

## بهینه‌سازی تابع بازدهی سه بُعدی بر اساس توابع احتمال کشف کانسار و هزینه حفاری به‌منظور جانمایی شبکه گمانه‌های اکتشافی

امین حسین مرشدی<sup>۱</sup>

۱- استادیار، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد

(دریافت: مهر ۱۳۹۴، پذیرش: اسفند ۱۳۹۴)

### چکیده

به‌منظور اکتشافات زیرسطحی کانسار، شبکه حفاری باید به‌گونه‌ای طراحی شود که از اتلاف منابع و بودجه جلوگیری شود. در طراحی بهینه شبکه حفاری باید دو راهبرد افزایش احتمال کشف و کاهش هزینه‌ها در نظر گرفته شود که این اصول، دو نقطه مقابل در بهینه‌سازی هستند. اولین مرحله در این راستا، بهینه‌سازی امتداد شبکه طراحی شده است که به‌امتداد اصلی کانسار و ضریب شکل (نسبت عرض به طول) کانسار بستگی دارد که در نهایت از مدل بازدهی (تفاضل توابع درآمد و هزینه) استفاده شده است. در این مطالعه، منظور از درآمد، افزایش احتمال کشف کانسار و منظور از هزینه، هزینه‌های حفاری اکتشافی، به‌عنوان دو سنگ بنای اصلی مدل بهینه‌سازی است. تابع احتمال کشف، به‌عواملی چون هندسه کانسار (پارامترهای بُعدی و جهت)، نسبت طول کانسار به طول شبکه حفاری و زاویه برخورد گمانه به کانسار بستگی دارد. انواع کانسارهای رگه‌ای، لایه‌ای و پورفیری به ترتیب دارای هندسه یک، دو و سه بُعدی هستند. در مطالعه حاضر، کانسارهایی با هندسه سه بُعدی مورد بررسی قرار می‌گیرند که مدل اولیه هندسه کانسار باید توسط مطالعات ژئوفیزیکی تعیین شود. پارامترهای موثر در تابع هزینه حفاری شامل طول حفاری، نوع حفاری و زاویه حفاری است. در مرحله بعد، مدل تابع بازدهی نسبت به هر یک از متغیرهای مستقل طول شبکه نمونه‌برداری و زاویه حفاری مشتق جزئی گرفته و نتیجه حل آن، تشکیل دستگاه دو معادله و دو مجهول است. با حل این دستگاه، متغیرهای طول شبکه نمونه‌برداری و زاویه حفاری به‌صورت بهینه تعیین شده که مقادیر به‌دست آمده این دو پارامتر، مقدار بهینه احتمال کشف را مشخص نموده و در نهایت براساس تغییرات شیب کانسار، زاویه حفاری نظیر آن تصحیح شده است.

### واژگان کلیدی

شبکه گمانه‌های اکتشافی، مدل بازدهی حفاری، هندسه کانسار، پارامترهای هزینه حفاری، تابع احتمال کشف کانسار

### ارجاع به این مقاله:

حسین مرشدی، الف.، (۱۳۹۴)، بهینه‌سازی تابع بازدهی سه بُعدی بر اساس توابع احتمال کشف کانسار و هزینه حفاری به‌منظور جانمایی شبکه گمانه‌های اکتشافی، روش‌های تحلیلی و عددی در مهندسی معدن، ۵(۱۰)، ۱۱۱-۱۲۳.

## ۱- مقدمه

اطلاعات به صورت محدود مورد استفاده قرار گرفته و اغلب مکمل روش‌های زمین آماری بوده است [۴]. در رویکرد احتمالاتی، احتمال کشف کانسار متکی بر مقایسه هندسه شبکه حفاری و هندسه کانسار است. با توجه به احتمال کشف مورد نظر و خصوصیات بُعدی و جهتی کانسار (طول)، نسبت عرض به طول، آزیموت، شیب و ...، ویژگی‌های شبکه اکتشافی (هندسه، طول و آزیموت) تعیین می‌شود. با بررسی همزمان تابع احتمال کشف و تابع هزینه حفاری، می‌توان شبکه اکتشافی را با استفاده از تابع بازدهی بهینه کرد [۶، ۷]. روش‌های ارائه شده زمین آماری برای انتخاب محل حفاری‌های اضافه، بر این اصل استوار است که واریانس تخمین را با افزایش حفاری در مناطق با عدم قطعیت بالا، می‌توان کاهش داد. تابع هدف باید به گونه‌ای انتخاب شود که با افزودن حفاری‌های جدید، باعث حداکثر میزان کاهش در واریانس کریجینگ شود. معیار دیگر زمین آماری، میانگین قدرمطلق خطای تخمین است، این روش بر مبنای اختلاف بین مقدار واقعی و تخمینی تعریف شده است. در روش شبیه‌سازی زمین آماری نیز، از معیاری بر مبنای اختلاف و تغییرات بین تحقق‌ها مختلف می‌توان استفاده کرد [۴، ۸]. یکی از شاخص‌های مربوط به ارزش اطلاعات، بر مبنای ارزش اقتصادی بلوک‌های کانسار تعریف شده است که به صورت حاصلضرب پارامترهای وزن مخصوص، عیار، حجم بلوک و قیمت تعیین می‌شود. روش دیگر استفاده از تئوری اطلاعات، آنتروپی و محتوای اطلاعات است و نمونه برداری در مناطقی انجام می‌شود که مقدار آنتروپی بیشینه باشد [۹].

در مطالعه حاضر، بهینه‌سازی شبکه حفاری بستگی به نوع هندسه کانسار دارد و برای طراحی شبکه حفاری، ابتدا امتداد شبکه و سپس با استفاده از مدل بازدهی، دیگر خصوصیات شبکه و گمانه‌ها بهینه می‌شود. بدین منظور، مدل‌سازی سه بُعدی احتمال کشف و هزینه حفاری بر اساس ضریب شکل کانسار، نسبت طول کانسار به طول شبکه و تپ کانسار انجام شده و در نهایت خصوصیات جهتی و بُعدی شبکه اکتشافی پیشنهاد می‌شود.

## ۲- رویکرد احتمالاتی طراحی شبکه اکتشافی

در پژوهش‌های صورت گرفته تعیین پارامترهای الگوی بهینه شبکه برای کشف اهداف بیضوی شکل مورد نظر بوده

برای اکتشاف و شناخت زیر سطحی کانسار، یکی از مهمترین مراحل، طراحی، جایابی و اجرای بهینه حفاری‌های اکتشافی است [۱]. در یک سیستم نمونه برداری سه بُعدی، معمولاً همه مناطق به یک اندازه در دسترس نیستند و در نتیجه احتمال انتخاب مناطق عمیق کمتر از مناطق سطحی است، در صورتی که، یکی از شرایط صحت نمونه برداری، ایجاد یک فضای هم احتمال جهت برداشت نمونه‌ها است [۲]. نمونه‌برداری بسته به هندسه فضایی هدف، می‌تواند دو بُعدی یا سه بُعدی باشد. داده‌های حاصل از حفاری، نقش مهمی در مدلسازی عدم قطعیت در فضای سه بُعدی دارد. به منظور بهینه‌سازی نمونه‌برداری لازم است به مواردی چون تعداد نمونه‌های لازم برای دستیابی به خطای مجاز در سطح اعتماد معین، نحوه توزیع (محل و موقعیت) نمونه‌ها در فضای واحد نمونه‌برداری و بزرگی (جرم) نمونه‌ها توجه کرد. در سیستم‌های سه بُعدی، احتمال روبرو شدن با یک خطای سیستماتیک به خصوص در صورتی که تغییرات متغیر تصادفی نسبت به عمق قابل ملاحظه است، به مراتب بیشتر از سیستم‌های یک و دو بُعدی است. از این رو برای دسترسی به نقاط عمیق توده معدنی راه حلی جز حفر چاهک، چاه، گمانه یا تونل وجود ندارد. نمونه برداری سه بُعدی از نظر الگوی گمانه‌ها، به سه نوع کاملاً تصادفی، ردیفی تصادفی و ردیفی سیستماتیک تقسیم می‌شود. شکل و هندسه شبکه حفاری دارای شکل‌های متفاوتی است و در زمانی که هندسه کانسار به طور کامل شناخته شده نباشد، یکی از بهترین شکل‌های شبکه حفاری، شبکه مربعی است که در دو راستا، دارای طول یکسان است [۲، ۳].

