ولی از آنجا که در مطالعه حاضر تمرکز تنها بر روی عامل سوم (به عنوان مهم‌ترین عامل پیشگوی مس) است، نقشه توزیع امتیاز عاملی برای عامل سوم (Cu و Au) در شکل ۳ به دو صورت درون‌یابی شده و نمادین نشان داده شده است. در نقشه‌های نمادین، مقدار امتیاز عاملی برابر و بزرگ‌تر از درصد فراوانی ۹۵ درصد به عنوان حد جدایش، به منظور مقایسه با دیگر نقشه‌ها، در نظر گرفته شده است.

هر یک از نقشه‌های توزیع امتیاز عاملی برای عامل‌های اول، دوم و سوم می‌توانند نواحی را به عنوان نواحی امیدبخش معرفی کنند. افزون بر این نواحی امیدبخش در این نقشه‌ها ممکن است با هم منطبق باشند یا همپوشانی نداشته باشند. در این حالت پرسش این است که در پایان، کدام نواحی را باید به عنوان نواحی امیدبخش به صورت یک نقشه برای پی‌جویی کانی‌سازی از نوع مورد جستجو انتخاب کرد؟ یکی از پاسخ‌های این پرسش این است که مناطق معرفی شده در نقشه توزیع مقادیر عاملی عامل سوم با توجه به حضور عناصر Cu و Au در آن، در اولویت هستند ولی در حقیقت برخی دیگر از عامل‌ها نیز توانایی ردیابی کانی‌سازی مورد جستجو را، البته با اهمیت کمتر، دارند. حتی اگر پذیرفته شود که عامل سوم تنها عامل معرف کانی‌سازی مس است، به علت ماهیت ریاضی روش تجزیه و تحلیل عاملی هنوز هم مشکل وجود دارد. زیرا در محاسبه امتیاز عاملی هر نمونه، مقدار غلظت دیگر عناصر که در عامل‌های دیگر قرار دارند نیز تأثیرگذار هستند. این تأثیر از نوع منفی است و سبب فاصله گرفتن امتیاز هر نمونه از مقدار واقعی می‌شود و در نتیجه جداسازی نمونه‌های بی‌هنجاری دارای خطا خواهد بود. در مطالعه حاضر با به‌کارگیری تحلیل عاملی مرحله‌ای نه تنها از این تأثیر منفی کاسته شده، بلکه این روش سبب شدت بخشی به بی‌هنجاری‌ها و همچنین کاهش تعداد متغیرها شده است. بنابراین به منظور اجرای تجزیه و تحلیل عاملی مرحله دوم، ابتدا عناصر Mo و As که در جدول ۱ هیچ‌گونه همبستگی مثبتی با دیگر عناصر در هیچ یک از عامل‌ها ندارند، حذف شدند. سپس دوباره تجزیه و تحلیل عاملی روی داده‌ها اجرا شد. ماتریس چرخش یافته، در مرحله دوم اجرای تحلیل عاملی در جدول ۳ نشان داده شده است. در این جدول نیز مانند مرحله اول، حد ۰/۶ به عنوان حد آستانه جداسازی عامل‌ها در نظر گرفته شده است. افزون بر این به منظور آشکارسازی بهتر عامل‌های استنتاج‌شده، نمودار پراکندگی نسبی عناصر در فضای چرخش یافته نیز رسم شد که در شکل ۴ نشان داده شده است.

بر پایه نتایج تحلیل عاملی مرحله دوم، دو ترکیب پیشگو قابل استنتاج است. عامل اول شامل عناصر Sb، Ag، Pb و Zn و عامل دوم شامل عناصر Cu و Au است. در این حالت نیز به منظور مقایسه نتیجه اجرای تحلیل عاملی مرحله دوم با مرحله اول، واریانس تحت پوشش هر عامل در جدول ۴ آمده است.

با توجه به اعداد جدول ۴ دیده می‌شود که واریانس تشریح شده به وسیله عامل اول (Zn-Pb-Sb-Ag) و عامل دوم (Cu-Au) به ترتیب برابر ۴۹/۶ و ۲۰/۰۵ است. بنابراین مجموع واریانس تحت پوشش عامل دوم (Cu-Au) که معرف و پیشگوی قوی‌تری برای پی‌جویی مس پورفیری است، از ۱۳/۴۳ به ۲۰/۰۵ افزایش یافته است. همچنین مجموع واریانس تحت پوشش عامل اول (Zn-Pb-Sb-Ag) که برای پی‌جویی مس پورفیری یک ترکیب ردیاب است بیشتر شده و از ۴۳/۶ به ۴۹/۴ افزایش یافته است. همچنین افزون بر دو مورد بالا تعداد متغیرها از ۳ به ۲ کاهش یافته است. برتری‌های نتایج مرحله دوم تحلیل عاملی نسبت به مرحله اول به علت حذف عناصری است که در هیچ عاملی همبستگی مثبت نشان نداده‌اند. البته باید یادآور شد که برای نمونه عنصر Mo برای مس پورفیری یک ردیاب است ولی از آنجا که روش تحلیل عاملی یک روش آماری است، بنابراین با افزایش یا کاهش غلظت یا خطای تجزیه، حتی در چند نمونه، ممکن است محل این عنصر در خروجی تحلیل جابه‌جا شود. با توجه به اینکه در جدول ۳ عنصری وجود ندارد که نتوان آن را در هیچ عاملی طبقه‌بندی کرد (عنصر با مقدار امتیاز کمتر از ۰/۶)، بنابراین مرحله دوم، مرحله پایانی اجرای تجزیه و تحلیل عاملی مرحله‌ای خواهد بود. گفتنی است که استفاده از تعداد عناصر کمتر یا بیشتر طبیعتاً تعداد مراحل کمتر یا بیشتر را برای تحلیل عاملی در پی خواهد داشت. بنابراین پس از پایان تجزیه و تحلیل عاملی مرحله‌ای، نقشه پایانی بهترین عامل معرف کانی‌سازی مس پورفیری (یعنی عامل دوم شامل عناصر Cu و Au) که در واقع بی‌هنجاری‌ها در آن شدت بیشتری دارند، رسم شد که در شکل ۵ نشان داده شده است. همچنین در شکل ۶ مقایسه تعداد اندیس‌های پیش‌بینی شده با کاربرد دو روش تحلیل عاملی معمولی و روش بهبودیافته یعنی تحلیل عاملی مرحله‌ای آمده است.

