



برآورد برخی ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی خاک با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی

علی اصغر بسالت پور، محمد علی حاج عباسی و شمس الله ایوبی^۱

^۱به ترتیب دانشجوی دکتری، استاد و دانشیار گروه علوم خاک دانشگاه صنعتی اصفهان

a_besaaltpour@ag.iut.ac.ir

چکیده

شبکه‌های عصبی مصنوعی سیستم‌های یادگیرنده‌ای هستند که در صورت دارا بودن پیچیدگی لازم و نیز نمونه و زمان کافی برای آموزش، می‌توانند هر تابع غیر تصادفی از هر درجه‌ای را مدل کنند. در این پژوهش قابلیت استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی برای مدل سازی برآورد مقاومت برشی خاک و میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها (MWD) با رگرسیون چند متغیره خطی مقایسه شد. برای این منظور از برخی داده‌های زود یافت مؤثر بر این خصوصیات شامل برخی ویژگی‌های توپوگرافی، پوشش گیاهی و خاک استفاده گردید. برای بررسی کارایی دو مدل نیز از برخی شاخص‌های آماری نظیر ضریب همبستگی (r^۲)، میانگین مربعات خطا (MSE) و میانگین خط تخمین (MEE) بین مقادیر اندازه گیری شده و برآورد شده استفاده شد. نتایج نشان داد که مدل‌های شبکه عصبی طراحی شده برای تخمین هر دو پارامتر مورد مطالعه، دارای کارایی بسیار بالاتری نسبت روش‌های رگرسیونی مرسوم بودند. مقادیر MSE و MEE مدل شبکه عصبی طراحی شده برای برآورد مقاومت برشی خاک به ترتیب برابر ۰/۸۹، ۰/۰۶ و ۰/۰۵- بود. این درحالیست که مقدار شاخص ضریب همبستگی برای بهترین مدل رگرسیونی برازش داده شده ۰/۵۱ بود. مقدار ضریب همبستگی بین مقادیر اندازه گیری شده و برآورد شده MWD با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی نیز ۰/۸۹ بود درحالی که مقدار این شاخص برای بهترین مدل رگرسیونی برازش داده شده ۰/۲۵ بود. بنابراین به نظر می‌رسد که بتوان از شبکه‌های عصبی مصنوعی برای برآورد برخی ویژگی‌های خاک در منطقه مورد مطالعه نظیر مقاومت برشی و میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها استفاده نمود.

واژه‌های کلیدی: مقاومت برشی خاک، پایداری خاکدانه‌ها، مدل سازی، شبکه‌های عصبی مصنوعی

۱. مقدمه

خاک به عنوان یک سیستم پویا، همواره تحت تأثیر نیروهای خارجی قرار داشته که این نیروها می‌توانند طبیعی (مانند قطرات باران، رواناب، انسان، گیاهان و جانوران) یا غیر طبیعی (مانند ادوات کشاورزی) باشند. توده خاک تا حد معینی در برابر نیروهای خارجی مقاومت نشان می‌دهد و بیش از آن حد، خاک گسیخته می‌شود. گسیختگی خاک معمولاً از نوع برشی بوده و به حداکثر مقاومتی که خاک در برابر گسیختگی و لغزش در امتداد هر صفحه دلخواه نشان دهد، مقاومت برشی خاک گویند (وفائیان ۱۳۷۶). در بسیاری از مطالعات از مقاومت برشی سطح خاک به عنوان شاخص مناسب برای بررسی فرسایش پذیری خاک نامبرده شده است (فرانتی و همکاران ۱۹۹۹، لئونارد و ریچارد ۲۰۰۴). پایداری خاکدانه‌ها نیز از جمله شاخص‌های کیفیت خاک بوده و یکی از مهمترین عوامل مؤثر بر فرسایش پذیری خاک‌ها است (لی بی سونیا، ۱۹۹۶).

روش‌های مختلفی برای اندازه‌گیری مقاومت برشی خاک و پایداری خاکدانه‌ها وجود دارد. از جمله روش‌های آزمایشگاهی اندازه‌گیری مقاومت برشی خاک می‌توان به آزمایش برش مستقیم، آزمایش تک محوری غیرمحصور (فشاری غیرمحصور) و آزمایش فشردگی سه محوری اشاره نمود. برای اندازه‌گیری مقاومت برشی خاک در مزرعه نیز ممکن است از دستگاه‌هایی نظیر رینگ برشی، پنترومتر مخروطی، پنترومتر جیبی و دستگاه برش وین استفاده شود. از شاخص‌های اندازه‌گیری پایداری خاکدانه‌ها نیز می‌توان به شاخص میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها^۱، رس قابل پراکنش^۲ و

