

تعیین تابع عضویت فازی به کمک مدل سازی چند فرکتالی برای تهیه نقشه پتانسیل مس در منطقه ساردویه کرمان

امین ابراهیمی^۱؛ میر مسعود خیرخواه زرکش^{۲،۳}؛ پیمان افضل^{۴*}

- ۱- دانشجوی دکتری سنجش از دور و GIS، دانشکده محیط زیست و انرژی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران،
amin.gisman@gmail.com
- ۲- دانشیار گروه سنجش از دور و GIS، دانشکده محیط زیست و انرژی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران،
kheirkhah@scwmri.ac.ir
- ۳- دانشیار پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، تهران،
P_Afzal@azad.ac.ir
- ۴- دانشیار گروه مهندسی معدن، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران جنوب، تهران، ایران،
(دریافت ۲۲ خرداد ۱۳۹۵، پذیرش ۱۰ خرداد ۱۳۹۶)

چکیده

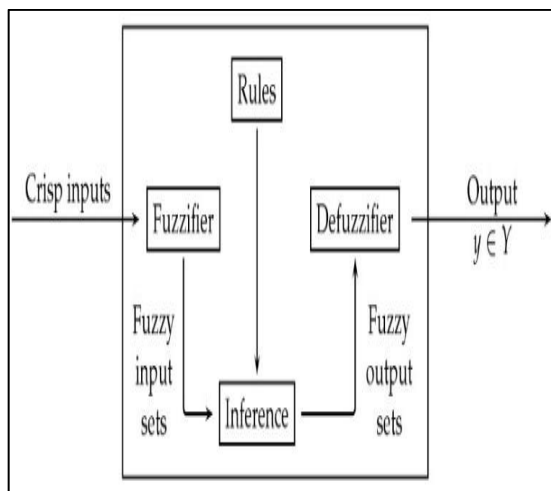
در سال‌های اخیر کارهای گوناگونی برای تلفیق لایه‌های اطلاعاتی و تعیین مناطق امیدبخش در محیط GIS به روش فازی صورت پذیرفته است. اما تعیین تابع عضویت فازی و نیز مرزبندی مناطق امیدبخش به‌طور معمول از استاندارد خاصی تبعیت نمی‌کند. در این تحقیق تلاش شده تا با استفاده از مدل سازی فرکتالی به روش عیار-مساحت علاوه بر جدایش مناطق امیدبخش از مناطق زمینه و دسته‌بندی مناطق با کانه‌زایی عنصر مس در یک گروه، راهکار مشخصی برای تعیین تابع عضویت فازی ارائه شود. این تحقیق در محدوده نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ ساردویه، با استفاده از لایه‌های اطلاعاتی ژئوشیمی رسوب آبراهه‌ای، ژئوفیزیک هوابردی، زمین‌شناسی و تصاویر ماهواره‌ای اجرا و اندازه هر سلول ۲۰۰ متر در نظر گرفته شد. درجه عضویت هر لایه با استفاده از نمودار لگاریتمی عیار-مساحت محاسبه و با اپراتور گاما تلفیق لایه‌ها انجام شد. در پایان ضمن مرزبندی نقشه پتانسیل معدنی به کمک مدل سازی مولتی‌فرکتالی، نتایج با نقشه محدوده‌های معدنی موجود تطبیق داده شد و مقدار ضریب کاپای فازی ۷۲ درصد محاسبه شد.

واژه‌های کلیدی

فرکتال، منطق فازی، تابع عضویت، پتانسیل معدنی مس، ساردویه

۱-مقدمه

تابع عضویت، مقادیر مجموعه X را به عددی در بازه $[0,1]$ می‌نگارد. تاکنون توابع عضویت گوناگونی طراحی و پیشنهاد شده است مانند توابع مثلثی، دوزنقه‌ای و گوسی. توابع عضویت از مهمترین اجزای یک سیستم استدلال فازی محسوب می‌شوند که در ابتدای فرآیند استدلال فازی برای تعیین تابع ورودی‌های کلاسیک از آن‌ها استفاده می‌شود. اما تعیین تابع عضویت یک مجموعه خاص یک استاندارد مشخص و معینی ندارد. در کارهای مختلف این تابع بر اساس نظر فرد نخبه یا داده‌های موجود استخراج و تعیین شده است [۱۰-۱۲].



نمودار ۱: مراحل تلفیق فازی

۲-۲ مدل‌سازی فرکتالی

با توجه به این‌که هندسه اقلیدسی توانایی بیان بیشتر پیچیدگی‌های موجود در طبیعت را ندارد، دانشمندان به دنبال هندسه‌ای بودند که بتواند این پیچیدگی‌ها را توصیف کند. پروفیسور ماندلبروت (۱۹۸۳) برای نخستین بار هندسه فرکتال را به‌عنوان ابزاری مناسب برای توصیف کلیه فرایندهای موجود در طبیعت معرفی کرد. به گفته او "هندسه فرکتال توصیف‌گر طبیعت است آن‌گونه که طبیعت اعمال می‌کند نه آن‌گونه که بشر می‌خواهد و این امتیاز بسیار بزرگی محسوب می‌شود". در هندسه فرکتال بعدها فرکتالی وجود دارند که به‌طور معمول اعداد صحیح نیستند و بعدها فرکتالی نامیده می‌شوند و برای بیان پیچیدگی یک شکل می‌توان از آن استفاده کرد. بر این اساس در دهه‌های ۱۹۸۰ و ۱۹۹۰ میلادی روش‌های گوناگون آنالیز فرکتالی همچون عیار-مساحت، عیار-فاصله، عیار-محیط و طیف توان ارائه شدند که در میان آن‌ها روش عیار-مساحت در علوم زمین کاربردی بسیار یافته است [۱۳-۱۵].

