

مدل‌سازی پارامترهای مقاومت برشی خاک سطحی در مقیاس زمین‌نما به کمک برخی ویژگی‌های خاک و محیطی در اراضی منطقه سمیرم استان اصفهان

شقایق هوائی^۱ - شمس اله ایوبی^{۲*} - محمدرضا مصدقی^۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۳/۳

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۱۱/۲۸

چکیده

مقاومت برشی خاک سطحی یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های مؤثر در تخمین و اندازه‌گیری فرسایش خاک بوده که اندازه‌گیری مستقیم آن در سطح حوضه آبخیز هزینه‌بر و وقت‌گیر می‌باشد. این پژوهش با هدف پیش‌بینی مقاومت برشی خاک سطحی و رتبه‌بندی مهم‌ترین فاکتورهای مؤثر بر آن، با استفاده از مدل‌سازی توسط روش‌های شبکه عصبی مصنوعی (ANNs) و رگرسیون چندمتغیره خطی (MLR) و مقایسه این دو روش انجام شد. برای اندازه‌گیری مقاومت برشی خاک سطحی در صحرا، دستگاه جعبه برش مستقیم طراحی و ساخته شد که قادر به تعیین هر دو پارامتر چسبندگی (c) و زاویه اصطکاک داخلی (ϕ) می‌باشد. منطقه مورد مطالعه به مساحت ۳۵۰۰ کیلومترمربع در اراضی شهرستان سمیرم، واقع در استان اصفهان انتخاب و نمونه‌برداری خاک (۵-۱۰ سانتی‌متری) و اندازه‌گیری مقاومت برشی خاک سطحی توسط دستگاه مزبور در ۱۰۰ نقطه انجام شد. ویژگی‌های توزیع اندازه ذرات، درصد رس ریز، مقدار ماده آلی، درصد آهک، چگالی ظاهری و درصد سنگ‌ریزه خاک روی نمونه‌های خاک تعیین شدند. شاخص نرمال‌شده پوشش گیاهی (NDVI)، کاربری زمین و نوع سازند زمین‌شناسی نیز تعیین گردید. مدل‌سازی به دو روش ANNs و MLR جهت پیش‌بینی مقاومت برشی خاک سطحی (c) و (ϕ) انجام شد. به منظور ارزیابی و مقایسه عملکرد مدل‌های مذکور از شاخص‌های ضریب تبیین و ریشه میانگین مربعات خطا استفاده شد. نتایج نشان‌دهنده دقت مناسب روش ANNs نسبت به روش MLR به دلیل توانایی زیاد شبکه عصبی در کشف و بررسی روابط پیچیده غیرخطی بین پارامترها است. نتایج تجزیه حساسیت بر اساس مدل‌های شبکه عصبی نشان داد که NDVI، چگالی ظاهری و میزان رس ریز فاکتورهایی هستند که به کمک آن‌ها می‌توان c خاک را پیش‌بینی کرد. نتایج تجزیه حساسیت در مورد پارامتر ϕ نشان داد که میزان شن، چگالی ظاهری و NDVI مهم‌ترین فاکتورها و نسبت OM/Clay و مقدار ماده آلی کم‌اهمیت‌ترین فاکتورها در پیش‌بینی این پارامتر در منطقه مورد بررسی بودند.

واژه‌های کلیدی: مقاومت برشی خاک سطحی، شبکه عصبی مصنوعی، چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی، تجزیه حساسیت

مقدمه

خاک و گسیختگی آن می‌شوند (۸). گسیختگی در خاک بسیار پیچیده‌تر از بسیاری مواد در مهندسی می‌باشد، به این دلیل که رفتار خاک ممکن است از سیال روان تا ترد و سخت در اثر تغییر رطوبت تغییر کند (۱۵). همچنین پژوهش‌های پیشین در زمینه فرسایش خاک نشان داده است که فرسایش‌پذیری خاکی که در آن روان‌آب جاری می‌شود، توسط مقاومت برشی سطح خاک کنترل می‌شود (۲۴). راثوس و همکاران (۲۷) نیز به این نتیجه رسیدند که شرایط خاک زمانی که به وسیله جریان شیار، به حد آستانه فرساینده‌گی برسد، توسط مقاومت برشی سطح خاک کنترل می‌گردد.

