

## تحلیل قابلیت اطمینان به روش ممان دوم مرتبه اول در پیش‌بینی نرخ نفوذ سرمته

فخرالسادات هاشمی نسب<sup>۱</sup>، راحب باقرپور<sup>۲\*</sup>، علیرضا باغبانان<sup>۳</sup>، مسعود منجزی<sup>۴</sup>

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان

۳- دانشیار، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان

۴- دانشیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

(دریافت: دی ۱۳۹۳، پذیرش: آذر ۱۳۹۶)

### چکیده

با توجه به اهمیت عملیات چالزنی در معدنکاری و تأثیر آن بر سایر مراحل استخراج، تاکنون مطالعات گسترده‌ای بر روی پیش‌بینی آهنگ نفوذ سرمته و بررسی پارامترهای مؤثر بر آن انجام گرفته است. تخمین آهنگ نفوذ سرمته از جمله نیازهای مرحله طراحی و برنامه‌ریزی یک پروژه معدنی محسوب می‌شود. به منظور دستیابی به یک برآورد مناسب از آهنگ نفوذ سرمته در سنگ، باید عوامل مؤثر شناسایی و میزان تأثیر آنها بررسی و عدم قطعیت هر یک تعیین گردد. عوامل مورد بررسی در این تحقیق شامل نیروی فشاری وارده بر مته، مقاومت فشاری تک محوری، سختی اشمیت، شاخص فابریک سیستم رده‌بندی  $Q$  است. پس از انجام برداشت‌های میدانی و آزمون‌های آزمایشگاهی یک پایگاه داده از پارامترهای فوق در معدن ایرانکوه گردآوری شد. از میان این پارامترها، سختی اشمیت کمترین انحراف معیار و بیشترین اندیس قابلیت اعتماد و نیروی فشاری پشت سرمته بیشترین انحراف معیار و کمترین اندیس قابلیت اعتماد را دارد. این بدین معناست که در میان متغیرهای ورودی، سختی اشمیت کمترین و نیروی فشاری پشت سرمته بیشترین میزان عدم قطعیت را دارد. همچنین انحراف معیار و اندیس قابلیت اعتماد مدل تجربی ارائه شده برای آهنگ نفوذ به ترتیب مقادیر  $۵۳/۰۲$  و  $۰/۷۲۹$  است. این مقادیر نشان‌دهنده پراکندگی کم و بنابراین عدم قطعیت پایین این رابطه است.

### کلید واژه‌ها

قابلیت چالخوری توده سنگ، اندیس فابریک توده سنگ، تحلیل عدم قطعیت، تحلیل قابلیت اعتماد، روش ممان دوم مرتبه اول، معدن سرب و روی ایرانکوه

\* عهده دار مکاتبات: [bagherpour@cc.iut.ac.ir](mailto:bagherpour@cc.iut.ac.ir)

## ۱- مقدمه

سال ۱۷۳۲ در مدل ویلبر پارامترهای سختی موس، بافت، شکستگی و ساختار توده سنگ به عنوان مهم‌ترین پارامترها مؤثر بر قابلیت چالخوری سنگ ذکر شد. مدل ویلبر بهترین مدل از بین مدل‌های ارائه شده تا آن زمان شناخته شد. در این مدل، ویلبر برای اولین بار فاکتورهای توده سنگ را کلاس‌بندی نمود [۵]. در سال ۱۹۸۶، هوارس و همکارانش رابطه‌ی قابل قبولی میان آهنگ نفوذ و مشخصاتی از سنگ از قبیل چگالی حجمی، مقاومت فشاری سنگ در حالت اشباع و تخلخل ظاهری بیان کردند. همچنین آنها به این نتیجه رسیدند که رابطه میان آهنگ نفوذ با سختی اشمیت و مقاومت فشاری سنگ در حالت خشک، رابطه‌ی قابل قبولی نیست [۶]. قهرمان در سال ۱۹۹۹، با استفاده از مدل رگرسیونی چندگانه به منظور پیش‌بینی آهنگ نفوذ در سیستم‌های حفاری چرخشی، DTH و سیستم‌های حفاری هیدرولیکی چکش بالا، به این نتیجه رسید که، پارامترهایی که در هر کدام از این سیستم‌های حفاری بر آهنگ نفوذ تأثیر دارند، متفاوت هستند. به طوری که پارامترهای مؤثر بر آهنگ نفوذ در سیستم حفاری چرخشی، وزن مته حفاری، سرعت چرخش مته حفاری، قطر مته و مقاومت فشاری سنگ هستند. این در حالی است که در سیستم حفاری DTH، فشار عملیاتی، قطر پیستون و سختی اشمیت بوده و در سیستم حفاری هیدرولیکی چکش بالا، فشار هوا، مقاومت فشاری سنگ و کوارتز محتوی سنگ پارامترهای مؤثر بر آهنگ نفوذ هستند [۷]. آلتینداگ در تحقیقات خود طی سال‌های ۲۰۰۰، ۲۰۰۲ و ۲۰۰۳، اندیس تُردی را با توجه به مقاومت فشاری تک‌محوره و مقاومت کششی به دست آورد. همچنین رابطه قابل قبولی را بین این اندیس و اندیس قابلیت حفاری در سیستم‌های حفاری چرخشی ارائه کرده است [۸-۱۰]. آکون و کارپوز یکی دیگر از پارامترها مؤثر بر آهنگ نفوذ را شاخص کیفیت سنگ معرفی نمودند. آنها به این نتیجه رسیدند که شاخص کیفیت سنگ و آهنگ نفوذ رابطه خطی مستقیم دارند. همچنین فراوانی درزه از جمله پارامترهای مؤثر بر آهنگ نفوذ از دیدگاه این محققین است. آنها رابطه میان تعداد درزه‌ها در هر متر و آهنگ نفوذ را با یک رابطه تجربی در ماسه‌سنگ به دست آوردند [۱۱]. یارعلی و قهرمان در سال ۲۰۱۱، تحقیقاتی در مورد تُردی که یکی از پارامترهای مؤثر بر قابلیت حفاری است، انجام دادند. آنها اظهار داشتند که هیچ تعریف واحد یا روش اندازه‌گیری

