

تعیین رابطه مقاومت فشاری تک‌محوری با پارامترهای اندیس بار نقطه‌ای، وزن مخصوص و تخلخل توده‌سنگ به روش شبکه عصبی

حسینعلی لازمی^{۱*}; محمدرضا اسکندری^۲

۱- استادیار دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد بافق

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیک سنگ، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد بافق

چکیده

مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ به عنوان یکی از پارامترهای مکانیکی مهم و اساسی در مباحث مکانیک سنگ مطرح است. این پارامتر در آزمایشگاه و بر اساس استانداردهای خاص تعیین می‌شود. مقاومت فشاری تک‌محوری می‌تواند به روش مستقیم و با انجام آزمایش فشاری تک‌محوری تعیین گردد که انجام این آزمایش مستلزم هزینه و زمان است. در برخی موارد بهتر است که از روش‌های غیرمستقیم این پارامتر تعیین شود. بر این اساس لازم است بین این پارامتر و دیگر پارامترهای فیزیکی و مکانیکی سنگ ارتباط منطقی برقرار نمود. در این مقاله پارامترهای تأثیرگذار در مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ در محدوده ایران مرکزی و در منطقه بافق مورد مطالعه قرار گرفته و با انجام آزمایش‌های مکانیک سنگی و با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی رابطه‌ای برای تعیین مقاومت فشاری تک‌محوری بر اساس پارامترهای تخلخل، اندیس بار نقطه‌ای و وزن مخصوص سنگ در این منطقه ارائه شده است. پارامترهای تخلخل، اندیس بار نقطه‌ای و وزن مخصوص به عنوان ورودی در نظر گرفته شده و مقاومت فشاری تک‌محوری به عنوان خروجی تخمین زده شده است. در نهایت نتایج بدست آمده از شبکه عصبی با داده‌های واقعی مقایسه شده و همبستگی آن‌ها مورد تأیید قرار گرفته است.

کلمات کلیدی

مقاومت فشاری تک‌محوری، تخلخل، وزن مخصوص، اندیس بار نقطه‌ای، شبکه عصبی مصنوعی.

۱- مقدمه

خصوصیات فیزیکی و مکانیکی از جمله مهم‌ترین پارامترهای سنگ است که به طور گسترده‌ای در پروژه‌های عمرانی و معدنی برای مطالعات مکانیک سنگی مورد نیاز بوده و تعیین می‌گردند. در این میان اندازه‌گیری مقاومت فشاری تک محوری در بیشتر طراحی‌های مکانیک سنگ از اولویت‌های آزمایشگاهی بوده و کمتر پروژه‌ای است که از این اندازه گیری بی‌نیاز باشد.

اگر چه مقاومت تراکمی تک محوری سنگ (σ_c) به صورت مستقیم به عنوان پارامتر طراحی مورد استفاده قرار نمی‌گیرد ولی این پارامتر نقشی مهمی در مرحله طراحی و ساخت تونل‌ها، شیب‌ها و شالوده‌ها در توده‌سنگ بازی کرده و به عنوان داده ورودی بعضی روش‌های تجربی مثل RMR، RMI و معیارهای شکست بکار می‌رود [۱] [۲]. علاوه بر آن از مقاومت تراکمی تک محوری سنگ به عنوان پارامتر ورودی برای پیش‌بینی مدول الاستیسیته سنگ و همچنین تخمین مدول تغییر شکل توده‌سنگ بکار می‌رود. بنابراین این پارامتر، یک پارامتر حیاتی و ضروری در پروژه‌های مهندسی سنگ است. اگرچه روش اندازه‌گیری مقاومت فشاری تک محوری خیلی مشکل نیست ولی معمولاً هزینه و وقت زیادی جهت تهیه نمونه مناسب، آماده سازی و انجام آزمایش لازم است، بنابراین در بسیاری از مواقع روش‌های غیرمستقیم که برای تعیین مقاومت فشاری تک محوری بکار می‌رود، ارجحیت دارد [۳] [۴].

