

## بررسی مدل‌سازی‌های پتانسیل معدنی با استفاده از روش‌های مختلف دانش محور

سعید داودآبادی فراهانی

تاریخ انتشار: ۱۴۰۱/۰۵/۱۰

### چکیده

مدل‌سازی فرآیندی است که منجر به تولید مدل می‌گردد. مدل خلاصه یک واقعیت است که جزئیات مهم در آن در نظر گرفته شده است. مدل در واقع یک واقعیت را ساده بیان می‌کند ولی این ساده کردن به حدی نیست که مسائل مهم حذف شوند. یعنی عواملی که تاثیر حیاتی دارند، در مدل در نظر گرفته می‌شوند. در اکتشافات مقدماتی و اولیه، شناسایی مناطقی که باید در مراحل بعدی مورد توجه قرار گیرند با استفاده از مدل‌سازی پتانسیل معدنی صورت می‌گیرد. مدل‌سازی پتانسیل معدنی در واقع یافتن مکان‌ها یا مناطقی است که یک سری معیارها و ملاک‌ها برای حضور ذخیره در آن‌ها صدق می‌کند. روش‌های ساخت مدل‌های پیشگو به دو دسته دانش محور و داده محور تقسیم می‌شوند. در این تحقیق به بیان روش‌های مختلف دانش محور در مدل‌سازی پتانسیل معدنی پرداخته ایم. این روش‌ها شامل مدل‌سازی دانش محور با استفاده از نقشه‌های شاهد دوتایی، مدل‌سازی دانش محور با استفاده از نقشه‌های شاهد چندکلاسه، روش منطق بولی، مدل‌سازی با روش همپوشانی شاخص دوتایی، مدل‌سازی با روش همپوشانی شاخص چند کلاسه، روش منطق فازی و روش توابع برآورد می‌باشد.

**کلمات کلیدی:** مدل‌سازی، پتانسیل معدنی، دانش محور، فازی، توابع برآورد.

## ۱- مقدمه

در مدل سازی پتانسیل معدنی در شرایطی که در منطقه مورد مطالعه تعداد اندیس های شناخته شده کم بوده و یا هیچ اندیس شناخته شده ای وجود ندارد، از روش های دانش محور استفاده می شود. روش های دانش محور مدل سازی پتانسیل معدنی در شروع عملیات اکتشاف در مناطقی که از لحاظ زمین شناسی مناسب بوده ولی در آن کار اکتشافی کم صورت گرفته، مناسب هستند. این روش ها عموماً در مناطقی که در آنجا هیچ ذخیره شناخته شده ای وجود ندارد یا تعداد ذخایر شناخته شده اندک است به کار می روند. تجربه اجرای عملیات اکتشاف و بررسی ارتباط و وابستگی بین ذخایر معدنی شناخته شده و الگوهای زمین شناسی در نواحی که در آنها اکتشاف در حد خوب و متوسط صورت گرفته، به عنوان اساس روش دانش محور در تهیه مدل پتانسیل معدنی می باشد. [Carranza, 2008] بنابراین در این روش از مدل مفهومی ذخایر مورد پی جویی در مناطقی که عملیات اکتشاف در آنجا خوب صورت گرفته، برای تهیه مدل پتانسیل معدنی در نواحی جدید استفاده می شود. در واقع مدل مفهومی به عنوان ملاکی برای انتخاب و شناسایی معیارهای اکتشافی و الگوهای شاهد، تولید نقشه های پیش گو، تخصیص وزن به نقشه ها و الگوهای شاهد و در نهایت تلفیق نقشه های شاهد به منظور معرفی مناطق امیدبخش برای ذخیره مورد جستجو استفاده می شود. بنابراین واژه دانش محور اشاره به ارزیابی کیفی یا وزن دادن به شواهد براساس مقایسه و قضاوت کارشناسی می باشد. تخمین وزن هر نقشه ی شاهد و همچنین تخمین امتیاز و ارزش هر الگو (کلاس) از هر نقشه ی شاهد براساس قضاوت کارشناسی و تخصیصی روی همراهی فضای بین ذخایر مورد جستجو و هر مجموعه از منظرهای زمین شناسی شاخص (نشانه و راهنما) صورت می گیرد. از این رو روش دانش محور به نام روش تجربه محور مدل سازی پتانسیل معدنی نیز شناخته شده است. تجربه ای که در روش دانش محور تهیه مدل پتانسیل معدنی استفاده می شود، از طریق عملیات و مشاهدات صحرایی اکتشاف مواد معدنی و همچنین از طریق تجربه های کاربرد روشهای مختلف تحلیل و وابستگی فضایی بین منظرها و الگوهای زمین شناسی مشخص، با پراکندگی ذخایر شناخته شده مشابه مواد معدنی مورد جستجو، به دست می آید. همچنین ممکن است برای یک کارشناس که تجربه زیادی در اکتشاف ذخایر معدنی از نوع مورد جستجو دارد، دانش از تجربه استنتاج شود. روش دانش محور مدل سازی پتانسیل معدنی ممکن است نقشه های شاهد دوتایی یا چند کلاسه را براساس میزان اطلاعات و تجربه به دست آمده از نواحی خوب اکتشاف شده قبلی و یا با توجه به میزان دقت داده های اکتشافی در دسترس در مناطق مناسب (به لحاظ زمین شناسی) برای اکتشاف، به کار گیرد. اگر میزان یک یا هر دو عامل فوق یعنی اطلاعات حاصل از عملیات صحرایی و همچنین تجربه حاصل از مطالعه اندیس های شناخته شده مشابه ذخایر مورد جستجو بالا باشد، استفاده از نقشه های شاهد چند کلاسه برای مدل سازی پتانسیل معدنی مناسب می باشد، در غیر این صورت باید از نقشه های شاهد دوتایی استفاده گردد. [Carranza, 2008]