عملیات چالزنی و آتشیاری بخش مهمی از عملیات استخراج معادن روباز است. مقدار مصرف ماده منفجره در هر کشور می‌تواند شاخصی برای ارزیابی کمیت برنامه‌های توسعه آن کشور باشد. امروزه به خاطر فراوانی فعالیت‌های عمرانی و استخراج معادن، استفاده از ماده منفجره به دلیل تولید قدرت لازم جهت شکست سنگ رو به افزایش است. زیرا ماده منفجره به دلیل قدرت لازم مطمئن‌ترین ابزار برای شکست سنگ است. نکته مهم این است که برای استفاده از ماده منفجره و عملیات آتشیاری باید عملیات چالزنی به درستی صورت گرفته باشد. عملیات چالزنی به عنوان اولین مرحله در فرآیند استخراج نقش تعیین کننده‌ای بر سایر مراحل استخراج دارد. جهت برآورد قابلیت چالزنی در معدن باید آهنگ نفوذ سرمرته مورد بررسی قرار گیرد و پارامترهای تأثیرگذار بر آن مشخص شود. این پارامترهای را می‌توان به دو گروه پارامترهای قابل کنترل مانند قطر و نوع سرمرته، بار وارده بر مته و عوامل غیرقابل کنترل مانند مشخصات توده سنگ و ساختارهای زمین‌شناسی و عوامل محیطی تقسیم‌بندی نمود [۱].

در بحث پیرامون تأثیر ویژگی‌های ماده‌سنگ و توده‌سنگ بر قابلیت چالخوری، متخصصان بسیاری با استفاده از پارامترهای مختلف، رفتار سنگ‌ها را تشریح کرده‌اند. فیش در سال ۱۹۶۸، مدلی را برای پیش‌بینی آهنگ نفوذ در حفاری چرخشی ارائه داد که نشان دهنده رابطه مستقیم آهنگ نفوذ در حفاری چرخشی با نیروی فشاری وارده بر مته و رابطه معکوس با مقاومت فشاری تک محوری است [۲]. اشمیت در سال ۱۹۷۲، رابطه‌ای را میان آهنگ نفوذ با پارامترهایی از قبیل: مقاومت فشاری، مقاومت کششی، سختی شور، چگالی، مدول یانگ، سرعت موج طولی، عرضی و نسبت پواسون بیان کرد. بر این اساس در بین پارامترهای بیان‌شده، مقاومت فشاری، مقاومت کششی و مدول یانگ رابطه خوبی با آهنگ نفوذ دارد [۳]. اودسون در سال ۱۹۷۹، رابطه بین آهنگ نفوذ، شاخص کیفی توده‌سنگ، درجه آلتراسیون و سنگ‌شناسی در سنگ‌های آذرین را مورد بررسی قرار داد. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که مقدار شاخص کیفیت سنگ (RQD)، در سنگ‌های بسیار شکاف‌پذیر و گسسته موجب آهنگ نفوذ بالا می‌شود [۴]. در

حاصل ضرب مؤلفه محورهای این دو مؤلفه تعیین کننده شاخص فابریک توده‌سنگ در این رده‌بندی است که به صورت رابطه ۲ بیان می‌شود:

$$F_Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \quad (2)$$

شاخص فابریک توده‌سنگ معرف کیفیت زمین‌شناسی آن است و با توصیف خصوصیات ذاتی توده‌سنگ قدرت درک و فهم بیشتری از کیفیت آن به کاربران می‌دهد [۱۶].

### ۳- تحلیل عدم قطعیت

عدم قطعیت به عنوان یک عبارت مصطلح دارای مفهوم مشخصی است که ممکن است این مفهوم در تقاطع با علوم مختلف تعاریف متفاوتی را بیان نماید. در هر علم و هر حوزه عدم قطعیت، ابهامات موجود در آن فضا را در بر می‌گیرد و لذا تعاریف متعددی دارد. اما عدم قطعیت به عنوان یک مفهوم عمومی، اصطلاحی است که عدم اطمینان انسان را در مورد برخی اشخاص یا اشیا منعکس می‌نماید، و بازه‌ی باز میان اطمینان کامل و عدم اطمینان محض را در بر می‌گیرد [۱۷]. عدم قطعیت در مهندسی سنگ، پارامتری غیر منفی است که پراکندگی مقادیر حول مقدار واقعی را نشان می‌دهد.

خاک و سنگ از جمله محیط‌های غیر همگن و ناهمسانگرد هستند که معمولاً توسط یکسری پارامترهای هندسی، مکانیکی و مقاومتی (وزن مخصوص، مدول یانگ، چسبندگی، زاویه اصطکاک و غیره) تعریف می‌شوند. این پارامترها در دو نقطه مختلف می‌توانند مقادیر متفاوتی را نشان دهند، لذا تعریف آنها به‌طور دقیق ممکن نیست، مگر با اندازه‌گیری در هر نقطه که چنین امری مسلماً امکان‌پذیر نیست. به عبارت دیگر پارامترها، مقادیری را کسب می‌کنند که شناخت دقیق آنها برای ما ممکن نیست. در واقع به یک نقطه در فضا ممکن است مقداری از منحنی تغییرات آن پارامتر اختصاص داده می‌شود، لذا پارامترها ملزم به تعریف شدن توسط یک فرآیند آماری هستند.

