

## تعیین بی‌هنجاری‌های ژئوشیمیایی زیرسطحی سرب منطقه هفت‌سواران خمین از استان مرکزی به روش هیبرید مولتی فراکتالی

فریدون قدیمی<sup>۱\*</sup>، معصومه خاوری<sup>۲</sup> و سعید مجدی‌فر<sup>۳</sup>

۱، ۲ و ۳- گروه مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اراک، اراک

\* نویسنده مسئول: ghadimi@Arakut.ac.ir

نوع مقاله: کاربردی

پذیرش: ۹۹/۱/۲۰

دریافت: ۹۸/۱۰/۱۱

### چکیده

منطقه مورد مطالعه در جنوب استان مرکزی، در شهرستان خمین، در زون سنندج سیرجان و در کمربند فلزایی سرب و روی ملایر- اصفهان واقع شده است. این بررسی جهت تعیین بی‌هنجاری سرب با توجه به ۱۷۰ نمونه از ۳۳ گمانه حفاری در منطقه هفت سواران انجام شده است. این بررسی نشان داد که مدل‌های سینگلاریتی اصلی و تعدیل یافته نسبت به مدل سینگلاریتی وزنی نتایج بهتری از بی‌هنجاری سرب را در مطالعات دو بعدی و سه بعدی نشان دادند. ضریب همپوشانی سطحی نیز همبستگی بالای دو روش سینگلاریتی اصلی و تعدیل یافته را در تفکیک بی‌هنجاری‌ها به خوبی نشان داد. بنابراین، تلفیق دو بعدی و سه بعدی روش‌های سینگلاریتی در تفکیک موقعیت و گسترش بی‌هنجاری‌ها موثرند. روند بی‌هنجاری‌های شناسایی شده نیز به روش تعدیل یافته در امتداد گسل‌های منطقه بوده که نقش گسل‌ها را در حرکت سیالات سرب ساز به خوبی نشان می‌دهد

واژه‌های کلیدی: بی‌هنجاری‌های ژئوشیمیایی، سینگلاریتی اصلی، سینگلاریتی وزنی، سینگلاریتی تعدیل یافته، هفت‌سواران

### ۱- پیشگفتار

تفکیک بی‌هنجاری‌های ژئوشیمیایی منعکس کننده فرآیندهای ژئوشیمیایی نظیر انواع کانی‌سازی بوده که از اهداف ژئوشیمیایی اکتشافی است (وانگ و زو، ۲۰۱۹). الگوهای بی‌هنجاری که در اثر فرآیندهای کانی‌سازی ایجاد می‌شوند از نظر مکانی و فراوانی بسیار پیچیده هستند (لیو و همکاران، ۲۰۱۹). تفکیک دقیق خصوصیات مکانی در شناسایی بی‌هنجاری‌های ضعیف بسیار مهم است (چنگ، ۲۰۰۷). آگاهی از تفکیک بی‌هنجاری‌های ضعیف از زمینه با توجه به تاثیر واحدهای مختلف زمین‌شناسی کار بسیار مشکلی است (زائو و همکاران، ۲۰۱۵). به عبارتی، تفکیک بی‌هنجاری‌های ضعیف از زمینه صرفاً با تحلیل داده‌های اولیه امکان‌پذیر نیست (اروسی و یونس، ۲۰۱۹). به علاوه، چنین بی‌هنجاری‌هایی از روی داده‌های ترکیبی به کمک روش‌های ریاضی به طور صحیح انجام نمی‌گیرد. بنابراین، موضوع بی‌هنجاری‌های ضعیف یکی از مهم‌ترین چالش‌های علم ژئوشیمی است (چنگ و همکاران، ۲۰۱۱).

امروزه روش‌های فراکتال و مولتی‌فراکتال نقش مهمی در تفکیک بی‌هنجاری‌های ژئوشیمیایی دارند (زو و وانگ، ۲۰۱۵؛ پارسا و همکاران، ۲۰۱۷). مدل‌های فراکتال و مولتی‌فراکتال در تفکیک بی‌هنجاری از زمینه مورد استفاده قرار می‌گیرند (حسن‌پور و افضل، ۲۰۱۱؛ کاوه و همکاران، ۲۰۱۱؛ زو، ۲۰۱۱؛ افضل و همکاران، ۲۰۱۳ و ۲۰۱۲). با توجه به اینکه شاخص سینگلاریتی<sup>۱</sup> شب تغییرات نسبی را در فواصل کم ارزیابی می‌کند، شاخص خوبی در تعیین بی‌هنجاری ضعیف است. سینگلاریتی واژه‌ای فراکتالی است که ویژگی بی‌هنجار حاصل از فرآیند فیزیکی خاص را در فواصل زمانی- مکانی کوچک مورد ارزیابی قرار می‌دهد (چنگ، ۲۰۰۷). امروزه شاخص سینگلاریتی روش کاملی برای شناسایی بی‌هنجاری‌های ضعیف است (چنگ، ۲۰۱۲؛ اکسیا و همکاران، ۲۰۱۲؛ زو و همکاران، ۲۰۱۳؛ گون کالوز و همکاران، ۲۰۱۸). شاخص سینگلاریتی نوعی روش آماری است که اثرات ناحیه‌ای زمینه را کاهش داده و اطلاعات آماری از داده‌ها را حول و حوش همسایگی یک نقطه فراهم می‌آورد (زو،

<sup>1</sup> Singularity index

به شکل چینه‌کران است. کانی‌سازی شامل گالن، پیریت، اسفالریت، کالکوپیریت، اکسیدهای آهن (هماتیت، گوتیت و لیمونیت)، کربنات آهن (سیدریت) کلسیت، دولومیت و کوارتز است. عیار سرب و روی به ترتیب ۳ و ۱/۵ درصد وزنی است. نسبت‌های  $Pb/Pb+Zn$ ،  $Pb+Zn$  و ترکیبات  $Cu+Pb+Zn$  و  $Cu$  در شیل‌ها و ماسه‌سنگ‌های منطقه هفت‌سواران نشان داد کانی‌سازی از نوع رسوبی-بروندمی<sup>۵</sup> بوده و کانی در امتداد گسل‌های نرمال با امتداد شمال شرق - جنوب‌غرب صورت گرفته است. با حرکت محلول‌های کانی‌ساز در طول گسل‌های نرمال، شیل‌ها و ماسه‌سنگ‌ها تحت تاثیر آلتراسیون سیلیسی، دولومیتی و سریسیتی هیدروترمال قرار گرفته‌اند (زندى و همکاران، ۲۰۱۸).

## ۲-۲-۲ نمونه برداری و تجزیه شیمیایی

یکصد و هفتاد نمونه از ۳۳ گمانه با عمق متوسط ۵۰ متر و فواصل ۱۰۰ متر از منطقه هفت‌سواران خمین انتخاب گردید. جهت تعیین بی‌هنجاری‌های ژئوشیمیایی زیرسطحی سرب، نمونه‌ها در سه مقطع عمودی، به طوری که در مقطع اول عمودی ۶۳ نمونه، در مقطع دوم عمودی ۴۸ نمونه و در مقطع سوم ۵۹ نمونه برداشت گردید (شکل‌های ۲ و ۳). در فرآیند آماده‌سازی در شرکت زرآزما نمونه سنگ ابتداء خشک، سپس با استفاده از سنگ‌شکن‌های فکی تا ابعاد کمتر از ۴ میلی‌متر خردایش شده و در آسیاب دیسکی تا سایز ۷۵ میکرون (۲۰۰ مش) نرمایش گردید. پودر حاصل از مرحله نرمایش توسط دستگاه  $ICP-MS$  با روش چهار اسید ( $HNO_3$  و  $HClO_4.HCl.HF$ ) برای عنصر سرب و غیره تجزیه شدند. حد دقت دستگاه برای سرب یک میلی‌گرم بر کیلوگرم ( $ppm$ ) بوده و خطای تجزیه کمتر از ۱۰ درصد با توجه به نمونه‌های تکراری بررسی شد.

## ۲-۳-۳ روش درون‌یابی تفاضل محدود

بررسی روند تغییرات عیار متغیر در مقیاس محلی و ناحیه‌ای به دو روش سطحی (برازش داده‌ها) و درون‌یابی (مقدار متغیر برای تشکیل نقشه شبکه‌ای) امکان‌پذیر است. لذا روش تفاضل محدود، جهت تخمین شبکه‌ای مربعی استفاده شد. روش تخمین بر مبنای تفاضل

۲۰۱۴). سینگولاریتی به انواع سینگولاریتی اصلی<sup>۲</sup>، سینگولاریتی وزنی<sup>۳</sup> و سینگولاریتی تعدیل یافته<sup>۴</sup> تقسیم می‌شود (قدیمی و خاوری، ۲۰۱۹). در هریک از روش‌ها، تلاش این است که بی‌هنجاری‌های محلی از زمینه پیچیده زمین‌شناسی تفکیک شود.

هدف از این تحقیق تعیین بی‌هنجاری‌های ژئوشیمیایی به روش‌های مختلف شاخص سینگولاریتی، ارزیابی سطح پوشش روش‌ها و انتخاب مناسب‌ترین روش تعیین بی‌هنجاری‌ها در بخش زیرسطحی منطقه هفت‌سواران خمین برای سرب است.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- زمین‌شناسی منطقه

کارهای قدیمی مربوط به استخراج کانسنگ پلی‌متال هفت‌سواران مربوط به ۵۰ سال پیش است. کارهای اکتشافی قبلی شامل چند تونل اکتشافی کوچک و گمانه است. طبق مطالعات و بررسی‌های اولیه انجام شده در محدوده، بخش‌هایی که نیازمند اکتشاف سیستماتیک بوده، مشخص گردید. بر این اساس، اکتشاف در دو محدوده اصلی بنام هفت‌سواران شرقی و هفت‌سواران غربی صورت گرفت. بیش‌ترین حجم عملیات اکتشافی و استخراجی در محدوده هفت‌سواران غربی انجام شده است. عملیات اکتشافی که به صورت سیستماتیک و علمی در منطقه پیشنهاد و اجراء شده، نتایج خوبی را در برداشت و افق‌های جدیدی از ماده معدنی نشان داد (محمودی و همکاران، ۲۰۱۹).