1 mean weight diameter, MWD
2 water dispersible clay, WDC



میانگین هندسی قطر خاکدانه ها^۱ اشاره کرد (کالرو و همکاران ۲۰۰۸). با این وجود بسیاری از این روش‌ها نسبتاً پیچیده و عمدتاً وقت‌گیر و هزینه‌بر بوده و استفاده از آنها در مقیاس‌های بزرگ نظیر حوزه‌های آبخیز با محدودیت‌های فراوان مواجه است. به همین سبب امروزه از روش‌های غیر مستقیم نظیر توابع انتقالی خاک^۲ و توابع پیش‌بینی فضایی خاک^۳ به منظور برآورد این ویژگی‌های استفاده می‌گردد. در این توابع با استفاده از داده‌های زود یافت مانند توزیع اندازه ذرات خاک، ماده آلی و آهک خاک، خواص توپوگرافی (مانند درصد شیب، جهت شیب، ارتفاع) و پوشش گیاهی (نظیر درصد پوشش گیاهی و شاخص‌های مرتبط با آن)، برخی خصوصیات دیر یافت مانند خصوصیات فیزیکی و مکانیکی خاک تخمین زده می‌شوند (خلیل مقدم و همکاران ۲۰۰۹). از جمله روش‌های نوین برای ایجاد توابع انتقالی و توابع پیش‌بینی فضایی خاک، شبکه‌های عصبی مصنوعی^۴ می‌باشند.

شبکه‌های عصبی مصنوعی سیستم‌های یادگیرنده‌ای هستند که در صورت دارا بودن پیچیدگی لازم و نیز نمونه و زمان کافی برای آموزش، می‌توانند هر تابع غیر تصادفی از هر درجه‌ای را مدل کنند. اجزای سازنده شبکه‌های عصبی مصنوعی به عنوان یک مدل از سیستم عصبی موجودات زنده، نرون‌ها هستند. وظیفه هر نرون، انجام نوعی پردازش بر روی سیگنال‌های ورودی و تولید یک خروجی واحد مطلوب است. قبل از ورود هر سیگنال به نرون، سیگنال از فضایی موسوم به فضای سیناپسی عبور می‌کند که در آن عملیات تقویت و یا تضعیف سیگنال صورت می‌گیرد. این فضا در واقع محل ارتباط یک نرون با نرون دیگر است. وظیفه شبکه‌های عصبی این است که طی یک دوره آموزشی، بیاموزند که به ازای هر ورودی، خروجی مطلوب را تولید نمایند. از جمله مهم‌ترین مزایای شبکه‌های عصبی مصنوعی نسبت به رگرسیون‌های چند متغیره در ایجاد توابع انتقالی و توابع پیش‌بینی فضایی خاک آن است که نیاز به یک معادله اولیه برای تعیین ارتباط بین ورودی‌ها و خروجی مطلوب نمی‌باشد (منهاج ۱۳۸۰).

۲. مواد و روش‌ها

۱.۱. منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه بخشی از حوزه آبخیز بازفت (۳۴° ۴۹' تا ۳۲° ۵۰' طول شرقی و ۳۷° ۳۱' تا ۳۹° ۳۲' عرض شمالی) یکی از ۶ زیرحوزه اصلی حوزه آبخیز کارون شمالی بود. نام بازفت برای این حوزه برگرفته از نام رودخانه دایمی آب بازفت با طول تقریبی ۱۴۶ کیلومتر می‌باشد که از بخش شمال غربی حوزه به سمت جنوب شرقی آن جریان دارد. بخش اعظم این حوزه (حدود ۵۰ درصد) کوهستانی بوده که مرتفع‌ترین نقطه آن زردکوه با ارتفاع ۴۲۲۱ متر و ارتفاع متوسط حوزه حدود ۲۲۰۰ متر می‌باشد. شیب متوسط حوزه متغیر و بیشترین آن مربوط به کلاس شیب ۷۰ تا ۷۰ درصد است (معادل ۴۶ درصد از وسعت کل حوزه). حدود ۵۶ درصد از وسعت کل حوزه دارای پوشش مرتعی (عمدتاً دافنه و گون) و بقیه منطقه دارای پوشش جنگلی (عمدتاً بلوط ایرانی، *Quercus persica*) یا عاری از پوشش می‌باشد. متوسط بارش و درجه حرارت سالیانه در حوزه به ترتیب ۵۰۰ تا ۱۴۰۰ میلی‌متر و ۸ تا ۲۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. حوزه آبخیز بازفت در زون شکسته زاگرس قرار داشته و قدیمی‌ترین رخنمون‌های منطقه مربوط به دوران پالئوژئیک زیرین (پرکامبرین) تا دوره‌های فرسایشی و نهشتی کواترنر در قلمرو زاگرس می‌باشند. واحدهای فیزیوگرافی غالب در منطقه بر اساس مطالعات صحرائی و خصوصیات ظاهری خاک‌ها شامل کوه‌ها، تپه‌ها، فلات‌ها و تراس‌ها، دشت‌های دامنه‌ای، دشت‌های آبرفتی و اراضی مخلوط و متفرقه می‌باشند (مهندسین مشاور پارساب ۱۳۷۵).

