برآورد ذخیره کانسار فسفات اسفوردی با استفاده از روش‌های زمین‌آماری و شبکه عصبی مصنوعی

نوشته : احمدرضا صیادی*، مسعود منجزی* و حسین شهرآبادی*

*گروه مهندسی معدن، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

Reserve Evaluation of Esfordi Phosphate Mine using Geostatistical and Artificial Neural Network

By: A. Sayadi*, M. Manjezi* & H. Shahr Abadi*

* Department of Mining Eng., Tarbiat Modarres University, Tehran, Iran

تاریخ دریافت: ۱۳۸۵/۱۱/۲۲ تاریخ پذیرش: ۱۳۸۶/۰۸/۰۵

چکیده

ارزیابی ذخیره کانسارها یکی از مهم‌ترین پارامترهای لازم برای طراحی معدن بوده و روش‌های متعددی در این خصوص توسعه یافته است. علاوه بر روش‌های تحلیلی زمین‌آماری، روش‌های هوش مصنوعی مانند شبکه‌های عصبی برای برآورد ذخیره بسیار مناسب تشخیص داده شده‌اند. در این تحقیق مدل هندسی و بلوکی کانسار فسفات اسفوردی تهیه و میزان ذخیره برآورد شده است. مدل بلوکی محتوی حدود ۱۰۰ هزار بلوک با ابعاد ۵ × ۲۵ × ۲۵ است. برای برآورد عیار هر بلوک، از روش تحلیل زمین‌آماری و شبکه‌های عصبی استفاده شد. به منظور برآورد زمین‌آماری، روش کریجینگ معمولی مورد استفاده قرار گرفت. در روش شبکه عصبی یک شبکه چند لایه پرسپترون به‌کار گرفته شده و برای آموزش شبکه از روش آموزش LM استفاده شد. میزان ذخیره برای دامنه مناسبی از عیار حد برآورد شده است. با در نظرگرفتن عیار حد ۶ درصد، میزان ذخیره ۱۶/۵ میلیون تن با عیار میانگین ۱۱/۴۴ درصد و ۱۷/۵ میلیون تن با عیار میانگین ۱۱/۸۳ درصد به ترتیب به کمک روش زمین‌آماری و روش شبکه‌های عصبی محاسبه شد. نتایج مشابه بوده و اختلافی کمتر از ۶٪ دارند. مدل‌سازی و برآورد انجام شده، مبنای لازم را برای اصلاح طرح استخراجی فعلی معدن فسفات اسفوردی با هدف استخراج انتخابی تا تراز ۱۷۲۰ فراهم می‌نماید.

کلید واژه‌ها: ارزیابی ذخیره، زمین‌آمار، شبکه‌های عصبی، شبکه پرسپترون چندلایه ،کانسار فسفات اسفوردی

Abstract

Reserve evaluation is one of the most important parameters for mine designing and several methods have been developed in this regards. Among these methods, in addition to geostatistical methods, artificial methods such as Artificial Neural Networks (ANN) are suitable for reserve evaluation. In this research, geometrical and block model of Esfordi phosphate mine are prepared and the reserve is estimated. The block model contains 100 thousand blocks with dimensions of 25×25×5 m. To estimate the grade of each block,both methods of geostatistical and ANN methods are used. For geostatistical estimation, normal kriging is applied. In ANN a perceptron multilayer network is used and for training of network LM method is considered. Based on geostatistical and ANN methods, the amount of estimated reserve is 16.5 Mt with an average grade of 11.44% and 17.5 Mt with an average grade of 11.83%, respectively, considering a cut-off grade of 6%. The results obtained from these two methods are identical to each other and difference is less than 6%. This estimation is a requisite for improving present design of the mine with an objective of selective mining up to sea level of +1720.

Key words: Reserve evaluation, Geostatistic, Neural networks, Multilayer perceptron network , Esfordi phospahte deposit.

۱–مقدمه

برآورد ذخیره کانسار شامل محاسبه گستره، عیار میانگین و تناژ ذخیره و فرایندی است که در هنگام اکتشاف شروع شده و در طول عمر معدن ادامه می‌یابد. نتایج برآورد ذخیره، داده‌های اساسی مورد نیاز برای انجام مطالعات امکان‌سنجی به شمار می‌آید (یاوری، ۱۳۸۱).

روش‌های زمین‌آماری از رایج‌ترین روش‌ها برای برآورد ذخایر معدنی به‌شمار می‌آیند. از جمله نقاط قوت این روش، برآورد بر اساس منطق میانگین متحرک وزن‌دار و برآورد خطی نااریب است. به کمک این روش خطای برآورد نیز قابل محاسبه است (حسنی پاک، ۱۳۷۷).

با افزایش روزافزون کارایی رایانه، پیشرفت کاربرد سامانه‌های دینامیکی هوشمند در حال افزایش است. شبکه‌های عصبی مصنوعی با الهام از عملکرد مغز انسان و واحدهای پردازشگر آن به‌وجود آمده‌اند (منهاج، ۱۳۸۱).