منطقه مطالعه در کمربند فلزایی سرب و روی ملایر- اصفهان واقع شده است. از دیدگاه تکتونیکی کانسارهای سرب و روی در حاشیه حوضه رسوبی ریفت شده دیده می‌شوند (زندى و همکاران، ۲۰۱۸). کانسار مورد مطالعه در ۲۵ کیلومتری جنوب‌غرب خمین و در پهنة زمین‌شناسی سندنجان- سیرجان واقع شده است (شکل ۱). با توجه به نقشه زمین‌شناسی هفت‌سواران (شکل ۲) واحدهای سنگ‌شناسی ژوراسیک در منطقه شامل شیل، ماسه‌سنگ و واحدهای سنگ‌شناسی کرتاسه شامل سنگ آهک و دولومیت می‌باشند. بافت در کانی‌ها به صورت استوک‌ورک، رگ‌های و پرکننده فضای خالی و کانی‌سازی

<sup>2</sup> Original singularity

<sup>3</sup> Weighted singularity

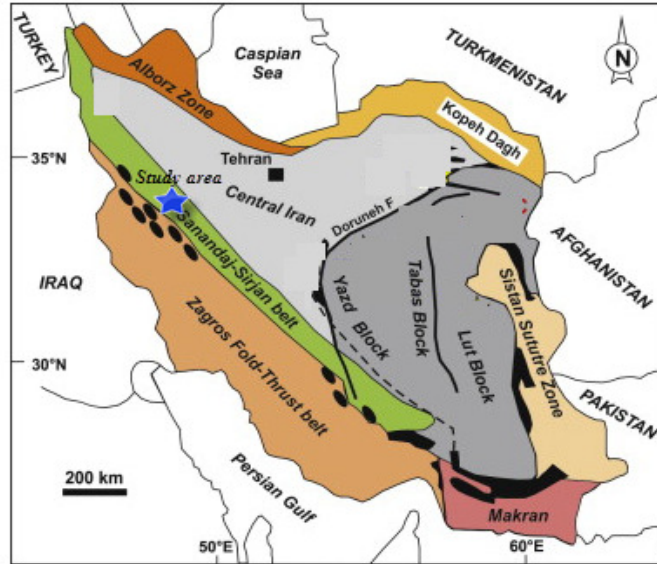
<sup>4</sup> Modified singularity

<sup>5</sup> Sedex

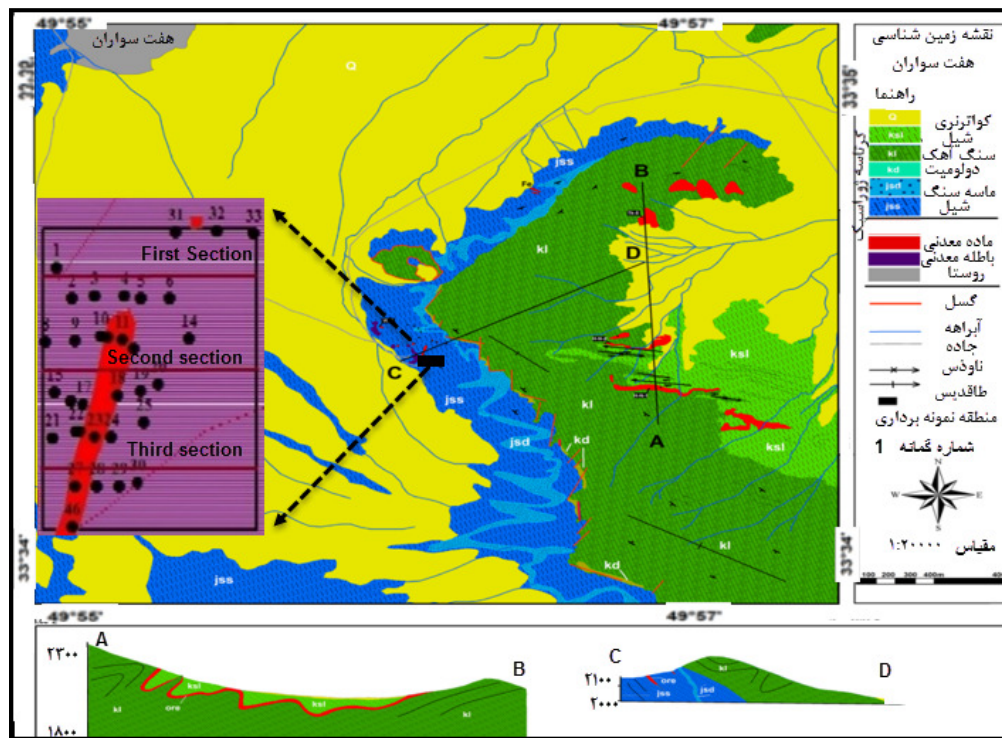
<sup>6</sup> Inductively coupled plasma-mass spectrometry

اساس این روش برای حل معادلات استفاده از تقریب تابع با روش تیلور است. روش مزبور تئوری نسبتاً ساده‌ای دارد و مزایای این روش را می‌توان در کاربرد ساده آن، دقت نسبتاً قابل قبول نتایج به دست آمده، برنامه‌های کامپیوتری و تجهیزات در دسترس برشمرد.

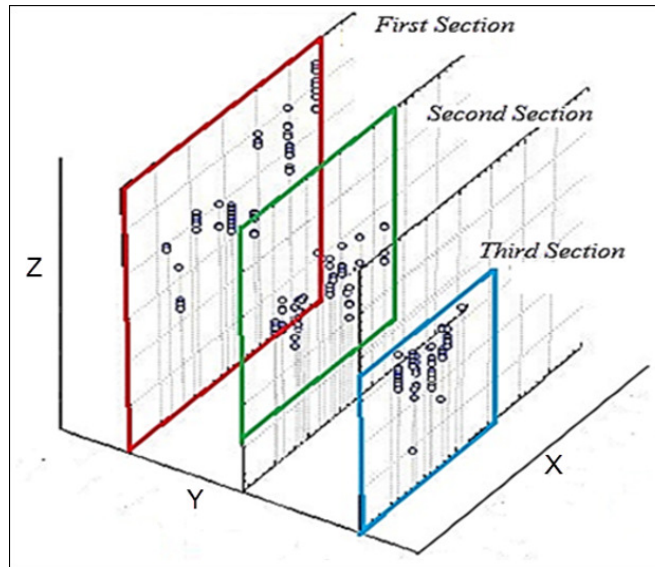
محدود کاملاً ریاضی بوده و به همراه روش‌های فراکتال و مولتی‌فراکتال در تحلیل داده‌ها ارزشمند است (چنگ، ۲۰۱۲؛ گونگالوز و همکاران، ۲۰۱۸). روش تفاضل محدود یکی از روش‌های عددی است که برای حل تقریبی معادلات دیفرانسیل به کار برده می‌شود. در این روش مشتق توابع با تفاضلات معادل آن‌ها تقریب زده می‌شود.



شکل ۱. کانسار سرب هفت‌سواران در پهنه زمین‌شناسی سنندج- سیرجان (اشتوکلین، ۱۹۶۸)



شکل ۲. نقشه زمین‌شناسی محدوده کانی‌سازی سرب و روی هفت‌سواران خمین (زند و همکاران، ۲۰۱۸)



شکل ۳. موقعیت نمونه برداری در نمودار سه‌بعدی از منطقه هفت‌سواران خمین

تقریب مرتبه دوم مرکزی برای مشتق دوم تابع در نقطه  $i, j$  از رابطه ۶ به دست می‌آید.

$$f_{xx|i,j} = \frac{f_{i+1,j} - 2f_{i,j} + f_{i-1,j}}{\Delta x^2} \quad (6)$$

برای مشتق دوم در جهت  $y$  می‌توان رابطه (۷) را نوشت: با جایگزینی مقادیر محاسبه شده از تقریب اختلاف محدود در معادله لاپلاس رابطه به صورت (۸) است.

$$f_{yy|i,j} = \frac{f_{i,j+1} - 2f_{i,j} + f_{i,j-1}}{\Delta y^2} \quad (7)$$

$$\frac{f_{i+1,j} - 2f_{i,j} + f_{i-1,j}}{\Delta x^2} + \frac{f_{i,j+1} - 2f_{i,j} + f_{i,j-1}}{\Delta y^2} = 0 \quad (8)$$

و با در نظر گرفتن  $\frac{\Delta x^2}{\Delta y^2} = \beta^2$  رابطه (۹) را خواهیم داشت.

$$f_{i+1,j} + \beta^2 f_{i,j+1} + f_{i-1,j} + \beta^2 f_{i,j-1} - 2(1 + \beta^2)f_{i,j} = 0 \quad (9)$$

در صورتی که معادلات بر حسب مقدار تابع در نقطه  $i, j$  مرتب شوند رابطه (۱۰) حاصل می‌شود.

$$\frac{f_{i+1,j} + \beta^2 f_{i,j+1} + f_{i-1,j} + \beta^2 f_{i,j-1} - 1}{2(1 + \beta^2)} = f_{i,j} \quad (10)$$

در حالت خاصی که اندازه شبکه محاسباتی در دو جهت با هم برابر باشد ( $\Delta x = \Delta y$ ) روابط (۱۱ و ۱۲) را خواهیم داشت.

در روش تفاضل محدود فواصل هر شبکه هر چه کوچکتر باشند دقت کار بیش‌تر است. تئوری این روش با معادله لاپلاس و شرایط مرزی مشخص بررسی می‌شود (روابط ۱ و ۲).

$$f_{xx} + f_{yy} = 0 \quad (1)$$

$$f_{xx} + f_{yy} = F(x, y) \quad (2)$$

در روش تفاضل محدود ابتداء لازم است میدان محاسباتی شبکه‌بندی شوند (شکل ۴a). لذا فرض می‌شود میدان محاسباتی دارای شبکه هم اندازه در راستای  $x, y$  و اندازه شبکه در هر راستا،  $\Delta X$  و  $\Delta Y$  باشد (شکل ۴b).

در روش تفاضل محدود ابتداء لازم است میدان محاسباتی شبکه‌بندی شوند (شکل ۴a). لذا فرض می‌شود میدان محاسباتی دارای شبکه هم اندازه در راستای  $x, y$  و اندازه شبکه در هر راستا،  $\Delta X$  و  $\Delta Y$  باشد (شکل ۴b).

در اینجا  $f(i, j)$  غلظت عناصر در نقطه با مختصات  $(i, j)$  است.

