

به کارگیری روش منطق فازی در تلفیق داده‌های اندیس سرب و روی محدوده اکتشافی چیچکلو (خاور تکاب) به منظور تعیین نقاط پتانسیل دار در محیط GIS

محمد فرزامیان^۱، ابوالقاسم کامکار روحانی^۱، منصور ضیایی^۱، حسنعلی فرجی سبکبار^۲، کیومرث سیف پناهی^۱

^۱ دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

^۲ دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۸۸/۰۵/۲۵ تاریخ پذیرش: ۱۳۸۹/۰۲/۱۴

چکیده

کانسار سرب و روی چیچکلو یکی از مناطق پتانسیل دار است که در محدوده کمربند سرب و روی پهنه تکاب و در ۲۵ کیلومتری شمال باختر معدن انگوران قرار گرفته است. کانسار یادشده در طی چندین دهه گذشته به دفعات مورد مطالعات پی‌جویی و اکتشاف در مقیاس‌های مختلف قرار گرفته و آخرین فعالیت‌های اکتشافی، برداشت‌های تفصیلی ژئوفیزیکی (به‌روش مقاومت ویژه و قطبش القایی) و ژئوشیمیایی به‌منظور پتانسیل‌یابی کانسار سرب و روی در این منطقه بوده است. در این پژوهش، پس از مدل‌سازی و تفسیر داده‌های ژئوفیزیکی و پردازش و تفسیر داده‌های ژئوشیمیایی، نقشه‌های اکتشافی در محیط GIS آماده‌سازی شدند. در ادامه، با به‌کارگیری توابع عضویت دوزنقه‌ای که متناسب با ماهیت اکتشافی است، نقشه‌های اکتشافی فازی‌سازی شده و در واقع روش فازی‌سازی نوینی برای فازی‌سازی نقشه‌های یادشده مورد توجه قرار گرفته است. در پایان برای تلفیق نقشه‌های فازی اکتشافی از عملگرهای فازی استفاده شده است. نتایج بررسی نقشه نهایی اکتشافی به‌منظور اکتشاف ماده معدنی سرب و روی در منطقه یادشده گسترش بی‌هنجاری‌های اکتشافی با مطلوبیت فازی بیش از ۰/۵ را در جنوب‌خاوری منطقه مطالعاتی نشان می‌دهد که حاصل همپوشانی قابل توجه بی‌هنجاری‌های ژئوفیزیکی و ژئوشیمیایی در این منطقه است.

کلیدواژه‌ها: کانی‌سازی سرب و روی، سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی، مقاومت ویژه، قطبش القایی، برداشت‌های ژئوشیمیایی، منطق فازی، تابع عضویت دوزنقه‌ای، عملگرهای فازی
***نویسنده مسئول:** محمد فرزامیان
Email: mohammadfarzhamian@fu.ut.ac.ir

۱- مقدمه

و عرض جغرافیایی "۴۵° ۲۴' ۳۶" تا "۲۶° ۲۵' ۳۶" قرار دارد و از نظر ساختاری در محل برخورد پهنه‌های البرز - آذربایجان و سندانج - سیرجان قرار گرفته است. واحدهای زمین‌شناسی رخنمون یافته در منطقه را می‌توان به سه واحد اصلی تقسیم‌بندی کرد. این واحدها از قدیم به جدید شامل سروزیت و تالک - شیست با سن پرکامبرین (واحد زیرین) است که در بخش جنوبی و باختری منطقه رخنمون دارد. بالای این واحد دولومیت‌های کرم تا سفید رنگ پودری و گاه برشی با سن پالوزویک وجود دارد و در نهایت، بالاترین واحد شامل ماسه‌سنگ‌ها و شیل‌های سرخ رنگ به سن انوسن است (شکل ۱). بیشتر گسل‌های موجود در منطقه عادی با مؤلفه امتدادلغز و روند عمومی شمالی - جنوبی هستند. کانی‌سازی سرب و روی در واحد دولومیتی به‌صورت رگچه‌ای، پراکنده و برشی دیده می‌شود. کانه‌های سرب و روی در منطقه شامل گالن، اسفالریت، اسمیت زونیت، سروزیت به‌همراه پیریت و کانی‌های باطله کوارتز، دولومیت و تالک هستند (محمدی نیایی، ۱۳۷۹).

۲-۲. برداشت‌های اکتشافی

به‌منظور برآورد گسترش کانسارهای فلزی سرب و روی در منطقه، برداشت‌های ژئوفیزیکی به روش‌های مقاومت ویژه و قطبش القایی با استفاده از آرایش دو قطبی - دو قطبی با فواصل جابه‌جایی ۲۵ متر، گام‌های ۷۵ متر و $n=1$ تا $n=5$ در ۱۰ خط پروفیل موازی که فاصله این پروفیل‌ها از یکدیگر ۱۰۰ متر است، بر روی واحدهای کربناتی در منطقه مورد نظر انجام شد (شکل ۱). مدل‌سازی داده‌های مقاومت ویژه و قطبش القایی با استفاده از نرم افزار Res2dinv صورت پذیرفت. هدف در روش معکوس‌سازی داده‌های ژئوفیزیکی، ارائه مدلی است که بیشترین همخوانی را با داده‌های صحرائی داشته باشد. در حقیقت مدل به‌دست آمده بیانگر یک پاسخ ریاضی مطابق با ساختار زمین‌شناسی است. در فرایند وارون‌سازی در یک فرایند تکرار، پارامترهای مدل آنقدر تغییر می‌یابد تا بیشترین همخوانی میان پاسخ مدل ارائه شده و داده‌های صحرائی حاصل شود. مدل به‌دست آمده باید با داده‌های زمین‌شناسی تطبیق داده شود تا درستی آن نیز از نظر زمین‌شناسی مورد تأیید قرار

به‌طور کلی در استفاده از GIS برای تهیه نقشه پتانسیل معدنی، دو دسته کلی مدل‌سازی مطرح است (Bonham-Carter, 1994). دسته اول با عنوان روش‌های متکی بر داده‌ها (Data driven methods) شناخته می‌شوند، متغیرهای مدل با در نظر گرفتن شواهد موجود و مدل‌های ذخیره اکتشاف شده در منطقه مطالعاتی تعیین می‌شوند که در این دسته می‌توان به روش‌هایی چون وزن‌های نشانگر (Weight of evidence) (Bonham-Carter, 1994)، رگرسیون لجستیک (Logistic regression) (Chung & Agterburg, 1980)، تحلیل تصمیم‌گیری درختی (Decision tree analysis) (Reddy & Bonham-Carter, 1991) و شبکه‌های عصبی (Neural networks) (Brown et al., 2000) اشاره کرد. در دسته دوم که به روش‌های متکی بر دانش (Knowledge driven methods) موسوم هستند، متغیرهای مدل با توجه به هدف اکتشافی، منطقه مورد مطالعه و عوامل تأثیر گذار دیگر به‌وسیله کارشناس برآورد می‌شود. روش‌هایی چون منطق بولین (Boolean logic)، همپوشانی شاخص (Index overlay) (Harris, 1989) و منطق فازی (Fuzzy logic) (An et al., 1992) نیز از این دسته‌اند. منطق فازی در بررسی‌های گسترده‌ای از جمله اکتشاف نهشته‌های آهن (An et al., 1991)، اکتشاف نهشته‌های نوع می‌سی‌سی‌پی (Eddy et al., 1995) و همچنین اکتشاف نهشته‌های طلائی اپی‌ترمال (Carranza et al., 1999) در تهیه نقشه پتانسیل معدنی مورد استفاده و در این پژوهش مورد توجه قرار گرفته است. از سوی دیگر، در این پژوهش با توجه محدودیت‌های حاکم بر روش‌های متداول فازی‌سازی نقشه‌های اکتشافی، روش فازی‌سازی نوینی با به‌کارگیری تابع عضویت دوزنقه‌ای معرفی و اعمال شده است.

۲- مطالعات اکتشافی

۲-۱. منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در جنوب باختر زنجان و ۳۰ کیلومتری خاور تکاب و ۲۵ کیلومتری معدن انگوران و در محدوده طول جغرافیایی "۴۷° ۳۸' ۴۸" تا "۴۸° ۳۹' ۴۸"

دولومیتی مرتبط است و عناصر Cs, Ti, Th, V, Co, Ni, Fe, W, Ba, Cr, u, y در مشابهت با تجزیه خوشه‌ای به سنگ‌شناسی ماسه‌سنگی و بالا بودن میزان زمین این عناصر در این میزان تعلق دارد.

در تشابه با پاسخ تحلیل خوشه‌ای، عناصر همبود (پاراژنز) کانی‌سازی سرب و روی در عامل دوم تمرکز یافته‌اند. در این عامل ضرایب بالای سرب، روی، نقره، کادمیم، آنتیموان و مس گویای عناصر همبود کانی‌سازی سرب و روی است. پس از بررسی و مقایسه نتایج تجزیه‌ها عناصر سرب، روی، کادمیم، آنتیموان و نقره که عناصر مرتبط با کانی‌سازی سولفیدی سرب و روی هستند، به‌عنوان عناصر هدف در تحلیل پایانی انتخاب شدند. در مورد مس هر چند که این عنصر از نظر مقدار ضریب فاکتوری می‌تواند در فاکتور دوم قرار بگیرد اما با توجه به این که توزیع غلظت مس فقط در حد زمینه سنگ‌های در برگیرنده است به‌عنوان عنصر هدف لحاظ نشده است.

۳-۲. آماده‌سازی نقشه‌های اکتشافی

برای تهیه نقشه‌های مقاومت ویژه و قطبش القایی، نتایج عددی به دست آمده از مدل‌سازی هر یک از پروفیل‌ها از نرم افزار Res2dinv مورد استفاده قرار گرفت. بر اساس این نتایج، مقادیر عددی مدل‌سازی شده مقاومت ویژه و قطبش القایی در ده ژرفای ۹، ۱۶، ۲۴، ۳۲، ۴۱، ۵۲، ۶۳، ۷۵، ۸۵ و ۱۰۵ استخراج شد. سپس با استفاده از نرم افزار Spatial Analyst در محیط نرم‌افزار Arc GIS مقاطع افقی هر یک از ژرفاهای بیان شده رسم و ده نقشه مقاومت ویژه و قطبش القایی در ده ژرفای یاد شده تهیه شد. نقشه‌های مقاومت ویژه و قطبش القایی در ژرفای ۵۲ متری در شکل‌های ۴ و ۵ آورده شده است. در یک نگاه کلی در مورد نقشه مقاومت ویژه در ژرفای ۵۲ متر می‌توان دو ناحیه کاملاً متفاوت از نظر مقاومت ویژه (یکی با مقاومت ویژه بیش از ۷۰ اهم متر در باختر لایه و دیگری با مقاومت ویژه کمتر از ۱۵۰ اهم متر در خاور لایه) را به راحتی تفکیک کرد که ناحیه اول منطبق بر واحد دولومیتی و ناحیه دوم منطبق بر واحد ماسه‌سنگی و شیل است. نکته قابل توجه کاهش مقاومت ویژه در جنوب و جنوب باختری نقشه منطبق بر میزان دولومیتی است. در نقشه قطبش القایی در ژرفای ۵۲ متر می‌توان گسترش بی‌هنجاری در جنوب منطقه با بارپذیری بیش از ۲۰ میلی‌ثانیه را دید. نقشه‌های پراکندگی عناصر سرب، روی، آنتیموان، کادمیم و نقره رسم شده است تا به‌عنوان نقشه‌های اطلاعاتی ژئوشیمیایی برای تلفیق و محاسبه نقشه نهایی اکتشافی به کار برده شود. نقشه‌های پراکندگی عنصرهای سرب و روی در شکل‌های ۶ و ۷ آورده شده است.

بررسی نتایج نقشه‌های پراکندگی عناصر سرب و روی، گسترش بی‌هنجاری‌های این عناصر را در خاور نقشه با امتداد شمالی- جنوبی نشان می‌دهد. در پایان، نقشه سنگ‌میزان و آخرین نقشه اکتشافی است که برای تلفیق و ارائه نقشه نهایی اکتشافی در نظر گرفته شده است.