توزیع عیار ماده معدنی به عوامل متعددی بستگی دارد. تأثیر بسیاری از این عوامل به روشنی مشخص نیست و در مدل‌های رایج ریاضی در نظر گرفته نمی‌شود. تقریباً در تمامی روش‌های برآورد ذخیره فرض می‌شود که تغییرات عیار تابعی از فاصله است، در حالی که عوامل دیگری همانند محیط تشکیل، تیپ کانسار و درجه کانی‌سازی نیز مؤثر است. جذابیت شبکه عصبی در این ارتباط به این دلیل است که سامانه‌های پویا و غیرخطی در اختیار می‌گذارند که قابلیت یادگیری دارند. این تخمین‌گر احتیاجی به چنین فرض‌هایی ندارد (حسنی‌پاک، ۱۳۸۰).

در این تحقیق، ذخیره کانسار فسفات اسفوردی با استفاده از روش‌های زمین‌آماری و شبکه‌های عصبی برآورد شده است. به رغم قابلیت شبکه عصبی در برآورد ذخایر معدنی، روش‌های زمین‌آماری هنوز به عنوان یکی از بهترین ابزارها تلقی می‌شوند.

ذخیره این معدن، تاکنون چندین بار با روشهای کلاسیک و زمین‌آماری محاسبه شده است. با توجه به اتخاذ طرح استخراج انتخابی در این معدن، مدل‌سازی و برآورد دوباره ذخیره کانسار ضروری است.

۲–روش زمین‌آماری

به‌طور کلی برآورد زمین‌آماری، فرایندی است که با آن می‌توان مقدار یک کمیت را در نقاطی با مختصات معلوم با استفاده از مقدار همان کمیت در نقاط دیگری با مختصات معلوم برآورد کرد (حسنی‌پاک، ۱۳۷۷). روش زمین‌آماری یکی از کارآمدترین روش‌ها در تعیین خطای همراه با برآورد است. این روش قادر به پیشگویی بهترین و بدترین حالت رخداد ممکن در رابطه با عیار و تناژ ماده معدنی است (Samanta, 2005) .

۳– روش شبکه های عصبی

هر شبکه عصبی شامل سه مرحله آموزش، تعمیم و اجرا است (Matias, 2004). در مسائل مربوط به معدن و تعیین ذخیره، در صورت عدم وجود ساختار در تغییرات و فقدان روند شناخته شده‌ای بین داده‌های اولیه، شبکه عصبی می‌تواند روش مؤثری برای حل این مشکلات باشد (حسنی‌پاک، ۱۳۸۰). نقش اصلی شبکه عصبی، برآورد و تخصیص عیار به بلوک‌های ساخته شده است. در ادامه با توجه به اندازه بلوک‌ها، تناژ هر بلوک محاسبه شده و ذخیره کانسار تعیین می‌شود(Matias, 2004).

شبکه‌های عصبی توانایی آن را دارند که روابط و وابستگی‌های غیر خطی و پیچیده را از یک حجم عظیم داده فراگیرند. ساختار موازی که در آن تعداد زیادی واحدهای محاسباتی ساده (نرون‌ها) به صورت مشترک انجام فعالیت را برعهده دارند باعث می‌شود که سهم هر یک از واحدهای محاسباتی و نرون‌ها چندان حائز اهمیت نباشد، بنابراین اگر خطایی در یکی از واحدهای محاسباتی رخ دهد، تأثیر چندانی بر واحدهای دیگر نخواهد داشت.

نقش اصلی یک نرون، عمل ذخیره ورودی‌های خود تا جایی که مجموع ورودی‌ها از حد آستانه فراتر نرود و متعاقباً تولید یک خروجی است. ورودی‌های نرون از طریق دندریت‌ها که به خروجی‌های نرون‌های دیگر توسط نقاط اتصال (سیناپس‌ها) متصل هستند، وارد می‌شوند. سیناپس‌ها کارایی سیگنال‌های دریافتی را تغییر می‌دهند. بدنه سلول، کلیه ورودی‌ها را دریافت می‌کند و هنگامی که مجموع ورودی‌ها از حد آستانه فراتر رفت، سیگنالی را ارسال می‌کند. مدلی که از نرون ساخته می‌شود، باید مشخصه‌های زیر را به طور خلاصه داشته باشد: خروجی یک نرون یا فعال است (یک) و یا غیر فعال است (صفر)، خروجی تنها به ورودی‌ها بستگی دارد و میزان ورودی‌ها باید به حدی برسد که خروجی نرون‌ها را فعال سازد. این مسئله را می‌توان به طریق ریاضی به صورت رابطه ۱ بیان کرد. با فرض xi به عنوان ورودی، هر خط ورودی دارای یک ضریب وزنی (wi) مربوط به خود است. نرون مدل سازی شده ورودهای خود را محاسبه می‌کند. ابتدا اولین ورودی را در ضریب وزنی مربوط به خط ارتباطی آن ورودی ضرب می‌کند. سپس همین عمل را برای ورودی دوم و سایر ورودی‌ها تکرار می‌کند و در نهایت تمام مقادیر حاصل را جمع می‌کند.

$$\sum_{i=1}^{n} w_i x_i = w_1 x_1 + w_2 x_2 + w_3 x_3 + w_4 x_4 + ... w_n x_n \quad (۱)$$