استفاده از سامانه اطلاعات مکانی و تکنیک‌های تلفیق داده و پردازش اطلاعات به‌منظور انتخاب بهترین مکان رو به گسترش است. روش‌های متنوعی به‌کار گرفته شده تا لایه‌های اطلاعات زمینی را با یکدیگر ترکیب و مناطق دارای پتانسیل را استخراج کند [۱]. به‌همین منظور تا کنون روش‌های مبتنی بر ریاضیات و آمار مانند [۲]، روش بیزین [۳]، و روش‌هایی مانند نشانه‌های وزن‌دار [۴]، مجموعه‌های فازی [۵] و شبکه‌های عصبی [۶] استفاده شده‌اند.

استفاده از تئوری مجموعه‌های فازی برای مدل‌سازی و تلفیق اطلاعات در اکتشاف معدن در تحقیقات مختلفی مورد استفاده قرار گرفته است [۷،۸]. اما نکته مهم و تأثیرگذار در این روش مدل‌سازی، انتخاب تابع عضویت است. تعیین تابع عضویت یک مرحله بسیار مهم در تهیه نقشه پتانسیل معدنی به روش فازی است [۹]، زیرا مقدار ارتباط و اهمیت آن شاخص با فرآیند کانی‌سازی را نشان می‌دهد. در تمام این تحقیقات اگرچه روش‌های استفاده شده در محدوده مورد مطالعه و برای هر شاخص، نتایج مطلوبی ارائه داده است اما نمی‌تواند به‌عنوان یک استاندارد ثابت در همه موارد مورد استفاده قرار گیرد. همچنین مسئله تعیین و تفکیک اولویت‌های اکتشافی و مرزبندی آن‌ها در نقشه نهایی اهمیت ویژه‌ای داشته و کار ساده‌ای نیست. در این تحقیق با استفاده از مدل‌سازی مولتی فرکتالی، ضمن ارائه روشی برای تعیین تابع عضویت فازی، راهکار مناسبی برای تفکیک جوامع و تعیین اولویت‌های اکتشافی ارائه شده است.

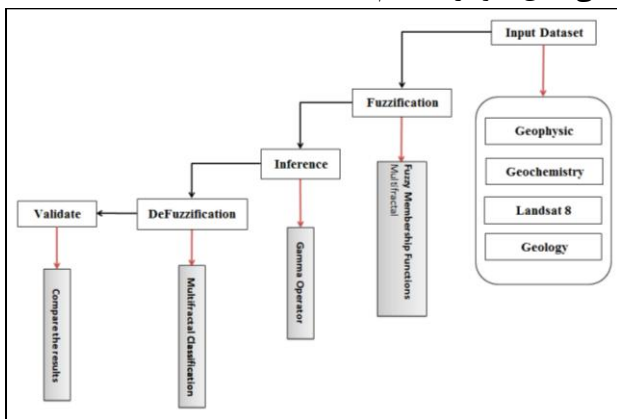
۲-مواد و روش‌ها

۲-۱ - مجموعه‌های فازی

اطلاعات زمین‌شناسی و تفسیر آن‌ها مبهم و دشوار است. تعیین مقادیر کمی برای صفاتی مانند کم، خوب، متوسط، بالا و غیره کار دشواری است. منطق فازی توسط عسگرزاده پروفیسور علوم کامپیوتر دانشگاه برکلی کالیفرنیا ارائه شد. تئوری مجموعه‌های فازی یک چهارچوب ریاضی برای تبدیل این صفات به مقادیر کمی فراهم می‌کند. در این تئوری، عضویت اعضای مجموعه از طریق یک تابع $u(x)$ مشخص می‌شود که x نمایانگر یک عضو مشخص و u تابعی است که درجه عضویت x در مجموعه مربوطه را تعیین می‌کند و مقدار آن بین صفر و یک است (فرمول ۱):

$$A = \{(X, \mu_A(x)) \mid x \in X\} \quad (1)$$

محدوده مورد مطالعه در این مقاله مربوط به نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ ساردویه است که از لحاظ کانه‌زایی مس دارای پتانسیل بالایی است. محدوده مورد مطالعه جزئی از رون ماگمایی ارومیه-دختر و بخش شمالی کمربند ماگمایی کرمان است [۲۱]. در این منطقه کانسارهای پورفیری مس به میزان زیادی وجود دارند که از جمله مهم‌ترین آن‌ها کانسارهای معروف سرچشمه و دره-زار می‌باشند [۲۲]. هدف اصلی در این مطالعه یافتن مناطق امیدبخش برای اکتشاف کانسارهای مس پورفیری می‌باشد. براساس مدل توصیفی این کانسارها که توسط کاکس و سینگر (۱۹۸۶) تهیه شده، لایه‌های اطلاعاتی آن‌ها تهیه و تعبیر شده-اند [۲۳]. داده‌های تهیه شده مربوط به این منطقه شامل داده-های ژئوفیزیک هوایی، زمین‌شناسی، ژئوشیمی، گسل‌ها، اندیس‌ها و محدوده‌های معدنی موجود و تصویر ماهواره‌ای ETM⁺ می‌باشد. همچنین تهیه نقشه شاخص در ۵ مرحله اصلی طبق نمودار ۲ انجام شد.



نمودار ۲: مراحل انجام تحقیق

در مرحله اول با استفاده از داده‌های موجود، لایه‌های اطلاعاتی به شرح زیر تهیه شد:

- تهیه نقشه مغناطیس از داده‌های ژئوفیزیک هوایی برای شناسایی توده‌های عمقی و نیز گسل‌های پی-سنگی؛
- تهیه نقشه آلتراسیون پتاسیک از داده‌های ژئوفیزیک هوایی با توجه به وجود رگه‌های مگنتیت؛
- تهیه نقشه ژئوشیمی مس از نمونه‌برداری‌های آبراهه-ای؛
- تهیه نقشه ژئوشیمی طلا از نمونه‌برداری‌های آبراهه-ای؛
- تهیه نقشه ژئوشیمی مولیبدن از نمونه‌برداری‌های آبراهه‌ای؛

