

## بکارگیری روش‌های ماشین بردار پشتیبان، آمار کلاسیک و زمین آماری به منظور طراحی شبکه اکتشاف تفصیلی کانسار سرب و روی رباط خمین

رضا احمدی\*

گروه مهندسی معدن، دانشکده مهندسی علوم زمین، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۷/۲۰

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۲/۱۳

\*rezahmadi@gmail.com

### چکیده

در پژوهش حاضر طبقه‌بندی اولیه کانسار اره گیجه رباط خمین توسط روش ماشین بردار پشتیبان انجام شد. برای این منظور از ۵۴۸ داده چندمتغیره شامل ۳۳۷ داده ژئوفیزیکی Ip و Rs، ۲۱۱ داده نوع سنگ و عیارسنجی مجموع سرب و روی نمونه‌های دستی، ترانشه‌ها و چاهک‌ها، سه متغیر Ip، Rs و نوع سنگ به عنوان متغیرهای پیش‌بین و عیار مجموع سرب و روی، به عنوان متغیر هدف انتخاب شد. سپس طبقه‌بندی توده کانسار براساس سه عیار حد مجموع سرب و روی ۱/۵، ۲ و ۳ درصد، به دو طبقه بی‌هنجاری و زمینه صورت گرفت. در ادامه در موقعیت‌های شناخته شده به عنوان بی‌هنجاری، گمانه‌های اکتشافی بطور پراکنده در سطح محدوده، حفاری شد. در مرحله بعد طراحی شبکه اکتشاف تفصیلی با دو روش آمار کلاسیک و زمین آماری انجام شد که با روش تحلیلی شبکه مستطیلی به ابعاد ۳۶×۳۵ متر به دست آمد. بکارگیری روش زمین آماری داده‌های عیارسنجی مجموع سرب و روی گمانه‌ها با نرم افزار SGeMS، شبکه اکتشاف مربعی شکلی به ابعاد ۵۵×۵۵ متر را نتیجه داد. براساس نتایج پژوهش، در مرحله بعد حفر کارهای اکتشافی نیمه عمیق در موقعیت گره‌های شبکه اکتشافی طراحی شده با روش زمین آماری به واسطه دقت بیشتر این روش، پیشنهاد می‌شود.

**کلمات کلیدی:** کانسار سرب و روی رباط خمین، ماشین بردار پشتیبان (SVM)، طراحی شبکه اکتشاف، روش کلاسیک، روش زمین آماری

### مقدمه

در بسیاری از موارد مشخصات کانسار در قسمت‌های مختلف آن متفاوت و ناشناخته است و برای اینکه اطلاعات صحیحی از مشخصات کانسار به دست آید، بایستی کارهای اکتشافی را که معمولاً شامل ترانشه‌ها، چاهک‌ها، چال‌ها، گمانه‌ها و سایر کارهای اکتشافی است، در تمام سطح کانسار به‌طور یکنواخت گسترش داد. یکی از نیازهای اساسی در تمامی مراحل عملیات اکتشافی یک کانسار، تعیین موقعیت دقیق کارهای اکتشافی و یا طراحی شبکه اکتشاف می‌باشد. به‌طور کلی نحوه قرار گرفتن کارهای اکتشافی در کنار یکدیگر را شبکه اکتشاف می‌گویند. شبکه اکتشاف دارای انواع مختلفی است که انتخاب نوع، شکل و ابعاد شبکه، به شرایط و خصوصیات زمین‌شناسی کانسار بستگی دارد (Ahmadi, 2005). امروزه مسائل مرتبط با اکتشاف مواد معدنی و طراحی شبکه‌های اکتشافی، نیازمند استفاده همه‌جانبه از سایر علوم به‌ویژه علوم جدید، روش‌ها و تکنیک‌های سریع، دقیق و هوشمند می‌باشند. (Smirnoff et al., 2008) بازدهی عملیات اکتشافی در هر مرحله می‌تواند از طریق پردازش مناسب اطلاعات موجود، افزایش یابد. در این صورت هر مرحله بعدی، از دانش و اطلاعات مراحل قبلی برخوردار خواهد بود که این امر اساس و فلسفه طراحی عملیات اکتشافی است.

در پژوهش حاضر به منظور اکتشاف تفصیلی کانسار سرب و روی رباط خمین به عنوان یکی از کانسارهای فلزی بالارزش کشور، ابتدا برای صرفه‌جویی در وقت و هزینه و کاهش ریسک اکتشاف مرحله بعدی عملیات اکتشاف، با استفاده از روش هوشمند ماشین بردار پشتیبان (SVM) که یکی از روش‌های شناخت الگو می‌باشد، سطح محدوده کانسار به کمک داده‌های

اکتشافی سطحی مرحله اول عملیات اکتشافی شامل داده‌های ژئوفیزیکی قطبش القایی (IP) و مقاومت ویژه (Rs) برداشت مستطیلی، داده‌های عیارسنجی نمونه‌های سطحی رخنمون‌ها، ترانشه‌ها و چاهک‌ها با در نظر گرفتن عیار حد مناسب، به دو طبقه زون پرعیار یا بی‌هنجاری (بالتر از عیار حد) و زون کم عیار یا زمینه (پایین‌تر از عیار حد) طبقه‌بندی شد؛ به عبارت دیگر جداسازی اولیه ماده معدنی از باطله صورت گرفت. سپس براساس نتایج این مرحله از عملیات اکتشاف، بطور پراکنده در سطح محدوده، در موقعیت‌های شناخته شده به عنوان زون پرعیار و نیز در موقعیت بی‌هنجاری‌های شبه مقاطع ژئوفیزیکی، گمانه‌های اکتشافی حفاری شد و در نهایت طراحی شبکه اکتشاف تفصیلی به دو روش آمار کلاسیک با استفاده از کلیه اطلاعات و زمین آماری با استفاده از داده‌های عیارسنجی عمقی گمانه‌ها صورت گرفت.

در ارتباط با طبقه‌بندی ماده معدنی براساس معیارهای مختلف، با استفاده از روش هوشمند ماشین بردار پشتیبان و طراحی شبکه اکتشاف کانسارهای معدنی با استفاده از روش‌های کلاسیک و زمین آماری طی سال‌های اخیر، تحقیقات معدودی صورت گرفته که در ادامه به چند مورد از مهم‌ترین آنها اشاره می‌شود. Ahmadi و Hossein-nejad (۲۰۰۲) از نتایج عملیات اکتشاف ژئوشیمیایی، به‌منظور ارائه مدل اکتشافی و طراحی نوع و چگالی شبکه اکتشاف کانسار سرب و روی عمارت اراک استفاده نمودند. آنها به‌منظور تعیین چگالی شبکه اکتشاف، از روش تحلیلی (کلاسیک) استفاده کردند. Ahmadi و Kheirabadi (۲۰۰۲) با استفاده از داده‌های ژئوفیزیکی، عیارسنجی ترانشه‌ها و تعداد معدودی گمانه عمیق، برای کانسار

لاهای شکل آهن و منگنز شمس آباد اراک (که ماده معدنی به صورت عدسی‌هایی در میان آهک‌های ضخیم لایه قرار گرفته است) با استفاده از دو روش تحلیلی و زمین‌آماری، شبکه اکتشاف بهینه طراحی نمودند. Twarakavi و همکاران (۲۰۰۶) با استفاده از روش‌های ماشین بردار پشتیبان (SVM) و حداقل مربعات ماشین بردار پشتیبان (LSVM)، به تهیه نقشه توزیع مکانی در یک معدن طلا در رسوبات حومه شهر آلاسکا پرداختند. Zuo و Carranza (۲۰۱۱) با استفاده از دو روش SVM با تابع کرنل سیگموئیدی و وزن‌های شاهد به تهیه نقشه پتانسیل معدنی طلا در باختر مگومانوا اسکوشیای کانادا پرداختند. نتایج این مطالعه برتری روش SVM را به‌عنوان یک ابزار برای تهیه نقشه پیش‌بینی، نشان می‌دهد. Abedi و همکاران (۲۰۰۶) از روش طبقه‌بندی نظارت شده SVM برای تهیه نقشه پتانسیل معدنی مس پورفیری نوچون کرمان استفاده کردند. برای این منظور اطلاعات زمین‌شناسی، داده‌های ژئوفیزیکی و ژئوشیمیایی برای بررسی و تهیه نقشه پتانسیل معدنی نوچون، جمع‌آوری و ترکیب شد. با استفاده از روش SVM داده‌های بیست و یک گمانه، به پنج طبقه با دقت ۵۲/۳۸ درصد، طبقه‌بندی شد. Yu و همکاران (۲۰۱۲) از تصاویر استر همراه با مدل رقومی تهیه شده از داده‌های مغناطیس‌سنجی هوایی و بکارگیری الگوریتم SVM، برای طبقه‌بندی خودکار سنگ‌شناسی منطقه‌ای در شمال باختر هند استفاده کردند. این مطالعه نشان می‌دهد که SVM می‌تواند برای تهیه نقشه سنگ‌شناسی مناطقی که برخی از اطلاعات سنگ‌شناسی آنها در دسترس است، کمک کننده باشد. Abbaszadeh و همکاران (۲۰۱۳) از روش SVM با تابع کرنل از نوع تابع پایه شعاعی به‌منظور جداسازی مناطق دگرسانی ذخیره مس پورفیری سونگون اهر استفاده کردند. نتایج نشان داد که با انتخاب پارامترهای بهینه، مناطق دگرسانی فلیک و پتاسیک با دقت ۹۵ درصد و ۱۰۰ درصد به‌ترتیب برای مراحل آموزش و آزمون داده‌ها، از یکدیگر جدا شدند. Ahmadi (۲۰۱۸a) شبکه اکتشاف مقدماتی چال‌های حفاری در محدوده امیدبخش طلا در منطقه دلجان را با استفاده از داده‌های عیارسنجی نمونه‌های لیتوژئوشیمیایی و کانی‌های سنگین آبراهه‌ها با دو روش تحلیلی و زمین‌آماری طراحی نمود. بکارگیری روش زمین‌آماری با استفاده از نرم افزار GS+ برای کل منطقه، شبکه اکتشاف مستطیلی به ابعاد ۲۴۰۰×۲۱۰۰ متر را نتیجه داد که با ابعاد شبکه به‌دست آمده از روش تحلیلی، بسیار متفاوت بود. Ahmadi (۲۰۱۸b) با توجه به روش‌های متداول اکتشاف کانسارهای معدنی توسط شبکه‌های اکتشافی مختلف و تشابه کانسارهای معدنی با اشکال هندسی معمول، نحوه طراحی شبکه اکتشاف بهینه برای هر نوع کانسار را براساس روابط موجود در احتمالات هندسی، ارائه کرده است. شبکه اکتشاف بهینه با استفاده از احتمالات هندسی برای دو اندیس مس شناسایی شده با عملیات دورسنجی واقع در جنوب غرب کرمان یکی با ساختار تقریباً خطی و دیگری با ساختار تقریباً دایره‌ای، طراحی شده است. برای این منظور ابعاد شبکه اکتشاف بهینه برای هر اندیس با در نظر گرفتن کم‌ترین مقدار احتمال کشف یا ۰/۵ و احتمال کشف مطلوب یا ۰/۹۵ در دو حالت جهت‌یافتگی تصادفی و با جهت‌یافتگی مشخص، محاسبه شده است.

### زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

کانسار سرب و روی رباط مطابق شکل ۱ در ۳۲ کیلومتری باختر و شمال باختر شهرستان خمین، ۱۰ کیلومتری شمال باختر شهر قورچی باشی و ۲ کیلومتری جنوب روستای رباط پایین قرار دارد. محدوده مورد مطالعه به

صورت چندضلعی نامنظمی است که سه کوه به نام‌های اره گیجه، تخت حسین و برآفتاب را در بر گرفته است. راه‌های دسترسی به منطقه به دو صورت یکی از طریق شهرستان اراک به طرف سه‌راه شازند و سپس گذر از روستاهای قدمگاه، موچان، الیم‌آباد، خرم‌آباد و در نهایت رباط پایین می‌باشد و دیگری از شهرستان خمین به سمت قورچی‌باشی و سپس انحراف به سمت راست با طی مسافتی در حدود ۱۲ کیلومتر است.

محدوده مورد مطالعه از نظر ساختاری در پهنه دگرگونی سندانج-سیرجان قرار داشته و از پوشش کربناته- آواری کرتاسه روی مجموعه دگرگونی قدیمی تشکیل شده است. این محدوده از ناودیس و تاقدیس‌هایی با روند عمومی شمال‌باختر- جنوب‌خاور تشکیل شده که شامل یک ناودیس با هسته مرکزی از جنس نهشته‌های مارنی و آهک مارنی و دو تاقدیس با هسته واحد سنگ‌آهک در جنوب باختر و شمال خاور آن می‌باشد. این ساختمان ناودیس و تاقدیسی با یک سری گسله‌های عرضی، عمدتاً با روند شمال‌خاور- جنوب باختر قطع شده که اغلب از نوع امتداد لغز چپ‌گرد یا راست‌گرد بوده و باعث جابجایی افق کانه‌دار و سنگ‌های دربرگیرنده آن به میزان چند متر (بیشینه ۵۰ متر) شده است (Pichab Kansar, 2009). ناحیه مورد مطالعه از نظر کانی‌زایی به‌ویژه حضور کانی‌های سرب و روی، بخشی از نوار کانه‌زایی ملایر- اصفهان به‌شمار می‌آید. حضور معادن و نهشته‌های مهم سرب و روی همانند آهنگران، عمارت، موچان، کلیشه، هفت سواران، لکان، حسین آباد، ایرانکوه و ناحیه مورد مطالعه، جلوه‌هایی از انباشت‌های این گستره معدنی مهم می‌باشد که به‌طور عمده در سنگ آهک-های دوره کرتاسه، تمرکز کانی‌زایی را می‌توان در آنها تقریباً به‌صورت استراتی‌بند (چینه‌کران) ملاحظه نمود. این پهنه که بلافاصله بعد از پهنه زاگرس بلند (High Zagros) و در شمال خاوری آن قرار دارد، یکی از پرتکاپوترین و غنی‌ترین پهنه‌های ساختاری از دید زمین‌شناسی اقتصادی به-ویژه از نظر وجود کانسارهای فلزی مانند سرب و روی می‌باشد.

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 جنوب باختری تاقدیس کوه برآفتاب در بر گرفته اند، به-عنوان محدوده‌های مناسب برای اکتشاف مرحله تفصیلی انتخاب شدند. به-دلیل اهمیت کمتر مناطق تخت‌حسین و برآفتاب در مقایسه با منطقه اره‌گیجه، 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 و RS با آرایه مستطیلی (Kalagari, 2010) در محدوده‌ای به وسعت ۶۸۰×۱۵۰۰ متر 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 ۱۹ فوره ترانشه به طول‌های ۲۰ تا ۱۵۰ متر (جمعاً به طول حدود ۱۱۱۰ متر) بر روی افق سیلیسی کانه‌دار می‌باشد. در شکل ۲ موقعیت نقاط برداشت ژئوفیزیکی به روش‌های IP و RS با آرایه مستطیلی و نیز موقعیت کارهای اکتشافی سطحی شامل نمونه‌های دستی رخنمون‌های سطحی، ترانشه‌ها و چاهک‌ها در منطقه اره‌گیجه نشان داده شده است.

عنوان زون پرعبار (ماده معدنی) و موقعیت بی‌هنجاری‌های شبه مقاطع ژئوفیزیکی حفر گردید که در هر دو مرحله، برداشت زمین‌شناسی، نمونه‌گیری و تجزیه شیمیایی نمونه‌ها برای عناصر سرب و روی صورت گرفت.

در مرحله دوم نیز تعداد ۴۳ حلقه گمانه اکتشافی (۲۶ حلقه گمانه قائم و ۱۷ حلقه گمانه مایل) به عمق‌های ۱۵/۵ تا ۶۰ متر جمعاً به متر اژ ۱۴۱۳/۱۵ متر بطور پراکنده و عمدتاً در محدوده‌های طبقه‌بندی شده به

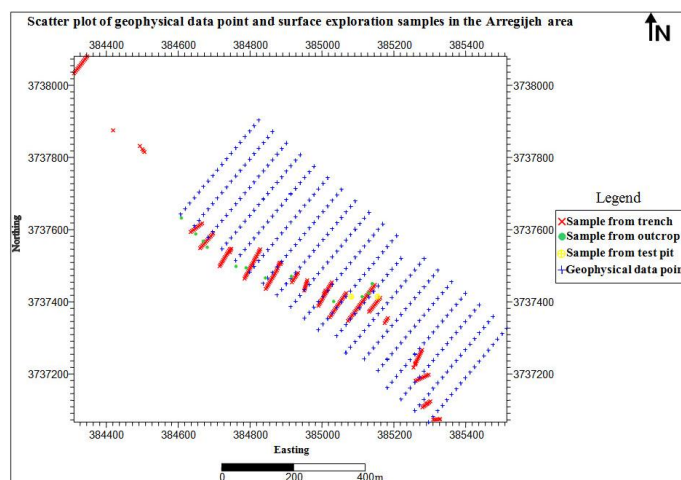


شکل ۱- نقشه موقعیت جغرافیایی و راه‌های دسترسی به محدوده مورد مطالعه (مشخص شده با علامت ▲).  
Fig. 1. Geographical location map and access roads to the study area (marked with the symbol ▲)

استفاده شده و برای تعیین نوع، چگالی و ابعاد شبکه اکتشاف تفصیلی کانسار با استفاده از گمانه‌های اکتشافی پراکنده در مرحله دوم عملیات اکتشافی، از دو روش مبتنی بر آمار کلاسیک و زمین‌آمار استفاده شده است.

## بحث و نتایج

در پژوهش حاضر به منظور طبقه‌بندی اولیه توده کانسار منطقه ازه گیجه رباط خمین با استفاده از کارهای اکتشافی سطحی مرحله اول، از روش SVM



شکل ۲- نقشه موقعیت پراکندگی نقاط برداشت ژئوفیزیکی مستطیلی، نمونه‌های سطحی رخنمون‌ها، ترانشه‌ها و چاهک‌ها در منطقه ازه-گیجه.  
Fig. 2. Location map of geophysical survey points by gradient configuration, surface samples of outcrops, trenches and test pits in the Arregijeh area

مدل طبقه‌بندی ماشین بردار پشتیبان برای حل مسائل طبقه‌بندی داده‌ها و از مدل رگرسیون در حل مسائل پیش‌بینی، استفاده می‌شود. روش SVM از جمله روش‌های طبقه‌بندی مبتنی بر آمار کلاسیک است که قادر است در فضاهای با ابعاد بزرگ و بر روی داده‌های پراکنده به خوبی عمل کند. روش SVM مبتنی بر نظریه یادگیری آماری است که از اصل کمینه کردن ریسک ساختاری (SRM) (Structural Risk Minimization) و نظریه کران (VC) (Vapnik-Chervonenkis) استفاده می‌کند. یکی از اهداف مهم هر روش مبتنی بر یادگیری آماری،

## طبقه‌بندی با روش SVM

### مبانی نظری روش SVM

روش SVM از جمله روش‌های هوشمند شناخت الگوست که برای حل مسائلی که از نظر محاسباتی، حل آن‌ها دشوار بوده و یا الگوریتم شناخته شده‌ای برای حل دقیق آن‌ها وجود ندارد، مورد استفاده قرار می‌گیرد. ماشین‌های بردار پشتیبان جزء روش‌های آموزش نظارت‌شده هستند که برای حل مسائل طبقه‌بندی، رگرسیون و رتبه‌بندی مورد استفاده قرار می‌گیرند (Cortes and Vapnik, 1995; Ivanciuc, 2007).

سنگ و عیار مجموع سرب و روی مشخص نیست. برای تعداد ۲۱۱ نقطه دیگر مقادیر عیار و نوع سنگ مشخص بوده ولی مقادیر  $I_p$  و  $R_s$  در دسترس نیست. از آنجایی که موقعیت نقاط برداشت ژئوفیزیکی و نمونه های سطحی ترانشه ها (دارای عیارسنجی)، دقیقاً بر یکدیگر منطبق نیستند، بنابراین ابتدا از طریق شبکه بندی و درون یابی، مقادیر  $I_p$  و  $R_s$  در موقعیت برداشت نمونه های سطحی ترانشه ها تعیین شد.

