

بهبود در نقشه‌های نواحی امیدبخش اکتشافی با استفاده از رویکرد ترکیبی فرایند تحلیل شبکه‌ای - تاپسیسی

رضا قاسمی^۱، بهزاد تخم‌چی^۲ و گریگور بورگ^۳

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

^۲دانشیار، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

^۳استاد، انستیتوی علوم زمین و جغرافیا، دانشگاه مارتین لوتر، هاله ویتنبرگ، آلمان

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۹/۰۷ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۲/۳۱

چکیده

افزایش در صحت خروجی نقشه‌های نواحی امیدبخش اکتشافی و همچنین کاهش مساحت فضای جستجو در اکتشاف از اهداف اصلی پی‌جویی اکتشافی است. انتخاب صحیح روش تلفیق داده‌های اطلاعاتی که بیشترین تطابق را با ماهیت داده‌های مورد استفاده داشته باشد، اولین قدم در این راه است. با توجه به اینکه داده‌های اکتشافی عموماً به صورت دوطرفه به یکدیگر وابسته‌اند و با توجه به شرط ارتباط یک‌طرفه در داده‌های مورد ارزیابی در روش تحلیل سلسله مراتبی، در این تحقیق از رویکرد تحلیل شبکه‌ای استفاده شد که می‌تواند ارتباط دوطرفه بین معیارها و زیرمعیارها را مدل کند. در این تحقیق داده‌های اکتشافی مربوط به منطقه بوانات در استان فارس جهت تهیه نقشه نواحی امیدبخش اکتشافی ذخایر ماسیوسولفید تیب بشی با استفاده از این رویکرد استفاده و سعی در بهینه کردن دو فاکتور صحت و مساحت جستجو شد. به صورتی که بالاترین میزان صحت نتایج با کمترین میزان مساحت جستجو محقق شود. نتایج تحقیق نشان می‌دهد که محدوده‌های پیشنهادی توسط رویکرد تحلیل شبکه‌ای در مقایسه با روش تحلیل سلسله مراتبی که هر دو روش دانش‌محور هستند، صحت بیشتر و همچنین مساحت کمتری دارند. بر اساس این نتایج، میزان مساحت محدوده‌های پیشنهادی با استفاده از این رویکرد از ۱۱۳۸/۴ کیلومتر مربع در رویکرد AHP به ۹۵۲/۶ کیلومتر مربع در رویکرد ANP، ۱۷ درصد کاهش و میزان صحت نتایج بیش از ۶ درصد افزایش پیدا کرده است. شاخص منحنی مشخصه عملکرد سیستم (ROC) برای رویکرد تحلیل سلسله مراتبی ۰/۷۶۰۹ بوده که به وسیله رویکرد تحلیل شبکه‌ای به ۰/۸۲۷۵ بهبود یافته است.

کلیدواژه‌ها: نقشه نواحی امیدبخش اکتشافی، فرایند تحلیل شبکه‌ای، سامانه اطلاعات مکانی، افزایش صحت نتایج، کاهش مساحت فضای جستجو.

E-mail: mrghasemi20@yahoo.com

*نویسنده مسئول: رضا قاسمی

۱- پیش‌نوشتار

یکی از اهداف اصلی در پی‌جویی و اکتشاف مواد معدنی به وسیله تولید نقشه‌های امیدبخش اکتشافی، افزایش در میزان صحت در نتایج نقشه‌های امیدبخش اکتشافی و همچنین کاهش در میزان مساحت فضایی است که این نقشه‌ها پیشگویی می‌کنند. مهم‌ترین عامل در حصول چنین خصوصیتی در نتایج، انتخاب روش صحیحی جهت تلفیق داده‌هاست که بتواند دو فاکتور فوق را ارضا کند. روش تلفیق مناسب باید بالاترین میزان تناسب با نوع، ماهیت و ساختار داده مورد تلفیق را داشته باشد. روش تحلیل سلسله مراتبی در سال ۱۹۷۲ با رویکرد مقایسه زوجی بین معیارهای مختلف مؤثر در یک فرایند ارائه شد (Saaty, 1972). روش فوق امکان فرموله کردن یک مسئله را به صورت ساختار سلسله مراتبی فراهم می‌آورد. این روش تطابق بالایی با ساختار ذهن انسان دارد و حل مسئله را ساده‌تر می‌کند. همچنین با استفاده از محاسبه نرخ سازگاری (CI)، میزان عدم تشابه قضاوت‌های مختلف یک کارشناس را جهت تصحیح آن، نمایش می‌دهد که با موضوع مقادیر ویژه (Eigenvalue) مرتبط است (Ishizaka and Labib, 2011). (He and Liu (2012). روشی را برای کاربرد این روش در داده‌های علوم زمین با منابع مختلف اطلاعاتی ارائه کردند که بر استدلال مبتنی بر مورد بنا نهاده شده بود. (Macharia (2014) از این رویکرد در مکان‌یابی مسیر بهینه لوله‌های نفت استفاده کرد. (Asadi et al. (2016) از ترکیب روش تاپسیسی و تحلیل سلسله مراتبی جهت به نقشه درآوردن مناطق پتانسیل دار طلا- مس پورفیری استفاده کرده‌اند. پژوهشگران دیگری توسعه یافته فازی این رویکرد را در پژوهش‌های خود به کار برده‌اند (Wang et al., 2008; Singh and Sharma, 2011; Zhang et al., 2017). از جنبه نظری، روش فرایند تحلیل سلسله مراتبی، زمانی ارزشمند است که ساختار تصمیم‌گیری یک‌طرفه باشد (جعفرنژاد و رحیمی، ۱۳۸۳). معیارهای ارزیابی در یک مسئله همیشه مستقل از یکدیگر نیستند و عموماً با یکدیگر تعامل دارند (مؤمنی و آتش‌سوز، ۱۳۸۳). اغلب پژوهشگران حوزه علوم زمین و نقشه‌های نواحی امیدبخش اکتشافی، به این موضوع توجهی نداشته‌اند که شرط اولیه استفاده از رویکرد

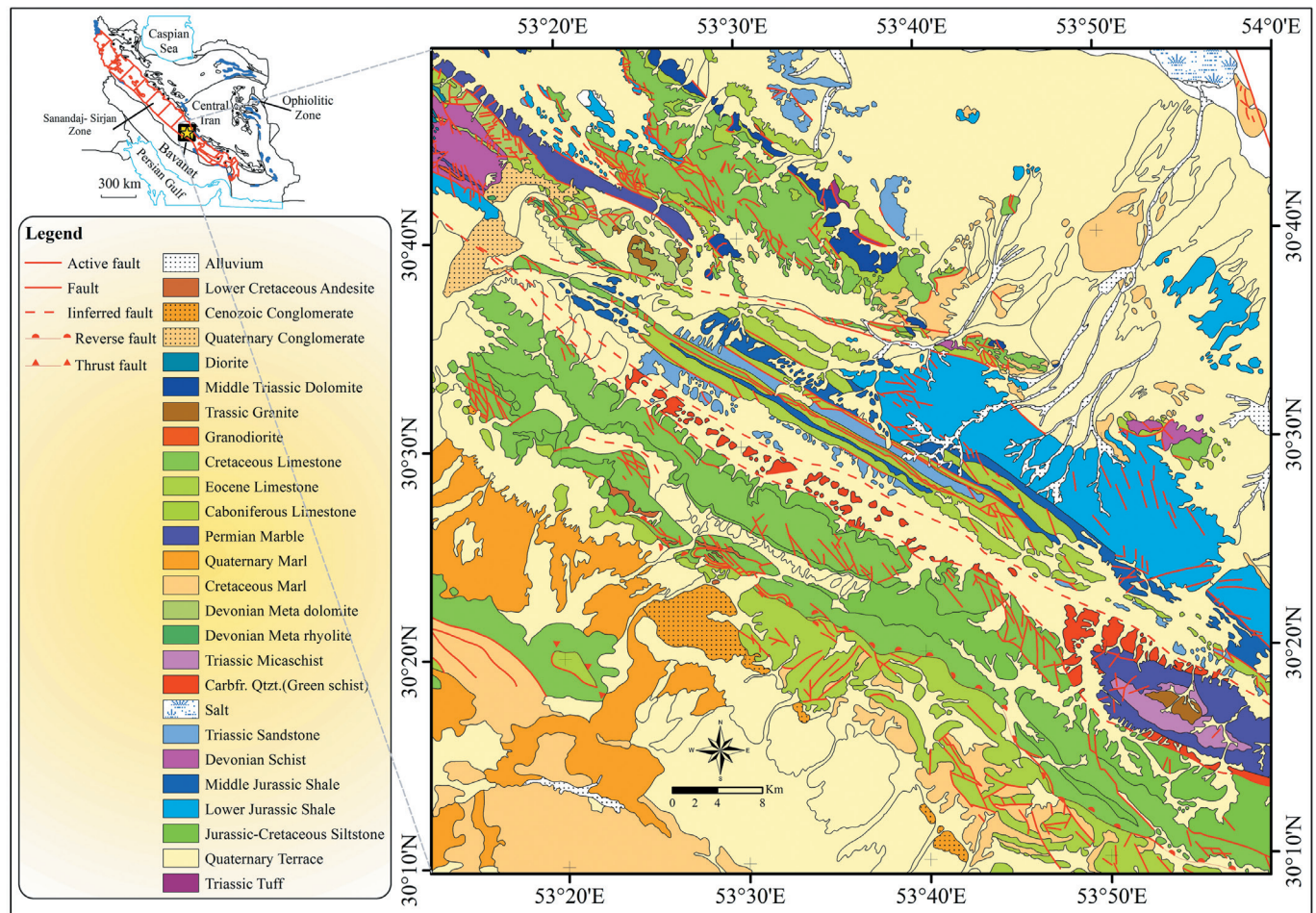
تحلیل سلسله مراتبی، عدم وابستگی دوطرفه معیارها و زیرمعیارها به یکدیگر است (Saaty, 2004; Ghasemi et al., 2018a) که این موضوع می‌تواند گمراه‌کننده و موجب حصول نتایج توأم با خطا باشد. برای رفع این مشکل رویکرد جدیدی با نام فرایند تحلیل شبکه‌ای را ارائه شده که شرط وابستگی یک‌طرفه رویکرد AHP در آن موضوعیتی ندارد (Saaty and Peniwati, 2013; Saaty, 2006; Saaty, 1990). داده‌های ژئوفیزیکی سعی در برداشت مشخصه‌های فیزیکی زمین دارند که این موضوع به جنس زمین‌شناسی سنگ وابستگی زیادی دارد. داده‌های ژئوشیمی آبراهه‌ای و دورسنجی نیز همچون داده‌های ژئوفیزیکی مستقل از جنس سنگ نیستند و به آن وابسته‌اند. همچنین پر واضح است که این داده‌ها از ساختارهای منطقه تأثیر می‌پذیرند و مستقل از آن نیستند. با توجه به این توضیحات، تحقیق زیر جهت مقایسه نتایج دو رویکرد AHP و ANP شکل گرفت و از رویکرد تاپسیسی جهت رده‌بندی نتایج حاصل از این دو رویکرد استفاده شد. چرا که خروجی این دو رویکرد ممکن است در گستره ۰ تا ۱ نباشد و رویکرد تاپسیسی این مشکل را حل می‌کند. اهداف اصلی این تحقیق عبارتند از: الف) استفاده از رویکرد ANP و AHP در تهیه نقشه نواحی امیدبخش اکتشافی، ب) استفاده از روش تاپسیسی جهت رتبه‌بندی نقشه‌های پیشگو، ج) مقایسه میزان صحت نتایج دو روش ANP و AHP با استفاده از محاسبه درصد مشخصه عملکرد سیستم (Receiver Operating Characteristic) در منحنی نتایج هر دو روش.