روش عیار-مساحت که توسط چنگ و همکاران (۱۹۹۴) ارائه شد مبتنی بر میزان مساحتی است که هر عیار خاص در منطقه مورد مطالعه اشغال کرده است. هر چه عیار عنصر افزایش یابد میزان مساحت اشغالی توسط آن نیز کاهش می‌یابد. یکی از مرسوم‌ترین روش‌ها برای نمایش توزیع عیار یک عنصر در یک منطقه، ترسیم نقشه کنتوری (منحنی میزان) هم عیار عنصر مربوطه در منطقه مورد مطالعه است. اگر مقدار هر کنتور عیار ρ در نظر گرفته شود، می‌توان یک معادله توانی برای تمرکز مواد با خواص فرکتالی ارائه کرد [۱۶].

$$A_{>\rho} \propto \rho^{-D} \quad (2)$$

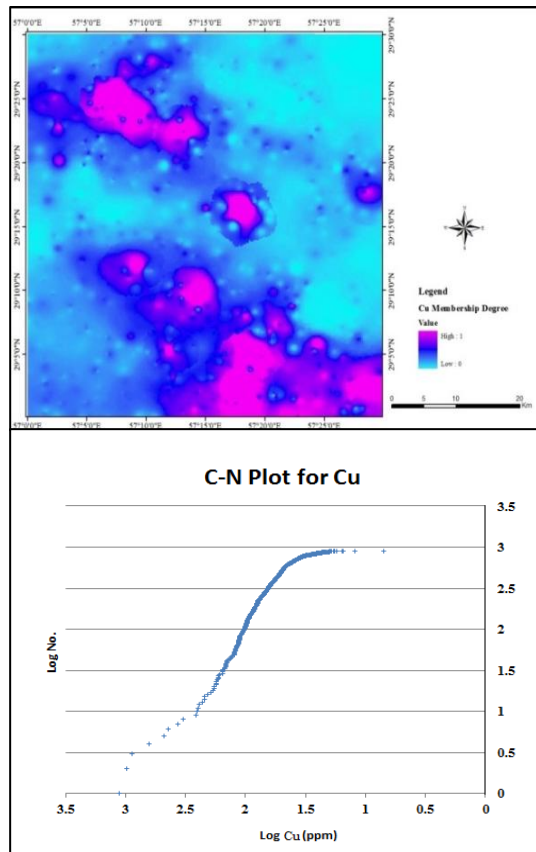
مقدار D در حقیقت نمایانگر بعد فرکتالی مربوط به دامنه‌های متفاوت ρ را نشان می‌دهد. با ترسیم تغییرات مساحت در برابر عیار در نمودار لگاریتمی می‌توان بعد هر جامعه را از طریق شیب خط برازش شده به آن حساب کرد. در این نمودار نقاط شکست در تغییر شیب خط برازش شده معین می‌شوند. این نقاط شکست بیانگر تغییر جامعه‌ای به جامعه دیگر است، به گونه‌ای که علاوه بر جدا کردن زمینه می‌توان آنومالی‌های ممکن، احتمالی و قطعی یک عنصر و حتی در برخی موارد کانی‌سازی‌های اصلی و فرعی مربوط به آن عنصر را از یکدیگر جدا کرد [۱۷].

این توانایی منحصر به فرد به خاطر ماهیت فرکتالی توزیع عناصر در طبیعت است. این مساله سبب می‌شود که نیازی به حذف مقادیر خارج از ردیف نباشد زیرا به دلیل ماهیت فرکتالی داده‌ها به‌طور خودکار این داده‌ها کنار گذاشته می‌شوند.

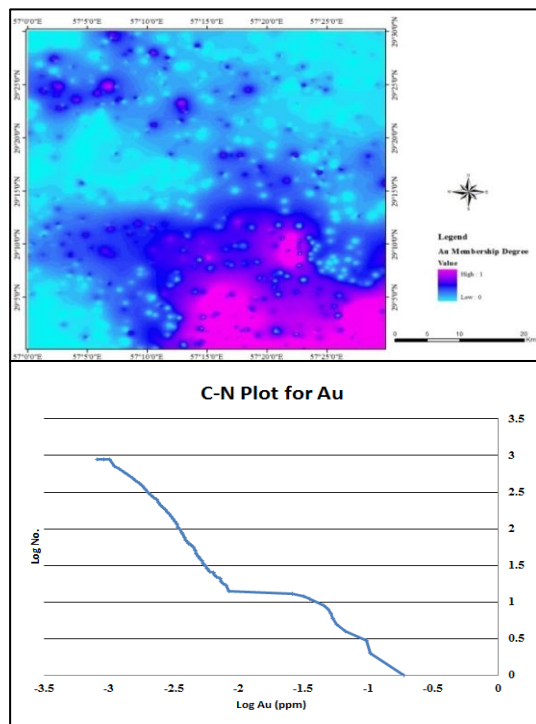
نظریه مدل‌سازی چند فرکتالی یا مولتی‌فرکتالی ناشی از طبیعت توزیع فرکتالی عناصر و نیز نوع ارتباط عیار با مساحت دربرگیرنده آن به‌صورت یک تابع توانی است یعنی اینکه در نمودار لگاریتمی عیار-مساحت حالتی پلکانی دیده می‌شود. این حالت پلکانی که تعداد تکرار نمودار در اندازه‌های مختلف را نشان می‌دهد می‌تواند نمایانگر تعداد مرحله‌های غنی‌شدگی عناصر و به تبع آن تعداد مراحل کانی‌زایی و نیز پراکندگی‌های ثانویه در منطقه مورد مطالعه باشد.

در سال‌های اخیر مطالعاتی براساس مدل‌سازی توام فازی و فرکتالی بخصوص در مطالعات ژئوشیمیایی اکتشافی صورت پذیرفته است [۱۸-۲۰].