۲- عوامل موثر بر مقاومت فشاری تک محوری

به طور کلی عوامل موثر بر مقاومت فشاری تک محوری سنگ‌ها را می‌توان به دو گروه عمده عوامل داخلی و خارجی تقسیم‌بندی نمود. عوامل داخلی، عواملی هستند که بستگی به خصوصیات ذاتی سنگ دارند. عواملی مثل ترکیب کانی‌شناسی، چگالی، تخلخل، ابعاد و شکل دانه‌ها، شاخص پوکی و ناهمسان گردی از این قبیل عوامل می‌باشند. عوامل خارجی بستگی به روش آزمایش، دستگاه آزمایش، شرایط محیطی و شخص آزمایش‌کننده دارد. عواملی چون ابعاد نمونه، شکل هندسی نمونه، نسبت ارتفاع به قطر، اصطکاک بین صفحات بارگذاری دستگاه و نمونه، سرعت بارگذاری، نحوه اتصال نمونه به دستگاه آزمایش، رطوبت نمونه، ترکیب مایعات موجود در نمونه و درجه حرارت از این عوامل می‌باشند [۳].

۳- تعیین مقاومت فشاری تک محوری به روش غیرمستقیم

با توجه به اینکه روش مستقیم تعیین σ_c پر هزینه و وقت‌گیر بوده و نیاز به تجهیزات خاص دارد، روش‌های دیگری برای تعیین σ_c ، به عنوان روش‌های غیرمستقیم بکار می‌رود. در این روش‌ها با تعیین پارامترهای فیزیکی و مکانیکی سنگ که تعیین آن‌ها کم هزینه‌تر از تعیین σ_c است، می‌توان مقدار σ_c را از معادلاتی که با این پارامترها مرتبط است، به دست آورد [۳].

همان‌گونه که ذکر شد مقاومت فشاری تک محوری سنگ با دیگر پارامترهای ژئومکانیکی سنگ مرتبط است، بنابراین از این ارتباط برای تعیین مقاومت سنگ به روش غیرمستقیم استفاده می‌شود که می‌تواند از لحاظ سرعت و هزینه انجام آزمایش نقش مثبتی داشته باشد. محققان در تحقیقات مختلف، پارامترهای مختلفی از سنگ مانند وزن مخصوص، تخلخل، اندیس بار نقطه‌ای، سختی، سرعت موج در سنگ و برخی پارامترهای دیگر از سنگ را برای تعیین مقاومت فشاری بکار برده‌اند و از روش‌های مختلف آماری و ریاضی برای تعیین مقاومت فشاری تک محوری، از یک پارامتر یا چند پارامتر ژئومکانیکی توده‌سنگ، استفاده شده است [۵] [۶] [۷].

۴- وضعیت زمین‌شناسی و سنگ‌شناسی منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در استان یزد، در ناحیه ایران مرکزی قرار دارد. در این منطقه از قدیمی‌ترین سنگ‌های دگرگون شده (پرکامبرین) تا آتشفشان فعال و نیمه‌فعال امروزی قرار دارد. در این نواحی، مرز واحدها با یکدیگر در بیشتر جاها گسلی و در جاهای دیگر فرورفتگی‌هایی وجود دارد. این مجموعه بر اثر حرکات کوهزایی شدیداً دگرگون شده و پلاتفرم ایران مرکزی را تشکیل داده است. در دوران مزوزوئیک و سنوزوئیک ایران مرکزی منطقه پرتحرکی بوده و فعالیت‌های ماگمایی به صورت سنگ‌های آتشفشانی و توده‌های گرانیتی نفوذی در آن دیده می‌شوند. از نظر چینه‌شناسی واحدهای سنگی پرکامبرین در ایران مرکزی که مستقیماً زیر رسوبات فسیل‌دار کامبرین قرار دارد در اکثر نقاط ایران مرکزی مخصوصاً در کوه‌های یزد به خوبی شناخته شده است. رسوبات پالئوزوئیک تا سنوزوئیک ایران مرکزی بیشتر از رسوبات پایانی و کم‌عمق تشکیل شده است. سنگ‌های آهکی شیلی و ماسه‌سنگی لیتولوژی اصلی کامبرین است. سنگ‌های

