

## مدل‌سازی وارون داده‌های ژئوفیزیکی و پتانسیل‌یابی سرب و روی اره‌گیجه رباط خمین استان مرکزی با استفاده از تلفیق اطلاعات اکتشافی در سامانه اطلاعات مکانی (GIS)

رضا احمدی<sup>۱\*</sup> و نوشین افضل<sup>۲</sup>

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

نویسنده مسئول: Rezahmadi@gmail.com \*

دریافت: ۹۷/۱/۱۴ پذیرش: ۹۷/۵/۱۶

### چکیده

در کانسار سرب و روی اره‌گیجه رباط خمین فعالیت‌های اکتشافی به دو روش غیرمستقیم و مستقیم در دو مرحله انجام شده است. در پژوهش حاضر ابتدا براساس اطلاعات اکتشافی مرحله اول یعنی داده‌های ژئوفیزیکی برداشت مستطیلی، عیارسنجی اکتشافات سطحی و اطلاعات زمین‌شناسی، با استفاده از روش دانش‌محور منطق فازی، مناطق امیدبخش مورد شناسایی قرار گرفت. برای دستیابی به این هدف، لایه‌های شاهد منطقه شامل داده‌های ژئوفیزیکی، گسل، ژئوشیمی و زمین‌شناسی در محیط نرم‌افزار ArcGIS تلفیق شد. برای وزن‌دهی و اولویت‌بندی لایه‌های اکتشافی، از میان روش‌های مختلف تصمیم‌گیری چندمعیاره، روش شباهت به گزینه ایده‌آل فازی مورد استفاده قرار گرفت. به‌منظور تشکیل نمودار سلسله‌مراتبی نیز از روش دلفی (Delphi) استفاده شد و در این راستا چهار معیار اصلی دقت و قابلیت اطمینان نتایج، زمان و هزینه عملیات، تعداد داده‌ها و تفسیر نتایج، مد نظر قرار گرفت. در نهایت پس از رتبه‌بندی لایه‌های اطلاعاتی و براساس اولویت‌بندی آن‌ها، نقشه مناطق امیدبخش ماده معدنی با استفاده از روش مجموع وزن‌ها تهیه شد. سپس اکتشافات ژئوفیزیک عمقی منطقه به روش‌های مقاومت ویژه و قطبش القایی، از طریق تعیین میزان همبستگی خطی بین داده‌های ژئوفیزیکی بعد از مدل‌سازی وارون هموار با داده‌های عیارسنجی گمانه‌های اکتشافی عمیق (مرحله دوم عملیات اکتشاف) منطبق بر پروفیل‌های ژئوفیزیکی، اعتبارسنجی شد. در پایان براساس داده‌های عیارسنجی گمانه‌های موجود، صحت رویکرد پتانسیل‌یابی سرب و روی با درجه اعتباری در حدود ۵۶ درصد، اعتبارسنجی گردید.

**واژه‌های کلیدی:** کانسار سرب و روی اره‌گیجه رباط خمین، پتانسیل‌یابی مواد معدنی، شباهت به گزینه ایده‌آل فازی، مدل‌سازی وارون، شبه‌مقاطع ژئوفیزیکی

### مقدمه

یک از این روش‌ها با توجه به میزان و نوع اطلاعات در دسترس، در شرایط مطلوب خاص خود مورد استفاده قرار می‌گیرند و البته هر کدام نیز مزایا و معایب خاص خود را دارند.

در پژوهش حاضر برای کانسار سرب و روی رباط خمین به‌عنوان یکی از کانسارهای فلزی کوچک، ابتدا با استفاده از روش‌های اکتشاف غیرمستقیم و مستقیم سطحی مرحله اول عملیات اکتشافی، پتانسیل‌یابی ماده معدنی از طریق تلفیق تمام اطلاعات اکتشافی در محیط سامانه اطلاعات مکانی (GIS) و نیز مدل‌سازی وارون هموار داده‌های ژئوفیزیکی، صورت گرفته، سپس بر اساس نتایج این مرحله، عملیات اکتشافات عمیق در مرحله بعدی، انجام شده و مدل‌سازی زمین‌شناسی و اکتشافی کانسار صورت گرفته است.

عملیات اکتشاف مواد معدنی یک فرآیند چند مرحله‌ای است که از شناسایی اولیه و پی‌جویی شروع شده و تا اکتشاف کامل کانسار ادامه می‌یابد. شناخت کامل یک کانسار مستلزم انجام یک‌سری عملیات پردازش داده و مدل‌سازی است که این کار معمولاً با استفاده از نرم‌افزارهای تخصصی قوی، با دقت و سرعت بیش‌تری انجام می‌گیرد. بطور کلی روش‌های پتانسیل‌یابی مواد معدنی را می‌توان به دو گروه دانش‌محور<sup>۱</sup> و داده‌محور<sup>۲</sup> تقسیم کرد. روش‌های دانش‌محور شامل منطق بولین، همپوشانی شاخص و منطق فازی بوده و روش‌های داده‌محور شامل اوزان شاهد، رگرسیون لجستیک و شبکه‌های عصبی است (کارانزا و همکاران، ۱۹۹۹). هر

<sup>1</sup> Knowledge driven

<sup>2</sup> Data driven

## مرور پیشینه پژوهش

در ارتباط با پتانسیل‌یابی مواد معدنی با استفاده از تلفیق اطلاعات اکتشافی در GIS طی سال‌های اخیر، تحقیقات چندی صورت گرفته که در ادامه به چند مورد از مهم‌ترین آن‌ها اشاره می‌شود. کارانزا و همکاران (۱۹۹۹) از مدل اکتشافی ماده معدنی در GIS برای تهیه نقشه پتانسیل ماده معدنی در بخش شمال‌شرقی فیلیپین استفاده کردند که نتایج، پتانسیل بالایی را برای ذخایر لاتریت نشان داد. حاضری و همکاران (۱۳۸۷) از سیستم اطلاعات مکانی و الگوسازی اکتشافی به منظور شناسایی مناطق معدنی امیدبخش در محدوده رشته‌کوه‌های ایرانکوه (معدن باما) استفاده کردند و با استفاده از روش اوزان شواهد، وزن‌های داده شده برای هشت لایه ژئوفیزیک، ژئوشیمی، گسل، سنگ‌شناسی، دورسنجی، رخنمون ماده معدنی، اکسیداسیون و کانی‌شناسی را محاسبه نمودند. ضیایی و همکاران (۲۰۱۰) برای پتانسیل‌یابی ذخایر معدنی در منطقه تروند-چاه‌شیرین (جنوب‌شرق دامغان) از چند لایه اطلاعاتی شامل نقشه ثابت کانی‌سازی، نقشه زمین‌شناسی، نقشه ژئوشیمیایی و نقشه مغناطیس‌سنجی هوایی در محیط GIS استفاده کردند. آن‌ها برای مدل‌سازی داده‌های اکتشافی از دو روش منطق فازی و اوزان شواهد استفاده نمودند. ملاحسینی و علی‌آبادی (۱۳۹۱) از داده‌های ماهواره‌ای برای اکتشاف ذخایر آهن و عناصر فلزی در منطقه محلات استفاده کردند و سپس براساس ارزش عوامل تاثیرگذار مانند شیب منطقه، نوع کانی‌زایی و غیره، عامل وزنی را به منظور تلفیق وزنی در GIS انجام دادند. در نهایت مناطق دارای اندیس معدنی مناسب جهت اکتشاف آهن، با استفاده از GIS معرفی شدند. شاهی و کامکار روحانی (۲۰۱۴) از GIS با روش اوزان شواهد برای تهیه نقشه پتانسیل طلای گرمایی در منطقه تربت حیدریه در شرق ایران استفاده کردند. این مطالعه براساس نتایج حاصل از تلفیق داده‌های ژئوفیزیک هواپرد، زمین‌شناسی، دگرسانی‌های آرژیلیک و پروپیلیتیک و داده‌های ژئوشیمیایی انجام شده است. در نتیجه چهار منطقه به عنوان مناطق بالقوه کانی‌سازی طلا شناسایی شدند که بسیاری از رگه‌ها و رگچه‌های شامل مواد معدنی در آن یافت می‌شوند. کی یان و همکاران (۲۰۱۵) از مدل سه‌بعدی GIS به منظور ارزیابی پتانسیل معدن مس

چندفلزی جیاما<sup>۱</sup> در تیبِت<sup>۲</sup> چین استفاده کردند. آن‌ها برای ارزیابی، از مدل فلزایی، زمین‌شناسی سه‌بعدی و ژئوشیمی و برای وزن‌دهی، از روش اوزان شواهد استفاده کردند که این پژوهش در نهایت منجر به شناسایی سه نقطه اکتشافی در منطقه شد.

## معرفی منطقه مورد مطالعه

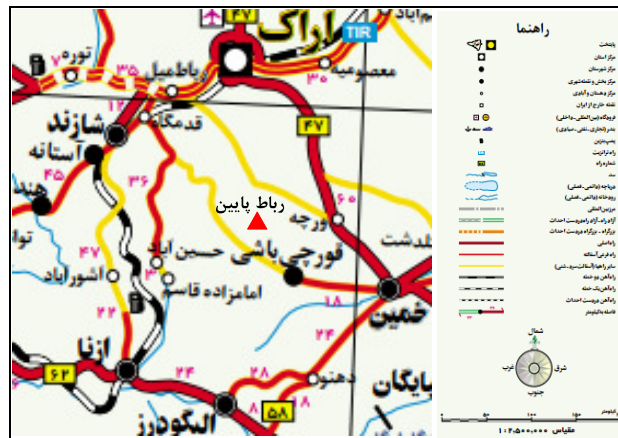
کانسار سرب و روی اره‌گیجه رباط در ۳۲ کیلومتری غرب و شمال‌غرب شهرستان خمین، ۱۰ کیلومتری شمال‌غرب شهر قورچی‌باشی و ۲ کیلومتری شمال روستای رباط قرار دارد (شکل ۱). محدوده مورد مطالعه به صورت چندضلعی نامنظمی است که سه کوه به نام‌های اره‌گیجه، تخت‌حسین و برآفتاب را در بر گرفته است (پیچاپ کانسار، ۱۳۸۸).