همان‌گونه که در شکل ۵ دیده می‌شود، شدت بی‌هنجاری‌ها در پیرامون ذخایر معدنی در مقایسه با شکل ۳ بیشتر شده است. همچنین با توجه به شکل ۶، نمودار نرخ پیش‌بینی اندیس‌های شناخته شده با استفاده از روش تحلیل عاملی مرحله‌ای به طور آشکاری بالاتر از نمودار نرخ پیش‌بینی در حالت استفاده از روش تحلیل عاملی معمولی قرار دارد.

۴-۲. اجرای تحلیل عاملی مرحله‌ای و استخراج ترکیب پیشگوی کانی‌سازی فلورین

پس از آماده‌سازی و تبدیل داده‌های ژئوشیمیایی برگه پل‌سفید به جامعه تقریباً نرمال، از تحلیل عاملی مرحله‌ای برای استنتاج بهترین ترکیب چند عنصری معرف کانی‌سازی فلورین استفاده و پس از اجرای چهار مرحله بهترین ترکیب معرف کانی‌سازی فلورین شامل عناصر Pb، Ag، Zn، Ba و Sb استخراج شد. نتایج اجرای ۴ مرحله تحلیل عاملی در جدول ۵ آمده است. همان‌گونه که در این جدول دیده می‌شود پس از اجرای مرحله اول تحلیل عاملی دو عنصر Sr و Au در هیچ عاملی طبقه‌بندی نمی‌شوند (با در نظر گرفتن حد آستانه ۰/۶) بنابراین این دو عنصر ابتدا حذف و سپس تحلیل عاملی مرحله دوم اجرا شده است. در خروجی این مرحله هیچ عنصری وجود ندارد که نتوان آن را در زیر مجموعه یک عامل طبقه‌بندی کرد. بنابراین باید بهترین عامل انتخاب شود که با توجه به اینکه هدف پی‌جویی کانی‌سازی فلورین است عامل دوم از مرحله دوم (F2) بهترین عامل خواهد بود. پس از این مرحله، در مرحله سوم تحلیل عاملی، همه عناصری که به دیگر عامل‌ها تعلق دارند حذف و تحلیل عاملی، دوباره تنها با عناصر عامل دوم اجرا می‌شود. نتیجه تحلیل عاملی مرحله سوم نشان می‌دهد که عنصر Mo (با در نظر گرفتن حد آستانه ۰/۶) نیز باید از این مجموعه حذف شود. بنابراین با اجرای تحلیل عاملی مرحله چهارم بهترین ترکیب چند عنصری معرف کانی‌سازی فلورین به‌دست آمده است. همان‌گونه که دیده می‌شود مجموع واریانس تحت پوشش برای عامل معرف (F2) در مرحله اول تحلیل عاملی از ۶۲/۷۸ به ۶۹/۱۷ در مرحله چهارم تحلیل عاملی افزایش یافته است که نشانه بهبود مدل چند عنصری است (جدول ۵).

پس از استنتاج بهترین الگوی معرف کانی‌سازی فلورین، به منظور مقایسه، مقادیر امتیاز عاملی نمونه‌های رسوب آبراهه‌ای به‌صورت نقشه توزیع مقادیر برای عامل‌های پیشگو، در مرحله اول و چهارم تحلیل عاملی، رسم شد (شکل ۷).