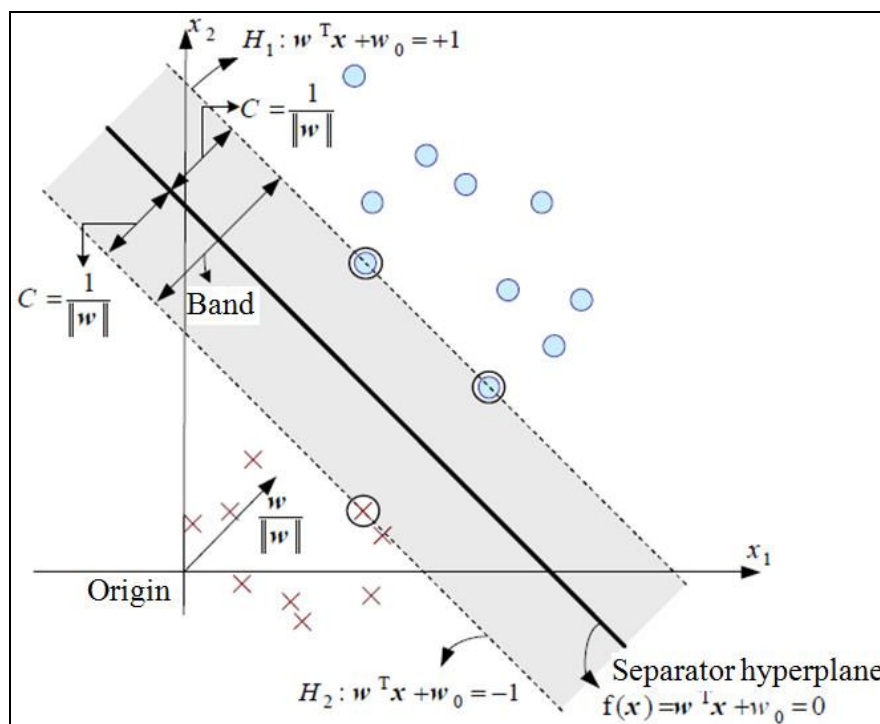
در شکل ۴ موقعیت نقاط اکتشافی سطحی شامل تعداد ۵۴۸ نمونه سطحی ترانشه ها و نقاط ژئوفیزیکی  $I_p$  و  $R_s$  در سطح منطقه اره گیجه بر روی نقشه توپوگرافی - زمین شناسی با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ منطقه رباط نشان داده شده است. از آنجایی که داده های نوع سنگ، کیفی هستند، به منظور بیان کمی آنها، ضریب همبستگی point-biserial هر نوع سنگ با عیار مجموع سرب و روی، محاسبه شد و حاصل آن برای نوع سنگ به عنوان یک متغیر کمی وارد شد. برای محاسبه این ضریب همبستگی باید برای هر ۵۴۸ داده، کد سنگ تعریف شود. بنابراین به ۲۱۱ داده اکتشافی سطحی رخنمون ها، ترانشه ها و چاهک ها با توجه به نوع سنگ آن ها کدهایی اختصاص یافت که این کدها مطابق جدول ۱ تعریف شدند. برای مشخص کردن نوع سنگ در ۳۳۷ نقطه داده برداشت ژئوفیزیکی، از نقشه زمین شناسی ۱:۲۵۰۰۰ منطقه رباط استفاده شد. برای این منظور ابتدا مطابق شکل ۴ با استفاده از راهنمای نقشه زمین شناسی منطقه رباط و داده های جدول ۱، به تمام ۳۳۷ موقعیت، کدهای نوع سنگ صورت گرفت. سپس ضریب همبستگی point-biserial هر نوع سنگ (هر کد) با عیار مجموع سرب و روی برای سه عیار حد ۱/۵، ۲ و ۳ درصد (با در نظر گرفتن شرایط مختلف اقتصادی روز و آینده) به طور جداگانه محاسبه شد که نتایج آن در جدول ۲ خلاصه شده است.

توان تعمیم پذیری آن است که SVMها از توانایی تعمیم بالایی برخوردارند (Li et al., 2009).

نحوه عملکرد SVMها بدین صورت است که طبقه بندی کننده ای می سازند که بیشترین حاشیه را بین دو مجموعه داده ایجاد کند. برای تحقق این هدف، مسئله یادگیری به یک مسئله بهینه سازی غیرخطی مقید تبدیل می شود. در روش SVM بردارهای ورودی به یک فضای چندبعدی نگاشت می شوند. پس از آن ابرصفحه ای ساخته می شود که مطابق شکل ۳ با بیشترین فاصله ممکن، بردارهای ورودی را از هم جدا می کند و آن را ابرصفحه با بیشینه مرز جداکننده می نامند (Yu and Kim, 2012).

### آماده سازی و پردازش داده ها

برای انجام یک طبقه بندی نظارت شده، دو دسته متغیر مورد نیاز است که در آنالیز وارد می شوند؛ یک دسته متغیر هدف هستند که به کمک آنها طبقه های مورد نظر تعریف می شوند و دسته دیگر متغیرهای پیش بین هستند که به کمک آن ها مدل به دست آمده از آنالیزهای چندمتغیره، به پیش بینی عضویت این داده ها در یکی از طبقه های تعریف شده توسط متغیر هدف می پردازد. در این راستا ۵۴۸ داده اطلاعاتی سطحی موجود در منطقه اره گیجه شامل چهار متغیر داده های ژئوفیزیکی  $I_p$  و  $R_s$ ، نوع سنگ و عیارسنجی مجموع سرب و روی حاصل از برداشت نمونه های سطحی ترانشه ها، برای انجام آنالیز و طبقه بندی نظارت شده به کار گرفته شد. سه متغیر  $I_p$ ،  $R_s$  و نوع سنگ به عنوان متغیرهای پیش بین و متغیر عیار مجموع سرب و روی، به عنوان متغیر هدف می باشد. از کل مجموعه داده ها تعداد ۳۳۷ داده مربوط به داده های ژئوفیزیکی  $I_p$  و  $R_s$  است که با آرایه مستطیلی برداشت شده اند. گفتنی است که برای این ۳۳۷ داده، مختصات جغرافیایی موقعیت نقاط برداشت و مقادیر  $I_p$  و  $R_s$  معلوم بوده ولی نوع



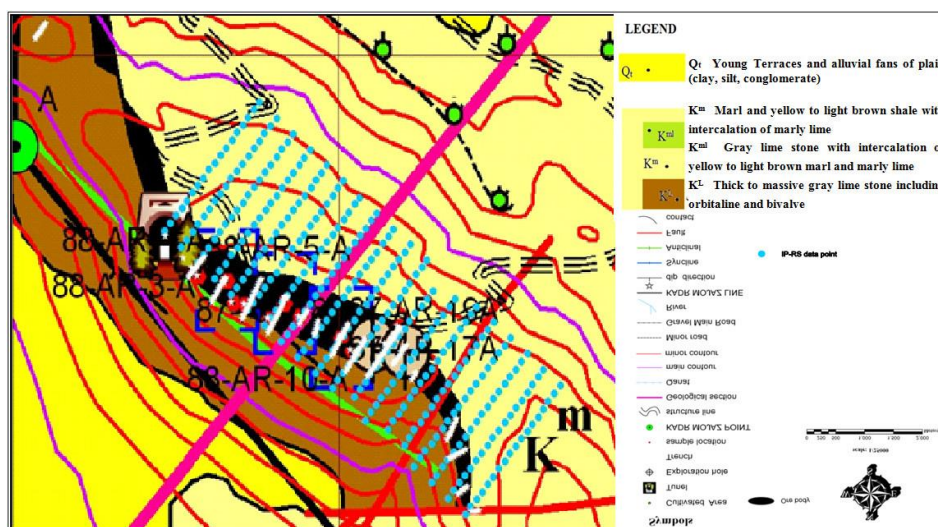
شکل ۳- طبقه بندی دو سری داده توسط ماشین بردار پشتیبان (Johnson and Wichern, 2002).

Fig. 3. Classification of two series of data by means of Support Vector Machine (Johnson and Wichern, 2002).

جدول ۱- کد اختصاص یافته به نوع سنگ برای محاسبه ضریب همبستگی point-biserial با داده‌های عیار مجموع سرب و روی، برای ۲۱۱ داده اکتشافی سطحی.

Table 1. Assigned code to the rock type to calculate point-biserial correlation coefficient with Pb-Zn assay data for 211 surface exploration data.

Code	Lithology	Abbreviation
1	Silicified limestone	SLC-LST
2	Limestone	LST
3	Altered Zone	Alter-Zone
4	Marl	MRL



شکل ۴- موقعیت ۵۴۸ داده اکتشافی سطحی (نمونه‌های ترانشه‌ها و چاهک‌ها، نقاط IP و Rs) منطقه آره‌گیجه بر روی بخشی از نقشه توپوگرافی- زمین‌شناسی ۱:۲۵۰۰۰ رباط. Fig. 4. Location of 548 surface exploration data (samples of trenches and test pits, IP and Rs data points) in the Arregijeh area on the part of Robot 1:25000 topography-geology map.

جدول ۲- ضریب همبستگی point-biserial محاسبه شده برای عیاردهای مختلف.

Table 2. Point-biserial correlation coefficient calculated for the various cut-off grades.

Code	Lithology	Abbreviation	Correlation value		
			Cut-off grade 1.5%	Cut-off grade 2%	Cut-off grade 3%
1	Silicified limestone	SLC-LST	0.72	0.78	0.84
2	Limestone	LST	0.47	0.62	0.62
3	Altered Zone	Alter-Zone	1	1	1
4	Marl	MRL	0.36	0.36	0

استحصال، قیمت روز فلز، زمان و غیره متفاوت است. به هر جهت از آنجایی که در شرایط فعلی، عیار حد اقتصادی مجموع سرب و روی کنسار حدود ۳ درصد است، بنابراین برای تصمیم‌گیری در مراحل بعدی عملیات، نتایج محاسبات به ازای این مقدار عیار حد، ملاک عمل قرار می‌گیرد. بدیهی است نتایج محاسبات به ازای دیگر مقادیر عیار حد در آینده، قابل کاربرد خواهد بود.