۳- منطق فازی

۳-۱. تعریف

منطق فازی اولین بار توسط Zadeh (1965) معرفی شد. منطق فازی بر اساس مجموعه‌های فازی تعریف می‌شود که در آن مجموعه‌ها حد و مرز معینی ندارند، اما در منطق صریح یا منطق صفر و یک برخلاف منطق فازی، مجموعه‌ها مرز معین دارند. یکی از اساسی‌ترین مفاهیم در منطق فازی تابع عضویت است که برای هر عضو مجموعه یک مقدار عضویت می‌دهد. مقدار عضویت در مجموعه غیرفازی برابر صفر و یک است اما مقدار عضویت در مجموعه فازی عددی در فاصله [0,1] است و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\mu_A: X \rightarrow [0,1] \quad (1)$$

که μ_A میزان تعلق عضو x به مجموعه فازی A است. مقدار یک حاکی از تعلق

گیرد (Loke, 2001). نتایج مدل‌سازی وارون داده‌های قطبش القایی و مقاومت ویژه پروفیل P-4.5S (که موقعیت آن در شکل ۱ نشان داده شده) در شکل ۲ آورده شده است. نتایج مدل‌سازی پروفیل یاد شده دلالت بر حضور بی‌هنجاری با بارپذیری بیش از ۳۵ میلی‌ثانیه و با گسترش از مبدأ تا $x=225$ متری و گستره ژرفی ۱۰ تا ۶۰ متری دارد. مقاومت ویژه این بی‌هنجاری متغیر است و در گسترش $x=125$ تا $x=225$ ، به حدود ۲۰۰ اهم‌متر کاهش پیدا می‌کند. تغییرات مقاومت ویژه می‌تواند شاهدهی بر تغییرات بافت کانی‌سازی باشد. گسترش این بی‌هنجاری منطبق بر واحد دولومیتی است که سنگ‌میزان اصلی کانی‌سازی ماده معدنی می‌باشد. حضور بی‌هنجاری دیگری در طول این پروفیل در گسترش $x=400$ تا $x=600$ و در ژرفای ۳۰ تا ۷۰ متری با بارپذیری حدودی ۳۰ میلی‌ثانیه قابل رؤیت است. مقاومت ویژه این بی‌هنجاری با توجه به حضور شیل، ماسه‌سنگ و رس به عنوان عامل اصلی کاهش مقاومت ویژه در این محل، به‌طور کلی پایین اما به نسبت متغیر است.

با توجه به نتایج حاصل از مطالعات زمین‌شناسی و اکتشافات ژئوفیزیکی، تعداد ۳۰۰ چال کم‌ژرفا در یک شبکه مربعی ۵۰ متر در ۵۰ متر (شکل ۱) برای بررسی‌های ژئوشیمیایی طراحی و با استفاده از دستگاه دریل واگن، به مرحله اجرا درآمده است. ژرفای متوسط چال‌ها ۱۰ متر بوده که از هر چال از نیم متر انتهایی یک نمونه پودری برای تجزیه برداشت و به آزمایشگاه ارسال شده و به روش ICP مورد تجزیه قرار گرفته است (کوثری، ۱۳۸۵). متغیرهای آماری برخی از عناصر در جدول ۱ آمده است. پس از پردازش داده‌های ژئوشیمیایی، برای تعیین رفتار شیمیایی عناصر همبود، همبستگی گروهی عناصر با به کارگیری تحلیل‌های فاکتوری و خوشه‌ای مورد ارزیابی قرار گرفته است. بر اساس نتایج پراکندگی احتمال، از داده‌های تبدیل یافته به‌روش باکس-کاکس (Boxe-Cox) برای تحلیل‌های یاد شده استفاده شده است.

در تحلیل خوشه‌ای، هدف دست یافتن به ملاکی برای طبقه‌بندی هر چه مناسب‌تر متغیرها و با نمونه‌ها بر اساس تشابهات درون گروهی و اختلافات برون گروهی است. در این روش سعی بر آن است که متغیرها و نمونه‌ها به‌صورت خوشه‌هایی که بیشترین تشابه را میان خود و بیشترین اختلاف را با خوشه‌های دیگر دارند تقسیم شود (حسنی پاک و شرف الدین، ۱۳۸۰). برای محاسبه میزان تشابه (تشکیل ماتریس شباهت) ضرایب همبستگی مورد توجه قرار گرفته است. از سوی دیگر برای خوشه‌بندی داده‌ها، روش اتصال نزدیک‌ترین همسایگی استفاده شده است. دندوگرام حاصل از تحلیل خوشه‌ای عناصر در شکل ۳ آمده است.

با توجه به دندوگرام شکل ۳ می‌توان دو خوشه کاملاً مجزا را تفکیک کرد. در خوشه اول عناصر Cs تا U قرار می‌گیرند که به واحد ماسه‌سنگی و بالا بودن میزان زمینه این عناصر نسبت به میزان دولومیتی منطقه مربوط است. در خوشه دوم می‌توان عناصر همبود سرب و روی (سرب، روی، کادمیم، آنتیموان، نقره و مس) را به خوبی تفکیک کرد. حضور عناصر منیزیم و کلسیم در این خوشه در ارتباط با سنگ درون‌گیر دولومیتی است که میزان کانی‌سازی می‌باشد و در نهایت، عنصر گوگرد با توجه به نوع کانی‌سازی سولفیدی موجود در منطقه در این خوشه قرار دارد.

هدف از تجزیه و تحلیل عاملی تشخیص اصلی‌ترین متغیرهای کنترل‌کننده از متغیرهایی با نقش کمتر است که می‌توان با کمترین تعداد متغیرهای عاملی، بیشترین تغییرپذیری میان داده‌ها را توجه کرد و سهم نسبی هر یک از متغیرهای عاملی را در توجه تغییرپذیری مشخص کرد (حسنی پاک و شرف الدین، ۱۳۸۰). جدول ۲ نتیجه به کارگیری این روش با اعمال تابع وریمکس را نشان می‌دهد. چهار مؤلفه اول با مقادیر ویژه ۱۳/۷، ۴/۷، ۰/۸۵، ۰/۷ و در مجموع ۸۳٪ از تغییرپذیری میان داده‌ها را توجه می‌کند. عامل اول را می‌توان به تجزیه مؤلفه‌های سین ژنتیک نسبت داد. در این عامل میزان تعلق منفی مقدار بالا دو عنصر کلسیم و منیزیم به سنگ درونگیر

$$[T_p(\mu_1, \dots, \mu_n)] = \max \left(0, 1 - \left[\sum_{i=1}^n (1 - \mu_i)^p \right]^{1/p} \right), p > 0 \quad (5)$$

تغییر متغیر p در رابطه یاد شده سازگاری قابل انعطافی میان مقدار صفر و عضو کمینه تابع عضویت را به همراه خواهد داشت.

– **عملگرهای فازی انفصالی (Disjunctive):** عملگرهای فازی انفصالی در مواقعی که حضور هر یک از ملاک‌ها به تنهایی برای مفسر مفید واقع شود مورد استفاده قرار می‌گیرد. نتیجه اعمال این عملگر (که با به کارگیری توابع t -conorms انجام می‌پذیرد) بر روی توابع عضویت همواره مقداری بزرگ‌تر (یا مساوی) از بزرگ‌ترین عضو توابع عضویت است:

$$S = (\mu_1, \dots, \mu_n) \geq V_{i=1}^n \mu_i \quad (6)$$

که در این رابطه V بیشینه مقدار n توابع عضویت است. از عملگرهای فازی انفصالی می‌توان به عملگرهای زیر اشاره کرد:

$$S_1(\mu_1, \dots, \mu_n) = V_{i=1}^n \mu_i \quad (7)$$

$$S_2(\mu_1, \dots, \mu_n) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - \mu_i) \quad (8)$$

عملگر S_1 با عنوان عملگر فازی Or که بر اساس Or منطقی بولین است و عملگر S_2 که با عنوان عملگر جمع جبری فازی شناخته می‌شود، در تلفیق داده‌های اکتشافی و در مواقعی که حضور هر نشانگر مثبت می‌تواند برای بیان مطلوبیت کافی باشد مورد استفاده قرار می‌گیرد (Bonham-Carter, 1984). به غیر از عملگرهایی که به آنها اشاره شد عملگرهای t -conorm متغیر دیگری حضور دارند که با تغییر متغیرها عملگرهای متفاوتی تولید می‌شوند که می‌توان از این میان به عملگر yager t -conorm اشاره کرد:

$$S_y(\mu_1, \dots, \mu_n) = \min \left(1, \left(\sum_{i=1}^n \mu_i^p \right)^{1/p} \right), p > 0 \quad (9)$$

تغییر متغیر p در رابطه بالا سازگاری قابل انعطافی بین مقدار یک و عضو بیشینه تابع عضویت را به همراه خواهد داشت.

– **عملگرهای فازی جبرانی (Compensatory):** (Zimmerman 1978) نشان داده است که همواره عملگرهای t -norms (به سبب ماهیت کاهش‌ی) و عملگرهای t -conorms (به سبب ماهیت افزایش‌ی) برای تلفیق توابع عضویت مناسب نیستند. به نظر می‌رسد تلفیقی از این عملگرها می‌تواند در بیشتر موارد نظر مفسر را تأمین کند. این عملگرها با عنوان عملگرهای جبرانی شناخته می‌شوند. Zimmerman and Zysno (1980) دو شکل کلی عملگر جبرانی را که تلفیقی از عملگرهای t -norms و t -conorms است به صورت زیر تعریف کرده‌اند:

$$E(\mu_1, \dots, \mu_n) = (T(\mu_i))^{1-\gamma} (S(\mu_i))^\gamma, \gamma \in [0, 1] \quad (10)$$

$$E(\mu_1, \dots, \mu_n) = (1-\gamma)T(\mu_i) + \gamma S(\mu_i), \gamma \in [0, 1] \quad (11)$$

از جمله عملگرهای جبرانی می‌توان به عملگر معروف Hurwicz اشاره کرد:

$$E_H(\mu_1, \dots, \mu_n) = (1-\gamma) \min(\mu_i) + \gamma \max(\mu_i) \quad (12)$$

بسته به مقدار γ نتیجه اعمال این عملگر بر روی توابع عضویت همواره مقداری میان کوچک‌ترین و بیشترین مقدار تابع عضویت است. وقتی γ برابر با یک باشد ترکیب همان Or فازی و وقتی γ صفر باشد، ترکیب And فازی خواهد بود. ضعف این عملگر فارغ از ماهیت مدل‌سازی آن است که تنها توابع عضویت بیشینه و کمینه در نتیجه پایانی نقش دارند (به طور کلی این ضعف در عملگرهای And (رابطه (3))، Or (رابطه (7)) و یا بسط‌هایی از این دو عملگر، وجود دارد). همچنین Zimmerman & Zysno (1980) تلفیقی از عملگرهای جمع جبری و ضرب جبری فازی را به صورت زیر معرفی کردند:

کامل عضو x به مجموعه فازی A و مقدار صفر نیز بیانگر تعلق نداشتن عضو x به مجموعه فازی A است.

۳-۲. توابع عضویت

توابع عضویت در برگزیده تمامی اطلاعات مرتبط با مجموعه فازی هستند. توابع عضویت توسط نوع تابع و متغیرهای مرتبط با آن تعریف می‌شوند (Baglio et al., 1994). از متداول‌ترین توابع عضویت می‌توان به توابع عضویت مثلثی، دوزنقه‌ای و گوسین (Gaussian) اشاره کرد که به طور گسترده‌ای در علوم مهندسی برای طراحی سامانه‌های کنترل فازی مورد استفاده قرار گرفته است. با توجه به این که تعیین دقیق مرز جدایش جامعه بی‌هنجاری از زمینه در نقشه‌های اکتشافی امکان‌پذیر نیست، تعریف فازی مرز جدایش میان جامعه بی‌هنجاری از زمینه می‌تواند خطای این جدایش را تا حد زیادی کاهش دهد. با بررسی ویژگی‌های توابع عضویت بیان شده به نظر می‌رسد که تابع عضویت دوزنقه‌ای به بهترین شکل می‌تواند نظر کارشناس را اعمال کند. شکل ۸ بخش‌های اصلی تابع عضویت دوزنقه‌ای را نمایش می‌دهد. این تابع از دو بخش اصلی تشکیل شده است، بخش هسته (Core) تابع که هر عضوی از مجموعه در این بازه واقع شود تعلق کامل (برابر با یک) به مجموعه فازی متناسب خواهد داشت. بخش دوم مرز (Boundary) تابع است که هر عضوی از مجموعه در این بازه مقدار فازی میان صفر و یک را به خود اختصاص خواهد داد و هر چه عضو یاد شده به هسته نزدیک‌تر باشد مقدار فازی متناسب به یک نزدیک‌تر خواهد بود. این تابع با به کارگیری چهار متغیر d, c, b, a و رابطه ریاضی متناسب با شکل ۸ ارائه می‌شود.