۲.۲. نمونه‌برداری و اندازه‌گیری ویژگی‌های خاک

منطقه مورد مطالعه ابتدا بر اساس خواص توپوگرافی، زمین‌شناسی و پوشش گیاهی به واحدهای کاری همسان تقسیم گردید. سپس نمونه‌برداری خاک از عمق سطحی (۰ تا ۵ سانتی‌متر) به صورت تصادفی نظارت شده انجام و در کل ۱۶۰ نمونه با در نظر گرفتن سطح هر واحد کاری برداشت گردید. نمونه خاک‌ها پس از انتقال به آزمایشگاه هواخشک و جهت انجام آزمایش‌های خاکشناسی از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شدند. ماده آلی خاک به روش واکلی و بلاک (نلسون و سامرز ۱۹۸۶)، آهک خاک به روش خشتی کردن مواد خشتی شونده با اسید کلریدریک و تیتراسیون با سود (نلسون ۱۹۸۲) تعیین شد. درصد ذرات رس، سیلت و شن به روش پیپت و درصد ذرات شن ریز و شن خیلی ریز با عبور سوسپانسیون آب و خاک به ترتیب از الک‌های به شماره مش ۱۸۰ و ۲۷۰ تعیین شد (جی و بادر ۱۹۸۶). روش ون‌باول (۱۹۵۰) اصلاح شده توسط کمپر و روزنو (۱۹۸۶) برای تعیین میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها (MWD) به عنوان شاخصی از پایداری خاکدانه‌ها استفاده شد. برای اندازه‌گیری مقاومت برشی سطح خاک نیز از دستگاه توروین (مدل BS1377) استفاده شد.

1 geometric mean diameter, GMD

2 pedotransfer functions, PTFs

3 soil spatial prediction functions, SSPFs

4 artificial neural networks, ANNs



۳.۲. تعیین ویژگی‌های توپوگرافی و پوشش گیاهی

برخی خواص توپوگرافی نقاط نمونه برداری نظیر درصد شیب، جهت شیب و ارتفاع با استفاده از نقشه مدل رقومی ارتفاعی^۱ با اندازه ابعاد سلولی ۲۰ متر در ۲۰ متر در محیط نرم افزار ایلویس تعیین شد. شاخص پوشش گیاهی NDVI^۲ نیز به عنوان معیاری از وضعیت پوشش گیاهی نقاط مورد مطالعه استفاده شد. این شاخص از تصویر ماهواره‌ای IRS 2008 با وضوح ۲۴ متر در ۲۴ متر و در محیط نرم افزار ایلویس استخراج گردید.

۴.۲. تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها

پس از اندازه گیری ویژگی‌های خاک و تعیین خصوصیات توپوگرافی و پوشش گیاهی نقاط مورد مطالعه، برخی خصوصیات آماری داده‌ها نظیر حداقل، میانگین، حداکثر، دامنه و انحراف معیار با استفاده از نرم افزار SPSS تعیین شد. سپس به منظور یکسان نمودن ارزش داده‌ها پیش از استفاده در مدل‌سازی با شبکه‌های عصبی و رگرسیون خطی، داده‌ها با استفاده از رابطه ۱ استاندارد شدند:

$$Xn = \left[\left(\frac{Xi - \bar{X}}{X \max - X \min} \right) \times 0.5 \right] + 0.5 \quad (1)$$

در این رابطه Xn داده‌های استاندارد شده، Xi داده‌های مشاهده‌ای، $Xmax$ و $Xmin$ به ترتیب حداکثر و حداقل داده‌های مشاهده‌ای و \bar{X} میانگین داده‌های مشاهده‌ای می‌باشد. این رابطه داده‌ها را در بازه [۰ و ۱] تبدیل می‌کند.

۵.۲. مدل سازی با رگرسیون چند متغیره خطی (MLR)

دو گروه مختلف از ویژگی‌های زود یافت خاک، توپوگرافی و پوشش گیاهی مؤثر بر مقاومت برشی خاک و MWD، به عنوان ورودی برای برآورد این ویژگی‌ها انتخاب شدند (جدول ۱). برای ایجاد مدل رگرسیونی چند متغیره خطی از نرم افزار SPSS استفاده شد.

جدول ۱- متغیرهای ورودی و خروجی مورد استفاده برای ایجاد مدل‌های مختلف رگرسیونی و شبکه عصبی

خروجی	ورودی
مقاومت برشی خاک	رس، سیلت، شن، شن ریز، شن خیلی ریز، ماده آلی، آهک، MWD، NDVI، درصد شیب، جهت شیب و ارتفاع
MWD	رس، ماده آلی، آهک، NDVI و درصد شیب

MWD: میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها، NDVI: شاخص پوشش گیاهی

۶.۲. مدل سازی با شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN)

در هر دو مدل شبکه عصبی طراحی شده برای برآورد مقاومت برشی خاک و MWD، ۶۰ درصد داده‌ها (۹۶ داده) برای آموزش مدل، ۲۰ درصد برای فرایند اعتبارسنجی (۲۳ داده) و ۲۰ درصد باقیمانده به عنوان داده‌های تست مدل استفاده شد. فرایند آموزش مدل در محیط نرم افزار MatLab 7.6 و با استفاده از شبکه عصبی پرسپترون چند لایه^۳ و قاعده آموزش پس انتشار^۴ انجام شد. تعداد نرون‌ها در لایه پنهان و تعداد دور یا اپاک^۵ مناسب به منظور رسیدن به بهترین ساختار شبکه عصبی برای هر مدل با کمترین خطا به روش سعی و خطا تعیین شد.