مدل‌سازی ابتدا برای تعداد ۲۱۱ نقطه داده که سه متغیر پیش‌بین IP، Rs و نوع سنگ و متغیر هدف عیار مجموع سرب و روی آنها معلوم می‌باشد، صورت گرفت. طبقه‌بندی براساس متغیر هدف با دو طبقه بی-

### طبقه‌بندی توده کنسار آره‌گیجه با روش SVM

برای منطقه مورد مطالعه با استفاده از متغیر عیار مجموع سرب و روی براساس سه عیار حد ۱/۵، ۲ و ۳ درصد، دو طبقه زون پرعیار (بی هنجاری) و کم‌عیار (زمینه) تعریف شد. بنابراین داده‌هایی که عیار مجموع سرب و روی بالای عیار حد دارند، به طبقه بی‌هنجاری و داده‌های با عیار مجموع سرب و روی کمتر از عیار حد، به گروه زمینه تعلق خواهند داشت. علت تعیین سه مقدار برای عیار حد جهت انجام محاسبات، آن است که ارزش اقتصادی کنسار متناسب با شرایط مختلف همانند تکنولوژی

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - y'_i)^2 \quad (\text{معادله ۲})$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - y'_i)^2} \quad (\text{معادله ۳})$$

که در این روابط  $y_i$  مقادیر اندازه گیری شده،  $y'_i$  مقادیر پیش بینی شده،  $\bar{y}$  مقدار میانگین متغیر  $y$  و  $n$  نیز تعداد داده‌ها می‌باشد.

معیار ضریب تعیین نشان دهنده میزان انطباق مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده است که بهترین حالت آن به ازای مقدار برابر با یک است و اگر صفر باشد یعنی عملکرد مدل برای پیش‌بینی، خیلی ضعیف است. معیارهای میانگین مربعات خطا و جذر میانگین مربعات خطا نیز بیانگر خطای بین مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده هستند و هرچه مقدار آنها کم‌تر باشد، عملکرد مدل از درجه اطمینان بیش‌تری برخوردار است. مقادیر شاخص‌های  $R^2$ ،  $MSE$  و  $RMSE$  برای مراحل آموزش و آزمون داده‌ها برای سه عیار حد ۱/۵، ۲ و ۳ درصد، در جدول ۳ آورده شده است. اگرچه مقادیر شاخص‌های ارزیابی در حد متوسط می‌باشند، مثلاً مقادیر  $R^2$  بین ۰/۵ و ۰/۸ است، ولی پاسخ‌ها با توجه به ماهیت و نوع داده‌های مورد استفاده، قابل قبول هستند. علت این امر آن است که اولاً داده‌های عیارسنجی، مربوط به نمونه‌های سطحی (ترانشه‌ها) بوده؛ به عبارت دیگر داده‌ها سطحی هستند. ثانیاً از ابتدا میزان همبستگی خطی بین داده‌های مورد استفاده، در حد متوسط می‌باشد. ثالثاً به دلیل فقدان تمام اطلاعات مطلوب (سه متغیر پیش‌بین و متغیر هدف) در تمام نقاط اطلاعاتی سطح منطقه، به منظور کامل کردن داده‌ها، داده‌ها در چندین مرحله، تقریب زده شده‌اند. با این نگرش و قابل قبول بودن مقادیر خطاها، در مرحله بعد از این الگوریتم برای پیش‌بینی عیار مجموع سرب و روی در ۳۳۷ نقطه فاقد عیار در سطح محدوده، استفاده شد.

هنجاری و زمینه به کمک مدل SVM در محیط نرم‌افزار MATLAB انجام شد. برای این منظور ابتدا به‌طور تصادفی ۸۰ درصد از داده‌ها (تعداد ۱۶۹ نقطه داده) برای مرحله آموزش و ۲۰ درصد دیگر (تعداد ۴۲ نقطه داده) برای مرحله آزمون انتخاب شدند. برای تولید مدل SVM از تابع کرنل پایه‌شعاعی استفاده شد زیرا این نوع تابع کرنل براساس نتایج پژوهش‌های زیادی که در آن‌ها به‌کار گرفته شده، توانایی بسیار خوبی در طبقه‌بندی غیرخطی نشان داده و نتایج مطلوبی حاصل کرده است. مقادیر پارامترهای تابع کرنل برابر با  $\sigma = 0.4$  (عرض یا پهنای کرنل گوسی) و  $C=10$  (پارامتر تنظیم برازش) به دست آمدند. مقادیر بهینه پارامترهای تابع کرنل با استفاده از روش جستجو در یک فضای شبکه‌بندی شده (Grid Search) به دست آمدند. در این روش از طریق تعریف حدود مقادیر بالا و پایین برای این پارامترها در سه راستای عمود برهم مشابه سه ضلع، یک مکعب سه‌بعدی ایجاد کرده و این مکعب، شبکه‌بندی می‌شود. سپس با استفاده از سه حلقه For در محیط نرم‌افزار MATLAB مقدار تابع هدف (خطا) کمینه می‌شود. تابع هدف نیز میانگین قدر مطلق اختلاف مقادیر واقعی پارامتر اندازه‌گیری (عیار مجموع سرب و روی) با مقادیر تخمینی مدل SVR براساس مقادیر پارامترهای تابع کرنل در هر گره از این شبکه، تعریف شد.

برای ارزیابی عملکرد مدل‌ها نیز از شاخص‌های ضریب تعیین (Determination coefficient) ( $R^2$ )، میانگین مربعات خطا (Mean Square Error) (MSE) و جذر میانگین مربعات خطا (Root Mean Squared Error) (RMSE) مطابق روابط (۱) تا (۳) استفاده شد.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - y'_i)^2}{\sum_{i=1}^n (\bar{y} - y'_i)^2} \quad (\text{معادله ۱})$$

جدول ۳- نتایج عملکرد مدل‌سازی در مراحل آموزش و آزمون برای عیارحدهای مختلف.

Table 3. The results of modeling performance in training and test stages for various cut-off grades.

Modeling performance index	Cut-off grade (%)	Training data	Test data
$R^2$	1.5	0.72	0.69
	2	0.68	0.61
	3	0.62	0.58
MSE	1.5	0.39	0.41
	2	0.42	0.43
	3	0.46	0.49
RMSE	1.5	0.62	0.64
	2	0.66	0.65
	3	0.68	0.7

طبقه زون پرعیار و زون کم‌عیار براساس عیار حدهای مختلف و نمایش موقعیت واقعی نقاط داده، در شکل ۶ نشان داده شده است. در این شکل موقعیت نمونه‌های برداشت شده از ترانشه‌ها (که داده‌های عیارسنجی در این نقاط، سازنده مدل SVM است) با علامت  $\times$  و موقعیت نقاط برداشت ژئوفیزیکی (که عیار در این نقاط توسط مدل SVM پیش‌بینی شده است) با علامت O مشخص شده‌اند. همچنین نقاط با عیار بیشتر از عیار حد مورد

درنهایت برای این ۳۳۷ نقطه نیز براساس سه عیار حد ۱/۵، ۲ و ۳ درصد، سطح منطقه مورد مطالعه به دو طبقه آنومالی (پرعیار) و زمینه (کم‌عیار) طبقه‌بندی شد. به عنوان نمونه در شکل ۵ نقشه دوبعدی طبقه‌بندی توده کانسار به دو طبقه، با ۲۱۱ داده اکتشافی و ۳۳۷ داده ژئوفیزیکی توسط روش SVM، برای سه عیار حد ۱/۵، ۲ و ۳ درصد نشان داده شده است. در نهایت نقشه طبقه‌بندی توده کانسار اهره‌گیجه به دو

گمانه اکتشافی، به عنوان کارهای اکتشافی نیمه عمیق و عمیق استفاده شد. از آنجایی که بخشی از داده‌های اکتشافی به صورت سطحی (شامل ترانشه‌ها، چاهک‌ها و نمونه‌های سطحی) و بخشی به صورت عمیق (گمانه‌های اکتشافی) می‌باشند، ابتدا تمام داده‌ها به صورت نقاط سطحی به سطح زمین تصویر شدند تا کلیه اطلاعات، به صورت یک پارچه درآیند. برای این منظور نخست میانگین وزن دار عیار هر گمانه اعم از قائم یا شیب دار آزیموتی، محاسبه شد. سپس مقدار میانگین عیار گمانه‌های قائم، به موقعیت دهانه آنها در سطح زمین و برای گمانه‌های شیب دار آزیموتی، به تصویر نقطه وسط گمانه در سطح زمین نسبت داده شد. پراکندگی کارهای اکتشافی نامبرده در شکل ۷ نشان داده شده است. براساس مطالعات مرحله شناسایی و پی جویی اولیه و مطابق شکل ۷ امتداد تقریبی ماده معدنی، شمال باختری- جنوب خاوری تشخیص داده شد.