۳-۳. عملگرهای فازی

انتخاب عملگر فازی مناسب در تلفیق، امری ضروری به شمار می‌رود. عملگرهای فازی زیادی در نوشته‌ها پیشنهاد شده است (Zadeh, 1973; Yager, 1978; Mizomoto, 1989a; Dubois & Prade, 1985; Zimmermann, 1987; Zimmermann & Zysno, 1980; Zimmermann, 1991). هر یک از این عملگرها بسته به نوع مسئله می‌تواند بهترین بازتاب از هدف را ارائه دهد. سه نوع از عملگرهای فازی به طور گسترده‌ای در تلفیق توابع عضویت به کار گرفته می‌شوند (Kaymak, 1998).

– **عملگرهای فازی ارتباطی (Conjunctive):** این عملگر در مواقعی که هدف مفسر برقراری تمامی شرایط باشد مورد استفاده قرار می‌گیرد. نتیجه اعمال این عملگر (که با به کارگیری توابع t -norms انجام می‌پذیرد) بر روی توابع عضویت همواره مقداری کوچک‌تر و یا مساوی با کوچک‌ترین عضو توابع عضویت است:

$$T = (\mu_1, \dots, \mu_n) \leq \Lambda_{i=1}^n \mu_i \quad (2)$$

که در این روابط μ_i تابع عضویت فازی برای i امین تابع عضویت، n تعداد توابع عضویتی است که قرار است ترکیب شوند و Λ کمترین مقدار n توابع عضویت است. از عملگرهای فازی ارتباطی می‌توان به عملگرهای زیر اشاره کرد:

$$T_1(\mu_1, \dots, \mu_n) = \Lambda_{i=1}^n \mu_i \quad (3)$$

$$T_2(\mu_1, \dots, \mu_n) = \prod_{i=1}^n \mu_i \quad (4)$$

عملگر T_1 با عنوان عملگر فازی And که مطابق با And منطقی بولین است و عملگر T_2 که با عنوان عملگر ضرب جبری فازی شناخته می‌شود به طور گسترده‌ای در تلفیق داده‌های اکتشافی و در مواقعی که دو یا چند بخش از شواهد برای اثبات فرضیه‌ای باید هم‌زمان حضور داشته باشند استفاده شده است (Bonham-Carter, 1984). به غیر از عملگرهایی که به آن اشاره شد عملگرهای t -norm متغیری دیگری حضور دارند که با تغییر این متغیرها، عملگرهای متفاوتی تولید می‌شوند که می‌توان از این میان به عملگر yager t -norm اشاره کرد:

مثال در نقشه اکتشافی سرب، مقدار فازی سلولی با غلظت ۳۸۰ ppm برابر خواهد بود با:

$$\mu_{(Pb=380ppm)} = \frac{(0.1 \times 0) + (0.4 \times 0.5) + (0.9 \times 1)}{(0 + 0.5 + 1)} = 0.73 \quad (15)$$

تمامی مراحل فازی‌سازی و محاسبه مساحت تجمعی به طور مستقیم در محیط GIS انجام پذیرفته است. در نقشه زمین‌شناسی نیز، برای واحد دولومیتی که سنگ میزبان اصلی کانی‌سازی است، ارزش ۰/۸ و برای واحد ماسه‌سنگی ارزش ۰/۳ در نظر گرفته شده است. از طرف دیگر گسترش دولومیت‌ها در ماسه‌سنگ تا ژرفای ۱۰۵ متری (ژرفای تجسس ژئوفیزیکی) با توجه به جهت و زاویه شیب برآورد و فازی‌سازی شده است. نقشه‌های فازی مربوط به مقاومت ویژه و قطبش القایی در ژرفای ۵۲ متر در شکل ۱۱ و ۱۲، پراکندگی عنصر سرب در شکل ۱۳ و نقشه فازی سنگ میزبان در شکل ۱۴ آورده شده است.

۵- تلفیق نقشه‌های اکتشافی

۵-۱. نقشه ژئوفیزیک

نقشه‌های مقاومت ویژه و قطبش القایی در ده ژرفای بیان شده در بخش دوم مدل‌سازی و رسم و در بخش چهارم فازی‌سازی شده‌اند، اما در پایان باید یک نقشه نهایی برای قطبش القایی و یک نقشه نهایی برای مقاومت ویژه برای تلفیق نتایج و ارائه نقشه نهایی ژئوفیزیک ارائه کرد. به تعریف دقیق‌تر، هدف در این مرحله ارائه یک روش مناسب به‌تصویر کشیدن اطلاعات ژرفایی (سه بعدی) به یک نقشه دو بعدی است که در برگیرنده اطلاعات مربوط به تمام ژرفاها باشد. به این منظور با به‌کارگیری عملگر رابطه (۱۳) با مقادیر بالا γ (که اثر افزایشی دارد) نقشه‌های فازی مقاومت ویژه و قطبش القایی مربوط به ده ژرفا مورد تلفیق قرار گرفتند. نتیجه آن خواهد شد که بی‌هنجاری‌هایی که گسترش ژرفایی بیشتری دارند، در چند ژرفا ظاهر می‌شوند و همدیگر را تقویت می‌کنند و در نقشه نهایی ارزش فازی بیشتری نسبت به بی‌هنجاری‌هایی که گسترش ژرفایی کمتری داشته‌اند به‌خود اختصاص خواهند داد. عملگر رابطه (۱۳) با مقادیر متفاوت γ اعمال شده تا بهترین مقدار γ (۰/۹۵) برای تلفیق نقشه‌های قطبش القایی و ۰/۹ برای تلفیق نقشه‌های مقاومت ویژه) انتخاب شده است. نقشه نهایی مقاومت ویژه و قطبش القایی در شکل ۱۵ و ۱۶ آمده است. بررسی نقشه نهایی قطبش القایی به گسترش بی‌هنجاری با ارزش فازی بیش از ۰/۵ در جنوب این نقشه دلالت دارد (با توجه به ماهیت تلفیق، مقادیر بالای فازی گواهی بر بی‌هنجاری‌های با بارپذیری بالا و گسترش ژرفایی به‌نسبت زیاد است). گسترش اصلی این بی‌هنجاری منطبق بر پروفیل‌های p-2s، p-3s، p-4s و p-4.5s است که روند افزایشی مطلوبیت بی‌هنجاری از باختر به خاور کاملاً آشکار است. در نقشه نهایی مقاومت ویژه نیز می‌توان مقادیر بالای ارزش فازی را در خاور محدوده دید، که بیشترین بخش آن به‌سبب حضور واحد ماسه‌سنگی و شیل و رس است. در ادامه، به‌منظور ارائه نقشه ژئوفیزیک، نقشه‌های مقاومت ویژه و قطبش القایی مورد تلفیق قرار گرفتند. با نگاهی بر عملگرهای معرفی شده در بخش (۳-۳) به‌نظر می‌رسد که عملگرهای جمعی ارتباطی به سبب ماهیت کاهشی و عملگرهای جمعی انحصالی به سبب ماهیت افزایشی که دارند به‌ترتیب سبب کاهش و شدت بخشی کاذب مطلوبیت فازی بی‌هنجاری‌های ژئوفیزیکی می‌شوند، بنابراین عملگرهای جبرانی با مقادیر γ تقریبی ۰/۴ تا ۰/۷ که نقش بینابینی ایفا می‌کنند و نقشه نهایی آن توسط متغیری بین متغیر نقشه‌های فازی قطبش القایی و مقاومت ویژه کنترل می‌شود می‌تواند به‌بهترین شکلی مطلوبیت فازی بی‌هنجاری ژئوفیزیکی را ارائه دهد. پس از بررسی عملگرها، عملگر رابطه (۱۳) با $\gamma=0.6$ برای تلفیق نهایی انتخاب شده است. نقشه نهایی ژئوفیزیک در شکل

$$E_Z(\mu_1, \dots, \mu_n) = \left(\prod_{i=1}^n \mu_i \right)^{1-\gamma} \left(1 - \prod_{i=1}^n (1-\mu_i) \right)^\gamma \quad (13)$$

بسته به مقدار γ نتیجه اعمال این عملگر همواره مقداری میان جمع جبری فازی و ضرب جبری فازی توابع عضویت خواهد بود. این عملگر به‌طور گسترده‌ای در تلفیق شواهد در امر اکتشافات مورد استفاده قرار گرفته است. وقتی γ یک باشد ترکیب همان جمع جبری فازی خواهد بود و وقتی γ صفر باشد ترکیب برابر با حاصل ضرب جبری فازی است (Bonham-Carter, 1984).

۴- فازی‌سازی نقشه‌های اکتشافی

در این مرحله نقشه‌های ژئوفیزیکی، ژئوشیمیایی و زمین‌شناسی به منظور ارائه نقشه نهایی اکتشافی، فازی‌سازی شدند. برای فازی‌سازی نقشه‌های ژئوشیمیایی از نتایج اعمال روش عیار-مساحت به‌منظور بهینه کردن فازی‌سازی نقشه‌های یاد شده استفاده گردیده است. نمودار تمام لگاریتمی مساحت تجمعی - غلظت برای عنصر سرب به عنوان نمونه در شکل ۹ آمده است. با اعمال نتایج روش عیار-مساحت، می‌توان سه ناحیه را با توجه به تغییرات بعد فرکتال در نقشه‌های ژئوشیمیایی تفکیک کرد. اگر چه به‌کارگیری این روش در تفکیک سازی زون‌های بی‌هنجار نتایج قابل قبولی ارائه می‌دهد، اما با توجه به خطای برداشت و تجزیه عناصر و همچنین خطای حاکم بر رگرسیون داده‌ها به‌منظور برآورد بعد فرکتال و جداسازی جوامع، تعیین دقیق مرز جدایش بین این سه ناحیه با خطا همراه است. بدین دلیل، این مرزها با به‌کارگیری توابع عضویت دوزنقه‌ای به‌طور فازی تعیین شده‌اند. توابع عضویت دوزنقه‌ای مربوط به نقشه اکتشافی سرب در شکل ۱۰ آمده است. قسمت هسته توابع دوزنقه‌ای مرتبط با سه ناحیه تفکیک گردیده در نقشه اکتشافی سرب، منطبق بر نتایج تفکیک سازی نمودار لگاریتمی عیار-مساحت (شکل ۱۰) و قسمت مرزی توابع دوزنقه‌ای مذکور به‌منظور کاهش خطای جداسازی تعریف شده است.

فازی‌سازی نقشه‌های قطبش القایی و مقاومت ویژه نیز با استفاده از توابع دوزنقه‌ای و با توجه به نتایج مدل‌سازی پروفیل‌های ژئوفیزیکی، دامنه تغییرات و هدف اکتشافی (سرب و روی) انجام پذیرفته است. هر یک از نقشه‌های ژئوفیزیکی نیز به‌سه ناحیه زمینه، جدایش از زمینه و بی‌هنجاری تفکیک شده است. به‌منظور برآورد حد زمینه از نتایج مدل‌سازی پروفیل‌های شمالی که از نظر کانی‌سازی عقیم هستند و برای برآورد حد جدایش از زمینه و بی‌هنجاری نتایج مدل‌سازی پروفیل‌های جنوبی مورد توجه قرار گرفته است (قابل توجه آن که تغییرات قطبش القایی و مقاومت ویژه در سنگ میزبان دولومیت اساس این تفکیک‌سازی قرار گرفته است و این نکته که در حفاری‌های انجام شده حضور پیریت به‌عنوان کانی باطله با کانی‌سازی سرب و روی همراه بوده است نیز در نظر گرفته شده است). روابط ریاضی مربوط به توابع عضویت دوزنقه‌ای هر یک از نقشه‌های اکتشافی به‌منظور فازی‌سازی نقشه‌های اکتشافی محاسبه و در جدول ۳ بیان شده است. مقدار x در هر یک از این نقشه‌ها، مربوط به تغییرات متغیرهای نقشه مورد نظر است. توابع f_1 ، f_2 و f_3 به‌ترتیب روابط ریاضی توابع عضویت دوزنقه‌ای مرتبط با سه ناحیه تفکیک شده در نقشه اکتشافی مورد نظر را نشان می‌دهد.