روابط ۳، ۴ و ۵ را به صورت قراردادی در نظر می‌گیریم.

$$f(x_i, y_j) = f_{i,j} \quad (3)$$

$$\frac{\partial f(x_i, y_j)}{\partial x} = \left\langle \frac{\partial f}{\partial x} \middle| i, j \right\rangle = f_{x|i,j} \quad (4)$$

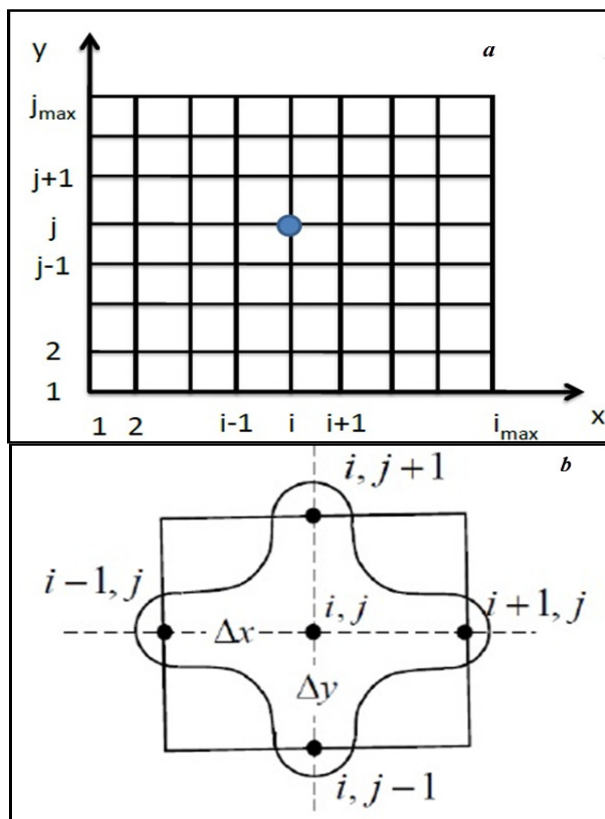
$$\frac{\partial^2 f(x_i, y_j)}{\partial x^2} = \left\langle \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} \middle| i, j \right\rangle \quad (5)$$

تکرار می‌گردد. اساس این روش بر پایه تکرار بوده و تکرار تا جایی ادامه یافته که جواب‌ها مقداری همگرا شده و یا تفاوت دو مقدار به دست آمده در دو مرحله پیاپی از خطای مورد نظر کمتر باشد (معمولاً ۰/۱ به عنوان پایان محاسبات در نظر گرفته می‌شود). جهت سرعت و دقت، کلیه محاسبات با برنامه‌نویسی در نرم‌افزار *Matlab* انجام و کد مورد نظر نوشته شد.

$$f_{i+1,j} + f_{i,j+1} + f_{i-1,j} + f_{i,j-1} - 4f_{i,j} = 0 \quad (11)$$

$$\frac{f_{i+1,j} + f_{i,j+1} + f_{i-1,j} + f_{i,j-1}}{4} = f_{i,j} \quad (12)$$

رابطه (۱۲) حاکی از برابری مقدار تابع در نقطه  $i,j$  با متوسط ریاضی آن در نقاط اطراف است. تخمین در هر نقطه با محاسبه میانگین از نقاط اطراف انجام می‌گیرد. بنابراین، محاسبات برای تمامی شبکه‌ها انجام و سپس



شکل ۴. (a) شبکه‌بندی منطقه مورد نظر در تفاضل محدود، (b) نمایش نقطه مورد محاسبه در تفاضل محدود

با تغییر  $V$  تغییر، مقادیر  $C(V)$  و  $\mu(V)$  نیز تغییر می‌یابد. هم‌چنین با کاهش  $V$ ، مقادیر  $\mu(V)$  نیز کاهش خواهد یافت. مقدار  $C(V)$  به ویژگی‌های کانسار بستگی دارد. مطابق با مدل مولتی‌فراکتال، مقادیر  $C(V)$  و  $\mu(V)$  از نسبت قانون-توان تبعیت می‌کند (روابط ۱۴ و ۱۵).

$$\mu(V) = cV^{\frac{\alpha}{3}} \quad (14)$$

$$C(V) = cV^{\left(\frac{\alpha}{3}\right)-1} \quad (15)$$

#### ۴-۲- شاخص سینگولاریتی

براساس تئوری مولتی‌فراکتال، سینگولاریتی وابسته به توزیع خود تشابهی است (چنگ، ۲۰۰۸). سینگولاریتی براساس مدل قانون-توان<sup>۱</sup> تعریف می‌شود. در مناطق کانی‌سازی، مقدار عنصر در حجم از کانسار ( $V$ ) به صورت  $\mu(V)$  است. بنابراین، غلظت  $C(V)$  عنصر با توجه به حجم  $V$  به صورت رابطه (۱۳) بیان می‌شود.

$$C(V) = \frac{\mu(V)}{V} \quad (13)$$

<sup>1</sup> Law-power model

شیب تخمین در رابطه خطی (رابطه ۵) به صورت  $2-\alpha$  است. در نقشه‌های دوبعدی ژئوشیمیایی، شاخص سینگولاریتی برابر ۲ است. معمولاً مناطق غیرسینگولار حدود ۲، بخش وسیعی را در نقشه احاطه می‌کنند. از آن جایی که در روش سینگولاریتی اصلی، پنجره‌های محاسباتی گسترده بوده، معمولاً از شاخص سینگولاریتی وزنی استفاده می‌شود. مقدار میانگین از روش وزنی فاصله معکوس<sup>۲</sup> به دست می‌آید. روش فاصله معکوس، روش وزنی میانگین بوده که داده‌ها با استفاده از انحراف معیار یک نقطه نسبت به نقاط دیگر به صورت وزنی هستند. در این روش، وزن‌ها با توجه به فاصله یک نقطه نسبت به نقطه نامشخص تعیین می‌گردند. نزدیک‌ترین نقطه دارای وزن بیش‌تری است (رابطه ۱۸).

$$C = \frac{\frac{c_1}{d_1^n} + \frac{c_2}{d_2^n} + \dots + \frac{c_m}{d_m^n}}{\frac{1}{d_1^n} + \frac{1}{d_2^n} + \dots + \frac{1}{d_m^n}} \quad (18)$$

جهت محاسبه بی‌هنجاری ضعیف، بایستی حداقل عیار از منطقه مطالعه را به عنوان زمینه معرفی و از کل مقادیر داده‌ها کم نمود. بنابراین، شاخص سینگولاریتی تعدیل یافته و بی‌هنجاری‌های ضعیف به خوبی نمایش داده می‌شوند. به همین منظور، شاخص سینگولاریتی تعدیل یافته جزئیات مطالعه را به خوبی معرفی می‌نماید.

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- روش سینگولاریتی اصلی

روش سینگولاریتی اصلی شاخص  $\alpha$  را برای هر نقطه در منطقه، بدون توجه به وزن آن‌ها محاسبه می‌کند (اکسیا و همکاران، ۲۰۱۸). بی‌هنجاری سرب با شاخص سینگولاریتی کمتر از ۲ در اولین مقطع عمودی و در بخش‌های شرقی و مرکزی نقاط حفاری دیده می‌شود (شکل ۶a). در بخش مرکزی، منطقه بی‌هنجاری در محدوده نقطه حفاری ۵ و در عمق ۲۵ متری و در منطقه شرقی در نقطه حفاری ۳۲ و در عمق ۱۰ و ۳۰ متری مشاهده می‌شود. سه بی‌هنجاری سرب در مقطع دوم و در مناطق مرکزی و غربی دیده می‌شوند (شکل ۶b).

عیار سرب در بخش غربی و در عمق ۲ و ۲۰ متری زیاد است. مناطق بی‌هنجاری در بخش مرکزی در نقاط حفاری ۱۲، ۱۹ و ۲۵ در عمق ۴۰ متری دیده می‌شوند.

در اینجا  $\mu(V)$  مقدار عنصر در  $V$  و  $C(V)$  میانگین غلظت از  $V$ ،  $C$  مقدار ثابت و  $\alpha$  رابط قانون-توان است. در روابط (۱۴ و ۱۵) ارتباط از نوع سه‌بعدی است. روش‌های مشابهی نیز برای دو بعد به کار رفته است. با این تفاوت که سطح جایگزین تبدیل به حجم می‌گردد (چنگ، ۲۰۰۷). در مدل‌های مولتی‌فراکتال، توان  $\alpha$  شاخص سینگولاریتی نامیده می‌شود (چنگ، ۲۰۰۸). مقدار توان  $\alpha$  به دو گروه طبقه‌بندی می‌شود:  $C(V)$  ارتباطی با  $V$  نداشته، در آن صورت  $\alpha = 3$  و  $C(V)$  به  $V$  وابسته بوده، آنگاه  $\alpha \neq 3$ . گروه اول به صورت غیرسینگولار و گروه دوم سینگولار است. شاخص  $\alpha$  با روش حداقل میانگین مربعات با توجه به خط مستقیم در نمودار لگاریتمی  $C(V)$  براساس  $V$  متفاوت تعیین می‌شود. شاخص سینگولاریتی با مقادیر ذیل مشخص می‌شود:

۳  $\alpha = 3$  اگر و فقط  $C(V)$  ثابت و ارتباطی با  $V$  ندارد.

$\alpha < 3$  اگر و فقط  $C(V)$  تابع کاهشی نسبت به  $V$  باشد.

$\alpha > 3$  اگر و فقط  $C(V)$  تابع افزایشی نسبت به  $V$  باشد.

مثبت بودن شاخص سینگولاریتی غنی‌شدگی و منفی بودن شاخص تهی‌شدگی نسبت به ماده معدنی را نشان می‌دهد (علی و همکاران، ۲۰۱۵). شاخص سینگولاریتی اصلی با توجه به کمترین همسایگی براساس رابطه (۱۶) تخمین زده می‌شود.

$$C = c \cdot \varepsilon^{\alpha-E} \quad (16)$$

در اینجا  $C$  میانگین غلظت عنصر،  $c$  مقدار ثابت،  $\alpha$  شاخص سینگولاریتی،  $\varepsilon$  فاصله نرمال شده و  $E$  هندسه اقلیدسی است. شاخص سینگولاریتی در روی خط مستقیم از جفت داده  $C$  و  $\varepsilon$  اندازه‌گیری می‌شود. این روش بی‌هنجاری قوی و هم‌چنین بی‌هنجاری ضعیف را نشان می‌دهد. جهت تخمین سینگولاریتی محلی از داده‌های ژئوشیمیایی از پنجره مینا<sup>۱</sup> استفاده شد (چنگ، ۲۰۰۷). در پنجره مینا به شکل مربع یا دایره رابطه  $r_{min} = r_1 < r_2 < \dots < r_n = r_{max}$  برقرار است (شکل ۵). میانگین عیار برای هر یک از پنجره‌های مینا محاسبه شده و مقدار مورد نظر بر روی نمودار لگاریتمی روند خطی دارد (رابطه ۱۷).