به منظور حفظ پایداری خاک در برابر تنش‌های محیطی از جمله فعالیت‌های خاک‌ورزی و عوامل فرساینده خاک باید به بررسی مقاومت برشی در برابر تنش‌های وارده پرداخت. فرانتی و همکاران

مقاومت برشی خاک یک ویژگی فیزیکی (مکانیکی) مهم خاکی مؤثر بر سایر ویژگی‌های ذاتی خاک از جمله فرسایش‌پذیری خاک و روابط ماشین-خاک می‌باشد. در کشاورزی مکانیزه، وسایل زمین-گیرایی (مانند تراکتورها) هم زمان تنش‌های مماسی و قائم به خاک اعمال می‌کنند. فعالیت‌هایی که به عنوان خاک‌ورزی و تردد روی زمین‌های کشاورزی صورت می‌گیرند سبب اعمال نیرو (تنش) بر

۱- دانشجوی دکتری، گروه خاکشناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ولی عصر رفسنجان

۲ و ۳- دانشیاران گروه خاکشناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان
(Email: ayoubi@cc.iut.ac.ir)

*- نویسنده مسئول:

(۹)، لئونارد (۲۰) و لوک و همکاران (۲۳) دریافتند که مقاومت برشی سطح خاک به عنوان شاخص مناسبی برای فرسایش‌پذیری خاک می‌باشد. به این ترتیب مدل‌سازی فرسایش خاک و روان‌آب به برآورد دقیق مقاومت برشی سطح خاک نیاز دارد (۶).

مقاومت برشی خاک تحت تأثیر دو عامل چسبندگی (c) و مقاومت اصطکاکی بین دانه‌های خاک است. چسبندگی به ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مانند میزان و نوع رس، درجه اشباع، نوع کاتیون‌ها و آنیون‌های محلول و مقدار ماده آلی بستگی دارد و این مقاومت بستگی به نیروهای عمودی وارده بر خاک ندارد. مقاومت اصطکاکی متناسب با تنش عمودی وارده بر سطح برش بوده و زاویه اصطکاکی بین دانه‌های خاک موسوم به زاویه اصطکاکی داخلی (ϕ) می‌باشد. مقاومت اصطکاکی خاک به دلیل اصطکاکی بین ذرات مجاور و قفل شدن آنها در یکدیگر می‌باشد (۱).

روش‌های بسیاری از جمله فروسنج مخروطی، پره برشی، جعبه برش پیچشی و جعبه برش مستقیم، برای اندازه‌گیری مستقیم مقاومت برشی خاک وجود دارند. به طور کلی می‌توان بیان داشت که بسیاری از این روش‌ها پیچیده و وقت‌گیر بوده و به کار بردن آنها در مقیاس بزرگ دشوار است. در روش غیرمستقیم، مقاومت برشی خاک با استفاده از توابع انتقالی خاک^۱ (PTFs) و توابع پیش‌بینی مکانی خاک تخمین زده می‌شود (۵). توابع پیش‌بینی مکانی خاک و PTFs عبارتند از توابع پیش‌بینی که می‌توانند داده‌های پایه‌ای (زودیافت) خاک مانند توزیع اندازه ذرات، چگالی ظاهری و مقدار ماده آلی را به ویژگی‌های مکانیکی خاک مانند مقاومت فروسنجی و مقاومت برشی خاک تبدیل کنند. این توابع پیش‌بینی‌کننده با استفاده از روش‌های متعدد بسیار ساده تا روش‌های پیچیده‌ای چون انواع تجزیه‌های رگرسیونی و شبکه‌های عصبی مصنوعی^۲ (ANNs) ایجاد می‌شوند (۵).

از بین روش‌های متداول‌تر می‌توان به دو مورد تجزیه‌های رگرسیونی و ANN اشاره کرد، که هر کدام دارای مزایا و معایبی می‌باشند. از مزایای روش‌های تجزیه رگرسیونی می‌توان به ارائه نهایی توابع پیش‌بینی‌کننده به صورت معادله‌های معتبر اشاره نمود. اگر چه یکی از بزرگ‌ترین معایب آنها عدم توانایی این روش‌ها برای کشف روابط پیچیده موجود بین متغیرهای ورودی است. از طرف دیگر بزرگ‌ترین مزیت استفاده از ANN، دینامیک بودن این سیستم‌ها می‌باشد که به کاربران در کشف روابط پیچیده و غیرخطی بین متغیرها کمک می‌کند (۱).