در ادامه برای نواحی حد زمینه، جدایش از زمینه و بی‌هنجاری در نقشه‌های ژئوشیمیایی و ژئوفیزیکی به‌ترتیب ارزش فازی ۰/۱، ۰/۴ و ۰/۹ در نظر گرفته شده است و در پایان مقدار فازی هر سلول از نقشه‌های ژئوشیمیایی با به‌کارگیری رابطه زیر محاسبه شده است:

$$\mu_A = \frac{0.1f_1 + 0.4f_2 + 0.9f_3}{\sum_{i=1}^3 f_i} \quad (14)$$

که در این رابطه f_1 ، f_2 و f_3 به‌ترتیب میزان تعلق هر سلول مشخص به‌سه ناحیه زمینه، جدایش از زمینه و بی‌هنجاری ممکن در هر یک از نقشه‌های یاد شده است. به‌عنوان

حاکمی از همپوشانی قابل توجه بی‌هنجاری‌های نقشه‌های یادشده در این ناحیه است. حفاری به‌عمل آمده در جنوب منطقه (ناحیه‌ای که با بیضی سیاه رنگ تفکیک شده است) حضور ماده معدنی را نشان می‌دهد که درستی نتایج به‌دست آمده را مورد تأیید قرار می‌دهد.

در یک نگاه کلی به پژوهش ارائه شده، می‌توان نتایج زیر را مورد توجه قرار داد: - GIS می‌تواند به‌عنوان ابزاری کارآمد در جمع‌آوری داده‌ها، استخراج اطلاعات مورد نظر و انجام محاسبه‌های آماری و تلفیق نقشه‌های اکتشافی به‌منظور ارائه نقشه نهایی به‌کار گرفته شود. در این پژوهش، اعمال توابع دوزنقه‌ای فازی با استفاده از روابط ریاضی مرتبط (جدول ۳) و فازی‌سازی نقشه‌های اکتشافی و در نهایت، تلفیق نقشه‌ها به‌کمک عملگرهای فازی به‌طور مستقیم در محیط GIS صورت پذیرفت.

- تابع عضویت فازی دوزنقه‌ای که در این پژوهش به‌عنوان روش نوینی در فازی‌سازی نقشه‌های اکتشافی پیشنهاد و استفاده شده است، نتایج قابل قبولی ارائه داده است و با توجه به قابلیت، انعطاف و تطابقی که با ماهیت نقشه‌های اکتشافی دارد می‌تواند به‌عنوان روشی مؤثر در بهینه‌کردن فازی‌سازی نقشه‌های اکتشافی و کاهش خطای تفکیک‌سازی جوامع بی‌هنجاری و زمینه در کارهای اکتشافی استفاده شود.

- به‌کارگیری روش‌های جداسازی جوامع بی‌هنجاری از زمینه در نقشه‌های اکتشافی، نقش مؤثری در بهینه‌کردن فازی‌سازی نقشه‌های اکتشافی ایفا می‌کند. در این پژوهش روش عیار - مساحت برای نیل به این هدف مورد توجه قرار گرفته است.

- ارائه روش به‌تصویر کشیدن اطلاعات سه بعدی (ژرفی) ژئوفیزیکی منطقه مورد نظر با به‌کارگیری مدل منطق فازی ارائه شده، به‌مدل دو بعدی که اطلاعات ژرفی را به‌بهترین وجهی بازتاب می‌کند نقش مؤثری در بهینه‌سازی تلفیق و مقایسه نقشه بی‌هنجاری‌های ژئوفیزیکی با نقشه‌های دو بعدی بی‌هنجاری‌های ژئوشیمیایی و زمین‌شناسی در این منطقه داشته است.

- در میان عملگرهای فازی معرفی شده در بخش ۳-۳، عملگر فازی رابطه (۱۳) که با عنوان عملگر گاما در تلفیق نقشه‌های اکتشافی شناخته می‌شود، جایگاه ویژه‌ای دارد. عملگر یادشده با تعیین مقدار گاما می‌تواند با توجه به‌ماهیت تلفیق، به‌بهترین وجهی نظر کارشناس را اعمال و بازتاب کند.

سپاسگزاری

این پژوهش در دانشگاه صنعتی شاهرود انجام پذیرفته است. همچنین مؤلفان از همکاری آقایان کرم سلطانی، یارمحمدی و امام جمعه که با در اختیار قرار دادن داده‌های اکتشافی منطقه چیچکلو موجبات این پژوهش را فراهم آوردند صمیمانه سپاسگزاری می‌شود.

۱۷ آمده است. با مطالعه نقشه ژئوفیزیکی می‌توان گسترش بی‌هنجاری ژئوفیزیکی در جنوب نقشه با ارزش فازی بیش از ۰/۵ را دید. افزایش ارزش فازی گسترش بی‌هنجاری مورد نظر در روند باختری، خاوری به‌طور کامل مشهود است، به‌طوری که ارزش فازی در خاور این بی‌هنجاری به بیش از ۰/۷ می‌رسد. بیشترین بخش این بی‌هنجاری منطبق بر واحد دولومیتی است.

۲-۵. نقشه ژئوشیمیایی

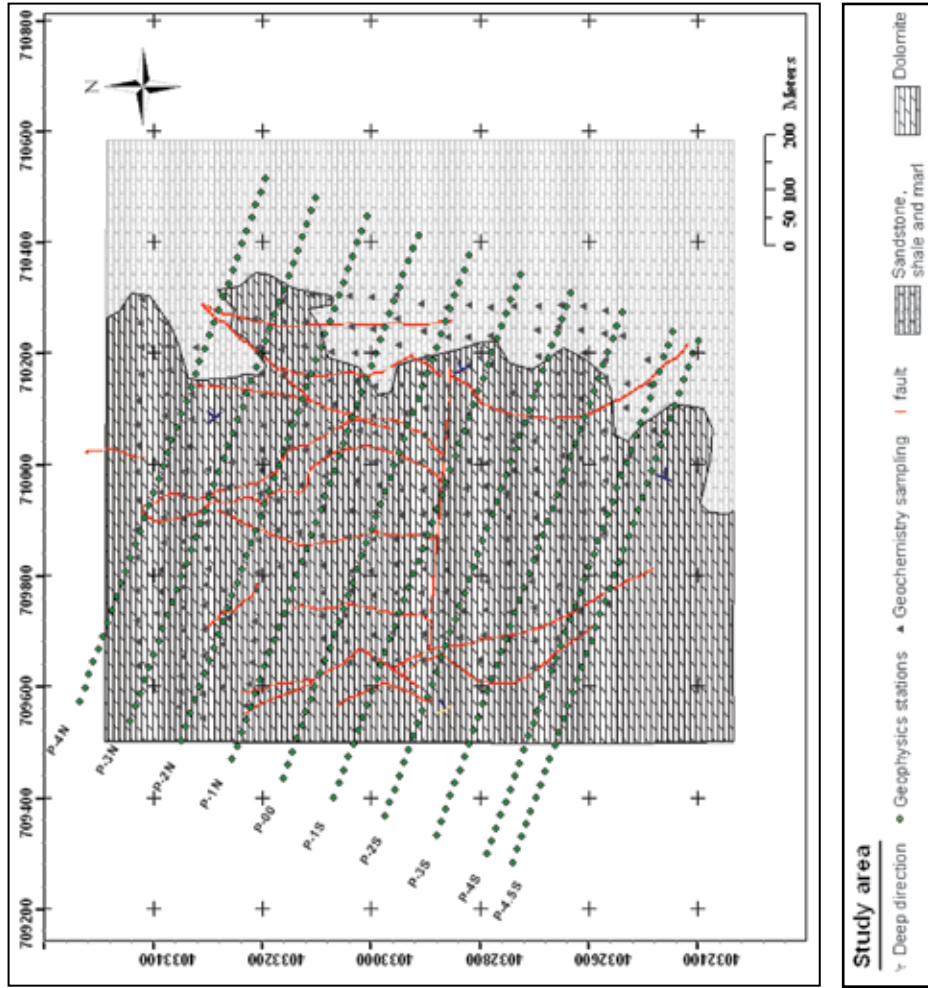
نقشه‌های فازی پراکندگی عناصر همبند نیز به‌منظور ارائه نقشه ژئوشیمیایی مورد تلفیق قرار گرفتند. در مشابهت با دلایلی که در مورد تلفیق نقشه‌های مقاومت ویژه و قطبش القایی بیان شد، پس از بررسی عملگرها، عملگر رابطه (۱۳) با $\gamma=0.65$ برای تلفیق نهایی انتخاب شده است. مطالعه نقشه نهایی ژئوشیمیایی که در شکل ۱۸ آمده است بر گسترش بی‌هنجاری عناصر همبند با ارزش فازی بیش از ۰/۵ در خاور نقشه یادشده با امتداد شمالی - جنوبی بر واحد دولومیتی دلالت دارد. در برخی نواحی ارزش فازی این گسترش بی‌هنجاری به ۰/۸ نیز می‌رسد.

۳-۵. نقشه نهایی اکتشافی

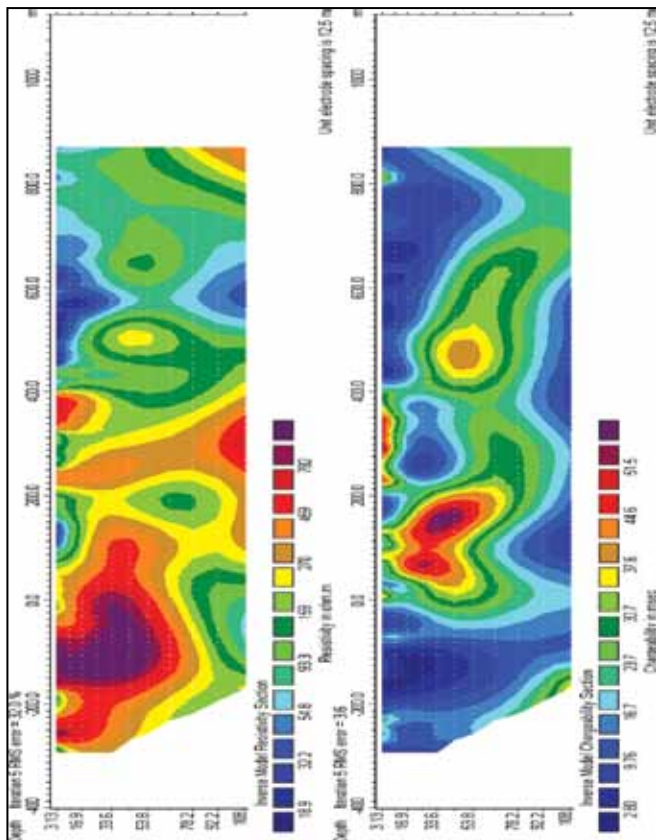
با بررسی و مقایسه نتایج بی‌هنجاری‌های ژئوفیزیکی و ژئوشیمیایی و مطابقت با نقشه زمین‌شناسی می‌توان همپوشانی قابل توجهی میان بی‌هنجاری‌های ژئوفیزیکی و ژئوشیمیایی در واحد دولومیتی در جنوب منطقه دید، اما به‌منظور تفسیر کمی و ارائه نقشه نهایی اکتشافی، نقشه‌های ژئوفیزیکی، ژئوشیمیایی و زمین‌شناسی در این مرحله مورد تلفیق قرار گرفته‌اند. حضور نقشه زمین‌شناسی (سنگ میزبان) نیز به‌منظور افزایش مطلوبیت بی‌هنجاری‌های منطبق بر واحد دولومیتی به‌عنوان میزبان اصلی کانی‌سازی است. در این مرحله برای تلفیق نقشه‌های یادشده رابطه (۱۳) با مقادیر ۰/۳ تا ۰/۵ مورد بررسی قرار گرفت. این انتخاب به‌منظور افزایش سطح اطمینان به بی‌هنجاری‌های نقشه نهایی اکتشافی انجام پذیرفته است. نقشه نهایی اکتشافی با به‌کارگیری $\gamma=0.35$ و $\gamma=0.45$ در شکل‌های ۱۹ و ۲۰ آورده شده است. بررسی نتایج نقشه اکتشافی معدنی، مطلوبیت فازی بیش از ۰/۴ را در خاور نقشه یادشده با گسترش شمالی و جنوبی نمایش می‌دهد، که در جنوب نقشه مطلوبیت فازی به بیش از ۰/۶ می‌رسد که حاکمی از همپوشانی قابل توجه بی‌هنجاری‌های ژئوفیزیکی و ژئوشیمیایی منطبق بر واحد دولومیتی است و به‌نظر مطلوب‌ترین نواحی جهت بررسی از روش گمانه‌های اکتشافی است.