از مقایسه شکل‌های ۷- الف و ب به‌طور آشکاری مشخص است که شدت بی‌هنجاری‌ها در شکل ۷- ب که حاصل تجزیه و تحلیل عاملی مرحله‌ای است، بیشتر است همچنین در شکل ۷- ب مرز جدایش محل‌های بی‌هنجاری از نواحی بهنجار را به‌طور آشکارتری می‌توان جدا کرد. برای نمونه مقایسه بخش‌های باختر و خاور منطقه مورد مطالعه در هر دو نقشه نشان می‌دهد که این دو بخش در نقشه شکل ۷ - ب به طور آشکارتری در بخش زمینه طبقه‌بندی شده است. همچنین مقایسه بخش‌های مرکزی و شمال باختر منطقه مورد مطالعه در هر دو نقشه نشان می‌دهد که این دو بخش در نقشه شکل ۷- ب به طور آشکارتری در بخش بی‌هنجاری طبقه‌بندی شده است. بنابراین حد و مرز جدایش بی‌هنجاری از زمینه در نقشه چند عنصری حاصل از تحلیل عاملی مرحله‌ای واضح‌تر است. افزون براین مقایسه محل رخنمون‌های سنگ میزبان کانی‌سازی (با توجه به مطالعات انجام شده بیشتر آهک‌ها و دولومیت‌های سازند الیکا و گاه سازند تیزکوه) در دو نقشه نشان می‌دهد که انطباق بیش‌تری بین محل این رخنمون‌ها در بالادست بی‌هنجاری‌های ژئوشیمیایی در نقشه ۷- ب نسبت به نقشه ۷ - الف وجود دارد. همچنین در نقشه ۷ - ب شدت بی‌هنجاری در پایین‌دست معدن فلورین بیشتر است.

۵- بحث

با توجه به اینکه انتخاب بهترین ترکیب عناصر ردیاب و معرف در پی‌جویی یک نوع کانی‌سازی مشخص، همیشه بحث برانگیز بوده و تحلیل عاملی معمولی ممکن است نتایج قطعی را به دست ندهد، استفاده از تحلیل عاملی مرحله‌ای که در آن عناصر و ترکیب‌های غیر پیشگو حذف می‌شوند نتایج دقیق‌تری را در مورد ترکیب عناصر در هر عامل پیشگو و همچنین امتیاز چند عنصری هر نمونه رسوب آبراهه‌ای در اختیار می‌گذارد. بررسی‌های صورت گرفته در مطالعه حاضر، با استفاده از روش جدید معرفی شده یعنی اجرای تجزیه و تحلیل عاملی مرحله‌ای که در واقع اصلاح روش تحلیل عاملی معمولی است، بر روی دو نوع ماده معدنی متفاوت و در دو منطقه متفاوت، نشان می‌دهد که با شناسایی و حذف مرحله به مرحله عناصر با تأثیر منفی، امتیاز عاملی هر نمونه به مقدار واقعی نزدیک‌تر شده است زیرا مجموع واریانس تشریح شده توسط هر عامل افزایش می‌یابد و جدایش عوامل نیز در تحلیل عاملی مرحله‌ای آشکارتر صورت گرفته است. بنابراین عملکرد تحلیل عاملی مرحله‌ای مؤثرتر از تحلیل عاملی معمولی در شناسایی عوامل چند عنصری معرف برای پی‌جویی یک نوع کانی‌سازی معین است و موجب بهبود خروجی تحلیل عاملی خواهد شد. افزون بر این در مدل‌سازی پتانسیل معدنی که در آن نقشه شاهد ژئوشیمیایی یک لایه مهم است همیشه باید از یک ترکیب چند عنصری به جای یک عنصر خاص استفاده شود که در این زمینه استفاده از تحلیل عاملی مرحله‌ای می‌تواند در شناسایی بهترین ترکیب معرف راهگشا باشد و استفاده از این روش موجب شدت‌بخشی به بی‌هنجاری‌ها، افزایش واریانس تحت پوشش عوامل، افزایش نرخ پیش‌بینی اندیس‌های معدنی و همچنین افزایش انطباق میان بی‌هنجاری‌های ژئوشیمیایی و سنگ میزبان کانی‌سازی می‌شود.