در چهار دهه اخیر، مطالعات مختلفی در زمینه تعیین بهینه تعداد و موقعیت نمونه‌ها و بهینه سازی الگوریتم نمونه برداری انجام شده است که به طور کلی این راهکارها را می‌توان در سه دسته روش احتمالاتی، مدیریت خطای زمین آماری و روش‌های مبتنی بر ارزش اطلاعات تقسیم بندی نمود. در روش احتمالاتی، راهکارهای ارائه شده منحصر به شبکه‌های منظم حفاری بوده است و در مقابل، دیدگاه مدیریت خطای زمین آماری بیشترین کاربرد را در این زمینه داشته است [۴، ۵]. الگوریتم‌های مبتنی بر ارزش

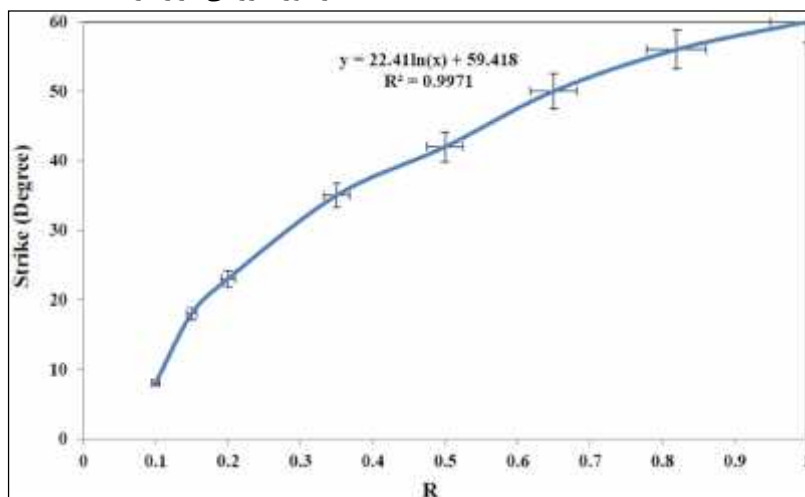
$$P(r) = \frac{\tan^{-1}\left(\frac{b}{a}\sqrt{\frac{a^2-r^2}{r^2-b^2}}\right)}{f/2} \quad (1)$$

که  $a$  و  $b$  به ترتیب شعاع بزرگ و کوچک هدف بیضوی و  $r$ ، فاصله بین مرکز هدف تا محل حفاری است.

برای بهینه‌سازی شبکه حفاری، ابتدا باید امتداد شبکه حفاری را نسبت به امتداد کانسار مورد نظر، بهینه کرد. زاویه بهینه بین امتداد کانسار و شبکه حفاری به مقدار ضریب شکل کانسار ( $R$ ) که نسبت عرض به طول کانسار است، بستگی دارد که با افزایش ضریب شکل، زاویه بین امتداد کانسار و شبکه حفاری افزایش می‌یابد و به طور تقریبی بین ۱۰ تا ۵۰ درجه تغییر می‌کند [۳].

$$\begin{aligned} R < 0.15 &\Rightarrow 18^\circ \pm 10^\circ \\ 0.15 < R < 0.5 &\Rightarrow 30^\circ \pm 10^\circ \\ 0.5 < R < 1 &\Rightarrow 45^\circ \pm 10^\circ \end{aligned} \quad (2)$$

در تعیین امتداد شبکه حفاری باید به این نکته توجه داشت که بعضی از تیپ کانسارها مانند کانسارهای پورفیری دارای جهت یافتگی‌های طبیعی هستند که تعیین امتداد آنها با مشکلات خاص خود همراه است [۱۲]. در تعیین امتداد شبکه که با چرخش شبکه نسبت به کانسار همراه است باید قابلیت توجه خصوصیات کانسار در دو امتداد را دارا باشد. در محاسبه طول شبکه بهینه باید به احتمال کشف بهینه و زاویه حفاری نیز توجه کرد. در شکل ۱، نحوه تعیین امتداد شبکه حفاری براساس مقدار ضریب شکل کانسار مورد بررسی قرار گرفته شده است.



شکل ۱: رابطه بین ضریب شکل و زاویه بین امتداد شبکه حفاری و امتداد کانسار

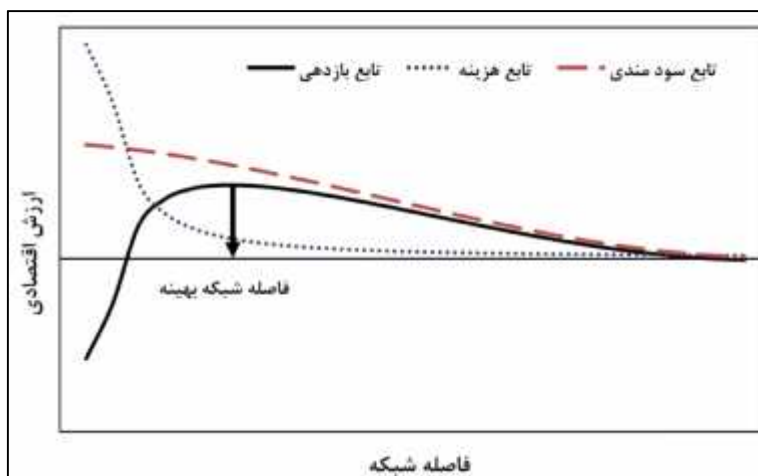
است. انتخاب اهداف بیضوی شکل، به این دلیل بود که تصویر سطحی اکثر اهداف طبیعی را می‌توان با اشکال بیضی‌وار تقریب زد و از قابلیت تعمیم بالایی برخوردار است. در مواردی که هدف دارای جهت یافتگی ترجیحی مشخص است، شبکه لوزی وار، بهینه‌ترین الگو حفاری محسوب شده و در مواردی که جهت یافتگی هدف مشخص نباشد، باید از شبکه مربعی یا مثلثی استفاده کرد. در این روش، فاصله بهینه شبکه، تابعی از هزینه حفاری، ارزش اقتصادی هدف (کانسار)، شکل (هندسه) و احتمال کشف هدف است. در این بررسی، براساس چگالی حفاری یکسان در هر الگوی حفاری، موثرترین زاویه جهت‌گیری شبکه با محور اصلی هدف ارائه شده است که این زاویه طبق مطالعات انجام شده برای شبکه‌های لوزی، مستطیلی، مربعی و مثلثی به ترتیب صفر، ۲۶، ۴۵ و ۳۰ درجه است [۱۰، ۱۱]. انتخاب الگو شبکه در دو حالتی که جهت‌گیری هدف مشخص یا نامشخص باشد و براساس احتمال کشف یک بار و بیش از یک بار مورد بررسی قرار گرفته شده است؛ البته شایان ذکر است که هدف‌های مورد بررسی می‌توانند دارای ساختارهای ورقه‌ای، منشوری، بیضی وار ناقص و استوانه‌ای باشد. با توجه به افزایش فاصله بین مرکز هدف تا منطقه حلقوی حفاری، احتمال کشف هدف کاهش می‌یابد که در نهایت احتمال کشف ( $P$ ) به صورت یک فرمول تحلیلی بیان شده است [۶]:

$$F(x) = K \times R(x) - M \times C(x) \quad (3)$$

در مدل بازدهی از یک طرف تابع سودمندی که مرتبط با احتمال کشف است، طبق تعریف در بازه ۰-۱ قرار می‌گیرد و از سوی دیگر تابع هزینه، می‌تواند بین صفر تا بی نهایت تغییر کند. به منظور رفع این ناهمسانی باید ضرائب مقیاس‌کننده را به گونه‌ای تعریف کرد که حاصل ضرب توابع در ضرائب در بازه [۰-۱] قرار بگیرد. در شکل ۲، به صورت شماتیک نحوه محاسبه تابع پیشنهادی بازدهی براساس توابع سودمندی و هزینه و در نهایت فاصله بهینه برای شبکه در حالت دوبعدی نمایش داده شده است [۶،۳].