۲-۳ پیش پردازش و آماده‌سازی داده‌ها



شکل ۱: فازی سازی نقشه مس و نمودار لگاریتمی عیار-مساحت



شکل ۲: فازی سازی نقشه طلا و نمودار لگاریتمی عیار-مساحت

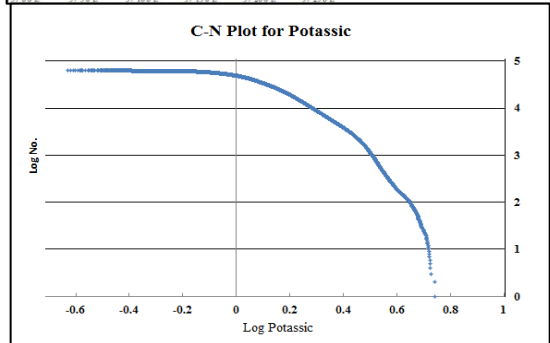
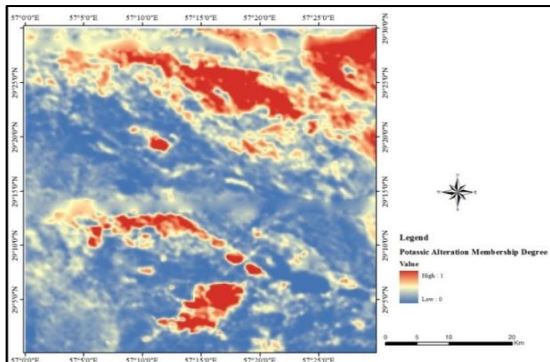
- تهیه نقشه دانسیته گسل از نقشه زمین شناسی به- دلیل اهمیت زیاد ساختارها در تیپ پورفیری؛
- تهیه نقشه واحدهای سنگی از نقشه زمین شناسی برای تعیین توده های نفوذی نیمه عمیق. برای لایه زمین شناسی نخست واحدها کدگذاری شدند و سپس فازی سازی شدند؛
- تهیه نقشه آلتراسیون آرژیلیک به روش مولفه اصلی از تصویر ماهواره ETM^+

کلیه نقشه های فوق به همراه نقشه زمین شناسی منطقه، به شکل رستر و اندازه پیکسل ۲۰۰ متر تهیه شدند. در مرحله فازی سازی برای تعیین درجه عضویت هر پیکسل ابتدا باید یک تابع عضویت تعریف شود. همان طور که اشاره شد برای تعریف تابع عضویت استاندارد مشخصی وجود ندارد. اگرچه توابع متنوعی تاکنون ارائه شده است اما انتخاب از بین آنها و تعیین پارامترهای مورد نیاز هر تابع کار آسانی نیست. در بسیاری موارد از توابع فازی هلالی ۱ استفاده شده است اما نکته مهم تعیین شیب در این توابع است. با توجه به این که تغییرات شیب در نمودار لگاریتمی عیار-مساحت نشان دهنده تغییرات از زمینه به سمت آنومالی است بنابراین می توان با نرمال سازی مقدار لگاریتم مساحت در نمودار مذکور درجه عضویت هر پیکسل را محاسبه کرد. این تابع نرمال سازی که داده ها را به مقیاس ۰ تا ۱ انتقال می دهد به شرح زیر است:

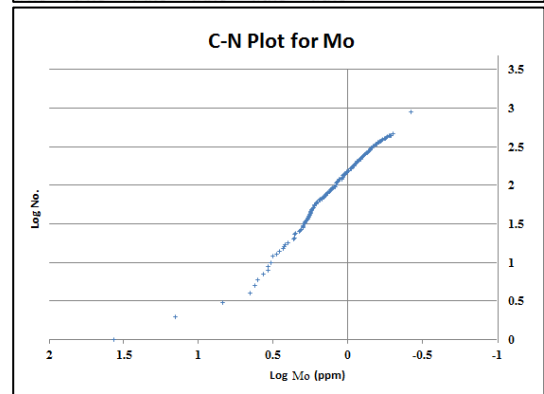
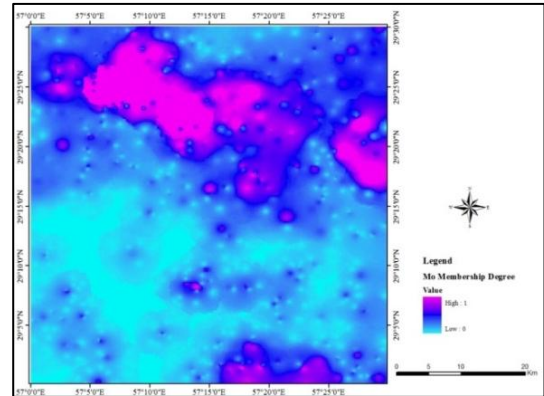
$$Z(x_i) = \text{Log} \left[\sum_{x_j \leq x} P(x_j) \right] \quad (3)$$

$$\mu(x_i) = \frac{z(x_i) - \min_{z(x_j)}}{\max_{z(x_j)} + \min_{z(x_j)}} \quad (4)$$

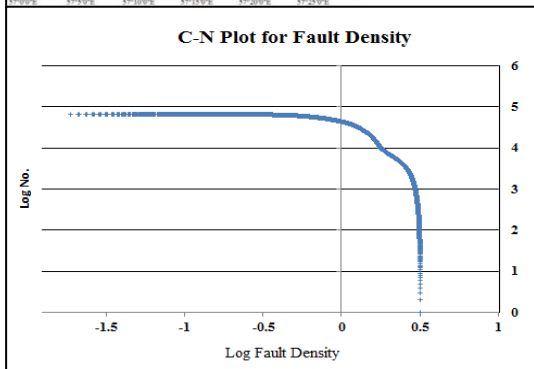
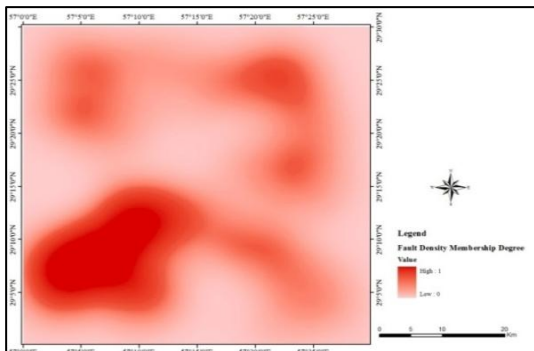
اشکال ۱ تا ۸ نقشه های فازی سازی شده با تابع بالا را نمایش می دهند. در سمت چپ هر تصویر نمودار لگاریتمی عیار-مساحت نشان داده شده است. به کمک این تابع، درجه عضویت هر پیکسل به دست آمد.