دلایل زیادی برای عدم قطعیت در تحلیل نرخ نفوذ وجود دارد. این عدم قطعیت‌ها به‌طور کلی شامل عدم قطعیت مکانی مانند توپوگرافی، چینه‌شناسی محل، منشأ زمین‌شناسی و خصوصیات مواد زیر سطحی، وجود آب زیرزمینی، عدم اطمینان داده‌ای مانند خصوصیات برجای

مشخصی در بین پژوهشگران مختلف وجود ندارد. از آنجایی که تُردی، ترکیبی از پارامترهای مختلف سنگ است، می‌توان اهمیت این پارامتر را در زمینه قابلیت حفاری درک کرد [۱۲]. چینیانی و همکاران در سال ۲۰۱۲، یک مدل تجربی برای توسعه شاخص قابلیت حفاری ویژه توده سنگ SRMD توسعه دادند. در مدل آنها، آهنگ نفوذ با استفاده از پارامتر نیروی فشاری وارده بر مته و مقدار سرعت چرخش سرمته نرمال شده است [۱۳].

در این پژوهش از شاخص فابریک توده‌سنگ سیستم رده‌بندی Q برای پیش‌بینی قابلیت چالخوری استفاده شده است. اما چون شاخص فابریک تنها در برگیرنده مشخصات مربوط به ناپیوستگی‌های توده‌سنگ است، پارامترهای مقاومت فشاری تک‌محوری ماده‌سنگ و عوامل عملیاتی دستگاه چالزنی نیز مورد استفاده قرار گرفته است.

### ۲- شاخص فابریک توده سنگ

تاکنون روش‌های تجربی فراوانی جهت اهداف مهندسی پیشنهاد شده است که سیستم‌های رده‌بندی مهندسی سنگ جزء جدایی‌ناپذیر روش‌های تجربی طراحی به شمار می‌آید. از میان سیستم‌های ارائه شده تاکنون چهار سیستم RMR، Q، GSI و RMI رایج‌تر هستند. تزاموس و سوفیانوس به بررسی همبستگی بین این چهار سیستم متداول پرداخته و شاخص فابریک توده‌سنگ را به عنوان فصل مشترک این چهار سیستم رده‌بندی معرفی کردند [۱۴]. از این شاخص به عنوان داده ورودی در مدل کردن توده‌سنگ در مکانیک سنگ استفاده می‌شود. این شاخص دو مؤلفه اندازه بلوک و شرایط سطح درزه دارد (رابطه ۱).

$$F = f(BS, JC) \quad (1)$$

که در آن F شاخص فابریک توده سنگ، BS مؤلفه ساختار توده‌سنگ (اندازه بلوک)، و JC مؤلفه شرایط سطح درزه است [۱۵].

برای تعیین شاخص فابریک توده‌سنگ سیستم Q، اندیس کیفی توده‌سنگ RQD و تعداد دسته‌درزه‌ها  $J_n$  پارامترهای مربوط به ساختار سنگ هستند. نسبت این دو پارامتر معرف ابعاد بلوک است. پارامتر شرایط درزه به وسیله پارامتر زبری  $J_r$  و میزان هوازدگی درزه  $J_a$  محاسبه می‌شود. نسبت این دو پارامتر معرف شرایط درزه است.

Method)، روش مونت کارلو و ... وجود دارد. روش ممان دوم مرتبه اول محاسبات به نسبت ساده‌ای دارد و تنها اطلاعات مورد نیاز برای محاسبه آن، اطلاعات مربوط به ممان‌های متغیرهای ورودی است بنابراین در این تحقیق، از این روش استفاده شده است.

### ۳-۲- تحلیل قابلیت اعتماد با استفاده از روش ممان دوم مرتبه اول

در این روش منحنی تابع پایه (تابع متغیرهای تصادفی ورودی) توسط چند جمله‌ای تیلور معادل‌سازی می‌شود. به عبارت دیگر این منحنی توسط بسط سری تیلور در اطراف نقطه هدف به صورت خطی تقریب زده خواهد شد. در این روش تنها از جمله اول بسط سری تیلور استفاده می‌گردد و از بقیه جملات به دلیل کوچکی مشتق مراتب بالاتر صرف نظر خواهد شد. به این ترتیب میانگین و انحراف معیار تابع پایه بر اساس میانگین و انحراف معیار متغیرها به سادگی محاسبه شده و امید ریاضی (میانگین)  $(\mu)$  یا  $(E[g])$  و انحراف معیار  $(\sigma_g)$  تابع پایه، بر اساس میانگین و انحراف معیار متغیرها، به سادگی محاسبه می‌شود.

تابع پایه را می‌توان با استفاده از جمله اول بسط سری تیلور به صورت رابطه ۳ نوشت:

$$G = Y - 1 + \sum_{i=1}^m (X_i - X'_i) \quad (3)$$

که در این رابطه،  $Y$ : تابع پایه،  $X_i$ : متغیرهای تصادفی و  $X'_i$ : متوسط متغیرهای تصادفی است. برای محاسبه متوسط و انحراف معیار تابع پایه باید تابع پایه را اطراف متوسط متغیرهای تصادفی با سری تیلور باز نمود (رابطه ۴):

$$Y = g(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (4)$$

توسعه سری تیلور اطراف بردار تصادفی متوسط به شرح رابطه ۵ است:

$$Y = g(\mu_{X_1}, \mu_{X_2}, \dots, \mu_{X_n}) + \sum_{i=1}^n (X_i - \mu_i) \frac{\partial g}{\partial x_i} + \frac{1}{2!} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (X_i - \mu_i)(X_j - \mu_j) \frac{\partial^2 g}{\partial x_i \partial x_j} + \dots \quad (5)$$