### ۳- تعریف مدل بازدهی

یکی از روش‌های بهینه‌سازی پروژه اکتشافی، استفاده از مدل بازدهی است. یک مدل بازدهی از تابع احتمال کشف و تابع هزینه تشکیل شده که هر کدام دارای ضرائب ثابتی هستند. این مدل‌سازی دارای تناسب تام در هر مرحله از عملیات اکتشافی است. در این مسئله از بهینه‌سازی تابع هدف شبکه حفاری بهینه استفاده می‌شود که بدین منظور باید توابع هزینه و سود را محاسبه کرده و با استفاده از ضرائب ثابت بی‌مقیاس  $(K, M)$  و تفاضل تابع سودمندی  $R(x)$  و هزینه  $C(x)$ ، مدل بازدهی محاسبه شود. در مرحله بعد، براساس مقدار بهینه مدل بازدهی، پارامترهای بهینه شبکه حفاری مشخص می‌شود [۶].



شکل ۲: نمایش شماتیک مدل بازدهی و فاصله شبکه بهینه

- کانسار با جهت یافتگی معین و کشف قطعی
- کانسار با جهت یافتگی تصادفی و کشف منفرد
- کانسار با جهت یافتگی تصادفی و کشف قطعی

جهت یافتگی تصادفی برای کانسارهایی به کار می‌رود که نمی‌توان به راحتی طول و جهت اصلی کانسار را تعیین کرد و در همه جهات دارای گستردگی به نسبت یکسانی هستند، در چنین کانسارهایی مانند مس پورفیری، مرحله بهینه‌سازی امتداد نیز مشکل است. کشف منفرد به حالتی اطلاق می‌شود که کانسار تنها توسط یک کار اکتشافی ثبت شده باشد و در صورتی که تشخیص کانسار توسط بیش از یک کار اکتشافی صورت گرفته باشد، کشف قطعی رخ داده

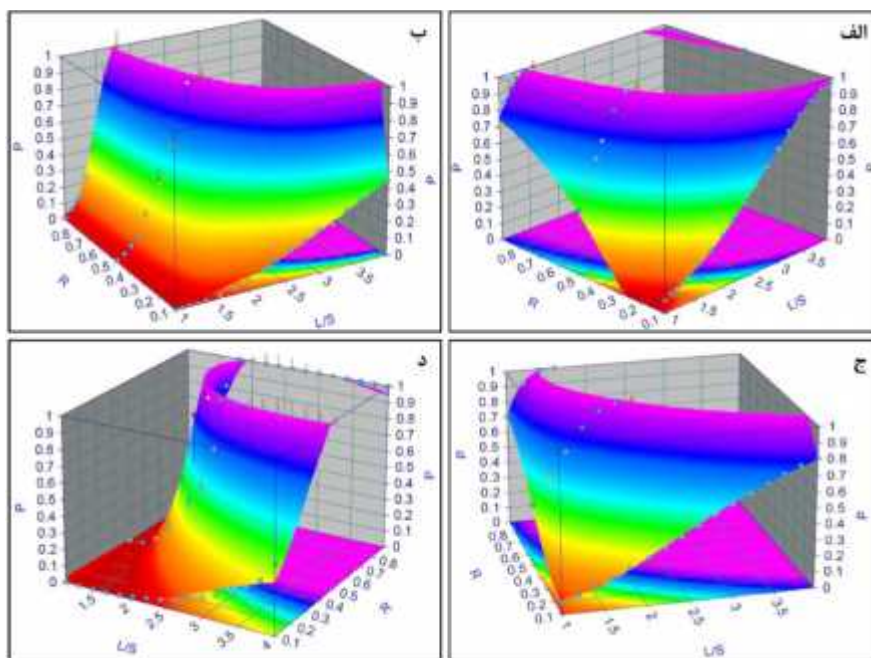
### ۳-۱- تابع احتمال کشف (سودمندی)

تابع سودمندی یا احتمال کشف بسته به هندسه کانسار متفاوت است و به عواملی چون طول، ضریب شکل (عرض به طول) کانسار بستگی دارد و عامل شیب کانسار نیز در تابع احتمال کشف موثر است. به طور کلی عوامل موثر در تابع احتمال کشف، به خصوصیات هندسی کانسار و نحوه برخورد گمانه به کانسار بستگی دارد. بدین منظور تابع سودمندی بر اساس سه پارامتر (احتمال کشف، ضریب شکل و نسبت ابعاد طول کانسار به شبکه) در چهار حالت اکتشافی مورد بررسی قرار می‌گیرد [۶،۳]:

- کانسار با جهت یافتگی معین و کشف منفرد

کانسار نمایش داده شده است. در این بررسی از اطلاعات مربوط به پایگاه داده اطلاعات آماری ۳۹۲ کانسار تجسس شده که اکثراً مربوط به منطقه آمریکای شمالی است، استفاده شده است که شش تیپ کانی زایی را شامل می‌شود.

است. در مورد حالت‌های کشف منفرد و قطعی، می‌توان گفت که مقدار احتمال کشف قطعی در شرایط برابر بیشتر از کشف منفرد است و در مواردی که احتمال کشف قطعی مورد نظر است، امتداد شبکه با زاویه ۱۵-۵ درجه نسبت به امتداد کانسار بیشینه می‌شود. در شکل ۳، تابع احتمال کشف در چهار حالت مختلف مذکور بر اساس خواص بعدی



شکل ۳: نمایش سه بُعدی احتمال کشف بر اساس ضریب شکل کانسار و طول کانسار به طول شبکه در حالت‌های الف) جهت یافتگی معین و کشف منفرد، ب) جهت یافتگی معین و کشف قطعی، ج) جهت یافتگی تصادفی و کشف منفرد، د) جهت یافتگی تصادفی و کشف قطعی.

بُعدی و جهتی کانسار بستگی دارد. در یک حفاری قائم می‌توان تنها اثر بعدی تابع سودمندی را بر روی فاصله شبکه بررسی کرد اما در صورتی که حفاری زاویه‌دار و مایل باشد باید اثر شیب کانسار و زاویه حفاری را بررسی کرد. در کانسارهای مس-نیکل اولترابازیک، شیب کانسار در حدود ۷۵ درجه است، تابع احتمال کشف برای این‌گونه کانسارها، زاویه حفاری باید روی زوایای ۳۵، ۴۵ و ۵۵ مقایسه شود [۷]. با کاهش زاویه حفاری مشاهده می‌شود احتمال کشف افزایش می‌یابد به دلیل اینکه به زاویه عمود بر بردار سطح نزدیک می‌شود. در شکل ۴ احتمال کشف در دو حالت حفاری مایل و قائم برای فواصل شبکه مختلف نمایش داده شده است.

برای مقایسه رابطه احتمال برای زاویه از جدول ۲ برای بررسی تاثیر حفاری مایل در افزایش احتمال کشف نسبت

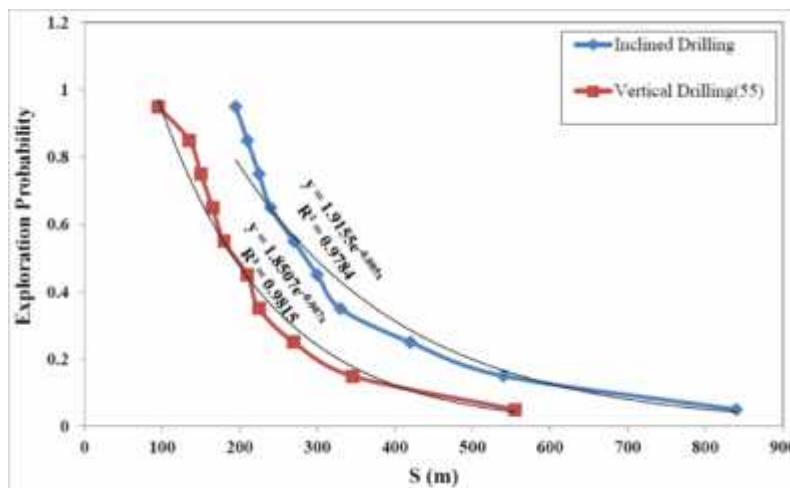
توابع بر اساس منحنی‌های سه‌بعدی در چهار حالت مختلف بررسی شده است که معرف توزیع احتمال کشف بر اساس خواص هندسی کانسار است و ضرائب هریک از توابع معرفی شده در چهار حالت، مقدار ثابتی است که در هر مورد متفاوت است (جدول ۱). روابط ارائه شده جدول ۱ با برازش بهترین سطوح بر روی داده‌های آماری کانسارهای تجسس شده حاصل شده است. با مشخص بودن طول کانسار و ضریب شکل کانسار، تابع احتمال کشف تنها به طول شبکه حفاری وابسته است. در اینجا ضریب ثابت  $K$  که در معادله بازدهی در مقدار تابع احتمال کشف (سودمندی) ضرب شد، برابر با  $1/0.5$  در نظر گرفته شده است [۱۳،۶].