## ۲- مدل سازی دانش محور با استفاده از نقشه های شاهد دوتایی

در این روش مدلسازی، نقشه های شاهد نشان دهنده ی معیارهای شناسایی، فقط شامل دو الگوی شاهد، با امتیاز حداکثر و حداقل می باشند. حداکثر امتیاز به الگوی فضایی داده می شود که نشان دهنده حضور یک منظر زمین شناسی شاخص و راهنما بوده و همراهی فضایی مثبت و محقق شده ای با کانی سازی های مشابه ذخایر مورد جستجو دارد. حداقل امتیاز به الگوی فضایی تخصیص می یابد که نشان دهنده عدم حضور یک منظر زمین شناسی شاخص و راهنما بوده و هیچگونه همراهی فضایی محقق شده و معنی داری با کانی سازی های مشابه ذخایر مورد جستجو ندارد. در روش دوتایی مدلسازی، هیچگونه امتیاز حد واسطی بین این دو مقدار حداکثر و حداقل وجود ندارد. بنابراین این روش با حالات طبیعی و دنیای واقعی مغایرت دارد. به عنوان مثال ذخایر معینی ممکن است عملاً با گسلهای مشخصی همراه باشند (محل های وقوع تعدادی از ذخایر که معمولاً در روی نقشه ها با محل گسل ها مطابقت دارند)، حال اگر تصویر سطحی مشخصی از موقعیت آنها (کانی سازی و گسل) در فضای سه بُعدی زیر سطحی در دسترس نباشد، ممکن است اشتباه صورت گیرد، زیرا محل گسل های نشان داده شده در نقشه ها ممکن است با محل واقعی کانی سازی فاصله داشته باشد.

## ۲-۱- مدل سازی دانش محور با استفاده از نقشه های شاهد چندکلاسه

در این نوع از مدلسازی پتانسیل معدنی، نقشه های شاهد نشان دهنده معیارهای پی جویی دارای بیش از دو کلاس می باشند. در این روش مدل سازی فرض میشود که الگوهای مختلف نقشه های شاهد دارای درجه اهمیت متفاوت از نظر میزان وابستگی به کانی سازی بوده و بنابراین دارای ارزش های وزنی مختلفی براساس روش به کار رفته در مدل سازی داده های فضایی، خواهند بود. بالاترین امتیاز به الگوهایی تخصیص می یابد که حضور منظرهای زمین شناسی دلالت کننده کانی سازی را به تصویر می کشند. البته مقدار این امتیازها که همراهی مثبت و امیدبخش الگوهای زمین شناسی را با ذخایر مورد جستجو نشان می دهند، متفاوت میباشد. همچنین پایین ترین امتیاز به الگوهایی تخصیص می یابد که نشان دهنده عدم حضور شواهد مناسب و دلالت کننده حضور کانی سازی بوده و همراهی مثبت و معنی داری بین منظرهای زمین شناسی و ذخایر مورد جستجو وجود ندارد. بنابراین دامنه پیوسته ای از حداقل تا حداکثر امتیاز در مدل سازی با استفاده از نقشه های شاهد چند کلاسه وجود دارد. این روش دانش محور ممکن است واقعیت را کمتر یا بیشتر از حالت طبیعی به نمایش گذارد.

## ۲-۲- روش منطق بولی

روش منطق بولین یا به اختصار منطق بولی، یک روش مدل سازی دانش محور با استفاده از نقشه های شاهد دوتایی می باشد. در کاربرد منطق بولی برای مدل سازی پتانسیل معدنی، خصوصیات و یا قسمتهایی (الگوها و کلاسهایی) از داده های فضایی که با یک معیار شناسایی مناسب مطابقت دارند، یعنی شرط حضور یک معیار اکتشاف امیدبخش در آنها صدق می کند، با ارزش درست و عموماً با امتیاز ۱، طبقه بندی و ذخیره می شوند. در غیر این صورت با امتیاز ۰ نشان داده می شود و به معنی ارزش نادرست از نظر حضور ذخیره (یا وجود منطقه امیدبخش اکتشافی) می باشد. بنابراین یک نقشه شاهد بولی فقط شامل دو کلاس طبقه بندی شده با ارزش های ۰ به معنی نادرستی و ۱ به معنی درستی است. در مدل سازی با استفاده از منطق بولی، کلیه نقشه های شاهد، وزنی معادل دارند، زیرا در ماهیت منطق بولی مفهومی تحت عنوان مثلاً ۲ ضرب در درست وجود ندارد. بنابراین امتیازهای ۰ و ۱ در نقشه های شاهد بولی فقط به صورت نمادین بوده و به عنوان ارزش عددی در محاسبات منظور نمی شود. نقشه های شاهد بولی مرحله به مرحله با استفاده از عملگرهای منطقی با هم ترکیب میشوند. هر یک از نقشه های شاهد بولی در واقع به عنوان یک شرط، انعکاسی از حضور یا عدم حضور فرآیندهای کنترل کننده کانی سازی و ارتباط بین آنها و الگوهای فضایی را در اختیار می گذارند. در هر مرحله حداقل دو نقشه شاهد بولی با هم ترکیب میشوند و یک وابستگی بین دو مجموعه از فرآیندهای کنترل کننده وقوع کانی سازی و الگوهای فضایی دلالت کننده حضور کانی سازی را نمایش می گذارند. در هر یک از مراحل مختلف ترکیب نقشه های شاهد بولی ممکن است از عملگرهای مختلفی، به عنوان مثال به صورت عملگرهای AND (اشتراک) و OR (اجتماع) استفاده شود.