براساس مطالعات مرحله شناسایی اولیه و پی‌جویی در منطقه مورد مطالعه، محدوده کوه‌های اره‌گیجه، تخت‌حسین و برآفتاب که بیش‌ترین رخنمون افق سیلیسی کانه‌دار را در لولای تاق‌دیس اره‌گیجه، دماغه ناودیس تخت‌حسین و یال جنوب‌غربی تاق‌دیس کوه برآفتاب دربر گرفته‌اند، به‌عنوان محدوده‌های مناسب برای اکتشاف مرحله تفصیلی انتخاب شدند. به‌دلیل اهمیت کمتر مناطق تخت‌حسین و برآفتاب در مقایسه با منطقه اره‌گیجه از نظر زمین‌شناسی اقتصادی، فعالیت‌های اکتشافی، عمدتاً در منطقه اره‌گیجه انجام شده و بنابراین تمرکز عمده پژوهش حاضر نیز بر روی منطقه اره‌گیجه می‌باشد. مهم‌ترین فعالیت‌های اکتشافی انجام شده در منطقه اره‌گیجه در مرحله اکتشافی اول شامل تهیه نقشه‌های توپوگرافی و زمین‌شناسی با مقیاس ۱:۱۰۰۰، مطالعات ژئوفیزیکی به روش‌های IP (در حوزه زمان) و مقاومت‌سنجی (RS) با آرایه مستطیلی (کلاگری، ۱۳۸۹) در محدوده‌ای به وسعت ۶۸۰ × ۱۵۰ متر مربع با مشخصات طول خط جریان AB=1000m و فاصله الکترودی MN=20m، برداشت ۴ پروفیل ژئوفیزیکی با روش‌های IP و RS با آرایه دوقطبی-دوقطبی و حفر ۲ حلقه چاهک و ۱۹ فقره ترانشه به طول‌های ۲۰ تا ۱۵۰ متر (جمعاً به طول حدود ۱۱۱۰ متر) بر روی افق سیلیسی کانه‌دار می‌باشد. در مرحله دوم نیز تعداد ۴۳

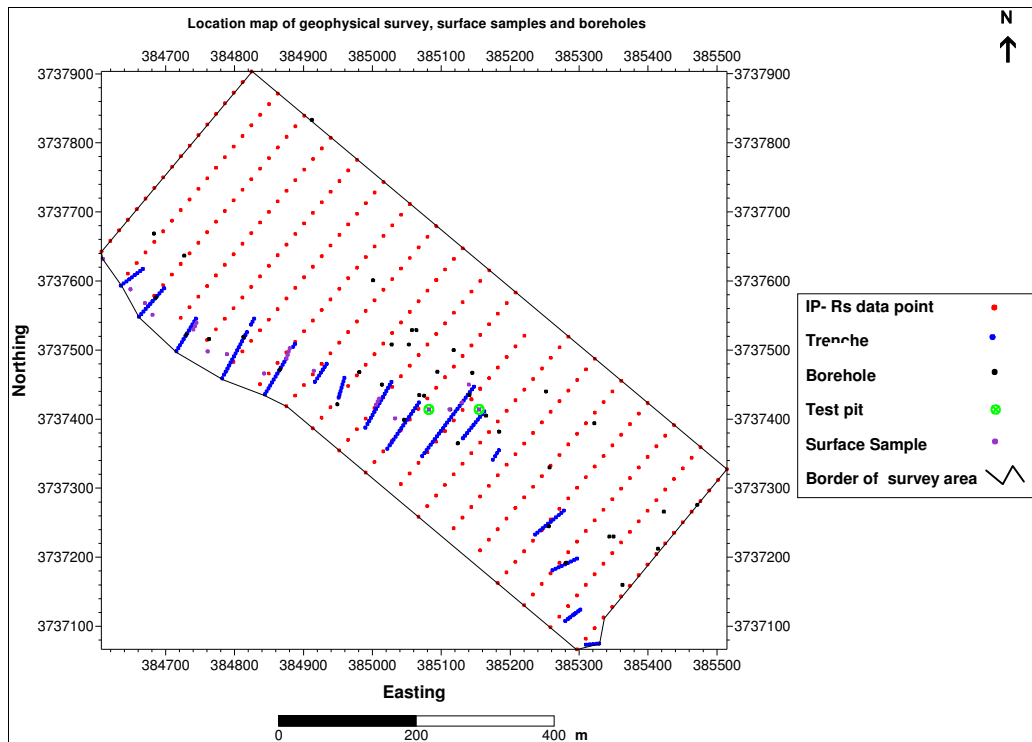
<sup>1</sup> Jiama<sup>2</sup> Tibet

مستطیلی و نیز موقعیت کارهای اکتشافی سطحی شامل نمونه‌های دستی سطحی، چاهک‌ها، ترانشه‌ها و گمانه‌های عمیق، نشان داده شده است. در این شکل برای نمایش گمانه‌های قائم از موقعیت دهانه آن‌ها استفاده شده و برای گمانه‌های شیب‌دار آزمایشی، نقطه وسط گمانه، به سطح زمین تصویر شده است. همچنین با توجه به اهداف پژوهش، حد و مرز محدوده مورد بررسی به سطح برداشت ژئوفیزیکی با آرایه مستطیلی، محدود شده است.

حلقه گمانه اکتشافی (۲۶ حلقه گمانه قائم و ۱۷ حلقه گمانه مایل) به عمق‌های ۱۵/۵ تا ۶۲ متر جمعاً به متر از ۱۴۱۳/۱۵ متر بطور پراکنده و عمدتاً در موقعیت بی‌هنجاری‌های ژئوفیزیکی شناسایی شده در مرحله قبل و مکان‌های تعبیر شده به‌عنوان مناطق امیدبخش، حفر گردید که در هر دو مرحله، برداشت زمین‌شناسی، نمونه‌گیری و تجزیه شیمیایی نمونه‌ها برای تعیین عیار عناصر سرب و روی صورت گرفت. در شکل ۲ موقعیت نقاط برداشت ژئوفیزیکی به روش‌های IP و Rs با آرایه



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی و راه‌های دسترسی به محدوده کانسار سرب و روی رباط (مشخص شده با علامت ▲)



شکل ۲. نقشه موقعیت نقاط برداشت ژئوفیزیکی با آرایه مستطیلی، ترانشه، گمانه، چاهک و نمونه‌های سطحی در منطقه اره‌گیجه

استراتاباند (چینه‌کران) مشاهده کرد (پیچاب کانسار، ۱۳۸۸).

کانی‌سازی در محدوده رباط به‌صورت سرب، روی و باریت در مجموعه کربناته- آواری کرتاسه (آپتین- سنومانین) به‌صورت افق‌هایی در واحدهای سنگ‌آهک و آهک مارنی و مارن تمرکز دارد. همزاد کانه‌ای در کانسنگ شامل پیریت، گالن، سروزیت، اسفالریت، اسمیت‌زونیت، کالکوپیریت، باریت، مالاکیت و اکسیدهای آهن (عمدتاً لیمونیت و گوتیت) بوده و کانی‌سازی به‌شکل عدسی‌ها، زون‌های رگه و رگچه‌ای و پرکننده فضای خالی است. دگرسانی در محدوده کانی‌سازی به‌صورت سیلیسی شدن، کربناتی‌شدن، آرژیلی‌شدن و هماتیتی‌شدن بوده و دگرسانی عمده در افق‌های کانه‌دار، سیلیسی‌شدن همراه با آنکریتی‌شدن می‌باشد (پیچاب کانسار، ۱۳۸۸). شکل ۳ نقشه توپوگرافی-زمین‌شناسی با مقیاس ۱:۱۰۰۰ منطقه اراگیجه را نشان می‌دهد که موقعیت کارهای اکتشافی نیز بر روی آن نمایش داده شده‌اند. مطابق این شکل واحدهای  $K^m$ ،  $K^L$  و  $K^{Lm}$  در نقشه زمین‌شناسی بیش‌ترین سطح رخنمون‌ها را به خود اختصاص داده‌اند. با توجه به نقشه زمین‌شناسی، منطقه اراگیجه از مخروط‌افکنه‌های قدیمی، مارن، شیل، سنگ‌آهک خاکستری و سنگ‌آهک ضخیم لایه تا توده‌ای تشکیل شده و بر اساس بررسی‌های انجام شده، ماده معدنی عمده در سنگ‌آهک ضخیم لایه قرار دارد.

### روش‌شناسی پژوهش

به‌منظور شناسایی وضعیت کانسار در منطقه مورد مطالعه ابتدا لایه‌های شاهد شامل چهار لایه ژئوفیزیک، گسل، ژئوشیمی و زمین‌شناسی مطابق شکل ۴ در محیط ArcGIS تهیه شد. سپس برای وزن‌دهی لایه‌های اکتشافی از روش شباهت به گزینه ایده‌آل فازی در زمینه تصمیم‌گیری (عطایی، ۱۳۸۹)، به‌دلیل حساسیت و دقت آن استفاده شد. روش شباهت به گزینه ایده‌آل فازی<sup>۳</sup> (فازی- تاپسیس) اولین بار توسط چن و هوانگ (۱۹۹۲) ارائه شد. روش تصمیم‌گیری چندمعیاره<sup>۴</sup> (MADM) فازی- تاپسیس به‌دلیل مزیت‌هایی که دارد، کاربردهای زیادی در علوم مختلف یافته و تاکنون نتایج قابل قبول و

بنابراین برخی از کارهای اکتشافی خارج از این محدوده (همانند تعداد ۳ عدد ترانشه واقع در قسمت شمال غربی منطقه که در این شکل نشان داده نشده‌اند) در مراحل بعدی پردازش در نظر گرفته نشده‌اند. قابل ذکر است که ۳ عدد ترانشه واقع در قسمت شمال‌غربی منطقه، در بخش خارج از محدوده حاوی ماده معدنی حفر شده‌اند و از نظر حضور ماده معدنی، اهمیت چندانی ندارند.