حاصل جمع فوق باید با مقدار آستانه نرون مورد نظر مقایسه شود. در مقایسه با آستانه، اگر حاصل جمع به دست آمده از میزان آستانه فراتر رود آن‌گاه خروجی نرون مساوی (۱) خواهد بود و اگر حاصل جمع کم‌تر از آستانه باشد خروجی آن مساوی صفر می‌شود. رایج‌ترین ساختار (نوع) شبکه‌های عصبی، شبکه پرسپترون چند لایه (MLP) است. شبکه پرسپترون چند لایه، شبکه‌ای با ساختار لایه لایه است، به طوری‌که هر لایه شامل چند نرون است که ورودی‌های آن تنها به لایه قبلی و خروجی آن به لایه بعدی متصل می‌شود. این شبکه از یک لایه ورودی، تعدادی لایه مخفی (به طور معمول یک یا دو لایه مخفی) و یک لایه خروجی مطابق شکل ۱ تشکیل شده است.

۴–روش تحقیق

به‌منظور برآورد ذخیره کانسار ابتدا داده‌های اولیه آماده‌سازی و سپس مدل هندسی کانسار ساخته شده است. در ادامه پس از تحلیل عیار به دو روش زمین‌آماری و شبکه عصبی، مدل بلوکی تهیه شده و با در نظر گرفتن ابعاد بلوک‌ها و وزن مخصوص ماده معدنی، برآورد ذخیره کانسار صورت گرفته است. به منظور برآورد عیار از نرم‌افزارهای دیتاماین و متلب به ترتیب برای تحلیل زمین‌آماری و شبکه عصبی استفاده شده است.

۵– برآورد ذخیره کانسار فسفات اسفوردی

معدن فسفات اسفوردی در ۳۵ کیلومتری شمال‌باختری بافق در استان یزد واقع است. عملیات اکتشافی شامل تهیه نقشه زمین‌شناسی به مقیاس ۱:۱۰۰۰، حفر ترانشه و گمانه است. در طی سال‌های بهره‌برداری معدن، ذخیره کانسار چندین بار برآورد شده است. برای مثال در قالب یک تحقیق انجام شده، میزان ذخیره برآورد شده به روش کلاسیک، در حدود ۱۵/۵ میلیون تن با عیار متوسط ۱۶/۵ درصد برآورد شده است. با توجه به لزوم طراحی دوباره معدن به منظور استخراج انتخابی کانسار، مدل‌سازی و برآورد دوباره ذخیره ضروری است.

۵–۱–آماده‌سازی داده‌ها

آماده‌سازی داده‌ها در سه مرحله تحلیل آماری، بهنجارسازی و ترکیب کردن صورت‌گرفته است. برای شناسایی توزیع متغیر ناحیه‌ای عیار فسفات در منطقه، پارامترهای آماری محاسبه شد (شکل ۲).

– بهنجارسازی داده‌های عیار فسفات

توابع مختلفی برای بهنجارسازی داده‌ها وجود دارد از جمله تبدیل لگاریتمی، تبدیل لگاریتمی سه پارامتری و تبدیل کاکس و باکس. اما نکته‌ای که باید به آن توجه کرد این است که در پایان برآورد؛ نتایج باید به توزیع اولیه داده‌ها برگشت داده شود. در مواردی که داده‌ها چولگی مثبت دارند می‌توان با تبدیل لگاریتمی توزیع داده‌ها را به نرمال نزدیک کرد. حال اگر با تبدیل لگاریتمی معمولی نتوان به منظور خود رسید باید از روش تبدیل لگاریتمی سه پارامتری استفاده کرد. تبدیل لگاریتمی سه‌پارامتری به صورت زیر تعریف می‌شود (حسنی پاک، ۱۳۸۰)

$$z = \log(bx + a) \quad (۲)$$

که در این رابطه aثابت تبدیل است. با توجه به وجود چولگی مثبت در مورد داده‌های معدن اسفوردی (شکل ۲) تبدیل لگاریتمی سه‌پارامتری صورت گرفت و مقدار ثابت تبدیل به میزان ۰/۲۴۱– به دست آمد. هیستوگرام مقادیر تبدیل یافته فسفات در شکل ۳ آمده است.

– ترکیب کردن داده‌ها

ترکیب کردن موجب از بین رفتن تغییرپذیری در مقیاس کوچک می‌شود و این همان چیزی است که باعث نوعی منظم سازی شده و تغییرنمای حاصل از این مقادیر را منظم می‌کند (حسنی‌پاک، ۱۳۸۰). در این تحقیق طول ترکیب داده‌ها برابر با ارتفاع پله‌های استخراجی در نظر گرفته شده که معادل ۵ متر است. در ترکیب کردن داده‌ها باید در نظر داشت که اگر یک طول ثابت به عنوان پایه در نظر گرفته شود امکان حذف بخشی از داده‌ها وجود دارد. به همین دلیل به‌طورمعمول یک بازه به عنوان طول ترکیب داده‌ها در نظر گرفته می‌شود. در این تحقیق بازه ۲/۵ تا ۵ متر به عنوان طول ترکیب داده‌ها لحاظ شده است.