عملگر AND وقتی استفاده میشود که حداقل باید دو مجموعه از شواهد فضایی با هم و هم زمان به منظور محقق شدن هدف، حضور داشته باشند. عملگر OR وقتی استفاده میشود که یکی از حداقل دو گروه از شواهد فضایی به منظور محقق شدن هدف، کافی است. علاوه بر دو عملگر فوق عملگرهای دیگری نظیر NOT و غیره نیز در منطق بولی وجود دارند که کمتر در مدلسازی دانش محور پتانسیل معدنی استفاده شده است. خروجی ترکیب نقشه های شاهد با استفاده از منطق بولی نیز نقشه ای دارای دو کلاس میباشد. یک کلاس (کلاس با امتیاز ۱) نشان دهنده محل هایی است که تمام یا اکثر معیارهای شناسایی در آن حضور دارند و کلاس دیگر (کلاس با امتیاز ۰) نشان دهنده نقاطی است که در آنها معیارهای شناسایی حضور ندارند.

مثال هایی از کاربرد این روش در مدل سازی پتانسیل معدنی در منابعی مانند [Thiart and De Wit, Bonham-Carter, 1994; Harris et al., 2001, 2000] آورده شده اند.

## ۲-۳- مدل سازی با روش همپوشانی شاخص دوتایی

روش همپوشانی شاخص دوتایی نیز همانطور که از اسم آن مشخص است یک روش مدل سازی دانش محور با استفاده از نقشه های شاهد دوتایی می باشد. در مدل سازی همپوشانی شاخص دوتایی خصوصیات یا کلاس هایی از داده های فضایی که نشان دهنده یک معیار مناسب و امیدبخش برای شناسایی کانی سازی هستند، به صورت یک کلاس با ارزش ۱ ذخیره می شوند، در حالی که دیگر قسمت های نقشه دارای ارزش ۰ هستند. بنابراین یک نقشه دوتایی شبیه نقشه های بولی به وجود می آید، با این تفاوت که ارزش های شاهد می تواند به صورت عددی در نظر گرفته شود. بنابراین نقشه شاخص دوتایی را می توان به عنوان یک نقشه که اجرای عملیات محاسباتی روی آن ممکن است، در نظر گرفت. در نتیجه هر نقشه شاهد دوتایی (۱ می تواند از ۱ تا n تغییر کند) می تواند یک وزن عددی را به خود اختصاص دهد یا در آن ضرب شود. این وزن براساس قضاوت و نظر کارشناسی و همچنین تجربه ای که در مورد اهمیت هر مجموعه از داده های فضایی و الگوهای زمین شناسی مرتبط با کانی سازی وجود دارد، تخصیص می یابد. در این حالت عموماً الگوهای زمین شناسی دلالت کننده کانی سازی به صورت نقشه های شاهدی هستند که تحت بررسی قرار می گیرند. این نقشه های شاهد دوتایی وزن دار با استفاده از معادله (۱) ترکیب می شوند. در این معادله امتیاز S برای هر محل (یا در واقع هر سلول واحد از منطقه مورد مطالعه) محاسبه می شود [Bonham-Carter, 1994].

$$S = \frac{\sum_{i=1}^n W_i R_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \quad \text{معادله (۱)}$$

در معادله (۱)،  $W_i$  وزن هر نقشه شاهد دوتایی  $B_i$  (۱ می تواند از ۱ تا n تغییر کند) می باشد. در نقشه خروجی، هر محل یا سلول دارای یک مقدار S بین ۰ یعنی کاملاً بدون ارزش اکتشافی و ۱ یعنی کاملاً امیدبخش و دارای ارزش اکتشافی حداکثر است. بنابراین اگرچه در این روش نقشه های ورودی فقط دارای دو کلاس و طبقه بندی می باشند، اما خروجی می تواند مقادیر ارزش اکتشافی حد واسط بین ۰ و ۱ را داشته باشد، که این حالت بیش تر از خروجی مدل سازی بولی واقعیت را منعکس می کند. در این خصوص نیز مثال هایی با استفاده از کاربرد روش مدل سازی همپوشانی شاخص دوتایی در تهیه مدل پتانسیل معدنی توسط [Bonham-Carter, 1994; Carranza et al.,

[Carranza, 2002; 1999; Thiart and De Wit, 2000;] ارائه شده است. تعیین و تخصیص وزن مناسب برای هر یک از نقشه‌های شاهد خاص تا حد زیادی به صورت درک و قضاوت کیفی وزن‌دهنده اجرا می‌شود و حتی در حالتی که دانش و تجربه کافی نیز وجود دارد، ممکن است شامل مراحل سعی و خطا<sup>۱</sup> باشد [Carranza, 2008].

