

کاربرد مدل سازی MARS بر روی داده‌های اکتشافی به منظور تخمین پراکندگی ژئوشیمیایی مقدار طلا بر اساس پاراژنهای عنصری

رضا قوامی ریایی^{۱*}، داود شاهسونی^۲

۱- استادیار دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود rghavami2@yahoo.com

۲- استادیار دانشکده ریاضی دانشگاه صنعتی شاهرود

(دریافت 30 بهمن 1389، پذیرش 9 بهمن 1390)

چکیده

در این تحقیق روش مدل سازی رگرسیون غیرپارامتری چند متغیره اسپیلاین (MARS) به منظور تعیین الگوهای غیرخطی پنهانی (داده‌های با تعداد متغیرهای زیاد) بر روی داده‌های کانی‌سازی طلا تپ پهنه برشی واقع در شمال غرب ایران اعمال شده است. MARS متغیرهای Pb-As-W-Bi-Cu-Be-V-Sn را به عنوان پاراژنهای عنصری کانی‌سازی ارزیابی کرده است. بر این اساس مدل پراکندگی ژئوشیمیایی مقدار متغیر وابسته (Au) بر اساس متغیرهای مستقل (پاراژنهای عنصری) در طی دو مرحله مدل‌سازی پیشرو و پسرو تخمین زده شده است. مقایسه مقادیر تخمین‌زده‌شده متغیر مستقل با مقادیر اندازه‌گیری شده تأییدکننده همبستگی زیاد بین این دو دسته داده است. بدین ترتیب بر اساس توابع مبنای تعریف‌شده و روش MARS، مقدار طلا با دقت زیادی تخمین زده شده است. حدود آستانه‌ای تأثیر متغیرهای وابسته بر روی متغیر مستقل به صورت گره‌ای محاسبه شده است. چنانچه بخواهیم بر اساس روش‌های متداول آماری به تعریف تابع هدف بپردازیم لازم است تا تلفیقی از چندین روش آماری دو و چند متغیره را به کمک بگیریم. با این وجود امکان ارزیابی روند تغییرات متغیر مستقل در ازای مقادیر مختلف متغیرهای وابسته وجود ندارد که این امر در روش MARS ممکن است. مدل‌سازی این تحقیق در محیط‌های لیتوژئوشیمیایی ثانویه انجام شده است که لازم است نقش شرایط فیزیکوشیمیایی محیط و شرایط آب و هوایی منطقه نیز در مدل پراکندگی مدنظر قرار داده شود. نتایج مدل‌سازی پراکندگی ژئوشیمیایی عناصر در محیط‌های لیتوژئوشیمیایی اولیه می‌تواند در محاسبه و ارزیابی ذخیره اهمیت زیادی داشته باشد.

کلمات کلیدی

روش MARS، حد آستانه‌ای، متغیر مستقل، متغیر اسپیلاین، توابع مبنای

1- مقدمه

تجزیه دستگاهی یا شیمیایی برخی از عناصر بسیار مشکل است و دقت و صحت اندازه‌گیری آن‌ها نیازمند دستگاه‌هایی با حد قابل ثبت بسیار پایین است که به عنوان مثال می‌توان فلزات قیمتی مانند طلا (Au) و عناصر کمیاب خاکی (REE) را نام برد. استفاده از روش‌های ICP امکان آنالیز این عناصر با حد حساسیت ppb را میسر ساخته است ولی آنچه مسلم است فرآیند برداشت نمونه معرف و محلول‌سازی از نمونه‌های خاک، رسوبات و یا سنگ، بخشی از مشکل است که کماکان برای برخی از این عناصر، به‌ویژه طلا، باقی می‌ماند. علاوه بر آن، هزینه آنالیز با استفاده از این روش‌ها در فاز پی‌جویی و اکتشاف مقدماتی به لحاظ هزینه‌های اکتشافی قابل توجه نیست. در بسیاری از این موارد، عنصر مورد نظر (Au) دارای پاراژنهای ژئوشیمیایی است که فرآیند پراکندگی و یا تمرکز آن‌ها در شرایط زمین‌شناسی یکسان دارای روند مشابهی است. تجزیه این عناصر راحت‌تر بوده و دقت بالایی نیز دارد. تخمین غلظت عنصر مذکور بر اساس گروه عناصر پاراژن و روش‌های آماری-مدل‌سازی نیز میسر است.

روش‌های متعدد آماری وجود دارند که بر اساس آن‌ها امکان تعیین عناصر پاراژن یک متغیر وابسته ممکن است [1,2,3,4,5]. بر اساس عناصر پاراژن که امکان آنالیز آن‌ها با دقت زیاد و هزینه مناسب وجود دارد می‌توان توابعی برای تخمین مقدار متغیر وابسته (Au) تعریف کرد. در روال متداول از روش‌های ارزیابی رگرسیون، تحلیل خوشه‌ای و تحلیل فاکتوری به‌منظور تعیین روابط بین پاراژن‌ها و تعریف توابعی که آن‌ها را به یکدیگر مرتبط می‌سازد کمک گرفته می‌شود [6,7,8,9,10,11,12].