گوکتپا و همکاران (۱۲) در پژوهشی با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی به پیش‌بینی مقاومت برشی خاک پرداختند. آن‌ها از

پارامترهای زودیافت خاک هم‌چون میزان رطوبت خاک و شاخص خمیری برای برآورد مقاومت برشی خاک استفاده کردند. خلیل مقدم و همکاران (۱) از ANNs برای برآورد مقاومت برشی خاک با استفاده از توزیع اندازه ذرات خاک، ویژگی‌های توپوگرافی، شاخص نرمال شده اختلاف پوشش گیاهی^۳ (NDVI)، کربن آلی خاک (SOC) و CaCO_3 به عنوان ویژگی‌های زودیافت استفاده کردند. حبیبگاهی و همکاران (۱۳) نیز از ANNs برای پیش‌بینی مقاومت برشی خاک استفاده کردند. هم‌چنین بسالت‌پور و همکاران (۵) از ANNs برای پیش‌بینی مقاومت برشی خاک سطحی استفاده کرده و بیان داشتند که NDVI یکی از مهم‌ترین پارامترها برای پیش‌بینی مقاومت برشی خاک سطحی می‌باشد. تجزیه حساسیت ANNs، درک و توجیه این روابط را بسیار آسان کرده است. ولی این روش دارای معایبی نیز بوده که مهم‌ترین آن عدم ارائه معادله جهت پیش‌بینی متغیر وابسته خروجی یا در اصطلاح جعبه سیاه بودن این روش‌ها می‌باشد. به این ترتیب در صورت امکان پذیر بودن، اجرای هر دو روش تخمین (رگرسیون و ANNs) در پژوهش‌ها امکان بهره‌مندی از مزایای آنها را در اختیار کاربران قرار می‌دهد، به علاوه مقایسه این دو نیز خود به کاهش تأثیر معایب و کاستی‌های هر دو روش کمک شایانی خواهد کرد (۱).

با توجه به اهمیت اندازه‌گیری و ضرورت تخمین هر چه دقیق‌تر مقاومت برشی خاک جهت حفظ پایداری خاک و ارزیابی فرسایش‌پذیری آن، در این پژوهش از ویژگی‌های زودیافت فیزیکی و شیمیایی خاک، نوع کاربری زمین، NDVI و نوع سازند زمین‌شناسی جهت پیش‌بینی مقاومت برشی خاک استفاده شد. هم‌چنین به بررسی و مقایسه دو روش رگرسیون چندمتغیره خطی^۴ و ANNs برای تخمین پارامترهای مقاومت برشی سطح خاک و رتبه‌بندی مهم‌ترین فاکتورهای پیش‌بینی‌کننده با استفاده از مدل‌سازی توسط ANNs پرداخته است (۱).

مواد و روش‌ها

موقعیت جغرافیایی منطقه

منطقه مورد مطالعه با مساحت ۳۵۰۰ کیلومتر مربع به مرکزیت شهرستان سمیرم در استان اصفهان واقع گردیده است. این منطقه در طول جغرافیایی ۳۳° ۵۱' شرقی و عرض جغرافیایی ۲۵° ۳۱' شمالی قرار دارد. موقعیت جغرافیایی منطقه و کوهستانی بودن آن موجب ریزش‌های جوی فراوان در این ناحیه می‌گردد که نتیجه آن رویش گیاهان مختلف مرتعی است. ارتفاع منطقه از سطح دریا حدود ۲۵۰۰

3- Normalized difference vegetation index

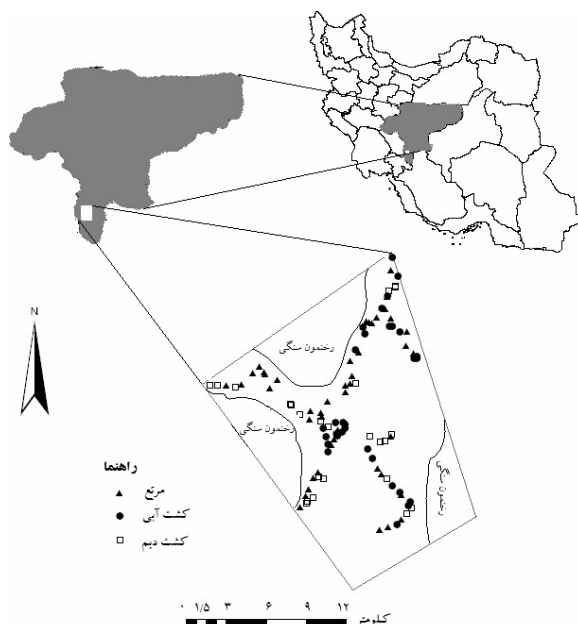
4- Multiple linear regression

1- Pedotransfer functions

2- Artificial neural networks

لایه ۵-۰ سانتی‌متری اقدام به نمونه‌برداری خاک گردید. موقعیت جغرافیایی منطقه و پراکنش نقاط نمونه‌برداری به تفکیک نوع کاربری زمین در شکل ۱ ارائه شده است.