۲- منطقه مورد مطالعه

محدوده مورد مطالعه در این پژوهش شامل بخش‌هایی از تقریباً ۴ برکه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ به مساحت تقریبی ۱۵۰۰ کیلومتر مربع است که در بخشی از زون ساختاری سندانج-سیرجان، زیر زون ساختاری بیستون قرار دارد. این محدوده شامل بخش‌هایی از برکه‌های با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ با نام‌های جیان، ده‌بید، سوریان و سعادت‌آباد است.

و امتداد شمال باختر - جنوب خاور دارد. از نظر زمین‌شناسی محدوده فوق بیشتر شامل متابازالت، کلریت- مسکوویت شیست، کلریت- کوارتز شیست، میکاشیست و گرافیت شیست است (رجب‌زاده و اسماعیلی، ۱۳۹۲؛ شکل ۱). مهم‌ترین کانی سولفیدی موجود در آن پیریت و کالکوپیریت است. سنگ دربرگیرنده کانه‌زایی شامل سنگ‌های کلریت- کوارتز شیست و کلریت- مسکوویت شیست است. آثار گسترده شدادی و سرباره‌های ذوب به همراه آثار کانه‌زایی مس، روی و نقره در جنوب باختر و جنوب خاور شهر سوریان وجود دارد (رجب‌زاده و اسماعیلی، ۱۳۹۲).

وجود چند اندیس معدنی تیب ماسیوسولفید با نام‌های چیر، مزایجان و... و همچنین یک معدن با تیب ماسیوسولفید (کانسار مس جیان)، قرار گرفتن در زون‌های ساختاری مرتبط و همچنین وجود لیتولوژی‌های مناسب کانه‌زایی ماسیوسولفید در این زون می‌تواند شواهد خوبی جهت پتانسیل بودن این منطقه باشد. کانسار مس جیان که یکی از معادن اصلی در پهنه بوانات است و در نوار خاوری زون دگرگونی سنندج- سیرجان و در فاصله ۱۹۵ کیلومتری شمال خاور شهر شیراز قرار دارد. این مجموعه آتشفشانی- رسوبی دگرگون شده سن پرموتریاس



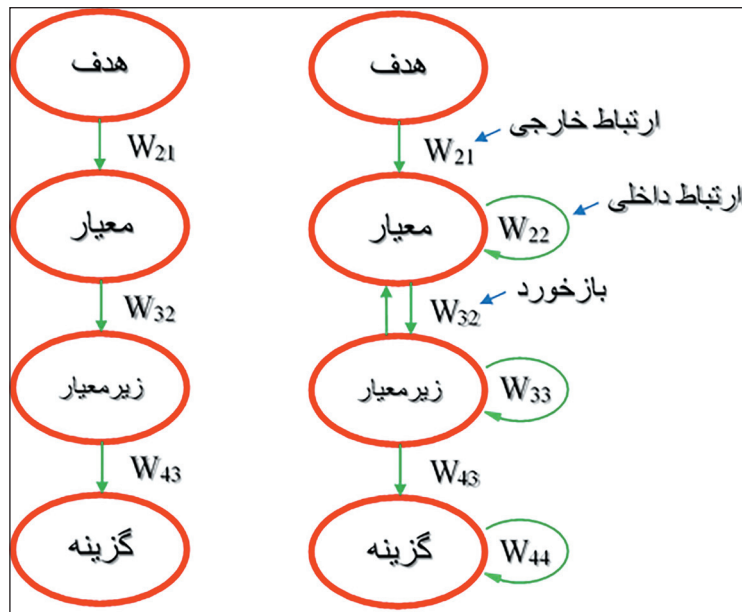
شکل ۱- نقشه زمین‌شناسی محدوده مورد مطالعه، برگرفته از نقشه زمین‌شناسی ۱:۲۵۰,۰۰۰ اقلید (Houshmandzadeh and Soheili, 1990).

۳- روش‌شناسی

۳-۱. فرایند تحلیل شبکه‌ای (Analytical Network Process)

با توجه به محدودیت روش تحلیل سلسله مراتبی در عدم توانایی این رویکرد جهت لحاظ کردن وابستگی بین معیارها، زیرمعیارها و گزینه‌ها (Saaty 1990) رویکرد دیگری را توسعه داد که به رویکرد فرایند تحلیل شبکه‌ای (ANP) معروف شد (Yüksel and Dagdeviren, 2007). فرایند تحلیل شبکه‌ای یکی از روش‌های پرکاربرد در تصمیم‌گیری چند معیاره است. این رویکرد در واقع گسترش یافته روش تحلیل سلسله مراتبی است؛ بدین معنا که اگر وابستگی‌های بین عناصر موجود در تحلیل، غیر از حالت یک‌طرفه خطی، دوطرفه هم باشد (مثلاً وابستگی از بالا به پایین و یا برعکس)، وزن معیارها به گزینه‌ها و وزن گزینه‌ها به معیارها وابسته است (شکل ۲). در چنین حالتی، مسئله از حالت سلسله مراتبی خارج می‌شود که یک سیستم غیرخطی شبکه‌ای تشکیل می‌دهد و قوانین و روش‌های تحلیل سلسله مراتبی در مورد آن قابل

کاربرد نیست (مومنی و آتش‌سوز، ۱۳۸۳). فرایند تحلیل شبکه‌ای را می‌توان از نظر توانایی مدل کردن روابط بین معیارها و عناصر، کامل‌ترین روش تصمیم‌گیری چندمعیاره دانست. این روش تمامی ویژگی‌های مثبت تحلیل سلسله مراتبی مانند جمله سادگی، انعطاف‌پذیری، به کارگیری معیارهای کمی و کیفی به‌طور همزمان و قابلیت بررسی سازگاری در قضاوت‌ها را دارد و علاوه بر آن می‌تواند ارتباطات پیچیده (وابستگی‌های متقابل و بازخورد) بین عناصر تصمیم را به وسیله ساختار شبکه‌ای مدل کند (زبردست، ۱۳۸۹). این روش علاوه بر مقایسه دودویی از زیرمعیارها تحت معیارها، به فرد تصمیم‌گیرنده این امکان را می‌دهد که تمام زیرمعیارهای پنهان که با یکدیگر در تعامل هستند را به‌طور مستقل مقایسه کند (Sevklı et al., 2012). فرایند تحلیل شبکه‌ای دارای چهار مرحله است (Carlucci and Schiuma, 2009) که در ادامه شرح داده می‌شوند.