۶.۲. شاخص‌های ارزیابی مدل‌ها

به منظور بررسی کارایی و دقت دو مدل شبکه عصبی طراحی شده برای برآورد مقاومت برشی خاک و MWD در این پژوهش از برخی شاخص‌های آماری نظیر ضریب همبستگی^(۲)، میانگین مربعات خطا^۶ و میانگین خطای تخمین^۷ استفاده شد.

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [S(xi) - M(xi)]^2 \quad (2)$$

- 1 digital elevation model, DEM
- 2 normalized difference vegetation index
- 3 multilayer perceptron, MLP
- 4 back propagation
- 5 Epoch
- 6 mean square error, MSE
- 7 mean estimation error, MEE



$$MEE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [S(xi) - M(xi)] \quad (3)$$

در این روابط $M(xi)$ و $S(xi)$ به ترتیب مقادیر مشاهده‌ای و برآورد شده و n تعداد کل مشاهدات می‌باشد.

۳. نتایج و بحث

۱.۳. ویژگی‌های خاک، توپوگرافی و پوشش گیاهی

جدول ۲ توصیف آماری ویژگی‌های خاک، توپوگرافی و پوشش گیاهی نقاط مورد مطالعه، استفاده شده برای برآورد مقاومت برشی خاک و MWD را نشان می‌دهد. بر اساس توزیع اندازه ذرات خاک، بافت غالب خاک در منطقه شامل لومی رسی سیلتی، لومی سیلتی، لومی و رسی سیلتی بود. ماده آلی خاک بین ۰/۲۲ تا ۶/۳۳ درصد و آهک خاک به ترتیب دارای حداقل، حداکثر، میانگین و انحراف معیار ۱/۰۰، ۸۰/۶۵، ۲۵/۳۲ و ۲۱/۱۲ درصد بود. مقادیر زیاد آهک خاک در منطقه مورد مطالعه به دلیل وجود مواد مادری مارن غنی از گچ و آهک و وجود افق کلسیک می‌باشد که دارای مقدار زیادی از کربنات‌ها است. پایداری خاکدانه‌ها در منطقه از ۰/۰۳ تا ۱/۴۷ میلی‌متر متغیر بود. تخریب جنگل‌ها و مراتع، تغییر کاربری اراضی به دیم و شخم و شیار اراضی، چرای بی‌رویه و ورود زودهنگام دام به مراتع، قطع درختان و سوزاندن بوته‌ها، شیب زیاد و هدررفت خاک در منطقه به طور مستقیم و غیرمستقیم سبب تخریب خاکدانه‌ها و بنابراین مقادیر کم MWD در برخی از نقاط مورد مطالعه شده است (مهندسی مشاور پارساب ۱۳۷۵).

جدول ۲- توصیف آماری پارامترهای مورد استفاده برای مدل‌سازی مقاومت برشی خاک و MWD

شاخص آماری					پارامتر
انحراف معیار	دامنه	حداکثر	حداقل	میانگین	
۸/۴۲	۴۵/۶۰	۵۳/۶۰	۸/۰۰	۳۱/۰۸	رس (درصد)
۹/۲۸	۶۰/۰۰	۸۱/۶۰	۲۱/۶۰	۴۸/۴۰	سیلت (درصد)
۱۲/۸۱	۶۲/۴۰	۶۵/۶۰	۳/۲۰	۲۰/۵۳	شن (درصد)
۵/۴۵	۲۷/۳۴	۲۸/۰۴	۰/۷۰	۶/۶۵	شن خیلی ریز (درصد)
۳/۳۸	۱۵/۸۴	۱۶/۰۲	۰/۱۸	۴/۱۳	شن ریز (درصد)
۱/۲۹	۶/۱۱	۶/۳۳	۰/۲۲	۲/۵۸	ماده آلی (درصد)
۲۱/۱۲	۷۹/۶۵	۸۰/۶۵	۱/۰۰	۲۵/۳۲	آهک (درصد)
۰/۲۹	۱/۴۵	۱/۴۷	۰/۰۳	۰/۳۷	MWD (میلی متر)
۰/۰۸	۰/۷۸	۰/۴۷	-۰/۳۱	۰/۱۳	NDVI
۱۵/۴۲	۷۷/۵۱	۸۰/۶۱	۳/۱۰	۲۸/۳۱	درصد شیب
۱۰۰/۸۱	۳۴۷/۹۸	۳۶۵/۸۵	۸/۸۷	۱۷۱/۸۲	جهت شیب (رادیان)
۲۹۷/۶۴	۱۷۳۲/۰۰	۲۶۳۹/۰۰	۹۰۷/۰۰	۱۷۱۴/۵۳	ارتفاع (متر)
۱/۱۷	۶/۳۶	۹/۷۰	۳/۳۳	۶/۳۴	مقاومت برشی (کیلو پاسگال)