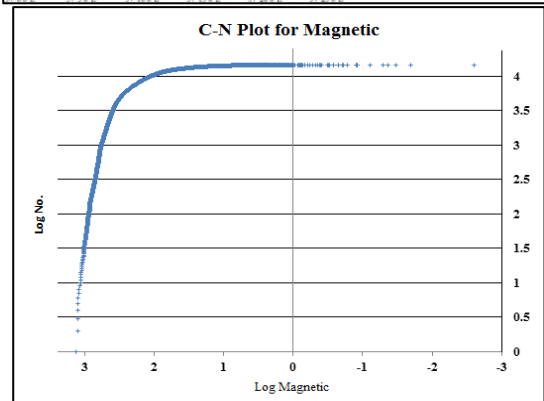
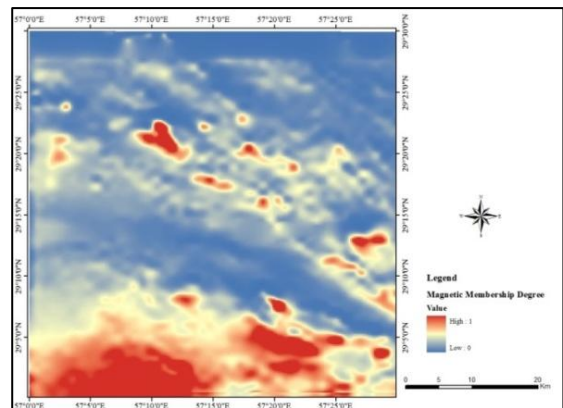
شکل ۵: فازی سازی نقشه آلتراسیون پتاسیک و نمودار لگاریتمی عیار-مساحت



شکل ۳: فازی سازی نقشه مولیبدن و نمودار لگاریتمی عیار-مساحت



شکل ۶: فازی سازی نقشه چگالی گسل و نمودار لگاریتمی عیار-مساحت



شکل ۴: فازی سازی نقشه شدت میدان مغناطیسی و نمودار لگاریتمی عیار-مساحت

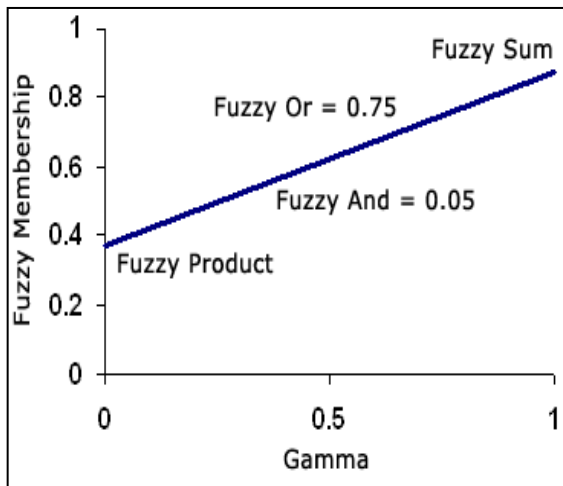
همان‌طور که در تصاویر بالا مشاهده می‌شود اگرچه شیب نمودار در لایه‌های مختلف متفاوت و در برخی لایه‌ها مانند شدت میدان مغناطیسی و چگالی گسل‌ها این شیب بسیار زیاد است اما بررسی نتایج نشان از منطقی بودن درجه عضویت محاسبه شده برای هر لایه است.

۴-۲ تلفیق اطلاعات و تهیه نقشه پتانسیل

اپراتورهای مختلفی مانند جمع، ضرب، گاما و غیره برای همپوشانی لایه‌ها به روش فازی وجود دارد. اپراتور ضرب حساسیت زیاد و برعکس اپراتور جمع حساسیت کمی به تغییر مقادیر هر یک از لایه‌های ورودی دارد. بنابراین برای تعدیل این حساسیت می‌توان از اپراتور گاما (فرمول ۵) استفاده کرد.

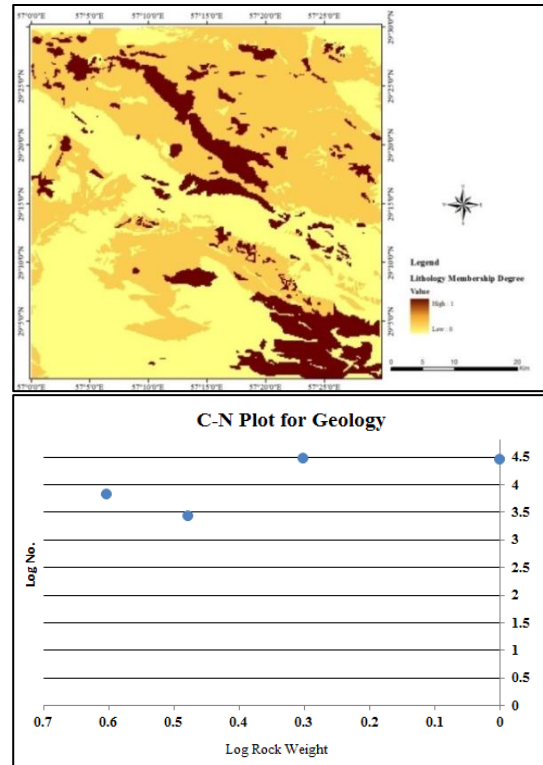
$$\mu(x) = (\text{FuzzySum})^\gamma * (\text{FuzzyProduct})^{1-\gamma} \quad (5)$$

نمودار ۳ ارتباط بین اپراتورهای مختلف را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌کنید در صورتی که γ برابر با صفر در نظر گرفته شود مقدار خروجی اپراتور گاما با اپراتور ضرب برابر خواهد بود.

