نشریه بین المللی علوم مهندسی دانشگاه علم وصنعت ایران
ویژه‌نامه مهندسی مواد، معدن و عمران، جلد ۱۹، شماره ۹، سال ۱۳۸۷، صفحه ۲۴-۱۷

PREDICTION OF THE SHEAR STRENGTH OF INFILLED ROCK JOINTS USING ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS AND COMPARISON WITH EMPIRICAL MODELS

Zare Naghadehi, M.
Author is a PhD Student at the Faculty of Mining, Petroleum & Geophysics, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran.
mzare@tus.ac.ir

Kakaie, R.
Author is Associate Professor at the same Faculty
r_kakaie@shahroodut.ac.ir

Ataei, M.
Author is Associate Professor at the same Facult:
ataei@shahroodut.ac.ir

Torabi, S.R.
Author is Associate Professor at the Faculty of Engineering, Tarbiat Modarres University, Tehran, Iran
rtorabi2@yahoo.com

***Abstract**: Determination of the mechanical parameters of rock joints and mainly the influence of infill material of joints on the shear strength of discontinuous media has a great importance. For achieving this goal, till many researches have conducted on the simulated models with the use of physical modeling and laboratory testing. However, many of them are rather unemployable for some reasons such as different conditions of the surface and underground environments. Accordingly, in this paper an exact model has been developed for prediction of the shear strength of in filled rock joints using surface sampling of natural joints, numerous direct shear tests in different filling conditions and finally by utilization of the artificial neural networks. In order to increase the network accuracy, kinds of filling materials separated and a network with two hidden layers has been developed for each kind. The comparison of the results with empirical models demonstrated that these networks have better capability in prediction of the parameter in question.*

پیش‌بینی مقاومت برشی درزه‌های سنگی پرشده با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی و مقایسه با مدل‌های تجربی

مسعود زارع نقدهی، رضا کاکایی، محمد عطایی و سیدرحمان ترابی

چکیده: تعیین پارامترهای مکانیکی درزه‌های سنگی و از میان آن‌ها تاثیر پرکنندهٔ درزه‌ها بر مقاومت برشی محیط‌های ناپیوسته از اهمیت بسزائی برخوردار است. برای دستیابی به این هدف، تاکنون تحقیقات بسیاری به کمک مدل‌سازی فیزیکی و انجام آزمایش‌های مختلف بر روی مدل‌های مصنوعی ساخته شده در آزمایشگاه انجام شده است. ولی به دلیل عواملی نظیر تفاوت خصوصیات سنگ‌ها در مناطق مختلف و شرایط گوناگون سطحی و زیرزمینی نمی‌توان از نتایج آن‌ها با اطمینان بالا استفاده کرد. بدین منظور در این مقاله با انجام نمونه‌برداری‌های سطحی از درزه‌های سنگی طبیعی و

تاریخ وصول: ۸۶/۴/۱۰
تاریخ تصویب: ۸۷/۹/۱

مسعود زارع نقدهی، دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود. mzare@tus.ac.ir
دکتر رضا کاکایی، دانشیار، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود. r_kakaie@shahroodut.ac.ir
دکتر محمد عطایی، دانشیار، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود. ataei@shahroodut.ac.ir
دکتر سیدرحمان ترابی، دانشیار، دانشکده فنی- مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس تهران. rtorabi2@yahoo.com

Archive of SID
www.SID.ir

آزمایش‌های برش مستقیم متعدد در شرایط مختلف پرشدگی از نظر جنس و دانه‌بندی و در نهایت استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی، مدلی دقیق برای پیش‌بینی مقاومت برشی درزه‌های پرشده ارائه شده است. به منظور افزایش دقت شبکه‌ها، نوع پرکننده‌ها تفکیک شده و برای هر نوع، یک شبکه مجزا با دو لایه پنهان ساخته شده است. مقایسهٔ نتایج به دست آمده از شبکه‌های عصبی با مدل‌های تجربی معروف نشان داد که این شبکه‌ها از قابلیت بالاتری در پیش‌بینی پارامتر یاد شده برخوردارند.