دامنه تابع سودمندی بر اساس احتمال کشف بین ۰-۱ تغییر می‌کند و بستگی به هندسه کانسار دارد که به شرایط

به‌حالت قائم برای فواصل شبکه مختلف در کانسارهای نیکل-مس اولترامافیک استفاده می‌شود.

جدول ۱: روابط تابع احتمال کشف براساس حالت های مختلف کشف و جهت یافتگی

نوع جهت یافتگی	نوع کشف	$P_i(L/S,R)$
جهت یافتگی معین	کشف منفرد	$\frac{(a + e \cdot \ln R + i(\ln R)^2) + (c + k \cdot \ln R) \ln(\frac{L}{S}) + g(\ln(\frac{L}{S}))^2}{((1 + d \cdot \ln R + h(\ln R)^2) + (b + j \cdot \ln R) \cdot \ln(\frac{L}{S}) + f(\ln(\frac{L}{S}))^2)}$
	کشف قطعی	$e^{-\left[ \left( a + \frac{h \ln R}{R} + \frac{i}{R} \right) + b \cdot \ln\left(\frac{L}{S}\right) + \frac{c}{\left(\frac{L}{S}\right)^{0.5}} + \frac{d \cdot S}{L} + \frac{e}{\left(\frac{L}{S}\right)^{1.5}} + \frac{f}{\left(\frac{L}{S}\right)^2} + g e^{-\left(\frac{L}{S}\right)} \right]}$
جهت یافتگی تصادفی	کشف منفرد	$z = (a + cy + eR^2 + hR^3) + \left( \frac{b}{L} + \frac{f \cdot R}{L} + \frac{iR^2}{L} \right) \cdot S + \left( \frac{d}{L^2} + \frac{jR}{L^2} \right) \cdot S^2 + \frac{g}{L^3} \cdot S^3$
	کشف قطعی	$\frac{((a + e \cdot R + i \cdot R^2) + (c + k \cdot R) \cdot \ln(\frac{L}{S}) + g(\ln(\frac{L}{S}))^2)}{((1 + d \cdot R + h \cdot R^2) + (b + j \cdot R) \cdot \ln(\frac{L}{S}) + f(\ln(\frac{L}{S}))^2)}$



شکل ۴: نمایش احتمال کشف بر اساس فاصله طول شبکه در حفاری قائم و زاویه دار

جدول ۲: تاثیر زاویه حفاری در افزایش احتمال کشف [۷]

شبکه برداشت مربعی و حفاری ۵۵ درجه		شبکه برداشت مربعی و حفاری قائم	
فاصله شبکه (متر)	سطح احتمال کشف	فاصله شبکه (متر)	سطح احتمال کشف
۸۴۰	۰/۰۵	۵۵۵	۰/۰۵
۵۴۰	۰/۱۵	۳۴۵	۰/۱۵
۴۲۰	۰/۲۵	۲۷۰	۰/۲۵
۳۳۰	۰/۳۵	۲۲۵	۰/۳۵
۳۰۰	۰/۴۵	۲۱۰	۰/۴۵
۲۷۰	۰/۵۵	۱۸۰	۰/۵۵
۲۴۰	۰/۶۵	۱۶۵	۰/۶۵
۲۲۵	۰/۷۵	۱۵۰	۰/۷۵
۲۱۰	۰/۸۵	۱۳۵	۰/۸۵
۱۹۵	۰/۹۵	۹۰	۰/۹۵

زاویه حفاری را متمم شیب کانسار در نظر گرفت (شکل ۵) [۱۴].

برای محاسبه اثر شیب کانسار و زاویه حفاری در تابع سودمندی از رابطه  $\sin(\alpha + \beta)$  استفاده می‌شود که دامنه ۲ بین صفر تا ۹۰ درجه و دامنه  $S$  بین ۳۵ تا ۹۰ درجه تغییر می‌کند که در شکل ۶ بر حسب رادیان نمایش داده شده است.

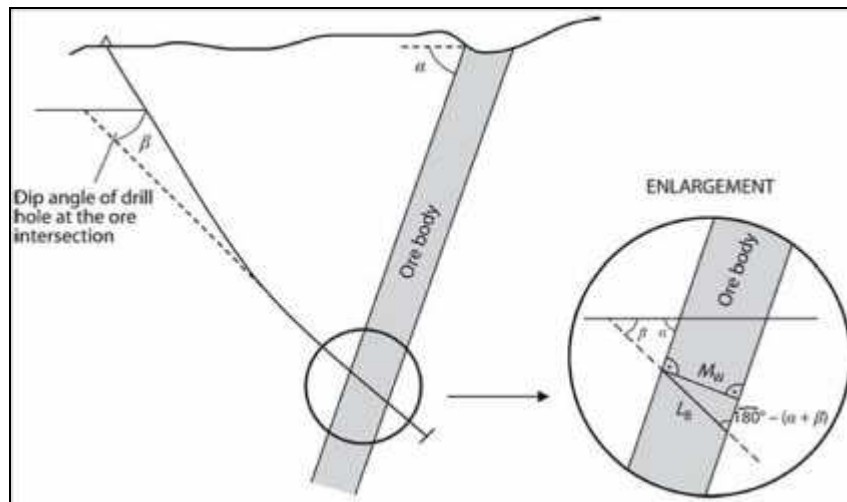
تابع سودمندی در دو حالت حفاری قائم و زاویه دار بر اساس زوایای حفاری و شیب کانسار در رابطه (۴) نشان داده شده است.

همانطور که در معادلات (۴) مشاهده می‌شود، تابع سودمندی در دو حالت حفاری قائم و زاویه دار بر اساس زوایای حفاری و شیب کانسار نشان داده شده است. برای درک بهتر اثر حفاری مایل، یک لایه ماده معدنی شیب دار را فرض کنید که برای بیشینه‌سازی احتمال کشف، باید

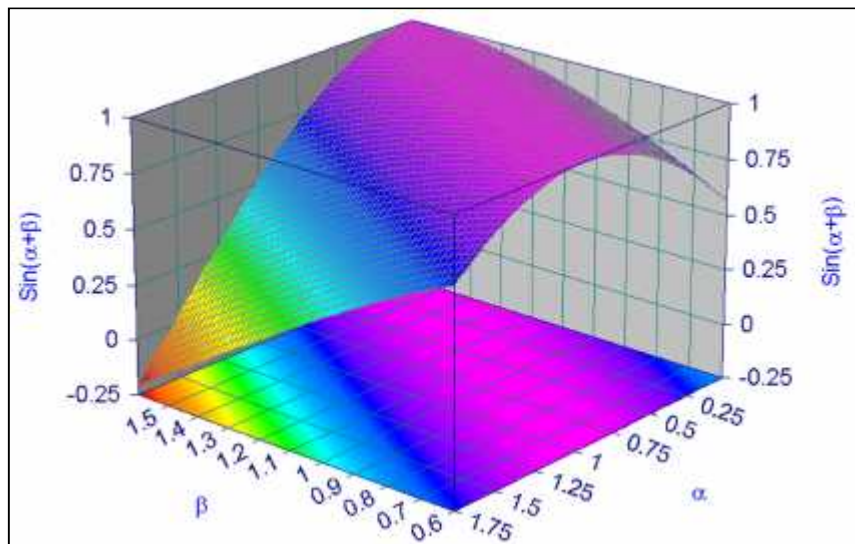
$$\text{For Vertical Drilling} \Rightarrow P = R(x) = G_1\left(\frac{L}{S}, R\right) \xrightarrow{R, L \text{ are definite}} P = R(S) = G(S)$$

$$\text{For Inclined Drilling} \Rightarrow P(\cap S) \xrightarrow{S \text{ are independent}} P(\cap S) = P(\ ) \times P(S) \quad (۴)$$

$$\Rightarrow P = R(x) = G_1\left(\frac{L}{S}, R\right) \cdot \sin(\alpha + \beta) \xrightarrow{R, L, S \text{ are definite}} P = R(S, S) = P(\ ) \times P(S) = G(S) \cdot \sin(\alpha + \beta)$$



شکل ۵: نمایش برخورد حفاری مایل با لایه دارای زاویه



شکل ۶: مطالعه اثر پارامترهای هندسی بر تابع سودمندی (زوایا بر حسب رادیان)



## ۳-۲- تابع هزینه

در این مطالعه، تابع هزینه در مدل بازدهی به پارامترهای هندسی و حفاری، نوع حفاری و نوع کانسار وابسته است [۱۵]. هزینه در حفاری الماسه تقریباً سه برابر حفاری ضربه‌ای است و هزینه حفاری زاویه‌دار با عکس سینوس زاویه حفاری رابطه دارد و تابع هزینه به صورت رابطه (۵) تعریف می‌شود.