مخصوص و اندیس بار نقطه‌ای به عنوان ورودی شبکه و مقاومت فشاری تک محوری به عنوان خروجی در نظر گرفته می‌شود. با توجه به تعداد ۶۰ نمونه واقعی مشاهده گردید که شبکه مذکور دارای خطای زیادی است، لذا بر اساس روش‌های آماری و با استفاده از تکنیک رگرسیون غیرخطی ارتباط بین هر پارامتر با پارامترهای خروجی بر حسب توابع غیرخطی به دست آمده سپس نسبت به آموزش شبکه عصبی و محاسبه خطا اقدام شده است. در مرحله آموزش الگوریتم یادگیری، از الگوریتم جستجو استفاده شد به گونه‌ای که محدوده هر یک از ضرایب به فاصله‌های بسیار کوچک تقسیم‌شده و سپس نسبت به اصلاح وزن‌ها اقدام شده به گونه‌ای که خروجی نسبت به جواب واقعی خطای کمتری داشته باشد. این اصل به عنوان جستجوی هوشمندانه در الگوریتم جستجو مد نظر قرار گرفت و وزن‌ها بر اساس خطای حداقل به دست آمده است. در ضمن تابع آستانه در شبکه عصبی به شکل زیر تعریف شده است.

$$\begin{aligned} y_{out} &= 1 & \text{if } y_{in} > 0 \\ y_{out} &= 0 & \text{if } y_{in} \leq 0 \end{aligned} \quad (1)$$

۶- پارامترهای ورودی و نتایج خروجی

در شبکه عصبی مورد استفاده در این مقاله، اندیس بار نقطه‌ای، وزن مخصوص و تخلخل، پارامترهای ورودی و مقاومت فشاری تک محوری پارامتر خروجی است. برای طراحی شبکه از داده‌های آزمایشگاهی مربوط به نمونه‌های منطقه مورد مطالعه استفاده شده است. تعداد نمونه‌های آزمایش شده ۶۰ مورد است که برای هر نمونه پارامترهای مقاومت فشاری تک محوری، اندیس بار نقطه‌ای، تخلخل و وزن مخصوص به دست آمده است. برای اینکه بتوان از طریق شبکه عصبی رابطه منطقی بین مقاومت فشاری تک محوری و پارامترهای فوق‌الذکر به دست آورد، ابتدا با استفاده از روش رگرسیون غیرخطی اطلاعات حاصل از آزمایش‌های انجام‌شده بر روی نمونه‌های تهیه‌شده از منطقه مورد مطالعه، بین مقاومت فشاری تک‌محوره و هر یک از پارامترهای اندیس بار نقطه‌ای، وزن مخصوص و تخلخل به طور جداگانه، روابطی مشخص می‌گردد که در هر سه مورد روابط غیرخطی است. در نهایت با استفاده از شبکه عصبی بین مقاومت فشاری تک‌محوره و سه پارامتر تخلخل، وزن مخصوص و اندیس بار نقطه‌ای رابطه‌ای با حداقل خطا به دست آورده می‌شود.

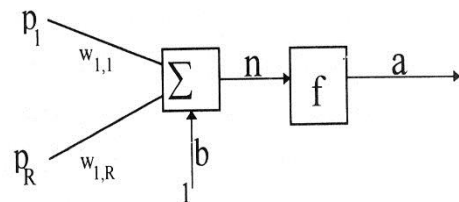
دگرگونی پرکامبرین در قسمت شرقی ایران مرکزی و سنگ‌های غیردگرگونی مربوط به پرکامبرین‌اند که جوان تر بوده و حاصل رسوبات کم‌عمق دریایی می‌باشند [۸].