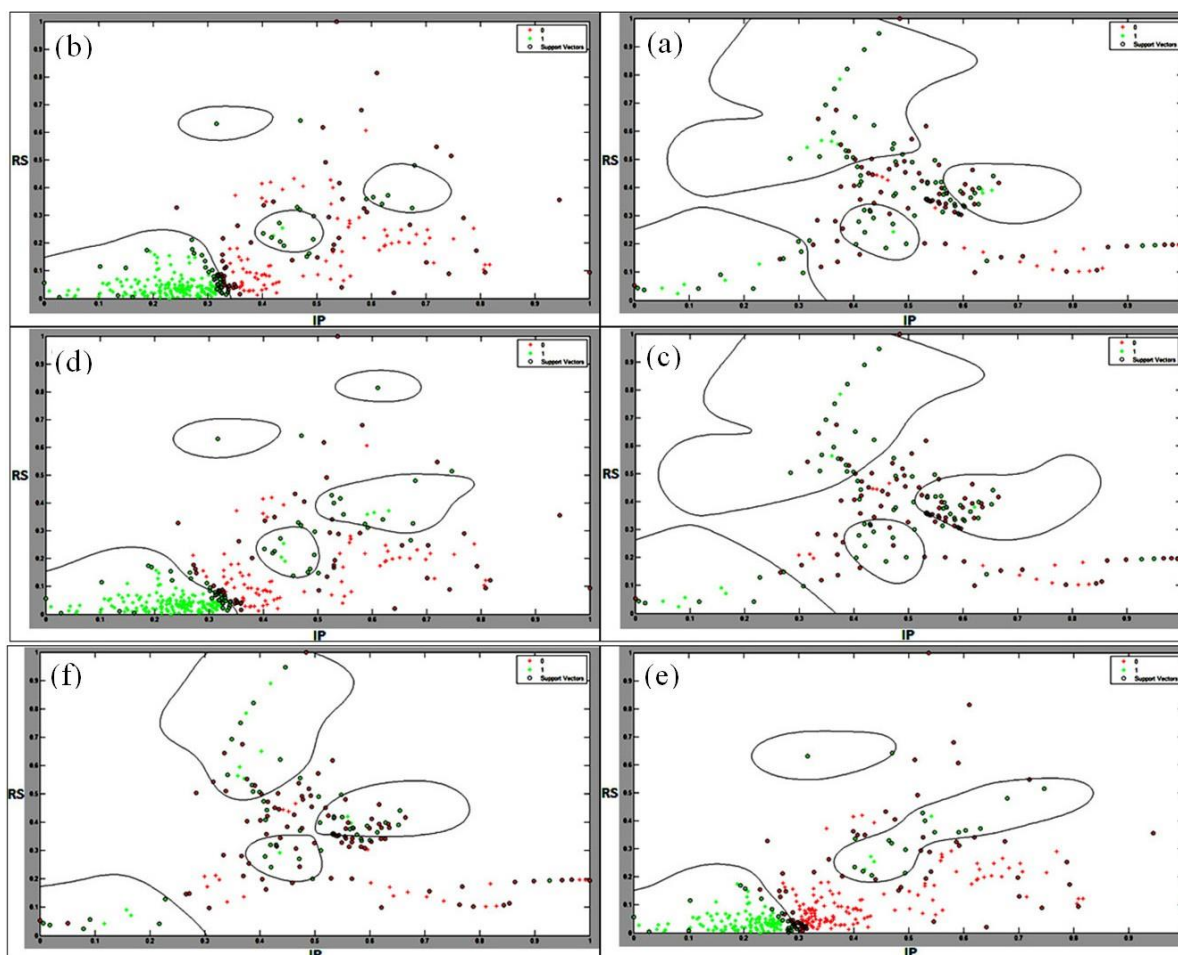
نظر، با رنگ قرمز و نقاط با عیار کمتر از عیار حد مورد نظر، با رنگ آبی نشان داده شده‌اند.

### طراحی شبکه اکتشاف کانسار

در این پژوهش طراحی نوع هندسی و ابعاد شبکه اکتشاف در مرحله اکتشافات تفصیلی، برای کانسار سرب و روی اره گیجه رباط خمین با دو روش کلاسیک و زمین آماری انجام شده است.

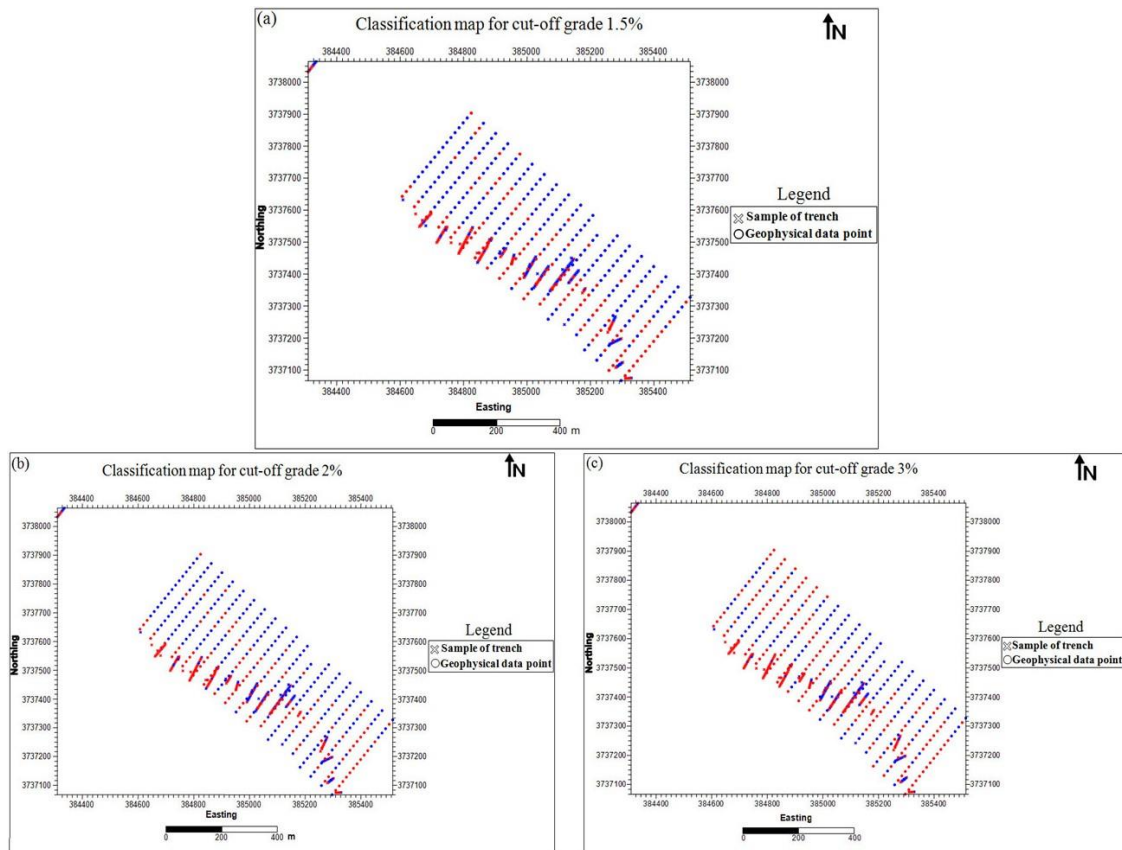
### روش کلاسیک

برای به دست آوردن یک ایده کلی و طراحی شبکه برداشت اولیه، از روش مبتنی بر آمار کلاسیک استفاده می‌شود. برای این منظور از داده‌ها و نتایج اکتشافات مراحل قبل یعنی تعداد ۲۸۲ نمونه حاصل از حفر ۳۷ عدد ترانشه، ۵۸ نمونه دستی سطحی برداشت شده از رخنمون‌های کانی‌سازی و ۲ نمونه حاصل از حفر دو فقره چاهک، به عنوان داده‌های اکتشافات سطحی و داده‌های عیارسنجی تعداد ۱۴۴ مغزه حاصل از حفر ۴۳ حلقه



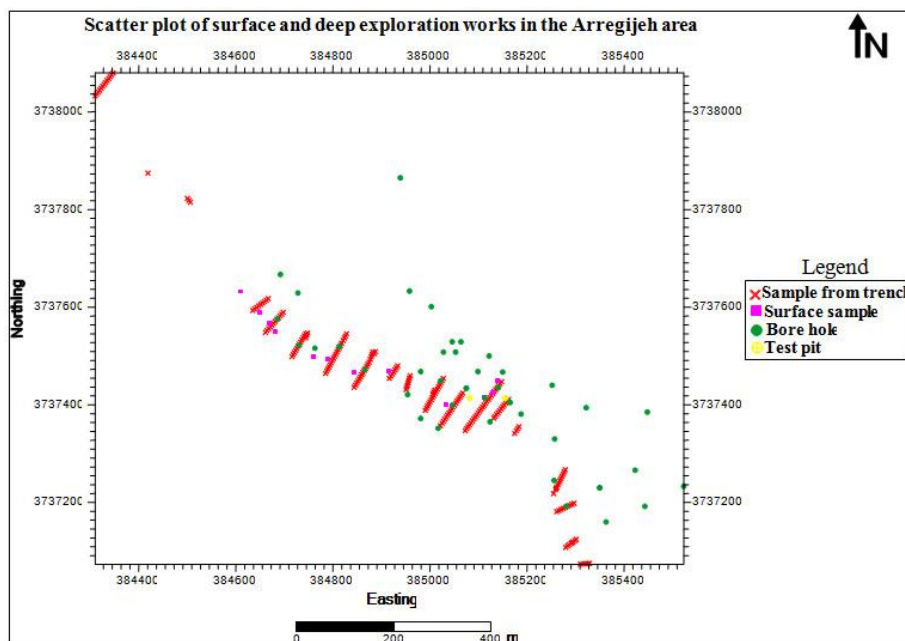
شکل ۵- مقطع دوبعدی طبقه‌بندی SVM به ترتیب برای ۲۱۱ و ۳۳۷ داده برای عیار حد ۱/۵ درصد (b-a)، عیار حد ۲ درصد (d-c) و عیار حد ۳ درصد (f-e). نقاط با رنگ قرمز مبین ۰، رنگ سبز مبین ۱ و با علامت O نشانه بردار پشتیبان هستند.

Fig. 5. Two dimensional section of SVM classifier for 211 and 337 data, respectively for cut-off grade of 1.5% (a-b), cut-off grade of 2% (c-d) and cut-off grade of 3% (e-f). Red and green points stand for 0 and 1, respectively and points with symbol o denote machine vector.



شکل ۶- نقشه طبقه‌بندی توده کنسار آره‌گیجه به ازای عیارحد (a) ۱/۵ درصد، (b) ۲ درصد و (c) ۳ درصد. رنگ قرمز مربوط به زون پرعیار و رنگ آبی مربوط به زون کم‌عیار می‌باشد.

Fig. 6. Classification map of the Arregijeh deposit for cut-off grades of 1.5% (a), 2% (b) and 3% (c). Red and blue points stand for high-grade and low-grade zones, respectively.



شکل ۷- نقشه موقعیت پراکندگی کارهای اکتشافی (نمونه‌های رخنمون‌ها، ترانشه‌ها، چاهک‌ها و گمانه‌ها) در سطح منطقه آره‌گیجه.

Fig. 7. Location map of exploration works (sampling locality of outcrops, trenches, test pits and boreholes) in the Arregijeh area.