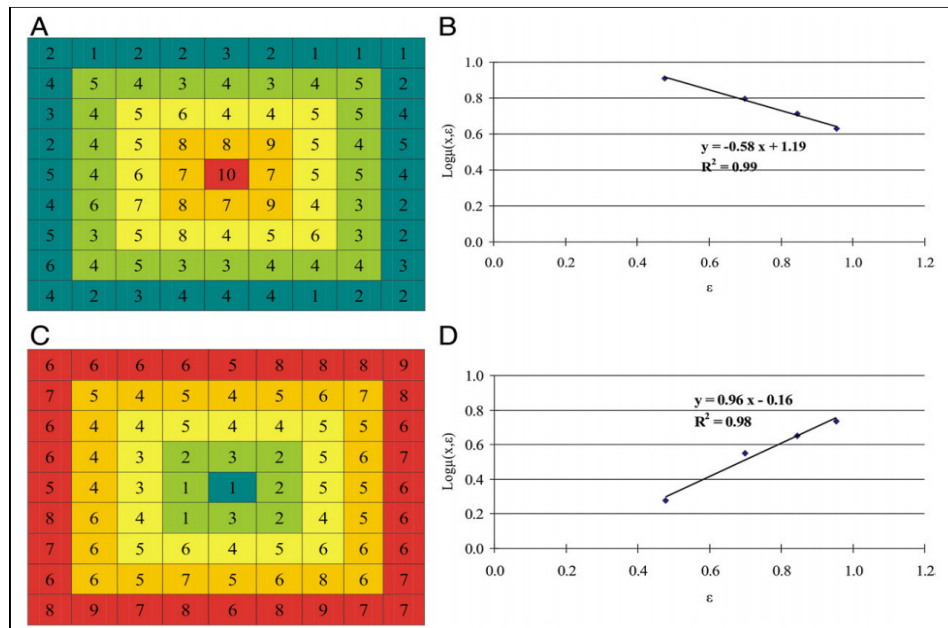
$$\text{Log}C[A(r)] = c + (\alpha - 2)\log(r) \quad (17)$$

<sup>2</sup> Inverse distance weighting method

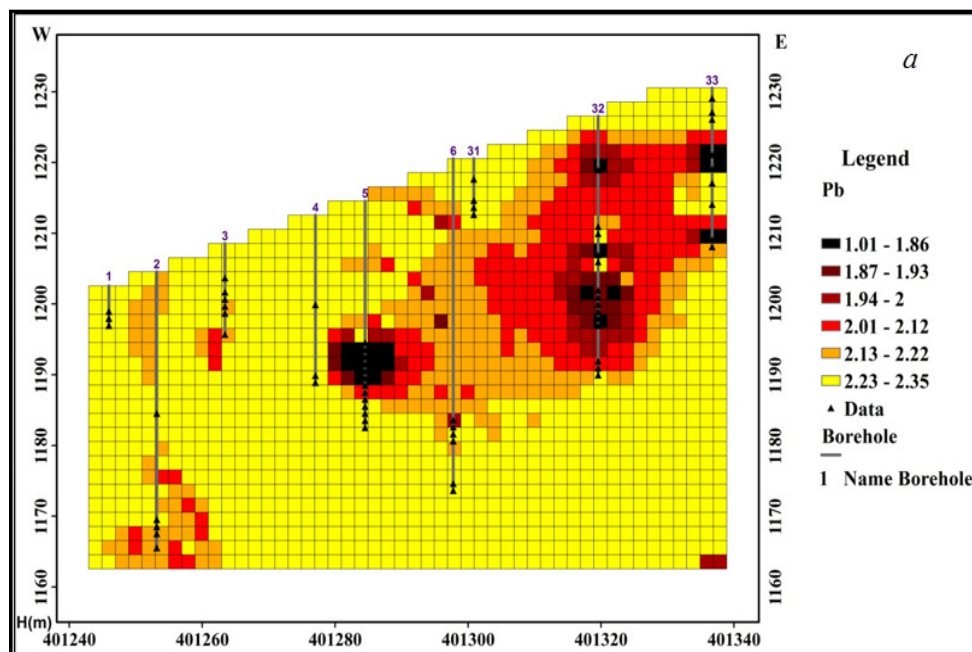
<sup>1</sup> Base window

بنابراین، غنی‌شدگی سرب دارای روند شمال غرب- جنوب شرق بوده و بیش‌ترین مقدار عیار در بخش‌های مرکزی و غربی مقاطع عمودی متمرکز است.

در مقطع سوم، بی‌هنجاری‌های سرب عمدتاً در بخش غربی در اطراف نقاط حفاری ۲۱، ۲۲ و ۲۷ و در عمق ۲۰ متری و در بخش غربی در اطراف نقاط حفاری ۲۳ و ۲۸ در عمق ۴۰ متری به چشم می‌خورند (شکل ۶c).

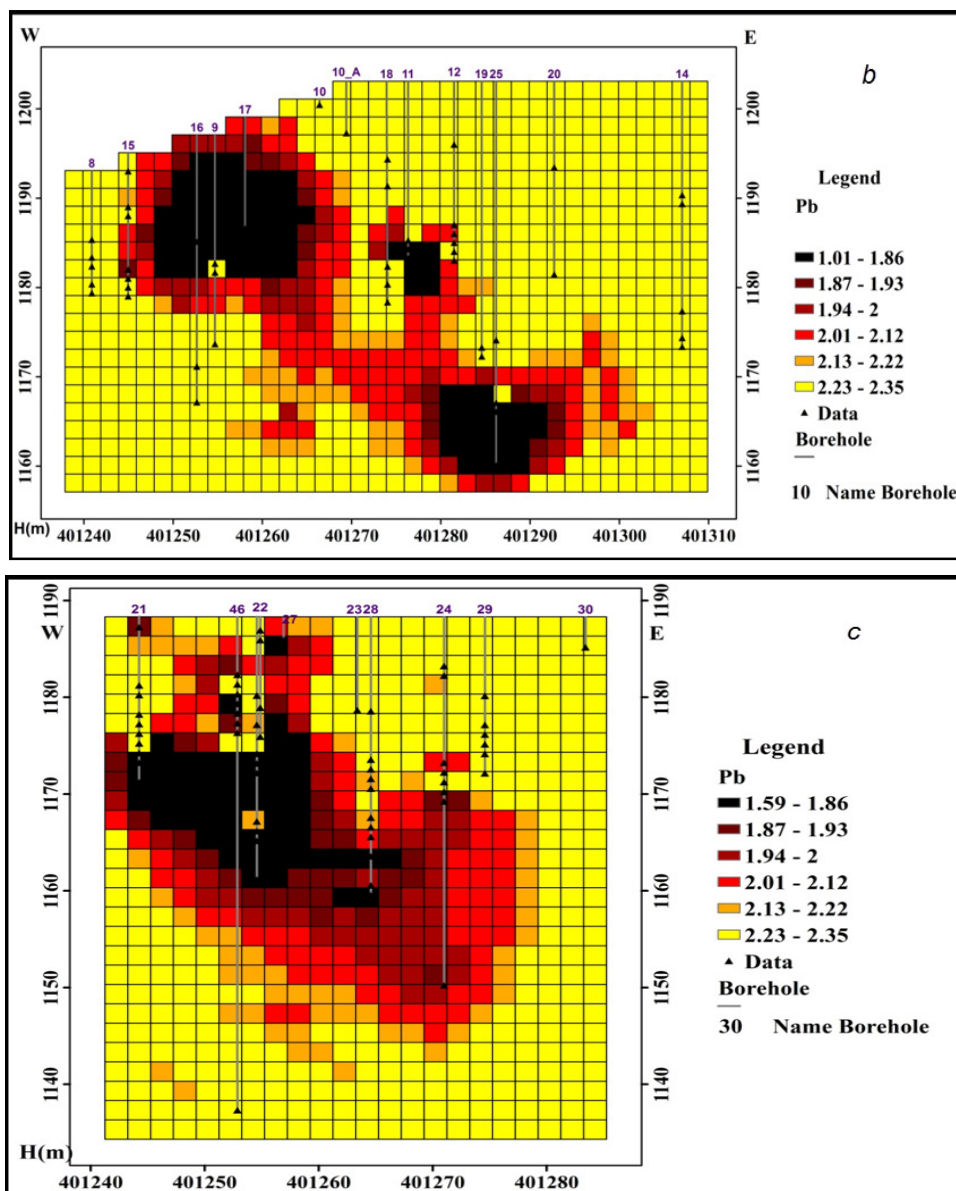


شکل ۵. تخمین سینگلاریتی داده‌های ژئوشیمیایی بر اساس پنجره مینا (A) و (C) اندازه مربعات از  $3 \times 3$ ،  $5 \times 5$ ،  $7 \times 7$  تا  $9 \times 9$  متغیر بوده که جهت تخمین مقادیر متوسط غلظت عناصر به ترتیب در حالت غنی‌شدگی و تهی‌شدگی مورد استفاده قرار می‌گیرد. (B) و (D): دو نمودار لوگ-لوگ در پایه ده که ارتباط متوسط غلظت عناصر  $(x, \epsilon)$  و اندازه مربعات  $\epsilon$  برای (A) و (C) به ترتیب نشان می‌دهد.  $\alpha - 2$  از شیب خط مستقیم تخمین زده شده است. در اینجا  $\alpha$  برابر  $1/42$  کوچک‌تر از  $2$  برای الگوی غنی‌شدگی (A) و  $\alpha$  برابر  $2/96$  بزرگ‌تر از  $2$  الگوی تهی‌شدگی را نشان می‌دهد (C).