امید ریاضی جمله دوم رابطه قبل با توجه به تعریف متوسط، صفر است، به طوری که با صرف نظر از جملات ریشه‌های بالاتر رابطه ۶ به دست می‌آید:

خاک و یا سنگ، رفتار خاک و یا سنگ وعدم قطعیت در برآورد پارامترهای مؤثر در نفوذ در دستگاه حفاری است. به دلیل اینکه از این عدم قطعیت‌ها نمی‌توان به طور کامل چشم‌پوشی کرد، از این روش‌های مخصوصی جهت محاسبه و یا مدیریت آنها در مدل به وجود آمده است [۱۸]. از جمله روش‌های محاسبه تأثیر عدم قطعیت‌های ورودی می‌توان روش تحلیل حساسیت، حدود اطمینان (بررسی قابلیت اعتماد)، محاسبه مستقیم خطاها در اطلاعات، تفسیر قضاوت‌های توصیفی و نظرات تخصصی را نام برد. در این تحقیق از روش تحلیل قابلیت اعتماد برای محاسبه عدم قطعیت داده‌های ورودی استفاده شده است که در ادامه به بررسی آن به طور مفصل پرداخته شده است.

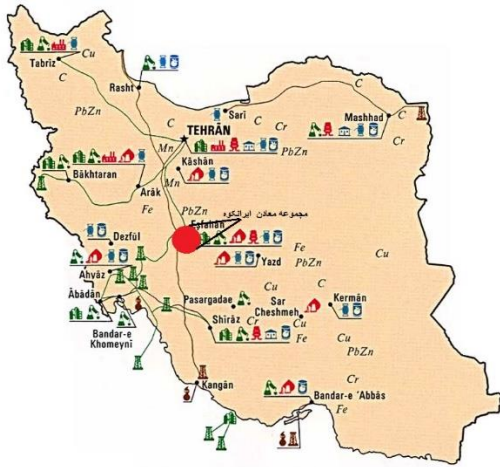
### ۳-۱- تحلیل قابلیت اعتماد

تحلیل قابلیت اعتماد شامل یک مجموعه روش‌هایی است که عدم قطعیت‌ها را با استفاده از توزیع احتمالاتی تابع پایه، مدیریت می‌کنند. در حقیقت روش‌های تحلیل قابلیت اعتماد، عدم قطعیت‌های پارامترهای ورودی را به مقدار خروجی تابع انتقال می‌دهند و یا به عبارتی تأثیر عدم قطعیت‌های پارامترهای ورودی بر مقدار خروجی اعمال خواهد شد. این روش دارای دو مزیت است، ابتدا اینکه اجازه می‌دهد عدم قطعیت‌ها به روش منطقی در طراحی و محاسبات مدیریت شود و به صورت دقیق به تحلیل یا تعیین حساسیت متغیرهای متفاوت پرداخته شود. دوم اینکه تصمیم‌گیری‌ها بندرت مطلوب هستند و این روش‌ها پایه منطقی‌تری را برای تصمیم‌گیری در یک تحلیلی که کاملاً قطعی است ایجاد می‌کنند

در مفهوم اساسی تحلیل قابلیت اعتماد فاکتورهای ژئوتکنیکی، کمیت‌هایی آماری هستند که دارای یک مقدار مرکزی (میانگین) و یک پراکندگی (واریانس)، اطراف این مقدار میانگین هستند (ممان آماری درجه اول و دوم). در بعضی از روش‌های احتمالاتی پارامترهای آماری دیگری نیز برای تشریح بیشتر توابع توزیع متغیرهای ورودی لازم است مثل: چولگی، کشیدگی و ... (ممان آماری درجه سوم، چهارم و ...)

برای اندازه‌گیری قابلیت اعتماد، روش‌های مختلفی همچون روش مرتبه اول (FORM)، روش ممان دوم مرتبه اول (FOSM)، روش تخمین نقطه‌ای (Point Estimate)

حدود ۳۰۰ متر است که به طور عمومی از آهک و دولومیت همراه مقدار کمی شیل و مارن تشکیل شده است.



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی معدن سرب و روی ایرانکوه در نقشه صنعت و معدن ایران [۲۰]

#### ۵- داده‌های جمع‌آوری شده

در این تحقیق در راستای بررسی تأثیر پارامترهای مختلف زمین‌شناسی، ژئومکانیکی و پارامترهای عملیاتی دستگاه بر میزان نرخ نفوذ و پیش‌بینی عملکرد دستگاه چالزنی، پس از بررسی پیشینه تحقیق و شناخت نقاط ضعف و قوت آنها، پارامترهای لازم در پیش‌بینی سرعت حفاری انتخاب شد. این پارامترها شامل پارامترهای عملیاتی دستگاه چالزنی از جمله نیروی فشاری پشت سرمته و سرعت چرخش سرمته، پارامترهای مربوط به ماده سنگ شامل مقاومت فشاری تک محوری، مقاومت کششی برزیلی و چکش اشمیت و پارامترهای مربوط به توده سنگ شامل اندیس فابریک توده سنگ سیستم‌های RMR، Q، و GSI بود. پس از انجام برداشت‌های میدانی و آزمون‌های آزمایشگاهی بانک اطلاعاتی جامعی از پارامترهای مقاومت فشاری تک محوری، سختی اشمیت، نیروی فشاری وارده بر مته و اندیس فابریک سیستم Q، که به عنوان متغیرهای ورودی محسوب می‌شوند، در معدن سرب و روی ایرانکوه به دست آمد [۲۱].