۵- شبکه عصبی مصنوعی

شبکه‌های عصبی مصنوعی یک سیستم پردازش اطلاعات است که مشخصه عملکرد آن مشابه عملکرد شبکه‌های عصبی بیولوژیک است. یک شبکه عصبی شامل تعداد زیادی واحد پردازشگر ساده به نام سلول است. هر کدام از این خطوط دارای وزنی مربوط به خود می‌باشند. شبکه‌های عصبی را می‌توان در مسائل مختلفی از قبیل ذخیره و بازیابی اطلاعات و یا الگوها، دسته‌بندی کردن الگوها، ایجاد یک ارتباط از تعدادی الگوی ورودی به تعدادی الگوی خروجی و یا یافتن حل برای مسائل بهینه یابی در حضور محدودیت‌ها بکار برد. شبکه عصبی مصنوعی مدل ریاضی از شبکه عصبی بیولوژیک است [۹][۱۰].

۵-۱- ساختمان شبکه‌های عصبی

یک شبکه عصبی از تعدادی سلول که در لایه‌های متوالی قرار گرفته‌اند تشکیل شده است. اساساً در این شبکه‌ها سه نوع لایه از جمله یک لایه ورودی (که به عنوان ظرفیتی جهت دریافت مقادیر ورودی شبکه عمل می‌کند)، یک یا چند لایه میانی و یک لایه خروجی وجود دارد (شکل ۱). تعداد سلول‌های موجود در لایه‌های ورودی و خروجی بر اساس تعداد عوامل ورودی و خروجی سیستم و تعداد سلول لایه‌های میانی با توجه به پیچیدگی مسئله به صورت تجربی تعیین می‌گردد. بر اساس نحوه ارتباط سلول‌های موجود در یک شبکه با یکدیگر، شبکه‌های عصبی دارای انواع مختلفی می‌باشند. اتصالات موجود بین لایه‌ها دارای وزن‌های قابل تغییر می‌باشند که ابتدا به صورت تصادفی مقداردهی و در طول فرآیند یادگیری با کاهش دادن میزان خطای شبکه اصلاح و مقادیر نهایی آن‌ها تعیین می‌شوند. شکل (۱) ساختمان یک سلول را نشان می‌دهد این سلول‌ها را واحد پردازش کننده می‌نامند.



شکل ۱: ساختمان یک سلول با چند ورودی [۱۰]

در این مسئله خاص، ابتدا پارامترهای تخلخل، وزن

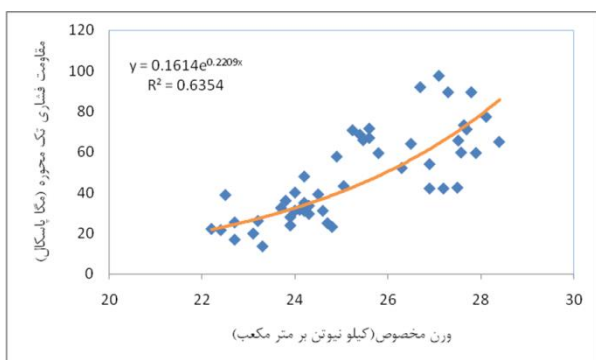
۷-۲- ارتباط بین مقاومت فشاری تک محوری و وزن مخصوص

از اطلاعات به دست آمده از آزمایش‌های تک‌محوره و تعیین پارامتر وزن مخصوص، ارتباط غیرخطی بین دو پارامتر مقاومت فشاری تک‌محوره و وزن مخصوص به دست آمده است. با توجه به داده‌های به دست آمده از آزمایش، مشاهده می‌شود که وزن مخصوص بیشتر در محدوده ۲۳ تا ۲۸ کیلونیوتن بر مترمکعب قرار دارد. رابطه بین این دو پارامتر در شکل (۳) نشان داده شده و به صورت زیر است:

$$\sigma_c = 0.1614e^{0.2209\gamma} \quad (3)$$

که در آن:

σ_c مقاومت فشاری تک محوری بر حسب مگاپاسکال و γ ، وزن مخصوص بر حسب کیلو نیوتن بر مترمکعب است. همان‌گونه که از شکل ۳ پیدا است رابطه مقاومت فشاری تک محوری با وزن مخصوص یک رابطه غیرخطی است و با افزایش وزن مخصوص، مقاومت فشاری تک محوری افزایش می‌یابد و ضریب همبستگی در این معادله 0.6354 است ($R^2 = 0.6354$).