واژه‌های کلیدی: مقاومت برشی، درزه‌های سنگی پرشده، شبکه‌های عصبی، مدل‌های تجربی

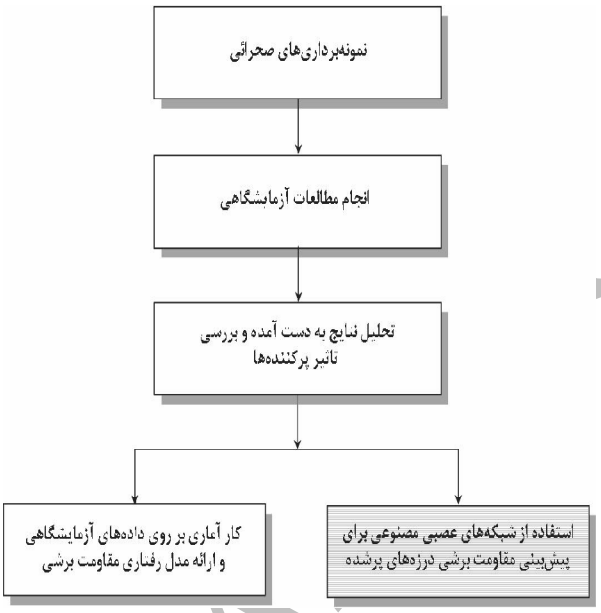
۱. مقدمه

روش معمول در طراحی سازه‌های سنگی و تحلیل پایداری توده‌های سنگی اغلب با موقعیت‌سنجی، برداشت و به نقشه در آوردن ناپیوستگی‌های موجود و ارزیابی مقاومت و رفتار تغییرشکل پذیری آن‌ها آغاز می‌شود. تعیین پارامترهای مکانیکی درزه‌های سنگی صرفاً نه یک مسئلهٔ تحلیلی بلکه مستلزم کارهای تجربی است که بایستی به صورت سازمان‌یافته و گسترده انجام پذیرد. در این میان می‌توان از پرکنندهٔ درزه‌ها به عنوان یکی از موثرترین پارامترها یاد کرد که مطالعهٔ نحوهٔ تأثیر آن از اهمیت وافری برخوردار است. تاکنون تلاش‌های بسیاری به منظور ارائهٔ یک مدل جامع و کاربردی برای تخمین و پیش‌بینی مقاومت برشی درزه‌های پرشده انجام شده است.

برای دستیابی به این هدف، تحقیقات بسیاری به کمک مدل‌سازی فیزیکی و انجام آزمایش‌های مختلف بر روی مدل‌های مصنوعی ساخته شده از مواد مختلف و سنگ‌ها با زبری‌های ایجاد شده در آزمایشگاه (مانند سطوح زبر دندانه اره‌ای و سطوح صاف و صفحه‌ای) انجام شده است. ولی معیاری که بتواند از دقت کافی برخوردار بوده و مقبولیت عمومی را کسب کند و نیز در تمام موارد قابل استفاده باشد، تاکنون ارائه نشده است. علت این امر تفاوت خصوصیات سنگ‌ها در مناطق مختلف و شرایط گوناگون سطحی و زیرزمینی می‌باشد.

لذا به دست آوردن مدلی جامع، عام و قابل کاربرد در تمام شرایط نسبتاً غیرممکن به نظر می‌رسد. به همین دلیل، شبکه‌های عصبی مصنوعی با توجه به سابقه موفقیت‌آمیز آن‌ها در علوم مرتبط با مهندسی سنگ [۱،۲،۳،۴،۵،۶،۷] به عنوان روشی مناسب برای حل مشکل یاد شده انتخاب شدند. در این مقاله سعی شده است با استفاده از ساخت یک شبکه عصبی با مشخصاتی متناسب با نوع و تعداد ورودی‌ها، مقاومت برشی درزه‌های سنگی پرشده تخمین زده شود.

همچنین روابط تجربی بررسی شده و نتایج دو روش مقایسه شده است. قابل ذکر است که مقالهٔ حاضر، بخش دوم از یک تحقیق جامع به منظور مطالعه و بررسی آزمایشگاهی و آماری تاثیر پرکننده‌ها بر رفتار برشی درزه‌های سنگی با هدف ارائه یک مدل تجربی جدید [۸] بوده که در تحقیق اخیر از داده‌های به دست آمده در آن (به جز داده‌های استفاده شده در ساخت مدل تجربی) بهره گرفته شده است. همچنین از مدل تجربی یاد شده نیز در مقایسه‌ها استفاده شده است. شکل ۱ فلوچارت کلی تحقیق مذکور را نشان می‌دهد که بخش مربوط به این مقاله در آن به صورت پررنگ مشخص شده است.



شکل ۱. فلوچارت کلی تحقیق جامع به منظور مطالعه و پیش‌بینی تاثیر پرکننده‌ها بر مقاومت برشی درزه‌های سنگی

۲. مقاومت برشی درزه‌های پرشده

وجود درزه‌ها می‌تواند به طور قابل ملاحظه‌ای بر رفتار مکانیکی توده‌های سنگی تأثیرگذار باشد. در واقع مهم‌ترین عاملی که در توده‌سنگ باعث کاهش مقاومت و افزایش تغییرشکل پذیری می‌شود وجود درزه‌هاست. این عامل در شناخت و طبقه‌بندی توده‌سنگ اهمیتی بیشتر از مقاومت و خصوصیات سنگ سالم دارد، به طوری که در شناخت توده‌سنگ، ویژگی‌های گوناگون درزه‌ها از جمله زبری، امتداد، فاصلهٔ درزه‌ها از یکدیگر، نوع پرشدگی و رطوبت

Archive of SID

www.SID.ir

از موارد مهم در طبقه‌بندی به شمار می‌روند. هندسهٔ سطح یک درزه (زبری سطح درزه) از اهمیت بسزایی در رفتار برشی سنگ‌های درزه‌دار برخوردار است. این اهمیت به دلیل تأثیر فوق‌العادهٔ زبری در به وجود آمدن اتساع یا جابجایی عمودی و به تبع آن در مقاومت ناپیوستگی طی جابجایی افقی می‌باشد. شاید بتوان موثرترین عامل پس از زبری را حضور پرکننده‌ها در بین صفحات درزه‌ها عنوان کرد [۹]. وجود مصالح پرکنندهٔ نرم می‌تواند اثرات نامطلوبی بر مقاومت برشی و نیز سختی برشی درزه داشته باشد. همچنین عواملی چون مقاومت فشاری تک محوری سنگ بکر و ماده پرکننده، ضخامت پرکننده و میزان ناهمواری و تموج درزه نیز در مقاومت برشی درزه‌های پرشده موثر هستند. در ادامه، مطالعات آزمایشگاهی انجام شده بر روی تاثیر پرکننده‌ها بر مقاومت برشی درزه‌ها تشریح می‌گردند.