شکل ۲- مقایسه روش‌های تحلیل شبکه‌ای و تحلیل سلسه مراتبی (Sevкли et al., 2012).

متقابل بین عناصر یک خوشه نیز دوجه دو انجام می‌گیرد. تأثیر هر عنصر بر روی عنصر دیگر به وسیله بردار ویژه ارائه می‌شود. وابستگی‌های یک طرفه و دوطرفه نشان‌دهنده تأثیر بین خوشه‌ها هستند که به ترتیب با پیکان‌های یک طرفه و دوطرفه نشان داده می‌شوند. اگر فرض شود که ماتریس A ، ماتریس مقایسه زوجی معیارها باشد، بردار اهمیت داخلی که نشانگر اهمیت نسبی عناصر یا خوشه‌هاست، این گونه به دست می‌آید (Carlucci and Schiuma, 2009):

$$A_w = \lambda_{max} w \quad (1)$$

که در آن w بردار ویژه (ضریب اهمیت) و λ_{max} بزرگ‌ترین مقدار ویژه عددی است. (Saaty (1980) برای محاسبه بردار ویژه w ، چندین روش ارائه کرده است. یکی از این روش‌ها روش تقریب میانگین هندسی است.

– **ساخت مدل و تبدیل مسئله به یک ساختار شبکه‌ای:** باید مسئله به‌طور مشخص و روشن به یک ساختار منطقی و شبکه‌ای تبدیل شود. در این ساختار، به گره‌ها، خوشه و به عناصر درون یک خوشه، عناصر گفته می‌شوند که ممکن است با یک یا تمامی عناصر خوشه‌های دیگر مرتبط باشند. ارتباطها با پیکان نمایش داده می‌شوند. ممکن است عناصر درون یک خوشه بین خود دارای وابستگی درونی و ارتباط متقابل باشند. این گونه ارتباطها به وسیله یک حلقه متصل به خوشه نشان داده می‌شوند.

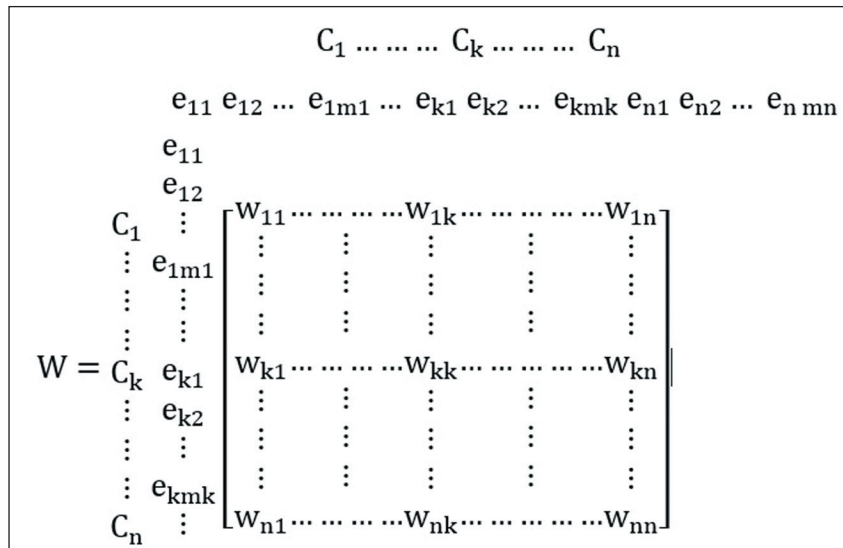
– **تشکیل ماتریس مقایسه زوجی و تعیین بردارهای اولویت:** همانند روش تحلیل سلسه مراتبی، مقایسات زوجی انجام می‌شود. بر اساس میزان اهمیت جهت تحقق هدف مسئله، عناصر تصمیم در هر یک از خوشه‌ها و همچنین خود خوشه‌ها به وسیله مقیاس‌های جدول ۱، دو به دو مورد مقایسه قرار می‌گیرند. علاوه بر این، وابستگی

جدول ۱- مقیاس‌های مقایسه زوجی استفاده شده در مسئله (Saaty, 1980).

اهمیت	شدت اهمیت نسبی	شرح اهمیت
۱	اهمیت مساوی	دو موضوع به‌طور مساوی نسبت به هم نقش داشته‌اند.
۳	اهمیت متوسط	تجربه و قضاوت کمی طرفدار یکی از موضوعات نسبت به دیگری.
۵	اهمیت زیاد	تجربه و قضاوت به مقدار زیادی طرفدار یکی از موضوعات نسبت به دیگری.
۷	اهمیت خیلی زیاد	یکی از موارد بر دیگری خیلی زیاد ارجحیت دارد. این قدرت در عمل نشان داده شده است.
۹	بسیار مهم	شواهد در بالاترین مرتبه ممکن از تأیید، طرفدار یک موضوع بر دیگری.
۲ و ۴ و ۶ و ۸	برای مقایسه بین ارزش‌های بالا	زمانی که هیچ کلمه مناسبی برای توصیف قضاوت وجود ندارد، به عبارتی میانه‌روی.

در شکل ۳، CN نشان‌دهنده خوشه eNn ، eNn عنصر n ام در خوشه N ام و W_{ij} ماتریس شامل وزن‌های نسبی بردارهای w تأثیر عناصر در خوشه N ام نسبت به خوشه J است. در حالت وابستگی داخلی که خوشه N ام هیچ تأثیری بر خوشه J ام خودش نداشته باشد، W_{ij} صفر می‌شود.

– **تشکیل ابرماتریس و تبدیل آن به ابرماتریس حده بردارهای اولویت داخلی (W)‌های محاسبه شده:** در ستون‌های مناسب از یک ماتریس بزرگ وارد می‌شوند. ابرماتریس (Super matrix)، ماتریسی است که هر بخش از آن، ارتباط بین دو خوشه در یک سیستم را نشان می‌دهد که ساختار عمومی آن در شکل ۳ نشان داده شده است (Saaty, 1999).



شکل ۳- فرمت استاندارد یک ابرماتریس (Saaty, 1999).

$$A = \begin{bmatrix} 1 & w_1/w_2 & w_1/w_{n-1} & w_1/w_n \\ & w_2/w_1 & 1 & w_2/w_{n-1} \\ & & & \ddots \\ w_{n-1}/w_1 & w_{n-1}/w_2 & 1 & w_{n-1}/w_n \\ & & & & 1 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & a_{2(n-1)} & a_{1n} \\ & 1/a_{12} & 1 & a_{2(n-1)} \\ & & & \ddots \\ 1/a_{1(n-1)} & 1/a_{2(n-1)} & 1 & a_{(n-1)n} \\ & & & & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

انتخاب گزینه برتر: اگر ابرماتریس تشکیل شده در مرحله قبل، کل شبکه را در نظر گرفته باشد، یعنی گزینه‌ها نیز در ابرماتریس لحاظ شده باشند، اولویت کلی گزینه‌ها از ستون مربوط به گزینه‌ها در ابرماتریس حد نرمالیزه شده قابل استنتاج است. محاسبات بعدی جهت انتخاب اولویت کلی گزینه‌ها انجام می‌شود. گزینه‌ای که بیشترین اولویت کلی را دارد، به عنوان برترین گزینه برای موضوع مورد نظر انتخاب می‌شود.

۳-۲. منحنی مشخصه عملکرد سیستم (ROC)

منحنی‌های ROC در سال ۱۹۵۰ برای اولین بار جهت تشخیص سیگنال رادیویی دارای اغتشاش (noise) توسعه پیدا کردند. در آمار، یک منحنی ROC، یک نمودار گرافیکی است که توانایی تشخیص یک سیستم طبقه‌بندی دودویی را نمایش می‌دهد (Anaesthetist web page, 2011). منحنی ROC با قرار دادن میزان تشخیص‌های مثبت صحیح (TPR) در برابر میزان تشخیص‌های مثبت کاذب (FPR) در تنظیمات آستانه مختلف ایجاد می‌شود. به عبارت دیگر، منحنی ROC می‌تواند با ترسیم توابع توزیع تجمعی از احتمال صحیح در محور y در مقایسه با عملکرد توزیع تجمعی احتمال اشتباه در محور x حاصل شود (Fawcett, 2006; Peres and Cancelliere, 2014; Peres et al., 2015; Zuo, 2017). آنالیز ROC ابزاری مناسب برای انتخاب مدل‌های احتمالاً بهینه فراهم می‌کند که می‌تواند در مدل‌های تصمیم‌گیری به کار برده شود.

$$TPR = TP / (TP + FP) \quad (5)$$

$$FPR = FP / (TP + FN) \quad (6)$$

۳-۳. روش تاپسیس (Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution) (to Ideal Solution)