۵–۲–مدل‌سازی هندسی کانسار

بهترین مدل هندسی که می‌تواند برای کانسار تعریف شود مدلی است که با درنظر گرفتن مقاطع زمین‌شناسی، ساخته شود، زیرا درهنگام تعیین همبستگی و ارتباط دادن گمانه‌ها، چین‌خوردگی‌ها، گسل‌ها و شکستگی‌ها به‌طور کامل مشخص می‌شود(David,1982). بدین منظور مقاطع زمین‌شناسی به طور کامل بررسی شد. در شکل ۴ موقعیت یک نمونه مقطع در جهت شمال باختری– جنوب خاوری و در شکل ۵ مقطع سنگ‌شناسی مربوطه به آن نشان داده شده است.

بعد از همبستگی(کرولاسیون) گمانه‌ها و ساختن رشته‌های فضایی ماده‌معدنی، با ارتباط این رشته‌ها به هم مدل هندسی کانسار در فضای سه‌بعدی ساخته شده است. در ادامه با استفاده از همین رشته‌ها مدل تورسیمی ساخته می‌شود.

۵–۳–تحلیل عیار

همان‌طور که ذکر شد، مطالعات برآورد و تحلیل عیار کانسار به دو روش

کریجینگ و شبکه عصبی مصنوعی صورت گرفته است.

۵-۳-۱- کریجینگ

برآورد عیار در این روش طی سه مرحله واریوگرافی، شناسایی همسانگردی و برآورد عیار صورت می‌گیرد. پارامترهای مهم محاسبه واریوگرام شامل طول گام، تعداد گام‌ها و همچنین تغییرات آزیموت و زاویه شیب بیضوی جستجو است. با توجه به این‌که طول ترکیب ۵ متر در نظرگرفته شد، طول گام نیز ۵ متر لحاظ می‌شود. همان‌طورکه برای ترکیب به جای استفاده از یک طول ثابت، از یک بازه استفاده شد، طول گام نیز به صورت یک بازه تعریف می‌شود که در این تحقیق نیز بازه گام مشابه با بازه ترکیب یعنی ۲/۵-۵ متر در نظر گرفته شده است. تعداد گام‌ها در واریوگرافی برابر با ۲۵ در نظر گرفته شده است. انتخاب تغییرات مجاز آزیموت و زاویه شیب در ارتباط با ترکیبی از پارامترهای گوناگون است و مهم‌ترین پارامتر ناهمسانگردی مورد انتظار در پیوستگی کانی‌زایی است. هرچه ناهمسانگردی کانی‌زایی بیشتر باشد، باید زاویه تغییرات مجاز کاهش داده شود تا بتوان ناهمسانگردی ذاتی را آشکار کرد (Coombes, 2002) همان‌طور که بعداً ملاحظه خواهد شد با توجه به این‌که کانسار دارای ناهمسانگردی ناحیه‌ای است، زاویه تغییرات ۱۵ درجه در نظر گرفته شده است. دو نمونه از واریوگرام‌های رسم شده در شکل‌های ۶ و ۷ آمده است.

با توجه به ارزیابی واریوگرام‌های حاصل، کانسار دارای ناهمسانگردی ناحیه‌ای است. بهترین روش برای یافتن امتدادهای ناهمسانگردی، استفاده از مولفه‌های اصلی است که در این روش، بردارهای ویژه امتدادهای موردنیاز یعنی امتدادهای بیشترین، کمترین و حدواسط مشخص می‌شوند. مقادیر ویژه نیز طول محورها یا همان شعاع تأثیر را به‌دست می‌دهند.

عملیات برآورد عیار مستلزم تعریف محدوده برآورد است. این عملیات در قالب مراحل سه گانه زیر صورت می‌گیرد: تبدیل لگاریتمی سه پارامتری داده‌های عیار فسفات که قبلاً انجام شده است، برآورد عیار سلول‌ها و تبدیل معکوس مقادیر برآورد زده شده به توزیع اولیه داده‌ها. برای تبدیل معکوس به توزیع اولیه داده‌ها از فرمول کلارک به شرح زیر استفاده شده است (حسنی‌پاک، ۱۳۸۰):

$$C = (G_{log}) + (\frac{\sigma_{k_{log}}^{2}}{2}) + \frac{\gamma(\bar{v},v)}{2} - \mu \qquad (۳)$$

که در این روش G_{log} مقدار عیار برآوردی در مقیاس لگاریتمی، $\sigma_{k_{log}}^{2}$ نصف واریانس برآورد لگاریتمی بلوک مورد نظر، $\gamma(\bar{v},v)$ نصف پراش درون بلوکی که به کمک تابع کمکی بر اساس ابعاد بلوک به‌دست می‌آید و μ ظریب لاگرانژ که در حل دستگاه معادلات کریجینگ به همراه دیگر ضرایب کریجینگ قابل محاسبه است. ابتدا مقدار C به کمک رابطه ۳ محاسبه شده سپس با استفاده از رابطه ۴ مقادیر تبدیل معکوس به دست می‌آید.

$$g = 10^{C} + 0.241 \qquad (۴)$$

در جدول ۱ پارامترهای محدوده برآورد ارائه شده است.