۳. اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی و داده‌های اولیه

در ابتدا چند منطقه به عنوان مناطق مورد نظر اولیه انتخاب شده و پس از انجام مشاهدات و بازدیدهای صحرائی از این مناطق، شیب‌های سنگی جادهٔ خوش‌ییلاق واقع در جاده ارتباطی شاهرود- آزادشهر به عنوان منطقهٔ نمونه‌برداری اصلی انتخاب شد. سپس نمونه‌برداری با تعداد بالا از این منطقه انجام گردید.

پس از آماده‌سازی نمونه‌ها و برش آن‌ها به ابعاد مورد نظر (محدودهٔ ابعاد ۶×۶ تا ۷×۷ سانتی‌متر مربع)، مطالعات آزمایشگاهی شروع شد. آزمایش‌های مربوطه تماماً در آزمایشگاه مکانیک سنگ دانشگاه صنعتی شاهرود انجام شد. در این مرحله، ابتدا برای تمام نمونه‌ها ضریب زبری سطح درزه محاسبه شد که بدین منظور از آزمایش کجی (آزمایش سنجش ضریب اصطکاک داخلی و ضریب زبری سطح درزه با استفاده از سطح شیب‌دار قابل کنترل[۲]) و سختی اشمیت استفاده گردید. این آزمایش‌ها به تعداد زیاد انجام شد تا دقت در محاسبهٔ ضریب زبری درزه‌ها بالا باشد. سپس نمونه‌هایی که از نظر میزان ضریب زبری در محدودهٔ خاصی قرار می‌گرفتند، انتخاب شده و بقیهٔ نمونه‌ها حذف شدند. خاک پرکنندهٔ درزه‌ها نیز از خود منطقهٔ نمونه‌برداری برداشت شد. خاک مذکور به سه قسمت مجزا (از روی دانه‌بندی و با توجه به مش موردنیاز) که شامل ماسه (ابعاد ۰/۰۶ تا ۲ میلی‌متر)، رس (ابعاد کمتر از ۰/۰۶ میلی‌متر) و مخلوط ماسه و رس (طبیعی) بود، تقسیم شد. سپس مقاومت برشی هر سه قسمت جداگانه به دست آمد. پس از اضافه کردن مواد پرکننده با ضخامت‌های مختلف به سطوح درزه‌های مورد نظر، نمونه‌ها در جعبه برش قرار گرفته و تحت بارهای عمودی مختلف آزمایش شدند. بخشی از نتایج آزمایش‌های مذکور برای پرکننده رسی به طور نمونه در جدول ۱ آورده شده است. در این جدول، σ_n بار قائم وارد بر درزه بر حسب مگاپاسکال، t/a نسبت ضخامت پرکننده به ارتفاع متوسط دندانه‌ها (ناهمواری‌ها) و τ_p مقاومت برشی حداکثر درزه پرشده بر بر حسب مگاپاسکال می‌باشد.

[2] *Tilt Test Apparatus*

۴. پیش‌بینی مقاومت برشی درزه‌های حاوی پرکننده با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی

۴-۱. مبانی شبکه‌های عصبی

دیرزمانی است که بشر در پی یافتن روشی جهت شبیه‌سازی عملکرد مغز انسان در قالب یک سیستم مصنوعی می‌باشد. این امر سبب انجام پژوهش‌های بسیاری در این زمینه شده است که شبکه‌های عصبی مصنوعی حاصل آن است. شبکه‌های عصبی برای اولین بار توسط اندرسون معرفی شدند [۱۰]. چنین شبکه‌ای یک سیستم پویا و غیرخطی است که از تعداد زیادی واحد پردازش (نرون[۳]) و اتصالات بین واحدهای پردازش تشکیل می‌شود. شبکه عصبی برای حل مسائل سه مرحله را طی می‌کند:

الف: آموزش[۴]،

ب: ارزیابی[۵]،

پ: اجرا[۶]. آموزش فرایندی است که طی آن شبکه می‌آموزد تا الگوی موجود در ورودی‌ها را (که به صورت مجموعه داده‌های آموزشی است) بشناسد. برای این منظور هر شبکه عصبی از مجموعه‌ای از قوانین یادگیری که نحوه یادگیری را تعریف می‌کنند استفاده می‌کند. ارزیابی، توانایی شبکه را برای ارائه جواب قابل قبول در قبال ورودی‌هایی که در مجموعه آموزشی نبوده‌اند، می‌سنجد. به استفاده از شبکه برای انجام عملکردی که به آن منظور طراحی شده است، اجرا گفته می‌شود. شبکه‌های عصبی از یک سری واحدهای ساختاری اولیه تشکیل می‌شوند که آن‌ها را سلول عصبی یا گره[۷] می‌نامند. هر سلول عصبی دارای چندین ورودی است. بدنه سلول عصبی از دو بخش تشکیل شده است. تابع ترکیب[۸] در اولین بخش قرار دارد. وظیفه تابع ترکیب این است که تمام ورودی‌ها را ترکیب و یک عدد تولید کند. بخش دوم سلول عصبی نیز که تابع انتقال[۹] نام دارد، مقدار تابع ترکیب را به خروجی سلول تبدیل می‌کند [۱۱]. شبکه‌های عصبی ساختار لایه‌ای دارند. اولین لایه، لایهٔ ورودی و لایهٔ آخر، لایهٔ خروجی است. داده‌ها در سلول‌های لایهٔ ورودی جای می‌گیرند. این لایه صرفاً داده‌های ورودی را در قسمت خروجی خود کپی می‌کند. به جز لایهٔ ورودی تمام لایه‌های دیگر شبکه عصبی در کار پردازش شرکت می‌کنند و در نهایت خروجی به دست می‌آید. لایه‌های بین لایه ورودی و خروجی را لایه‌های داخلی