## پردازش آماری داده‌ها

از آنجایی که طراحی شبکه به روش کلاسیک، بر پایه آمار کلاسیک استوار است، بنابراین گام نخست برای استفاده از این روش، پردازش اولیه

آماري داده هاست. آماره‌های توصیفی مختصر داده‌های عیارسنجی مجموع سرب و روی در منطقه اره‌گیجه در جدول ۴ خلاصه شده است.

جدول ۴- آماره‌های توصیفی مختصر داده‌های عیارسنجی مجموع سرب و روی منطقه مورد مطالعه.  
Table 4. Descriptive statistics of Pb-Zn assay data in the study area.

Descriptive statistics	Number of samples	Minimum (%)	Maximum (%)	Mean (%)	Standard deviation (%)	Variance (% <sup>2</sup> )	Coefficient of variation (%)	Skewness	Kurtosis
Value	374	0.03	12.22	2.28	2.73	7.46	1.19	1.47	1.23

## طراحی شبکه با روش کلاسیک

براساس شرایط کانسار مورد مطالعه، از میان روش‌های کلاسیک تعیین چگالی، روش تحلیلی به عنوان مناسب‌ترین روش طراحی شبکه بوده و بنابراین در پژوهش حاضر نیز از این روش برای تعیین چگالی شبکه اکتشاف استفاده شده است. مطابق تعریف، مساحت کانسار به ازای واحد

کار اکتشافی که کانه را قطع کرده باشد، به نام چگالی شبکه اکتشاف خوانده می‌شود (Madani, 1997). بنابراین ابتدا باید مساحت سطح کانسار را تعیین نموده و با شمارش تعداد کار اکتشافی متقاطع با کانسار، چگالی شبکه اکتشاف را به دست آورد. نتایج محاسبات تعیین چگالی شبکه اکتشاف برای منطقه در جدول ۵ خلاصه شده است.

جدول ۵- نتایج محاسبات چگالی شبکه اکتشاف به روش تحلیلی در منطقه اره‌گیجه.  
Table 5. The results of exploration grid density calculated by analytical method in the Arregijeh area.

Parameter	Value
Deposit area (square meter)	335345.69
Number of exploration work (unit)	270
Density (square meter per unit)	1242.02

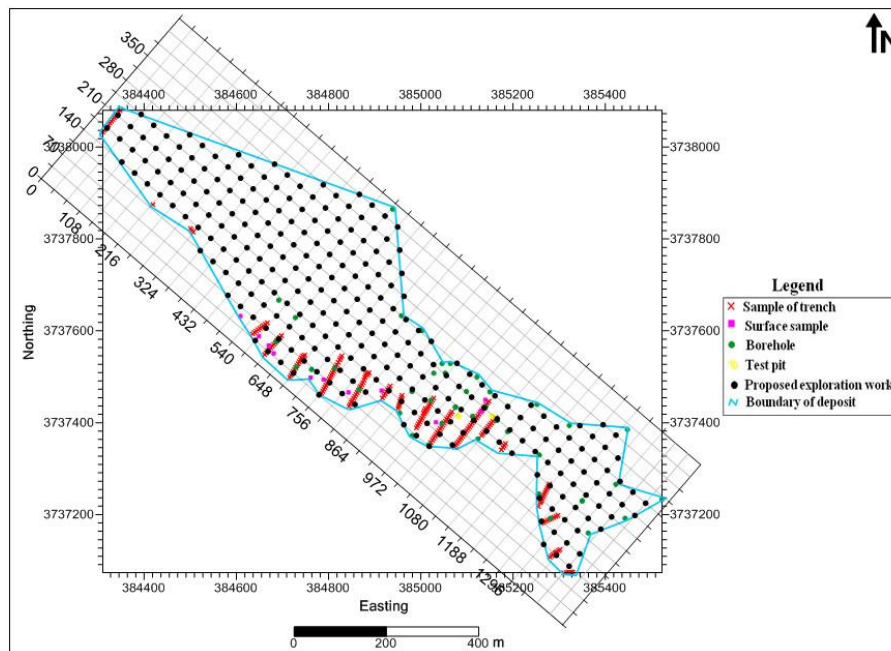
به منظور تعیین ابعاد شبکه اکتشافی در منطقه، دو سری پروفیل اکتشافی عمود برهم در نظر گرفته شد که با توجه به جهت یافتگی تقریبی کانسار در منطقه، راستای پروفیل‌ها، شمال‌باختری- جنوب‌خاوری و شمال‌خاوری- جنوب‌باختری است. گفتنی است که در ترسیم پروفیل‌های اکتشافی به منظور رعایت هم‌راستایی پروفیل‌ها، کارهای اکتشافی نزدیک به هر پروفیل، بر روی آن پروفیل تصویر شده است. برای تعیین ابعاد شبکه اکتشاف ابتدا ضریب تغییرات داده‌های هر پروفیل اکتشافی به طور جداگانه و سپس میانگین ریاضی ضریب تغییرات تمام پروفیل‌های هم‌راستا، محاسبه می‌شود تا ضریب تغییرات کل کانسار در آن راستا به دست آید (Ahmadi, 2005). این کار برای داده‌های ۲۴ پروفیل در راستای شمال‌باختری- جنوب‌خاوری و ۱۹ پروفیل در راستای

شمال‌خاوری- جنوب‌باختری (عمود بر پروفیل‌های اولیه) انجام شد. نتایج محاسبات ابعاد شبکه اکتشافی با این روش، در جدول ۶ خلاصه شده است. داده‌های این جدول نشان می‌دهند که شبکه اکتشاف طراحی شده برای منطقه از نوع مستطیلی به ابعاد ۳۶×۳۵ متر است. شبکه نهایی طراحی شده برای منطقه بطور طرح وار در شکل ۸ نشان داده شده است که در این شکل دواير توپر سیاه رنگ موقعیت کارهای اکتشافی نیمه عمیق (چال‌های دریل واگن) پیشنهادی جدید هستند. از آنجایی که براساس شواهد و داده‌های گمانه‌های عمیق پراکنده، عمق دفن ماده معدنی چندان زیاد نیست، بنابراین برای اکتشاف مرحله تفصیلی، کارهای اکتشافی نیمه عمیق همانند چال‌های دریل واگن با شبکه‌بندی منظم پیشنهاد می‌شود.

جدول ۶- نتایج محاسبات ابعاد شبکه به روش تحلیلی در منطقه اره گیجه.

Table 6. The results of exploration grid size calculated by analytical method in the Arregijeh area.

Value/Direction	Parameter		
0.94	Coefficient of variation percentage in eastern north-western (CV <sub>1</sub> ) south direction		
0.92	Coefficient of variation percentage in western north-eastern (CV <sub>2</sub> ) south direction		
0.978	(CV <sub>2</sub> )/(CV <sub>1</sub> ) Ratio		
1242.02	Grid density		
35.63	Size (meter)	Length	Grid size
Western north-eastern south	Direction		
34.85	Size (meter)	Width	
Eastern north- western south	Direction		



شکل ۸- شبکه اکتشاف نهایی طراحی شده به روش کلاسیک برای منطقه اره گیجه.

Fig. 8. Final exploration grid designed by statistical method for the Arregijeh area.

### واریوگرافی و تجزیه و تحلیل ساختار فضایی

واریوگرام ابزار ترسیمی بسیار سودمندی برای تجزیه و تحلیل ساختار فضایی منطقه و تشخیص ناهمسانگردی کانسار است. یکی از کاربردهای اساسی واریوگرام، طراحی شبکه اکتشاف می باشد که از طریق تعیین شعاع تاثیر واریوگرام‌های سقفدار در جهات مختلف، صورت می‌گیرد. زیرا طبق تعریف ویژگی شعاع تاثیر واریوگرام به معنی فاصله‌ای است که تا آن فاصله، نمونه‌ها به یکدیگر وابسته بوده و بر هم تاثیر گذارند و در فواصل بیش از آن عملاً از یکدیگر مستقل هستند. برای دستیابی به نحوه توزیع ساختار فضایی منطقه، آگاهی از میزان تداوم کانی‌سازی و همسان‌گردی (Isotropic) یا ناهمسانگردی (Anisotropic) منطقه، ترسیم واریوگرام-های جهتی در امتدادهای مختلف، ضروری است (Ahmadi, 2009). به

### روش زمین‌آماری

در آمار کلاسیک این واقعیت که احتمال تشابه مقدار یک کمیت در دو نمونه نزدیک به هم بیشتر است، تا دو نمونه دور از هم، در نظر گرفته نمی‌شود. به عبارت دیگر توزیع فضایی داده‌ها مد نظر قرار نمی‌گیرد و تحلیل‌ها مستقل از مکان و توزیع فضایی نمونه‌ها صورت می‌پذیرد (Hassani-Pak, 1998). زمین‌آمار به بررسی آن دسته از متغیرها می‌پردازد که ساختار فضایی از خود بروز می‌دهند. یعنی ابتدا وجود یا عدم وجود ساختار فضایی بین داده‌ها مورد بررسی قرار گرفته و در صورت وجود ساختار فضایی (همبستگی فاصله‌ای و جهتی) تحلیل داده‌ها انجام می‌شود. گام نخست در تحلیل‌های زمین‌آماری، انجام عملیات واریوگرافی درست و تجزیه و تحلیل ساختار فضایی کانسار براساس آن است.

توزیع داده‌ها (نرمال بودن یا نبودن تابع توزیع) است زیرا اگر تابع توزیع داده‌ها نرمال نباشد (مثلاً لاگ نرمال باشد) و پردازش بر روی داده‌های طبیعی صورت گیرد، در این صورت اثر تناسب واریانس با میانگین پیش می‌آید و فرضیات پایایی در زمین‌آمار برقرار نخواهند بود (Hassani-Pak, 1998). نتیجه این رخداد آن است که امکان دارد ناهمسانگردی دروغین در واریوگرام‌های امتدادی ظاهر شود و در نتیجه طراحی شبکه دقیقی صورت نگیرد (Ahmadi, 2005). همچنین خطای نظام دار در فرآیند تخمین افزایش می‌یابد و تخمین‌ها نیز از اعتبار لازم برخوردار نخواهند بود. آماره‌های توصیفی مختصر برای داده‌های عیارسنجی مجموع سرب و روی گمانه‌های منطقه اره گیجه در جدول ۷ خلاصه شده است.