۶- نتیجه‌گیری

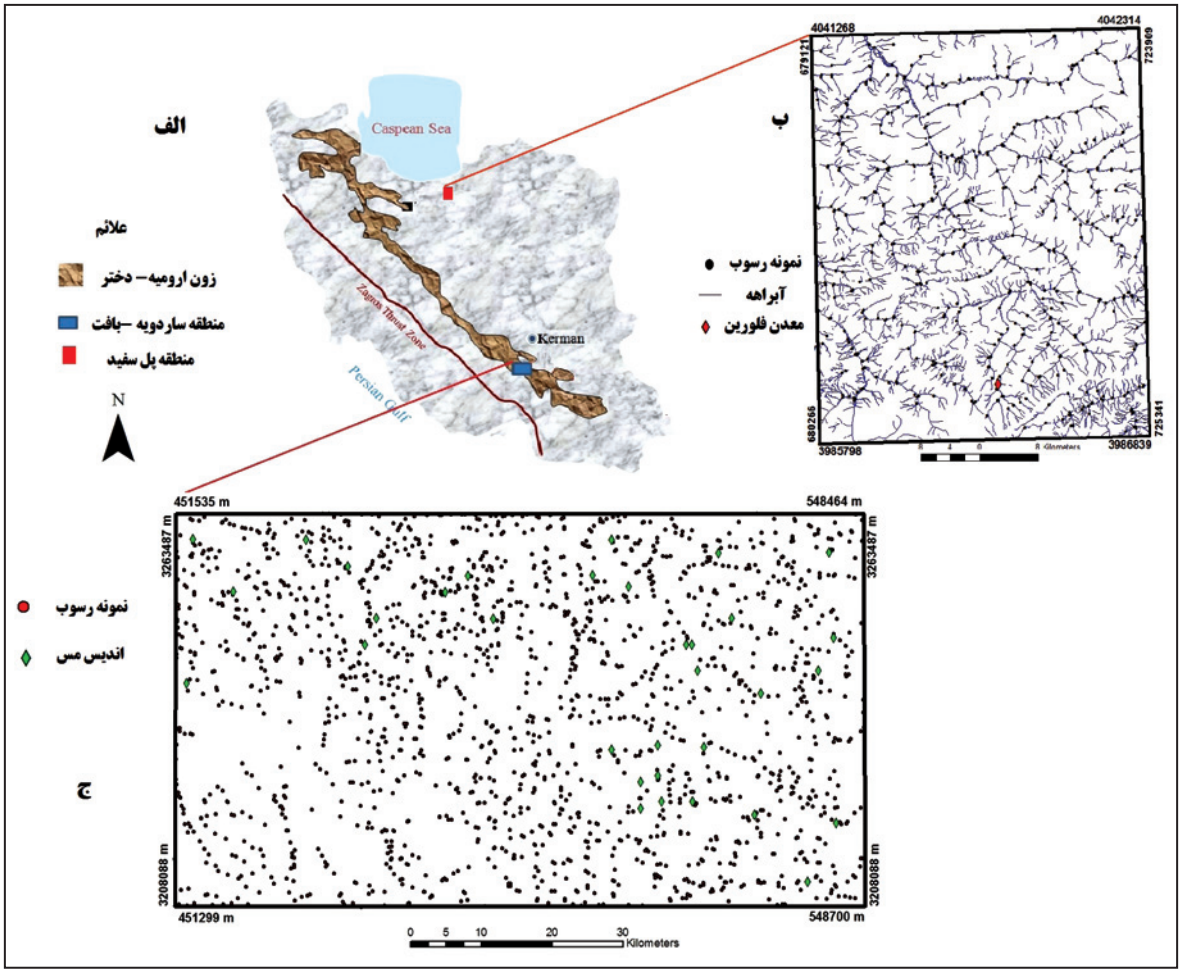
نتایج حاصل از اجرای روش جدید بهبودیافته تحلیل عاملی مرحله‌ای نسبت به روش پیشین را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد:

- محل بی‌هنجاری‌های چند عنصری با ترکیب سنگی میزبان کانی‌سازی انطباق بیشتری دارد (شکل ۷).
- شدت هاله‌های ژئوشیمیایی چند عنصری به‌ویژه در پیرامون کانی‌سازی‌ها افزایش می‌یابد (شکل‌های ۵ و ۷).
- نرخ پیش‌بینی اندیس‌های معدنی افزایش می‌یابد (شکل ۶).
- واریانس تشریح‌شده و تحت پوشش هر عامل پیشگو افزایش می‌یابد (جدول‌های ۲، ۴ و ۵).
- بیشتر تعداد متغیرها کاهش می‌یابد (جدول‌های ۱، ۳ و ۵).
- عناصر دارای تأثیر منفی در محاسبه مقدار واقعی امتیاز عاملی هر نمونه رسوب آبراهه‌ای شناسایی و حذف می‌شود.
- قدرت جداسازی نواحی بی‌هنجاری با توجه به تغییرات ناگهانی در مرز جدایش افزایش می‌یابد (شکل‌های ۵ و ۷).

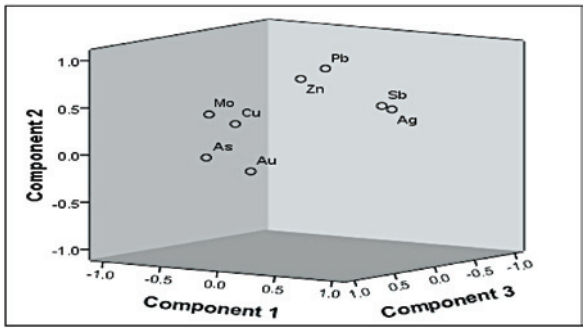
افزون‌بر موارد یاد شده، در مورد داده‌های منطقه مورد مطالعه ساردویه- بافت و کانی‌سازی مس، افزایش نرخ پیش‌بینی اندیس‌های شناخته شده (به‌عنوان نمونه‌های آزمون) با استفاده از اعتبارسنجی نتایج در شکل ۵ و به‌ویژه در شکل ۶، برتری روش تحلیل عاملی مرحله‌ای، با افزایش نرخ پیش‌بینی به میزان حدود ۱۳ درصد (در حد فراوانی ۹۵ درصد) در مقایسه با روش تحلیل عاملی معمولی، به اثبات رسیده است.