در یک روش مدل‌سازی جدید به نام اسپلین رگرسیونی تطبیقی چندمتغیره یا MARS¹ این امکان وجود دارد تا بتوان الگوی غیرخطی پنهان در مجموعه داده‌های با تعداد متغیر زیاد را آشکار کرد. بدین ترتیب ضمن بکارگیری یک روش، امکان تعریف تابع تخمین ممکن می‌شود و ضرورتی به تلفیق چندین روش آماری وجود نخواهد داشت. اساس این روش مبتنی بر توابعی با نام توابع مینا² است که برای هر متغیر توضیحی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\max\{0, x - t\} \quad \text{and} \quad \max\{0, t - x\}$$

که در آن t گره³ نامیده شده و در عمل یکی از مشاهدات آن متغیر توضیحی است. این توابع موسوم به توابع اسپلین هستند که در گره t زوج منعکس یافته‌ای⁴ هستند. شکل کلی مدل MARS به صوت زیر تعریف می‌شود [2,13,14,15,16]:

$$\hat{Y} = c_0 + \sum_{k=1}^M c_k B_k(X)$$

که در این معادله \hat{Y} مقدار تخمین متغیر مورد پاسخ، X بردار متغیرهای توضیحی و یا همان عناصر پاراژن، B_k تابع مینا و c_k ضرایبی هستند که با کمینه‌سازی مجموع مربعات باقیمانده‌ها تعیین می‌شوند. هر تابع مینا ممکن است به صورت یک تابع خطی اسپلین یا حاصل ضرب دو یا چند تا از آن‌ها باشد که مبین اثرات متقابل است [13, 14]. در مدل MARS فضای متغیرهای توضیحی را با گره‌هایی خاص به تعدادی ناحیه مجزا تفکیک می‌کند که آن گره‌ها باعث بیشترین کاهش در مجموع مربعات خطا شده‌اند.

برازش مدل MARS در دو مرحله انجام می‌شود. در مرحله پیشرو، تعداد زیادی از توابع مینا با گره‌های متفاوت بطور پی در پی به مدل اضافه می‌شوند. این عمل مدلی را تولید می‌کند که پیچیده بوده و موجب بیش‌برازش⁵ می‌گردد. در مرحله دوم یا مرحله حذف پسرو، توابع مبنائی که از اهمیت و تأثیرگذاری کمتری در تخمین برخوردار هستند، حذف می‌شوند. سرانجام، بهترین مدل بر مبنای کمینه بودن معیاری به نام "اعتبارسنجی تقاطعی تعیم یافته"⁶ (GCV) انتخاب می‌گردد. فرض کنید GCV_k مقدار GCV برای k امین مدل در مرحله حذفی باشد. این کمیت توسط عبارت زیر تعریف می‌شود

$$GCV_k = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{f}_k(x_i))^2 / (1 - C(k)/n)^2$$

که \hat{f}_k مدل برآورد شده در گام k ام مرحله حذفی پسرو و

$$C(k) = \lambda \cdot m$$

که m معرف تعداد گره‌های توابع اسپلین موجود در مدل و λ پارامتر هموار سازی نامیده شده و در عمل معمولاً بین 2 تا 4 انتخاب می‌شود.

در تعبیر و تفسیر داده‌های ژئوشیمیایی، بندرت از روش MARS به‌عنوان یک تکنیک تحلیل چند متغیره استفاده شده است. لذا در این تحقیق از روش مذکور بمنظور تخمین مقدار متغیر وابسته (Au) بر اساس متغیرهای مستقل کمک گرفته می‌شود.

شده و از مقدار جایگزین استفاده شده است.

1-1-4- تعبیر و تفسیر داده‌ها

بخشی از روش‌های ارزیابی فاکتورهای مؤثر بر کانی‌سازی طلا پهنه برشی روش‌های متداول تحلیل داده‌های ژئوشیمیایی است که می‌توان به تحلیل‌های ضرائب همبستگی، خوشه‌ای، فاکتوری - برداری و کنونیکال⁷ اشاره کرد. بر اساس بررسی‌های انجام شده با این روش‌ها، ارتباط ژنتیکی نزدیکی بین عوامل کانی‌ساز (Cu, Pb, Zn, Ag, Au,) با یکدیگر و عوامل سنگ‌ساز (Cr, Ni, Co, Mg, V) با یکدیگر وجود دارد [21]. روش دیگری که تاکنون بندرت در تحلیل داده‌های ژئوشیمیایی استفاده شده است روش MARS است که می‌تواند در گروه روش‌های تحلیل چند متغیره مطرح شود. در ادامه پارامترهای مؤثر در تخمین متغیر هدف را بر اساس روش MARS تجزیه و تحلیل شده‌اند. آنچه مسلم است، عوامل پاراژنتیک طلا مایید این قابلیت را داشته باشند که بر اساس آن‌ها بتوان تخمین و ارزیابی مناسبی بر اساس روش‌های مدل‌سازی و تحلیل MARS از میزان طلا به دست آورد. برای اعتبارسنجی نیز باید نتایج تخمین متغیر هدف را با نتایج آنالیزهای شیمیایی آن مقایسه کرد تا بهتر بتوان از قابلیت و توانمندی تخمین‌گر باخبر شد. در ادامه تفسیر بیشتر نتایج به دست آمده از MARS متمرکز شده است.