شکل ۳: رابطه بین مقاومت فشاری تک محوری و وزن مخصوص

۷-۳- ارتباط بین مقاومت فشاری تک محوری و اندیس بار نقطه‌ای

با استفاده از اطلاعات به دست آمده از آزمایش‌های تک‌محوره و بار نقطه‌ای، ارتباط غیرخطی بین این دو پارامتر به دست آمده است. شکل ۴ تغییرات مقاومت فشاری تک محوری را نسبت به اندیس بار نقطه‌ای نشان می‌دهد. این رابطه به صورت زیر است:

$$\sigma_c = 10e^{0.3625I_s} \quad (4)$$

که در آن:

σ_c مقاومت فشاری تک محوری بر حسب مگاپاسکال و I_s ، اندیس بار نقطه‌ای بر حسب مگا پاسکال است. ضریب

۷-۴- تعیین ارتباط بین مقاومت فشاری تک‌محوره و پارامترهای تخلخل، وزن مخصوص و اندیس بار نقطه‌ای

بر اساس داده‌های حاصل از آزمایش‌های فشاری تک محوری، تخلخل، وزن مخصوص و اندیس بار نقطه‌ای، یک بانک اطلاعاتی از این داده‌ها حاصل شد. لازم به ذکر است که تعداد نمونه‌های تهیه شده جهت انجام آزمایش‌های مختلف ۶۰ مورد بوده که از سنگ‌های منطقه مورد مطالعه تهیه شده‌اند. باید توجه داشت که بر روی هر نمونه، هر چهار آزمایش انجام شده است. سپس ارتباط بین مقاومت فشاری تک محوری و دیگر پارامترهای ذکر شده بررسی شده که نتایج به شرح زیر است.

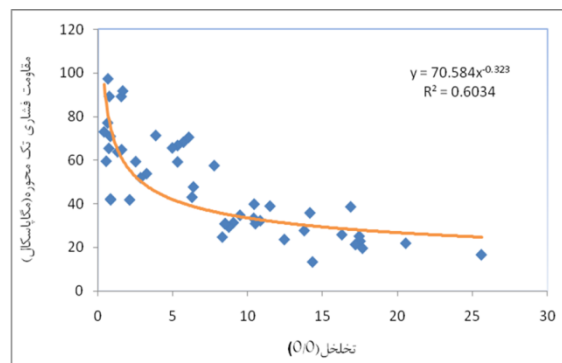
۷-۱- ارتباط بین مقاومت فشاری تک محوری و تخلخل

برای تعیین ارتباط بین مقاومت فشاری و تخلخل، بر روی نمونه‌های تهیه شده دو آزمایش فشاری تک محوری و آزمایش تخلخل طبق استاندارد ASTM انجام شد که با استفاده از این اطلاعات، مطابق شکل ۲ رابطه بین مقاومت فشار تک محوری و تخلخل تعیین گردید. شکل این رابطه به صورت زیر است:

$$\sigma_c = 70.584n^{-0.323} \quad (2)$$

که در آن:

σ_c مقاومت فشاری تک محوری بر حسب مگاپاسکال و n ، مقدار تخلخل بر حسب درصد است. همان‌گونه که از شکل ۲ مشخص است رابطه مقاومت فشاری تک محوری با تخلخل یک رابطه غیرخطی است. محدوده مقاومت فشاری تک محوری نمونه‌ها ۲۰ تا ۱۰۰ مگا پاسکال و میزان تخلخل در برخی موارد به بیش از ۲۰ درصد می‌رسد ولی بیشتر پراکندگی بین ۲ تا ۱۲ درصد است. ضریب همبستگی در این معادله 0.6034 است ($R^2 = 0.6034$).