۶- سپاسگزاری

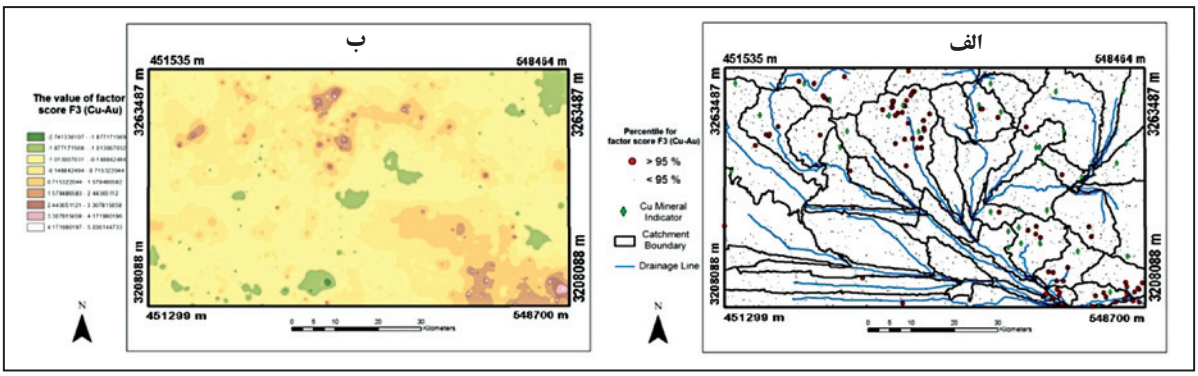
نویسندگان بر خود لازم می‌دانند از شرکت ملی صنایع مس ایران به‌ویژه جناب آقای مهندس اصفهانی‌پور، شرکت مهندسان مشاور معدن پارس آسیا جناب دکتر کریمی و جناب مهندس صاحب‌زمانی و همچنین از سازمان صنعت، معدن و تجارت استان مازندران برای حمایت‌هایشان سپاسگزاری کنند.



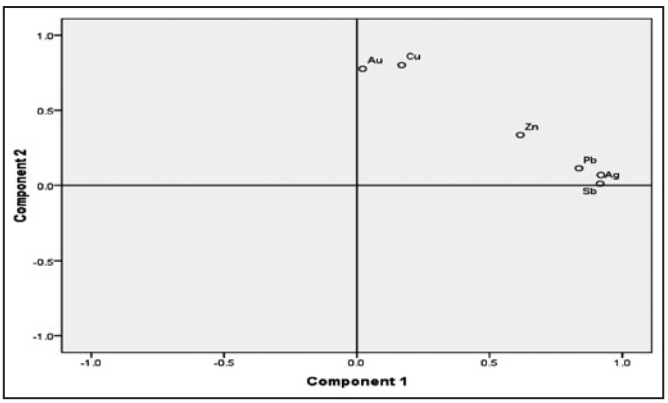
شکل ۱- الف) موقعیت مناطق مورد مطالعه در ایران؛ ب) نمونه‌های رسوب آبراهه‌ای؛ ج) منطقه پل سفید منطقه ساردویه- بافت.



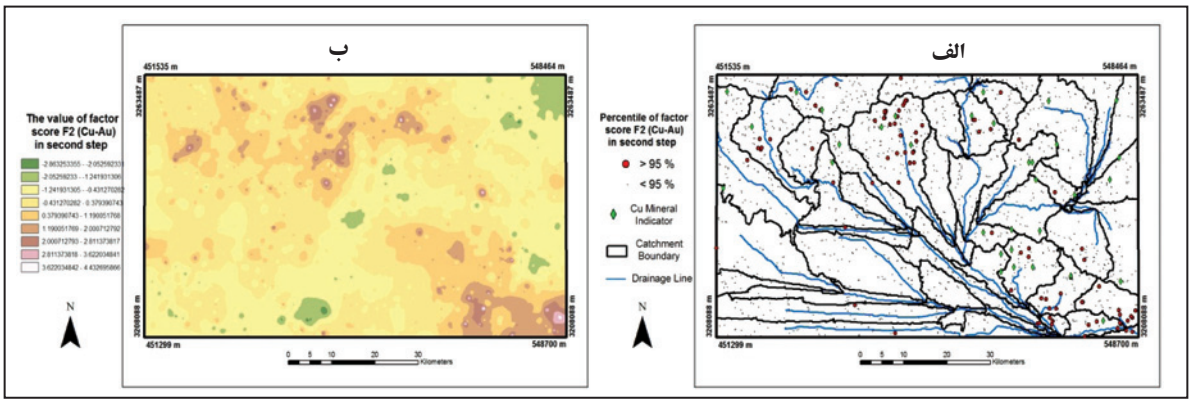
شکل ۲- نمودار پراکندگی عناصر در فضای چرخش‌یافته در تحلیل عاملی مرحله اول برای کانی‌سازی مس.