۵-۳-۲- شبکه‌های عصبی

تحلیل عیار با استفاده از این روش در سه مرحله طراحی شبکه, آموزش و آزمون انجام می‌شود. شبکه‌ای که برای برآورد ذخیره کانسار فسفات اسفوردی مورد استفاده قرار گرفته شد از ورودی‌های مختصات فضایی (x,y,z) و خروجی عیار فسفات تشکیل شده است. پس از آماده‌سازی داده‌های اولیه، ۱۵۰ داده برای آموزش و ۷۰ داده باقیمانده برای آزمون شبکه عصبی به‌کار گرفته شد. البته باید داده‌های ورودی به بازه [۱و ۱-] تبدیل مقیاس شوند که به اصطلاح بهنجار سازی داده‌های اولیه گفته می‌شود. شبکه‌های پرسپترون با ساختارهای متفاوت یک، دو، سه و چهار لایه مورد آزمایش قرار گرفتند. نتایج نشان دادکه شبکه چهار لایه با تعداد سلول‌های کم، بهتر از شبکه‌های ۲ و ۳ لایه پاسخ می‌دهد. شبکه عصبی تعریف شده دارای ۴ لایه است که در لایه اول، دوم و سوم، به ترتیب، ۷، ۲۷ و ۱۰ نرون، همچنین در لایه آخر با توجه به تک عضوی بودن از یک نرون استفاده شده است. تابع محرک در لایه اول و دوم به ترتیب تانژانت هذلولی و لگاریتم هذلولی، و در لایه سوم و چهارم تابع PURELIN است. میزان پس‌خوراند خطاها ۲۵۰ تکرار می‌باشد.

-آموزش و آزمون شبکه عصبی

برای آموزش و آزمون شبکه عصبی از توابع TrainLM (شکل۸) و TrainRP (شکل ۹) استفاده شد. روش TrainRP تمایل دارد داده‌ها را به سمت خط نزدیک کند و آموزش قابل قبول نیست از این رو برای ادامه محاسبات روش آموزش LM انتخاب شد.

در شکل ۱۰ برتری این روش نیز قابل مشاهده است. می‌توان ملاحظه کرد که منحنی مربوط به داده‌های واقعی (خط پر رنگ) به‌خوبی با عیار پیش‌بینی‌شده توسط شبکه (خط کم‌رنگ) انطباق دارد. این انطباق نشان می‌دهد که شبکه مورد نظر به‌خوبی قادر است تغییرات عیار را در کانسار پیش‌بینی کند و به‌عبارتی شبکه به تعمیم‌یافتگی قابل قبولی رسیده است.

۵-۴- محاسبه ذخیره

پس از ساختن مدل بلوکی کانسار و تخصیص عیار، میزان ذخیره برای دامنه مناسبی از عیار حد برآورد شد. مقدار ذخیره کانسار با فرض عیار حد ۶ درصد، ۱۶/۵ میلیون تن با عیار میانگین۱۱/۴۴ درصد و ۱۷/۵ میلیون تن با

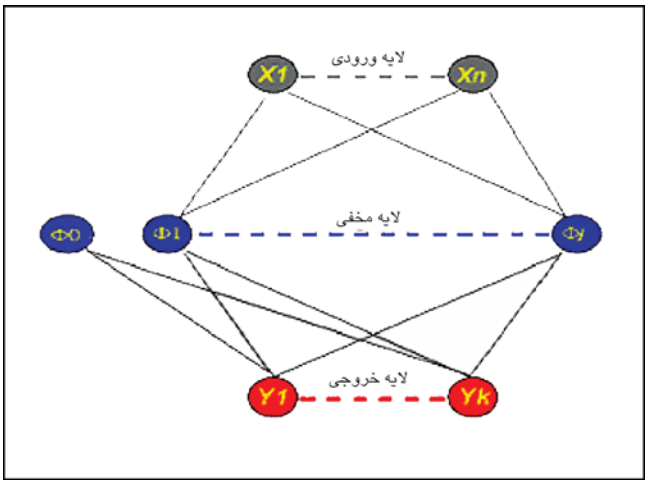
عیار متوسط ۱۱/۸۳ درصد به ترتیب با استفاده از روش زمین‌آماری و شبکه عصبی برآورد شد. میزان وزن مخصوص کانسار ۳/۲۵ تن بر مکعب در نظر گرفته شده است. در شکل‌های ۱۱ و۱۲ نمودار تغییرات تناژ و عیار میانگین نسبت به عیارحد به ترتیب بر اساس نتایج حاصل از روش زمین‌آماری و شبکه عصبی نشان داده شده است.