## ۲-۴- مدلسازی با روش همپوشانی شاخص چندکلاسه

این روش در واقع نوع بسط داده شده روش مدل‌سازی همپوشانی شاخص دوتایی است. هر یک از  $n$  امین الگوها (کلاس‌ها) از نقشه شاهد  $W_i$  دارای یک وزن  $S_{ij}$  به منظور نمایش میزان وابستگی به ذخایر معدنی می‌باشد. امتیاز تخصیص یافته به الگوها می‌تواند یک عدد صحیح یا حقیقی مثبت باشد. هیچ محدودیتی برای دامنه امتیاز تخصیص وزن به الگوها وجود ندارد، به جز این که دامنه امتیاز تخصیص یافته به الگوها در همه نقشه‌های شاهد باید سازگار<sup>۲</sup> و هماهنگی داشته باشند. یعنی دارای مقادیر حداقل و حداکثر یکسان باشند. در واقع کنترل برتری‌های نسبی در نقشه‌های شاهد در حالت در نظر گرفتن دامنه تغییرات متفاوت وزن‌ها برای یک نقشه شاهد نسبت به دیگر نقشه‌های شاهد عملی نیست [Carranza, 2008]. اهمیت نسبی یک نقشه شاهد در مقایسه با دیگر نقشه‌های شاهد به وسیله تخصیص وزن‌های  $W_i$  کنترل می‌شود. این امتیاز معمولاً عدد صحیح مثبت است. نقشه‌های شاهد وزن‌دار سپس با استفاده از معادله (۲) با هم ترکیب می‌شوند که در واقع میانگین وزن‌ها را برای هر محل محاسبه می‌کنند [Bonham-Carter 1994].

$$\bar{S} = \frac{\sum_i S_{ij} W_i}{\sum_i W_i} \quad \text{معادله (۲)}$$

مقدار خروجی  $\bar{S}$  برای هر محل، برابر مجموع حاصل ضرب  $S_{ij}$  و  $W_i$  در هر نقشه شاهد تقسیم بر مجموعه  $W_i$  ها برای هر نقشه شاهد می‌باشد. مثال‌هایی از مدل‌سازی به روش همپوشانی شاخص چندکلاسه توسط [De Araujo & Macedo, Harris et al., 2001; Billa et al., 2004; Chico-Olmo et al., 2002; 2002;] ارائه شده است. بنابراین علاوه بر انعطاف‌پذیری در تخصیص وزن به الگوهای شاهد، مزیت روش همپوشانی شاخص چندکلاسه در مقایسه با مدل‌سازی به روش همپوشانی شاخص دوتایی این است که عدم قطعیت را نیز در نظر گرفته و در پیش‌بینی دخالت می‌دهد. بنابراین به کارگیری هم‌زمان هر دو روش دوتایی و چندکلاسه به جای به کارگیری یکی از آن‌ها بهتر است. ضعف این روش‌ها نیز در تلفیق خطی شواهد است که باعث می‌شود نقش فرآیندهای مؤثر در کانی‌سازی مستقیماً در نظر گرفته نشود [یوسفی و کامکارروحانی، ۱۳۸۹].

## ۳- روش منطق فازی

مدلسازی به روش منطق فازی براساس تئوری مجموعه‌های فازی [Zadeh, 1965] بنا شده است. مثال‌هایی از کاربرد منطق فازی در نقشه برداری و مدل‌سازی پتانسیل معدنی توسط [D'Ercole et al., 2000; Knox-Robinson, 2000; Porwal & Sides, 2000; Venkararaman et al., 2000; Carranza & Hake, 2001; Carranza, 2002; Porwal et al., 2003; Harris & Sanborn-Barrie, Tangestani & Moore, 2003; Ranjbar & Honarmand, 2004; Eddy et al., 2006; Nykanen et al., 2008; Rogge et al., 2006;] ارائه شده است. به طور کلی کاربرد منطق فازی در مدل‌سازی پتانسیل معدنی شامل سه مرحله اصلی است. مرحله اول شامل فازی‌سازی داده‌های مربوط به شواهد، مرحله دوم ترکیب منطقی نقشه‌های شاهد فازی با کمک شبکه‌ای از مجموعه عملگرهای مناسب فازی و مرحله سوم قطعی‌سازی و خروج از حالت فازی به منظور کمک به تفسیر بهتر می‌باشد.