### زمین‌شناسی محدوده اکتشافی

محدوده مطالعه شده از نظر ساختاری در پهنه دگرگونی سنندج-سیرجان قرار گرفته و از پوشش کربناته-آواری کرتاسه روی مجموعه دگرگونی قدیمی تشکیل شده است. این محدوده از ناودیس و تاقدیس‌هایی با روند عمومی شمال‌غرب- جنوب‌شرق تشکیل شده که شامل یک ناودیس با هسته مرکزی از جنس نهشته‌های مارنی و آهک مارنی و دو تاقدیس با هسته واحد سنگ‌آهک در جنوب‌غرب و شمال‌شرق آن می‌باشد. این ساختمان ناودیس و تاقدیسی با یک سری گسله‌های عرضی، عمده‌تاً با روند شمال‌شرق- جنوب‌غرب قطع شده که اغلب از نوع امتدادلغز چپ‌گرد یا راست‌گرد بوده و باعث جابجایی افق کانه‌دار و سنگ‌های در برگیرنده آن به میزان چند متر (حداکثر ۵۰ متر) شده‌اند. کانسار مورد نظر از نظر نوعی، تیپ دره می‌سی‌سی‌پی<sup>۱</sup> (MVT) می‌باشد که در این نوع کانسارها بخش عمده کانی‌سازی در ساختمان ناودیس قرار می‌گیرد (پیچاب کانسار، ۱۳۸۸). ناحیه مورد مطالعه از نظر کانه‌زایی به ویژه حضور کانه‌های سرب و روی، بخشی از نوار کانه‌زایی ملایر- اصفهان به‌شمار می‌آید (پیچاب کانسار، ۱۳۸۸). این پهنه که بلافاصله بعد از پهنه زاگرس مرتفع<sup>۲</sup> و در شمال‌شرقی آن قرار دارد، یکی از پرتکاپوترین و غنی‌ترین پهنه‌های ساختاری از دید زمین‌شناسی اقتصادی به‌ویژه از نظر وجود کانسارهای فلزی مانند سرب و روی می‌باشد. حضور معادن و نهشته‌های مهم سرب و روی همانند آهن‌گران، عمارت، موچان، کلیشه، هفت‌سواران، لکان، حسین‌آباد و نظایر آن، جلوه‌هایی از انباشت‌های این گستره معدنی مهم می‌باشد که به‌طور عمده در سنگ‌آهک‌های دوره کرتاسه، مرکز کانی‌زایی را می‌توان در آن‌ها تقریباً به‌صورت

<sup>3</sup> Fuzzy TOPSIS

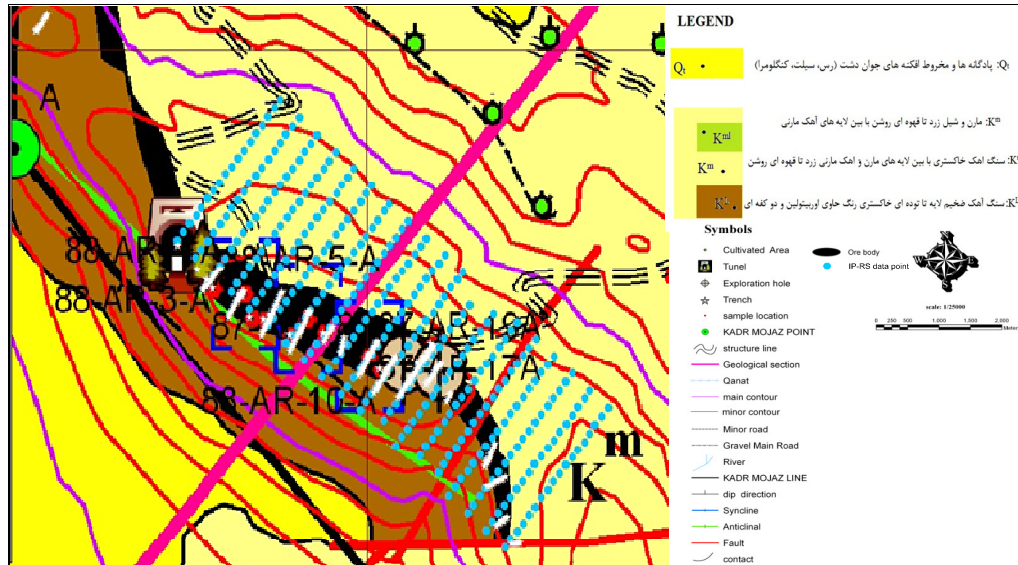
<sup>4</sup> Multicriteria analysis and decision making

<sup>1</sup> Mississippi Valley-Type

<sup>2</sup> High Zagros

موارد بهتر است از روش‌های تصمیم‌گیری فازی استفاده شود که روش شباهت به گزینه ایده‌آل فازی یکی از این روش‌هاست. در این حالت عناصر ماتریس تصمیم‌گیری یا وزن معیارها و یا هر دوی آن‌ها توسط متغیرهای زبانی که توسط اعداد فازی ارائه می‌شوند، ارزیابی شده و بدین ترتیب بر مشکلات روش تاپسیس کلاسیک، غلبه شده است (چن و هوانگ، ۱۹۹۲).

مثبتی به‌دست آورده است. در این مدل ارزش‌ها بر مبنای اعداد فازی تعیین می‌شوند و همانند تاپسیس کلاسیک، رتبه‌بندی براساس فاصله از راه‌حل ایده‌آل مثبت و منفی انجام می‌شود. در روش شباهت به گزینه ایده‌آل کلاسیک، برای تعیین وزن معیارها و رتبه‌بندی گزینه‌ها از مقادیر دقیق و معین استفاده می‌گردد. در بسیاری از مواقع تفکرات انسان، با عدم قطعیت همراه بوده و این عدم قطعیت در تصمیم‌گیری تاثیرگذار است. در این‌گونه



شکل ۳. نقشه توپوگرافی-زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰ منطقه اره‌گیجه با نمایش موقعیت کارهای اکتشافی بر روی آن

هم‌چنین مدل‌سازی وارون هموار<sup>۱</sup> شبه‌مقاطع بارپذیری و مقاومت‌ویژه ظاهری داده‌های برداشت پروفیل‌های ژئوفیزیکی با استفاده از نرم‌افزار RES2DINV انجام شد. در این راستا شبه‌مقاطع فاکتور فلزی<sup>۲</sup> نیز ترسیم شد و اعتبارسنجی نتایج برداشت‌های ژئوفیزیک عمقی از طریق ترسیم مقاطع اکتشافی منطبق بر پروفیل‌های ژئوفیزیکی صورت گرفت.

#### تهیه لایه‌های شاهد منطقه مورد مطالعه

به‌منظور تهیه لایه ژئوفیزیک، از داده‌های بارپذیری (IP) استفاده شد که برای به‌دست آوردن بی‌هنجاری هر منطقه، حد آستانه‌ای آن توسط رابطه  $\bar{X} + 2S$  (X میانگین و S انحراف معیار داده‌هاست) محاسبه گردید (ضیایی و همکاران، ۲۰۱۰) و مناطق بیش از این حد به‌عنوان

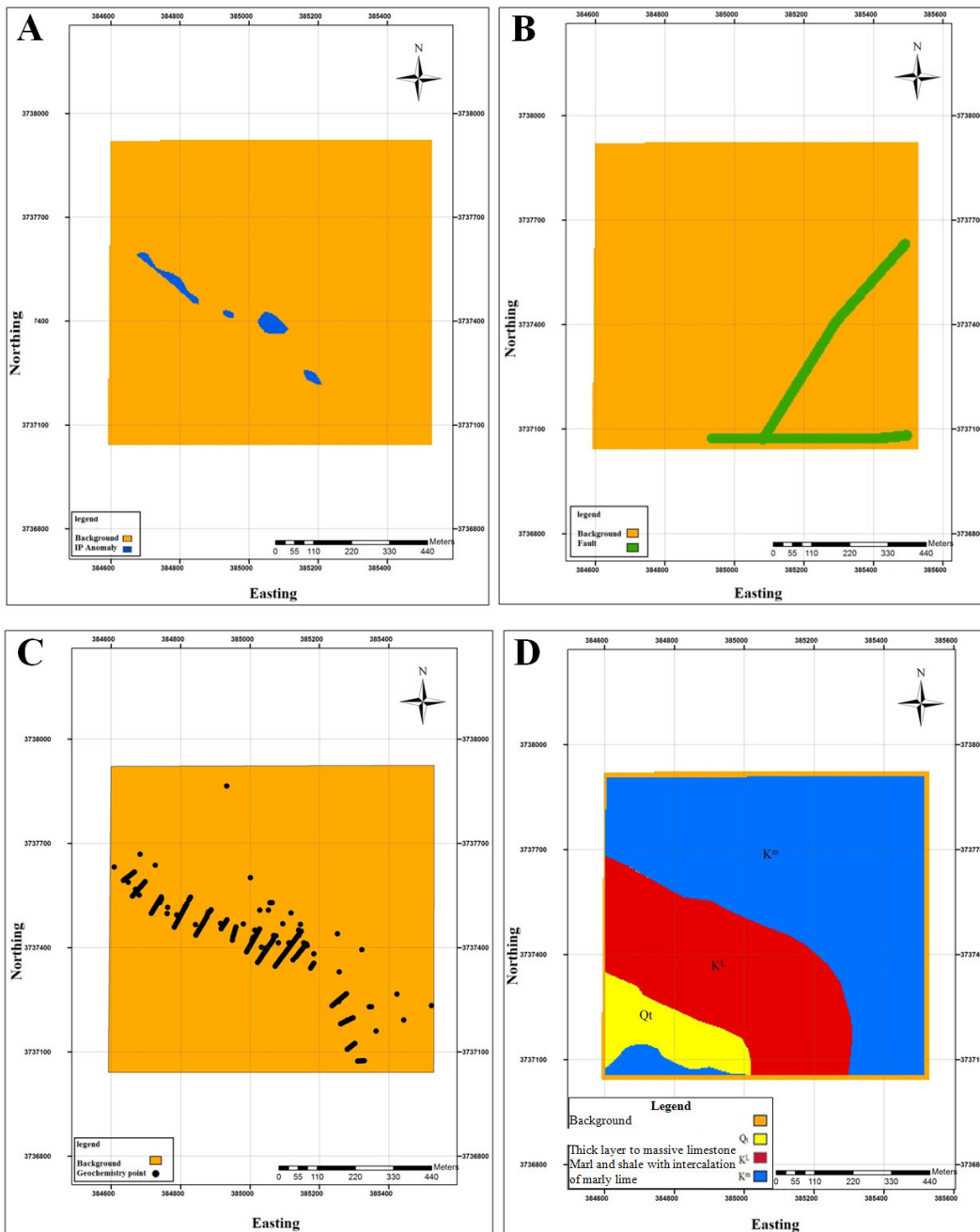
سپس با توجه به اولویت‌بندی که صورت گرفت، هر کدام از لایه‌های اطلاعاتی، رتبه‌بندی گردیده و مناطق امیدبخش از طریق تلفیق لایه‌ها در محیط ArcGIS مشخص شد. در پژوهش حاضر براساس نوع و میزان اطلاعات اکتشافی موجود در منطقه و هدف کار، روش منطق فازی مورد استفاده قرار گرفت. این روش زمانی استفاده می‌شود که داده‌ها و شواهد اکتشافی کم بوده و عدم قطعیت آن‌ها در پیش‌بینی رخداد کانسار نیز کم باشد. مهم‌ترین مزایای استفاده از سیستم فازی، بیان و توصیف عدم قطعیت در مسائل و استفاده از دانش انسانی بوده و ابزار جدیدی برای حل مسائلی است که تئوری احتمالات راه حلی برای آن‌ها ندارد. در واقع به‌طور خلاصه منطق فازی استفاده از قواعد خاص انجام یک کار براساس دانش انسانی به‌منظور بیان عدم قطعیت به‌طور دقیق می‌باشد.