۶- نتیجه‌گیری

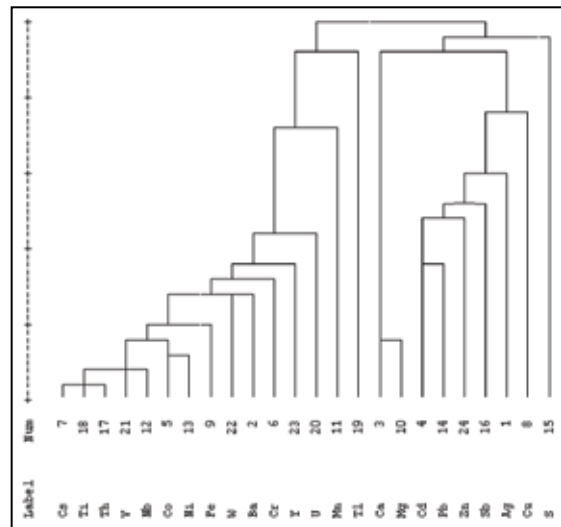
بررسی نقشه نهایی اکتشافی حاصل از تلفیق نقشه‌های فازی مقاومت ویژه، قطبش القایی، نقشه‌های پراکندگی عناصر سرب، روی، نقره، کادمیم و آنتیمون و همچنین نقشه سنگ میزبان، که با به‌کارگیری عملگرهای فازی حاصل شده است، مقادیر بالای ارزش فازی را در خاور نقشه یادشده با امتداد شمالی - جنوبی نشان می‌دهد که



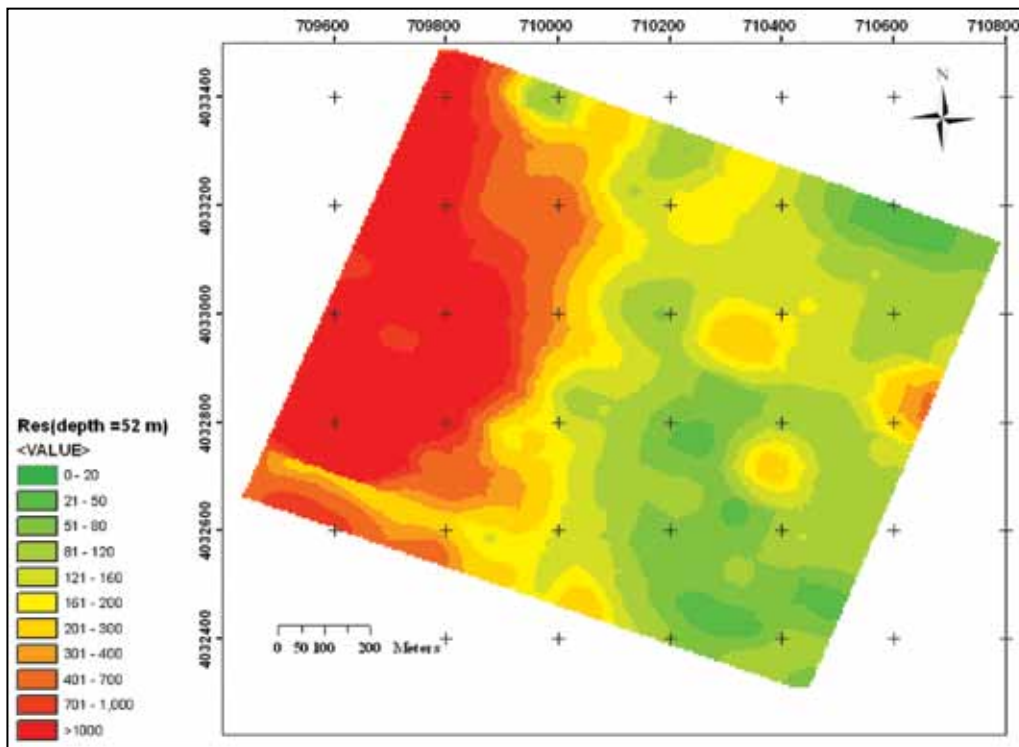
شکل ۱- نقشه زمین‌شناسی و برداشت‌های اکتشافی در منطقه



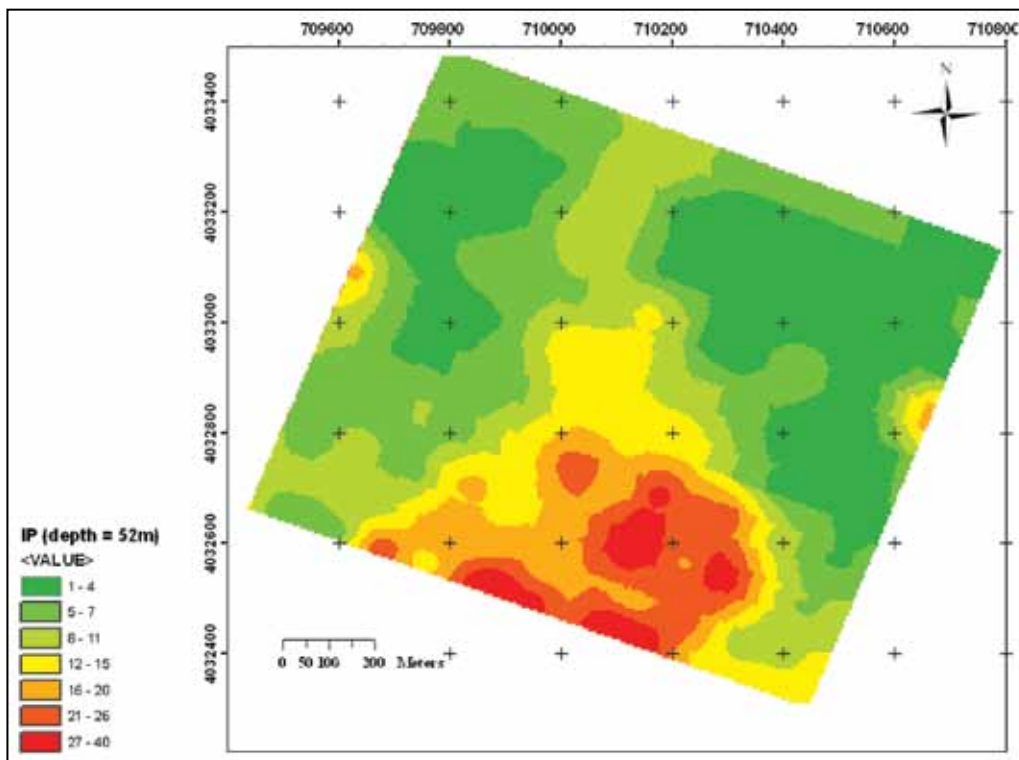
شکل ۲- مقاطع مدل‌سازی مقاومت ویژه و قطبش القایی پروفیل P-4.5s



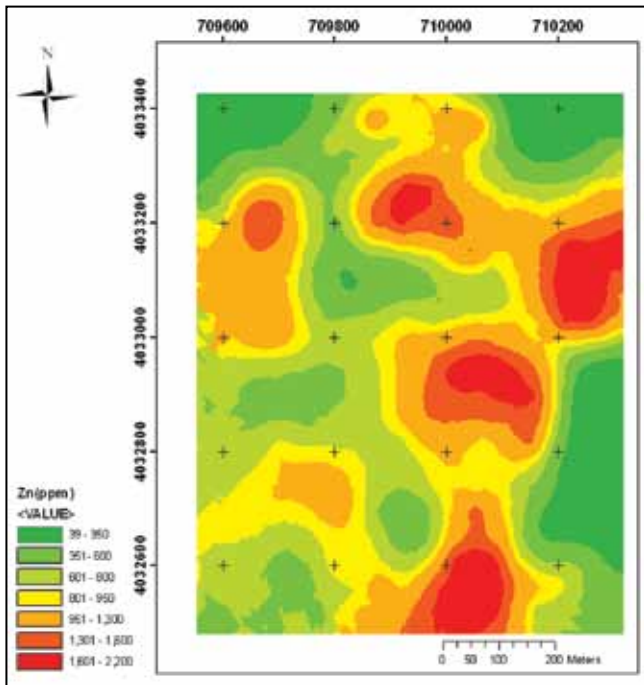
شکل ۳- دندروگرام حاصل از تحلیل خوشه‌ای عناصر



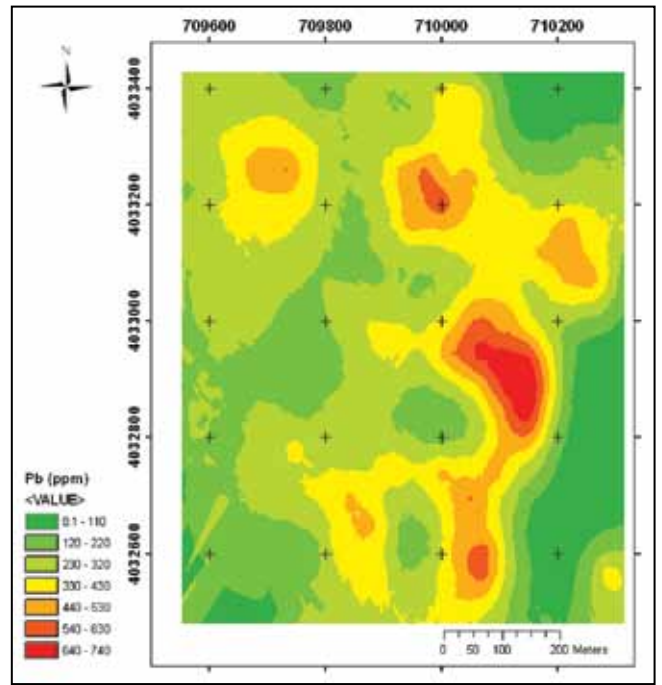
شکل ۴- نقشه اکتشافی مقاومت ویژه (ژرفای ۵۲ متر)



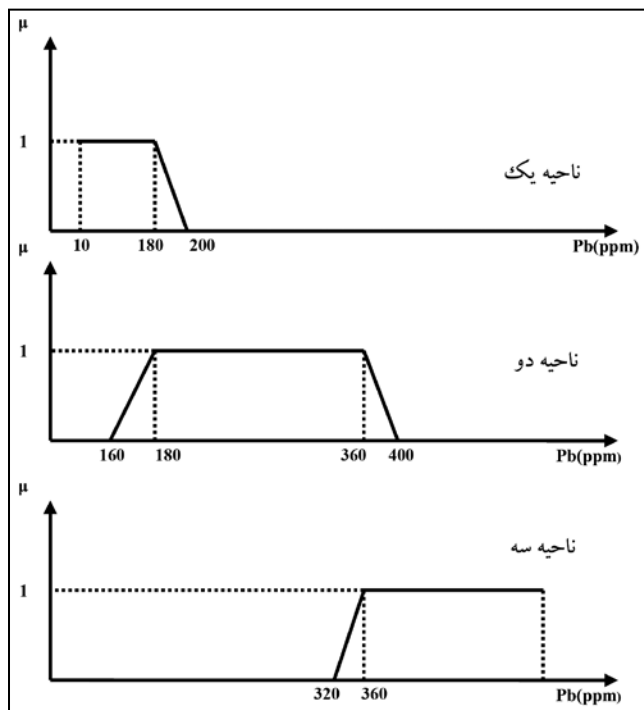
شکل ۵- نقشه اکتشافی قطبش القایی (ژرفای ۵۲ متر)