1-1-4- ارزیابی تحلیل مارس داده‌ها

برای ارزیابی پارامترهای درگیر با کانی‌سازی در منطقه مورد مطالعه، می‌توان از نتایج روش MARS نیز استفاده کرد. تفاوت عمده - ای که این روش با روش‌های متداول دارد در آن است که ضمن تعیین متغیرهای مؤثر، مدل پیش‌گویی متغیر پاسخ در برابر متغیرهای مستقل را تعیین می‌کند. به منظور اعمال تحلیل مارس، ابتدا این مدل با تنظیمات متفاوتی به داده‌ها برازش شده است. این تنظیمات شامل حداکثر تعداد توابع مینا در مرحله پیشرو، حداکثر مرتبه اثرات متقابل و پارامتر هموارسازی است. لازم به ذکر است که حداکثر تعداد توابع مینا و نیز حداکثر مرتبه اثرات متقابل، پارامترهایی هستند که توسط کاربر تعیین می‌شوند. همان‌گونه که در اصول روش مارس ذکر شده است، برای هر تنظیم، ابتدا در مرحله پیشرو کلیه توابع مینا به صورت مرحله به مرحله به مدل اضافه می‌شوند که در پایان اجرای این مرحله، مدل تولیدشده موجب خطای بالای محاسباتی می‌شود. در مرحله پسرو با حذف توابع مینای زائد که کمترین تأثیر را در مقدار طلا دارند به مدل نهایی دست خواهیم یافت. با اعمال هر تنظیم مدلی برآورد می‌شود و انتخاب بهترین مدل بر اساس حداقل بودن مجموع مربعات خطای برآورد، مقدار GCV و ضریب تعیین می‌شود. نتایج مدل انتخاب شده بدین صورت است. این نتایج با بسته نرم‌افزاری منبع - باز

2- کلیات زمین‌شناسی، تیپ کانی‌سازی و دگرسانی‌های مجاور

مناطق کانی‌سازی

منطقه مورد مطالعه در حاشیه باختری نوار دگرگونی سندانج - سیرجان و جنوب غربی ورقه زمین‌شناسی 1/100000 سقر واقع شده است. کهن‌ترین فعالیت‌های آذرین منطقه (استوک‌های گرانیتی - پرکامبرین) و توده‌های نفوذی بازیک سنگ‌های دگرگونی پرکامبرین (گنایس، شیست، مرمر و آمفیبولیت) را قطع کرده‌اند. در بازه‌های زمانی مزوزئیک (گرانیتوئیدی) و ترشیر (گرانیتوئیدی) توده‌های آذرین دیگری به داخل سنگ‌های دگرگونی قدیمی و پوشش آواری-کربناته پالئوزئیک تزریق شده است که خود می‌تواند عامل نویدبخشی برای کانی‌سازی‌های فلزی هیدروترمالی و اسکارنی در منطقه باشد. بخش - هایی از منطقه تحت تأثیر دگرگونی در حد رخساره‌های پایین شیست سبز (سازند کهر) تا بالاترین درجات رخساره آمفیبولیت واقع شده است [17,18,19].

تنش‌های تکتونیکی علاوه بر چین‌خوردگی و ایجاد درزه و گسل‌های فراوان، موجب کنتاکت گسله و تکتونیزه نیز شده است. دو روند NW-SE (به موازات روند اصلی زاگرس) و NE-SW (به سن احتمالی پالئوسن) غالب زون‌های گسله موجود در منطقه را تشکیل داده است.

بر اساس شرایط زمین‌شناسی، اطلاعات اکتشافی و مطالعات زمین‌شناسی اقتصادی منطقه، تیپ پهنه‌های برشی در مناطق کانی‌سازی محتمل بنظر می‌رسد. سنگ‌های درون‌گیر کانی‌سازی طلا در این پهنه به‌طور عمده متاولکانیک‌های اسیدی و بازیک کاملاً دگرپخته همراه با برگواری میلیونی و اولترامیلیونی هستند که در بین آن‌ها واحدهای فیلیتی و کربناتی نیز قرار گرفته است [17,18,20]. دگرسانی‌های سریسیتی، کلریتی، سیلیسی، سولفیدی و کربناتی شدن از مهمترین دگرسانی‌های موجود در سنگ‌های منطقه محسوب می‌شوند. تقریباً در کلیه واحدهای سنگی منطقه، دگرسانی کلریتی و سریسیتی گسترش دارد ولی در بخش‌های داخلی زون‌های دگرسانی و در ارتباط با زون‌های کانه‌دار دگرسانی سیلیسی، سولفیدی و کربناتی بیشترین گسترش را دارند [18].