<sup>1</sup> Smoothed inversion

<sup>2</sup> Metallic factor

که ممکن است کانی‌سازی در امتداد آن‌ها صورت گرفته باشد. بنابراین لایه گسل‌های منطقه با استفاده از نقشه زمین‌شناسی محدوده، ایجاد شد. با توجه به شواهد موجود، دو سری گسل با راستای شمال‌شرقی- جنوب غربی و شرقی- غربی در منطقه وجود دارد که این گسل‌ها در یک نقطه باهم تقاطع دارند.

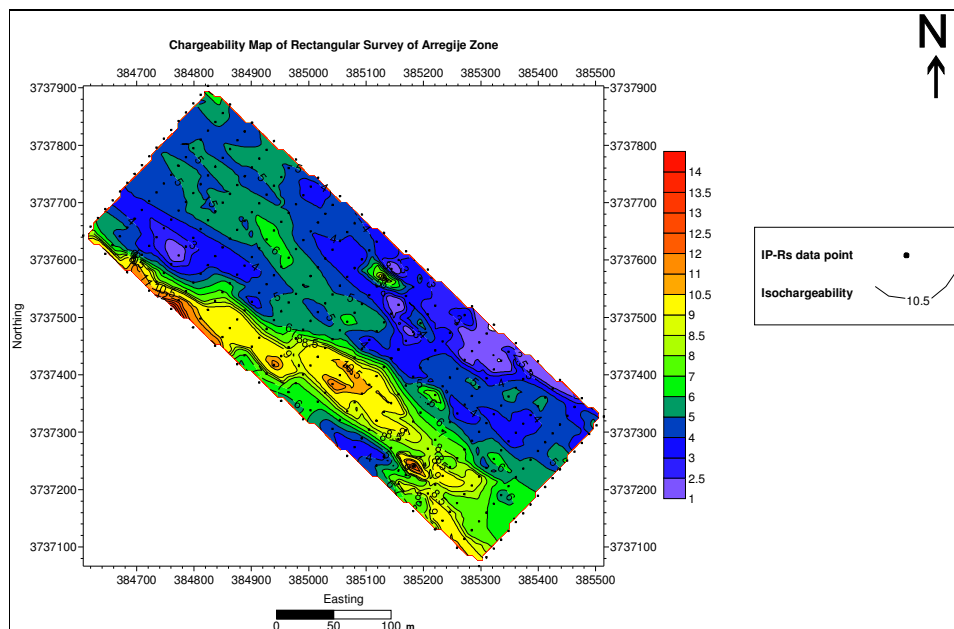
بی‌هنجاری انتخاب شدند. به‌منظور ارائه تصویری از میزان تغییرات بارپذیری در سطح محدوده، در شکل ۵ نقشه بارپذیری برداشت مستطیلی در منطقه، نشان داده شده است. یکی از عوامل کنترل کننده کانی‌سازی در هر منطقه به‌ویژه در کانسارهای از نوع رگه‌ای و پرکننده فضاهای خالی، گسل‌های موجود در آن منطقه می‌باشند



شکل ۴. A: لایه بارپذیری، B: لایه گسل‌های منطقه با بافر ۲۰ متر، C: لایه ژئوشیمی و D: لایه زمین‌شناسی منطقه، تهیه شده در محیط ArcGIS

نقشه موقعیت نمونه‌های برداشت شده، نشان داده شده است. زمین‌شناسی منطقه هم نقش مهمی در به‌وجود آمدن ماده معدنی دارد و شرایط تشکیل هر نوع ماده معدنی، به سنگ میزبان آن نیز بستگی دارد. مطابق نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰ منطقه اره‌گیجه (شکل ۳)، ماده معدنی عمدتاً در سنگ آهک ضخیم لایه قرار دارد.

در منطقه مورد مطالعه یک‌سری نمونه‌های سطحی از رخنمون‌ها و ترانشه‌ها برداشت شده و تجزیه شیمیایی بر روی آن‌ها صورت گرفته است. با توجه به اهمیت داده‌های عیارسنجی، برای تهیه لایه ژئوشیمی منطقه، از تمام داده‌های عیارسنجی سطحی بدون اعمال هیچ‌گونه حد آستانه، استفاده شد (البته در لایه ژئوشیمی شکل ۴



شکل ۵. نقشه بارپذیری منطقه اره‌گیجه

### ترسیم درخت سلسله مراتب تصمیم‌گیری و مراحل تصمیم‌سازی

نمودار سلسله مراتبی ایجاد شده برای منطقه مورد مطالعه در شکل ۶ نشان داده شده است. توالی مراحل مختلف تصمیم‌گیری نیز به‌صورت زیر می‌باشد. ابتدا پارامترها (لایه‌ها) از نظر معیارهای مختلف، ارزیابی شده که نتایج آن‌ها به‌عنوان ماتریس تصمیم در جدول ۱ خلاصه شده است. بردار وزن معیارها نیز به‌صورت جدول ۲ می‌باشد. برای تشکیل بردار وزن فازی و ماتریس تصمیم فازی از جدول‌های ۳ و ۴ استفاده شد. ماتریس تصمیم فازی پارامترها براساس معیارهای مختلف، بعد از بی‌مقیاس کردن، در جدول ۵ ارائه شده است. از میان معیارهای انتخاب شده، معیارهای اول، سوم و چهارم جنبه مثبت و معیار دوم جنبه منفی دارد. ماتریس بی‌مقیاس وزن‌دار داده‌ها نیز مطابق جدول ۶ می‌باشد. مطابق مجموعه روابط (۱) و (۲) بیش‌ترین عدد هر ستون

### انتخاب معیارها و راهبردها

با توجه به اهمیت اولویت انتخاب لایه‌ها در پتانسیل‌یابی مواد معدنی، به‌منظور تشکیل نمودار سلسله مراتبی از روش دلفی<sup>۱</sup> (دالکی و هلمر، ۱۹۶۳) استفاده شد. بدین منظور پرسش‌نامه‌ای در بین متخصصان آشنا به منطقه مطالعاتی، توزیع و از متخصصان درخواست شد که اهمیت و اولویت هر معیار را با استفاده از متغیر زبانی برآورد کنند. در ادامه، نتایج حاصل، میانگین‌گیری شده و دوباره در میان جامعه آماری اولیه توزیع شد و از آن‌ها خواسته شد که با توجه به انحرافات پاسخ‌های اولیه‌شان، تغییرات نهایی را بر روی ارزش‌های مورد نظرشان اعمال کنند. در پایان نمودار سلسله مراتبی تصمیم‌گیری در سه سطح به‌ترتیب هدف، معیار و راهبردها (آذر و فرجی، ۱۳۸۱) به‌کار گرفته شد.

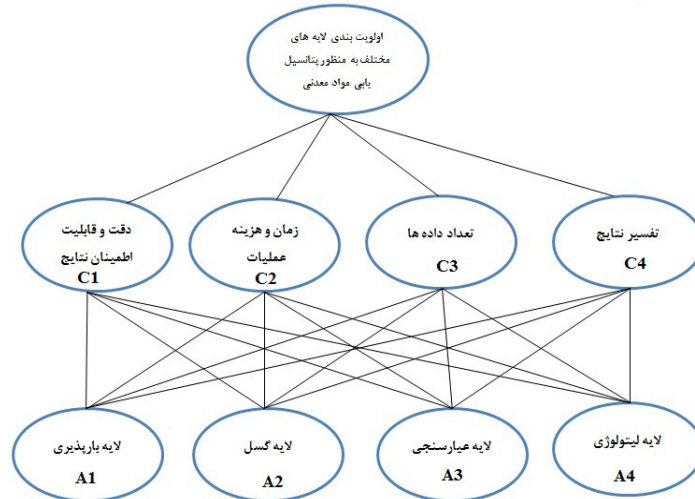
<sup>1</sup> Delphi method

نتایج محاسبات فاصله هر گزینه از حل ایده‌آل و ضد ایده‌آل به ترتیب در جدول‌های ۷ و ۸ و شاخص شباهت برای هر لایه نیز در جدول ۹ خلاصه شده است.