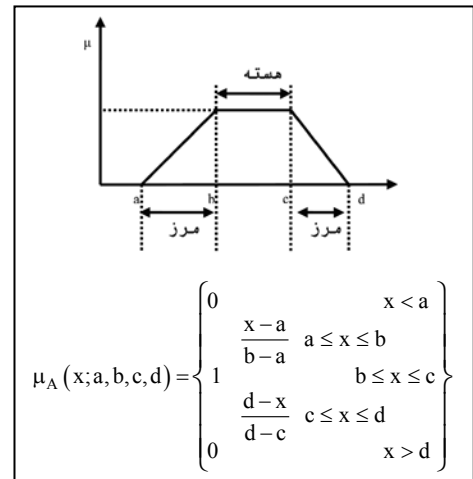
شکل ۷- نقشه توزیع عنصر روی



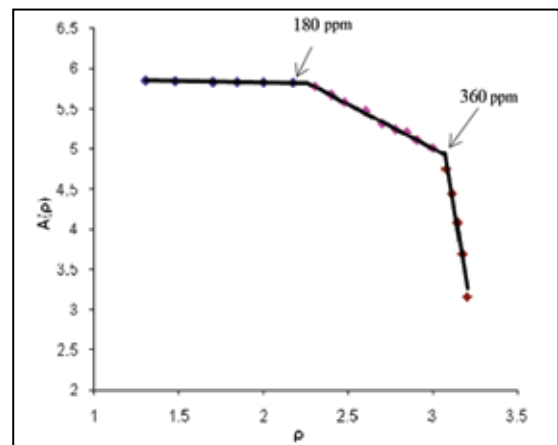
شکل ۶- نقشه توزیع عنصر سرب



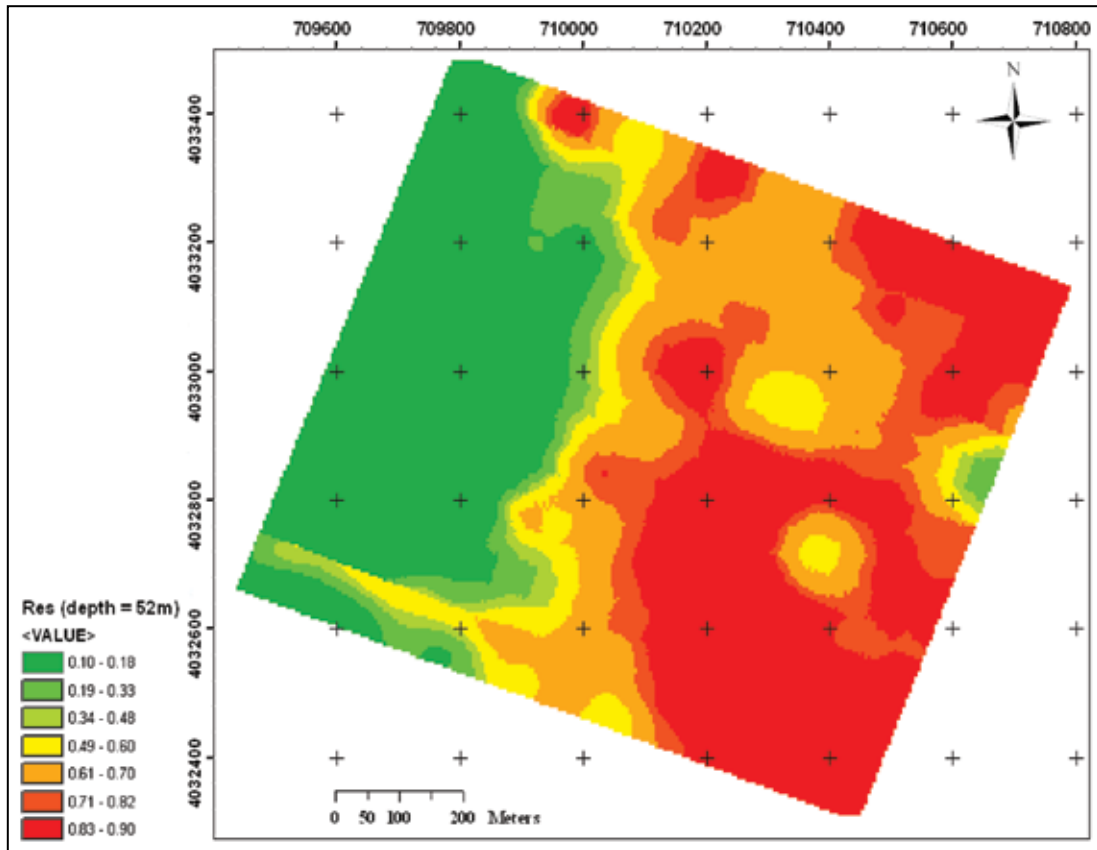
شکل ۱۰- تابع عضویت دوزنقه‌ای نقشه توزیع سرب



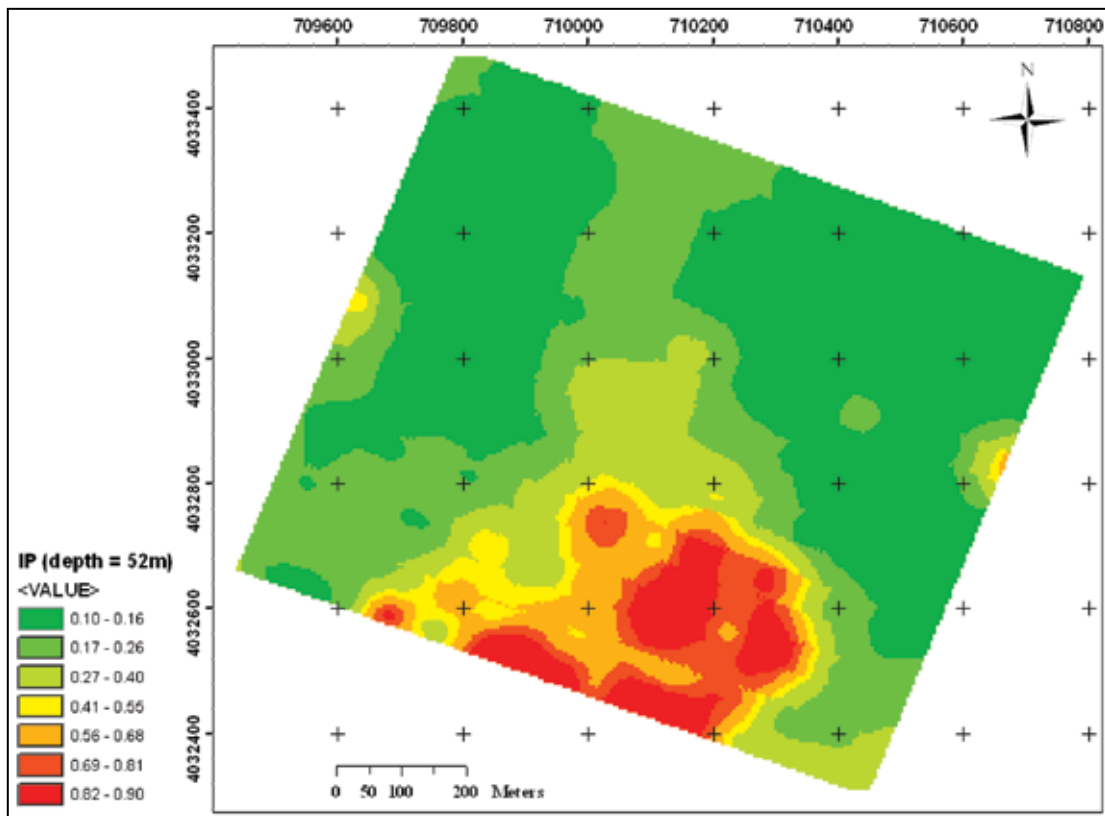
شکل ۸- تابع عضویت دوزنقه‌ای



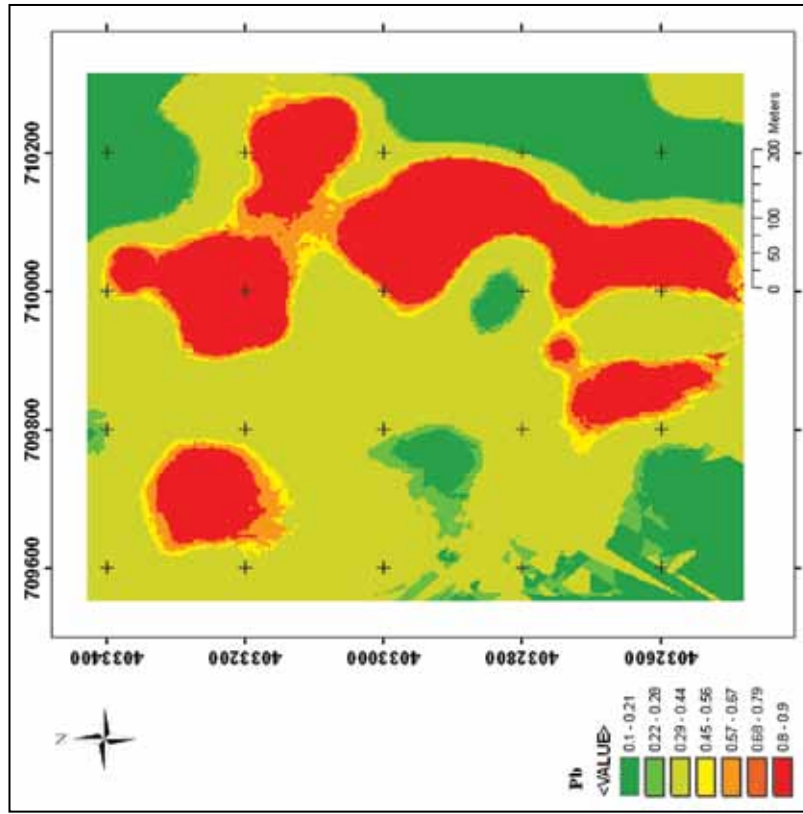
شکل ۹- نمودار لگاریتمی - لگاریتمی تغییرات مساحت تجمع و غلظت سرب



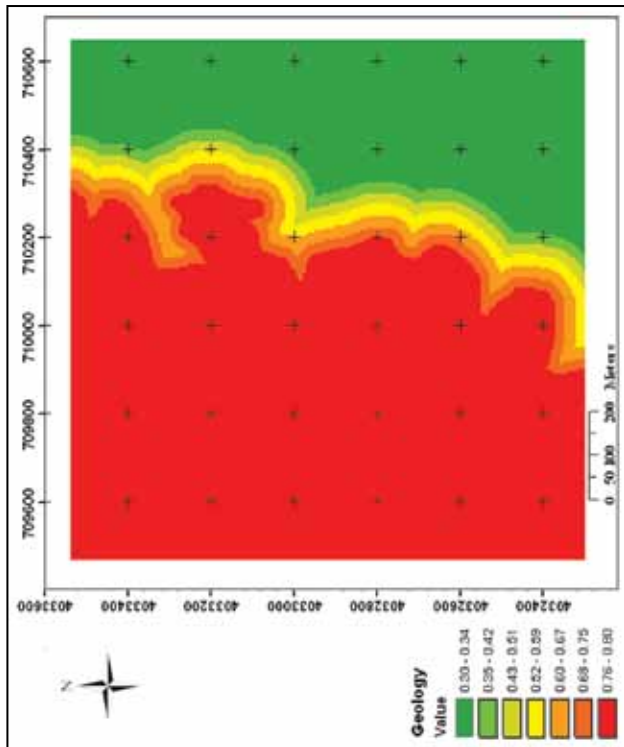
شکل ۱۱- نقشه فازی مقاومت ویژه (ژرفای ۵۲ متر)