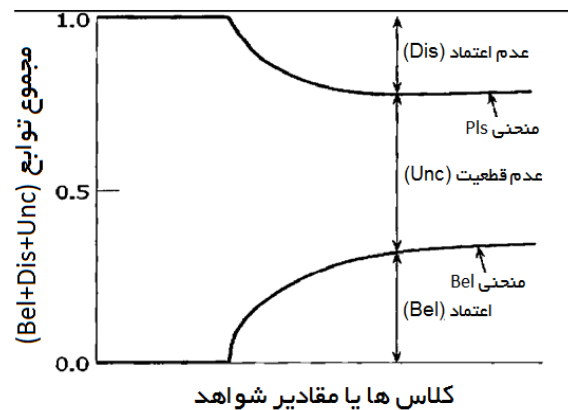
1. Trial-and-error

2. Compatible

#### ۴- روش توابع برآورد

##### ۴-۱- تخمین دانش محور توابع برآورد

مفهوم ارزیابی و تعیین میزان احتمال و درجه معرف بودن مجموعه‌ای از شواهد پیش‌گو توسط تئوری دمپستر- شایفر<sup>۳</sup> بیان می‌گردد. این تئوری ابتدا براساس تعمیم قانون احتمالات بیزین<sup>۴</sup> به وجود آمد و اساس تئوری برآورد توابع مربوط به میزان اعتبار شواهد شواهد (EBF)<sup>۵</sup>، شکل گرفت [Dempster, 1967, 1968]. سپس با تعریف دو تابع دیگر به نام‌های تابع اعتماد<sup>۶</sup> و تابع باور یا معقول بودن<sup>۷</sup> [Shafer, 1976] به ترتیب حدود پایین و بالا احتمالات تعریف شده و از آن پس در موارد مختلف توسط افراد مختلف توسعه پیدا کرد و در تلفیق داده‌ها و اطلاعات برای مدل‌سازی و شناسایی مناطق امیدبخش در اکتشاف مواد معدنی استفاده گردید. براساس این روش (روش برآورد توابع مربوط به میزان اعتبار و اهمیت شواهد که از این پس در متن به اختصار به آن توابع برآورد اطلاق می‌گردد) برای یک الگوی شاهد فضایی، که در ارزیابی میزان اهمیت یک موقعیت در مدل‌سازی پتانسیل معدنی استفاده می‌شود، چهار مقدار (توابع برآورد) در فاصله بین ۰ و ۱ براساس میزان شاهد بودن الگوی مورد نظر تعیین می‌گردد. این مقادیر شامل اعتماد (Bel)، عدم اعتماد<sup>۸</sup> (Dis)، عدم قطعیت<sup>۹</sup> (Unc) و باور (Pls) می‌باشند. توابع اعتماد و باور به ترتیب نشان‌دهنده حد پایین و بالای میزان معرف بودن یک شاهد فضایی در یک موقعیت پیشنهاد شده برای مطالعات اکتشافی می‌باشند. بنابراین توابع باور و اعتماد مجموعاً نشان‌دهنده میزان مبهم بودن<sup>۱۰</sup> و غیر قطعی بودن ارزیابی هستند. تابع عدم قطعیت (Unc) نشان‌دهنده عدم شناخت<sup>۱۱</sup> یا تردید<sup>۱۲</sup> در مورد یک شاهد فضایی، در یک موقعیت برای پی‌جویی یک ذخیره خاص می‌باشد. مقدار تابع عدم قطعیت از اختلاف بین تابع اعتماد و تابع باور به دست می‌آید. تابع عدم اعتماد (Dis) نشان دهنده میزان عدم معرف بودن یک شاهد فضایی در یک موقعیت برای پی‌جویی یک ذخیره خاص می‌باشد. در شکل (۱) روابط بین توابع برآورد نشان داده شده است.



شکل (۱): روابط بین توابع برآورد [Carranza, 2008]

مجموع مقادیر توابع اعتماد، عدم قطعیت و عدم اعتماد برای یک شاهد فضایی برابر ۱ است. همچنین مجموع توابع باور و عدم اعتماد نیز برابر ۱ است. بنابراین روابط  $Unc = Plc - Bel$ ،  $Pls = Bel + Unc$  و  $Bel = Pls + Unc$  برقرار است. میزان تابع عدم قطعیت تحت تأثیر نسبت بین تابع اعتماد و تابع عدم اعتماد است (Bel و Dis). اگر تابع عدم قطعیت برابر ۰ باشد، یعنی اطلاعات و دانش کافی و کامل در مورد شاهد فضایی وجود دارد، در این صورت  $Bel + Dis = 1$  و نسبت بین Bel و Dis برای یک شاهد، دارای حالتی دوتایی است یعنی طبق تئوری احتمالات  $Dis = 1 - Bel$  یا  $Bel = 1 - Dis$  است. حال اگر عدم قطعیت برابر ۱ باشد، یعنی هیچ اطلاعات و دانشی در مورد شاهد فضایی وجود نداشته و عدم شناخت و ابهام به طور کامل وجود دارد. در این صورت توابع Bel و Dis برای یک شاهد مشخص برابر ۰ می‌باشند. بنابراین در حالت عدم قطعیت کامل، تابع اعتماد و تابع عدم اعتماد وجود ندارند. البته در حالات طبیعی معمولاً

3. Dempster-Shafer

4. Bayesian

5. Evidential Belief Functions (EBF)

6. Belief

7. Plausibility

8. Disbelief

9. Uncertainty

10. Vague

11. Ignorance

12. Doubt

عدم قطعیت نه برابر ۰ و نه برابر ۱ است بنابراین  $0 < Unc < 1$  و در نتیجه  $Bel = 1 - Dis - Unc$  یا  $Dis = 1 - Bel - Unc$  می‌باشد. با توجه به این که عدم قطعیت معمولاً حضور دارد، نسبت بین  $Bel$  و  $Dis$  برای یک شاهد مشخص معمولاً دوتایی نیست و بنابراین برای یک شاهد مورد استفاده در محاسبات مدل‌سازی، نه تنها مقدار  $Bel$  بلکه مقادیر  $Dis$  و  $Unc$  نیز باید تخمین زده شوند. در کاربرد روش دمپستر-شیفر در مدل‌سازی و نقشه‌برداری پتانسیل معدنی، معمولاً دو تا از سه تابع  $Bel$ ،  $Dis$  و  $Unc$  به منظور تعیین میزان تأیید یا عدم تأیید یک شاهد فضایی در معرف بودن یک تیپ کانی‌سازی مورد جستجو و همچنین میزان عدم قطعیت آن شاهد فضایی در ابتدا تخمین زده می‌شوند. سپس تابع  $Pls$  به سادگی با استفاده از دو تابع دیگر محاسبه می‌گردد. تابع  $Pls$  در قانون تلفیق دمپستر استفاده نمی‌شود. تخمین هم‌زمان  $Bel$  و  $Dis$  معمولاً مشکل است، زیرا وابستگی دوتایی بین این توابع باعث نادیده گرفتن  $Unc$  می‌شود. تخمین با هم  $Dis$  و  $Unc$  نیز مشکل است، زیرا عدم اعتماد و تردید با هم تداخل دارند. بنابراین تخمین با هم  $Bel$  و  $Unc$  معمولاً آسان‌تر و راحت‌تر<sup>۱۳</sup> است. در حالتی که  $0 < Unc < 1$  است،  $Bel$  معمولاً کمتر یا معادل ۰/۵ برآورد می‌شود اما هرگز برابر ۰ نیست. ضمناً مقدار  $Unc$  از روش‌های زیر تخمین زده می‌شود.

- مقدار  $Pls = Bel + Unc$  بیشتر از ۰/۵ بوده امام برابر ۱ نیست.