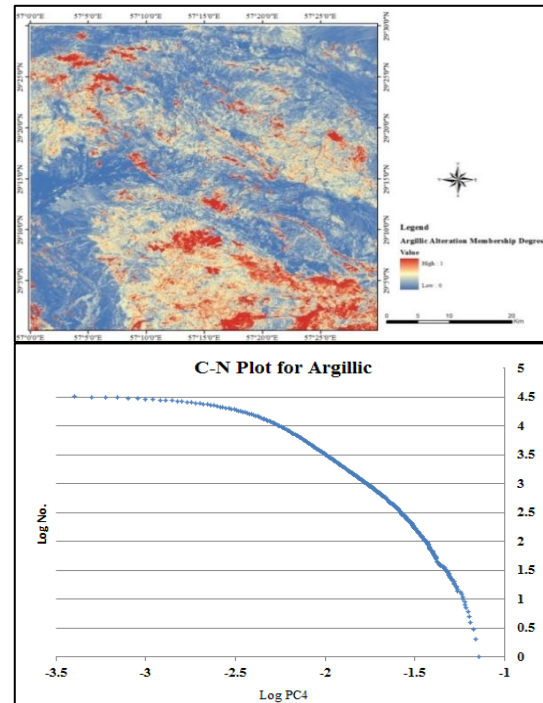


نمودار ۳: مقایسه توابع Sum و Product با تابع Gamma

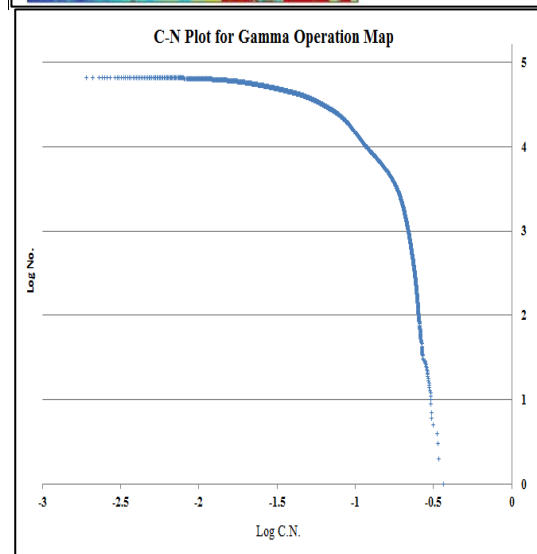
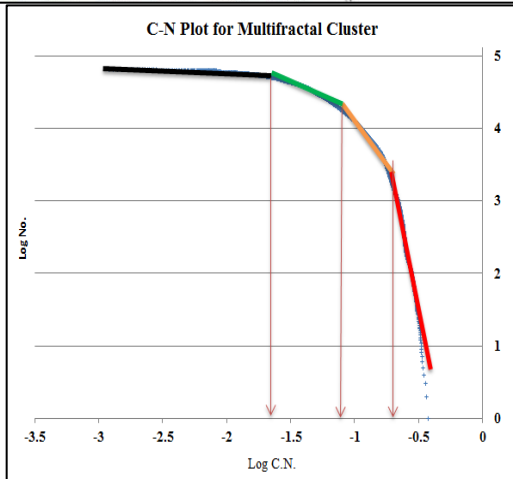
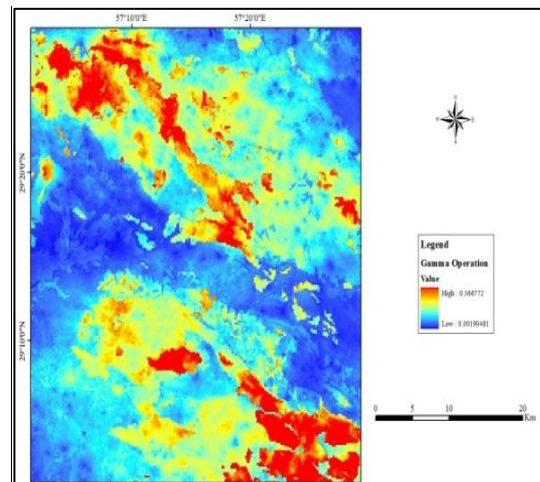
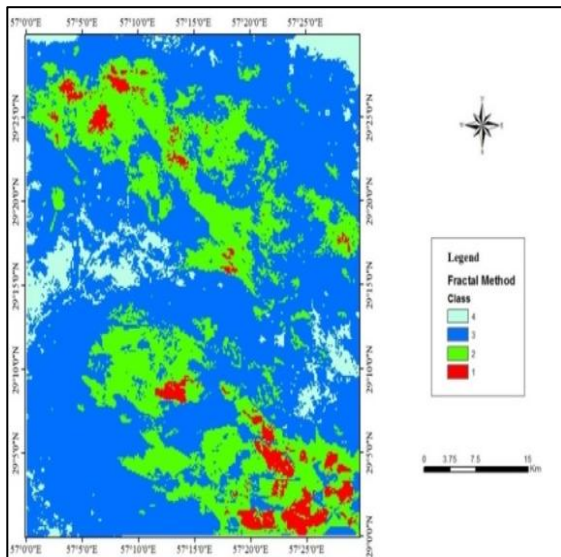
پس از فازی‌سازی لایه‌ها، نقشه پتانسیل با استفاده از اپراتور گاما با $\gamma=0.9$ تولید شد.