برای بررسی داده‌های به دست آمده حاصل از برداشت‌های میدانی و آزمون‌های آزمایشگاهی از نظر میزان پراکندگی و یا به عبارتی قابلیت اعتماد آنها، باید میانگین،

$$E[Y] = \mu_g = g(\mu_{x_1}, \mu_{x_2}, \dots, \mu_{x_n}) \quad (6)$$

که در این رابطه،  $E[Y]$ : امید ریاضی تابع پایه و  $\mu_g$ : میانگین تابع است. همچنین واریانس  $Y$  با استفاده از رابطه ۷ محاسبه می‌شود:

$$Var[Y] = E[(Y - E[Y])^2] = \sigma_g^2 \quad (7)$$

بنابراین با در دست داشتن  $\mu_g$  و  $\sigma_g$  و با استفاده از رابطه ۸ می‌توان اندیس قابلیت اعتماد ( $\beta$ ) را محاسبه نمود:

$$\beta = \frac{\mu_g}{\sigma_g} \quad (8)$$

اندیس قابلیت اعتماد، کمیتی است که اجازه می‌دهد قضاوت‌ها با شناخت عدم قطعیت‌های پارامترهای ورودی انجام پذیرد. این اندیس برای تهیه یک مبنای مقایسه‌ای قابلیت اعتماد، توسعه یافته است و جهت بیان درجه عدم قطعیت محاسبه شده به کار می‌رود. یعنی بدون شناخت کامل تابع توزیع احتمالاتی این پارامترها و تنها با توجه به بعضی از مشخصه‌های آماری آنها (میانگین و انحراف معیار) این مهم صورت می‌گیرد.

#### ۴- مطالعه موردی

برای به دست آوردن اطلاعات تکمیلی در خصوص عدم قطعیت نرخ نفوذ دستگاه چالزنی در معادن روباز، چندین جبهه کار از معدن سرب و روی ایرانکوه، مورد مطالعه قرار گرفت و اطلاعات زمین‌شناسی، سنگ‌شناسی و مقاومتی سنگ و اطلاعات دستگاه چالزنی و نرخ نفوذ به‌طور کامل ثبت و ضبط گردید.

محدوده این منطقه در رشته‌کوه ایرانکوه، در فاصله ۲۰ کیلومتری جنوب‌غربی اصفهان بین طول جغرافیایی ۵۱ درجه و ۳۱ دقیقه تا ۵۱ درجه و ۴۵ دقیقه و عرض جغرافیایی ۳۲ درجه و ۲۸ دقیقه تا ۳۲ درجه و ۳۷ دقیقه واقع شده است. شکل ۱ موقعیت جغرافیایی معدن سرب و روی ایرانکوه را در نقشه صنعت و معدن ایران نشان می‌دهد. بلندترین نقطه محدوده از سطح دریا برابر ۲۷۵۰ متر و پست‌ترین آن برابر ۱۶۶۰ متر است [۱۹]. قدیمی‌ترین سنگ‌های این منطقه متعلق به ژوراسیک زیرین بوده که از شیل‌های سیاه همراه با سیلت‌استون و ماسه‌سنگ تشکیل شده‌اند و تنها در یال شمالی این رشته‌کوه و به صورت بیرون‌زدگی دیده می‌شوند. این رسوبات از نظر سنی متعلق به بارمین تا آلبین زیرین است. ضخامت این رسوبات در

$$\mu = m_1 m x_1 = \int_0^{\infty} x f(x) dx \quad (9)$$

$$m_2 = m x_2 = \int_0^{\infty} x^2 f(x) dx \quad (10)$$

$$\sigma = m_2 - \mu^2 \quad (11)$$

با توجه به جدول ۲ که خصوصیات آماری متغیرهای ورودی را به طور خلاصه نشان می‌دهد، سختی اشمیت نرمال شده بیشترین اندیس قابلیت اعتماد و نیروی فشاری وارده بر مته کمترین اندیس قابلیت اعتماد را دارد. این نشان دهنده پراکندگی داده‌ها و عدم قطعیت بالا برای داده‌های نیروی فشاری پشت سرتمه نسبت به سایر متغیرهای ورودی است.

انحراف معیار و در نهایت اندیس قابلیت اعتماد هر یک از توابع پایه محاسبه شود [۲۲].

در ابتدا توابع پایه هر یک از متغیرهای ورودی، به صورت جداگانه محاسبه می‌شود و در نهایت تابع پایه نهایی که شامل تمام پارامترهای ورودی ابتدا بدست آمده و میانگین و انحراف معیار آن محاسبه می‌شود. توابع پایه هر یک از متغیرهای ورودی به صورت جداگانه به شرح جدول ۱ است. این توابع با استفاده از روش تحلیل آماری تک متغیره و با استفاده از روش SPSS محاسبه شده اند.

در ادامه میانگین و انحراف معیار برای هر یک از توابع پایه متغیرهای ورودی با استفاده از روابط ۹ و ۱۱ محاسبه می‌شود. نتایج در جدول ۲ قابل مشاهده است. در جدول ۲ همچنین شاخص قابلیت اعتماد برای هر یک از متغیرهای ورودی، که از رابطه ۸ محاسبه شده اند، مشاهده می‌شود.