به‌عنوان حل ایده‌آل ( $A^+$ ) و کمترین عدد هر ستون به عنوان حل ضد ایده‌آل ( $A^-$ ) در نظر گرفته می‌شوند.

$$A^- = \left\{ (0/45, 0/45, 0/45), (0/04, 0/04, 0/04), (0/21, 0/21, 0/21), (0/45, 0/45, 0/45) \right\} \quad (1)$$

$$A^+ = \left\{ (1, 1, 1), (0/7, 0/7, 0/7), (1, 1, 1), (1, 1, 1) \right\} \quad (2)$$



شکل ۶. نمودار سلسله مراتبی طراحی شده برای منطقه

جدول ۱. ماتریس تصمیم نتایج پارامترها از نظر معیارهای مختلف

معیار / پارامتر	$C_4$	$C_3$	$C_2$	$C_1$
$A_1$	بسیار زیاد	زیاد	مناسب	بسیار زیاد
$A_2$	تا حدودی زیاد	مناسب	کم	تا حدودی زیاد
$A_3$	زیاد	بسیار زیاد	زیاد	بسیار زیاد
$A_4$	تا حدودی زیاد	تا حدودی زیاد	مناسب	زیاد

جدول ۲. وزن معیارهای مختلف

معیار	$C_4$	$C_3$	$C_2$	$C_1$
وزن معیار	بسیار با اهمیت	با اهمیت	بی تفاوت	بسیار با اهمیت

جدول ۳. بردار وزن معیارهای مختلف

معیار	$C_4$	$C_3$	$C_2$	$C_1$
وزن معیار	(۰/۹ و ۱)	(۰/۷ و ۰/۹ و ۱)	(۰/۳ و ۰/۵ و ۰/۷)	(۰/۹ و ۱)

جدول ۴. ماتریس تصمیم فازی پارامترها براساس معیارهای مختلف

معیار / پارامتر	$C_4$	$C_3$	$C_2$	$C_1$
$A_1$	(۹ و ۱ و ۱)	(۷ و ۹ و ۱)	(۳ و ۵ و ۷)	(۹ و ۱ و ۱)
$A_2$	(۵ و ۷ و ۹)	(۳ و ۵ و ۷)	(۰ و ۱ و ۳)	(۵ و ۷ و ۹)
$A_3$	(۷ و ۹ و ۱)	(۹ و ۱ و ۱)	(۷ و ۹ و ۱)	(۹ و ۱ و ۱)
$A_4$	(۵ و ۷ و ۹)	(۵ و ۷ و ۹)	(۳ و ۵ و ۷)	(۷ و ۹ و ۱)



جدول ۵. ماتریس تصمیم فازی پارامترها براساس معیارهای مختلف بعد از بی‌مقیاس کردن

معیار / پارامتر	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>
A <sub>1</sub>	(۰/۹۰/۹۰)	(۰/۱۴۰/۲۰/۳۳)	(۰/۷۰/۹۰)	(۰/۹۰/۹۰)
A <sub>2</sub>	(۰/۵۰/۷۰/۹۰)	(۰/۲۰/۳۳/۱)	(۰/۳۰/۵۰/۷۰)	(۰/۵۰/۷۰/۹۰)
A <sub>3</sub>	(۰/۹۰/۹۰)	(۰/۱۰/۱۱/۱۴)	(۰/۹۰/۹۰)	(۰/۷۰/۹۰)
A <sub>4</sub>	(۰/۷۰/۹۰)	(۰/۱۴۰/۲۰/۳۳)	(۰/۵۰/۷۰/۹۰)	(۰/۵۰/۷۰/۹۰)

جدول ۶. ماتریس بی‌مقیاس وزن‌دار داده‌ها

معیار / پارامتر	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>
A <sub>1</sub>	(۰/۸۱/۹۰)	(۰/۰۴۰/۱۰/۲۳)	(۰/۴۹/۸۱)	(۰/۸۱/۹۰)
A <sub>2</sub>	(۰/۴۵/۷۰/۹۰)	(۰/۶۰/۱۶/۰/۷)	(۰/۲۱/۴۵/۰/۷)	(۰/۴۵/۰/۷/۹۰)
A <sub>3</sub>	(۰/۸۱/۹۰)	(۰/۳۰/۵۵/۰/۹)	(۰/۶۳/۰/۹/۱)	(۰/۶۳/۰/۹/۱)
A <sub>4</sub>	(۰/۶۳/۰/۹/۱)	(۰/۰۴۰/۱۰/۲۳)	(۰/۳۵/۰/۶۳/۰/۹)	(۰/۴۵/۰/۷/۹۰)

جدول ۷. تعیین فاصله هر گزینه از حل ایده‌آل

فاصله هر گزینه از حل ایده‌آل	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>	معیار / فاصله
۰/۹۹	۰/۱۲	۰/۴۴	۰/۳۱	۰/۱۲	d(A <sub>1</sub> ,A <sup>+</sup> )
۱/۶۱	۰/۳۶	۰/۳۱	۰/۵۸	۰/۳۶	d(A <sub>2</sub> ,A <sup>+</sup> )
۰/۹۷	۰/۱	۰/۴۳	۰/۲۲	۰/۲۲	d(A <sub>3</sub> ,A <sup>+</sup> )
۱/۴۳	۰/۲۲	۰/۴۲	۰/۴۳	۰/۳۶	d(A <sub>4</sub> ,A <sup>+</sup> )

جدول ۸. تعیین فاصله هر گزینه از حل ضد ایده‌آل

فاصله هر گزینه از حل ضد ایده‌آل	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>	معیار / فاصله
۱/۶۳	۰/۴۶	۰/۱۱	۰/۶	۰/۴۶	d(A <sub>1</sub> ,A <sup>-</sup> )
۱/۳۸	۰/۲۹	۰/۵	۰/۳	۰/۲۹	d(A <sub>2</sub> ,A <sup>-</sup> )
۱/۸۹	۰/۴۹	۰/۳۳	۰/۶۵	۰/۴۲	d(A <sub>3</sub> ,A <sup>-</sup> )
۱/۲۹	۰/۴۲	۰/۱۱	۰/۴۷	۰/۲۹	d(A <sub>4</sub> ,A <sup>-</sup> )

جدول ۹. تعیین شاخص شباهت

گزینه / پارامتر	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>4</sub>
فاصله از حل ایده‌آل	۰/۹۹	۱/۶۱	۰/۹۷	۱/۴۳
فاصله از حل ضد ایده‌آل	۱/۶۳	۱/۳۸	۱/۸۹	۱/۲۹
شاخص شباهت	۰/۶۲	۰/۴۵	۰/۶۶	۰/۴۷

تخصیص داده شد به‌گونه‌ای که مجموع وزن تمام لایه‌ها برابر با یک باشد. سپس با استفاده از روش مجموع وزن‌ها<sup>۱</sup> نقشه نهایی حاصل از تلفیق کلیه اطلاعات، شکل ۷ ترسیم گردید.

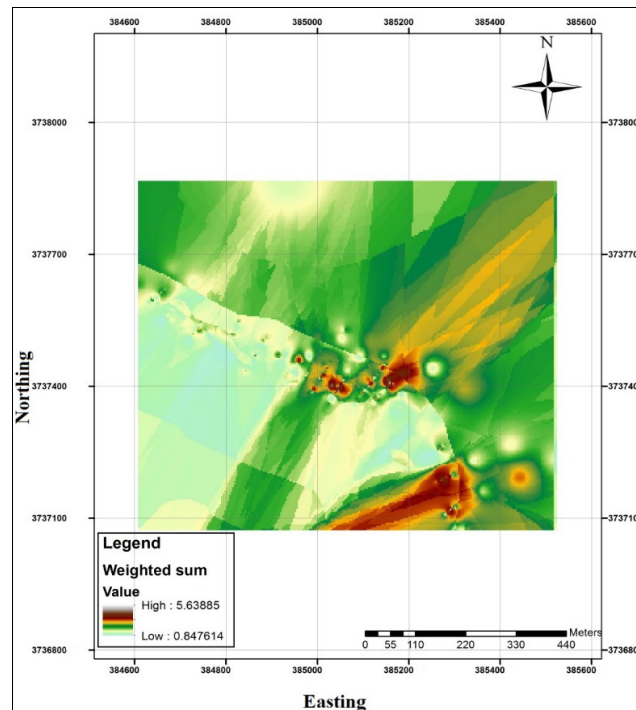
رتبه‌بندی گزینه‌ها براساس محاسبات فوق به‌صورت زیر می‌باشد:

$$A_3 > A_1 > A_4 > A_2$$

لایه گسل > لایه سنگ‌شناسی > لایه بارپذیری > لایه ژئوشیمی

براساس رتبه‌بندی و اولویت‌بندی لایه‌های اطلاعاتی، در محیط ArcGIS به هرکدام از لایه‌ها وزن مناسبی

<sup>1</sup> Weighted sum



شکل ۷. نقشه محدوده‌های امیدبخش سرب و روی اره‌گیجه

مطابق شکل ۸ گمانه‌های اکتشافی خیلی نزدیک به هر پروفیل، بر روی آن پروفیل تصویر شده است. مقطع ماده معدنی منطبق بر هر پروفیل ژئوفیزیکی، با استفاده از مقادیر عیارسنجی مجموع سرب و روی مغزه‌های گمانه‌ها، ترسیم شده است. گفتنی است که برای مقایسه نتایج حاصل از شبه‌مقاطع ژئوفیزیکی با مقاطع ماده معدنی منطبق بر آن‌ها، بایستی حدود و مرزهای شبه‌مقاطع ژئوفیزیکی با مقطع ماده معدنی منطبق بر آن برای هر یک از پروفیل‌های dd00، dd350W، dd550W و dd750W یکسان باشد.