تکنیک تصمیم‌گیری ترتیب اولویت‌ها با استفاده از شباهت به حالت ایده‌آل یا

رابطه ۲ یک ابرماتریس اولیه را نشان می‌دهد. با جایگزینی بردار اولویت‌های داخلی عناصر و خوشه‌ها در ابرماتریس اولیه، ابرماتریس بدون وزن به دست می‌آید. برای اینکه به شکل اولیه ابرماتریس فرم بگیرد، W به شکل بردار اولویت‌های محلی نرمالیزه می‌شود. اجزای یک ابرماتریس با قرار دادن این بردار اولویت نرمال به عنوان یک نمایش از هدف، معیارها، زیرمعیارها و گزینه‌ها ایجاد می‌شود (Saaty and Vargas, 2001).

$$W = \begin{matrix} \text{Goal(G)} & \begin{bmatrix} G & F & SF & A \\ \bar{0} & \bar{0} & \bar{0} & \bar{0} \end{bmatrix} \\ \text{Factors(F)} & \begin{bmatrix} W_{21} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\ \text{Subfactors(SF)} & \begin{bmatrix} 0 & W_{32} & 0 & 0 \end{bmatrix} \\ \text{Alternatives(A)} & \begin{bmatrix} 0 & 0 & W_{43} & I \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (2)$$

که در آن W، ابرماتریس است که عناصر آن ماتریس‌های زیر هستند: W21 یک بردار نشان‌دهنده تأثیر هدف در معیارها، W32 یک ماتریس نشان‌دهنده تأثیر معیارها در هر یک از زیرمعیارها، W43 یک ماتریس نشان‌دهنده تأثیر زیرمعیارها بر هر یک از گزینه‌ها و I ماتریس همانی است. اگر هر گونه وابستگی میان معیارهای W وجود داشته باشد، ماتریس W22 یک ماتریس غیر صفر خواهد بود. برای تشکیل ابرماتریس وزن‌دار، بردار ویژه از ماتریس مقایسه زوجی خوشه‌های سطر با توجه به خوشه ستون محاسبه می‌شود. این عملیات، بردار ویژه برای هر خوشه ستون را تشکیل می‌دهد. اولین بردار ویژه ورودی مربوط برای هر خوشه ستون، در همه عناصر در خوشه اول آن ستون و دومین آنها در همه عناصر در خوشه دوم آن ستون ضرب می‌شود. کار ادامه پیدا می‌کند و خوشه در هر ستون از ابرماتریس، در نتیجه نتایج ابرماتریس وزن‌دار، وزن‌داده می‌شود (Yüksel and Dagdeviren, 2007). در مرحله بعد، ابرماتریس وزن‌دار (Weighted Super Matrix) از طریق ضرب مقادیر ابرماتریس بدون وزن در ماتریس خوشه‌ای محاسبه می‌شود. سپس با نرمالیزه کردن ابرماتریس وزن‌دار، ابرماتریس از نظر ستونی به حالت تصادفی تبدیل می‌شود. در مرحله سوم و نهایی، ابرماتریس حد (Limit Super Matrix) با به توان رساندن تمامی عناصر ابرماتریس وزن‌دار تا زمانی که واگرایی حاصل شود (از طریق تکرار) یا به عبارت دیگر تمامی عناصر ابرماتریس همانند هم شوند، به دست می‌آید (زبردست، ۱۳۸۹):

$$\lim_{k \rightarrow \infty} W^k \quad (3)$$

اهمیت نسبی عنصر i به عنصر j توسط $aij = wi/wj$ در ماتریس مقایسه زوجی نشان داده می‌شود. ماتریس مقایسه دودویی A و عناصر آن در رابطه ذیل مشاهده می‌شوند (Sevкли et al., 2012):

قابلیت این را دارد که به عناصر دیگر اثر بگذارد. فلسفه این مدل تصمیم‌گیری این است که همواره برای مقایسه دو عامل، یک عامل به عنوان قاضی در نظر گرفته شود. این مقایسه بر اساس یک معیار کنترلی انجام می‌پذیرد. مثلاً برای مقایسه دو عنصر ولکانیک‌های مافیک و مقدار عنصر مس، در ابتدا ولکانیک‌های مافیک را متغیر مستقل و عنصر مس را متغیر وابسته فرض می‌کنند. در این حالت سؤال این است که ولکانیک‌های مافیک چقدر بر عنصر مس تأثیر می‌گذارند یا برعکس مقدار عنصر مس چقدر به ولکانیک‌های مافیک وابسته است؟ اینکه از چه نظر اثر می‌گذارد و یا وابسته است، همان ملاک در هدف مورد مطالعه این پژوهش است؛ یعنی از نظر پی‌جویی ذخایر ماسیوسولفید تیب بشی. حال مقایسه برعکس انجام می‌شود. مقدار عنصر مس متغیر مستقل و ولکانیک‌های مافیک متغیر وابسته فرض می‌شود. باز همین سؤال مطرح است که از نظر پی‌جویی ذخایر ماسیوسولفید تیب بشی، مقدار عنصر مس چقدر بر روی وجود ولکانیک‌های مافیک تأثیر می‌گذارد یا ولکانیک‌های مافیک چقدر به مقدار عنصر مس وابسته هستند؟ با توجه به این مقایسات جداول مقایسه‌ای تکمیل می‌شوند. حال فرض می‌شود که قرار است آنها را از نظر مقدار عنصر مس مقایسه شوند. سؤال این است که از نظر میزان مس، وجود ولکانیک مافیک بهتر است یا مثلاً وجود سازندهای آهن‌دار؟ مقدار مس همان معیاری است که به وسیله آن این دو مقایسه شدند که به این معیار، معیار کنترلی می‌گویند. ممکن است این بار آنها از نظر میزان عنصر روی مقایسه شوند. در اینجا هم مقدار عنصر روی، معیار کنترلی است. باید دانست که روابط بین عناصر از نوع علت و معلولی است نه از نوع روابط همبستگی.

تعیین روابط می‌تواند از طریق شناخت عمیق از موضوع و منطقه مورد مطالعه انجام شود که این موضوع در این تحقیق بر اساس سیستم کانه‌زایی ذخایر ماسیوسولفید تیب بشی و همچنین مطالعات قدیمی صورت گرفته در منطقه انجام پذیرفته است (Cox and Singer, 1986; Edwards and Atkinson, 1986; Bliss, 1992; Large, 1992; Bonham-Carter, 1995, 1997 and 2014; Galley, 2003; Franklin et al., 2005; Bonnet and Corriveau, 2007; Carr et al., 2008; Solomon, 2008; Dergatchev et al., 2011; Edwards, 2012; Robb, 2013; Shanks and Thurston, 2012; Tornos et al., 2015; Pirajno et al., 2016; Ghasemi et al., 2018b and c; Rajabzadeh and Esmaeili, 2013; Mousivand et al., 2007, 2012, 2013 and 2016; Asadi and Moore, 2017; Johnson et al., 2017). بر اساس این موضوع، مدل شبکه‌ای برای پی‌جویی ذخایر ماسیوسولفید تیب بشی آماده شد (شکل ۴). پس از انجام مقایسات زوجی که به علت حجم زیاد جداول، بخشی از آن در جداول ۲ تا ۷ آورده شده و محاسبات مربوط به وزن‌های هر عنصر از خوشه‌ها انجام گرفته است، جدول ۸ آماده شد. پس از اعمال وزن‌های حاصل از مدل ANP، نقشه نواحی امیدبخش اکتشافی ذخایر تیب ماسیوسولفید نوع بشی به دو روش AHP و AHP آماده شد (شکل ۵). از روش تاپسیس (Luukka, 2017) جهت رده‌بندی نهایی پیکسل‌ها استفاده و به وسیله روش نقاط شکست طبیعی (Natural breakpoint) کلاسه‌بندی شد.

مقایسه نتایج روش‌های ANP و AHP با توجه به ذخایر و اندیس‌های شناخته شده موجود در منطقه به صورت بصری انجام گرفت (شکل ۵). به دلیل اینکه تشخیص پیکسل‌های درست و غلط به صورت بصری خیلی ساده نیست؛ از روش آنالیز ROC هم استفاده شد که نتایج در شکل ۶ مشاهده می‌شود. با توجه به شکل، در رویکرد ANP میزان مساحت تحت پوشش منحنی ROC بیشتر از رویکرد AHP بوده که این موضوع مؤید این حقیقت است که رویکرد ANP نتایج دقیق‌تر و صحیح‌تری نسبت به رویکرد AHP در تهیه نقشه‌های نواحی امیدبخش اکتشافی از خود نشان می‌دهد. مقدار عددی ROC در رویکرد ANP برابر ۰/۸۲۷۵ و در رویکرد AHP برابر ۰/۷۶۰۹ بوده است. این موضوع نشان می‌دهد که مساحت بخش زیرین نمودار در رویکرد ANP بیشتر از AHP و در نتیجه صحت نتایج خروجی این روش بیشتر است.

تاپسیس یک روش رتبه‌بندی تصمیم‌گیری چندمعیاره، با رتبه‌بندی مکان‌های جایگزین بر اساس عملکرد کلی آنهاست. تاپسیس به عنوان یک روش تصمیم‌گیری چند شاخصه، روشی ساده ولی کارآمد در اولویت‌بندی محسوب می‌شود. این روش توسط (Chen and Hwang, 1992) مطرح شده است. در این روش علاوه بر در نظر گرفتن فاصله یک گزینه A_i از نقطه ایده‌آل، فاصله از نقطه منفی هم در نظر گرفته می‌شود. بدان معنی که گزینه انتخابی باید دارای کمترین فاصله از راه حل ایده‌آل و درعین حال دارای دورترین فاصله از راه حل ایده‌آل منفی باشد.