MWD: میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها، NDVI: شاخص پوشش گیاهی

شاخص NDVI در نقاط نمونه‌برداری از ۰/۳۱- تا ۰/۴۷ متغیر بوده و دارای میانگین و انحراف معیار به ترتیب ۰/۱۳ و ۰/۰۸ بود. شاخص NDVI بیان‌کننده سبزینه گیاهی است که در ارتباط با درصد تابش‌های جذب شده فتوسنتزی بوده و نمایانگر فعالیت کلروفیل در گیاهان است. این شاخص بین ۱- تا ۱ متغیر بوده که افزایش میزان عددی آن بیانگر افزایش درصد پوشش گیاهی سبز سالم می‌باشد و بنابراین سطوح بدون پوشش گیاهی، دارای مقادیر منفی NDVI هستند. درصد شیب در نقاط نمونه‌برداری بین ۳/۱۰ تا ۸۰/۶۱ درصد با میانگین ۲۸/۳۱ درصد متفاوت بود که نمایانگر توپوگرافی شدید در منطقه مورد مطالعه است. جهت شیب دارای میانگین ۱۷۱/۸۲ رادیان و ارتفاع نقاط نمونه‌برداری به ترتیب دارای حداقل، حداکثر،



میانگین و دامنه ۹۰۷/۰۰، ۳۱۳۹/۰۰، ۱۷۱۴/۵۳ و ۱۷۳۲/۰۰ متر بود. مقاومت برشی سطح خاک در منطقه مورد مطالعه تحت تأثیر فعالیت‌هایی همچون چرای بی‌رویه و زود هنگام دام، شخم و شیار در جهت شیب، قطع درختان و بوته‌ها و سله سطحی خاک قرار داشته و مقدار اندازه‌گیری شده آن از ۳/۳۳ تا ۹/۷۰ کیلو پاسکال متغیر بود. تخریب خاکدانه‌ها (به سبب تردد زیاد دام و شخم و شیار)، کاهش کربن آلی خاک و حذف ریشه گیاهان (به سبب چرای بی‌رویه دام و سوزاندن بوته‌ها) از جمله عوامل اصلی کاهش مقاومت برشی سطح خاک در برخی از نقاط مورد مطالعه بود. پوشش گیاهی و تحت اشکوب متراکم، تجمع سنگریزه در سطح خاک به سبب از دست رفتن خاک در مناطق بالادست و تشکیل سله در مناطق پایین دست نیز از عوامل افزایش مقاومت برشی سطح خاک در برخی نقاط مورد مطالعه بودند.

در بسیاری از مطالعات برخی از خصوصیات خاک مانند توزیع اندازه ذرات خاک، ماده آلی و آهک و نیز برخی از خصوصیات توپوگرافی و پوشش گیاهی مانند درصد و جهت شیب، ارتفاع و پوشش گیاهی به عنوان پارامترهای اثرگذار بر مقاومت برشی خاک و MWD نامبرده شده است (لئونارد و ریچارد ۲۰۰۴، هرن و همکاران ۲۰۰۵، کانتون و همکاران ۲۰۰۹ و کاناسوراس و همکاران ۲۰۱۰). برای مثال مصدقی و همکاران (۲۰۰۶) گزارش کردند که میزان آهک خاک پارامتری مهم و تأثیرگذار بر مقاومت برشی خاک مناطق خشک می‌باشد. هرن و همکاران (۲۰۰۵) بیان کردند که مقاومت برشی خاک‌های بدون پوشش به شکل و اندازه ذرات شن خاک وابسته بود. لئونارد و ریچارد (۲۰۰۴) دریافتند که حضور شبکه‌ای از ریشه گیاهان که نقشی مؤثر در پایداری خاکدانه‌ها دارد بر مقاومت برشی خاک نیز تأثیر فراوان داشت. کانتون و همکاران (۲۰۰۹) بیان کردند که ویژگی‌های توپوگرافی ممکن است به صورت غیرمستقیم از طریق اثر بر خصوصیات خاک مانند ماده آلی و بافت خاک و نیز رشد و نمو گیاهان بر پایداری خاکدانه‌ها اثرگذار باشند. خلیل مقدم و همکاران (۲۰۰۹) گزارش نمودند که با توجه به تأثیر غیرمستقیم توزیع اندازه ذرات خاک، مواد آلی و آهک خاک و ویژگی‌های توپوگرافی و پوشش گیاهی بر مقاومت برشی سطح خاک، می‌توان از این پارامترها جهت برآورد مقاومت برشی خاک با استفاده از توابع انتقالی و پیش بینی فضایی خاک استفاده نمود. کاناسوراس و همکاران (۲۰۱۰) از میزان آهک خاک، ماده آلی، رس و کربنات‌های کلسیم به عنوان مهمترین خصوصیات اثرگذار خاک بر میزان پایداری خاکدانه‌ها نام بردند.