شبه‌مقاطع، نمایش خیلی تقریبی از توزیع مقاومت‌ویژه توده‌های زیرسطحی و مقدار بارپذیری این توده‌ها می‌باشند (گریفیس و کینگ، ۱۹۸۳؛ میلسون، ۱۹۹۶). شبه‌مقاطع به‌عنوان ابزاری برای نمایش مقدار مقاومت‌ویژه ظاهری و بارپذیری ظاهری توده‌های زیرسطحی، به صورت تصاویر و نقشه‌ها مفید بوده و راهنمای اولیه برای تعبیر و تفسیر کمی می‌باشند ولی استفاده از آن‌ها به‌عنوان تصویر نهایی از مقاومت‌ویژه و بارپذیری ظاهری زیرسطحی، درست نیست (لک و بارکر، ۱۹۹۶؛ لک، ۱۹۹۹). بنابراین برای دستیابی به مقادیر ذاتی خواص فیزیکی زیرسطحی و به‌دست آوردن تصویری

#### مدل‌سازی وارون هموار داده‌های ژئوفیزیکی

بر اساس نتایج حاصل از مطالعات ژئوفیزیکی برداشت مستطیلی و مشخص شدن گسترش زون‌های بی‌هنجاری بارپذیری و مقاومت ویژه، به‌منظور تعیین نحوه گسترش عمقی بی‌هنجاری‌های ژئوفیزیکی این منطقه، مطابق شکل ۸ چهار پروفیل ژئوفیزیکی dd00، dd350W، dd550W و dd750W به موازات یکدیگر و با آرایه دوقطبی-دوقطبی برداشت شده است. شبه‌مقاطع دوقطبی-دوقطبی با مشخصات  $AB = MN = 20m$  متر و با گام‌های پرش ۲۰ متر برداشت شده‌اند. در این شکل موقعیت دهانه گمانه‌های حفر شده در مرحله دوم عملیات اکتشافی، واقع بر روی پروفیل‌های ژئوفیزیکی نیز نمایش داده شده و در مواردی که دهانه دو گمانه، خیلی نزدیک به هم باشد، یکی از گمانه‌ها یا هر دو گمانه شیب‌دار است.

برای تمام پروفیل‌های ژئوفیزیکی، شبه‌مقاطع بارپذیری، مقاومت‌ویژه ظاهری و فاکتور فلزی ترسیم شد. هم‌چنین به‌منظور ترسیم مقاطع اکتشافی منطبق بر پروفیل‌های ژئوفیزیکی، با استفاده از گمانه‌های اکتشافی، به‌منظور اعتبارسنجی برداشت‌های ژئوفیزیک عمقی، با هدف استفاده از کلیه اطلاعات اکتشافی و داده‌های موجود،

علامت اختصاری MF نشان داده می‌شود، برای روش قطبش القایی در حوزه زمان با استفاده از رابطه (۳) و در حوزه فرکانس از رابطه (۴) محاسبه می‌شود:

$$MF = \frac{M \times 2000}{\rho} \quad (3)$$

$$MF = \frac{PFE \times 2000}{\rho} \quad (4)$$

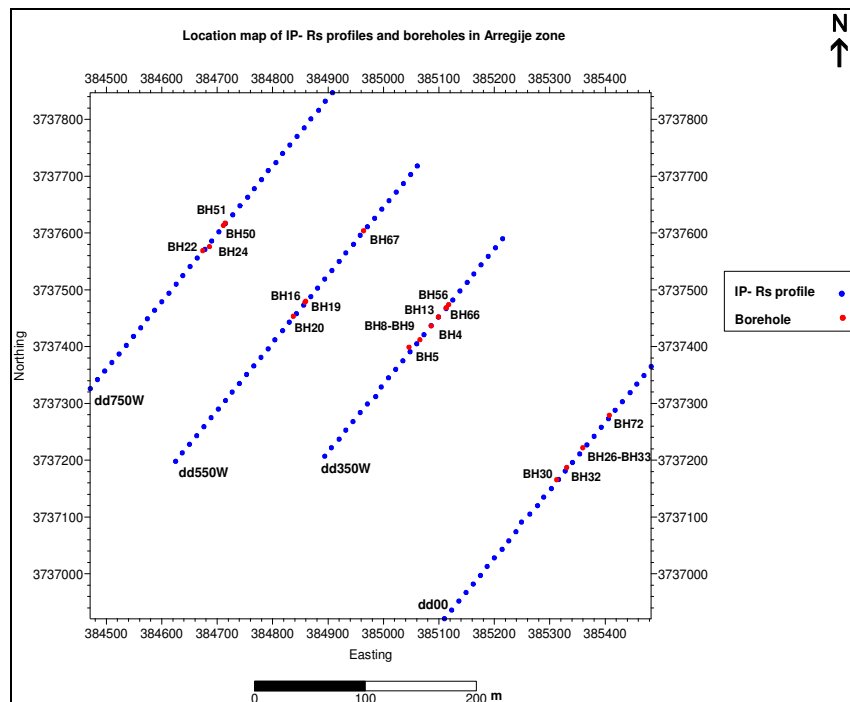
که در این روابط  $M$  مقدار بارپذیری ظاهری در حوزه زمان،  $\rho$  مقدار مقاومت ویژه ظاهری و  $PFE$  درصد اثر فرکانس (مقدار بارپذیری ظاهری در حوزه فرکانس) می‌باشد.

شبه‌مقطع فاکتور فلزی پروفیل dd00 بعد از مدل‌سازی وارون هموار در شکل ۱۰ ترسیم شده است. مطابق این شکل مقدار فاکتور فلزی در دو محدوده کوچک یکی مرکز شبه‌مقطع و دیگری در قسمت پایین نیمه سمت چپ شبه‌مقطع، مقادیر نسبتاً بالایی (بیش از ۵) را نشان می‌دهد. شکل ۱۱ نیز مقطع ماده معدنی منطبق بر پروفیل ژئوفیزیکی dd00 را نشان می‌دهد که با استفاده از داده‌های عیارسنجی پنج گمانه BH26، BH30، BH32، BH72 و BH33 ترسیم شده است. با توجه به این شکل مشاهده می‌شود که ماده معدنی در نیمه سمت چپ این مقطع از عیار بالاتری برخوردار است.

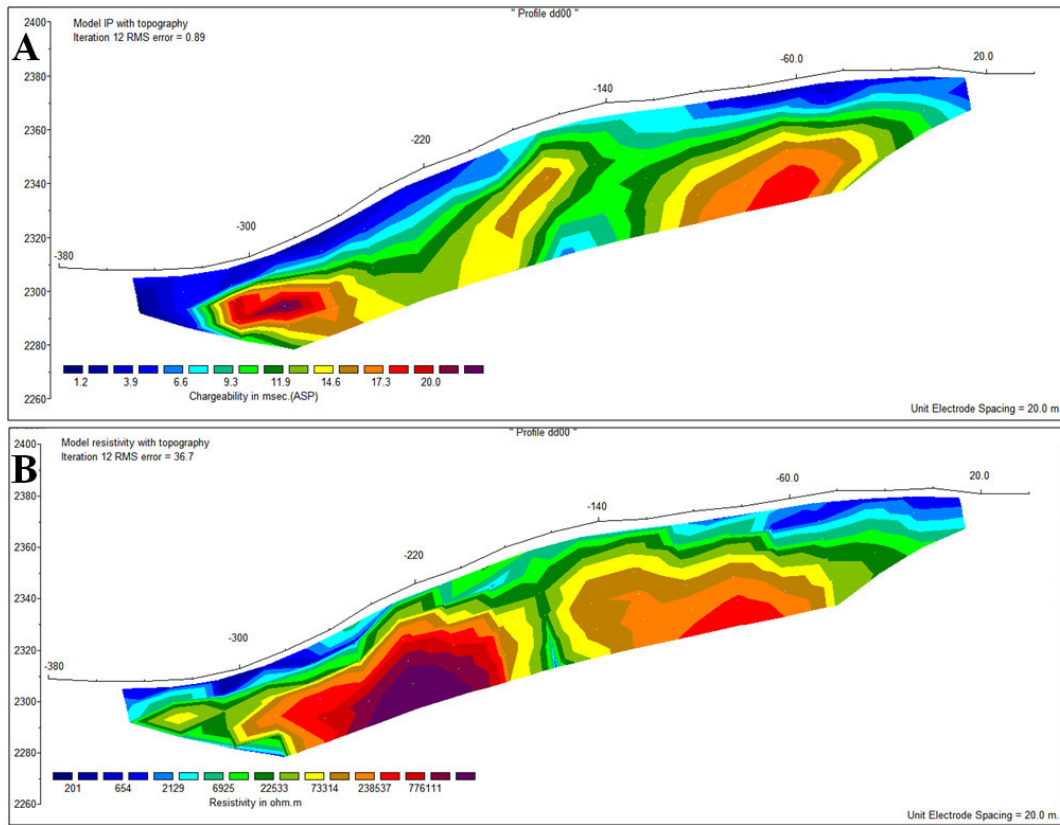
واقعی از توده‌های زیرسطحی، با استفاده از نرم‌افزار RES2DINV (لک، ۲۰۰۰؛ لک و لین، ۲۰۰۲) بر روی داده‌های بارپذیری و مقاومت ویژه ظاهری پروفیل‌های dd00، dd350W، dd550W و dd750W مدل‌سازی وارون هموار صورت گرفته است.

به‌عنوان نمونه شبه‌مقاطع بارپذیری و مقاومت ویژه، بعد از مدل‌سازی وارون هموار توسط نرم‌افزار RES2DINV برای پروفیل dd00 در شکل ۹ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۹-الف مشاهده می‌شود که بارپذیری در دو محدوده مجزا یکی نیمه راست و دیگری نیمه چپ شبه‌مقطع، بالاست. این محدوده‌های با بارپذیری بالا با موقعیت‌های نظیرشان در شبه‌مقطع مقاومت ویژه (شکل ۹-ب) با مقادیر با مقاومت ویژه نسبتاً زیاد (ناشی از سنگ میزبان آهکی)، هم‌خوانی داشته که می‌توانند بر کانی‌سازی فلزی سرب و روی دلالت داشته باشند.