جدول ۱: توابع پایه متغیرهای ورودی

توابع پایه متغیرهای ورودی	متغیرهای ورودی
نیروی فشاری وارده بر مته	$G = \frac{1}{72.517} e^{-0.00597(x^2 - 290.5x)}$
مقاومت فشاری تک محوری	$G = \frac{1}{27.32} e^{-0.002258(x^2 - 20.4x)}$
سختی اشمیت نرمال شده	$G = \frac{1}{0.144} e^{-0.0657(x^2 - 90.396x)}$
شاخص فابریک سیستم Q	$G = \frac{1}{15.95} e^{-0.0129(x^2 - 83.582x)}$

جدول ۲: خصوصیات آماری متغیرهای ورودی

متغیرهای ورودی	$\mu = m_1$	$m_2$	$\sigma = m_2 - \mu^2$	$\beta$
نیروی فشاری وارده بر مته	۱۴۵/۲۵	۲۱۳۸۶/۹۰۵	۲۸۹/۳۴	۰/۵۰۲
مقاومت فشاری تک محوری	۱۰۲/۰۲	۱۰۵۶۱/۱۲۵	۱۴۹/۹۶	۰/۶۸۵
سختی اشمیت نرمال شده	۴۵/۱۹۸	۲۰۹۵/۲۳	۵۲/۳۷۳	۰/۱۸۶۳
شاخص فابریک سیستم Q	۴۱/۷۹۱	۱۷۹۸/۷۳	۵۲/۲۴	۰/۸

رگرسیون عمومی شبکه عصبی (GRNN) که در ساختار آنها توابع پایه‌ی شعاعی به کار گرفته شده، زیرمجموعه‌ی شبکه‌های شعاعی بوده و دارای سه لایه شامل لایه‌ی ورودی، لایه‌ی پایه‌ی شعاعی و لایه‌ی خطی هستند. در شبکه‌های GRNN تعداد نرون‌ها در لایه‌ی ورودی و خروجی وابسته به شرایط مسئله است در حالی که تعداد نرون‌های لایه‌ی دوم برابر تعداد داده‌های آموزش است. در

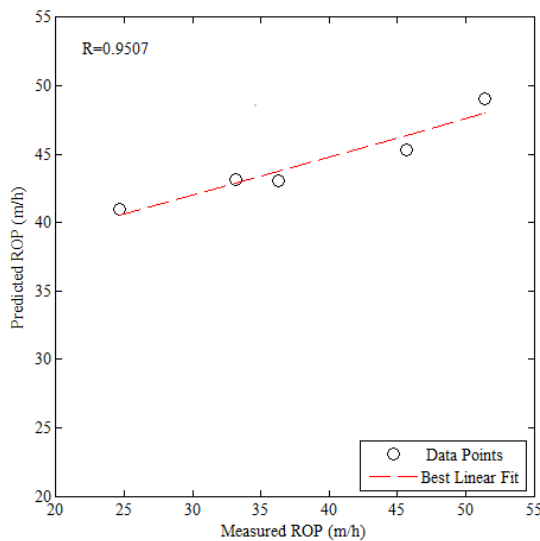
برای یافتن روابط تجربی با بهترین تطابق با داده‌های موجود در تعیین تابع پایه نهایی که شامل تمام متغیرهای ورودی است، از روش تحلیل آماری چند متغیره با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی استفاده شد.

۵-۱- روش تحلیل آماری چند متغیره یا استفاده از روش شبکه عصبی مصنوعی

در نهایت تابع پایه متغیرهای ورودی با استفاده از روش شبکه عصبی مصنوعی به صورت رابطه ۱۴ به دست آمد:

$$ROP = -0.48UCS + 0.17Thrust - 0.15F_Q - 0.057Ln(Sch) \quad (14)$$

شکل ۴ مقادیر اندازی‌گیری شده (محور افقی) و مقادیر تخمینی (محور عمودی) نرخ نفوذ با استفاده از شبکه را نمایش می‌دهد. R2 میزان همبستگی بین مقادیر واقعی و تخمینی را نشان می‌دهد. مقدار آن در بازه صفر تا یک تغییر می‌کند و مقدار یک نشان دهنده تطابق کامل داده‌ها بر هم و طبیعتاً مقدار صفر عدم همبستگی بین داده‌ها را نشان می‌دهد. مقدار R2 محاسبه شده برای مدل برابر ۰/۹۰۳ است که به عدد یک نزدیک است. مقدار RMSE محاسبه شده برای مدل نیز برابر با ۰/۴۸ است. بر اساس این دو پارامتر (RMSE و R2) می‌توان نتیجه گرفت که مدل شبکه عصبی آموزش یافته قابلیت استفاده برای پیش‌بینی نرخ نفوذ دستگاه چالزنی در معدن سرب و روی ایرانکوه را دارد.



شکل ۴: تغییرات نرخ نفوذ واقعی و نرخ نفوذ محاسبه شده

#### ۶- تحلیل آماری قابلیت اعتماد

در ادامه باید میزان قابلیت اعتماد معادله نرخ نفوذ جهت بررسی میزان عدم قطعیت، از روش ممان دوم مرتبه اول، محاسبه شود. رابطه ۱۵ بسط تیلور رابطه ۱۴ را نشان می‌دهد که در نهایت با بسط دادن رابطه، معادله ۱۶ حاصل می‌شود:

$$Y = f(\mu_{UCS}, \mu_{Thrust}, \mu_{Sch}, \mu_{F_Q}) + \sum_{i=1}^n \left( (X_i - \mu_i) \times \frac{\partial g}{\partial x_i} \right) \quad (15)$$