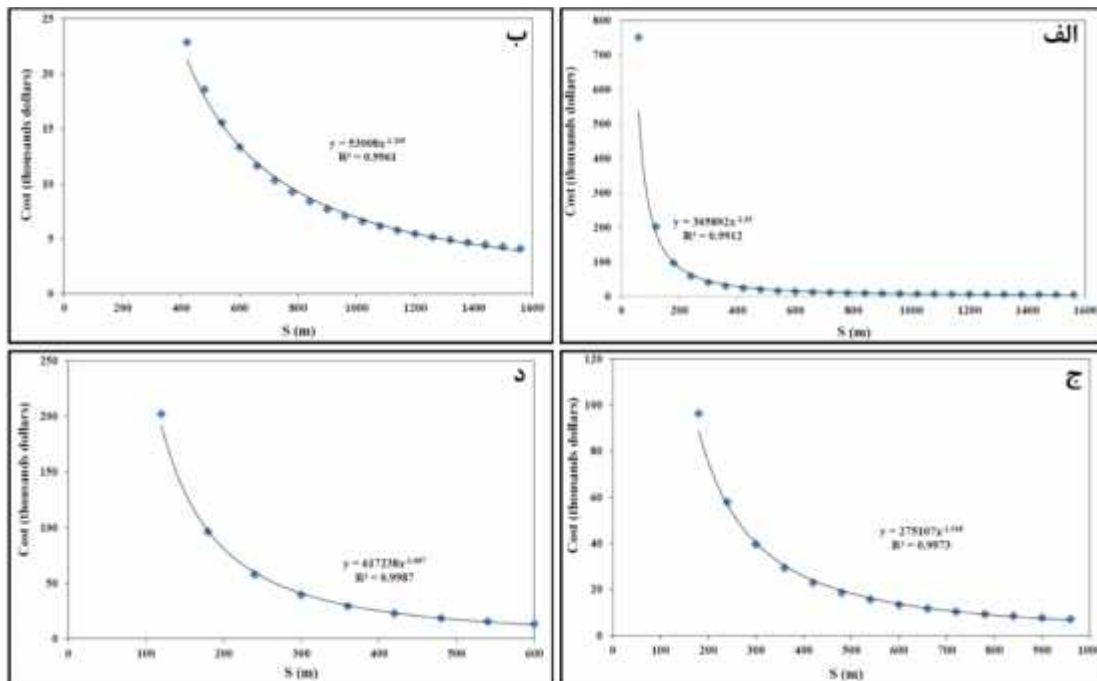
$$C(x, S) = \frac{acx^{-n}}{\sin S} \quad (5)$$

ضرائب ثابت  $a$  و  $n$  بر اساس دامنه متفاوت فاصله شبکه و نوع کانسار مورد بررسی متفاوت است. برای تعیین ضرائب مذکور، از اطلاعات مربوط به پایگاه داده آماری مربوط به کانسار تجسس شده از سه تیپ مس پورفیری، سرب و روی می‌سی‌سی‌پی و طلای رگه‌ای مورد بررسی قرار گرفت. تفاوت در توابع هزینه حفاری‌ها ناشی از پیچیدگی‌های کانسار و هزینه کشف است. برای مثال دامنه فاصله شبکه در کانسار مس پورفیری بسیار بیشتر از کانسار طلای رگه‌ای است. در مس پورفیری طول شبکه کمتر از ۴۰۰

متر اقتصادی نیست در صورتی که در طلای رگه‌ای طول شبکه کمتر از ۱۲۰ متر اقتصادی نیست. در شکل ۷، تابع هزینه به صورت کلی و برای تیپ کانسارهای مس پورفیری، سرب و روی می‌سی‌سی‌پی و طلای رگه‌ای ترسیم و با مدل توانی برازش داده شد که بستگی به دامنه انتخابی طول شبکه برای آن نوع کانسار دارد [۱۶، ۱۷].

برای حالت کلی و تیپ کانسارهای مس پورفیری، سرب و روی می‌سی‌سی‌پی و طلای رگه‌ای، براساس مدل توانی برازش داده شده؛ ضرائب ثابت  $a$  و  $n$  برای هر حالت استخراج شد که در جدول ۳ نمایش داده شده است.

تابع هزینه علاوه بر طول شبکه حفاری به زاویه حفاری، قیمت هر ۱۰۰ متر (بر حسب هزار دلار) و نوع حفاری بستگی دارد که واضح است که دامنه تابع هزینه بزرگتر از صفر تا ۱ است.  $C$  خود به عنوان تابعی از نوع حفاری است که رابطه مستقیم با هزینه حفاری دارد و در بازه ۱ تا ۶ تعریف می‌شود. در شکل ۸، براساس پارامترهای مختلف حفاری و فواصل مختلف شبکه، تابع هزینه محاسبه شده است.

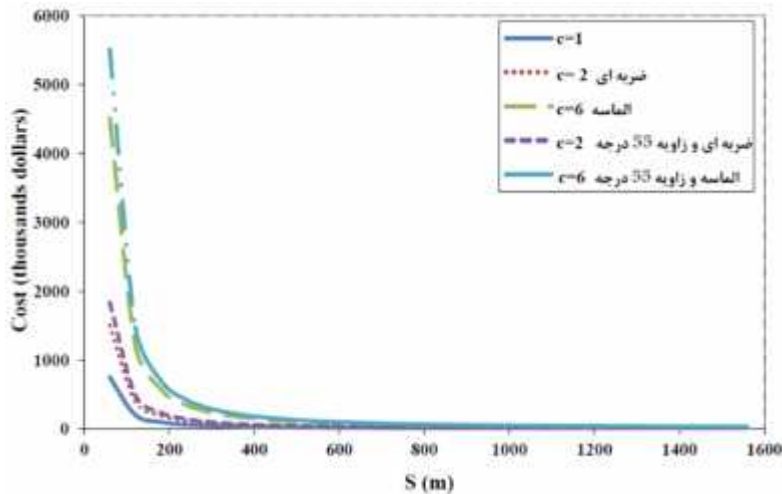


شکل ۷: نمایش تابع هزینه حفاری براساس طول شبکه نمونه‌برداری برای تیپ‌های الف) حالات کلی حفاری ( $c=1$ ), ب) مس پورفیری, ج) سرب و روی تیپ می‌سی‌سی‌پی, د) طلای تیپ رگه‌ای.



جدول ۳: نمایش ثابت‌های  $a, n$  در معادله هزینه به ازای  $c$  واحد

نوع کانسار	$a$	$n$	$R^2$
حالت کلی	۳۰۵۸۹۲	۱/۵۵	۰/۹۹۱۲
مس پورفیری	۵۳۰۰۸	۱/۳۹۵	۰/۹۹۶۱
سرب و روی می سی سی پی	۲۷۵۱۰۷	۱/۵۴۸	۰/۹۹۷۳
طلای رگهای	۶۱۷۲۳۸	۱/۶۸۷	۰/۹۹۸۷



شکل ۸: نمایش تابع هزینه برای حالات مختلف حفاری

$$C(S, S) = \frac{acS^{-n}}{\text{Sin}S}$$

$$M = \frac{1}{\text{Sin}(90-\gamma) * C_{Max}} \quad (7)$$

$$M = \frac{1}{\text{Sin}(90-\gamma) * C_{Max}}$$

$$M = \frac{1}{\text{Sin}(90-\gamma) * C(S_{Min})}$$

ج) روش سوم استفاده از اختلاف بین مقادیر بیشینه و کمینه فواصل شبکه و نرمال‌سازی مقادیر آن است.

$$\hat{S}_i = \frac{S_i - S_{min}}{S_{max} - S_{min}} \quad (8)$$

براساس سه روش ارائه شده برای قرار دادن تابع هزینه در بازه ۰-۱، روش دوم براساس ضریب تابع هزینه طول کمینه شبکه تعریف شد، به دلیل اینکه با تابع هزینه دارای هم‌خوانی بیشتری است و اثر شیب کانسار در نظر گرفته شده است.