۲.۳. رگرسیون چند متغیره خطی

مقادیر شاخص‌های آماری مورد استفاده برای ارزیابی کارایی مدل‌های رگرسیونی طراحی شده برای برآورد مقاومت برشی خاک و MWD در جدول ۳ آمده است. مقادیر r^2 و MSE برای مدل رگرسیونی طراحی شده برای برآورد مقاومت برشی خاک به ترتیب برابر ۰/۵۱ و ۱/۰۴ بود. مقدار این شاخص‌ها برای مدل رگرسیونی طراحی شده برای برآورد MWD نیز به ترتیب برابر ۰/۲۵ و ۰/۰۱ بود. بنابراین به نظر می‌رسد که بر اساس مقادیر شاخص‌های آماری ارزیابی مدل مورد استفاده در این پژوهش، مدل‌های رگرسیونی چند متغیره فاقد دقت قابل قبول برای برآورد و مدل‌سازی مقاومت برشی خاک و MWD در منطقه مورد مطالعه باشند. در واقع مدل‌های رگرسیونی خطی تنها قادر به تشخیص روابط خطی بین متغیرهای مستقل و وابسته اند و چنانچه روابط غیر خطی بین این متغیرها وجود داشته باشد، کارایی این مدل‌ها به حد قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد (یلماز و یوکسک، ۲۰۰۹). بنابراین به نظر می‌رسد که دلیل اصلی عملکرد ضعیف مدل رگرسیونی خطی در برآورد ویژگی‌های مورد مطالعه در این پژوهش، روابط غیر خطی بین این ویژگی‌ها و ورودی‌های مورد استفاده در مدل‌سازی باشد. سبحانی و همکاران (۲۰۱۰) نیز به قابلیت پایین مدل‌های رگرسیونی خطی در مدل‌سازی اشاره کردند.

جدول ۳- شاخص‌های آماری مورد استفاده برای ارزیابی کارایی مدل‌های رگرسیونی خطی در برآورد مقاومت برشی خاک و MWD

شاخص آماری		
MSE	r^2	خروجی
۱/۰۴	۰/۵۱	مقاومت برشی خاک
۰/۰۱	۰/۲۵	MWD

r^2 : ضریب همبستگی، MSE: میانگین مربعات خطا

۳.۳. شبکه‌های عصبی مصنوعی

مقادیر r^2 ، MSE و MEE برای مدل شبکه عصبی طراحی شده برای برآورد مقاومت برشی خاک به ترتیب برابر ۰/۸۹، ۰/۰۶ و ۰/۰۰۵ بود (جدول ۴). مقدار این شاخص‌ها برای مدل شبکه عصبی طراحی شده برای برآورد MWD نیز به ترتیب برابر ۰/۸۹، ۰/۰۴ و ۰/۰۱ بود. بنابراین به نظر می‌رسد که بر

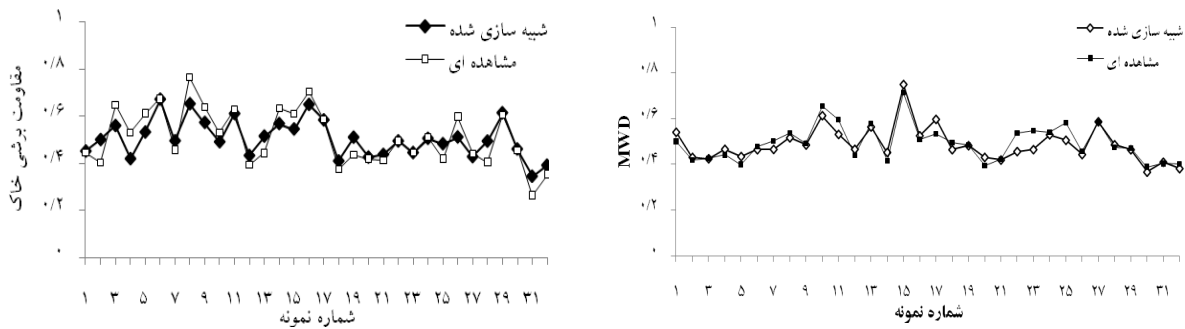
اساس مقادیر نسبتاً قابل قبول شاخص‌های آماری ارزیابی مدل، شبکه‌های عصبی مصنوعی دقت بیشتری نسبت به مدل‌های رگرسیونی مرسوم در برآورد و مدل‌سازی مقاومت برشی خاک و MWD در منطقه مورد مطالعه داشته باشند.