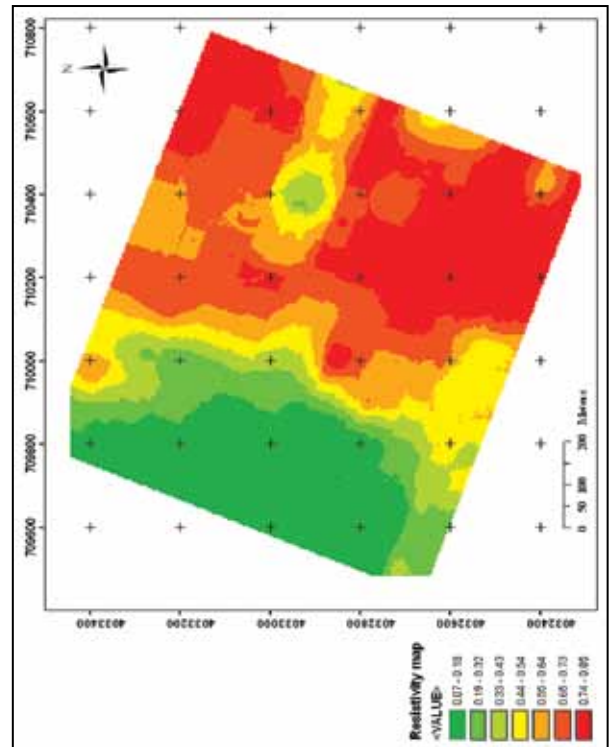
شکل ۱۲- نقشه فازی قطبش القایی (ژرفای ۵۲ متر)



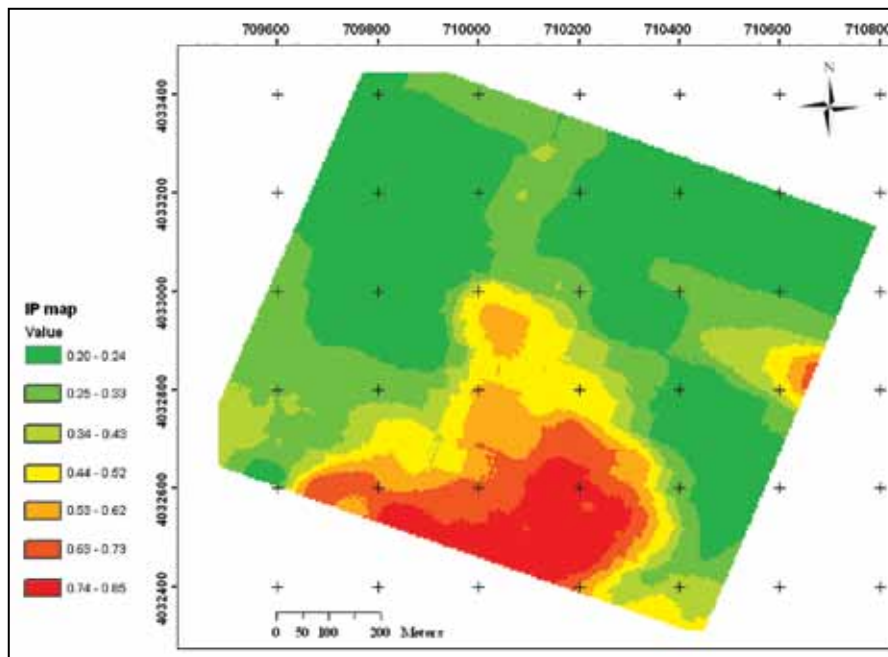
شکل ۱۳- نقشه فازی توزیع عنصر سرب



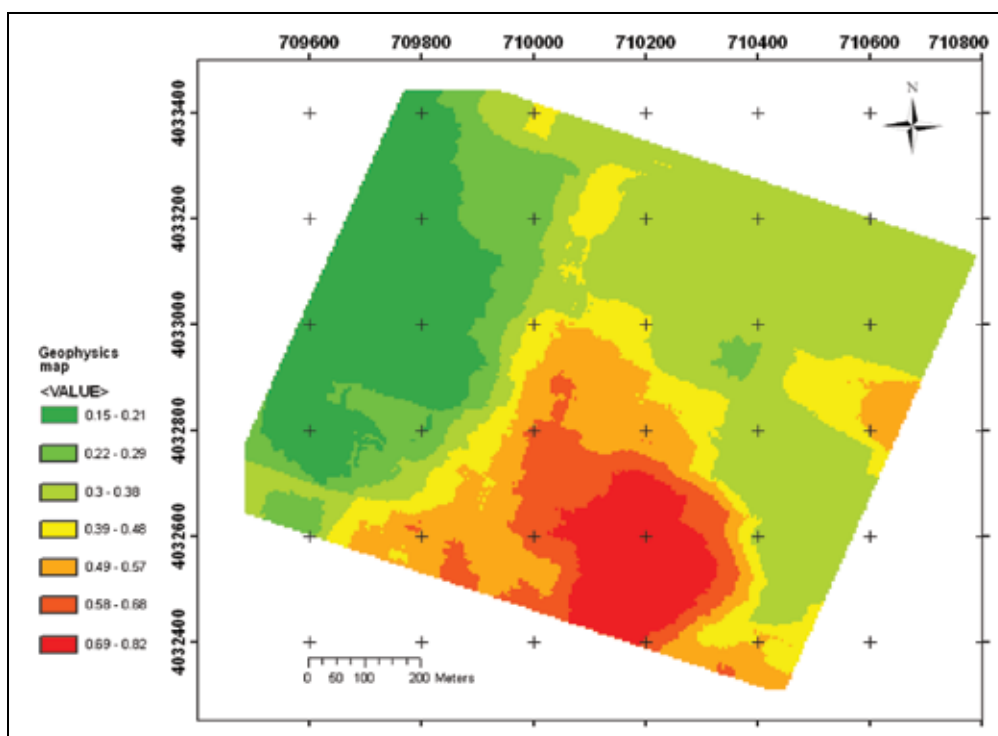
شکل ۱۴- نقشه فازی زمین‌شناسی



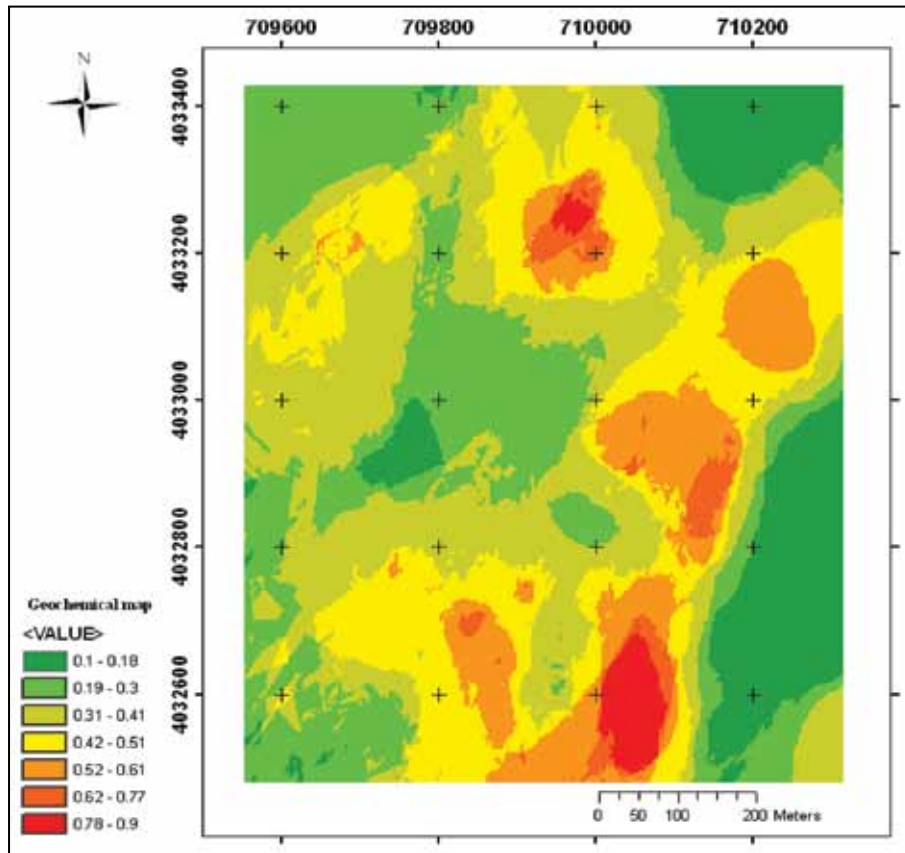
شکل ۱۵- نقشه نهایی مقاومت ویژه با به‌کارگیری رابطه (۱۳) با $\gamma = 0.9$



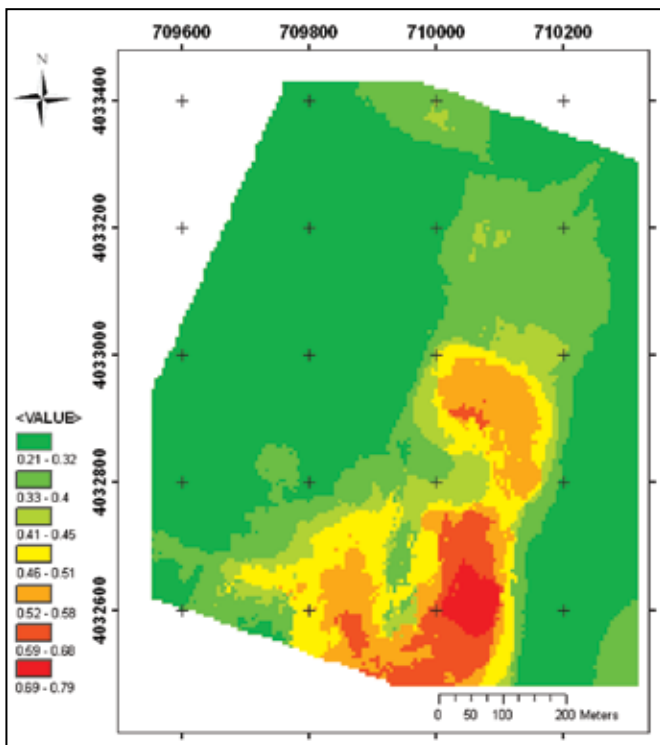
شکل ۱۶- نقشه نهایی قطبش القایی با به کارگیری رابطه (۱۳) با $\gamma = 0.95$



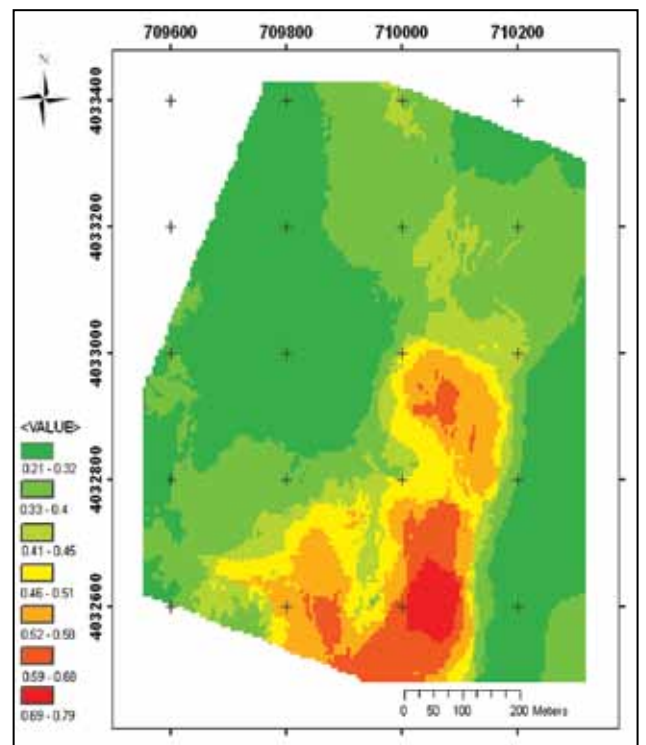
شکل ۱۷- نقشه نهایی ژئوفیزیکی منطقه چیچکلو