[3] *Neuron*
[4] *Training*
[5] *Validation*
[6] *Operation*
[7] *Node*
[8] *Combination function*
[9] *Transfer function*

Archive of SID

www.SID.ir

یا پنهان[10] می‌نامند. اگر شبکه دارای m گره در لایهٔ ورودی، n_1 گره در لایهٔ پنهان اول، n_2 گره در لایهٔ پنهان دوم و p گره در لایهٔ خروجی باشد، آن را به صورت mn_1n_2p نشان می‌دهند. شبکهٔ استفاده شده در این مطالعه از نوع تغذیهٔ پیشرو[11] است، بدین معنی که تنها یک جریان یک‌طرفه از لایهٔ ورودی به سمت لایهٔ خروجی وجود دارد و هیچ مسیر برگشتی موجود نیست. این نوع شبکه ساده‌ترین و پرکاربردترین نوع شبکه عصبی است و برای مسائل تخمین بسیار مناسب می‌باشد [۱۲].

جدول ۱. بخشی از نتایج آزمایش‌های مقاومت برشی درزه‌ها برای پرکننده رسی

σ_n (MPa)	t/a	τ_p (MPa)
0.25	0.0	0.45
	0.2	0.35
	0.4	0.3
	0.6	0.25
	0.8	0.2
	1.0	0.15
	1.2	0.13
	1.4	0.1
	1.6	0.1
0.50	0.0	0.6
	0.2	0.5
	0.4	0.45
	0.6	0.4
	0.8	0.35
	1.0	0.25
	1.2	0.2
	1.4	0.15
	1.6	0.15
0.75	0.0	0.8
	0.2	0.65
	0.4	0.55
	0.6	0.5
	0.8	0.4
	1.0	0.35
	1.2	0.25
	1.4	0.2
	1.6	0.2
1.0	0.0	0.95
	0.2	0.8
	0.4	0.75
	0.6	0.7
	0.8	0.6
	1.0	0.45
	1.2	0.35
	1.4	0.25
	1.6	0.25

[10] *Hidden layers*
[11] *Feed-forward networks*

۲-۴. ساخت، آموزش و استفاده از شبکه برای مسئلهٔ مورد نظر

به منظور انجام پیش‌بینی‌ها، پارامترهای بار قائم وارد بر درزه (σ_n) بر حسب مگاپاسکال و ضخامت نسبی پرکننده موجود در سطح درزه (t/a) به عنوان ورودی‌های شبکه عصبی در نظر گرفته شدند. خروجی شبکه مقاومت برشی بی‌بعد شدهٔ درزهٔ پرشده است. مقاومت برشی درزهٔ پرشده بر حسب مگاپاسکال به وسیله بار نرمال واردهٔ اولیه بی‌بعد شده است. برای آموزش و ارزیابی شبکه از بانک اطلاعاتی ایجاد شده از نتایج کل تست‌های آزمایشگاهی استفاده شده است. به منظور پی بردن شبکه به اهمیت داده‌های نادر، این قبیل داده‌ها چندین مرتبه به شبکه ارائه می‌شوند. به این منظور، فراوانی داده‌های نادر در بانک اطلاعاتی اولیه اصلاح شده است. تعداد اعضای بانک اطلاعاتی اصلاح شده ۳۶ عضو است که ۳۲ عضو برای آموزش و ۴ عضو برای ارزیابی یا تست شبکه مورد استفاده قرار می‌گیرند. البته امکان این وجود دارد که در برخی مواقع این تعداد بسته به میزان تکرارها دچار تغییر شود. داده‌های بانک اطلاعاتی به صورت تصادفی به مجموعه‌های آموزش و تست تقسیم شده‌اند. کلیهٔ شبکه‌ها در این تحقیق دارای دو لایهٔ میانی و یک لایهٔ خروجی می‌باشند. توابع انتقال به کار رفته در لایه‌های میانی و خروجی از نوع تابع tansig می‌باشند. چون در فرایند آموزش وزن‌های اولیه به صورت تصادفی مقدار دهی شده و احتمال دارد شبکه در کمینه محلی[12] گرفتار شود، هر شبکه چندین بار (۲۰ بار) مورد آموزش قرار گرفته و بهترین نتیجه ملاک عمل واقع گردیده است. همچنین برای ساخت و آموزش شبکه از الگوریتم trainlm موجود در نرم‌افزار MATLAB استفاده شده است [۱۳]. به دلیل در نظر گرفتن سه نوع مختلف ماده پرکنندهٔ درزه‌ها از نظر جنس و دانه‌بندی (پرکنندهٔ رسی، ماسه‌ای و ماسه- رسی)، سه شبکهٔ متفاوت برای مسئلهٔ مورد نظر ساخته شد. بهترین هندسه برای شبکه مربوط به پرکنندهٔ رسی ۱-۸-۲-۲، پرکنندهٔ ماسه‌ای ۱-۱۴-۲-۲ و برای پرکنندهٔ ماسه- رسی ۱-۸-۶-۲ به دست آمد. سایر مشخصات شبکه‌های عصبی به کار رفته در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲. مشخصات شبکه‌های عصبی به کار رفته برای پیش‌بینی مقاومت برشی درزه‌های پرشده