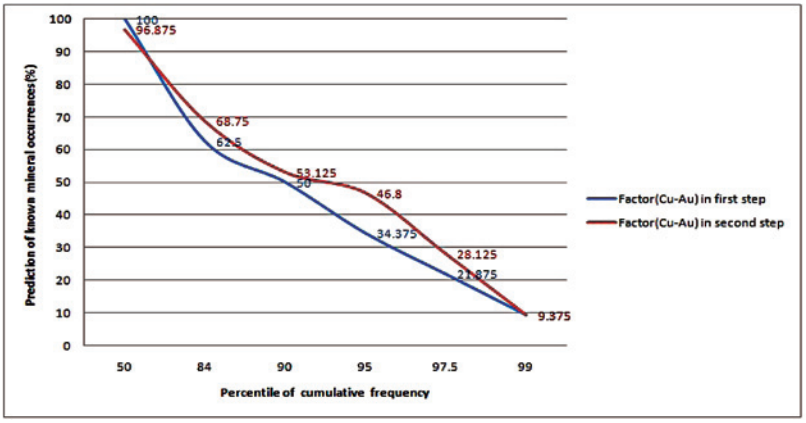
شکل ۳- الف) نقشه توزیع امتیاز عاملی عامل سوم (Cu و Au) به صورت نمادین و ب) توزیع مقادیر.



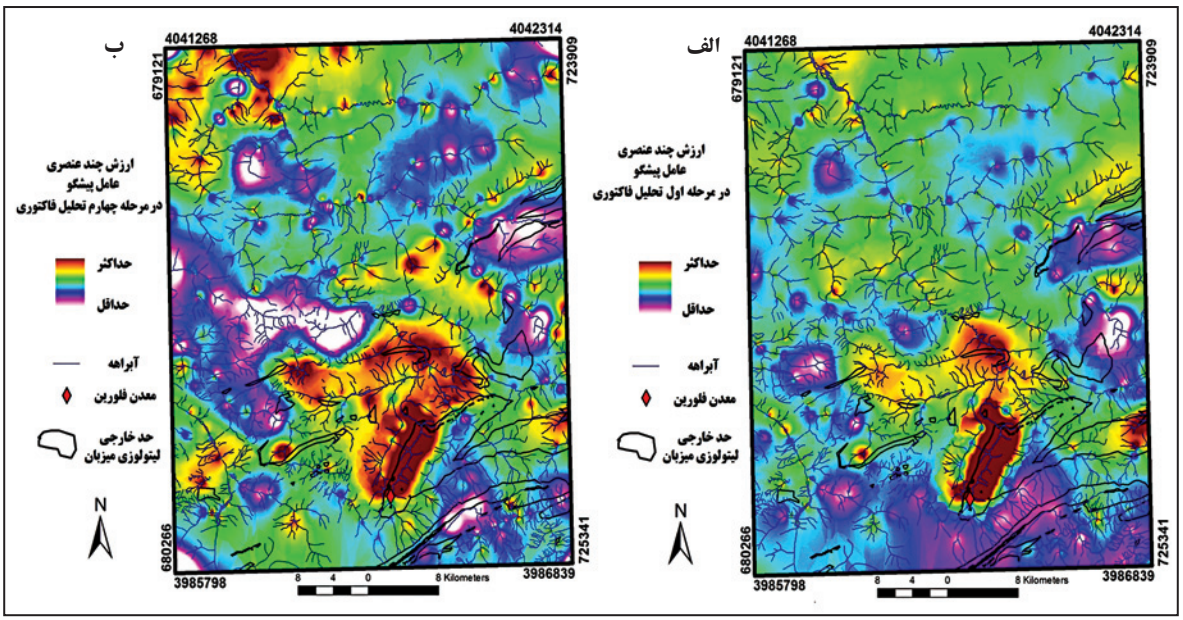
شکل ۴- نمودار پراکندگی عناصر در فضای چرخش‌یافته در تحلیل عاملی مرحله دوم برای کانی‌سازی مس.



شکل ۵- الف) نقشه نهایی بهبودیافته عامل معرف دوم به صورت نمادین و ب) توزیع مقادیر امتیاز عاملی



شکل ۶- مقایسه نرخ پیش‌بینی روش تحلیل عاملی معمولی و روش جدید بهبودیافته تحلیل عاملی مرحله‌ای.



شکل ۷- الف) نقشه توزیع ارزش چند عنصری نمونه‌های رسوب آبراهه‌ای با توجه به عامل پیشگو در مرحله اول و مرحله دوم؛ ب) تحلیل عاملی.

جدول ۱- ماتریس چرخش‌یافته در تحلیل عاملی مرحله اول برای کانی‌سازی مس.

	F_1	F_2	F_3
Zn	۰/۰۴۶	۰/۷۸۵	۰/۱۴۳
Pb	۰/۱۷۸	۰/۸۹۱	۰/۰۲۳
Ag	۰/۸۰۸	۰/۵۳۲	۰/۰۹۳
Cu	-۰/۱۳۸	۰/۳۶۹	۰/۶۹۲
As	-۰/۹۰۶	-۰/۱۷۲	-۰/۰۴۱
Sb	۰/۷۵۱	۰/۵۷۰	۰/۱۳۸
Mo	-۰/۷۵۰	۰/۳۲۹	۰/۱۴۸
Au	۰/۱۲۹	-۰/۰۸۰	۰/۸۸۴

جدول ۲ - مجموع واریانس تحت پوشش هر عامل در تحلیل عاملی مرحله اول برای کانی‌سازی مس.