– الگوریتم:

• **قدم اول:** تشکیل ماتریس داده‌ها بر اساس m گزینه و n شاخص (Tavana and Hatami-Marbini, 2011). در حقیقت n معیار مختلف تأثیرگذار در هدف تعیین می‌شود که تعداد m انتخاب برای آن معیارها وجود دارد. عنصر a_{ij} نشان‌دهنده ارزش شاخص j ام برای گزینه i ام است.

شاخص‌ها

$$A_{ij} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mn} \end{bmatrix} \quad (7)$$

• **قدم دوم:** استاندارد کردن داده‌ها (بی‌مقیاس کردن) و تشکیل ماتریس استاندارد از طریق رابطه زیر:

$$r_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sqrt{\sum_{k=1}^m a_{kj}^2}} \quad (8)$$

• **قدم سوم:** تعیین وزن هر یک از شاخص‌ها (w_i) بر اساس $\sum_{i=1}^n w_i = 1$. ماتریس حاصل ضرب مقادیر استاندارد هر شاخص در اوزان است:

$$V_{ij} = \begin{bmatrix} w_1 r_{11} & w_2 r_{12} & \dots & w_n r_{1n} \\ w_1 r_{21} & w_2 r_{22} & \dots & w_n r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_1 r_{m1} & w_2 r_{m2} & \dots & w_n r_{mn} \end{bmatrix} \quad (9)$$

• **قدم چهارم:** تعیین فاصله آمین گزینه از گزینه ایده‌آل (بالاترین عملکرد هر شاخص) که آن را با (A^+) نشان می‌دهند:

$$A^+ = \{ \max V_{ij} \mid j \in J \}, (\min V_{ij} \mid j \in J'), \quad A^+ = \{ v_1^+, v_2^+, \dots, v_n^+ \} \quad (10)$$

• **قدم پنجم:** تعیین فاصله آمین گزینه حداقل (پایین‌ترین عملکرد هر شاخص) که آن را با (A^-) نشان می‌دهند:

$$A^- = \{ (\min V_{ij} \mid j \in J), (\max V_{ij} \mid j \in J') \}, \quad A^- = \{ V_1^-, V_2^-, \dots, V_n^- \} \quad (11)$$

• **قدم ششم:** تعیین معیار فاصله‌ای برای گزینه ایده‌آل (S_i^+) و گزینه حداقل (S_i^-) :

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (V_{ij} - V_j^-)^2} \quad \text{و} \quad S_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (V_{ij} - V_j^+)^2} \quad (12)$$

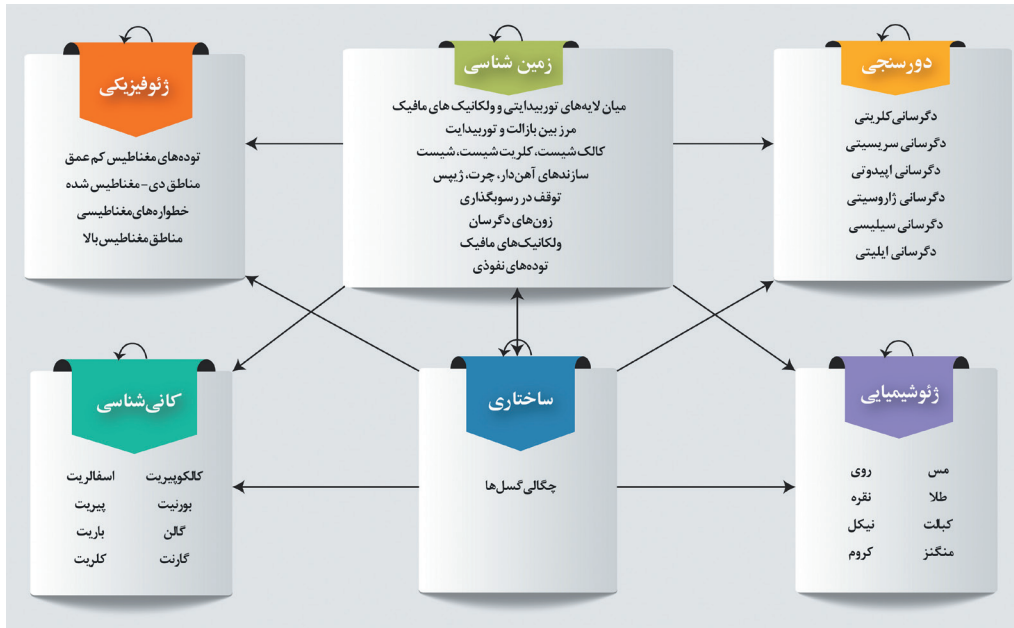
• **قدم هفتم:** تعیین ضریبی که برابر است با فاصله آلترناتیو حداقل، تقسیم بر مجموع فاصله گزینه حداقل S_i^- و فاصله گزینه ایده‌آل S_i^+ که آن را با C_i^* نشان می‌دهند و از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$C_i^* = \frac{S_i^-}{S_i^- + S_i^+} \quad (13)$$

• **قدم هشتم:** رتبه‌بندی بر اساس میزان $0 \leq C_i^* \leq 1$ در نوسان است و $C_i^* = 1$ بالاترین رتبه و $C_i^* = 0$ کمترین رتبه را نشان می‌دهند.

۴– بحث

تفاوت مدل ANP با سایر مدل‌های تصمیم‌گیری در این است که این مدل بر خلاف مدل AHP که معیارها تنها به معیار بالایی خود ارتباط دارند، اعتقاد به ارتباط بین عناصر دارد. در مدل AHP حتی خود معیارها هم به همدیگر وابسته نیستند. ولی در مدل ANP نه تنها خوشه‌ها بر عناصر و عناصر بر گزینه و گزینه بر عناصر و ... بلکه حتی به خودشان و به عناصر دیگر خوشه‌ها نیز تأثیر می‌گذارند. یعنی هر عنصری



شکل ۴- ساختار شبکه‌ای طراحی شده با توجه به سیستم کانه زایی ذخایر ماسیو سولفید تیب بشی جهت حل مسئله.

جدول ۲- جدول مقایسه‌ای رویکرد ANP (ارتباطات مستقیم خوشه زمین شناسی).

عنوان	ولکانیک مافیک	زون دگرسان	توده نفوذی	ولکانیک مافیک، توریدایت، میان لایه	رسوب گذاری توقف در	کالک شیست، کلریت شیست، شیست	توریدایت، مرز بین بازالت و	سازند آهن دار، چرت، ژپس
ولکانیک مافیک	۱	۰/۳۳۳	۱	۳	۵	۰/۳۳۳	۳	۱
زون دگرسان		۱	۳	۳	۵	۰/۳۳۳	۱	۱
توده نفوذی			۱	۱	۳	۰/۳۳۳	۱	۳
میان لایه توریدایت، ولکانیک مافیک				۱	۳	۰/۱۱۱	۱	۰/۳۳۳
توقف در رسوب گذاری					۱	۰/۱۱۱	۰/۱۴۲۹	۰/۱۴۲۹
کالک شیست، کلریت شیست، شیست						۱	۹	۵
مرز بین بازالت و توریدایت							۱	۳
سازند آهن دار، چرت، ژپس								۱

جدول ۳- جدول مقایسه‌ای رویکرد ANP (ارتباطات مستقیم خوشه ژئوشیمی آبراهه‌ای).

عنوان	مس	روی	طلا	نقره	کبالت	نیکل	کروم	منگنز
مس	۱	۳	۹	۵	۵	۹	۹	۹
روی		۱	۷	۳	۳	۷	۷	۷
طلا			۱	۰/۳۳۳	۰/۳۳۳	۳	۳	۳
نقره				۱	۱	۳	۳	۳
کبالت					۱	۳	۳	۳
نیکل						۱	۳	۱
کروم							۱	۱
منگنز								۱

جدول ۴- جدول مقایسه‌ای رویکرد ANP (ارتباطات مستقیم خوشه دگرسان‌های دوردستی).

عنوان	دگرسانی کلریتی	دگرسانی سیلیسی	دگرسانی سربستی	دگرسانی ایلیتی	دگرسانی ژاروسیتی	دگرسانی اپیدوتی
دگرسانی کلریتی	۱	۱	۳	۹	۹	۵
دگرسانی سیلیسی		۱	۳	۹	۹	۵
دگرسانی سربستی			۱	۵	۵	۳
دگرسانی ایلیتی				۱	۱	۰/۳۳۳
دگرسانی ژاروسیتی					۱	۰/۳۳۳
دگرسانی اپیدوتی						۱

جدول ۵- جدول مقایسه‌ای رویکرد ANP (ارتباطات مستقیم خوشه ژئوفیزیکی).