۶- نتیجه‌گیری

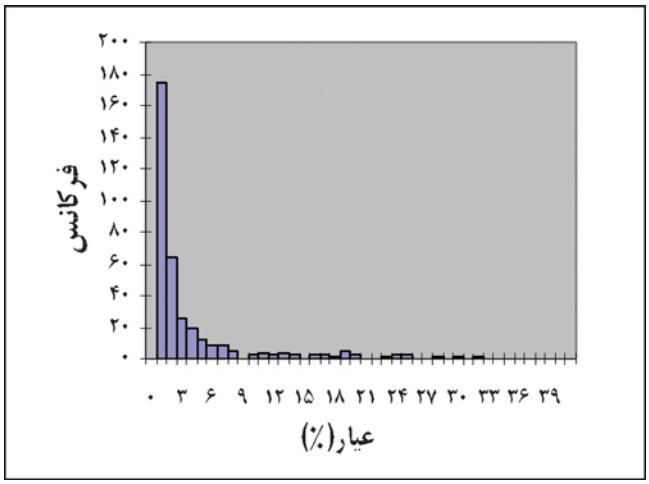
در این تحقیق، از دو روش زمین‌آماری و شبکه‌های عصبی برای ارزیابی ذخیره کانسار فسفات اسفوردی استفاده شد. هرچند روش زمین‌آماری به عنوان یک روش متداول برای ارزیابی ذخیره کانسارها شناخته شده است، اما نتایج حاصل از کاربرد شبکه‌های عصبی برای برآورد میزان ذخیره کانسار فسفات اسفوردی و بویژه همگرا شدن آن با نتایج روش زمین‌آماری نشان داد که این روش نیز توانایی کافی برای برآورد عیار و ذخیره کانسارها را دارد و در صورت کافی بودن داده‌های آموزش و انتخاب مناسب ساختار آن می‌تواند به عنوان یک رقیب جدی برای سایر روش‌ها مطرح شود. درحالی‌که مقدار ذخیره به روش زمین‌آماری ۱۶/۵ میلیون تن برآورد شد، شبکه عصبی طراحی شده میزان ذخیره را ۱۷/۵ میلیون تن برآورد نمود.

۷- تشکر و قدردانی

انجام این تحقیق بدون مساعدت مسئولان و کارشناسان معدن روباز فسفات اسفوردی امکان پذیر نبوده، بدین‌وسیله از آنها تشکر و قدردانی می‌شود.



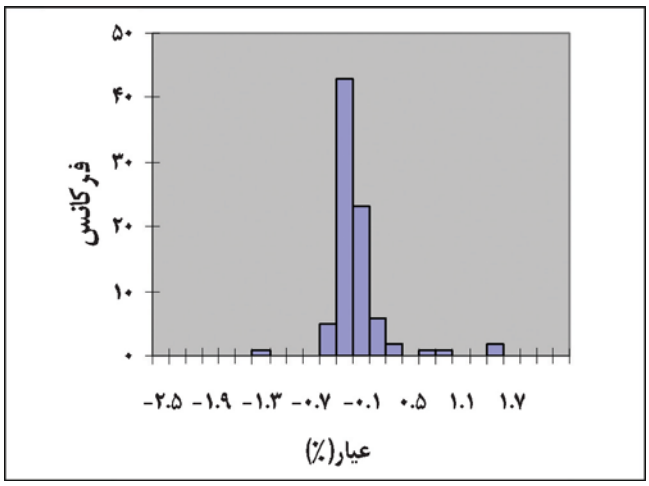
شکل ۱- شبکه پرسپترون سه‌لایه با یک لایه مخفی



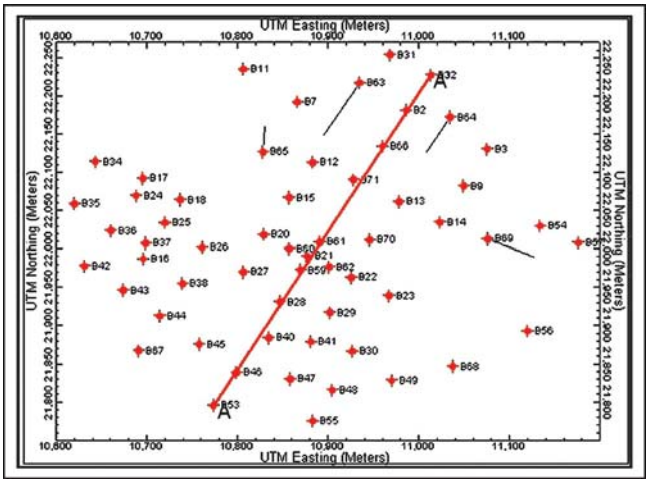
شکل ۲- هیستوگرام داده‌های اولیه فسفات

جدول۱- پارامترهای محدوده برآورد

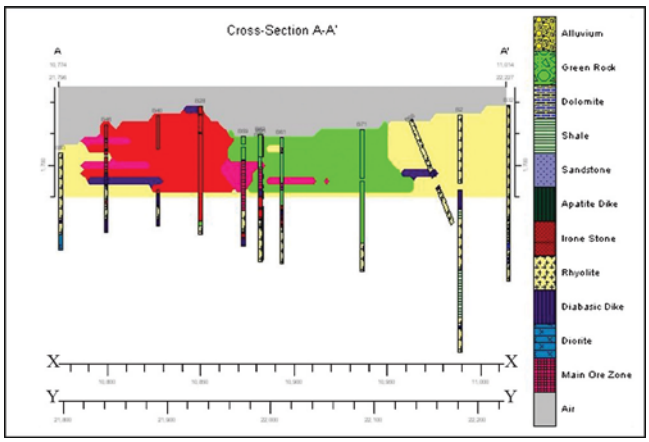
پارامتر	مقدار
روش برآورد	کریجینگ معمولی
محور اول بیضوی برآورد (x)	۱۹۴/۳۸ متر
محور دوم بیضوی برآورد (y)	۸۸/۷۸ متر
محور سوم بیضوی برآورد (z)	۷۷/۹۸ متر
زاویه چرخش اول	۰ درجه
زاویه چرخش دوم	۰ درجه
زاویه چرخش سوم	۰ درجه
کمترین تعداد نقاط	۸