- مقادیر تخمینی  $Bel$  و  $Unc$  به طور معکوسی متغیر می‌باشند، یعنی وقتی یکی بیشتر تر شود، دیگری کمتر می‌گردد و برعکس.

- مقادیر تخمینی  $Dis$  نیز با تخمین مقادیر  $Bel$  و  $Unc$  به طور معکوس تغییر می‌کند.

سه شرط فوق برای ارائه وابستگی‌ها و روابط واقع‌بینانه در حالت  $0 < Unc < 1$  مهم هستند. در مرحله اول عدم قطعیت بالاتر، اعتماد پایین‌تر را منجر می‌شود یا برعکس. در مرحله دوم اعتماد بالاتر، عدم اعتماد پایین‌تر را منجر خواهد شد و برعکس. بنابراین در حالت معمول یعنی در حالت  $0 < Unc < 1$ ، تخمین‌های  $Bel$  به سمت ۰ میل می‌کنند، در حالی که  $Pls = Bel + Unc$  به سمت ۱ می‌رود. شرایط فوق برای تخمین دانش‌محور  $Bel$  و  $Unc$  در حالتی که برای ارتباط بین شاهد فضایی و کانی‌سازی، عدم قطعیت کامل وجود دارد (یعنی  $Unc = 1$ ) یا اطلاعات و دانش به‌طور کامل وجود دارد (یعنی  $Unc = 0$ ) به کار نمی‌رود. مثالی از عدم قطعیت کامل ( $Unc = 1$ ) در نقشه‌برداری پتانسیل معدنی، وقتی است که داده فضایی وجود ندارد. همچنین هیچ حالت قطعیت کامل ( $Unc = 0$ ) در مدل‌سازی پتانسیل معدنی وجود ندارد زیرا اگر  $Unc$  برابر ۰ باشد، اصلاً نیازی به مدل‌سازی پتانسیل معدنی نخواهد بود. پس از تخمین  $Bel$  و  $Unc$  در حالت  $0 < Unc < 1$ ، دو تابع باقی‌مانده یعنی  $Dis$  و  $Pls$  به سادگی براساس روابط بین توابع برآورد که قبلاً بیان گردید و در شکل (۱) نیز نشان داده شد، برآورد می‌شوند. در عمل پارامترهای تخمین زده شده در روش توابع برآورد، در جدول خصوصیات همراه با نقشه‌های شاهد داده‌های فضایی مورد استفاده در مدل‌سازی پتانسیل معدنی، وارد می‌شوند. تخمین  $Bel$  شبیه تخمین امتیاز الگوهای شاهد مختلف در نقشه‌های چندکلاسه و همچنین تعیین امتیاز توابع عضویت فازی می‌باشد.

نقشه اعتماد دارای احتمالات جمع شده برای فرضیه مکان درست است و حداقل احتمال برای فرضیه مکان درست را نشان می‌دهد و در مکان‌هایی که شواهد مورد نظر در آن وجود دارند، میزان اعتقاد بالاتر است. از سوی دیگر، نقشه مقبولیت مناطق گسترده‌تری را نشان می‌دهد که احتمال بالاتری دارند. این نقشه برای فرضیه درست، بالاترین احتمال ممکن را نشان می‌دهد. نقشه فواصل اعتقاد احتمال بالقوه را نشان می‌دهد؛ این تصویر همچنین به ارزشمند بودن جمع‌آوری اطلاعات بیشتر دلالت دارد که منجر می‌شود منطقه برای تحقیقات آینده دارای ارزش بالقوه بیشتری باشد [اسلمان‌ماهینی و کامیاب، ۱۳۹۰].

پس از تخمین کلیه توابع برآورد، باید این توابع که برای نقشه‌های شاهد مختلف برآورد شده‌اند، با هم تلفیق شوند تا امتیاز هر سلول واحد

از منطقه مورد مطالعه به‌دست آید. در این حال به منظور تلفیق برای هر نقشه شاهد فضایی  $X_i$  (از ۱ تا  $n$ )، چهار نقشه خصوصیت نشان

دهنده توابع  $Bel$ ،  $Dis$ ،  $Pls$  و  $Unc$  تولید می‌شود. نقشه‌های توابع برآورد تولید شده برای نقشه شاهد  $X_1$  می‌توانند با نقشه‌های توابع

برآورد تولید شده برای نقشه شاهد  $X_2$ ، براساس قانون دمپستر تلفیق شوند. این تلفیق می‌تواند به‌وسیله کاربرد عملگرهای AND و OR

اجرا گردد. معادلات تلفیق نقشه‌های توابع برآورد تولید شده مربوط به دو نقشه شاهد فضایی  $X_1$  و  $X_2$  با استفاده از عملگر AND به

صورت روابط (۳) تا (۵) بیان می‌گردد [Carranza, 2008]:

$$Bel_{X_1, X_2} = \frac{Bel_{X_1} \cdot Bel_{X_2}}{\beta} \quad \text{معادله (۳)}$$

$$Dis_{x_i, x_r} = \frac{Dis_{x_i} Dis_{x_r}}{\beta} \quad \text{معادله (۴)}$$

$$Unc_{x_i, x_r} = \frac{Unc_{x_i} Unc_{x_r} + Bel_{x_i} Unc_{x_r} + Bel_{x_r} Unc_{x_i} + Dis_{x_i} Unc_{x_r} + Dis_{x_r} Unc_{x_i}}{\beta} \quad \text{معادله (۵)}$$

در معادلات،  $\beta$  از رابطه (۶) به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\beta = 1 - Bel_{x_i} Dis_{x_r} - Dis_{x_i} Bel_{x_r} \quad \text{معادله (۶)}$$