3- نمونه‌برداری و تجزیه نمونه‌ها

نمونه‌برداری ژئوشیمیایی از رسوبات رودخانه‌ای با تراکم 2Km^2 برای هر نمونه انجام شده است. بخش زیر 40 مش رسوبات بسته‌بندی شد و برای تهیه نمونه مورد نیاز برای تجزیه، حدود 100gr از بخش زیر 200 مش به آزمایشگاه آنالیز ارسال شد. هر نمونه با استفاده از روش اسپکترومتری نشری (Ag, As, B, Ba, Be, Bi, Co, Cr, Cu,) (Hg, Mn, Mo, Ni, Pb, Sb, Sn, Ti, V, W, Zn) و جذب اتمی (Au) تجزیه شد [19]. نتایج آنالیز به دست آمده عناصر و طلا عدم وجود داده سنسوردی را تایید می‌کند. در بین داده‌های طلا یک مقدار خارج از ردیف موجود است که قبل از شروع هرگونه محاسبات اصلاح

R و با استفاده از تابع earth به دست آمده است. در واقع R یک زبان و محیطی است برای محاسبات روش‌های پیشرفته آماری که این روش‌ها در نرم‌افزارهای تجاری قابل دسترس نیستند.

$$\begin{aligned}
 Au = & 66.691 - 0.030 * BF_1 + 37.317 * BF_2 - 0.006 * BF_3 \\
 & - 4.407 * BF_5 - 28.816 * BF_6 + 0.058 * BF_7 \\
 & - 2146.417 * BF_8 - 2587.655 * BF_9 - 0.186 * BF_{10} \\
 & - 0.076 * BF_{11} + 10.101 * BF_{12} + 13.220 * BF_{13} \\
 & + 2140.162 * BF_{14} - 9.794 * BF_{16} - 0.001 * BF_{19} \\
 & + 0.012 * BF_{20} - 0.816 * BF_{22}
 \end{aligned}$$

رابطه (1)

که در آن توابع مبنا عبارتند از:

Basis Functions

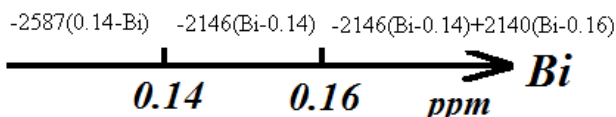
$$\begin{aligned}
 BF_1 &= \max(0, As - 8.370); \\
 BF_2 &= \max(0, 8.370 - As); \\
 BF_3 &= \max(0, Pb - 31.000) * BF_1; \\
 BF_4 &= \max(0, 31.000 - Pb) * BF_1; \\
 BF_5 &= \max(0, Cu - 20.900); \\
 BF_6 &= \max(0, 20.900 - Cu); \\
 BF_7 &= \max(0, W - 2.400) * BF_4; \\
 BF_8 &= \max(0, Bi - 0.140); \\
 BF_9 &= \max(0, 0.140 - Bi); \\
 BF_{10} &= \max(0, Be - 2.400) * BF_7; \\
 BF_{11} &= \max(0, 2.400 - Be) * BF_7; \\
 BF_{12} &= \max(0, W - 2.700) * BF_5; \\
 BF_{13} &= \max(0, 2.700 - W) * BF_5; \\
 BF_{14} &= \max(0, Bi - 0.160); \\
 BF_{16} &= \max(0, W - 3.000) * BF_5; \\
 BF_{19} &= \max(0, 153.500 - V) * BF_7; \\
 BF_{20} &= \max(0, Cu - 29.500) * BF_1; \\
 BF_{22} &= \max(0, Sn - 6.500) * BF_{16};
 \end{aligned}$$

میزان تأثیر آن بر متغیر پاسخ (Au) و انطباق نتایج مارس با توزیع فضایی به‌عنوان نمونه‌ای از دو متغیر با اهمیت (Cu و Bi) و یک متغیر بی‌اهمیت (V) در منطقه مورد مطالعه خواهیم پرداخت.

1- توابع مبنای مرتبط با Bi: توابع مبنای Bi به‌همراه ضریب تأثیر آن در رابط (1) عبارتند از:

$$\begin{aligned}
 & -2146 \max(0, Bi-0.14), \\
 & -2587 \max(0, 0.14-Bi), \\
 & 2140 \max(0, Bi-0.16)
 \end{aligned}$$

با توجه به مفاهیم توابع مبنا در تحلیل مارس، می‌توان عملکرد این توابع بر روی Au را به‌صورت زیر نمایش داد:



شکل 1: حدود آستانه‌ای Bi به‌همراه توابع مبنای مربوطه و شدت تأثیر آن‌ها بر تخمین متغیر مستقل

آنچه قابل ذکر است این است که در تمامی محدوده‌های

جدول (1) نمای دیگری از مدل برازش شده بالا است که در آن می‌توان حدود آستانه‌ای تشخیص‌داده‌شده با مدل مارس را برای متغیرهای مؤثر در مدل به آسانی دید. به‌عنوان مثال، حد آستانه تشخیص داده شده برای As برابر با 37/317 ppm است که میزان تأثیر آن بر روی طلا و برای مقادیر بیشتر و کمتر از حد آستانه مذکور به ترتیب برابر 0/30- و 37/317 (ردیف دوم و سوم جدول) است. همچنین حد آستانه برای عنصر Pb مقدار 31 ppm با ضریب تأثیر 0/06- است. لازم به ذکر است که Pb با مقادیر بیشتر از حد آستانه در تأثیر متقابل با As و با مقادیر کمتر از حد آستانه در تقابل با هر دو عنصر As و W با ضرائب تأثیر متفاوت است.