عنوان	خطواره‌های مغناطیسی	مناطق مغناطیسی بالا	مناطق دی-مغناطیس شده	توده‌های مغناطیس کم عمق
خطواره‌های مغناطیسی	۱	۵	۳	۱
مناطق مغناطیس بالا		۱	۰/۳۳۳	۰/۲
مناطق دی-مغناطیس شده			۱	۰/۳۳۳
توده‌های مغناطیس کم عمق				۱

جدول ۶- جدول مقایسه‌ای رویکرد ANP (اثر ارتباطات خارجی خوشه‌ها با معیار کنترلی زمین‌شناسی).

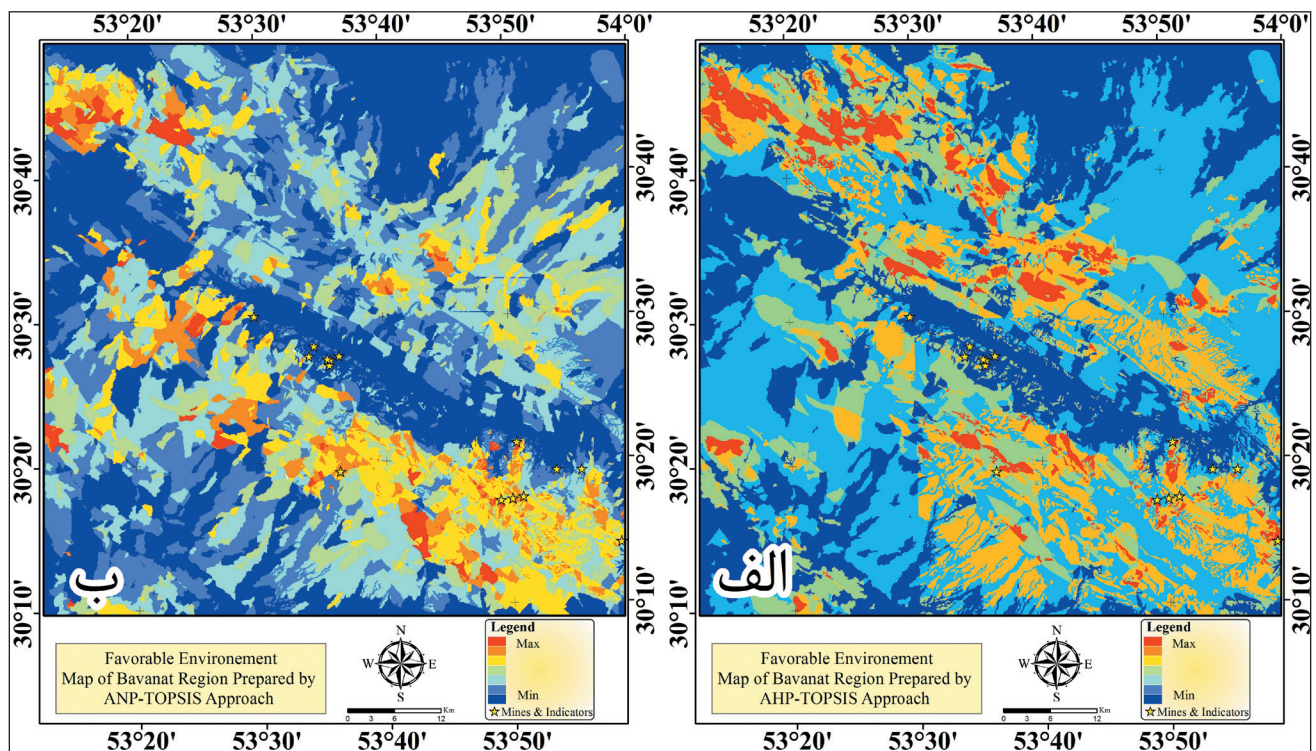
عنوان	زمین‌شناسی	ژئوفیزیکی	ژئوشیمیایی	کانی‌شناسی	دورسنجی	ساختاری
ژئوشیمیایی	۰/۳۳۳	۷	۱	۵	۱	۳
زمین‌شناسی	۱	۹	۳	۵	۳	۵
ژئوفیزیکی		۱	۰/۱۴۲۹	۰/۳۳۳	۰/۱۴۲۹	۰/۲
کانی‌شناسی				۱	۰/۱۴۲۹	۱
دورسنجی					۱	۳

جدول ۷- جدول مقایسه‌ای رویکرد ANP (اثر ارتباطات خارجی عناصر خوشه‌ها با معیار کنترلی ولکانیک‌های مافیک).

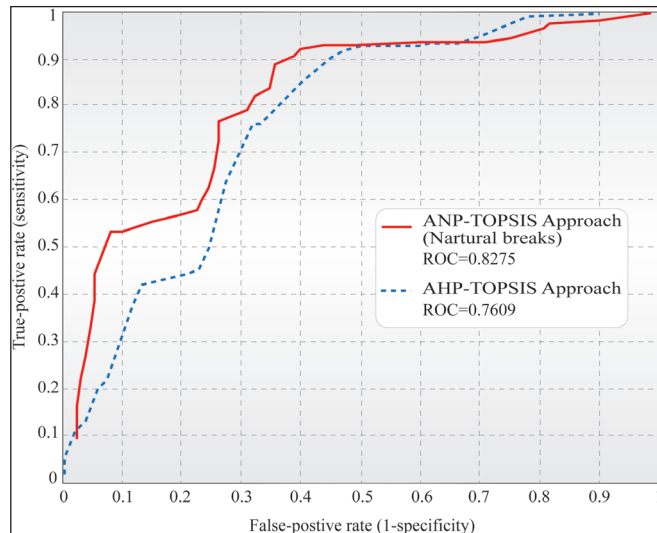
عنوان	مس	روی	طلا	نقره	کیالت	نیکل	کروم	منگنز
مس	۱	۳	۹	۵	۵	۹	۹	۹
روی		۱	۷	۳	۳	۷	۷	۷
طلا			۱	۰/۳۳۳	۰/۳۳۳	۳	۳	۳
نقره				۱	۱	۳	۳	۳
کیالت					۱	۳	۳	۳
نیکل						۱	۳	۱
کروم							۱	۱
منگنز								۱

جدول ۸- وزن‌های منتج از رویکرد ANP جهت هر یک از عناصر شبکه.

آلتراسیون	ژئوفیزیکی	ژئوشیمیایی	زمین‌شناسی
۰/۰۵۹۹۹۸	دگرسانی سیلیسی	۰/۰۳۶۳۵۲	توده‌های مغناطیس
۰/۰۲۸۳۹۰	دگرسانی ژاروسیتی	۰/۰۳۷۰۴۲	مناطق دی- مغناطیس شده
۰/۰۴۰۶۳۷	دگرسانی اپیدوتی	۰/۰۳۹۰۷۹	خطواره‌های مغناطیسی
۰/۰۲۸۳۹۰	دگرسانی ایلیتی	۰/۰۳۹۰۴۹	توده‌های مغناطیس کم عمق
۰/۰۵۹۹۹۸	دگرسانی کلریتی	ساختاری	توده‌های مغناطیس کم عمق
۰/۰۴۷۱۰۵	دگرسانی سرسیتی	۰/۰۲۵۷۱۶	گسل‌های زمین‌شناسی
		کانی‌شناسی	کانی‌های سنگین
		۰/۰۳۸۰۲۶	۰/۰۳۷۵۰۴
		۰/۰۱۶۴۲۰	۰/۰۱۶۲۴۷
		۰/۰۱۵۱۱۴	۰/۰۱۶۶۸۶
		۰/۰۲۱۲۰۳	۰/۰۱۷۲۹۱
		۰/۰۴۹۹۲۸	۰/۰۱۶۳۷۴
		۰/۰۴۰۵۰۱	۰/۰۱۵۶۳۳
		۰/۰۴۱۹۹۸	۰/۰۱۶۳۷۴
		۰/۰۴۱۶۵۶	۰/۰۱۶۳۷۴
		۰/۰۳۷۶۶۴	۰/۰۱۶۳۷۴
		۰/۰۳۸۰۲۶	۰/۰۱۶۳۷۴
		۰/۰۳۷۵۰۴	۰/۰۱۶۳۷۴



شکل ۵- نقشه نواحی امیدبخش اکتشافی ذخایر تیب ماسدیوسولفاید نوع بشی رویکرد: الف) AHP-TOPSIS؛ ب) ANP-TOPSIS.



شکل ۶- نمودار مقایسه منحنی مشخصه عملکرد سیستم (ROC) برای دو روش ANP و AHP.

۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق یک روش تلفیق داده‌های نوین مبتنی بر یک روش تصمیم‌گیری چندمعیاره با عنوان ANP-TOPSIS پیشنهاد شده است. این روش بر اساس دو الگوریتم قوی تصمیم‌گیری چندمعیاره شناخته شده با نام تحلیل شبکه‌ای و تاپسیس بنا نهاده شده است. شش لایه اکتشافی نقشه زمین‌شناسی مقیاس ۱:۱۰۰,۰۰۰، ویژگی‌های ساختاری، نقشه آنومالی ژئوشیمیایی، نقشه کانی‌شناسی، نقشه شدت مغناطیسی کل داده‌های ژئوفیزیک هوابرد و دگرسانی‌های حاصل از دورسنگی از منطقه مورد مطالعه تهیه و به منظور ایجاد نقشه نهایی نواحی امیدبخش معدنی آماده‌سازی شدند. در این الگوریتم، بردار وزن معیار بر اساس ماتریس مقایسه زوجی به همراه معیار کنترلی در الگوریتم تحلیل شبکه‌ای به دست آمده و رده‌بندی‌های نتایج خروجی از تحلیل شبکه‌ای توسط الگوریتم تاپسیس انجام شده است. الگوریتم ANP-TOPSIS برای تلفیق داده‌ها در یک منطقه سبز با میزان کمی از معادن شناخته شده در بخشی از زون سنندج- سیرجان جهت پی‌جویی ذخایر ماسیوسولفید استان فارس در ایران استفاده شد. خروجی این رویکرد با رویکرد پرکاربرد AHP مقایسه شد. نتایج اصلی حاصل از این تحقیق به‌صورت ذیل قابل ارائه است:

- مسائل مرتبط با تصمیم‌گیری در نقشه‌های نواحی امیدبخش معدنی به‌تهدایی به وسیله ساختار سلسله مراتبی قابل مدل کردن نیست. زیرا شرط یک طرفه بودن ارتباطات در این رویکرد، پیش فرض است و معیارهای اکتشافی بعضاً ارتباط دوطرفه دارند.

- در تولید نقشه‌های نواحی امیدبخش معدنی، معیارها، زیرمعیارها و گزینه‌ها می‌توانند با هم در تعامل دوطرفه باشند. لذا رویکرد تحلیل شبکه‌ای راهکار مناسبی جهت این کار است.

- وجود معیار کنترلی در مدل کردن ارتباط بین معیارها و زیرمعیارها امری لازم است.

- به علت وجود روابط بین زیر معیارهای یک خوشه و تعامل میان معیارهای مختلف و همچنین بهینه شدن اولویت‌ها به وسیله بازخورد، از روش تحلیل شبکه‌ای، نتایج دقیق و مؤثرتری در مدل‌های پیچیده اکتشافی نتیجه می‌شود.

- به دلیل پوشیده بودن ذخایر به وسیله رسوبات و آبرفت در منطقه مورد مطالعه، رخنمون کمتری از کانه‌زایی در سطح دیده می‌شود. این موضوع تا حدی بر مقدار عددی ROC نهایی تأثیر داشته و باعث کاهش آن می‌شود که البته در هر دو روش تلفیق، یکسان است و به برتری نسبی هر روش به دیگری تأثیری ندارد. ولی در مناطقی که کانه‌زایی رخنمون‌های بیشتری دارد و به عبارت دیگر، عملیات اکتشافی قبلی منجر به اکتشاف رخنمون‌های بیشتری شده است، رویکرد تحلیل شبکه‌ای می‌تواند ROC بیشتری را نتیجه‌گیری کند.

سپاسگزاری

در اینجا لازم است از جناب آقای مهندس فتوتی مدیر کل ژئومتیکس سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی و همچنین آقای دکتر صادقی رییس بخش سامانه اطلاعات مکانی برای فراهم آوردن امکاناتی جهت انجام این تحقیق و همچنین از سرکار خانم دکتر رضایی که برای یاریشان در آماده‌سازی برخی شکلها سپاسگزاری شود. از پروفیسور دیوید هیوستن نیز برای مشورت‌هایشان در طول مدت انجام تحقیق قدردانی به عمل می‌آید.

این تحقیق به وسیله سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی حمایت مالی شده و بخشی از این تحقیق در دوره فرصت مطالعاتی در دانشگاه مارتین لوتر هاله ویتنبرگ کشور آلمان با حمایت وزارت علوم، تحقیقات و فناوری انجام شده است.

کتابنگاری

- جعفرزاده، ا. و رحیمی، ح.، ۱۳۸۳- ارائه مدل ترکیبی پیشنهادی کیفیت خدمات (سروکوال) و تجزیه و تحلیل شبکه‌ای برای رتبه‌بندی مؤسسات ارائه‌دهنده خدمات: مطالعه موردی مؤسسات ارائه‌دهنده بیمه تحت نظر بیمه مرکزی. فصلنامه مدیریت صنعتی، شماره ۵.
- رجب‌زاده، م. و اسماعیلی، س.، ۱۳۹۲- مطالعه کانه زایی کانسار مس جیان، استان فارس، با استفاده از داده های پتروگرافی و ژئوشیمیایی، مجله زمین‌شناسی اقتصادی، شماره ۱، جلد ۵، صص. ۹۳ تا ۱۰۴.
- زبردست، ا.، ۱۳۸۹- کاربرد فرایند تحلیل شبکه‌ای ANP، در برنامه‌ریزی شهری و منطقه‌ای، نشریه هنرهای زیبا - معماری و شهرسازی، شماره ۴۱.
- مؤمنی، م. و آتش‌سوز، ع.، ۱۳۸۳- طراحی مدلی جهت برنامه‌ریزی محصول با استفاده از QFD به کارگیری ANP و برنامه‌ریزی آرمانی. فصلنامه مدیریت صنعتی، شماره ۴.

References

- Anaesthetist web page, 2011- ROC curves.
- Asadi, H. H., Sansoleimani, A., Fatehi, M. and Carranza, E. J. M., 2016- An AHP-TOPSIS predictive model for district-scale mapping of porphyry Cu-Au potential: a case study from Salafchegan Area (Central Iran). *Natural Resources Research*, 25(4), 417- 429.
- Asadi, S. and Moore, F., 2017- Fluid evolution in H₂O-CO₂-NaCl system and metallogenic analysis of the Surian metamorphic complex, Bavanat Cu deposit, Southwest Iran. *Mineralogy and Petrology*, 111 (1), 145- 161.
- Bliss, J. D., 1992- Developments in mineral deposit modeling (No. 2002-2004). US Government Printing Office.
- Bonham-Carter, G. F., 1995- Geographic information systems for geoscientists: modelling with GIS. Elsevier.
- Bonham-Carter, G. F., 1997- GIS methods for integrating exploration data sets. In *Proceedings of Exploration* (Vol. 97, pp. 59-64).
- Bonham-Carter, G. F., 2014- Geographic information systems for geoscientists: modelling with GIS (Vol. 13). Elsevier.
- Bonnet, A. L. and Corriveau, L. O. U. I. S. E., 2007- Alteration vectors to metamorphosed hydrothermal systems in gneissic terranes. *Mineral Deposits of Canada: A Synthesis of Major Deposit-Types, District Metallogeny, the Evolution of Geological Provinces, and Exploration Methods*. Edited by WD Goodfellow. Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division, Special Publication, 5, 1035- 1049.
- Carlucci, D. and Schiuma, G., 2009- Applying the analytic network process to disclose knowledge assets value creation dynamics. *Expert Systems with Applications*, 36(4), 7687- 7694.
- Carr, P. M., Cathles, L. M. and Barrie, C. T., 2008- On the size and spacing of volcanogenic massive sulphide deposits within a district with application to the Matagami district, Quebec. *Economic Geology*, 103(7), 1395- 1409.
- Chen, S. J. and Hwang, C. L., 1992- Fuzzy multiple attribute decision making methods. In *Fuzzy multiple attribute decision making* (pp. 289- 486) Springer, Berlin, Heidelberg.
- Cox, D. P. and Singer, D. A., 1986- Mineral deposit models (Vol. 1693). Washington, DC, USA: US Government Printing Office.
- Dergatchev, A. L., Eremin, N. I. and Sergeeva, N. E., 2011- Volcanic-associated Besshi-type copper sulphide deposits. *Moscow University Geology Bulletin*, 66(4), 274- 281.
- Edwards, R. and Atkinson, K., 1986- Ore deposits geology and its influence on mineral exploration.
- Edwards, R., 2012- Ore deposit geology and its influence on mineral exploration. Springer Science and Business Media.
- Fawcett, T., 2006- An introduction to ROC analysis. *Pattern recognition letters*, 27(8), 861- 874.
- Franklin, J. M., Gibson, H. L., Jonasson, I. R., and Galley, A. G., 2005- Volcanogenic massive sulphide deposits. *Economic Geology* 100th Anniversary Volume, 98, 523- 560.
- Galley, A. G., 2003- Composite synvolcanic intrusions associated with Precambrian VMS-related hydrothermal systems. *Mineralium Deposita*, 38(4), 443- 473.
- Ghasemi, R., Tokhmechi, B. and Borg, G., 2018a- Representation of mineral predictive maps using fuzzy spatial multi criteria decision making methods and uncertainty modelling, case study: Bavanat massive sulfide prospects.
- Ghasemi, R., Tokhmechi, B. and Borg, G., 2018b- Evaluation of effective factors in window optimization of fry analysis to identify mineralization pattern: Case study of Bavanat region, Iran. *Journal of Mining and Environment*.
- Ghasemi, R., Tokhmechi, B. and Borg, G., 2018c- A new linguistic quantifier knowledge-guided OWA approach for mineral prospectivity mapping: a case study of the Bavanat Region, Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 11(19), 588.
- He, B., C. and Liu, Y., 2012- Mineral prospectivity mapping method integrating multi-sources geology spatial data sets and case-based reasoning. *Journal of Geographic Information System*, 4(02), 77.
- Houshmandzadeh, A. and Soheili, M., 1990- Geological map of Eqlid, scale 1: 250,000. Geological Survey of Iran, map, (G10).
- Ishizaka, A. and Labib, A., 2011- Review of the main developments in the analytic hierarchy process. *Expert systems with applications*, 38(11), 14336- 14345.