جدول ۴- شاخص‌های آماری مورد استفاده برای ارزیابی کارایی شبکه‌های عصبی مصنوعی در برآورد مقاومت برشی خاک و MWD

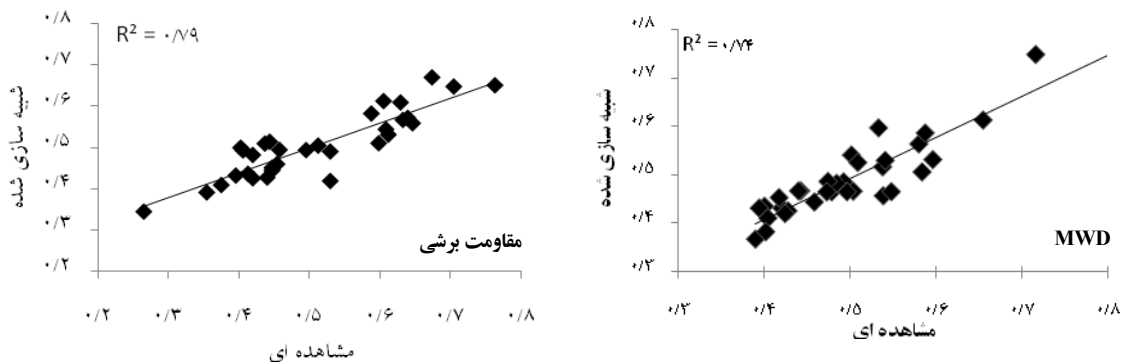
شاخص آماری			خروجی
MEE	MSE	r	
-۰/۰۰۵	۰/۰۶	۰/۸۹**	مقاومت برشی خاک
-۰/۰۱	۰/۰۴	۰/۸۹**	MWD

r: ضریب همبستگی، MEE: میانگین خطای تخمین، MSE: میانگین مربعات خطا و **: معنی‌دار در سطح ۱ درصد

مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده مقاومت برشی خاک و MWD برای داده‌های تست مدل شبکه عصبی نیز در شکل ۱ مقایسه شده‌اند. با توجه به این شکل مشخص است که برای هر دو ویژگی در برخی از نقاط به صورت غیریکنواخت بیش برآوردی از مقاومت برشی خاک و MWD صورت گرفته و در برخی دیگر، مقاومت برشی خاک و MWD کمتر از مقادیر مشاهده‌ای آنها تخمین زده شده‌اند. با این وجود با توجه به ضریب همبستگی (R^2) نسبتاً مناسب بین مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده برای داده‌های تست دو مدل شبکه عصبی طراحی شده در این پژوهش (شکل ۲)، به نظر می‌رسد که بتوان از شبکه‌های عصبی مصنوعی برای مدل‌سازی و تخمین مقاومت برشی سطح خاک و MWD در منطقه استفاده نمود. در پژوهش‌هایی مشابه، گوکنپ و همکاران (۲۰۰۸) نیز گزارش نمودند که از شبکه‌های عصبی مصنوعی می‌توان به عنوان ابزاری مناسب برای برآورد مقاومت برشی خاک استفاده نمود. خلیل مقدم و همکاران (۲۰۰۹) از پارامترهای مختلف خاک و توپوگرافی برای برآورد مقاومت برشی خاک در منطقه زاگرس مرکزی به عنوان ورودی مدل‌های مختلف شبکه عصبی با ساختارهای متفاوت استفاده نمودند و حداکثر ضریب همبستگی (r) برابر ۰/۶۷ را گزارش نمودند. تیفور (۲۰۰۲) قابلیت استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی در برآورد بار رسوب را مناسب و گاهی حتی بیشتر از مدل‌های فیزیکی دانست.



شکل ۱- مقایسه مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده مقاومت برشی خاک و MWD برای داده‌های تست مدل شبکه عصبی



شکل ۲- همبستگی بین مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده مقاومت برشی خاک و MWD برای داده‌های تست مدل شبکه عصبی



۴. نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نمایانگر آن بود که مدل‌های رگرسیون خطی چند متغیره فاقد دقت قابل قبول برای برآورد و مدل‌سازی مقاومت برشی خاک و MWD در منطقه مورد مطالعه می‌باشند. این در حالیست که شبکه‌های عصبی مصنوعی دارای دقت و قابلیت بیشتری نسبت به مدل‌های رگرسیونی مرسوم در برآورد و مدل‌سازی این دو ویژگی بودند. از سوی دیگر با توجه به همبستگی نسبتاً مناسب بین مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده مقاومت برشی خاک و MWD برای داده‌های تست مدل‌های شبکه عصبی طراحی شده، به نظر می‌رسد که بتوان از ویژگی‌های زود یافت مورد استفاده در این پژوهش به عنوان ورودی شبکه‌های عصبی مصنوعی در مدل‌سازی و تخمین مقاومت برشی سطح خاک و MWD در منطقه مورد مطالعه بهره جست. بنابراین به نظر می‌رسد که بتوان از شبکه‌های عصبی مصنوعی به عنوان روشی نوین برای برآورد ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی خاک جهت رسیدن به بیشترین دقت با صرف کمترین هزینه و وقت استفاده نمود. با این وجود، مطالعه امکان استفاده از تکنیک‌های انتخاب ورودی‌های بهینه نظیر الگوریتم‌های تکاملی^۱ همچون الگوریتم ژنتیک^۲ و نیز استفاده از دیگر ابزارهای مدل‌سازی در برآورد مقاومت برشی خاک و MWD مانند سیستم‌های نروفازی^۳ در پژوهش‌های آینده پیشنهاد می‌گردد.