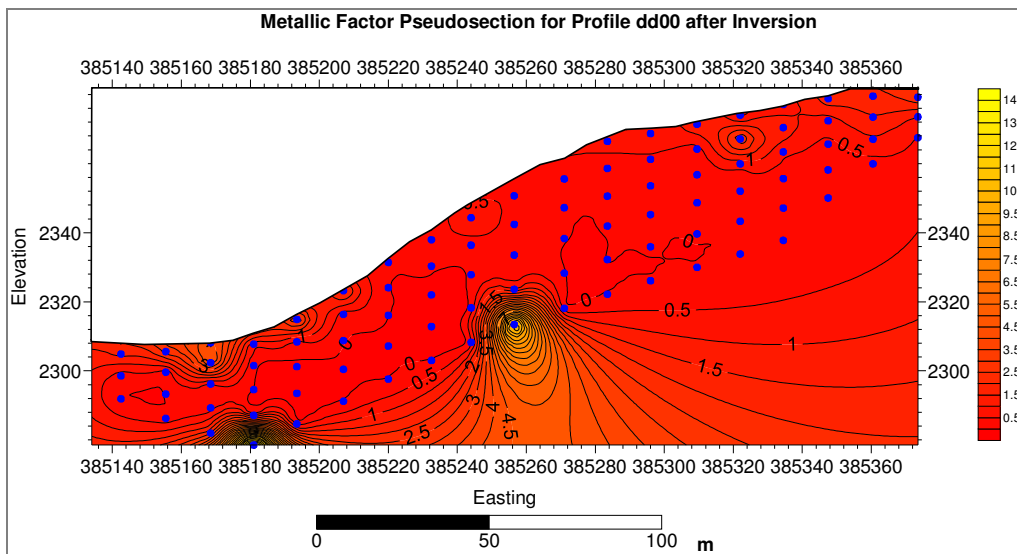
به‌منظور ارزیابی شبه‌مقاطع ژئوفیزیکی با مقاطع ماده معدنی، از شبه‌مقطع فاکتور فلزی استفاده شد که در واقع ترکیبی از شبه‌مقاطع بارپذیری و مقاومت ویژه ظاهری می‌باشد. فاکتور فلزی در واقع یک پارامتر کیفی است که تا حدودی پلاریزاسیون فلزی را از پلاریزاسیون غیرفلزی یا به‌عبارت‌دیگر کانی‌سازی فلزی را از غیرفلزی جدا می‌سازد (احمدی و همکاران، ۱۳۹۴). فاکتور فلزی که با



شکل ۸. موقعیت پروفیل‌های ژئوفیزیکی برداشت شده در منطقه اره‌گیجه و گمانه‌های منطبق بر آن‌ها



شکل ۹. مدل‌سازی وارون هموار داده‌های محدوده سرب و روی اره‌گیجه. A: بارپذیری و B: مقاومت ویژه پروفیل dd00 با استفاده از نرم‌افزار RES2DINV



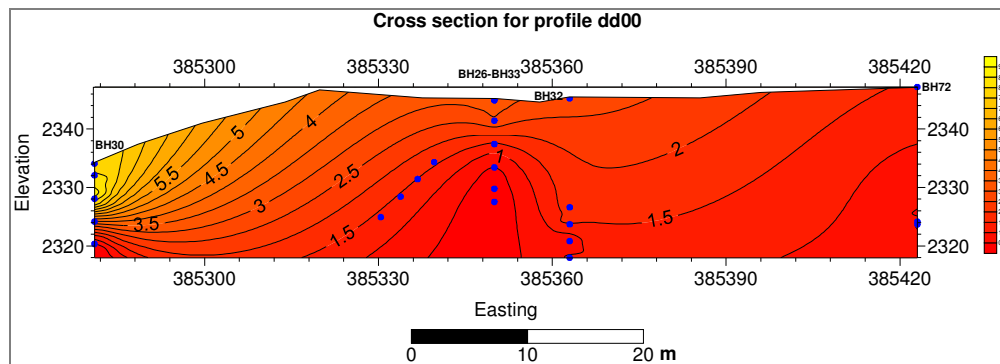
شکل ۱۰. شبه‌مقطع فاکتور فلزی پروفیل dd00 در محدوده سرب و روی اره‌گیجه بعد از مدل‌سازی وارون هموار

dd00، dd350W، dd550W و dd750W بعد از مدل‌سازی وارون هموار، یعنی مقاطع حقیقی ژئوالکتریکی زمین، نشان می‌دهد. داده‌های جدول ۱۰ و واژه‌های توصیفی مربوط به میزان ضرایب همبستگی (جدول ۱۱) نشان

اعتبارسنجی اکتشافات ژئوفیزیکی عمیق جدول ۱۰ میزان همبستگی خطی بین داده‌های عیارسنجی سرب و روی، داده‌های ژئوفیزیکی بارپذیری، مقاومت ویژه ظاهری و فاکتور فلزی را برای پروفیل‌های

سرب و روی با داده‌های بارپذیری در پروفیل‌های dd00 و dd750W بر خلاف انتظار منفی و در دو پروفیل دیگر مثبت اما بسیار کم می‌باشد. میزان همبستگی بین داده‌های عیارسنجی مجموع سرب و روی و مقاومت ویژه ظاهری، در پروفیل dd750W مثبت و در سایر پروفیل‌ها منفی است. میزان همبستگی بین داده‌های عیار مجموع سرب و روی و فاکتور فلزی در تمام پروفیل‌ها بجز پروفیل dd750W مثبت است که برای دو پروفیل dd00 و dd350W در حد کم و برای پروفیل dd550W نسبتاً زیاد است.

می‌دهند که میزان همبستگی بین داده‌های بارپذیری و مقاومت ویژه ظاهری در تمام پروفیل‌ها مثبت است که با کانی‌سازی در تطابق نسبی بوده و مقدار آن در پروفیل dd750W کم و در سایر پروفیل‌های دیگر متوسط است. میزان همبستگی بین داده‌های بارپذیری و فاکتور فلزی، در تمام پروفیل‌ها بسیار کم می‌باشد که برای یک کانی‌سازی فلزی همانند سرب و روی، این نتیجه تقریباً غیرمعمول است. میزان همبستگی بین داده‌های مقاومت ویژه ظاهری و فاکتور فلزی در تمام پروفیل‌ها منفی و در حد متوسط است. میزان همبستگی بین عیار مجموع



شکل ۱۱. مقطع اکتشافی (عیارسنجی سرب و روی) منطبق بر پروفیل ژئوفیزیکی dd00 در محدوده سرب و روی اره‌گیجه

جدول ۱۰. میزان همبستگی بین مقادیر بارپذیری، مقاومت ویژه ظاهری، فاکتور فلزی و عیارسنجی پروفیل‌های ژئوفیزیکی بعد از مدل‌سازی وارون هموار داده‌های ژئوفیزیکی محدوده سرب و روی اره‌گیجه

میزان همبستگی				عیار همبستگی
پروفیل dd750W	پروفیل dd550W	پروفیل dd350W	پروفیل dd00	
۰/۶۰۰	۰/۵۷۱	۰/۶۳۴	۰/۲۵۱	IP-Rs
-۰/۱۶۷	-۰/۲۸۵	۰/۰۶۲	-۰/۲۴۴	IP-MF
-۰/۳۵۷	-۰/۲۵۷	-۰/۱۱۰	-۰/۱۴۴	Rs-MF
۰/۵۰۸	۰/۱۵۶	۰/۰۴۸	-۰/۶۲۴	IP-(Pb+Zn)
-۰/۰۱۴	۰/۱۵۶	۰/۰۳۴	-۰/۴۲۶	Rs-(Pb+Zn)
۰/۷۵۵	۰/۱۸۸	۰/۰۲۰	-۰/۳۴۴	MF-(Pb+Zn)

جدول ۱۱. واژه توصیفی مربوط به میزان ضریب همبستگی بین دو متغیر (احمدی و همکاران، ۱۳۹۴)

میزان همبستگی	۰-۰/۲	۰/۲۱-۰/۴	۰/۴۱-۰/۷	۰/۷۱-۰/۹	۰/۹۱-۱
واژه توصیفی	بسیار کم	کم	متوسط	زیاد	بسیار زیاد

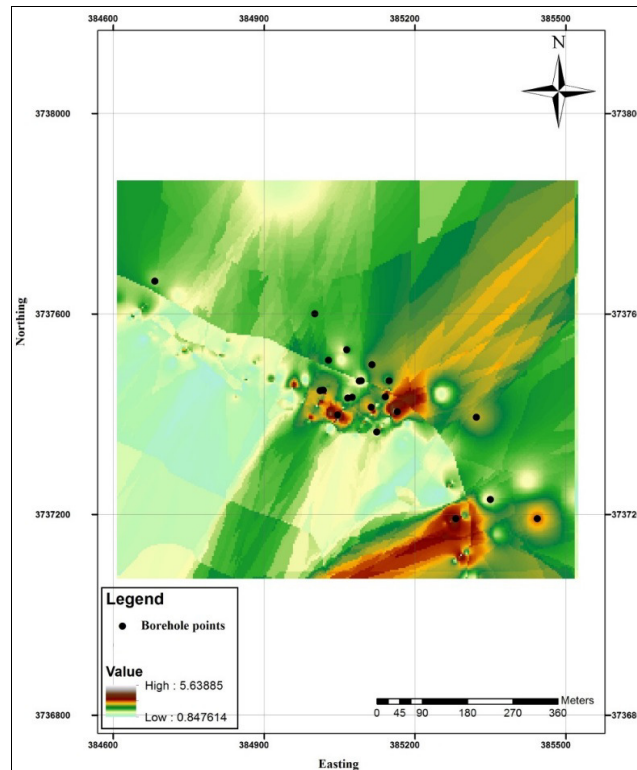
هم‌چنین با توجه به شرایط اقتصادی روز دو فلز سرب و روی و میزان عیار حد این دو عنصر در آینده‌ای نزدیک، آستانه بی‌هنجاری مجموع سرب و روی، ۳ درصد در نظر گرفته شد. در شکل ۱۲ نقشه نهایی مناطقی آمیدبخش یعنی موقعیت محدوده‌های عمقی با عیار بزرگ‌تر از ۳

### اعتبارسنجی رویکرد پتانسیل‌یابی

به‌منظور ارزیابی عملکرد پتانسیل‌یابی با استفاده از روش مجموع وزن‌ها، از بهترین معیار اعتبارسنجی عملکرد یعنی داده‌های عیارسنجی گمانه‌های اکتشافی موجود در منطقه (مرحله دوم عملیات اکتشافی) استفاده شد.