در مدل مارس توانایی تحلیل حساسیت نیز وجود دارد که متغیرهای با تأثیرات بیشتر را از متغیرهای با تأثیرات کمتر مجزا کرده و درجه اهمیت هر یک از آن‌ها تعیین کرد. جدول (2) نشان‌دهنده متغیرهای غیر مؤثر و نتایج تعیین درجه اهمیت متغیرهای مؤثر است.

4-2- تحلیل داده‌ها با روش مارس

در این قسمت به ذکر جزئیات بیشتری راجع به توابع مبنا و

جدول 1: حدود آستانه های عناصر و ضرائب تأثیر در مقدار طلا

Basis Function	Coefficient	Variable	Parent	Knot
0	66.691			
1	-0.030	As		8.370
2	37.317	As		8.370
3	-0.006	Pb	As	31.000
5	-4.407	Cu		20.900
6	-28.816	Cu		20.900
7	0.058	W	Pb	2.400
8	-2146.417	Bi		0.140
9	-2587.655	Bi		0.140
10	-0.186	Be	W	2.400
11	-0.076	Be	W	2.400
12	10.101	W	Cu	2.700
13	13.220	W	Cu	2.700
14	2140.162	Bi		0.160
16	-9.794	W	Cu	3.000
19	-0.001	V	W	153.500
20	0.012	Cu	As	29.500
22	-0.816	Sn	W	6.500

حاوی Bi با کاهش میزان Au مواجه هستیم و در عمل معنای این مطلب می تواند بدین ترتیب تفسیر شود که در مکان هایی که Bi وجود دارد نباید انتظار وجود Au و یا کانی سازی طلا را داشت. این مفهوم بر اساس توزیع فضایی غلظت Bi در منطقه نیز مورد تأیید است که در مکان هایی که حداقل غلظت Bi وجود دارد روندهای کانی سازی ملاحظه می شود [21]. در ضمن عنصر Bi در اثر متقابل با عناصر دیگر قرار ندارد.

یکی دیگر از امتیازات روش ماریس این است که حتی برای متغیری که رابطه معکوس با متغیر پاسخ دارد نیز حدود آستانه تأثیر تعیین می شود و عنصر Bi یکی از این پارامترها است.

جدول 2: نتایج تحلیل حساسیت مدل ماریس

Variable	Cost of Omission	Importance	
Pb	2226.172	100.000	
As	2146.916	98.151	
W	1986.931	94.309	
Bi	913.915	62.729	
Cu	564.729	48.178	
Be	295.817	32.836	
V	179.083	23.210	
Sn	64.886	3.303	
Ag	62.526	0.000	
B	62.526	0.000	
Ba	62.526	0.000	
Co	62.526	0.000	
Cr	62.526	0.000	
Hg	62.526	0.000	
Mn	62.526	0.000	
Mo	62.526	0.000	
Ni	62.526	0.000	
Sb	62.526	0.000	
Tl	62.526	0.000	
Zn	62.526	0.000	

$$-28.81 \max(0, 20.9 - \text{Cu})$$

نمایش شماتیکی عملکرد مقادیر مختلف Cu به صورت زیر

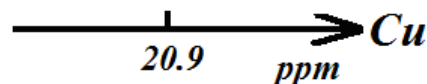
است:

$$-2 \text{ توابع مبنای مرتبط با Cu : توابع مبنای Cu به همراه}$$

ضریب تأثیر آن در رابطه (1) عبارتند از:

$$-4.407 \max(0, \text{Cu} - 20.9),$$

$$-28.81(20.9-Cu) - 4.407(Cu-20.9)$$



شکل 2: حد آستان‌های Cu به‌مراه توابع مبنای مربوطه و شدت تأثیر آن‌ها بر تخمین متغیر مستقل

5- مقایسه نتایج تخمین گر MARS برای تابع هدف و نتایج آنالیز

شیمیایی

بر اساس نتیجه این مدل‌سازی در نهایت میزان متغیر وابسته Au برآورد شد. نتایج مقایسه بین مقادیر محاسبه‌شده Au با مقادیر اندازه‌گیری‌شده در دو رنج مختلف داده‌ها در اشکال (3) و (4) ارائه شده است. نتایج مذکور همبستگی بالایی را نشان می‌دهند که این امر می‌تواند گویای تخمین مناسب مقدار متغیر وابسته بر اساس متغیرهای مستقل باشد. اعتبارسنجی مدل برآورد غلظت Au بر اساس روش Cross validation بررسی و تأیید شده است.