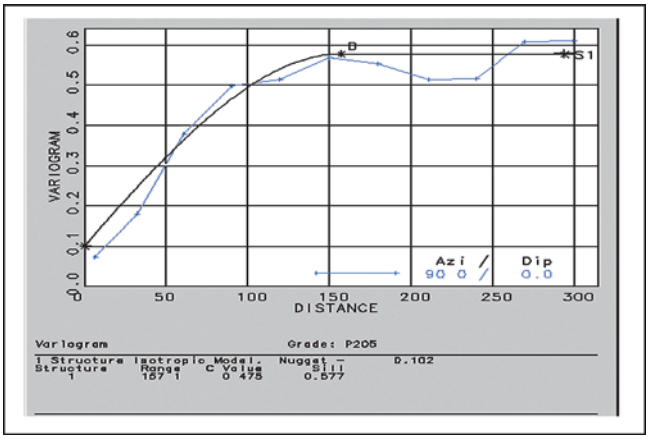
شکل ۳ – هیستوگرام داده‌های تبدیل‌یافته فسفات



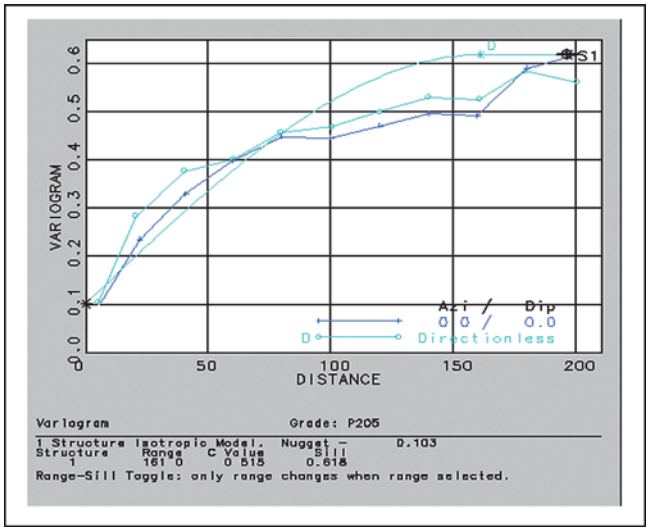
شکل ۴ – موقعیت نمونه مقطع در جهت شمال‌باختری- جنوب‌خاوری



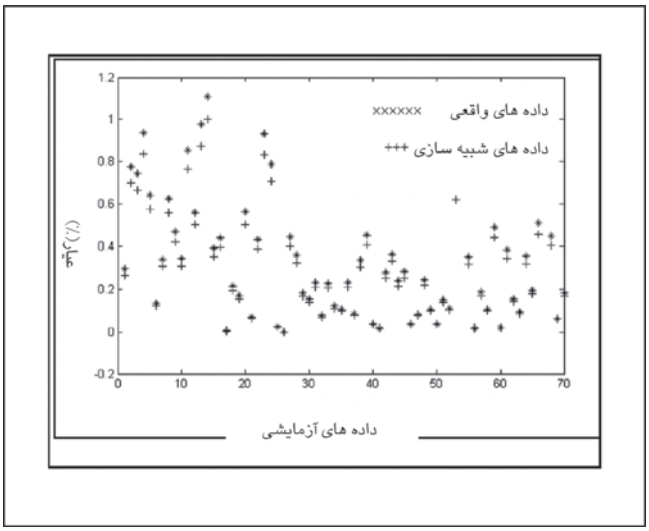
شکل ۵ – مقطع سنگ‌شناسی مربوط به شکل ۴



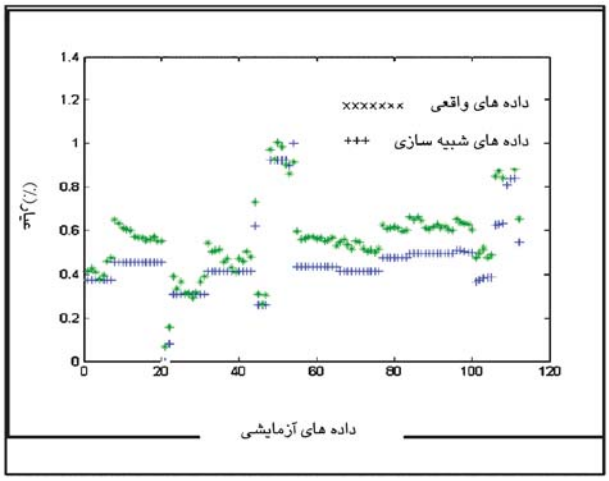
شکل ۶- نمونه واریوگرام با آزیموت ۹۰ و شیب صفر