$\beta$  یک عامل نرمال‌کننده جهت اطمینان از حالت  $Bel + Unc + Dis = 1$  است. معادلات (۳) و (۴) افزایشده<sup>۱۴</sup> هستند. بنابراین نتیجه کاربرد عملگر AND در تلفیق نقشه‌های Bel و همچنین در تلفیق نقشه‌های Dis، نقشه‌هایی است که در آن مقادیر خروجی به ترتیب نمایش دهنده میزان اعتماد و عدم اعتماد است. این نقشه‌ها برای یک موقعیت، که توسط شواهد فضایی ارزیابی شده، با استفاده از دو نقشه ورودی دارای انطباق فضایی تولید می‌شوند. در معادله (۵) هر دو مورد جابه‌جایی<sup>۱۵</sup> و اجماع‌پذیری<sup>۱۶</sup> (شرکت‌پذیری) وجود دارد. بنابراین نتیجه کاربرد عملگر AND در تلفیق دو نقشه Unc، نقشه‌ای است که در آن مقادیر خروجی به وسیله شواهد فضایی با عدم قطعیت زیاد در هر یک از دو نقشه ورودی کنترل می‌گردد. بنابراین عملگر AND در ترکیب دو شاهد فضایی مکمل<sup>۱۷</sup> هم  $X_1$  و  $X_2$ ، به منظور ارزیابی یک موقعیت در مدل‌سازی پتانسیل معدنی مناسب است. به عنوان مثال در اکتشافات مواد معدنی فاصله از گسل (مجاورت با گسل) و همچنین آنومالی‌های ژئوشیمیایی رسوبات آبراهه‌ای می‌توانند دو مجموعه از شواهد فضایی مکمل هم برای وقوع ذخایر معدنی تلقی گردند. زیرا انواعی از ذخایر معدنی مثلاً ذخایر طلای آبی‌ترمال در امتداد گسل‌ها بوده و همچنین اگر در سطح باشند، می‌توانند عناصر فلزی را آزاد ساخته و در سیستم آبراهه‌ها باعث تمرکز فلزات در حد آنومالی در رسوبات گردند. بنابراین کاربرد عملگر AND در ترکیب دو شاهد، خروجی را در بر دارد که در آن مناطق معرفی شده توسط هر دو شاهد تأیید شده است. بعد از به کار بردن معادلات (۳) تا (۵)، مقدار  $Pls_{x_i, x_r}$  با استفاده از روابط موجود، قابل محاسبه است. تلفیق نقشه‌های توابع برآورد ایجاد شده مربوط به دو نقشه شاهد فضایی  $X_1$  و  $X_2$  با استفاده از عملگر OR به صورت روابط (۷) تا (۹) بیان می‌گردد [Carranza, 2008]:

$$Bel_{x_i, x_r} = \frac{Bel_{x_i} Bel_{x_r} + Bel_{x_i} Unc_{x_r} + Bel_{x_r} Unc_{x_i}}{\beta} \quad \text{معادله (۷)}$$

$$Dis_{x_i, x_r} = \frac{Dis_{x_i} Dis_{x_r} + Dis_{x_i} Unc_{x_r} + Dis_{x_r} Unc_{x_i}}{\beta} \quad \text{معادله (۸)}$$

$$Unc_{x_i, x_r} = \frac{Unc_{x_i} Unc_{x_r}}{\beta} \quad \text{معادله (۹)}$$

در معادلات (۷) تا (۹)، مقدار  $\beta$  از همان معادله (۶) محاسبه می‌شود. روابط (۷) و (۸) هم جابه‌جا پذیر و هم اجماع‌پذیر هستند. بنابراین نتیجه کاربرد عملگر OR در تلفیق نقشه‌های Bel و همچنین در تلفیق نقشه‌های Dis، نقشه‌هایی است که در آن‌ها مقادیر خروجی به وسیله شواهد فضایی به ترتیب با میزان اعتماد زیاد و عدم اعتماد بالا در هر یک از دو نقشه ورودی کنترل می‌شوند. با توجه به این‌که معادله (۷) افزایشده می‌باشد، بنابراین نتیجه کاربرد عملگر OR در تلفیق دو نقشه Unc، نقشه‌ای است که در آن مقادیر خروجی به وسیله شواهد فضایی با عدم قطعیت پایین در هر یک از دو نقشه ورودی کنترل می‌گردد. بنابراین عملگر OR در ترکیب دو نقشه شاهد فضایی مکمل هم

14. Multiplicative  
15. Commutative  
16. Associative  
17. Supplementary

$X_1$  و  $X_2$ ، به منظور ارزیابی یک موقعیت در مدل‌سازی پتانسیل معدنی مناسب است و خروجی ترکیب دو شاهد، مناطقی را معرفی می‌کند که در آن‌ها محل حضور حداقل یکی از دو شاهد تأیید شده است. همان‌طور که قبلاً گفته شد، در اکتشافات مواد معدنی فاصله از گسل (مجاورت با گسل) و همچنین آنومالی‌های ژئوشیمیایی می‌توانند دو مجموعه از شواهد فضایی مکمل هم برای وقوع ذخایر معدنی تلقی گردند. در حالت تلفیق با عملگر OR تمام مناطق در مجاور گسل و همچنین محل تمام آنومالی‌های ژئوشیمیایی لزوماً منطبق با محل حضور کانی‌سازی نیستند.