6- نتیجه‌گیری

تخمین و مدل کردن تغییرات و پراکندگی مقدار طلا در یک منطقه کانی‌سازی با تیپ مشخص بر اساس پارامترهای تأثیرگذار در تغییرات، یکی از عمده‌ترین نتایج این تحقیق بر اساس روش مارس این است. نتایج مدل‌سازی و تخمین طلا با نتایج اندازه‌گیری مقدار طلا همبستگی بالایی را نشان می‌دهند که این امر اعتبار مدل ارزیابی پراکندگی طلا در منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد. اکنون بر اساس اندازه‌گیری پارامترهای وابسته و مدل تخمینی، امکان برآورد میزان طلا ممکن خواهد بود که این امر می‌تواند همراه با کاهش قابل‌ملاحظه هزینه‌های آنالیز و ساده‌سازی روند مطالعاتی آن‌ها باشد. روش مارس دارای مزایای زیادی در قیاس با روش‌های متداول مدل کردن تغییرپذیری پراکندگی عناصر است که در ادامه به برخی از این موارد اشاره شده است:

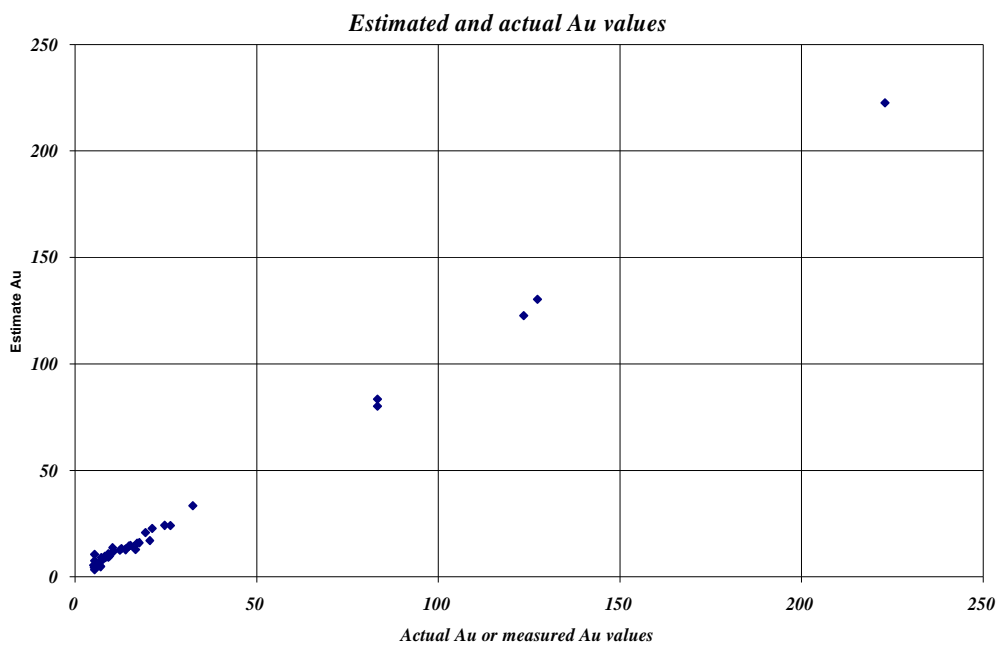
- تعیین حدود آستانه‌ای بر اساس روش مدل‌سازی مارس و ارزیابی نحوه تأثیر بین متغیر پاسخ با متغیر مستقل در قبل و بعد از حد آستانه‌ای تعیین‌شده که در روش‌های متداول انجام نمی‌گیرد. حال آن‌که در روش‌های متداول فرض بر این است که در کل تغییری در ارتباط بین دو متغیر وجود ندارد و یا ارتباط مستقیم یا معکوس در بین کل مقادیر وجود دارد.
- در مدل‌های رگرسیونی اثر متقابل مابین دو متغیر در کل رنج تغییرات آن‌ها بررسی می‌شود. این در حالی است که در مدل مارس اثرات متقابل در زیر دامنه‌ای از این رنج‌ها تعیین می‌شود.
- در مدل‌های رگرسیونی متداول روش رگرسیونی برای داده‌ها تعیین‌کننده آن است که داده‌ها از چه مدلی تبعیت کنند و سپس به برآورد آن‌ها پرداخته می‌شود و حال آن‌که در مدل مارس ماهیت ذاتی داده‌ها تعیین‌کننده نوع مدل ارتباطی آن‌ها است.

تفسیر ریاضی عبارات ریاضی ذکرشده این است که در مقادیر غلظت کمتر از 20/9 ppm میزان کاهش طلا بیشتر از مقادیر غلظت‌های بیشتر از 20/9 ppm است. در کل Cu اثر کاهش-دهندگی بر روی میزان Au (معکوس) دارد. در ضمن عنصر Cu در اثر متقابل با عناصر دیگر نیست.