شکل ۶. توزیع سرب بر اساس روش شاخص سینگلاریتی اصلی a: اولین مقطع عمودی





ادامه شکل ۶. توزیع سرب بر اساس روش شاخص سینگلاریتی اصلی *b*: دومین مقطع عمودی و *c*: سومین مقطع عمودی

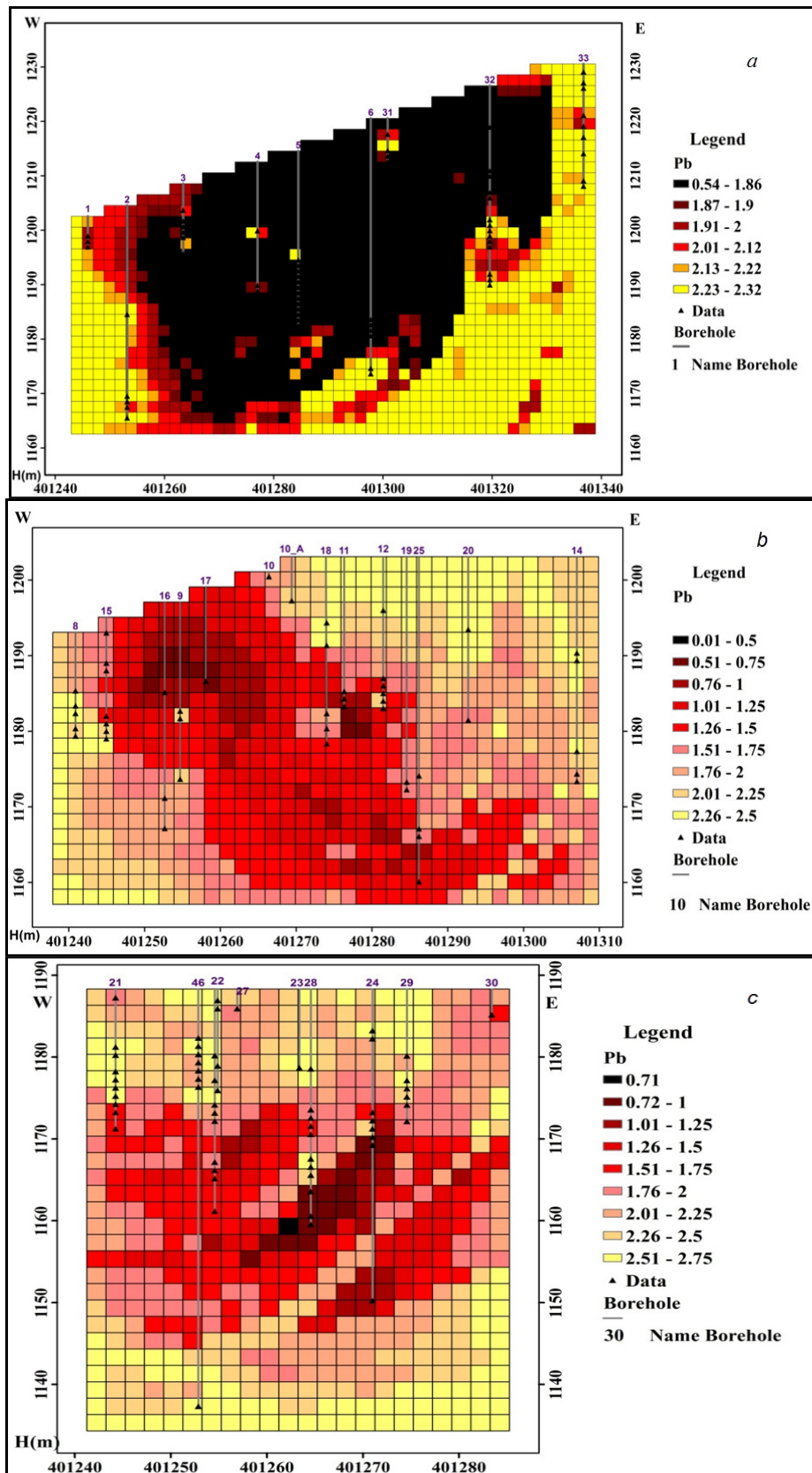
### ۳-۲- شاخص سینگلاریتی وزنی

این روش با استفاده از وزن فاصله معکوس، شاخص سینگلاریتی وزنی را محاسبه می‌کند (اکسیا و همکاران، ۲۰۱۸). بی‌هنجاری سرب در محدوده وسیعی از منطقه دیده می‌شود (شکل ۷). در اولین مقطع عمودی بی‌هنجاری از سطح زمین تا عمق ۴۰ متر در اکثر نقاط حفاری به چشم می‌خورد (شکل ۷a). در مقطع عمودی دوم، بی‌هنجاری سرب با ضخامت ۴۰ متر محدوده وسیعی را در اطراف نقاط حفاری ۱۰، ۱۱، ۱۲، ۱۷ و ۱۹ شامل می‌شود (شکل ۷b). هم‌چنین بی‌هنجاری سرب در کلیه نقاط حفاری در عمق بیش از ۲۰ متر در مقطع

عمودی سوم مشاهده می‌شود (شکل ۷c). بنابراین، شاخص سینگلاریتی وزنی بی‌هنجاری‌های سرب را در تمامی عمق‌های مناطق حفاری شرقی، مرکزی و غربی نشان می‌دهد.

با توجه به بررسی‌های زمین‌شناسی نیز مشخص شد کانی‌سازی در محدوده‌های شمال‌شرقی، مرکزی و بخش‌های غربی متمرکز شده است. بنابراین، روش سینگلاریتی وزنی به دلیل گسترده نشان دادن بی‌هنجاری‌های سرب در سه مقطع عمودی، روش مناسبی برای نمایش بی‌هنجاری نیست.



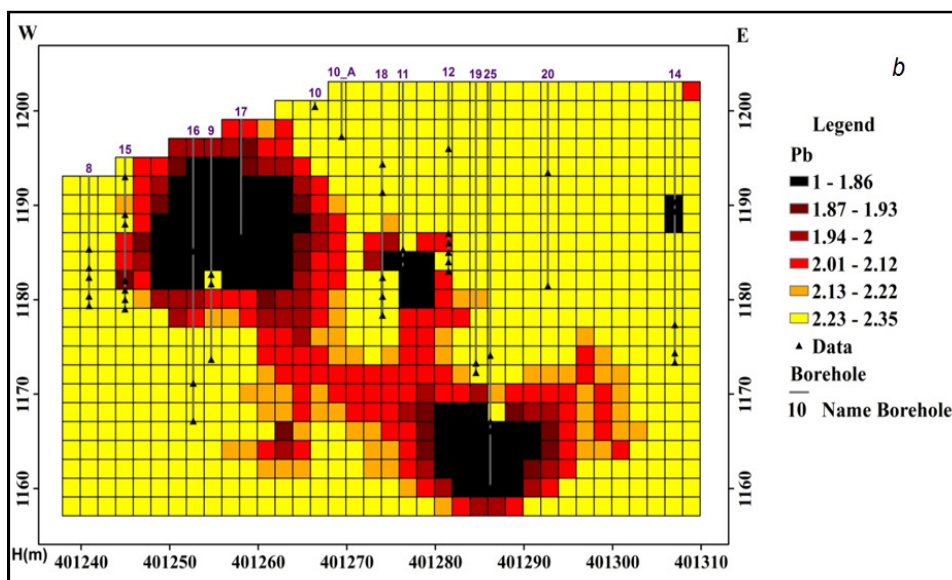
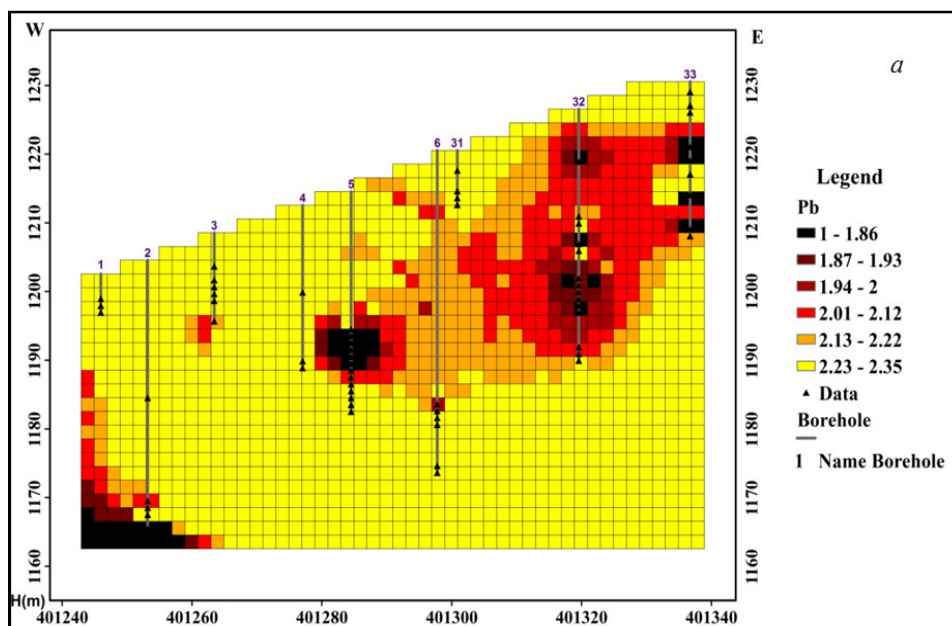


شکل ۷. توزیع سرب بر اساس روش شاخص سینگولاریتی وزنی (a): اولین مقطع عمودی، b: دومین مقطع عمودی و x سومین مقطع عمودی

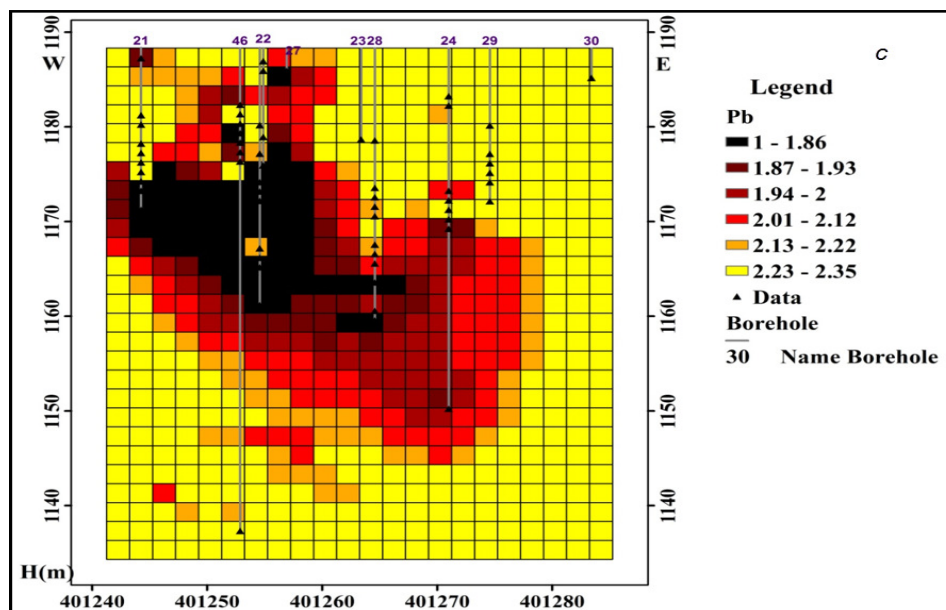
## ۳-۳- شاخص سینگولاریتی تعدیل یافته

با توجه به شاخص سینگولاریتی تعدیل یافته، بی‌هنجاری سرب در مقاطع عمودی اول و دوم عمدتاً در بخش‌های شرقی، مرکزی و غربی دیده می‌شوند (شکل ۸). بی‌هنجاری سرب در مقطع عمودی اول در بخش مرکزی در نقطه حفاری ۵ در عمق ۲۵ متر، در بخش شرقی در نقطه حفاری ۳۲ و در عمق ۵ تا ۲۰ متر و در منطقه غربی در نقاط حفاری ۱ و ۲ و در عمق ۲۵ متر دیده می‌شود (شکل ۸a). در مقطع عمودی دوم، بی‌هنجاری