#### ۴- محاسبه مدل بازدهی

با توضیحات ارائه شده در بخش‌های قبلی، از تفاضل دو تابع سودمندی و هزینه، با اعمال ضرائب ثابت، مدل بازدهی

در مدل بازدهی از یک طرف تابع سودمندی طبق تعریف، محدود به دامنه ۰-۱ می‌شود و از جهتی تابع هزینه، می‌تواند بین صفر تا بی‌نهایت تغییر کند. به منظور رفع این ناهمسانی باید ضریب یا تابع به گونه‌ای بی‌مقیاس شود که حاصل ضرب تابع هزینه در ضریب آن در بازه ۰-۱ قرار گیرد. بدین منظور سه رویکرد متفاوت پیشنهاد می‌شود:

الف) می‌توان بر مبنای هزینه کوچک‌ترین طول شبکه که دارای بیشترین مقدار هزینه است لگاریتم طبیعی گرفته شود.

$$C(S, S) = \text{Ln}\left(\frac{acS^{-n}}{\text{Sin}S}\right) \quad (6)$$

ب) روش دیگر برای قرار دادن تابع هزینه در بازه ۰-۱، تقسیم داده‌ها بر بیشینه مقدار آن است. صورت کسر  $M$  مربوط به اثر عکس متمم سینوس زاویه شیب کانسار است. در اینجا مقدار بیشینه هزینه در کمینه طول شبکه تعریف می‌شود که به عنوان ضریب به کار می‌رود.

را به صورت زیر بازنویسی کرده و فاصله شبکه بهینه، زاویه حفاری بهینه و احتمال بهینه را به دست آورد.

را می‌توان به دست آورد. برای مطالعه مدل بازدهی می‌توان روابط (۴، ۵ و ۷) را در رابطه (۳) جاگذاری و رابطه نهایی

$$F(S, S) = K \times R(S, S) - M * C(S, S) = 1.05 \times G(S) \cdot \sin(\tau + \gamma) - \frac{1}{\sin(90 - \tau) \times C(S_{Min})} \times \frac{acS^{-n}}{\sin S}$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial F(S, S)}{\partial S} &= 1.05 \times G'(S) \cdot \sin(\tau + \gamma) - \frac{1}{\sin(90 - \tau) \times C(S_{Min})} \times \frac{-n \cdot acS^{-n-1}}{\sin S} = 0 \\ \frac{\partial F(S, S)}{\partial S} &= 1.05 \times G(S) \cdot \cos(\tau + \gamma) + \frac{1}{\sin(90 - \tau) \times C(S_{Min})} \times \frac{acS^{-n} \cdot \cos S}{\sin^2 S} = 0 \end{aligned} \right\} \Rightarrow (S_{Opt}, S_{Opt}) \rightarrow P_{Opt} \quad (9)$$

در صورتی که چند نقطه اکسترمم نسبی به دست آید، باید شرایط نقطه بیشینه در آن صدق کند. در بین نقاطی که در شرایط بیشینه صدق کند، بیشترین مقدار تابع مدل بازدهی را داشته باشد زیرا مقدار بهینه طول شبکه و زاویه حفاری را دارد. برای یک نقطه در معادله سه حالت وجود دارد (رابطه (۱۰)) که براساس مسئله، نقاط بیشینه مد نظر است [۱۹].

با انجام مشتق جزئی مدل بازدهی نسبت به هریک از متغیرهای مستقل (طول شبکه حفاری و زاویه حفاری) و قرار دادن هر معادله برابر با صفر، به دستگامی از دو معادله همزمان و وابسته به هم منتهی می‌شود [۱۸]. با حل این دستگاه، مقدار هریک از متغیرهای مستقل، بر اساس راهبرد بهینه سازی شبکه تعیین می‌شود. با جایگذاری دو متغیر مستقل (طول شبکه حفاری و زاویه حفاری) در مدل بازدهی، می‌توان احتمال اکتشاف بهینه را محاسبه کرد.

$$\left. \begin{aligned} (S, S) \text{ is Maximum if } A < 0, D > 0 \\ (S, S) \text{ is Minimum if } A > 0, D > 0 \\ (S, S) \text{ is saddle point if } D < 0 \end{aligned} \right\} \Rightarrow A = f_{SS}(S, S), B = f_{SS}(S, S) = f_{SS}(S, S), C = f_{SS}(S, S), D = AC - B^2 \quad (10)$$

##### ۵- تأثیر هندسه سه بعدی کانسار

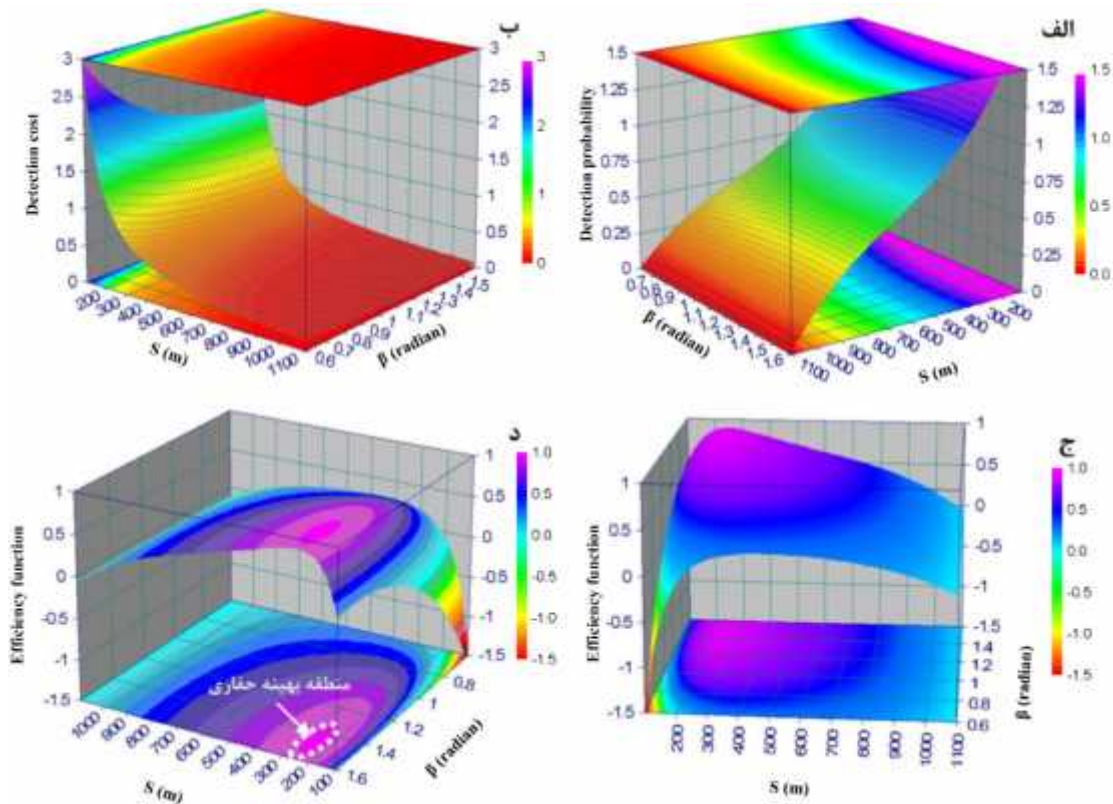
در کانسارهای لایه‌ای (دارای هندسه صفحه‌ای) که کانسار تقریباً از شیب یکسانی تبعیت می‌کند، می‌توان یک شیب حفاری بهینه ( $S_{Opt}$ ) بر اساس بردار نرمال صفحه ( $\vec{N}_{Balance}$ ) را برای اکتشاف کل کانسار پیشنهاد داد، اما در مواردی که کانسار دارای شیب متفاوت در هر منطقه باشد، برای هر قسمت یک شیب تصحیح حفاری بهینه ( $S_{Cor}$ ) براساس اثر سطح ( $S_{Surface\ effect}$ ) پیشنهاد می‌شود، برای مثال کانسارهایی که تحت چین خوردگی قرار گرفته‌اند و به شکل ناودیس - تاقدیس درآمده‌اند، برای هر دامنه تاقدیس یا ناودیس و راس آنها یک زاویه حفاری مجزا باید ارائه شود که براساس هندسه و بردار نرمال صفحات مماس بر نقطه برخورد ( $\vec{N}_0$ ) قابل محاسبه است که در رابطه ۱۱ نمایش داده شده است [۲۰-۲۲]. در شکل‌های ۱۰ و ۱۱، تغییر زاویه حفاری نسبت به عامل شیب هدف اکتشافی و رابطه آن با احتمال کشف نمایش داده شده است.