- Johnson, P. R., Zoheir, B. A., Ghebreab, W., Stern R. J., Barrie, C. T. and Hamer, R. D., 2017- Gold-bearing volcanogenic massive sulphides and orogenic-gold deposits in the Nubian Shield. Geological Society of South Africa.
- Large, R. R., 1992- Australian volcanic-hosted massive sulphide deposits; features, styles, and genetic models. *Economic Geology*, 87(3), 471- 510.
- Luukka, P., 2017- Preference modeling using ideal solutions in TOPSIS by n-ary norm operators. In *Real Option Workshop* (p. 10).
- Macharia, P. M., 2014- GIS analysis and spatial modelling for optimal oil pipeline route location. A case study of proposed isiolo nakuru pipeline route. In *Proceedings of sustainable research and innovation conference* (pp. 91- 94).
- Mousivand, F., Rastad, E., Emami, M. H. and Peter, J. M., 2013- Formation of Various Types of Volcanogenic Massive Sulphide (VMS) Deposits and Its Relationship with Tectono-Magmatic Evolution in the Sanandaj-Sirjan Zone. *Geosciences Scientific Quarterly Journal*.
- Mousivand, F., Rastad, E., Emami, M. H., Peter J. M. and Solomon, M., 2016- Ore facies, alteration zoning and physico-chemical conditions of formation of the Bavanat Besshi-type Cu-Zn-Ag volcanogenic massive sulphide deposit. *Geosciences Scientific Quarterly Journal*.
- Mousivand, F., Rastad, E., Hoshino, K. and Watanabe, M., 2007- The Bavanat Cu-Zn-Ag orebody: first recognition of a Besshi-type VMS deposit in Iran. *Neues Jahrbuch für Mineralogie-Abhandlungen: Journal of Mineralogy and Geochemistry*, 183(3), 297- 315.
- Mousivand, F., Rastad, E., Meffre, S., Peter, J. M., Mohajjel, M., Zaw, K. and Emami, M. H., 2012- Age and tectonic setting of the Bavanat Cu-Zn-Ag Besshi-type volcanogenic massive sulfide deposit, southern Iran. *Mineralium Deposita*, 47(8), 911- 931.
- Peres, D. J. and Cancelliere, A., 2014- Derivation and evaluation of landslide-triggering thresholds by a Monte Carlo approach. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18 (12), 4913-4931.
- Peres, D. J., Iuppa, C., Cavallaro, L., Cancelliere, A. and Foti, E., 2015- Significant wave height record extension by neural networks and reanalysis wind data. *Ocean Modelling*, 94, 128- 140.
- Pirajno, F., Chen, Y., Li, N., Li, C. and Zhou, L., 2016- Besshi-type mineral systems in the Palaeoproterozoic Bryah Rift-Basin, Capricorn Orogen, Western Australia: Implications for tectonic setting and geodynamic evolution. *Geoscience Frontiers*, 7(3), 345- 357.
- Rajabzadeh, m. A., and Esmaeili, S., 2013- STUDY ON MINERALIZATION AT JIAN COPPER DEPOSIT, FARS PROVINCE, USING PETROGRAPHICAL AND GEOCHEMICAL DATA. *Journal of Economic Geology*.
- Robb, L., 2013- Introduction to ore-forming processes. John Wiley and Sons.
- Saaty, T. L. and Peniwati, K., 2013- Group decision making: drawing out and reconciling differences. RWS publications.
- Saaty, T. L., 1972- An eigenvalue allocation model for prioritization and planning. *Energy Management and Policy Center, University of Pennsylvania*, 28- 31.
- Saaty, T. L., 1980- The analytical hierarchy process, planning, priority. Resource allocation. RWS publications, USA.
- Saaty, T. L., 1990- Decision making for leaders: the analytic hierarchy process for decisions in a complex world. RWS publications.
- Saaty, T. L., 1999- Fundamentals of the analytic network process. In *Proceedings of the 5th international symposium on the analytic hierarchy process* (pp. 12- 14).
- Saaty, T. L., 2004- Decision making—the analytic hierarchy and network processes (AHP/ANP). *Journal of systems science and systems engineering*, 13(1), 1- 35.
- Saaty, T., 2006- Decision Making with the Analytic Network Process. /Saaty T. Vargas L. NY: Springer.
- Saaty, T. L. and Vargas, L. G., 2001- How to make a decision. In *Models, methods, concepts & applications of the analytic hierarchy process* (pp. 1-25). Springer, Boston, MA.
- Sevklı, M., Oztekin, A., Uysal, O., Torlak, G., Turkyilmaz, A. and Delen, D., 2012- Development of a fuzzy ANP based SWOT analysis for the airline industry in Turkey. *Expert Systems with Applications*, 39(1), 14- 24.
- Shanks, W. C. and Thurston, R. (Eds.), 2012- Volcanogenic massive sulphide occurrence model. US Department of the Interior, US Geological Survey.
- Singh, R. and Sharma, S. K., 2011- Title-Supplier Selection: Fuzzy-AHP Approach. *International Journal of Engineering Science and Technology*, 3 (10).
- Solomon, M., 2008- Brine pool deposition for the Zn–Pb–Cu massive sulphide deposits of the Bathurst mining camp, New Brunswick, Canada. I. Comparisons with the Iberian pyrite belt. *Ore Geology Reviews*, 33(3), 329- 351.
- Tavana, M. and Hatami-Marbini, A., 2011- A group AHP-TOPSIS framework for human spaceflight mission planning at NASA. *Expert Systems with Applications*, 38(11), 13588- 13603.
- Tornos, F., Peter, J. M., Allen, R. and Conde, C., 2015- Controls on the siting and style of volcanogenic massive sulphide deposits. *Ore Geology Reviews*, 68, 142- 163.

- Wang, Y. M., Luo, Y. and Hua, Z., 2008- On the extent analysis method for fuzzy AHP and its applications. *European Journal of Operational Research*, 186(2), 735-747.
- Yüksel, İ. and Dagdeviren, M., 2007- Using the analytic network process (ANP) in a SWOT analysis–A case study for a textile firm. *Information Sciences*, 177(16), 3364- 3382.
- Zhang, N., Zhou, K. and Du, X., 2017- Application of fuzzy logic and fuzzy AHP to mineral prospectivity mapping of porphyry and hydrothermal vein copper deposits in the Dananhu-Tousuquan island arc, Xinjiang, NW China. *Journal of African Earth Sciences*, 128, 84- 96.
- Zuo, R., 2017- Selection of an elemental association related to mineralization using spatial analysis. *Journal of Geochemical Exploration*.

Improvement in mineral prospectivity maps results using a hybrid ANP-TOPSIS approach

R. Ghasemi^{1*}, B. Tokhmechi² and G. Borg³

¹Ph.D. Student, School of Mining, Petroleum and Geophysics Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

²Associate Professor, School of Mining, Petroleum and Geophysics Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

³Professor, Institute for Geosciences and Geography, Martin Luther University, Halle-Wittenberg, Germany

Received: 2017 November 28

Accepted: 2018 May 21

Abstract

Accuracy increment and search space reduction are the main purposes in production of mineral prospectivity maps. Choice of the suitable method for information integration in the geographical information system which has the most consistent with the nature of the used data, is the first step in achieving to this goal. Due to the fact that exploratory data are not independent and most of them has feedback among criteria and sub-criteria and according to the one-way dependence condition of the evaluated data in the Analytic Hierarchy Process (AHP) approach, an Analytic Network Process (ANP) approach is assigned. Exploratory data related to the Bavanat Region in Fars province are used, in case of providing the mineral prospectivity model for besshi type massive sulfide deposits. We tried to optimize two factors of the search area and accuracy to highest accuracy of the results and the least amount of search area. AHP as well as ANP approach, is knowledge-based approaches. The results of the research in AHP and ANP approaches in studied area indicate that, the ANP results is more reliable and has less suggested search area than AHP approach. Based on the results, suggested areas of ANP are 17% less than AHP (1138.4 Km² in AHP has decreased to 952.6 Km² in ANP), while, the accuracy of the results has increased more than 6%. The Receiver operating characteristic (ROC) curve index (area under the curve) shows that AHP approach ROC is 0.7609, which was improved and optimized by the ANP approach to 0.8275.

Keywords: Mineral prospectivity map, Analytic Network Process (ANP), Geographic information system, Accuracy increment, Search space reduction
For Persian Version see pages 191 to 202

*Corresponding author: R. Ghasemi; E-mail: mrghasemi20@yahoo.com