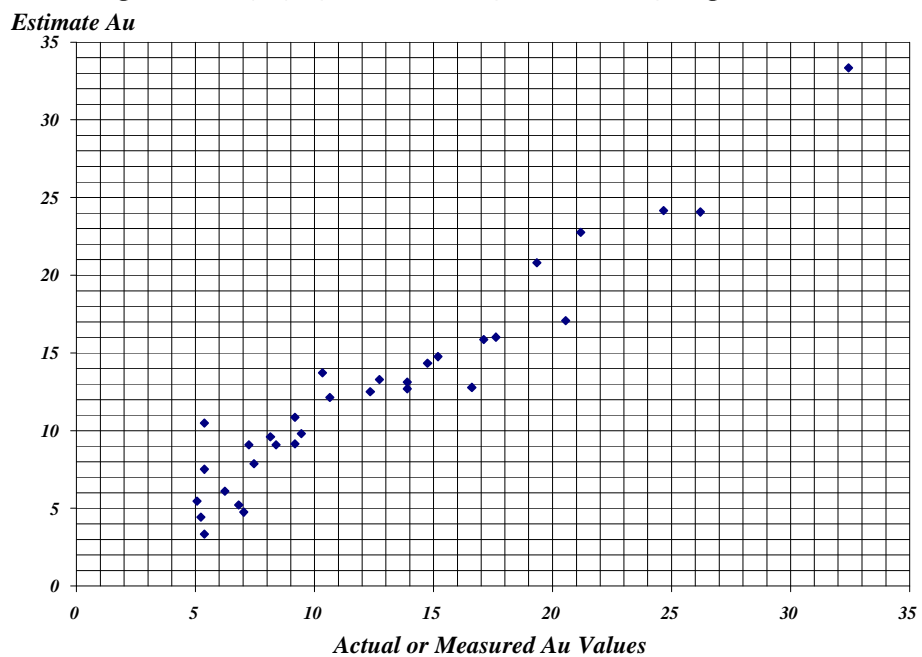
آنچه در خصوص نقشه‌های توزیع مکانی یا فضایی Cu قابل ملاحظه است این تأثیر این عنصر بر روی Au در مرزهایی تغییر غلظت مس و در مکانی است که از دو طرف با حداقل و حداکثر مقدار این عنصر روبرو هستیم (کاربری تعیین حد آستانه‌ای) [21]. این میزان تأثیر Cu در غلظت‌های پایین (<20.9 ppm) بر روی Au ملاحظه می‌شود و در عمل مکان‌هایی که غلظت Cu بالا باشد، منطقه کانی‌سازی آنومالی طلا وجود ندارد. این موضوع بر روی نقشه توزیع فضایی غلظت عنصر Cu در منطقه مورد مطالعه و روندهای کانی‌سازی نیز به‌خوبی قابل مشاهده است. از مقایسه ضرائب برآوردشده توابع مبنای Cu, Bi می‌توان نتیجه گرفت که شدت افت میزان Au در مقابل Bi بسیار زیادتر از شدت آن در مقابل Cu است.

3- توابع مبنای مرتبط با Ba: به‌عنوان نمونه یکی از عناصری که در تحلیل مارس میزان اهمیت آن ناچیز و یا از نظر ریاضی صفر در نظر گرفته شده (مانند Ba) در این قسمت تحلیل می‌شود.

چنانچه مناطق آنومال یا به عبارت بهتر بگوئیم، محدوده‌های غلظت بالای Ba را در نظر بگیریم، نمی‌توان ارتباطی بین این نواحی با غلظت طلا پیدا کرد. به‌عبارت دیگر مناطق آنومال طلا در محدوده‌های غلظت متوسط تا بالای Ba و محدوده‌های غلظت پایین Ba می‌تواند واقع شود. بنابراین عدم وابستگی بین Au و Ba در تحلیل مکانی توزیع این دو عنصر در منطقه مشاهده می‌شود. نتایج تحلیل چند متغیر نیز نشان‌گر عدم وابستگی و ضریب وزنی بی‌اهمیتی در فاکتور معرفی‌کننده این متغیر است [21]. بنابراین مجموعه روش‌های تحلیلی گویای عدم ارتباط بین Ba و Au در محاسبه و بررسی تغییرات غلظت طلا است.



شکل 3: مقایسه تمامی مقادیر محاسبه شده Au (بر حسب ppb) با مقادیر اندازه گیری شده (همبستگی 0/95)



شکل 4: مقایسه کرانه پایین مقادیر محاسبه شده Au (بر حسب ppb) با مقادیر اندازه گیری شده (همبستگی 0/90)