پارامتر	مقدار
تابع انتقال لایهٔ میانی	لاجستیک (سیگموئیدی)
تابع انتقال لایهٔ خروجی	خطی
نوع تابع خطا	مجذور میانگین مربعات خطاها (RMSE)
خطای مطلوب	۰/۰۰۱
حداکثر تعداد دوره‌های آموزش	۲۰
روش تغییر مقیاس داده‌های ورودی	روش مستقیم به بازه [۱ و ۱-]
روش تغییر مقیاس داده‌های خروجی	روش مستقیم به بازه [۱ و ۱-]

[12] *Local minimum*

Archive of SID

www.SID.ir

به منظور نشان دادن میزان موفقیت در آموزش شبکه‌ها از برخی نمودارها می‌توان استفاده کرد. مقادیر تخمین زده شدهٔ مقاومت برشی توسط شبکه در مقابل مقادیر واقعی آن برای داده‌های ارزیابی در دستگاه‌های مختصات رسم شده است. مقادیر واقعی در محور افقی و مقادیر تخمین زده شده در محور قائم دستگاه مختصات قرار گرفته‌اند. در صورتی که خروجی شبکه با مقادیر واقعی مقاومت برشی برابر باشد، کلیه نقاط بر روی خط Y=X قرار می‌گیرند. میزان انحراف نقاط نسبت به این خط بیانگر میزان تفاوت میان خروجی شبکه و مقادیر واقعی است. این نمودارها برای هر سه شبکه یاد شده و برای داده‌های ارزیابی در شکل ۲ نشان داده شده است.

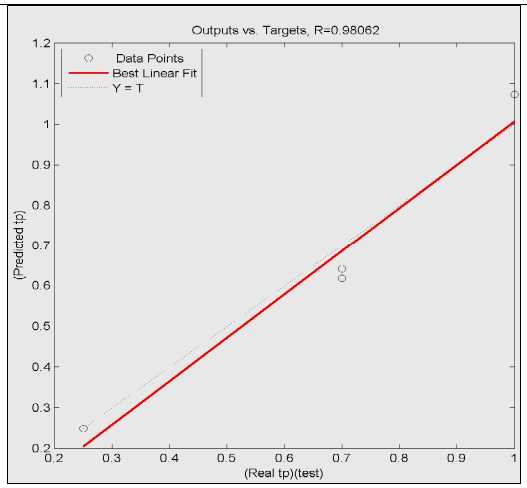
۴-۳. مقایسهٔ نتایج بدست آمده با مدل‌های تجربی

همان گونه که اشاره شد، تلاش‌های بسیاری در قالب ارائه مدل یا معیار تجربی جهت تخمین مقاومت برشی درزه‌های حاوی پرکننده در شرایط مختلف انجام شده است.

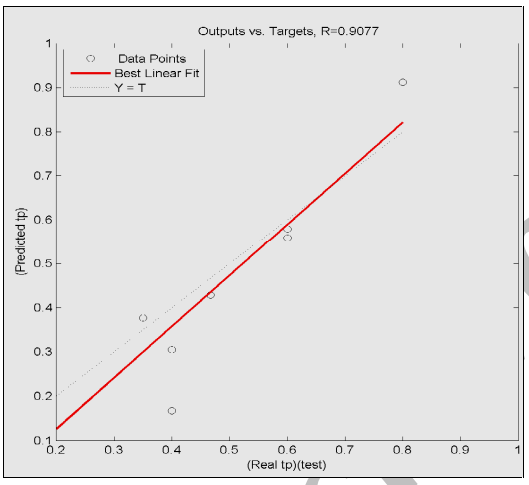
فین وج و همکارانش در سال ۱۹۹۰ برای تعیین مقاومت درزه‌های پرشده یک رابطهٔ تجربی ارائه دادند که بر نتایج آزمایشگاهی استوار بود. آن‌ها خاطر نشان کردند که اگر زوایای ناهمواری‌ها کم باشد، پوش مقاومت برشی خطی بوده و در زوایای ناهمواری بزرگ‌تر دوخطی می‌شود [۱۴]. دتولدو و دفریتاس در سال ۱۹۹۳ بر اساس مشاهدات تجربی، یک مدل کلی برای تعیین مقاومت برشی درزه‌های پرشده با ضخامت‌های پرکنندهٔ مختلف ارائه دادند. آن‌ها رفتار برشی کلی درزه‌های پرشده را به صورت قفل‌شدگی، تداخل و عدم تداخل توصیف کردند [۱۵].

براساس نتایجی که از آزمایش روی درزه‌های مدل‌سازی شده به دست آمد، پاپالیانگاس و همکارانش در سال ۱۹۹۳ مدلی برای تخمین مقاومت برشی درزه‌های پرشده ارائه دادند. طبق این مدل، مقاومت برشی درزه‌های پرشده بین دو حد قرار می‌گیرد؛ τ_{max} که حداکثر مقاومت برشی درزه‌های خالی است و τ_{min} که کمترین مقاومت برشی با ضخامت پرکنندهٔ بحرانی می‌باشد و با تغییر ضخامت، نوع پرکننده، زبری دیوارهٔ سنگی و تنش قائم تغییر می‌کند [۱۶]. ایندراراتنا و ولیدنیا در ۲۰۰۳ رفتار برشی درزه‌های گرافیتی پرشده را به صورت جامع و گسترده مورد مطالعه قرار دادند. در این تحقیقات از دستگاه برش بزرگ مقیاس طراحی شده در سال ۱۹۹۹ استفاده شد [۱۷]. در نهایت ولیدنیا در سال ۲۰۰۵ توانست مدل تخمین مقاومت برشی درزه‌های پرشده را برای معادن زیرزمینی گرافیت سریلانکا ارائه دهد [۱۸].