درصد مجموع سرب و روی، بر روی سطح زمین تصویر شده است. حفر گمانه در نقاطی که با درجه احتمال بیش‌تری به‌عنوان پتانسیل ماده معدنی تعیین شده بودند، منجر به قطع ماده معدنی گردید. صحت عملکرد رویکرد با درجه اعتباری در حدود ۵۶ درصد، به اثبات رسید.

درصد مجموع سرب و روی، به‌دست آمده با روش مجموع وزن‌ها، نشان داده شده است. گفتنی است که برای گمانه‌های قائم موقعیت دهانه آن‌ها در سطح زمین نمایش داده شده و برای گمانه‌های شیب‌دار آزیموتی، موقعیت مرکز محدوده‌های عمقی با عیار بزرگ‌تر از ۳



شکل ۱۲. اعتبارسنجی عملکرد شناسایی مناطق امیدبخش سرب و روی در محدوده اره‌گیجه

ژئوفیزیکی، نشان می‌دهد که میزان همبستگی بین این داده‌ها با داده‌های عیارسنجی سرب و روی، چندان زیاد نمی‌باشد که پیچیدگی ذاتی زمین‌شناسی خود کانسار، عیار نسبتاً پایین ماده معدنی و بالا بودن سطح نوفه در داده‌های ژئوفیزیکی منطقه مورد مطالعه، از دلایل اصلی آن است.

عملکرد رویکرد پیشنهادی پتانسیل‌یابی ماده معدنی نیز از طریق داده‌های عیارسنجی گمانه‌های اکتشافی موجود در منطقه، ارزیابی شد که بدین ترتیب رویکرد مورد استفاده، با درجه صحتی در حدود ۵۶ درصد اعتبارسنجی گردید. نتایج این پژوهش نشان می‌دهند که تلفیق اطلاعات اکتشافی مختلف غیرمستقیم و مستقیم در شناسایی نواحی امیدبخش، تا حدودی راه‌گشاست. به هرجهت به‌دلیل پیچیدگی‌های زمین‌شناسی کانسارهای

### نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر به‌منظور شناسایی مناطق امیدبخش و یا به عبارت دیگر اولویت‌بندی محدوده‌های دارای کارهای اکتشافی، روش دانش‌محور منطق فازی مورد استفاده قرار گرفت. بر این اساس نقشه نهایی حاصل از تلفیق کلیه اطلاعات ترسیم گردید. در مرحله بعد تعدادی گمانه اکتشافی عمیق بطور پراکنده در سطح محدوده، به‌ویژه در موقعیت بی‌هنجاری‌های حاصل از شبه‌مقاطع ژئوفیزیکی دوقطبی-دوقطبی و نیز محدوده‌های تعبیر شده به‌عنوان مناطق امیدبخش حفاری شدند. به‌منظور اعتبارسنجی عملیات اکتشاف ژئوفیزیک عمقی، میزان همبستگی خطی بین داده‌های ژئوفیزیکی بعد از مدل‌سازی وارون هموار توسط نرم‌افزار RES2DINV، با داده‌های عیارسنجی گمانه‌های منطبق بر پروفیل‌های

- Prospectivity Mapping: A Case study of Jiama copper-polymetallic deposit in Tibet, China, 71: 611-632.
- Loke, M. H., Barker, R. D (1996) Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudo-sections by a Quasi-Newton method, *Geophysical Prospecting*, 44: 131-152.
- Loke, M. H., Lane, J (2002) The use of constraints in 2D and 3D resistivity modeling, The 8<sup>th</sup> EEGS-ES Meeting, Portugal.
- Loke, M. H (1999) Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies: A Practical Guide to 2-D and 3-D Surveys, 66 p.
- Loke, M. H (2000) Topographic modelling in resistivity imaging inversion, 62nd EAGE Conference & Technical Exhibition Extended Abstracts, D-2.
- Milson, J (1996) *Field geophysics*, Second Edition, John Wiley & Sons, New York, 187 p.
- Shahi, H., Kamkar Rouhani, A (2014) A GIS-based weights-of-evidence model for mineral potential mapping of hydrothermal gold deposits in Torbat-e-Heydarieh area, *Journal of Mining and Environment*, 5 (2): 79-89.
- Ziaii, M., Abedi, A., Ziaei, M., Kamkar Rouhani, A., Zendahdel, A (2010) GIS modelling for Au-Pb-Zn potential mapping in Torud-Chah Shirin area-Iran, *Journal of Mining and Environment*, 1 (1): 17-27.
- فلزی، انجام چنین فرآیندی در صورتی بطور کامل موفقیت‌آمیز است که فعالیت‌های اکتشافی، براساس طراحی اصولی یک شبکه اکتشاف بهینه صورت گرفته باشند.
- ### منابع
- احمدی، ر، کریمی، ا، افضلی، ن (۱۳۹۴) اعتبارسنجی اکتشافات ژئوفیزیکی انجام شده در کانسار مس دره زرشک یزد با استفاده از داده‌های عیارسنجی عملیات حفاری، نوزدهمین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران و نهمین همایش ملی زمین‌شناسی دانشگاه پیام نور، تهران. آذر، ع؛ فرجی، ح (۱۳۸۱) علم مدیریت فازی، انتشارات اجتماع (دانشگاه تربیت مدرس)، ۳۰۸ ص.
- پیچاب‌کانسار، مهندسین مشاور (۱۳۸۸) گزارش زمین‌شناسی محدوده اکتشافی رباط همراه با تهیه نقشه زمین‌شناسی ۱:۲۰۰۰۰، ۴۲۷ ص.
- حاضری، م، صادقی سرخنی، ح، فتحیان‌پور، ن (۱۳۸۷) پتانسیل‌یابی سرب و روی با استفاده از تلفیق اطلاعات اکتشافی در سیستم GIS در منطقه ایرانکوه اصفهان، دومین کنفرانس مهندسی معدن ایران، دانشگاه تهران.
- عطائی، م (۱۳۸۹) تصمیم‌گیری چند معیاره فازی، ناشر: دانشگاه صنعتی شاهرود، ۲۶۴ ص.
- کلاگری، ع. ا (۱۳۸۹) اصول اکتشافات ژئوفیزیکی، ناشر: مولف، تبریز، ۴۸۵ ص.
- ملاحسینی، پ، علی‌آبادی، م، ع (۱۳۹۱) پتانسیل‌یابی ذخایر آهن در برگه ۱:۱۰۰۰۰۰ زمین‌شناسی محلات با استفاده از روش‌های دورسنجی (RS) و سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS)، چهارمین همایش انجمن زمین‌شناسی اقتصادی ایران، دانشگاه بیرجند.
- Carranza, E. J. M., Mangaoang, J. C., Hale, M (1999) Application of mineral exploration models and GIS to generate mineral potential maps as input for optimum land-use planning in the Philippines, *Natural Resources Research*, 8 (2): 165-173.
- Chen, S., Hwang., C (1992) Fuzzy multiple attribute decision making: methods and applications, Springer Verlag Inc, 536 p.
- Dalkey, N., Helmer, O (1963) An experimental application of the Delphi method to the use of experts, *Management Science*, 9 (3): 458-467.
- Griffiths, D. H., King, R. F (1983) *Applied geophysics for geologists and engineers: The Elements of Geophysical Prospecting*, Second Edition, Pergamon Press, 240 p.
- Keyan, X., Nan, L., Alok, P., Eun-Jung, H., Leon, B., Yongjun, L (2015) GIS-based 3D

## Inversion of geophysical data and potential mapping of Robat-Arregijeh Pb-Zn deposit, Khomein, Markazi province, using integration of exploratory information in GIS

R. Ahmadi<sup>1\*</sup> and N. Afzali<sup>2</sup>

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

\*Rezahmadi@gmail.com

Received: 2018/4/3 Accepted: 2018/8/7

### Abstract

In Robat-Arregijeh Pb-Zn deposit, various exploration activities have been carried out through two methods, indirect and direct in two stages. In current research, at first, depending on the exploration data in first stage including geophysical data surveyed by gradient configuration, surface explorations and geology information, promising areas were detected using knowledge driven fuzzy logic method. To achieve this goal, various layers of evidence including geophysical, faults, geochemical and geological layers were prepared in ArcGIS environment. Afterward for weighting and prioritization of exploration layers, among the variety of multi-criteria analysis and decision making (MADM) methods, fuzzy TOPSIS method was selected due to high sensitivity and accuracy in decision making. In order to perform hierarchical chart, Delphi method was also employed. In this regard, four criteria comprising accuracy and reliability of the results, time and cost of operation, number of data and interpretation of the results were considered. After ranking the informational layers and according to them prioritize, final mineral potentials map was produced using weighted sum method. Then, deep geophysical exploration in the region was validated through determination of linear correlation between geophysical data after smooth inverse modeling with lead-zinc assay of deep exploratory boreholes (related to the second stage of exploration operation) located on the geophysical profiles. Finally after ranking the informational layers, the mineral potential map was validated with accuracy percentage of about 56% through the existent borehole assay data.

**Keywords:** Khomein-Robat-Arregijeh Pb-Zn deposit, Mineral potential mapping, Fuzzy TOPSIS, Inverse modeling, Geophysical pseudo-sections