سرب در بخش غربی در نقاط حفاری، ۹، ۱۰، ۱۵ و ۱۶ و در اعماق ۲ تا ۵ متر و در بخش مرکزی در نقاط حفاری ۱۱، ۱۲، ۱۸، ۱۹، ۲۰ و ۲۵ در اعماق ۲۰ تا ۳۰ متر و در بخش شرقی در نقطه حفاری ۱۴ در عمق ۱۰ متر مشاهده می‌شود (شکل ۸b). در مقطع عمودی سوم، بی‌هنجاری در بخش غربی در نقاط حفاری ۲۱، ۲۲، ۲۷ و ۴۶ در عمق ۱۰ متر، در بخش مرکزی عمدتاً در نقاط حفاری ۲۴ و ۲۹ در عمق ۲۰ متر به چشم می‌خورد (شکل ۸c).



شکل ۸. توزیع سرب بر اساس روش شاخص سینگولاریتی تعدیل یافته (a: اولین مقطع عمودی، b: دومین مقطع عمودی)



ادامه شکل ۸. توزیع سرب بر اساس روش شاخص سینگولاریتی تعدیل یافته (c: سومین مقطع عمودی)

### ۳-۴- ضریب همپوشانی سطحی

ضریب همپوشانی سطحی<sup>۱</sup> (CAA) درجه شباهت روش‌های مختلف را مورد ارزیابی قرار می‌دهد. در این بررسی، ضریب همپوشانی تیلور<sup>۲</sup> جهت مقایسه و تشابهات روش‌ها مورد استفاده قرار گرفت (رابطه ۱۹).

$$CAA = \frac{S_{AA} + S_{BB}}{S_{AB} + S_{BA} + S_{AA} + S_{BB}} \quad (19)$$

در اینجا S مساحت، اندیس‌ها اجتماعات ژئوشیمیایی هستند؛ A بی‌هنجاری؛ B زمینه؛  $S_{AA}$  مساحت اولین و دومین روش تخمین بی‌هنجاری  $S_{BA}$ ؛ مساحت اولین روش به عنوان زمینه و در روش دوم بی‌هنجاری است (شهرستانی و مختاری، ۲۰۱۶).

در اولین مقطع عمودی از سرب، همپوشانی بین شاخص سینگولاریتی اصلی و شاخص سینگولاریتی تعدیل یافته ۹۸ درصد و در مقطع عمودی دوم و سوم این همپوشانی ۹۹ درصد است (جدول ۱). همپوشانی در مقاطع عمودی اول و دوم، بین روش‌های سینگولاریتی وزنی با شاخص‌های سینگولاریتی اصلی و تعدیل یافته کمتر از ۵۰ درصد است. اما در مقطع سوم عمودی این همپوشانی ۶۹ درصد می‌باشد. بنابراین، تنها دو روش سینگولاریتی اصلی و تعدیل یافته در تفکیک بی‌هنجاری سرب در منطقه هفت‌سواران مناسب است.

### ۳-۵- تطبیق روش‌های مختلف سینگولاریتی

#### ۳-۵-۱- روش سینگولاریتی اصلی و تعدیل یافته

اگرچه روش سینگولاریتی اصلی برای نمایش بی‌هنجاری ضعیف مناسب بوده، اما تحت تاثیر مقادیر زمینه قرار می‌گیرد (اکسیا و همکاران، ۲۰۱۸). بنابراین، روش سینگولاریتی تعدیل یافته جهت ارزیابی بی‌هنجاری سرب مناسب است. خروجی‌های دو روش ظاهراً کمی مشابه بوده، اما در این بررسی تفاوت‌ها ارزیابی شده است.

در نمودار شاخص سینگولاریتی اصلی در مقابل شاخص سینگولاریتی تعدیل یافته، نقاط روی خط  $y = x$  تشابه دو روش را نشان می‌دهند (شکل ۹). دو خط مستقیم که بر اعداد ترسیم شده به موازات محورهای افقی و عمودی هستند. این خطوط نمودار را به چهار قسمت تقسیم کرده‌اند. منطقه اول و سوم به ترتیب مناطق تهی و غنی از بی‌هنجاری را نشان می‌دهند. چنانچه نقاط در زیر خط  $y = x$  در منطقه سوم باشند، شاخص سینگولاریتی تعدیل یافته کمتر از شاخص سینگولاریتی اصلی است. منطقه دوم و چهارم تفاوت بین دو شاخص را نشان می‌دهد. بسیاری از نقاط در روش سینگولاریتی اصلی بی‌هنجاری سرب را در بخش دوم نشان نداده، اما در روش سینگولاریتی تعدیل یافته بی‌هنجار هستند.

<sup>1</sup> Coefficient of areal association

<sup>2</sup> Taylor overlap coefficient

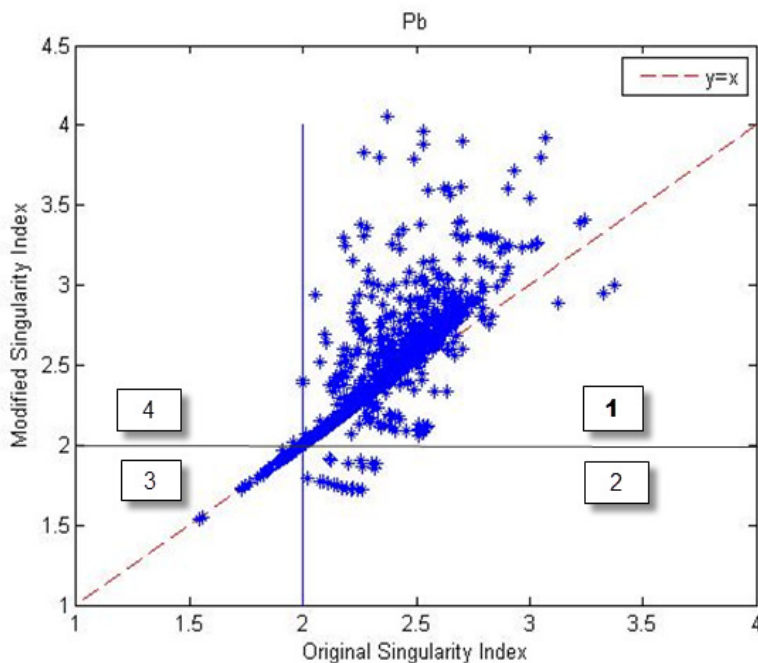
جدول ۱. ضریب همپوشانی سطحی بین شاخص‌های مختلف سینگولاریتی

Pb	OS*			MS		
	1	2	3	1	2	3
OS	1	1	1			
MS	0.98	0.99	0.99	1	1	1
WS	0.40	0.46	0.69	0.38	0.46	0.69

\* OS: Original singularity index

MS: Modified singularity index

WS: Weighted singularity index



شکل ۹. نمودار شاخص سینگولاریتی در مقابل شاخص سینگولاریتی تعدیل یافته در اولین مقطع عمودی

تاثیر قرار داده، لذا تلفیق روش‌های سینگولاریتی همراه با سایر روش‌ها در تفکیک بی‌هنجاری‌های ژئوشیمیایی موثرند (وانگ و زو، ۲۰۱۸). ارسو و یانسل (۲۰۱۹) از ترکیب شاخص سینگولاریتی و شبیه‌سازی گوسن جهت جداسازی بی‌هنجاری‌های مس و آهن منطقه ددیازی<sup>۴</sup> ترکیه استفاده نموده و تاکید کردند که تلفیق دو روش مورد نظر نقش مهمی در جداسازی بی‌هنجاری در مناطقی که اطمینان از نمونه‌برداری نیست دارند.

### ۳-۵-۲- شاخص سینگولاریتی سه‌بعدی

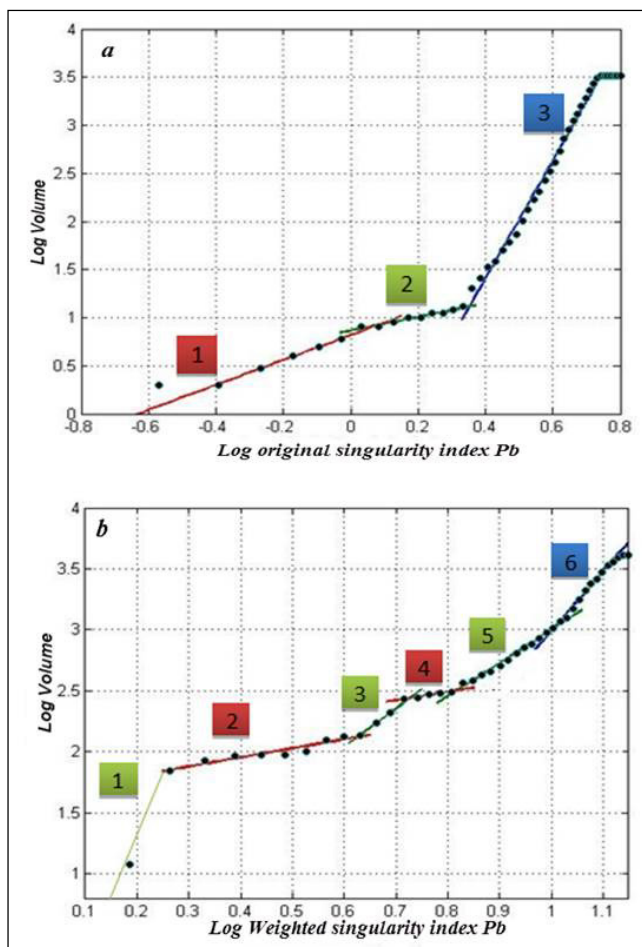
شاخص سینگولاریتی تنها یک نقطه را نسبت به نقاط اطراف در نظر گرفته و درجه غنی‌شدگی و تهی‌شدگی را نشان می‌دهد. بنابراین، مناطق با شاخص ۳ مناطق غیرسینگولار محسوب می‌شوند. شاخص سینگولاریتی