Component	Initial Eigenvalues		
	Total	Variance%	Cumulative %
F_1 (Ag-Sb)	۳/۴۸۹	۴۳/۶۰۶	۴۳/۶۰۶
F_2 (Zn-Pb)	۱/۷۴۵	۲۱/۸۰۹	۶۵/۴۱۵
F_3 (Cu-Au)	۱/۰۷۲	۱۳/۴۰۵	۷۸/۸۲۱
4	۰/۶۲۹	۷/۸۶۱	۸۶/۶۸۲
5	۰/۵۹۰	۷/۳۷۸	۹۴/۰۵۹
6	۰/۳۲۰	۴/۰۰۵	۹۸/۰۶۴
7	۰/۱۱۵	۱/۴۴۳	۹۹/۵۰۸
8	۰/۰۳۹	۰/۴۹۲	۱۰۰/۰۰۰

جدول ۳- ماتریس چرخش‌یافته در تحلیل عاملی مرحله دوم برای کانی‌سازی مس.

	F_1	F_2
Zn	۰/۶۱۶	۰/۳۳۶
Pb	۰/۸۳۷	۰/۱۱۴
Ag	۰/۹۱۶	۰/۰۱۱
Cu	۰/۱۶۹	۰/۸۰۲
Sb	۰/۹۱۹	۰/۰۶۸
Au	۰/۰۲۲	۰/۷۷۷

جدول ۴ - مجموع واریانس تحت پوشش هر عامل در تحلیل عاملی مرحله دوم برای کانی‌سازی مس.

Component	Initial Eigenvalues		
	Total	Variance%	Cumulative %
F_1 (Zn-Pb-Ag-Sb)	۲/۹۶۸	۴۹/۴۶۵	۴۹/۴۶۵
F_2 (Cu-Au)	۱/۲۰۳	۲۰/۰۵۳	۶۹/۵۱۷
3	۰/۸۶۴	۱۴/۳۹۵	۸۳/۹۱۲
4	۰/۵۹۲	۹/۸۶۴	۹۳/۷۷۵
5	۰/۳۲۱	۵/۳۴۷	۹۹/۱۲۲
6	۰/۰۵۳	۰/۸۷۸	۱۰۰/۰۰۰

جدول ۵- تحلیل عاملی مرحله‌ای استنتاج عامل چند عنصری پیشگوی کانی‌سازی فلورین.

مرحله اول				مرحله دوم				مرحله سوم		مرحله چهارم	
عناصر	F1	F2	F3	عناصر	F1	F2	F3	عناصر	F1	عناصر	F1
Pb	0.418	**0.792**	-0.040	Pb	0.377	**0.830**	-0.011	Pb	**0.900**	Pb	**0.921**
Ag	0.011	**0.817**	0.224	Ag	-0.002	**0.799**	0.256	Ag	**0.784**	Ag	**0.759**
Zn	-0.035	**0.853**	0.240	Zn	-0.079	**0.867**	0.269	Zn	**0.824**	Zn	**0.784**
Ba	**0.687**	0.588	-0.261	Ba	**0.671**	**0.615**	-0.238	Ba	**0.760**	Ba	**0.824**
Sb	0.555	**0.708**	-0.107	Sb	0.544	**0.717**	-0.074	Sb	**0.840**	Sb	**0.860**
Cu	**0.810**	0.239	0.342	Cu	**0.790**	0.261	0.355	Mo	0.590	Eigenvalue	3.458
Ni	**0.669**	0.238	**0.605**	Ni	**0.675**	0.216	**0.622**	Eigenvalue	3.734	Var.	69.170
Mo	-0.145	**0.637**	0.463	Mo	-0.159	**0.613**	0.498	Var.	62.232	Cum.Var.	69.170
Sn	0.139	0.198	**0.862**	Sn	0.124	0.172	**0.863**	Cum.Var.	62.232		
Co	**0.686**	0.223	0.549	Co	**0.684**	0.214	0.565				
Cr	**0.843**	-0.037	-0.131	Cr	**0.856**	-0.026	-0.126				
V	**0.907**	0.094	0.060	V	**0.915**	0.102	0.071				
Mn	**0.866**	0.080	-0.096	Mn	**0.871**	0.097	-0.086				
Sr	-0.587	0.586	0.121	As	**0.744**	0.198	0.129				
As	**0.723**	0.216	0.105	Bi	**0.620**	0.031	0.203				
Bi	**0.609**	0.039	0.196	W	**0.696**	-0.034	0.165				
W	**0.713**	-0.067	0.171	Eigenvalue	7.519	2.877	1.574				
Au	0.561	-0.029	0.151	Var.	46.997	17.981	9.836				
Eigenvalue	7.816	3.485	1.582	Cum.Var.	46.997	64.978	74.813				
Var.	43.422	19.364	8.792								
Cum.Var.	43.422	62.786	71.577								

References

Atapour, H. & Aftabi, A., 2007- The geochemistry of gossans associated with Sarcheshmeh porphyry copper deposit, Rafsanjan, Kerman, Iran: Implications for exploration and the environment. Journal of Geochemical Exploration, 93, 47–65.

Boomeri, M., Nakashima, K. & Lentz, D. R., 2009- The Miduk porphyry Cu deposit, Kerman, Iran: A geochemical analysis of the potassic zone including halogen element systematics related to Cu mineralization processes .Journal of Geochemical Exploration, 103, 17–29.