۵. منابع

۱. وفائیان، م.، (۱۳۷۶)، "خواص مهندسی خاک". انتشارات نشر ارکان، اصفهان.
2. Franti T.G., Laflen J.M., and Watson D.A., (1999), "Predicting soil detachment from high discharge concentrated flow". *Journal of Trans. ASAE*. **42**, pp 329-335.
3. LeOnard J., and Richard G., (2004), "Estimation of runoff critical shear stress for soil erosion from soil shear strength". *Journal of Catena*. **57**, pp 233-249.
4. Le Bissonnais, Y., (1996), "Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: I. Theory and methodology". *European Journal of Soil Science*. **47**, pp 425-437.
5. Calero, N., Barron, V., and Torrent, J., (2008), "Water dispersible clay in calcareous soils of southwestern Spain". *Journal of Catena*. **74**, pp 22-30
6. Khalilmoghadam B., Afyuni M., Abbaspour K.C., Jalalian A., Dehghani A.A., and Schulin R., (2009), "Estimation of surface shear strength in Zagros region of Iran-A comparison of artificial neural networks and multiple-linear regression models". *Journal of Geoderma*. **153**, 29 36.
۷. منہاج، م.، (۱۳۸۰)، "آشنایی با شبکه‌های عصبی مصنوعی". موسسه انتشارات علمی دانشگاه صنعتی شریف، تهران. ۱۳۷ ص.
۸. مهندسین مشاور پارساب، (۱۳۷۵)، "مطالعات شناسایی-توجیهی طرح آبخیزداری حوزه بازفت، استان چهارمحال و بختیاری". جلد هفتم: فرسایش و رسوب. ۱۵۳ ص.
9. Nelson D.W., and Sommers L.P., (1986), "Total carbon, organic carbon and organic matter". In: Page, A.L. (Ed.), *Methods of Soil Analysis: Part 2: Agronomy Handbook No 9*, American Society of Agronomy and Soil Science Society of America, Madison, WI, pp. 539-579.
10. Nelson, R.E., (198۲), "Carbonate and gypsum". In: Page, A.L. (Ed.), *Methods of Soil Analysis: Part I: Agronomy Handbook No 9*, American Society of Agronomy and Soil Science Society of America, Madison, WI, pp 181-197.
11. Gee G.W., and Bauder J.W., (1986), "Particle size analysis". In: Klute, A. (Ed.), *Methods of Soil Analysis: Part 1., Agronomy Handbook No 9., American Society of Agronomy and Soil Science Society of America, Madison, WI*, pp. 383-411.
12. van Bavel, C.H.M., (1950), "Mean weight diameter of soil aggregates as a statistical index of aggregation". *Soil Science Society American Proc*. **14**, pp 20 23.
13. Kemper W.D., and Rosenau K., (1986), "Size distribution of aggregates". In: Klute, A. (Ed.), *Methods of Soil Analysis: Part 1: Physical and Mineralogical Methods*, American Society of Agronomy, Madison, WI pp. 425-442.

1 evolutionary algorithms

2 genetic algorithm

3 adaptive neuro-fuzzy inference systems, ANFIS



14. Horn R., Fleige H., Richter F.H., Czyz E.A., Dexter A., Diaz-Pereira E., Dumitru E., Enarcho, R., Mayol F., Rajkai K., De la Rosa D., and Simota C., (2005), "SIDASS project, Part 5: Prediction of mechanical strength of arable soils and its effects on physical properties at various map scales". *Journal of Soil and Tillage Researches*. **82**, pp 47-56.
15. Canton, Y., Sole-Benet, A., Asensio, C., Chamizo, S., and Puigdefabregas, J., (2009), "Aggregate stability in range sandy loam soils: relationships with runoff and erosion". *Journal of Catena*. **77**, pp 192-199.
16. Canasveras J.C., Barron, V., Del Campillo, M.C., Torrent, J., and Gomez, J.A., (2010), "Estimation of aggregate stability indices in Mediterranean soils by diffuse reflectance spectroscopy". *Journal of Geoderma*. **158**, pp 78-84.
17. Mosaddeghi M.R., Hajabbasi M.A., and Khademi H., (2006), "Tensile strength of sand, palygorskite, and calcium carbonate mixtures and interpretation with the effective stress theory". *Journal of Geoderma*. **134**, pp 160-170.
18. Yilmaz, I., and Yuksek, G., (2009), "Prediction of the strength and elasticity modulus of gypsum using multiple regression, ANN, and ANFIS models". *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. **46**, pp 803-810.
19. Sobhani, J., Najimi, M., Pourkhorshidi, A.R., and Parhizkar, T., (2010), "Prediction of the compressive strength of no-slump concrete: A comparative study of regression, neural network and ANFIS models". *Journal of Construction and Building Materials*. **24**, pp 709-718.
20. Goktepe A.B., Altun S., Altintas G., and Tan O., (2008), "Shear strength estimation of plastic clays with statistical and neural approaches". *Journal of Building and Environment*. **43**, pp 849-860.
21. Tayfur, G., (2002), "Artificial neural networks for sheet sediment transport". *Hydrological Sciences Journal*. **47**, pp 879-892.