با بررسی بی‌هنجاری‌های نقره، سرب و روی اپی‌ترمال منطقه زجیانگ<sup>۱</sup> چین مشخص شد (اکسیا و همکاران، ۲۰۱۸) روش سینگولاریتی وزنی به دلیل واضح نشان دادن بی‌هنجاری بر روش سینگولاریتی اصلی ارجحیت دارد. از طرفی جداسازی طلا در منطقه تیان شان<sup>۲</sup> چین به کمک آستانه حدی شاخص سینگولاریتی اصلی و نمودار سینگولاریتی توسط لیو و همکاران (۲۰۱۹) تاکید شد. هم‌چنین در تفکیک بی‌هنجاری‌های ژئوشیمیایی استان فوجیان<sup>۳</sup> چین، شاخص سینگولاریتی اصلی جهت جداسازی بی‌هنجاری در مناطق ضعیف و مناطق با نمونه‌برداری کم توسط وانگ و زو (۲۰۱۹) بررسی شد. عدم اطمینان از مقادیر متغیرها در مناطقی که نمونه‌برداری انجام نگرفته، نتایج سینگولاریتی را تحت

<sup>1</sup> Zhejiang<sup>2</sup> Tianshan<sup>3</sup> Fujian<sup>4</sup> Dedeyazi

کم هستند. مناطق با شاخص سینگولاریتی حدود ۳ مناطق با بی‌هنجاری خیلی ضعیف هستند. سه اجتماع نقاط از سرب (بی‌هنجاری کم، متوسط و زیاد) (شکل ۱۰a) در شاخص سینگولاریتی اصلی سه‌بعدی و شش اجتماع نقاط (بی‌هنجاری خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد) در شاخص سینگولاریتی تعدیل یافته سه بعدی مشاهده گردید (شکل ۱۰b).

براساس روش فراکتال آلفا- حجم در مناطق غنی شده کمتر از ۳ است. این روش دقیقاً مشابه روش فراکتال غلظت- حجم بوده که در آن به جای غلظت مقدار شاخص سینگولاریتی (آلفا) جایگزین شده است. با ترسیم نمودار لگاریتمی آلفا- حجم، بهترین خط برازش از داده‌ها تعیین خواهد شد. تفاوت در خطوط، تفاوت در اجتماعات غنی‌شدگی را نشان می‌دهد. مقادیر کم شاخص سینگولاریتی، مناطق غنی‌شده و بی‌هنجار را مشخص می‌دارد. بدیهی است، مناطق بی‌هنجار دارای گستردگی



شکل ۱۰. اجتماعات اصلی از نقاط سرب در شاخص (a) سینگولاریتی اصلی و (b) تعدیل یافته سه‌بعدی

غنی‌شدگی از سرب را نشان می‌دهد. طیف تغییرات بی‌هنجاری در قطعه سوم از سینگولاریتی اصلی بین ۱ و ۳ (بی‌هنجاری ضعیف) با تجمعات زیاد نقاط همراه است. در شاخص سینگولاریتی وزنی این طیف از ۳ تا ۱۰ متغیر است (از بی‌هنجاری ضعیف تا زیاد). فراوانی نقاط زمینه در قطعه دوم از سینگولاریتی اصلی زیاد است. طیف

مقایسه شکل‌های سه‌بعدی تفاوت دو روش را نشان می‌دهند (شکل ۱۱). خط ۳ بر روی محورهای  $X$  و  $Y$  مرزهای تهی‌شدگی<sup>۱</sup> و غنی‌شدگی<sup>۲</sup> را مشخص می‌کند. قطعه اول مناطق تهی‌شدگی را در دو روش شاخص سینگولاریتی اصلی و تعدیل یافته و قطعه سوم منطقه

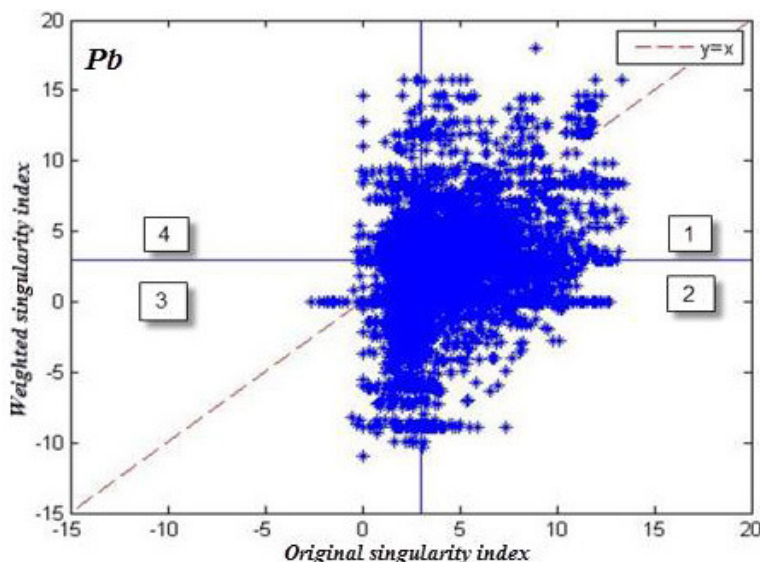
<sup>۱</sup> Depletion

<sup>۲</sup> Enrichment

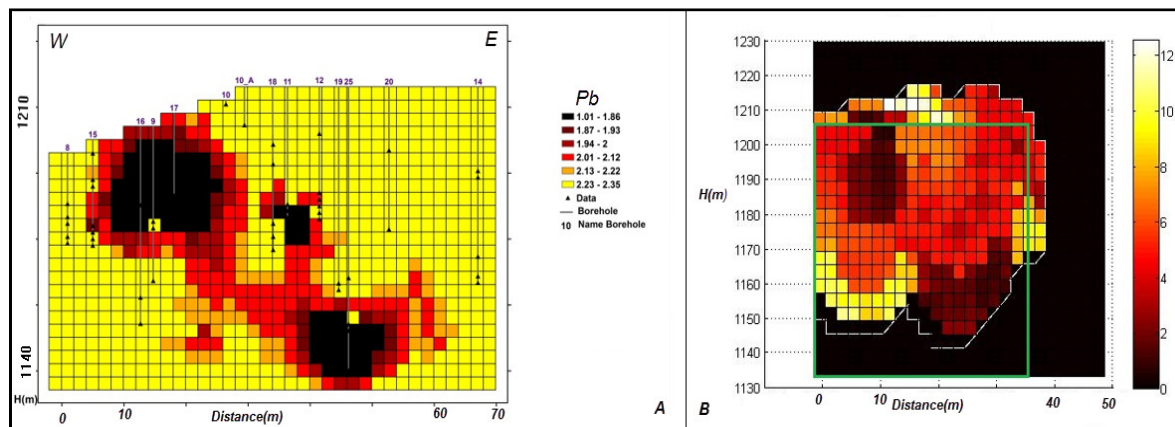


بی‌هنجاری تعیین شده به روش‌های خصوصاً سینگولاریتی اصلی و تعدیل یافته در جهت شمال شرق-جنوب غرب و در امتداد سیستم‌های گسلی منطقه است (شکل ۱۳). بنابراین، در فرآیندهای کانی‌سازی، سیستم‌های گسلی مسیر و فضای لازم برای مهاجرت و ته‌نشست کانسار سرب فراهم نموده است. از طرفی سیستم‌های گسلی با امتداد شمال‌شرق-جنوب‌غرب رابطه مکانی خوبی را با بی‌هنجاری سرب و مسیر سیالات نشان می‌دهند. همچنین سینگولاریتی تعدیل یافته روش مناسبی جهت مشخص کردن روند بی‌هنجاری و تفکیک بی‌هنجاری از زمینه در منطقه هفت‌سواران خمین است.

بی‌هنجاری در قطعه دوم از سینگولاریتی وزنی بالا است. در ربع چهارم، نقاط با بی‌هنجاری ضعیف (محدوده صفر تا ۳) در روش سینگولاریتی اصلی منطبق با نقاط زمینه در روش سینگولاریتی وزنی هستند. بنابراین، با توجه به پراکندگی وسیع نقاط نسبت به خط  $x = y$ ، بدیهی است دو روش سینگولاریتی اصلی و وزنی انطباق با هم دارند. همچنین با توجه نتایج سینگولاریتی اصلی دوبعدی و سه‌بعدی، خروجی در هر دو بعد تقریباً مشابه‌اند (شکل ۱۲). محدوده بی‌هنجاری در دو بعد (A) در دو منطقه مشابه محدوده در سه‌بعد (B) (داخل کادر) است. ضمناً بی‌هنجاری دارای روند به سمت غرب است. بنابراین، تلفیق روش‌های سینگولاریتی در دو بعد و سه‌بعد می‌تواند در تعیین موقعیت و گسترش بی‌هنجاری‌های ژئوشیمیایی موثر باشند.