شکل ۷: فازی‌سازی نقشه واحدهای سنگی و نمودار لگاریتمی عیار-مساحت



شکل ۸: فازی‌سازی نقشه آلتراسیون آرژیلیک و نمودار لگاریتمی عیار-مساحت



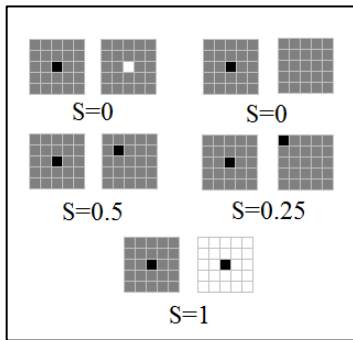
شکل ۱۰: نقشه اولویت‌های اکتشافی و نمودار شکستگی‌ها در نمودار لگاریتمی عیار-مساحت

شکل ۹: نقشه پتانسیل معدنی پس از تلفیق با اپراتور گاما و نمودار لگاریتمی عیار-مساحت

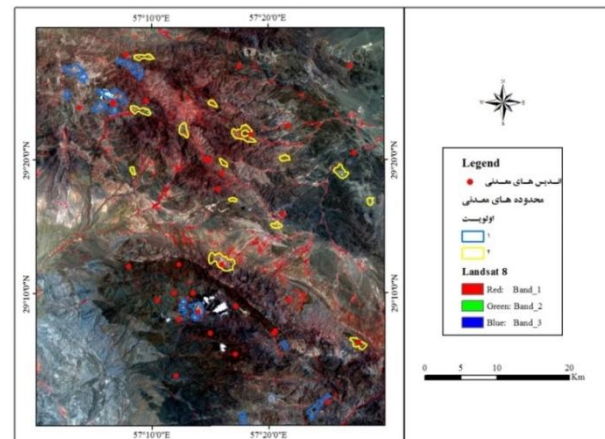
۳- نتایج و پیشنهادات

۳-۱ بررسی ماتریس خطا و محاسبه ضریب کاپای فازی^۵ به‌منظور بررسی نتایج و تعیین میزان تطبیق اولویت‌های اکتشافی (شکل ۱۰)، محدوده‌ها و اندیس‌های معدنی موجود در منطقه و محدوده‌های اکتشافی شرکت ملی مس ایران استفاده شد. این محدوده‌ها از جهت اهمیت به دو اولویت ۱ و ۲ تقسیم‌بندی شده‌اند.

اما حالا انتخاب یک مرز مشخص برای تعیین محدوده‌های اکتشافی پیشنهادی نیز از یک روش استاندارد و مشخصی پیروی نمی‌کند. به‌همین منظور از مدل‌سازی مولتی‌فرکتالی استفاده شد. شکل ۱۰ نمودار لگاریتمی عیار-مساحت نقشه پتانسیل (شکل ۹) به همراه نقشه اولویت‌های اکتشافی که بر اساس شکستگی‌های این نمودار مرزبندی شده‌اند را نشان می‌دهد.



شکل ۱۲: مقدار شباهت سلول مرکزی



شکل ۱۱: محدوده و اندیس‌های معدنی در محدوده نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ ساردوئیه

به کمک نرم‌افزار Map Comparison Kit ضریب کاپای فازی برای مقایسه نتایج حاصل با معادن موجود محاسبه شد. همان‌طور که در جدول شماره ۲ مشاهده می‌کنید ضریب کاپای فازی ۰٫۷۲، محاسبه شده است.

جدول ۲: ماتریس خطا همراه با مقادیر ضریب کاپای فازی برای روش مولتی فرکتال

ضریب کاپا	۰٫۷۲		
تصحیح خطا	۰٫۸۱		
Multi Fractal \ Mines	۱	۲	مجموع
	۱	۳۰۹	۱۴
۲	۱۸۶	۵۵۶	۷۴۲
مجموع	۴۹۵	۵۷۰	۱۰۶۵

در این قسمت با تهیه ماتریس خطا به بررسی میزان دقت نتایج می‌پردازیم. با استفاده از این ماتریس مقدار خطاهای امیسیون و کمیسیون نیز قابل اندازه‌گیری است. خطای کمیسیون مربوط به پیکسل‌هایی است که متعلق به آن کلاس نبوده ولی به آن کلاس نسبت داده شده است و خطای امیسیون مربوط به آن پیکسل‌هایی است که متعلق به آن کلاس بوده ولی به آن کلاس نسبت داده نشده است. میزان دقت هر کلاس و نیز صحت کلی نیز به کمک این ماتریس قابل محاسبه است. صحت کلی به‌عنوان یک معیار ارزش‌گذاری برای صحت طبقه‌بندی است.

جدول ۱: ماتریس خطا همراه با مقادیر صحت کلی و ضریب کاپا برای نقشه اولویت‌های اکتشافی

Multi Fractal \ Mines	Omissions	Commissions	دقت نتایج
1	۳۷/۵۸	۲/۸۳	۶۰/۷۱
2	۲/۴۶	۳۲/۶۳	۷۳/۵۴
درصد همپوشانی نهایی	OA=۷۵		

۴- بحث و نتیجه‌گیری

همان‌طور که بررسی ماتریس خطا، صحت کلی و ضریب کاپای فازی نشان می‌دهد مدل‌سازی مولتی‌فرکتالی با دقت مناسبی توانسته است محدوده‌های دارای پتانسیل را شناسایی کند. در واقع تابع عضویت تعریف شده بر اساس نمودار لگاریتمی عیار-مساحت، راهکاری مناسب و در عین حال ساده برای تخمین درجه عضویت ارائه می‌دهد. همچنین مدل‌سازی مولتی‌فرکتالی عیار-مساحت می‌تواند به‌عنوان یک تکنیک در جداسازی مرز جوامع به کار گرفته شود. اگر چه تحقیق پیش رو برای

یکی دیگر از معیارهای تعیین صحت کل، ضریب کاپای فازی است. این ضریب به دلیل آن که پیکسل‌های درست طبقه‌بندی نشده را نیز در نظر می‌گیرد از معیار صحت کلی، گویاتر است. شکل ۱۲ نحوه محاسبه میزان شباهت یک سلول را نشان می‌دهد.