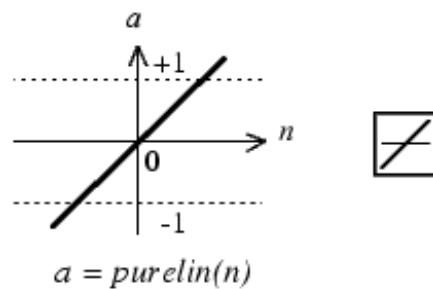
این روش برخلاف روش‌هایی نظیر انتشار به سمت عقب (BPNN) و شبکه عصبی هاپفیلد (HNN)، وزن‌های لایه‌های پایه‌ی شعاعی و خطی توسط خود شبکه و بدون نیاز به در نظر گرفتن هرگونه پیش‌فرض تعیین می‌گردند [۲۳]. این نوع شبکه‌ها اغلب به عنوان توابع تخمین استفاده می‌شوند و شامل دو تابع محرک گوسین و خطی در ساختار خود هستند. توابع خطی به صورت رابطه ۱۲ تعریف می‌شود:

$$a = \text{purelin}(n) \quad (12)$$

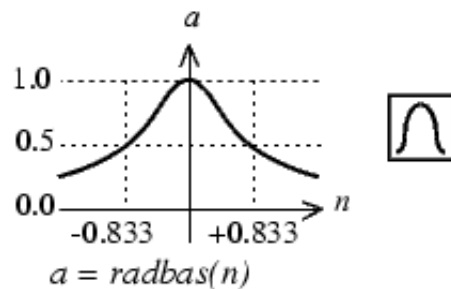
این بدان معنی است که خروجی این تابع برابر ورودی آن است. این تابع بیشتر در شبکه‌های آدلاین مورد استفاده قرار می‌گیرند. باید توجه شود که جمله بایاس  $b$  که در معادله فوق نشان داده شد موجب جابه‌جایی منحنی در فضای ورودی می‌شود (شکل ۲). توابع گوسین به صورت رابطه ۱۳ است:

$$a = a'e^{-\frac{(n-b)^2}{2c^2}} \quad (13)$$

که در آن  $a'$ ،  $b$  و  $c$  ضرایب ثابت حقیقی است. شکل این تابع زنگوله‌ای متقارن است که به سرعت به صفر نزول می‌کند. ثابت  $a'$  تعیین کننده ارتفاع قله منحنی،  $b$  تعیین کننده محل مرکز قله و  $c$  (انحراف معیار) تعیین کننده میزان کشیدگی و یا پهن‌شدگی زنگوله است (شکل ۳).



شکل ۲: نمودار تابع خطی



شکل ۳: نمودار تابع گوسین

$$\mu_g = E[Y] = g(\mu_{x_1}, \mu_{x_2}, \dots, \mu_{x_n}) \quad (17)$$

$$Var[Y] = E[(Y - E[Y])^2] = \sigma^2 \approx \left( \sum_i^n \sum_j^n \frac{\partial g}{\partial x_i} \right)^2 \quad (18)$$

$$\beta = \frac{\mu}{\sigma} \quad (19)$$

بنابراین با استفاده از روابط ۱۷، ۱۸ و ۱۹ مقدار میانگین، انحراف معیار و در نهایت اندیس قابلیت اعتماد تابع پایه به دست آمد که جدول ۳ نتایج حاصل از محاسبات را به‌طور خلاصه نشان می‌دهد.

جدول ۳: خلاصه نتایج محاسبات انجام شده

$\beta = \frac{\mu}{\sigma}$	$\sigma = m_2 - m_1^2$	$m_2$	$m_1 = \mu$	$g = ROP$
۰/۷۲۹	۵۳/۰۲	۱۵۴۶/۹۹۷	۳۸/۶۵۲	

دهنده پراکندگی حول مقدار واقعی نرخ نفوذ است، محاسبه می‌شود.

از میان متغیرهای ورودی، شامل نیروی فشاری وارده بر مته، مقاومت فشاری تک محوری، سختی اشمیت و شاخص فابریک توده سنگ، سختی اشمیت نرمال شده با اندیس قابلیت اعتماد ۰/۸۶۳ بالاترین اندیس قابلیت اعتماد کمترین نیروی فشاری پشت سرته با اندیس قابلیت اعتماد کمترین اندیس قابلیت اعتماد ۰/۵۰۳ را دارد. این بدین معناست که در میان متغیرهای ورودی در این تحقیق، سختی اشمیت کمترین میزان عدم قطعیت و نیروی فشاری پشت سرته بیشترین میزان عدم قطعیت را دارد.

همچنین انحراف معیار و اندیس قابلیت اعتماد مدل تجربی کلی ارائه شده برای آهنگ نفوذ سرته به ترتیب مقدار  $\beta = 0.729$  و  $\sigma = 53.02$  است. این مقادیر نشان‌دهنده پراکندگی کم حول مقدار واقعی و بنابراین عدم قطعیت پایین این رابطه است. پس می‌توان به این رابطه برای پیش‌بینی آهنگ نفوذ سرته در معدن سرب و روی ایرانکوه اطمینان نمود.

## مراجع

[1] Yasar, E., Ranjith P.G. and Viete D.R.; 2011, "An experimental investigation into the drilling and physico-mechanical properties of a rock-like brittle material", Journal of Petroleum Science and Engineering 76, p 185-193.

$$Y = g(102.04, 145.25, 45.198, 41.791) + \left[ \begin{array}{l} (UCS - 102.04) \times (-0.48) + \\ (Thrust - 145.25) \times (0.17) + \\ (F_Q - 41.791) \times (-0.15) + \\ (Sch - 45.198) \times (-0.057) \end{array} \right] \quad (16)$$

در مرحله بعد باید انحراف معیار و میانگین و در نهایت اندیس قابلیت اعتماد تابع پایه محاسبه گردد. به منظور محاسبه این سه پارامتر از رابطه‌های ۱۷، ۱۸ و ۱۹ استفاده شده است که این روابط به ترتیب انحراف معیار، میانگین و اندیس قابلیت اعتماد را محاسبه می‌کنند.