Borovec, Z., 1996- Evaluation of the concentrations of trace elements in stream sediments by factor and cluster analysis and the sequential extraction procedure, The Science of the Total Environment, 177, 237-250.

Chandrajith, R., Dissanayake, C. B. & Tobschall, H. J., 2001- Application of multi-element relationships in stream sediments to mineral exploration: a case study of Walawe Ganga Basin, Sri Lanka. Applied Geochemistry, 16, 339-350.

Grunsky, E. C., Drew, L. J. & Sutphin, D. M., 2009- Process recognition in multi-element soil and stream-sediment geochemical data, Applied Geochemistry, 24, 1602–1616.

Halfpenny, R. & Mazzucchelli, R. H., 1999- Regional multi-element drainage geochemistry in the Himalayan Mountains, northern Pakistan, Journal of Geochemical Exploration, 67, 223–233.

Helvoort, P. J., Filzmoser, P. & Gaans, P. F. M., 2005- Sequential Factor Analysis as a new approach to multivariate analysis of heterogeneous geochemical datasets: An application to a bulk chemical characterization of fluvial deposits (Rhine–Meuse delta, The Netherlands), Applied Geochemistry, 20, 2233–2251.

Hezarkhani, A., 2006a- Mineralogy and fluid inclusion investigations in the Reagan Porphyry System, Iran, the path to an uneconomic porphyry copper deposit. Journal of Asian Earth Sciences, 27, 598–612.

Hezarkhani, A., 2006b- Petrology of the intrusive rocks within the Sungun Porphyry Copper Deposit, Azerbaijan, Iran. Journal of Asian Earth Sciences, 27, 326–340.

Kaiser, H. F., 1958- The varimax criteria for analytical rotation in factor analysis. Psychometrika 23, 187–200.

Kumru, M. N. & Bakac, M., 2003- R-mode factor analysis applied to the distribution of elements in soils from the Aydın basin, Turkey, Journal of Geochemical Exploration, 77, 81–91.

Ranjbar, H., Honarmand, M. & Moezifar, Z., 2004- Application of the Crosta technique for porphyry copper alteration mapping, using ETM data in the southern part of the Iranian volcanic sedimentary belt .Journal of Asian Earth Sciences, 24, 237–243.

Reimann, C. & Filzmoser, P., 2000- Normal and lognormal data distribution in geochemistry: dead of a myth. Consequences of geochemical and environmental data. Environ. Geol. 39, 1001–1014.

Reimann, C., Filzmoser, P. & Garrett, R. G., 2002- Factor analysis applied to regional geochemical data: problems and possibilities, Applied Geochemistry, 17, 185–206.

Sun, X., Deng, J., Gong, Q., Wang, Q., Yang, L. & Zhao, Z., 2009- Kohonen neural network and factor analysis based approach to geochemical data pattern recognition, Journal of Geochemical Exploration, 103, 6–16.

Tangestani, M. H. & Moore, F., 2002- Porphyry copper alteration mapping in the Meiduk area, Iran. International Journal of Remote Sensing 23, 4815–4825.

Increasing the Exploration Success and Intensify of Stream Sediment Geochemical Halos Using Recognizing and Omitting the Non-Predictive Factors- Case Studies: Fluorite and Copper Mineralization

M. Yousefi [1*], A. Kamkar-Rouhani [2] & M. Alipoor [3]

[1] Assistant Professor, Department of Mining, Faculty of Engineering, Malayer University, Malayer, Iran
[2] Associate Professor, Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics, Shahrood University, Shahrood, Iran
[3] Assistant Professor, Faculty of Geosciences, Shahrood University, Shahrood, Iran

Received: 2011 September 18 Accepted: 2012 July 07

Abstract

Study of geochemical stream sediments is an effective method for prospecting mineral deposits especially in preliminary exploration stages. In this regard, generally multivariate analysis, for example factor analysis, is used to elicit an indicator component of the mineralization type sought. There are still several problems with regard to usage of factor analysis that have been discussed in several published papers. In this research, we have used the stepwise factor analysis, which is a new approach to create geochemical stream sediment evidential map. Using the stepwise factor analysis, we have succeeded in recognizing more effective indicator components, increasing the intensity of geochemical halos and explaining higher percentage of the total variance of the data. We have also improved the prediction rate of mineral occurrences and consequently, increasing the exploration success. In this research, we have successfully used the stepwise factor analysis to generate enhanced geochemical evidential map for prospecting two different deposit-types in two different areas of Iran for case studies. Using the stepwise factor analysis, the total variance relevant to the indicator component of porphyry copper mineralization has been increased from 13.43 to 20.05, and the prediction rate of mineral occurrences has been increased from 34.37% to 46.8% for cumulative percentile of 95% frequency. Hence, the exploration success has been increased up to 13% at least in the study area. Furthermore, using stepwise factor analysis, there are much simultaneous present of geochemical anomalies and geological indicative features.

Keywords: Enhancement of Exploration Success, Stepwise Factor Analysis, Indicator Components, Geochemical Halo.
For Persian Version see pages 85 to 92
*Corresponding author: M. Yousefi; E-mail: M.Yousefi.Eng@gmail.com