- [8] Ghanbari Y, Hezarkhani A, Ataei M, Pazand K (2012) Mineral potential mapping with fuzzy models in the Kerman–Kashmar Tectonic Zone, Central Iran. *Appl Geomater* 4(3):173–186.
- [9] Carranza EJM, Hale M (2001) geologically constrained fuzzy mapping of gold mineralization potential, Baguio district, Philippines. *Natural Resources* 10:125–136.
- [10] Nykänen V, Groves DI, Ojala VJ, Eilu P, Gardoll SJ (2008) Reconnaissance-scale conceptual fuzzy-logic prospectively modeling for iron oxide copper–gold deposits in the northern Fennoscandian Shield, Finland. *Aust J Earth Sci* 55:25–38.
- [11] Karimi M., Menhaj M.B., Mesgari M.S. 2008: Mineral potential mapping of copper minerals using fuzzy logic in GIS environment, ISPRS 2008, Beijing, China.
- [12] Yousefi M, Carranza EJM (2014). Fuzzification of continuous-value spatial evidence for mineral prospectively mapping, *Computers & Geosciences*
- [13] Afzal, P., Khakzad, A., Moarefvand, P., Rashidnejad Omran, N., Esfandiari, B., Fadakar Alghalandis, Y., 2010. Geochemical anomaly separation by multifractal modeling in Kahang (Gor Gor) porphyry system, Central Iran. *Journal of Geochemical Exploration* 104, 34–46.
- [14] Afzal, P., Fadakar Alghalandis, Y., Khakzad, A., Moarefvand, P., Rashidnejad Omran, N., 2011. Delineation of mineralization zones in porphyry Cu deposits by fractal concentration-volume modeling. *Journal of Geochemical Exploration* 108, 220–232.
- [15] Afzal P, Fadakar Alghalandis Y, Moarefvand P, Rashidnejad Omran N, Asadi Haroni H (2012) Application of power-spectrum–volume fractal method for detecting hypogene, supergene enrichment, leached and barren zones in Kahang Cu porphyry deposit, Central Iran. *J Geochem Explor* 112:131–138
- [16] Cheng, Q., Agterberg, F.P., Ballantyne, S.B., 1994. The separation of geochemical anomalies from background by fractal methods. *J Geochem Explor* 51: 109–130.
- [17] Li, C.J., Ma, T.H., Shi, J.F., 2003. Application of a fractal method relating concentration and distances for separation of geochemical anomalies from background. *J Geochem Explor* 77: 167–175.
- [18] Yousefi, M., Kamkar-Rouhani, A., Carranza, E.J.M., 2012. Geochemical mineralization probability index (GMPI): a new approach to generate enhanced stream sediment geochemical evidential map for increasing probability of

مدل‌سازی و تهیه نقشه پتانسیل معدنی به کار گرفته شده است اما با توجه به مبانی هندسه فرکتال و مجموعه‌های فازی می‌تواند در زمینه‌های دیگر علوم زمین مانند زمین لغزش، کشاورزی، ارزیابی پتانسیل آبهای زیرزمینی و هیدرولوژی مورد استفاده قرار گیرد.

با توجه به این‌که تاکنون استفاده از روش مدل‌سازی فازی-فرکتالی در تحلیل‌های مکانی رایج نبوده و به‌طور گسترده مورد استفاده قرار نگرفته است، پیشنهاد می‌شود این روش مدل‌سازی با توابع فازی دیگر مانند توابع هلالی بررسی و مقایسه شود.

یکی از مشکلات مهم در این تحقیق حجم بالای اطلاعات بود که باعث شد سائز سلول‌ها ۲۰۰ متر در نظر گرفته شود. همچنین پیشنهاد می‌شود در تحقیقات بعدی از داده‌های با مقیاس بزرگتر استفاده شود.

مراجع

- [1] Porwal A., Carranza E.J.M., Hale M. 2003: Knowledge-driven and data-driven fuzzy models for predictive mineral potential mapping. *Natural Resources Research*, v. 12(1), p. 1-25.
- [2] Chung, C.F., Agterberg, F.P., 1980. Regression models for estimating mineral resources from geological map data. *Mathematical Geology* 12 (5), 473–488.
- [3] Bonham-Carter, G.F., Agterberg, F.P. and Wright, D.F., 1988, Integration of geological datasets for gold exploration in Nova Scotia: *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, v. 54(11), p. 1585-1592.
- [4] Agterberg, F.P., and Cheng, Q., 2002. Conditional independence test for weights-of-evidence modeling. *Natural Resources Research*, v. 11(4), p. 249-255.
- [5] Chung, C. F. and Fabbri, A. G.: 1993, the representation of geoscience information for data integration, *Nonrenewable Resources*, 2-2, 122–139.
- [6] Singer, D. A., and Kouda, R., 1996, Application of a feed forward neural network in the search for Kuroko deposits in the Hokuroku district, Japan. *Mathematical Geology*, 28, 1017–1023.
- [7] Najafi, A., Karimpour, M.H., Ghaderi, M. (2014): Application of fuzzy AHP method to IOCG prospectivity mapping: A case study in Taherabad prospecting area, eastern Iran, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, v. 33, p. 142-154, DOI: 10.1016/j.jag.2014.05.003.

[22] Shahabpour, J., Kramers, J.D., 1987. Lead isotope data from the Sar Cheshmeh porphyry copper deposit, Kerman. Iran. Mineral. Deposita 22, 278–281.

[23] Cox, D. Singer, D., 1986. Mineral deposits models. U.S. geological survey bulletin, 1693 pp.

success in mineral potential mapping. J Geochem Explor 115: 24-35.

[19] Yousefi, M., Kamkar-Rouhani, A., Carranza, E.J.M., 2014. Application of staged factor analysis and logistic function to create a fuzzy stream sediment geochemical evidence layer for mineral prospectivity mapping. Geochemistry: Exploration, Environmental, Analysis 14: 45-58.

[20] Yousefi, M., Nykänen, V, 2016. Data-driven logistic-based weighting of geochemical and geological evidence layers in mineral prospectivity mapping. J Geochem Explor 164: 94-106.

[21] Shafiei, B., 2010. Lead isotope signatures of the igneous rocks and porphyry copper deposits from the Kerman Cenozoic magmatic arc (SE Iran), and their magmatic–metallogenetic implications. Ore Geol. Rev. 38, 27–36.

¹ Sigmoid Fuzzy Functions

² Sum

³ Product

⁴ Gamma

⁵ Fuzzy Kappa Coefficient

⁶ Omission

⁷ Commision