شکل ۲: رابطه بین مقاومت فشار تک محوری و تخلخل

خطای حداقل به دست آمد سپس یک رابطه کلی به صورت معادله ۴ ارائه گردید.

$$\sigma_c = 2.752 n^{-0.323} + 0.0323 e^{0.2209\gamma} + 7.8 e^{0.3625I_s} \quad (5)$$

که در رابطه فوق:

σ_c مقاومت فشاری تک محوری بر حسب مگاپاسکال

n تخلخل بر حسب درصد

γ وزن مخصوص سنگ بر حسب کیلونیوتن بر مترمکعب

اندیس بار نقطه‌ای بر حسب مگاپاسکال

بخش‌های اصلی معادله همان روابط قبلی هستند که به طور جداگانه بین مقاومت فشاری تک‌محوره و دیگر پارامترها و با استفاده از روش رگرسیون غیرخطی حاصل شده است و در معادلات (۲)، (۳) و (۴) آمده است. با استفاده از شبکه عصبی میزان تأثیر هر یک از روابط همان ضرایب معادلات غیرخطی در معادله (۵)، تعیین شده است که برای تخلخل، وزن مخصوص و اندیس بار نقطه‌ای به ترتیب ۲/۷۵۲، ۰/۳۲۳ و ۷/۸ است.

۹- نتیجه‌گیری

با استفاده از اطلاعات حاصل از آزمایش‌های انجام شده بر روی نمونه سنگ‌های مختلف در منطقه ایران مرکزی و به طور خاص بافق، نتایج زیر حاصل شده است.

با افزایش تخلخل، روند کاهش مقاومت فشاری تک محوری نمونه‌ها مشاهده می‌شود.

افزایش اندیس بار نقطه‌ای با افزایش مقاومت فشاری تک محوری نمونه‌ها همراه است که یک رابطه غیرخطی دارد.

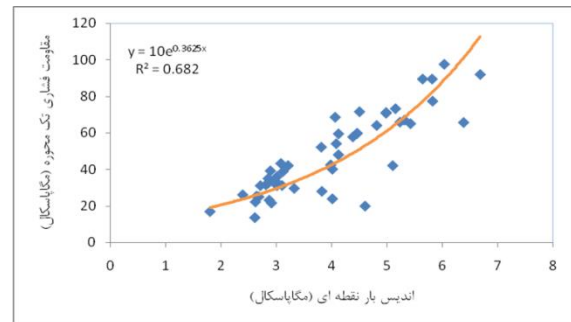
محدوده تغییرات وزن مخصوص نمونه‌ها زیاد نیست و با توجه به ضریب این پارامتر، تغییرات این پارامتر در رابطه ارائه شده نسبت به دو پارامتر دیگر کمتر است.

با توجه به رابطه ارائه شده، تأثیر مثبت مقادیر اندیس بار نقطه‌ای و وزن مخصوص در مقاومت فشاری تک محوری مشاهده می‌شود. همچنین مشاهده می‌شود که تخلخل تأثیر منفی در مقاومت فشاری تک محوری دارد.

با توجه به اینکه دو پارامتر وزن مخصوص و اندیس بار نقطه‌ای ارتباط مشابهی با مقاومت فشاری تک محوری دارند، با مقایسه ضرایب این پارامترها در معادله (۵) می‌توان چنین استنباط کرد که تغییرات در اندیس بار نقطه‌ای می‌تواند تأثیرگذاری بیشتری در تغییرات مقاومت فشاری تک محوری داشته باشد که این تأثیر در ضریب معادله غیرخطی و نیز در

همبستگی در این معادله ۰/۶۸۲ است ($R^2 = 0.682$).

همان گونه که از شکل ۴ مشخص است با افزایش اندیس بار نقطه‌ای، مقاومت فشاری تک‌محوره افزایش پیدا می‌کند. البته باید توجه داشت که این دو پارامتر هر دو معرف مقاومت سنگ هستند و وضعیت پراکندگی داده‌ها نیز نشان‌دهنده این حالت است.