که در رابطه (۱۰)،  $A$  و  $C$  به ترتیب مشتق مرتبه دوم تابع بازدهی نسبت به طول شبکه و زاویه حفاری و  $B$  مشتق مرکب تابع بازدهی نسبت به طول شبکه و زاویه حفاری است. در مدل سه بعدی علاوه بر مولفه تفاضل تابع و طول شبکه، شامل زاویه حفاری است. در این مدل بر اساس محاسبات انجام شده در مراحل قبل می‌توان مدل جامع‌تری را ارائه نمود. مزیت این مدل نسبت به مدل متداول قبلی این است که این مدل در تعیین تابع احتمال کشف، تابع هزینه، مدل بازدهی و پارامترهای حفاری تأثیر داشته است و در انتها نیز زاویه بهینه حفاری نیز قابل برآورد است که بستگی به احتمال کشف و طول شبکه بهینه دارد. در شکل ۹، مدل سه بعدی بازدهی، نحوه تعیین مقادیر بهینه فاصله شبکه و زاویه حفاری نشان داده شده است.

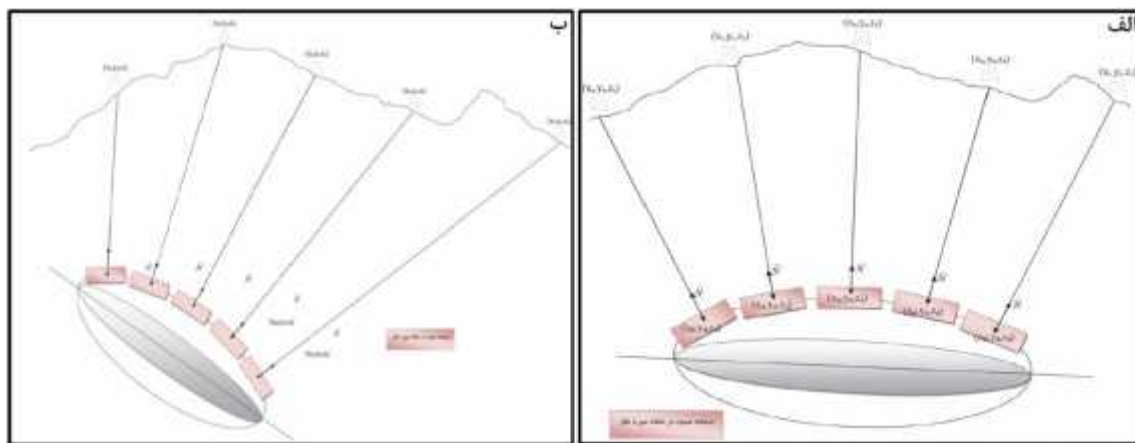
$$\left. \begin{aligned} \vec{N}_{Balance} &= (N_{Balance(i)}, N_{Balance(j)}, N_{Balance(k)}) \\ \vec{N}_0 &= \nabla f(x_0, y_0, z_0) = (f_x, f_y, f_z) \Big|_{(x_i, y_i, z_i)} = (N_i, N_j, N_k) \end{aligned} \right\} \Rightarrow Plan - XZ \rightarrow \begin{cases} \vec{N}_0 = (N_i, 0, N_k) \\ \vec{N}_{Balance} = (N_{Balance(i)}, 0, N_{Balance(k)}) \end{cases} \quad (11)$$

$$S_{Surface\ effect} = ArcCos\left(\frac{\vec{N}_0 \cdot \vec{N}_{Bal}}{|\vec{N}_0| |\vec{N}_{Bal}|}\right)$$

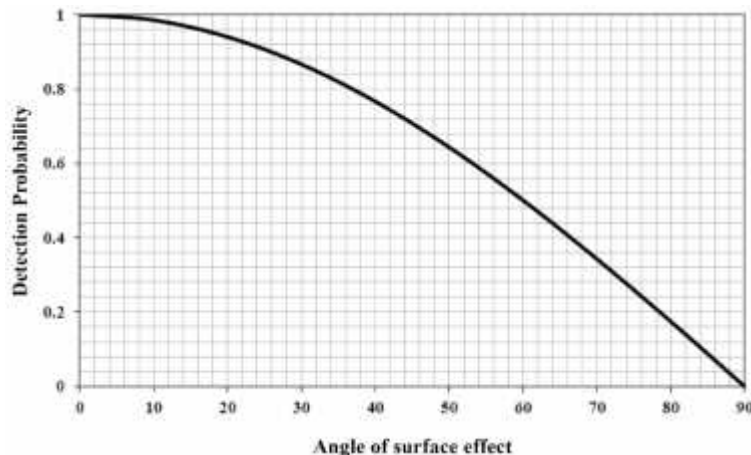
$$S_{Cor} = S_{Opt} \pm S_{Surface\ effect}$$



شکل ۹: الف) نمایش سه بعدی احتمال کشف، ب) نمایش سه بعدی هزینه، ج) نمایش سه بعدی مدل بازدهی، د) تعیین مقادیر بهینه فاصله شبکه و زاویه حفاری بهینه.



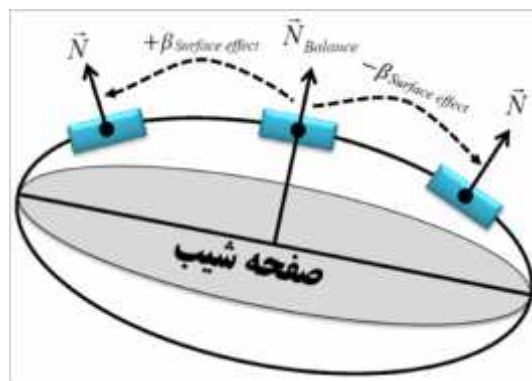
شکل ۱۰: تغییر شیب زاویه حفاری نسبت به شیب هدف اکتشافی در دو حالت افقی و زاویه‌دار



شکل ۱۱: نمایش رابطه احتمال کشف با زاویه بین جهت حفاری و بردار نرمال صفحه کانسار

تابع بازدهی مورد استفاده قرار گرفت و پارامترهای بهینه شبکه اکتشافی نمونه برداری تعیین شد. اولین مرحله برای بهینه‌سازی شبکه حفاری، بهینه‌سازی امتداد شبکه حفاری است که وابسته به ضریب شکل کانسار بین ۶۵-۵ درجه متفاوت باشد. در این پژوهش، برای بهینه‌سازی شبکه حفاری، مدل بازدهی به صورت تفاضل تابع درآمد از هزینه به کار گرفته شد، منظور از درآمد، افزایش احتمال کشف کانسار و منظور از هزینه، هزینه‌های مرتبط با حفاری اکتشافی است. احتمال کشف براساس کشف منفرد/قطعی و جهت یافتگی معین/تصادفی، به صورت تابعی از هندسه کانسار (پارامترهای بعدی و جهتی)، نسبت طول کانسار به طول شبکه حفاری و زاویه برخورد گمانه به کانسار تعیین شد. پارامترهای موثر در تابع هزینه حفاری، طول حفاری، نوع حفاری، زاویه حفاری و تیپ کانسار است. در این پژوهش سه نوع کانی سازی مس پورفیری، سرب و روی می سی سی پی و طلای رگه‌ای مورد مطالعه قرار گرفت و ضرائب تابع در این سه نوع کانی سازی مشخص شد که به پیچیدگی کانی‌زایی بستگی دارد. تابع بازدهی به صورت تفاوت بین احتمال کشف و هزینه حفاری با در نظر گرفتن ضرائب مقیاس کننده محاسبه شد. در مرحله بعد، مشتق جزئی مدل بازدهی را نسبت به هر یک از متغیرهای مستقل طول شبکه نمونه برداری و زاویه حفاری گرفته و نقاط اکسترمم طول شبکه نمونه برداری و زاویه حفاری به صورت بهینه تعیین شد. در نهایت، با توجه تغییرات محلی شیب صفحات مماس بر کانسار، زاویه حفاری بهینه براساس زاویه اثر سطح تصحیح شد.