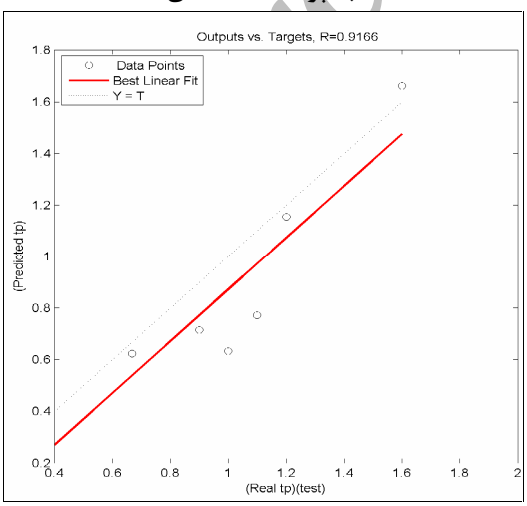
زارع و همکارانش در سال ۲۰۰۸ برای اولین بار با استفاده از درزه‌های سنگی طبیعی و مطالعات آزمایشگاهی و آماری، یک مدل تجربی جدید را برای پیش‌بینی مقاومت برشی درزه‌های پرشده ارائه کردند [۸]. این مدل با در نظر گرفتن پارامترهایی از قبیل زبری سطح درزه، ضخامت پرکننده، ابعاد و مشخصات بلوک سنگی و نیز نوع و خصوصیات پرکننده، مقاومت برشی درزهٔ پرشده را تخمین می‌زند.



الف. پرکنندهٔ رسی



ب. پرکنندهٔ ماسه‌ای



پ. پرکنندهٔ ماسه- رسی

شکل ۲. مقادیر تخمین زده شدهٔ مقاومت برشی در مقابل مقادیر واقعی برای داده‌های ارزیابی

Archive of SID

www.SID.ir

مدل‌های یاد شده از جمله مهم‌ترین آن‌ها بوده و هر یک روابط و معادلات مربوط به خود را دارند که در اینجا از آوردن آن‌ها خودداری شده است.

به منظور مطالعه و ارزیابی نتایج به دست آمده توسط شبکه‌های عصبی ساخته شده، می‌توان از مدل‌های تجربی یاد شده استفاده کرد. در این بخش، دو مدل از میان مدل‌های یاد شده انتخاب و داده‌های مربوط به این تحقیق وارد معادلات مربوط به آن‌ها شده است. در نهایت نتایج به دست آمده با جواب‌های واقعی مقایسه شده و خطاها و ضریب همبستگی میان آن‌ها به دست آمده است. نتایج مقایسه و پارامترهای مربوطه در جداول ۵ و ۶ آمده است.

جدول ۵. نتایج حاصل از کاربرد مدل تجربی فین وج و همکاران بر روی داده‌های اولیه

پارامتر	مقدار
مجذور میانگین مربعات خطاها (RMSE)	۰/۲۶۸
ضریب همبستگی	۰/۶۵

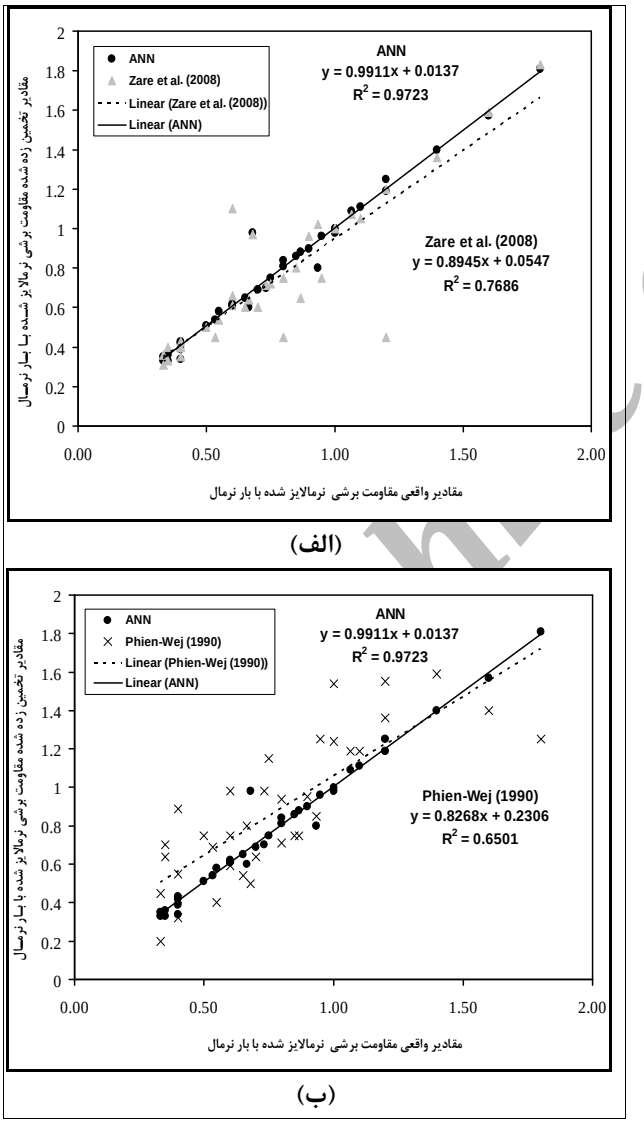
جدول ۶. نتایج حاصل از کاربرد مدل تجربی زارع و همکاران بر روی داده‌های اولیه