شکل ۱۸- نقشه نهایی ژئوشیمیایی منطقه چیچکلو



شکل ۲۰- نقشه نهایی اکتشافی با به کارگیری رابطه (۱۳) با $\gamma=0/45$



شکل ۱۹- نقشه نهایی اکتشافی با به کارگیری رابطه (۱۳) با $\gamma=0/35$

جدول ۲- عامل‌های استخراج شده ۴ مؤلفه اصلی با تحلیل عاملی

Component				Component					
1	2	3	4	1	2	3	4		
Ni	.900	.005	.248	.162	Ag	.066	.809	-.076	.193
Pb	-.342	.867	-.010	-.017	Ba	.833	-.012	.279	.074
Sb	-.015	.878	.108	.141	Ca	-.921	.151	.045	-.171
S	.263	.400	.044	.825	Cd	-.451	.737	-.114	-.216
Tl	.464	.481	.314	.300	Co	.835	.082	.345	.169
Th	.952	-.095	.210	.010	Cr	.855	-.006	.026	.230
Ti	.951	-.088	.194	-.021	Cs	.948	-.061	.190	.008
U	.810	.137	-.024	.070	Cu	.392	.681	.156	.174
V	.938	-.043	.189	.011	Fe	.844	.114	.253	.219
W	.859	-.030	.022	.216	Mg	-.903	.208	-.081	-.095
Y	.712	-.322	.300	.177	Mn	.445	-.015	.849	.025
Zn	-.192	.846	-.108	.009	Nb	.937	-.222	.147	.027

جدول ۱- متغیرهای آماری برخی از عناصر بر حسب ppm

عنصر	مقدار کمینه	مقدار بیشینه	مقدار میانگین	انحراف معیار
سرب	۱۰	۱۲۱۶	۲۱۶	۲۵۰
روی	۲۶	۳۱۷۵	۶۶۶	۶۲۶
مس	۱	۲۵۰	۲۶	۳۵
نقره	۰/۰۱	۲۵	۰/۱۵	۲/۵
آنتیموان	۰/۱	۳۰۲	۱۷	۳۱
کادمیم	۰/۲۵	۶۴۰	۲۵	۴۸

جدول ۳- روابط ریاضی توابع عضویت دوزنقه‌های نقشه‌های اکتشافی

	Area 1	Area 2	Area 3
Pb(ppm)	$f_1 = \begin{cases} 1 & x < 180 \\ \frac{1}{20}(200 - x) & 180 \leq x < 200 \\ 0 & x \geq 200 \end{cases}$	$f_2 = \begin{cases} 0 & x < 160 \\ \frac{1}{20}(x - 160) & 160 \leq x < 180 \\ 1 & 180 \leq x < 360 \\ \frac{1}{40}(400 - x) & 360 \leq x < 400 \\ 0 & x \geq 400 \end{cases}$	$f_3 = \begin{cases} 0 & x < 320 \\ \frac{1}{40}(x - 320) & 320 \leq x < 360 \\ 1 & x \geq 360 \end{cases}$
Zn(ppm)	$f_1 = \begin{cases} 1 & x < 650 \\ \frac{1}{50}(700 - x) & 650 \leq x < 700 \\ 0 & x \geq 700 \end{cases}$	$f_2 = \begin{cases} 0 & x < 600 \\ \frac{1}{50}(x - 600) & 600 \leq x < 650 \\ 1 & 650 \leq x < 1275 \\ \frac{1}{75}(1350 - x) & 1275 \leq x < 1350 \\ 0 & x \geq 1350 \end{cases}$	$f_3 = \begin{cases} 0 & x < 1200 \\ \frac{1}{75}(x - 1200) & 1200 \leq x < 1275 \\ 1 & x \geq 1275 \end{cases}$
Cd(ppm)	$f_1 = \begin{cases} 1 & x < 17 \\ \frac{1}{3}(20 - x) & 17 \leq x < 20 \\ 0 & x \geq 20 \end{cases}$	$f_2 = \begin{cases} 0 & x < 15 \\ \frac{1}{2}(x - 15) & 15 \leq x < 17 \\ 1 & 17 \leq x < 40 \\ \frac{1}{5}(45 - x) & 40 \leq x < 45 \\ 0 & x \geq 45 \end{cases}$	$f_3 = \begin{cases} 0 & x < 35 \\ \frac{1}{5}(x - 35) & 35 \leq x < 40 \\ 1 & x \geq 40 \end{cases}$
Sb(ppm)	$f_1 = \begin{cases} 1 & x < 13 \\ \frac{1}{2}(15 - x) & 13 \leq x < 15 \\ 0 & x \geq 15 \end{cases}$	$f_2 = \begin{cases} 0 & x < 11 \\ \frac{1}{2}(x - 11) & 11 \leq x < 13 \\ 1 & 13 \leq x < 40 \\ \frac{1}{5}(45 - x) & 40 \leq x < 45 \\ 0 & x \geq 45 \end{cases}$	$f_3 = \begin{cases} 0 & x < 35 \\ \frac{1}{5}(x - 35) & 35 \leq x < 40 \\ 1 & x \geq 40 \end{cases}$
Ag(ppb)	$f_1 = \begin{cases} 1 & x < 600 \\ \frac{1}{50}(650 - x) & 600 \leq x < 650 \\ 0 & x \geq 1000 \end{cases}$	$f_2 = \begin{cases} 0 & x < 550 \\ \frac{1}{100}(x - 550) & 550 \leq x < 600 \\ 1 & 600 \leq x < 2600 \\ \frac{1}{100}(2700 - x) & 2600 \leq x < 2700 \\ 0 & x \geq 2700 \end{cases}$	$f_3 = \begin{cases} 0 & x < 2500 \\ \frac{1}{500}(x - 2500) & 2500 \leq x < 2600 \\ 1 & x \geq 2600 \end{cases}$
Cu(ppm)	$f_1 = \begin{cases} 1 & x < 17 \\ \frac{1}{3}(20 - x) & 17 \leq x < 20 \\ 0 & x \geq 20 \end{cases}$	$f_2 = \begin{cases} 0 & x < 15 \\ \frac{1}{2}(x - 15) & 15 \leq x < 17 \\ 1 & 17 \leq x < 50 \\ \frac{1}{5}(55 - x) & 50 \leq x < 55 \\ 0 & x \geq 55 \end{cases}$	$f_3 = \begin{cases} 0 & x < 45 \\ \frac{1}{5}(x - 45) & 45 \leq x < 50 \\ 1 & x \geq 50 \end{cases}$

IP(ms)	$f_1 = \begin{cases} 1 & x < 10 \\ \frac{1}{5}(15-x) & 10 \leq x < 15 \\ 0 & x \geq 15 \end{cases}$	$f_2 = \begin{cases} 0 & x < 7 \\ \frac{1}{3}(x-7) & 7 \leq x < 10 \\ 1 & 10 \leq x < 20 \\ \frac{1}{5}(25-x) & 20 \leq x < 25 \\ 0 & x \geq 25 \end{cases}$	$f_3 = \begin{cases} 0 & x < 15 \\ \frac{1}{5}(x-15) & 15 \leq x < 20 \\ 1 & x \geq 20 \end{cases}$
Res(Ω)	$f_1 = \begin{cases} 1 & x > 400 \\ \frac{1}{100}(x-300) & 300 < x \leq 400 \\ 0 & x \leq 300 \end{cases}$	$f_2 = \begin{cases} 0 & x > 500 \\ \frac{1}{100}(500-x) & 400 < x \leq 500 \\ 1 & 150 < x \leq 400 \\ \frac{1}{50}(x-100) & 100 < x \leq 150 \\ 0 & x \leq 100 \end{cases}$	$f_3 = \begin{cases} 0 & x > 300 \\ \frac{1}{150}(300-x) & 150 < x \leq 300 \\ 1 & x \leq 150 \end{cases}$

کتابنگاری

حسینی پاک، ع. و شرف الدین، م.، ۱۳۸۰- تحلیل داده‌های اکتشافی، چاپ اول، انتشارات دانشگاه تهران، تهران، ۹۹۱ صفحه.
 کوثری، ۱۳۸۵- ارزیابی داده‌های اکتشافی در کانسار روی و سرب چیچکلو، تهران، ۶۷ صفحه.
 محمدی نیائی، ر.، ۱۳۷۹- گزارش مطالعات عملیاتی اکتشافی پتانسیل سرب و روی چیچکلو توسط اداره کل معادن استان آذربایجان غرب، ۷۸ صفحه.

References

- An, P., Moon, W. M. & Bonham-Carter, G. F., 1992- On a knowledge-based approach of integrating remote sensing, geophysical and geological information, Proc. IGARSS'92 (Houston, Texas), p. 34-38.
- An, P., Moon, W. M. & Rencz, A. N., 1991- Application of fuzzy theory for integration of geological, geophysical and remotely sensed data, Can. Exploration Geophysics, v. 27, no. 1, p. 1-11.
- Baglio, S., Fortuna, L., Graziani, S. & Muscato, G., 1994- Membership function shape and the dynamic behaviour of systems, Adaptive Control Signal Process, v.8, p. 369-377.
- Bonham-Carter, G. F., 1994- Geographic information systems for geoscientists: modeling with GIS, Pergamon Press, New York, 398 p.
- Brown, W. M., Gedeon, T. D., Groves, D. I. & Barnes, R. G., 2000- Artificial neural networks: a new method for mineral prospectivity mapping, Aust. Earth Sciences, v. 47, no. 4, p. 757-770.
- Carranza, E. J. M., Hale, M. & Mangaoang, J. C., 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, v. 8, no. 2, p. 165-173.
- Chung, C. F. & Agterberg, F. P., 1980- Regression models for estimating mineral resources from geological map data. Math. Geology, v. 12, no. 5, p. 473-488.
- Dubois, D. & Prade, H., 1985- A review of fuzzy set aggregation connectives, Information Sciences, v. 36, p.85-121.
- Eddy, B. G., Bonham-Carter, G. F. & Jefferson, C. W., 1995- Mineral resource assessment of the Parry Islands, high Arctic, Canada: a GIS-based fuzzy logic model, in Proc. Can. Conf. on GIS, CD ROM Session C3, Can. Ins. Geomatics, Ottawa, Canada, Paper 4.
- Harris, J. R., 1989- Data integration for gold exploration in eastern Nova Scotia using a GIS. Proc. Remote Sensing for Exploration Geology (Calgary, Alberta), p. 233-249.
- Kaymak, U., 1998- Fuzzy decision making with control applications. PhD Thesis, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands.
- Loke, M. H., 2001- Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys. Course Notes for USGS Workshop "2-D and 3-D Inversion and Modeling of Surface and Borehole Resistivity Data", Storrs, CT, 13- 16 March 2001.
- Mizumoto, M., 1989a- Pictorial representations of fuzzy connectives, part 1: case of t-norms, t-conorms and averaging operators, Fuzzy Sets and Systems, v. 31, p. 217-242.
- Mizumoto, M., 1989b- Pictorial representations of fuzzy connectives, part 2: case of compensatory operators and self-dual operators, Fuzzy Sets and Systems, v. 32, p. 45-79.
- Reddy, R. K. T. & Bonham-Carter, G. F., 1991- A decision-tree approach to mineral potential mapping in Snow Lake area, Manitoba. Can. Remote Sensing, v. 17, no. 2, p. 191-200.
- Yager, R. R., 1978- Fuzzy decision making including unequal objectives, Fuzzy Sets and Systems, v.1, p. 87-95.
- Yager, R. R., 1980- On a general class of fuzzy connectives. Fuzzy Sets and Systems, v.4, p. 235-242.
- Zadeh, L. A., 1965- Fuzzy sets. IEEE Information and Control, v. 8, no. 3, p. 338-353.
- Zadeh, L. A., 1973- Outline of a new approach to the analysis of complex system and decision processes, IEEE transactions on system, Man and Cybernetics, SMC3, p. 28-44.
- Zimmermann, H. J., & Zysno, p., 1980- Latent connectives in human decision making, Fuzzy Sets and Systems, v. 4, p. 37-51.
- Zimmermann, H. J., 1978- Results of empirical studies in fuzzy set theory, in G. J. Klir(ed.), Applied General Systems Research: Recent Developments, Plenum Press, New York, pp. 303-312.
- Zimmermann, H. J., 1987- Fuzzy Sets Decision Making and Expert Systems, Boston, Kluwer Academic Publishers.
- Zimmermann, H. J., 1991- Fuzzy set theory and its application, 2nd edn, Boston, Kluwer Academic Publishers.