- [6] Reimann, Clemens; Filzmoser, Peter ; Garrett, Robert G.; (2002); Factor analysis applied to regional geochemical data: problems and possibilities; *Applied Geochemistry*, Volume 17, Issue 3, Pages 185-206
- [7] Reis, A. P.; Sousa, A. J. and Cardoso Fonseca, E.; (2003); Application of geostatistical methods in gold geochemical anomalies identification (Montemor-O-Novo, Portugal); *Journal of Geochemical Exploration*; Volume 77, Issue 1, Pages 45-63
- [8] Jimenez-Espinosa, R.; Sousa, A.J.; Chica-Olmo, M.; (1993); Identification of geochemical anomalies using principal component analysis and factorial kriging analysis; *Journal of Geochemical Exploration*, Volume 46, Issue 3, Pages 245-256
- [9] Fraley, C. and Raftery, A.E.; (2002); Model-based clustering, discriminant analysis, and density estimation; *Journal of the American Statistical Association* 97, 611-631.
- [10] Borovec, Zdeněk; (1996); Evaluation of the concentrations of trace elements in stream sediments by factor and cluster analysis and the sequential extraction procedure; *Science of The Total Environment*, Volume 177, Issues 1-3, Pages 237-250
- [11] Swanson, Susan K.; Bahr, Jean M.; Schwar, Michael T.; Potter, Kenneth W.; (2001); Two-way cluster analysis of geochemical data to constrain spring source waters; *Chemical Geology*, Volume 179, Issues 1-4, Pages 73-91
- [12] Hongjin, Ji; Yongzheng, Zhu and Wu Xisheng; (1995); Correspondence cluster analysis and its application in exploration geochemistry; *Journal of Geochemical Exploration*; Volume 55, Issues 1-3, Pages 137-144
- [13] Friedman, J. H.; (1991a); Multivariate adaptive regression splines (with discussion); *Annals of Statistics* 19(1), 1-141.
- در روش‌های متداول باید چندین روش را بر روی داده‌ها اعمال کرد تا بتوان به انتخاب متغیرهای مؤثر و مدل‌سازی آن‌ها پرداخت. این در حالی است که در روش مارس انتخاب متغیرهای مؤثر و مدل‌سازی به‌طور توأم انجام می‌شود.
- مدل‌سازی پراکندگی غلظت عناصر بر اساس اطلاعات حاصل از مطالعات لیتوژئوشیمیایی اولیه و ارزیابی متوسط عیار عناصر می‌تواند در تخمین ذخیره کاربرد داشته باشد. در این تحقیق به مدل‌سازی پراکندگی طلا در محیط لیتوژئوشیمیایی ثانویه پرداخته شده است. آنچه در این محیط‌ها باید بیشتر مدنظر قرار داده شود نقش شرایط فیزیکوشیمیایی و آب و هوایی محیط در مدل پراکندگی ژئوشیمیایی عناصر است.

تقدیر و تشکر

در پایان این تحقیق لازم است تا مراتب تقدیر و تشکر خود را از ریاست محترم سازمان زمین‌شناسی کشور و مسئولین و کارشناسان محترم واحد پروژه‌های طلای آن سازمان به علت فراهم کردن امکان دسترسی به اطلاعات و نتایج آنالیز شیمیایی نمونه‌های ژئوشیمیایی منطقه اعلام داریم.

منابع

- [1] Davis, J.C.; (2002); *Statistics and data analysis in geology*. John Wiley & Sons, New York, 550pp.
- [2] Hastie, T., Tibshirani, R. & Friedman, J.; (2001); *The Elements of Statistical Learning; Data mining, Inference and Prediction*, Springer Verlag, New York
- [3] Pereira, H.G.; Renca, S.; Saraiva, J.; (2003); A case study on geochemical anomaly identification through principal components analysis supplementary projection; *Applied Geochemistry*, Volume 18, Issue 1, Pages 37-44
- [4] Francis, L.; (2003); Martial chronicles. Is MARS® better than neural networks? *Casualty Actuarial Society Forum*, 27-54.
- [5] Templ, Matthias; Filzmoser, Peter and Reimann, Clemens; (2008); Cluster analysis applied to regional geochemical data: Problems and possibilities; *Applied Geochemistry*, Volume 23, Issue 8, Pages 2198-2213.

- ⁵ Overfitting
⁶ Generalised Cross Validation
⁷ Canonical

- [14] Friedman, J.H.; (1991b); Estimating Functions of Mixed or Ordinal and Categorical Variables Using Adaptive Splines; Department of Statistics, Stanford University, Technical Report LCS108.
- [15] Lewis, P.A.W., Stevens, J., and Ray, B.K.; (1993); 'Modelling Time Series using Multivariate Adaptive Regression Splines (MARS®)', in Time Series Prediction: Forecasting the Future and Understanding the Past, eds. Weigend, A. and Gershenfeld, N., Santa Fe Institute: Addison-Wesley, pp. 297-318.
- [16] DeVeaux R.D., Psychogios D.C., and Ungar L.H.; (1993); A Comparison of Two Nonparametric Estimation Schemes: MARS and Neural Networks, Computers Chemical Engineering, 17, 8.
- [۱۷] حریری، ع.، نقشه زمین‌شناسی سقز، (1382)، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- [18] حیدری، س.م.، (1383)، کانی‌شناسی، ژئوشیمی و فابریک کانه‌زایی طلا در پهنه‌برشی خمیری منطقه کرویان، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، 150 ص.
- [19] قوامی ریابی، ر.؛ سیدرحیمی نیارق، س.م.؛ خالوکاکایی، ر. و هزاره، م.ر.، (1389)، رفتار و اختصاصات ژئوشیمیایی مناطق کانی‌سازی طلای پهنه‌های برشی مردستان، نشریه علمی-پژوهشی "مهندسی معدن"، دوره پنجم، شماره نهم، ۲۷-۳۶.
- [۲۰] راستاد، ا.، (1381)، "رخداد کانه‌زایی در پهنه برشی دگرسان کرویان (جنوب غرب سقز)". بیست و یکمین گردهمایی علوم زمین، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور،
- [21] علی زاده دین آباد، ه.، (1388)، فاکتورهای کنترل کننده تغییرات کانی‌سازی طلا در پهنه‌های برشی کردستان، پایان نامه کارشناسی ارشد، صفحه 143.
- زیرنویس

¹Multivariate Adaptive Regression Spline

² basis function

³ Knot

⁴ Reflected Pair