پارامتر	پرکننده رسی	پرکننده ماسه‌ای	پرکننده ماسه–رسی
مجذور میانگین مربعات خطاها (RMSE)	۰/۲۲۱	۰/۱۸۴	۰/۲۶۴
ضریب همبستگی	۰/۷۶۹	۰/۸۱۲	۰/۷۴۲

همان طور که مشاهده می‌شود، خطای تخمین‌های شبکه عصبی (با اینکه از داده‌های تقریباً کمی استفاده می‌کند) به مراتب کمتر از روابط تجربی است و این نشان دهنده توانایی زیاد شبکه عصبی است. دارا بودن خاصیت غیرخطی باعث می‌شود که شبکه عصبی رابطهٔ بین پارامترهای ورودی و خروجی را بهتر تشخیص دهد.

شکل ۳ نتایج مقایسه قدرت تخمین مدل‌های تجربی با شبکه عصبی ساخته شده را نشان می‌دهد. همانطور که در این نمودارها نیز دیده می‌شود، نتایج به دست آمده از شبکه عصبی هماهنگی بیشتری نسبت به روابط تجربی مختلف دارند.

مقاومت برشی درزه‌ها به خصوص در هنگام پرشدگی به عوامل بسیاری بستگی دارد که در نظر گرفتن تمامی آن‌ها در مدل‌های تجربی مستلزم محدودیت‌های بسیاری است. همچنین با افزایش تعداد متغیرها، مدل‌های بسیار زیادی را می‌توان پیشنهاد نمود. حذف یا اضافه کردن پارامترهای جدید نیز مستلزم ساخت مدل‌های تجربی جدید است که امری وقت‌گیر و نامطلوب می‌باشد. به جز موارد فوق، روابط تجربی گاهی برازش خوبی ارائه نمی‌دهند، زیرا شکل کلی مدل تقریباً ثابت بوده و در بیشتر اوقات تنها ضرایب آن تغییر داده می‌شوند. به همین دلیل است که بسیاری از روابط تجربی تنها برای یک منطقه کاربرد دارند. شبکه‌های عصبی مشکلات فوق را نداشته و انعطاف‌پذیری آن‌ها موجب می‌شود که در صورت نیاز بتوان هر تعداد عامل را حذف یا اضافه نمود (با انجام تحلیل حساسیت بر روی ورودی‌ها و تاثیر آن‌ها روی خروجی‌ها). همچنین در مورد تعدد ورودی‌ها نیز شبکه‌های عصبی از مشکلات به مراتب کمتری برخوردارند، به طوری که عوامل مختلف تاثیرگذار را می‌توان به راحتی در لایهٔ ورودی شبکه قرار داد [۱۶]. در واقع این یک امتیاز شبکه عصبی است که می‌تواند هر تعداد از عوامل را به عنوان ورودی بپذیرد. بدین ترتیب با صرف هزینه‌ای اندک و اندازه‌گیری پارامترهای موثر می‌توان کمیت‌های مهمی از جمله مقاومت برشی درزه‌ها را در حالات مختلف با دقت بسیار بیشتر به وسیله شبکه عصبی پیش‌بینی نمود.



شکل ۳. مقایسهٔ مقادیر تخمین زده شدهٔ مقاومت برشی درزه‌های پرشده با مدل‌های تجربی زارع (الف) و فین وج (ب)

www.SID.ir

از نتایج این نوع بررسی‌ها (پیش‌بینی مقاومت برشی) می‌توان در انواع پروژه‌های سطحی و پاره‌ای از پروژه‌های زیرزمینی استفاده کرد، بدین صورت که بتوان با اطلاع از شرایط محلی سنگ‌ها و پرشدگی آن‌ها و استفاده از شبکه عصبی ساخته شده، پایداری سازه‌های سنگی را تخمین زد. موارد قابل استفاده در سطح زمین عبارتند از پروژه‌هایی نظیر دیواره‌های سنگی تشکیل شده در پله‌های معادن روباز و ترانشه‌های راه که امکان جابجایی بلوک‌ها و سقوط آن‌ها به پائین وجود دارد که در این موارد به علت احتمال پرشدگی بیشتر در اثر باران‌های موسمی و جریان‌های سطحی، این کاربرد بیشتر نمایان است. همچنین در سازه‌هایی نظیر سدها، ساختمان‌ها و پل‌ها که پی ساختگاه آن‌ها از توده سنگ‌های درزه‌دار تشکیل شده است و یا در دیواره‌ها و سقف تونل‌های زیرزمینی می‌توان از این شبکه و پیش‌بینی‌های آن استفاده نمود.