با بررسی محاسبات صورت گرفته و با توجه به این اصل که، هرچه اندیس قابلیت اعتماد بیشتر شود، قابلیت اعتماد به آن بیشتر و در نتیجه عدم قطعیت کمتر است، می‌توان نتیجه گرفت که چون اندیس قابلیت اعتماد در اینجا بالا و مقدار ۰/۷۲۹ را دارد، بنابراین قابلیت اعتماد به رابطه به دست آمده (رابطه ۱۴) با روش شبکه عصبی مصنوعی برای پیش‌بینی نرخ نفوذ سرته در حفاریات روباز معدن سرب و روی ایرانکوه، بالاست و این رابطه می‌تواند جنبه عملی در این معدن را داشته باشد.

## ۷- نتیجه‌گیری

عدم قطعیت می‌تواند توصیف‌کننده‌ی کیفیت دانش انسان در رابطه با یک مورد خاص باشد که عبارت است از عدم اعتماد در رابطه با یک مسأله‌ی خاص در محیط پیرامون آن مسأله.

در این تحقیق به دلیل محیط انجام برداشت‌های میدانی و آزمون‌های آزمایشگاهی عدم قطعیتی در اطلاعات ثبت شده وجود دارد. بنابراین در رابطه توسعه یافته برای محاسبه نرخ نفوذ در معدن ایرانکوه عدم قطعیت و ابهام وجود دارد. در این تحقیق تلاش شده است که با استفاده از تحلیل قابلیت اعتماد به روش ممان دوم مرتبه اول *FOSM*، میزان ابهام و در واقع میزان تغییرات که نشان



- [15] Ghafouri, M, Lashkaripour, Gh, Moradi, Taher, Rostami Yarani, H., 2007, "Evaluate rock mass fabric index according to the system of rock mass classification", Fifth Conference of geology and environmental of Iran, 905-913, in Persian.
- [16] Hasheminasab, F, Monjezi, M, Khademi Hamidi, J., 2013, Estimated of drillability of rock using fabric index in lead and zinc mine in Zanjan, in Persian.
- [17] NRC (National Research Council), 2000, "Risk analysis and Uncertainty in Flood Reduction Studies", National Academic Press.
- [18] Ben H. Thacker, David S. Riha, Y.-T. (Justin) Wu, 1996, "probabilistic structural analysis of deep tunnels", Technical Report, Southwest Research institute
- [19] Ranjbar, Zahra., 2010, Determine the appropriate support system for access tunnels in goshfil mine using Multiple Criteria Decision Making, Master's thesis, Department of Petroleum Engineering and Geophysics, industrial University of Shahrud, in Persian.
- [20] Iran Economic Activity Map, Online: <http://www.mapper.com/Iran-Economic-Activity-Map>.
- [21] Hasheminasab, Fakhrosadat., 2013, Development of bit penetration rate model in drilling operation of surface excavation, Master's thesis, Technical Faculty of Tarbiat Modares University, In Persian
- [22] D. r. Griffiths. Gordon A Fenton; "Probabilistic Method In Geotechnical Engineering", spring wien New Yourk.
- [23] Minhaj, Mohammad bagher, 2002, Computational Intelligence, first volume, Foundations of Neural Networks, Second Edition, published by Amirkabir University of Technology, Tehran, In Persian.
- [2] Fish, B.G., 1968; "The basic variables in rotary drilling", Mine Quarry Eng; 27:74-81.
- [3] Schmidt, R.L., 1972; "Drillability Studies – Percussive Drilling in the Field", US Bureau of Mines RI 7684.
- [4] Oddsson, J., 1979; "Rock quality designation and drilling rate correlated with lithology and degree of alteration in volcanic rocks from the 1979 Surtsey drill hole", Surtsey Research Progress Report IX, 94-97.
- [5] Wilbur, L; ۱۹۸۷; Rock Tunnel Engineering Handbook, Edited by Bickel and kuesel, Publication of Van Norstrand Reinhold Company.
- [6] Howarth, D. F., Adamson, W. R. and Berndt, J. R., 1986; "Correlation of model tunnel boring and drilling machine performances with rock propertie". Int. J. Rock Mech. Min. Sci, 23p 171-175.
- [7] Kahraman, S., 1999; "Rotary and percussive drilling prediction using regression analysis", International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 36:p981-989.
- [8] Altindag, R., 2000; "The role of brittleness on the analysis of percussive drilling Performance", In: Proc. of 5th Turkish National Rock Mech. Symp., p. 105-112.
- [9] Altindag, R., 2002; "The evaluation of rock brittleness concept on rotary blast hole drills", The Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy.
- [10] Altindag, R., 2003; "Technical Note Estimation of Penetration Rate in Percussive Drilling by Means of Coarseness Index and Mean Particle Size", Rock Mech. Rock Engng. 36 (4), p 323-332.
- [11] Akun, M.E., Karpuz, C., 2005; "Drillability studies of surface-set diamond drilling in Zonguldak region sandstones from Turkey", International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 42, p 473-479.
- [12] Yarali, O., Kahraman S., 2011; "The drillability assessment of rocks using the different brittleness values", Tunnelling and Underground Space Technology 26, p406-414.
- [13] Cheniany, A, Khoshrou, H, Shahriar, K and Khademi Hamidi, J., 2012; "An estimation of the penetration rate of rotary drills using the Specific Rock Mass Drillability index", International Journal of Mining Science and Technology 22 p 187-193.
- [14] Tzamos, S, Sofianos, A. I., ۲۰۰۷; "A correlation of four rock mass classification systems through their fabric indice"s", Int J Rock Mech Min Sci; 4: p 477-495.