قابل ذکر است اگر زاویه حفاری در صفحه  $XZ$  مورد نظر باشد، زاویه بین بردارهای نرمال در صفحه  $XZ$  محاسبه و تصحیح انجام شود. در حالتی که کانسار افقی باشد یا شیب کانسار با شیب صفحه مماس بر کانسار هم جهت باشند، اثر آن (-) است ولی در حالتی که شیب کانسار با شیب صفحه مماس بر کانسار در خلاف جهت هم باشند، اثر آن (+) است. شکل ۱۲، نحوه تصحیح زاویه حفاری نسبت به حالت تعادل نمایش داده شده است.



شکل ۱۲: نمایش صفحه شیب و تصحیح اثر رویه کانسار بر زاویه بهینه حفاری

## ۶- نتیجه‌گیری

حفاری‌های اکتشافی، یکی از ابزارهای مهم در شناخت و مدلسازی منابع زیرسطحی محسوب می‌شوند. سه رویکرد احتمالاتی، مدیریت خطای زمین آماری و تئوری ارزش اطلاعات به منظور طراحی بهینه الگوی گمانه‌های اکتشافی ارائه شده است. در این مقاله، الگوریتم احتمالاتی براساس

## مراجع

- Weintraub and R. Epstein, Editors, Handbook of Operations Research in Natural Resources, pp. 561-577.
- [14] Wellmer F.W., Dalheimer.M., Wagner.M., 2007. "Economic Evaluations in Exploration", Springer, 250 pp.
- [15] Bahari, A., Baradaran, S.A., 2009. "Drilling cost optimization in a hydrocarbon field by combination of comparative and mathematical methods". Pet. Sci. 6(4), pp. 451-463.
- [16] Noaks, M., Landz, T., 1993. "Cost estimation handbook for the Australian mining industry", Australasian institute of mining and metallurgy (AusIMM) Publishers, Melbourne, 412 pp.
- [17] Miller, J.W., 1991. "Optimization of grid-drilling using computer simulation". Mathematical Geology 23(2), pp 201-218.
- [18] Harris, J.W., Stocker, H., 1998. "Handbook of mathematics and computational science". Springer, 1056 pp.
- [19] Wrede, R. C., Spiegel, M.R., 2010. "Schaum's Outline of Advanced Calculus", 3rd ed. McGraw-Hill, 456 pp.
- [20] Salmon, G., 2009. "A Treatise on the Analytic Geometry of Three Dimensions", BiblioLife, 500 pp.
- [21] Rusczyk, R., 2006. "Introduction to Geometry", 2nd ed, AoPS Inc, 557 pp.
- [22] Coxeter, H. S. M., 1998. "Non-Euclidean Geometry", 6th ed. Washington, DC: Math. Assoc. Amer., 354 pp.
- [1] Wingle, W.L., 1997. "Evaluating Subsurface Uncertainty Using Modified Geostatistical Techniques". Degree of Doctor of Philosophy (Geological Engineer), Colorado School of Mines, 180 pp.
- [2] Hassanipak, A.A., 2005. "Mining sampling (exploration, exploitation and mineral processing)", University of Tehran Press, 528 pp (in Persian).
- [3] Hassanipak, A.A., 2007. "Designing of exploration projects (geochemical, geophysical and drilling)", University of Tehran Press, 480 pp (in Persian).
- [4] Hossein Morshedy, A., Memarian, H., 2015. "A novel algorithm for designing the layout of additional boreholes". Ore Geology Reviews 67: 34-42.
- [5] Hossein Morshedy, A., Torabi, S. A., & Memarian, H., 2015. "A new method for 3D designing of complementary exploration drilling layout based on ore value and objective functions", Arabian Journal of Geosciences 8: 8175-8195.
- [6] Drew, L.J., 1979. "Pattern Drilling Exploration: Optimum Pattern Types and Hole Spacings When Searching for Elliptical Shaped Targets". Mathematical Geology 11: 223-254.
- [7] Geoffroy, J.G., Wignall, T.K., 1985. "Designing optimal strategies for mineral exploration". New York: Plenum Press, 364 pp.
- [8] Myers, J.C., 1997. "Geostatistical Error Management: Quantifying Uncertainty for Environmental Sampling and Mapping". Van Nostrand Reinhold, New York.
- [9] Soltani, S., Hezarkhani, A., 2011. "Determination of realistic and statistical value of the information gathered from exploratory drilling". Natural Resources Research 20: 207-216.
- [10] Houseknecht, D.W., 1982. "Probability of encountering coalbed discontinuities during vertical and horizontal borehole drilling". Washington, DC: US Department of the Interior, Bureau of Mines, RI 8665. NTIS No. PB82232091.
- [11] Eren, T., Ozbayoglu, M., 2010. "Real Time Optimization of Drilling Parameters During Drilling Operations". Paper SPE 129126-MS, SPE Oil and Gas India Conference and Exhibition, Mumbai, India.
- [12] Cox, D.P., Singer, D.A., 1986. "Mineral ore models", U.S. Geological Survey Bull 1693, 379 pp.
- [13] Alford, C., Brazil, M., Lee, D., 2007. "Optimization in underground mining". In: A.

# Optimizing 3D Efficiency Function Based on The Ore Detection Probability and Drilling Costs to Locate an Exploratory Boreholes Network

A. Hossein Morshedy<sup>1\*</sup>

1- Assistant Professor, Dept. of Mining and Metallurgy, Yazd University, Iran

\* Corresponding Author: morshedy@yazd.ac.ir

(Received: October 2015, Accepted: March 2016)

<b>Keywords</b>	<b>English Extended Abstract</b>
<b>Exploratory Boreholes Network</b> <b>Efficiency Function</b> <b>Ore Geometry</b> <b>Drilling Parameters</b> <b>Ore Detection Probability Function</b>	<b>Summary</b> In the earth sciences, a great deal of uncertainty modeling depends on subsurface interpretation. The exploratory borehole is one of the best tools for subsurface exploration and data gathering. In the mineral exploration project, the layout of boreholes is designed based on the available information and engineering judgment, which may result in a lack of information or redundant information in decision making. This paper presents a new algorithm to compute the parameters of the optimal exploratory boreholes network.

## Introduction

There are three significant concepts in sampling design, including probabilistic geometry, geostatistical error management, and information theory. The probability of intersection between target and network was calculated as a function of the target geometry and its relative orientation with respect to the directional and dimensional properties of exploration network.

## Methodology and Approaches

Designing of the optimal drilling network contains two main strategies: (i) maximize the detection (exploration) probability, (ii) minimize the cost of drilling. These two principles, which are two opposite points of each other. The beginning optimization stage of drilling network is determining the strike direction of the network that depends on the main direction and shape ratio (length to width) of the ore. In the following phase, the efficiency model (gross drilling return) is defined as the difference of the detection probability and cost function (as the two principals of optimization model). The ore detection probability was the function of ore geometry (directional and dimensional parameters), the ratio of ore length to drilling network length, and the angle of the borehole. Three types of ore geometry are considered: 1D (Vein model), 2D (band or layer model) and 3D (mass model).

## Results and Conclusions

In this present study, the ore with three dimensional geometry was studied that were the primary model produced by geophysical investigations. The effective parameters of the drilling cost function are related to the length of the borehole, the type of drilling, and inclination of the borehole. To compute the optimal parameters, the partial derivative of efficiency model was solved based on the independent variables (the size of drilling network and the angle of borehole). Finally, according to local variety in the dip of deposit, the optimal orientation of boreholes was correct based on angle of surface effect.

## Cite This Paper:

Hossein Morshedy, A., (2015). "Optimizing 3D Efficiency Function Based on The Ore Detection Probability and Drilling Costs to Locate an Exploratory Boreholes Network" Journal of Analytical and Numerical Methods in Mining Engineering, 5(10), 111-123.