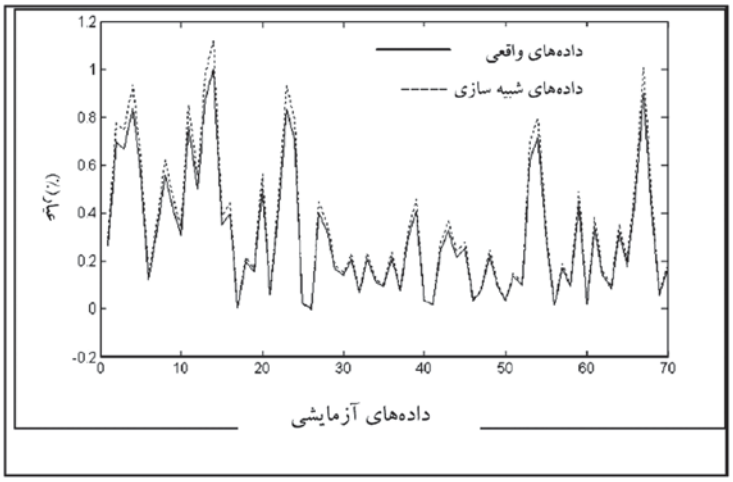
شکل ۷- نمونه واریوگرام با آزیموت و شیب صفر



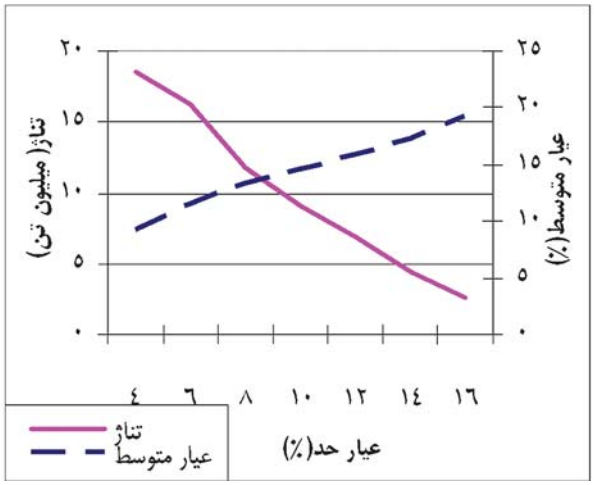
شکل ۸- نتایج آموزش و آزمون شبکه عصبی با استفاده از روش LM



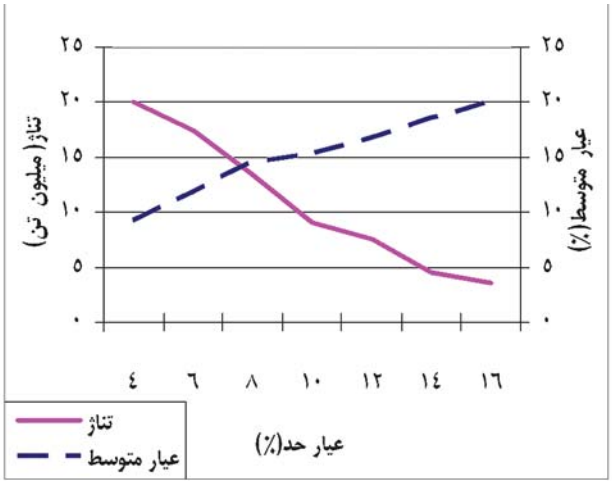
شکل ۹- نتایج آموزش و آزمون شبکه عصبی با استفاده از روش RP



شکل ۱۰- نتایج آموزش و آزمون شبکه عصبی با استفاده از روش LM



شکل ۱۱- تغییرات تناژ و عیار میانگین نسبت به عیار حد (روش زمین‌آمار)



شکل ۱۲- تغییرات تناژ و عیار میانگین نسبت به عیار حد (شبکه عصبی)

کتابنگاری

حسنی پاک، ع.ا ، ۱۳۸۰- تحلیل داده‌های اکتشافی، انتشارات دانشگاه تهرن.

حسنی پاک، ع.ا ، ۱۳۷۷- زمین آمار(ژئواستاتیستیک)، انتشارات دانشگاه تهران.

منهاج، م.ب ، ۱۳۸۱- مبانی شبکه‌های عصبی(هوش محاسباتی- جلد اول)، انتشارات دانشگاه امیرکبیر.

هارتمن، هوارد ال ، ۱۳۸۱- اصول مهندسی معدن، ترجمه مهدی یاوری، امنتشارات دانشگاه صنایع و معادن.

References

Coombes, J., 2002- Handy hints for variography, Snowden Associates Ltd.

David, M., 1982- Geostatistical ore reserve estimation, Elsevier Scientific Publishing Co.

Katsuaki Koike et al., 2001-Neural network-Based estimation of principal metal contents in the Hokuroku District, Northern Japan , Natural Resources Research, Vol. 11, No. 2.

Matias, J. M. et al., 2004-Comparison of Kriging and Neural networks with application to the exploitation of a Slate mine, Mathematical Geology, Vol. 36, No. 4.

Samanta, B. et al., 2005- An application of Neural networks to gold grade estimation in Nome Placer Deposit,"Journal of South African Inst. Mine, Metal, Vol. 105, pp. 237-246.