بعد از به کار بردن ۳ معادله (۷)، (۸) و (۹)، مقدار  $Pls_{X_1, X_2}$ ، با استفاده از روابط موجود، قابل محاسبه است. طبق قانون تلفیق دمپستر در هر زمان فقط دو نقشه از شواهد فضایی توابع برآورد، قابل ترکیب می‌باشند، بنابراین برای تلفیق نقشه‌های شاهد  $X_1$  تا  $X_n$  باید نقشه‌ها را یکی پس از دیگری با به کار بردن مناسب معادلات (۳) تا (۹) تلفیق نمود. در نهایت مقدار نهایی Bel به عنوان شاخصی برای کانی‌سازی در نظر گرفته می‌شود. به علاوه با توجه به این‌که معادلات (۳) افزایشده است، در حالی که معادله (۷) اجماع‌پذیر و جابه‌جا پذیر است، نقشه خروجی تلفیقی Bel که از معادله (۳) استنتاج شده خیلی مشابه نتایج تلفیق با معادله (۷) نیست. یعنی این‌که مقادیر تلفیقی حاصل از توابع برآورد مختلف نباید به صورت مطلق و جداگانه تفسیر شوند، بلکه باید نسبت به هم مقایسه و تفسیر گردند. بنابراین در مدل‌سازی پتانسیل معدنی، مقادیر تلفیق Bel نشان‌دهنده میزان نسبی احتمال وقوع ذخایر معدنی می‌باشد. همانند مدل‌سازی پتانسیل معدنی به روش منطق بولی و منطق فازی، تلفیق توابع برآورد با استفاده از عملگرهای منطق بولی نیز می‌تواند در مدل‌سازی مفید باشد.

## ۵- نتیجه گیری

مدل‌سازی فرآیندی است که منجر به تولید مدل می‌گردد. مدل خلاصه یک واقعیت است که جزئیات مهم در آن در نظر گرفته شده است. مدل در واقع یک واقعیت را ساده بیان می‌کند ولی این ساده کردن به حدی نیست که مسائل مهم حذف شوند. یعنی عواملی که تاثیر حیاتی دارند، در مدل در نظر گرفته می‌شوند. با استفاده از GIS می‌توان بهترین مناطقی را که از نظر داشتن خصوصیات لازم برای وجود کانی‌سازی مناسب می‌باشند، شناسایی نمود تا در مراحل بعدی و تفصیلی‌تر، عملیات اکتشافی بر روی آنها متمرکز گشته، در زمان و هزینه صرفه‌جویی شده و در ضمن از ریسک عملیات اکتشافی نیز کاسته شود. روش‌های مختلف اکتشافی وجود دارند که هر روش ممکن است تعدادی نواحی امیدبخش معرفی کند ولی به دلیل محدودیت مالی و زمانی فقط تعدادی از این مناطق به عنوان اولویت اکتشافی انتخاب می‌شوند. در نتیجه در انتخاب این مناطق باید حداکثر دقت در نظر گرفته شود. پس اگر به جای بررسی جداگانه هر روش اکتشافی، روش‌های مختلف در ارتباط با یکدیگر مورد بررسی قرار گیرند و خصوصیات روش‌های مختلف در یک چارچوب وابسته به هم تجزیه و تحلیل شوند، انتخاب بهترین نواحی برای تمرکز عملیات اکتشافی با دقت بیشتر و ریسک کمتر صورت خواهد گرفت. روش‌های ساخت مدل‌های پیشگوی معدنی به دو دسته دانش محور و داده محور تقسیم میشوند. از بین روش‌های مختلف با ذکر این نکته که هر یک از روش‌ها ممکن است در شرایطی بهتر از سایر روش‌ها عمل کند، اما به نظر می‌رسد استفاده از روش توابع برآورد به دلیل ارائه شاخصی برای عدم قطعیت روشی مناسب‌تر نسبت به سایر روش‌های معرفی شده باشد.



## منابع و مراجع

- ۱- رجایی، ب.، نقوی، ا.، و طاهری، ن.، آشنائی با نرم افزار های تعادلی، چاپ دوم، انتشارات دانشگاه، تهران، ۱۳۷۸.
- ۲- ابراهیمی، م.ح. و رحمانیان، م.، "تجزیه و تحلیل تئوری و شبیه سازی عددی شعله های پیش آمیخته"، مجموعه مقالات اولین کنفرانس احتراق ایران، ۲۸-۲۹ بهمن، ۱۳۸۴.
- ۳- احمدی، م.ح.، حقیقت، ح. و سوری، ا.، "اندازه گیری آلاینده های نیروگاه ری و مقایسه با استانداردهای موجود"، مجله فنی مهندسی مدرس، سال چهارم، شماره ۲، زمستان ۱۳۸۰.
- ۴- حسامیان، م. ح.، "مقایسه شعله های پیش مخلوط آزاد با شعله های پیش مخلوط در محیط متخلخل"، پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک (تبدیل انرژی)، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳۸۲.
- 5-Turns, S.R., and Mantel, S.J., *An Introduction to Combustion*, 2nd Edition, McGraw Hill, 2000.
- 6-Williams, A., "*Experimental investigation of premixed combustion within highly porous media*", Proceeding of the ASME/JSME Thermal Engineering Joint Conference, pp. 752-758, 1992.
- 7-Asemi, M.A., Rahimi, M.H., and Fathi, A., "*Stochastic modeling of CO and NO in premixed methane combustion*", *Combustion and Flame*, Vol. 113, pp. 135-146, 1998.
- 8-Holland, M. [2004], *Guide to citing Internet sources* [online]. Poole, Bournemouth University. Available from: [http://www.bournemouth.ac.uk/library/using/guide\\_to\\_citing\\_internet\\_sourc.html](http://www.bournemouth.ac.uk/library/using/guide_to_citing_internet_sourc.html) [Accessed 4 November 2004].