شکل ۴: رابطه بین مقاومت فشار تک محوری و اندیس بار نقطه‌ای

۸- رابطه بین مقاومت فشاری تک‌محوره و پارامترهای تخلخل، وزن مخصوص و اندیس بار نقطه‌ای با استفاده از شبکه عصبی

در این مرحله بعد از تعیین ارتباط بین پارامترهای ذکر شده به روش رگرسیون غیرخطی، یک ارتباط کلی بین این پارامترها تعیین می‌شود، که برای این کار از شبکه عصبی برای استفاده شد. شبکه مورد استفاده، یک شبکه تک لایه بوده و پارامترهای تخلخل، وزن مخصوص و اندیس بار نقطه‌ای به عنوان ورودی شبکه و مقاومت فشاری تک‌محوره به عنوان خروجی در نظر گرفته شد. با مقایسه داده‌های واقعی و نتایج خروجی مشاهده گردید که شبکه مذکور دارای خطای زیاد است. مطابق آنچه در قسمت‌های قبل آمده است و بر اساس روش‌های آماری، ارتباط مقاومت فشاری تک محوری با هر یک از پارامترهای مورد نظر به طور جداگانه بررسی و نوع رابطه مشخص گردید. سپس نسبت به آموزش شبکه عصبی و محاسبه خطا اقدام شد. در این شبکه، ارتباط مقاومت فشاری تک محوری با سه پارامتر تخلخل، وزن مخصوص و اندیس بار نقطه‌ای همان روابط قبلی در نظر گرفته می‌شود. در مرحله آموزش الگوریتم یادگیری از الگوریتم جستجو استفاده شد به گونه‌ای که محدوده هر یک از ضرایب به فاصله‌های بسیار کوچک تقسیم شده و سپس نسبت به اصلاح وزن‌ها اقدام نموده به گونه‌ای که خروجی نسبت به جواب واقعی خطای کمتری داشته باشد این اصل به عنوان جستجوی هوشمندانه در الگوریتم جستجو مد نظر قرار گرفت و وزن‌ها بر اساس

ضریب وزنی محاسبه شده توسط شبکه عصبی مشاهده می‌شود.

۱۰- مراجع

[1] K. Diamantis , E. Gartzos, G. Migiros; 1996; "Study on uniaxial compressive strength, point load strength index, dynamic and physical properties of serpentinites from Central Greece: Test results and empirical relations" Engineering Geology.

[۲] اورکی ، محمد ؛ رحیمی، بهروز؛ (۱۳۸۲)؛ "به دست آوردن ضریب تبدیل بار نقطه‌ای به مقاومت فشاری با استفاده از شبکه عصبی در معدن گل گهر"، سومین کنفرانس مکانیک سنگ ایران.

[۳] فهیمی فر، احمد؛ سروش، حامد؛ (۱۳۸۰)؛ " آزمایش‌های مکانیک سنگ"؛ انتشارات دانشگاه امیرکبیر.

[4] Chandong Chang, Mark D.Zoback, Abbas Khaksar; 2006; "Empirical relation between rock strength and physical properties in sedimentary rocks", Journal of Petroleum Science & Engineering.

[5] S. Kahraman; 2001; "Evaluation of simple methods for assessing the uniaxial compressive strength of rock"; International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 38.

[6] Engin C. Koncagu È., Paul M. Santi; 1999; "Predicting the unconfined compressive strength of the Breathittshale using slake durability, Shore hardness and rock structural properties", International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences.

[7] A. S.Tawadrous, D. De Gagne, M. Pierce and D. Mas Ivars; 2009; "Prediction of uniaxial compression PFC3D model micro-properties using artificial neural networks", Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech.

[۸] کاوشگران؛ (۱۳۷۰)؛ "گزارش زمین‌شناسی منطقه بافق".

[۹] جورابیان، محمود؛ (۱۳۸۴)؛ " شبکه‌های عصبی مصنوعی"؛

انتشارات دانشگاه شهید چمران اهواز.