منظور مطالعات واریوگرافی محدوده مورد نظر و در نتیجه طراحی شبکه اکتشاف بهینه با این روش، از نرم‌افزار زمین‌آماری SGeMS (Bohling, 2007) استفاده شد. SGeMS نرم افزار زمین آماری قدرتمندی است که قابلیت مدلسازی و شبیه‌سازی دوبعدی و سه بعدی داده‌ها را داراست. حال آنکه اغلب نرم افزارهای زمین آماری تنها می‌توانند داده های دوبعدی را مدل سازی کنند. به همین دلیل در پژوهش حاضر نرم افزار SGeMS مورد استفاده قرار گرفته است. از آنجایی که کارهای اکتشافی سطحی و عمیق، دارای ارتباط معنی داری نیستند، بنابراین واریوگرافی سه بعدی فقط برای داده‌های گمانه‌های عمیق انجام شد.

### پردازش آماری داده‌ها

قبل از انجام عملیات مدلسازی زمین‌آماری لازم است که بر روی داده‌ها، مطالعات آماری صورت گیرد. گام نخست برای این منظور تعیین نحوه

جدول ۷- آماره‌های توصیفی مختصر داده‌های عیارسنجی مجموع سرب و روی گمانه های منطقه مورد مطالعه.  
Table 7. Descriptive statistics of Pb-Zn assay data for the boreholes of the study area.

Statistical parameter	Value
Number of samples	268
Minimum (%)	0.06
Maximum (%)	12.22
Mean (%)	2.51
Median (%)	1.25
Standard deviation (%)	2.74
Variance (% <sup>2</sup> )	7.52
Coefficient of variation (%)	1.09
Skewness	1.39
Kurtosis	1.14

واریوگرام‌های امتدادی و داده‌های جدول ۸ نشان می‌دهند که بیشترین تغییرپذیری در راستای با آزیموت ۵۵ درجه، یعنی جهت شیب تقریبی ماده معدنی (راستای شمال خاوری- جنوب باختری) و کمترین تغییرپذیری، در راستای با آزیموت ۱۴۵ درجه، یعنی منطبق بر امتداد تقریبی ماده معدنی (راستای شمال باختری- جنوب خاوری) است. با توجه به داده های جدول ۸ مشاهده می‌شود که در بیشتر موارد مدل ثنوری از نوع نمایی بر واریوگرام‌های تجربی داده‌ها انطباق بهتری نشان داده است.

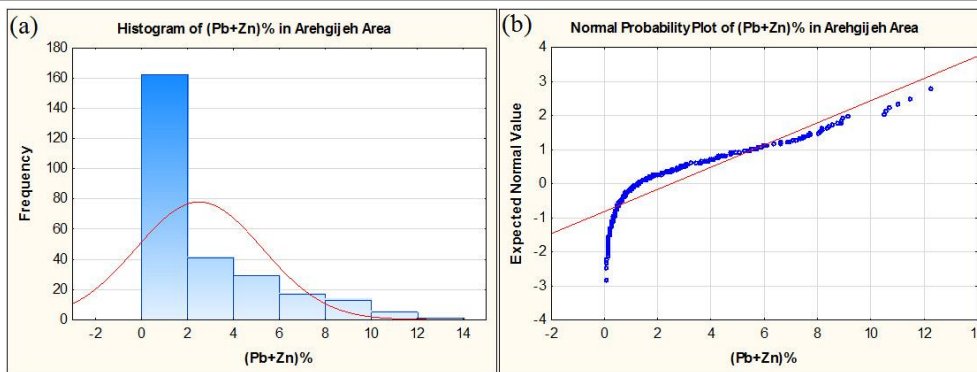
### طراحی شبکه با روش زمین‌آماری

به منظور اکتشاف تفصیلی منطقه اره گیجه، براساس مشخصات واریوگرام‌های امتدادی ترسیم شده در جهات مختلف به ویژه شعاع تأثیر واریوگرام‌ها برای داده‌های عیارسنجی مجموع سرب و روی، شبکه اکتشاف مربعی به ابعاد ۵۵×۵۵ متر پیشنهاد می‌شود. در شکل ۱۲ شبکه اکتشاف بهینه نهایی طراحی شده با روش زمین‌آماری برای منطقه اره گیجه نشان داده شده که در این شکل دوایر توپر سیاه رنگ موقعیت کارهای اکتشافی نیمه عمیق (چال‌های دریل واگن) پیشنهادی جدید هستند.

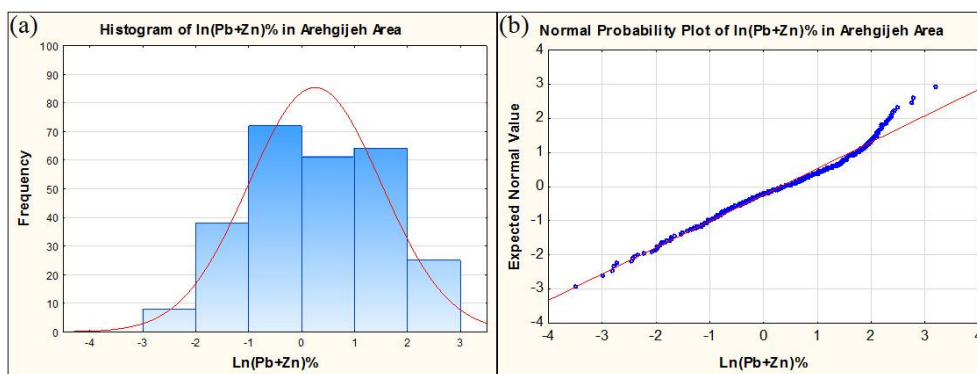
در شکل ۹ نیز هیستوگرام و نمودار توزیع احتمال تجمعی داده‌های عیار مجموع سرب و روی منطقه اره گیجه، نشان داده شده است. با توجه به داده‌های جدول ۷ و شکل ۹ مشاهده می‌شود که توزیع داده‌های عیار مجموع سرب و روی از نوع نرمال نیست زیرا هیستوگرام داده‌ها نامتقارن بوده، تابع توزیع به‌صورت زنگوله‌ای شکل نبوده و نمودار احتمال تجمعی آنها نیز به‌صورت خط راست نمی‌باشد. از آنجایی که این داده‌ها با یک تبدیل لگاریتمی به حالت نرمال تبدیل شدند، بنابراین توزیع آنها از نوع لاگ نرمال است. هیستوگرام و نمودار احتمال تجمعی داده‌های لگاریتم عیار مجموع سرب و روی منطقه نیز در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

### مدلسازی

برای مدلسازی واریوگرام داده‌های گمانه‌های عمیق در منطقه اره گیجه، از واریوگرافی سه بعدی استفاده شد. شکل ۱۱ دو نمونه از واریوگرام‌های امتدادی داده‌های عیار مجموع سرب و روی در منطقه اره گیجه را نشان می‌دهد. ویژگی‌های واریوگرام‌های ثنوری انطباق یافته بر داده‌ها در این منطقه نیز در جدول ۸ خلاصه شده است. بررسی شکل



شکل ۹- (a) هیستوگرام و (b) نمودار احتمال تجمعی داده های عیار مجموع سرب و روی منطقه اره گیجه.  
Fig. 9. (a) Histogram and (b) cumulative probability plot of Pb-Zn assay data in the Arregijeh area.

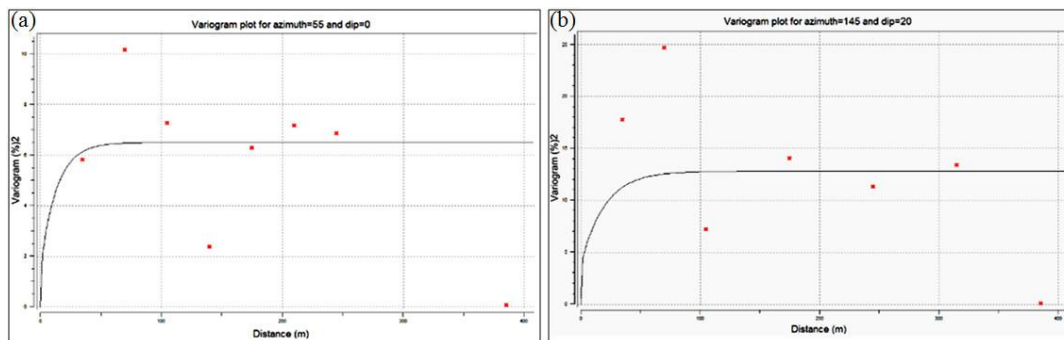


شکل ۱۰- (a) هیستوگرام و (b) نمودار احتمال تجمعی داده های لگاریتم عیار مجموع سرب و روی منطقه اره گیجه.  
Fig. 10. (a) Histogram and (b) cumulative probability plot of logarithmic Pb-Zn assay data in the Arregijeh area.

قدرمسلم دقت روش زمین آماری به خاطر در نظر گرفتن ساختار فضایی، بیشتر است. همچنین بزرگ تر بودن ابعاد شبکه طراحی شده با روش زمین آماری از نظر اقتصادی نیز نسبت به روش کلاسیک مقرون به صرفه تر است، بنابراین عقلانی است که در مرحله بعدی عملیات اکتشاف، شبکه طراحی شده با روش زمین آماری به عنوان ملاک قرار گرفته و پیاده سازی شود.

**مقایسه**

مقایسه ویژگی های شبکه های اکتشافی طراحی شده با دو روش تحلیلی آمار کلاسیک و زمین آماری نشان می دهد که به لحاظ هندسه شبکه، هر دو شبکه طراحی شده با دو روش مختلف، تقریباً مربعی شکل هستند؛ یعنی بطور کلی کانسار مورد مطالعه دارای جهت یافتگی فضایی مشخصی نیست. ولی اندازه و ابعاد شبکه طراحی شده با روش زمین آماری، بزرگ تر از شبکه به دست آمده با روش آمار کلاسیک است.