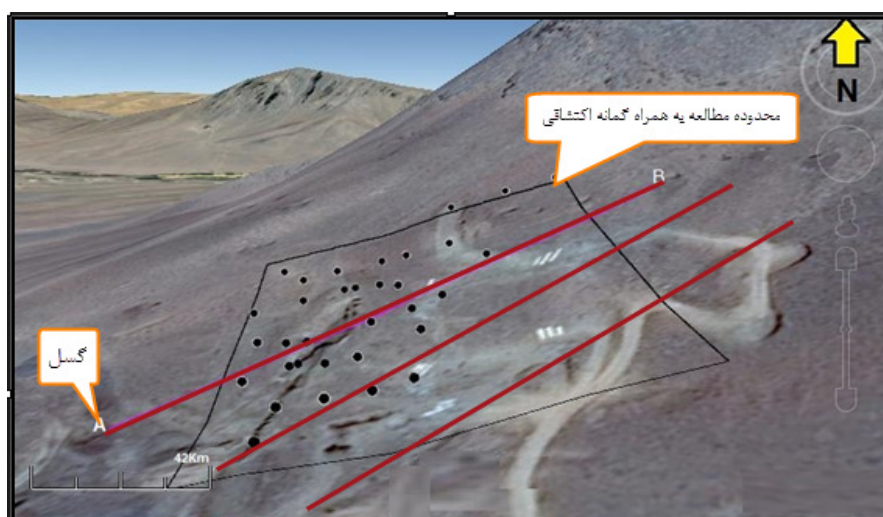


شکل ۱۱. نمودار سینگولاریتی اصلی در مقابل سینگولاریتی وزنی برای سرب



شکل ۱۲. شاخص سینگولاریتی اصلی در دو بعد (A) و سه بعد (B) برای سرب





شکل ۱۳. محدوده اکتشافی و گسل‌های دربرگیرنده

#### ۴- نتیجه‌گیری

بررسی داده‌های ژئوشیمیایی سرب منطقه هفت‌سواران خمین نشان داد که روش سینگولاریتی وزنی در مقایسه با سینگولاریتی اصلی و تعدیل‌یافته نمی‌تواند در تعیین بی‌هنجاری‌های ژئوشیمیایی مورد استفاده قرار گیرد. هم‌چنین مشخص شد روش سینگولاریتی تعدیل‌یافته به دلیل جدایش بهتر بی‌هنجاری‌های ضعیف از توانمندی بهتری نسبت به سینگولاریتی اصلی در منطقه برخوردار است. ضمناً نتایج سینگولاریتی اصلی به دلیل طبقه‌بندی بهتر مناطق بی‌هنجاری در محیط سه‌بعدی از روش‌های دیگر مناسب‌تر تشخیص داده شد. بنابراین، تلفیق روش‌های مختلف تعیین بی‌هنجاری‌های ژئوشیمیایی در تفکیک بی‌هنجاری از زمینه، تعیین بی‌هنجاری‌های ضعیف و تبعیت بی‌هنجاری از ساختمان‌های زمین‌شناسی نقش مهمی در تعیین امتداد و گسترش کانی‌سازی در منطقه هفت‌سواران داشته است. نتایج حاصل از سینگولاریتی اصلی و تعدیل‌یافته در دو و سه بعد داده‌های ژئوشیمیایی منطقه هفت‌سواران حاکی از روند عمومی شمال‌شرق- جنوب‌غرب کانی‌سازی سرب است. ضمناً این روند در امتداد گسل‌های غالب منطقه است.

#### تشکر و قدردانی

از داوران محترم این نشریه که در جهت ارتقای کیفیت این مقاله، پیشنهادات ارزنده‌ای ارائه نمودند، تشکر و قدردانی می‌شود.

#### منابع

- Afzal, P., Alghalandis, Y. F., Moarefvand, P., Rashidnejad Omran, N., Asadi Haroni, H (2012) Application of power-spectrum-volume fractal method for detecting hypogene, supergene enrichment, leached and barren zones in Kahang Cu porphyry deposit, Central Iran, *Journal of Geochemical Exploration*, 112: 131-138.
- Afzal, P., Harati, H., Fadakar Alghalandis, Y., Yasrebi, A. B (2013) Application of spectrum-area fractal model to identify of geochemical anomalies based on soil data in Kahang porphyry-type Cu deposit, Iran, *Chemical Erde Geochemical*, 73 (4): 533-543.
- Ali, Kh., Cheng, Q., Chen, Zh (2015) Multifractal power spectrum and singularity analysis for modeling stream sediment geochemical distribution patterns to identify anomalies related to gold mineralization in Yunnan Province, South China, *Geochemical Exploration Environment Analysis*, 7(4): 293-301.
- Cheng, Q (2007) Mapping singularities with stream sediment geochemical data for prediction of undiscovered mineral deposits in Gejiu, Yunnan Province, China, *Ore Geological Review*, 32: 314-324.
- Cheng, Q (2008) Non-linear Theory and Power-Law Models for Information Integration and Mineral Resources Quantitative Assessments, *Progress in Geomathematics*: 195-225.
- Cheng, Q., Bonham-Carter, G. F., Wang, W., Zhang, S., Li, W., Xia, Q (2011) A spatially weighted principal component analysis for multi-element geochemical data for mapping locations of felsic intrusions in the Gejiu mineral district of Yunnan, China, *Computer & Geoscience*, 37: 662-669.

- Stöcklin, J (1968) *Structural History and Tectonics of Iran I: A Review*, AAPG Bulletin, 52 (7): 1229–1258.
- Wang, J., Zuo, R (2019) *Recognizing geochemical anomalies via stochastic simulation-based local singularity analysis*, Journal of Geochemical Exploration, 198: 29–40.
- Xiao, F., Chen, J., Zhang, Z., Wang, C., Wu, G., Agterberg, F. P (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: 101–112.
- Xiao, F., Chen, J., Hou, W., Wang, Zh., Zhou, Y., Erten, O (2018) *A spatially weighted singularity mapping method applied to identify epithermal Ag and Pb–Zn polymetallic mineralization associated geochemical anomaly in Northwest Zhejiang, China*, Journal of Geochemical Exploration, 189: 122–137.
- IZandy Ilghani, N., Ghadimi, F., Ghomi, M (2018) *Application of alteration index and zoning for Pb–Zn exploration in Haft-Savaran area, Khomein, Iran*, Journal of Mining & Environment, 9: 229–242.
- Zhao, J., Chen, Sh., Zuo, R (2015) *Identifying geochemical anomalies associated with Au–Cu mineralization using multifractal and artificial neural network models in the Ningqiang district, Shaanxi, Chin*, Journal of Geochemical Exploration, 164: 33–41.
- Zuo, R. G (2011) *Identifying geochemical anomalies associated with Cu and Pb–Zn skarn mineralization using principal component analysis and spectrum-area fractal modeling in the Gangdese Belt, Tibet (China)*, Journal of Geochemical Exploration, 111:13–22.
- Zuo, R., Xia, Q., Zhang, D (2013) *A comparison study of the C–A and S–A models with singularity analysis to identify geochemical anomalies in covered areas*, Applied Geochemical, 33: 165–172.
- Zuo, R (2014) *Identification of weak geochemical anomalies using robust neighborhood statistics coupled with GIS in covered areas*, Journal of Geochemical Exploration, 136:93–101.
- Zuo, R., Wang, J (2015) *Fractal/multifractal modeling of geochemical data: A review*, Journal of Geochemical Exploration, 155: 84–90.
- Cheng, Q (2012) *Singularity theory and methods for mapping geochemical anomalies caused by buried sources and for predicting undiscovered mineral deposits in covered areas*, Journal of Geochemical Exploration, 122: 55–70.
- Ersoy, A., Yunsel, T. Y (2019) *Geochemical modelling and mapping of Cu and Fe anomalies in soil using combining sequential Gaussian co-simulation and local singularity analysis: a case study from Dedeyazı (Malatya) region, SE Turkey*, Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis, 19:331–342.
- Ghadimi, F., Khavari, M (2019) *Comparison of original and weighted singularity index in separation of Pb–Zn mineralized zone in the Haft Savaran district, central Iran*, Iranian Journal of Earth Sciences, 11:1–16.
- Gonçalves, M. A., Pinto, F., Vieira, R(2018) *Using multifractal modelling, singularity mapping, and geochemical indexes for targeting buried mineralization: Application to the W–Sn Panasqueira ore-system, Portuga*, Journal of Geochemical Exploration, 189:42–53.
- Hassanpour, S., Afzal, P (2011) *Application of concentration-number (C–N) multifractal modeling for geochemical anomaly separation in Haft Cheshmeh porphyry system, NW Iran*, Arabian Journal Geoscience, 6(3): 957–970.
- Kaveh, P., Ardeshir, H., Mohammad, A., Yousef, G (2011) *Application of multifractal modeling technique in systematic geochemical stream sediment survey to identify copper anomalies: a case study from Ahar, Azarbaijan, Northwest Iran*, Chemical Erde Geochemical, 71: 397–402.
- Liu, Y., Cheng, Q., Carranza, E. J. M., Zhou, K (2019) *Assessment of Geochemical Anomaly Uncertainty Through Geostatistical Simulation and Singularity Analysis*, Natural Resources Research, 28:199–212.
- Mahmoodi, P., Rastad, E., Rajabi, A., Moradpour, M (2019) *Mineralization horizons, structure and texture, alteration and mineralization stages in Zn–Pb (Ba) Eastern Haft-Savaran deposit in Malayer-Esfahan Metallogenic belt, south of Khomain*, Geoscience, 28(110): 3–12 (in Persian).
- Parsa, M., Maghsoudi, A., Yousefi, M., Sadeghi, M (2017) *Multifractal analysis of stream sediment geochemical data: Implications for hydrothermal nickel prospecting in an arid terrain, eastern Iran*, Journal Geochemical Exploration, 181: 305–317.
- Shahrestani, Sh., Mokhtari, A. R (2016) *Dilution correction equation revisited: The impact of stream slope, relief ratio and area size of basin on geochemical anomalies*, Africa Earth Science, 128: 16–26.

***Determination of subsurface geochemical anomalies of Pb in Haft-Savaran area, Khomein, Markazi province, by hybrid multifractal method***

***F. Ghadimi<sup>1\*</sup>, M. Khavari<sup>2</sup> and S. Mojeddifar<sup>3</sup>***

*1, 2, 3- Dept., of Mining Engineering, Arak University of Technology, Arak*

*\* ghadimi@Arakut.ac.ir*

***Recieved: 2020/1/1 Accepted: 2020/4/8***

***Abstract***

*The study area is located in the south of Markazi province, in Khomein city, in the Sanandaj- Sirjan zone and in the lead and zinc metal belt of Malayer-Isfahan. The research was conducted on 170 samples of 33 boreholes in Haft-Savaran area to identify Pb anomaly. Studies have shown that original and modified singularity models provide acceptable results for geochemical anomalies, but the results of the weighted singularity model were not significant in the two- and three-dimensional studies. Therefore, two-dimensional and three-dimensional integration of singularities are effective in separating the position and spreading the anomalies. Modified singularity model could provide better results than the original singularity method due to the separation of weak anomalies. Coefficient of areal association also indicated a high correlation between original and modified singularity models. Finally, it was found that Pb mineralization has a SW- NE trend in the region.*

***Keywords:*** *Geochemical anomaly, original singularity, weighted singularity, modified singularity, Haft-Savaran, Khomein*