۴. نتیجه‌گیری

در این مقاله به پیش‌بینی یکی از مهم‌ترین پارامترهای مکانیک سنگی در محیط ناپیوسته با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی پرداخته شد. ذکر این نکته ضروری است که با اینکه سعی شد مهمترین پارامترهای موثر بر مقاومت برشی درزه‌های سنگی پرشده در نظر گرفته شوند، با این حال عواملی همچون تأثیر رطوبت و مقاومت خود ماده پرکننده در مدل‌های پیش‌بینی کننده منظور نشده و این مدل‌ها قادر به در نظر گرفتن چنین پارامترهایی نمی‌باشند. مقایسه نتایج به دست آمده از این روش با نتایج مدل‌ها و روابط تجربی نشان داد که شبکه‌های عصبی قابلیت پیش‌بینی به مراتب بیشتری را نسبت به روش دیگر دارا هستند. مزیت روابط تجربی سادگی و سرعت محاسبات است، در حالی که به دلیل غیر واقعی بودن برخی فرضیات و در نظر نگرفتن بعضی عوامل مهم جواب‌های پرخطا ارائه می‌نمایند. شبکه‌های عصبی به دلیل غیرخطی بودن، انعطاف‌پذیری زیاد، خطای کم و همچنین قابلیت حذف و اضافه نمودن هر تعداد از عوامل بدون نیاز به کار گسترده، قابلیت‌های بسیار بیشتری نسبت به روابط تجربی دارند. با توجه به کاربردهای وسیع و موفقیت آمیز شبکه‌های عصبی در علوم زمین پیشنهاد می‌شود از این تکنیک به منظور پیش‌بینی سایر پارامترهای مکانیک‌سنگی نیز استفاده گردد.

مراجع

[1] Benardos, A.G., Kaliampakos, D.C., "*Modeling TBM Performance with Artificial Neural Networks*", Tunnelling and Underground Space Technology 19. 2004, pp. 597–605.

[2] Ghaboussi, J., "*Potential Applications of Neuro-Biological Computational Models in Geotechnical Engineering*", Proc., Fourth International Symposium on Nmnerical Models in Geomechanics, Swansea, U.K., 1992.

[3] Lee, C., Sterling, R., "*Identifying Probable Failure Modes for Underground Openings Using a Neural Network*", Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. 29 (1), 1992, pp. 49-67.

[4] Nie, X., Zhang, Q., "*Predication of Rock Mechanical Behavior by Artificial Neural Networks, A Comparison with Traditional Method*", 1V CSMR, Integral Approach to Applied Rock Mechanics, Santiago, Chile, 1994, pp. 279-287.

[5] Yang, Y., Zhang, Q., "*A Hierarchical Analysis for Rock Engineering Using Artificial Neural Networks*", Rock Mech. Rock Engng. 30 (4), 1997, pp. 207-222.

[6] Yang, Y., Zhang, Q., "*The Application of Neural Networks to Rock Engineering Systems (RES)*", Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr. 35 (6), 1998, pp. 727-745.

[7] Zhang, Q., "*The Application of Neural Network to Rock Mechanics and Rock Engineering*", Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. 28 (6), 1991, pp. 535-540.

[8] Zare Naghadehi, M., Torabi, S.R., Khalokakaie, R., Jalali S. M. E., "*Investigation of Shear Behavior of Natural Infilled Rock Joints under Constant Normal Load (CNL) Conditions*", Journal of Engineering Geology, In Press.

[9] Indraratna, B., Haque, A., "*Shear Behaviour of Rock Joints*", Balkema (Rotterdam), 2000, l64 pages.

[10] Anderson, J.A., "*Cognitive and Psychological Computation with Neural Models*", IEEE Trans. Systems, Man Cybernet. SMC-13, 1983, pp. 799-815.

[11] Hassoun, M.H., "*Fundamentals of Artificial Neural Networks*", MIT Press, Cambridge, 1995. 140 pages.

[12] Haykin, S., "*Neural Network: A Comprehensive Foundation*", Prentice Hall, 1990, 842 pages.

[13] Demuth, H., Beale, M., "*Neural Network Toolbox for Use with MATLAB*", User's Guide Version 6. 2004.

[14] Phien-wej, N., Shrestha, U.B., Rantucci, G., "*Effect of Infill Thickness on Shear Behavior of Rock Joints*", Rock Joints, Proc. Int. Conf. on Rock Joints, Loen (eds. N. R. Barton & 0. Stephansson). Balkema. (Rotterdam), 1990, pp. 289-294.

[15] DeToledo, P.E.C., DeFreitas, M.H., "*Laboratory Testing and Parameters Controlling the Shear Strength of Filled Rock Joints*", Géotechnique. Vol. 43. No 1. 1993. pp. 1-19.

[16] Papaliangas, T., Hencher, S.R., Lumsden, A.C., Manolopoulou, S., "*The Effect of Frictional Fill Thickness on the Shear Strength of Rock Discontinuities*", Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 30, No. 2. 1993, pp. 81-91.

[17] Indraratna, B., Welideniya, H.S., "*Shear Behaviour of Graphite Infilled Joints Based on Constant Normal Stiffness (CNS) Test Conditions*", Proc. of 10th Int.

Archive of SID

www.SID.ir

Cong. Soc. Rock Mech. Technology roadmap for rock mechanics, Johannesburg, Vol. 1, 2003, pp. 569-574.

[18] Welideniya, H.S., "*Laboratory Evaluation and Modelling of Shear Strength of Infilled Joints under Constant Normal Stiffness (CNS) Conditions*", Ph.D. Thesis. Uinv. of Wollongong. NSW. Australia. 2005, 285 pages.

Archive of SID

www.SID.ir