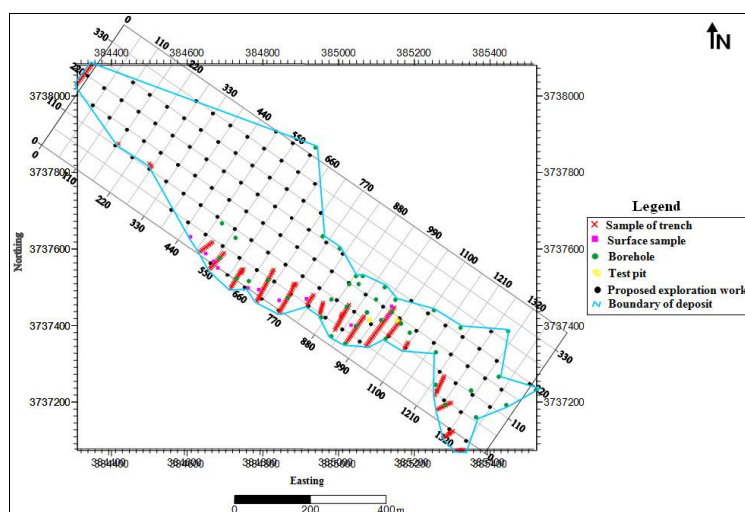
شکل ۱۱- دو نمونه از واریوگرام های امتدادی داده های عیارسنجی مجموع سرب و روی منطقه اره گیجه: (a) در راستای با آزیموت ۵۵ درجه و (b) در راستای با آزیموت ۱۴۵ درجه.

Fig. 11. Two directional variograms for Pb-Zn assay data directed at azimuth: (a) 55 degrees and (b) 145 degrees in the Arregijeh area.

جدول ۸- ویژگی‌های واریوگرام‌های امتدادی عیار مجموع سرب و روی منطقه اره گیجه.

Table 8. Characteristics of directional variograms of Pb-Zn assay data from the Arregijeh area.

Direction (degree)	Dip (degree)	Model	Nugget effect (% <sup>2</sup> )	Sill (% <sup>2</sup> )	Range (meter)
45	0	Exponential	2.1	2.8	54.5
50	20	Exponential	0.9	2.2	54.65
55	0	Exponential	1.5	5	54.7
135	20	Exponential	2	7	55.5
145	20	Exponential	3.8	9	55.7



شکل ۱۲- شبکه اکتشاف نهایی طراحی شده با روش زمین آماری برای منطقه اره گیجه.

Fig. 12. Final exploration grid designed by geostatistical method for the Arregijeh area.

### نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر برای طبقه‌بندی توده کانسار اره گیجه رباط خمین براساس اطلاعات و داده‌های اکتشافی سطحی مرحله اول عملیات اکتشاف و شناسایی مناطق با اولویت‌های اکتشافی جهت حفر گمانه‌های اکتشافی پراکنده در مرحله دوم عملیات اکتشافی، از روش شناخت الگوی هوشمند SVM استفاده شد. برای این منظور داده‌های سه متغیر  $I_p$ ,  $R_s$  و نوع-سنگ، به‌عنوان متغیرهای پیش‌بین و عیار مجموع سرب و روی به‌عنوان متغیر هدف در نظر گرفته شد. سپس طبقه‌بندی توده کانسار به دو طبقه زون پرعیار یا بی‌هنجاری (با عیار مجموع سرب و روی بالای عیار حد) و زون کم عیار یا زمینه (با عیار مجموع سرب و روی کمتر از عیار حد) برای سه عیار حد  $1/5$ ،  $2$  و  $3$  درصد صورت گرفت. ارزیابی عملکرد مدل توسط معیارهای مختلف سنجش خطا همانند  $R^2$ ،  $MSE$  و  $RMSE$  نشان داد که روش SVM در این مرحله از عملیات اکتشافی سطحی در منطقه، نتایج قابل قبولی ارائه نموده است. در مرحله بعد براساس مدل آموزش دیده با داده‌های عیارسنجی نمونه‌های سطحی ترانسه‌ها، برای تعداد  $337$  نقطه فاقد داده‌های عیارسنجی نیز پیش‌بینی مقادیر عیار، صورت گرفته و در نهایت نقشه‌های توده کانسار طبقه‌بندی شده به دو طبقه زون پرعیار و کم عیار براساس سه عیار حد  $1/5$ ،  $2$  و  $3$  درصد با نمایش موقعیت واقعی نقاط داده، ترسیم شد.

سپس با استفاده از داده‌های اکتشافی مرحله اول و براساس نتایج طبقه بندی توده کانسار، در موقعیت‌های شناخته شده به عنوان زون پرعیار و موقعیت بی‌هنجاری‌های شبه‌مقاطع ژئوفیزیکی، گمانه‌های اکتشافی بطور پراکنده در سطح محدوده، حفاری شدند و در نهایت طراحی شبکه اکتشاف تفصیلی منطقه به دو روش آمار کلاسیک با استفاده از کلیه اطلاعات اکتشاف و زمین آماری با استفاده از داده‌های عیارسنجی عمقی گمانه‌ها صورت گرفت.

روش کلاسیک طراحی شبکه برای منطقه اره گیجه یک شبکه مستطیلی نزدیک به مربع به ابعاد  $35 \times 36$  متر را نتیجه داد که طول آن در راستای شمال باختری- جنوب خاوری (امتداد عمومی کانسار) و عرض آن در راستای شمال خاوری- جنوب باختری (راستای عمود بر امتداد عمومی کانسار) است. روش زمین آماری و انجام واریوگرافی سه بعدی برای داده‌های عیارسنجی مجموع سرب و روی گمانه‌های اکتشافی منطقه، منجر به طراحی شبکه اکتشاف مربعی به ابعاد  $55 \times 55$  متر شد. براساس مطالعات قبلی و نتایج به‌دست آمده در پژوهش حاضر، جهت ادامه مطالعات پیشنهاد می‌شود که براساس شبکه اکتشاف طراحی شده با استفاده از روش زمین-آمار، اکتشافات نیمه عمیق (مانند چال‌های دریل واگن)، در نقاط گره این شبکه پیاده سازی شود و نتایج حاصل از آن، به طور جامع مورد مطالعه قرار گیرد، زیرا نتایج حاصل از اکتشافات تفصیلی، در تخمین میزان ذخیره کانسار با دقت زیاد، بسیار مفید خواهد بود.

- Abbaszadeh, M., Hezarkhani, A., Soltani, S., 2013. An SVM-based machine learning method for the separation of alteration zones in Sungun porphyry copper deposit. *Chemie der Erde* 73, 545–554.
- Abedi, M., Norouzi, G.H., Baharoudi, A., 2012. Support vector machine for multi-classification of mineral prospectivity area. *Computers & Geosciences* 46, 272–283.
- Ahmadi, R., 2005. Designing optimum exploration grid of metallic deposits with two practical case studies. Iran University of Science and Technology (Arak branch), Vice Chancellor for Research, Arak, p. 67 (In Persian).
- Ahmadi, R., 2009. Application of statistical patterns to evaluate ore reserves emphasis to Ali-abad, Yazd copper mine, Arak University of Technology, Vice Chancellor for Research, Arak, p. 102 (In Persian).
- Ahmadi, R., 2018a. Designing a preliminary exploration grid of drill holes for the promising area of gold in Delijan region. The 36<sup>th</sup> national and the 3<sup>rd</sup> international geosciences congress, 25<sup>th</sup>-27<sup>th</sup> February, Tehran, Iran.
- Ahmadi, R., 2018b. Application of geometric probability to design exploration grid of mineral deposits, case study: porphyry copper index located in the south-west of Kerman. *Journal of Analytical and Numerical Methods in Mining Engineering* 8 (15), 39-54.
- Ahmadi, R., Hossein-nejad, M.R., 2002. Geochemical investigations to supply the exploratory model and analysis of exploration grid of Arak-Emarat lead-zinc deposit. 21<sup>st</sup> conference on geosciences. Geological survey of Iran, Tehran (In Persian).
- Ahmadi, R., Kheirabadi, A., 2004. Designing optimum exploration grid of iron-manganese deposit of Arak-Shamsabad. The 1<sup>st</sup> Mining engineering conference of Iran, Tarbiat Modares University, Tehran (In Persian).
- Bohling, G., 2007. SGeMS tutorial notes.
- Cortes, C., Vapnik, V., 1995. Support vector networks. *Machine Learning* 20, 273–297.
- Hassani-Pak, A.A., 1998. Geostatistics. Tehran University Press, p. 314 (In Persian).
- Ivanciuc, O., 2007. Applications of support vector machines in chemistry. *Reviews in Computational Chemistry* 23, 291–400.
- Johnson, R.A., Wichern, D.W., 2002. Applied multivariate statistical analysis, 4th Edition. Prentice-Hall, London.
- Kalagari, A.A., 2010. Principles of geophysical explorations, Tabriz, p. 485 (In Persian).
- Li, H.D., Liang, Y., Xu, Q., 2009. Support vector machines and its applications in chemistry. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems* 95, 188–198.
- Madani, H., 1997. Principles of prospecting, exploration and evaluation of ore reserves. *Khane Farhang*, p. 816 (In Persian).
- Pichab Kansar consultant engineers Co., 2009. Geological report of Robot exploration region with supplying 1:20000 geology map, p. 427 (In Persian).
- Smirnoff, A., Boisvert, E., Paradis, S., 2008. Support vector machine for 3D modelling from sparse geological information of various origins. *Computers & Geosciences* 34, 127–143.
- Twarakavi, N., Misra, D., Bandopadhyay, S., 2006. Prediction of arsenic in bedrock derived stream sediments at a gold mine site under conditions of sparse data. *Natural Resources Research* 15(1), 15-26.
- Yu, H., Kim, S., 2012. SVM tutorial: classification, regression, and ranking, *Handbook of Natural Computing*, Springer Berlin Heidelberg, 479-506.
- Yu, L., Porwal, A., Holden, E., Dentith, M., 2012. Towards automatic lithological classification from remote sensing data using support vector machines. *Computers & Geosciences* 45, 229-239.
- Zuo, R., Carranza, E.J.M., 2011. Support vector machine: A tool for mapping mineral prospectivity. *Computers & Geosciences* 37, 1967–1975.