متر می‌باشد (۳). برای انجام این پژوهش نمونه‌برداری خاک به روش کاملاً تصادفی و در ۱۰۰ نقطه با فاصله حدود ۱۰۰۰ متر و در سه کاربری مرتع، کشت آبی و کشت دیم صورت گرفت. در هر نقطه از



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه و پراکنش نقاط نمونه‌برداری به تفکیک کاربری زمین



شکل ۲- دستگاه جعبه برش مستقیم هنگام اندازه‌گیری مقاومت برشی خاک در صحرا

خاک سطحی شامل چسبندگی (c) و زاویه اصطکاک داخلی (ϕ) را دارد.

دستگاه جعبه برش مستقیم شامل بخش‌های زیر می‌باشد: (۱) صفحه اعمال‌کننده تنش که در سطح خاک واقع شده و با جابه‌جاشدن در سطح خاک ایجاد گسیختگی برشی می‌کند (این صفحه به شکل دایره‌ای به قطر ۱۰ سانتی‌متر و مساحت ۷۸/۵ سانتی‌متر مربع می‌باشد) و همچنین تنش عمودی روی سطح گسیختگی از طریق افزودن وزنه‌های ۲، ۵ و ۱۰ کیلوگرم بر روی این صفحه اعمال می‌گردد، (۲) موتور الکترومکانیکی که به صفحه اعمال‌کننده تنش

اندازه‌گیری پارامترهای مقاومت برشی خاک توسط جعبه برش مستقیم

در این پژوهش جعبه برش^۱ مستقیم برای اندازه‌گیری مقاومت برشی خاک سطحی در محل (صحرا)، طراحی و ساخته شد (شکل ۲). تصویر شماتیک دستگاه نیز در شکل ۳ قابل مشاهده است. این جعبه برش مخصوص اندازه‌گیری مقاومت برشی خاک دست‌نخورده (در محل) می‌باشد و قابلیت اندازه‌گیری هر دو پارامتر مقاومت برشی

1- Shear box

$$\tau = \frac{\text{نیروی برشی}}{\text{سطح مقطع عمود عمود عمل کننده تنش}} = \text{تنش برشی} \quad (2)$$

در نهایت مقادیر مقاومت برشی (τ) در برابر تنش عمودی (σ_n) رسم شده و خط رگرسیون بر آن‌ها برازش داده شد که عرض از مبدا آن برابر چسبندگی (c) و شیب آن برابر $\tan \varphi$ است (۳۱):

$$\tau = c + \sigma_n \tan \varphi \quad (3)$$

تقریباً در تمامی نقاط اندازه‌گیری، پوش گسیختگی^۱ در دامنه تنش عمودی وارده (۲۵، ۶۲/۴ و ۱۲۴/۸ هکتوپاسکال) به صورت خطی بود و معادله ۳ به خوبی بیان‌کننده پارامترهای مقاومت برشی خاک بود.

اندازه‌گیری ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک

توزیع اندازه ذرات به روش پیبیت (۱۱) و مقدار رس ریز با استفاده از روش سانتریفوژ اندازه‌گیری شد. هم‌چنین درصد سنگ‌ریزه خاک به روش حجمی، درصد رطوبت خاک به روش وزنی، چگالی ظاهری به روش سیلندرهای نمونه‌گیری، مقدار کربن آلی خاک به روش والکلی و بلاک (۲۵) و مقدار کربنات کلسیم خاک به روش تیتراسیون معکوس (۲۶) اندازه‌گیری شد. برای تعیین چگالی ظاهری خاک از استوانه فلزی با حجم مشخص استفاده شد (۱۶). به منظور حذف اثر بافت خاک بر چگالی ظاهری، چگالی ظاهری نسبی^۲ (ρ_{b-rel}) نیز با استفاده از معادله زیر محاسبه گردید (۱۹):

$$\rho_{b-rel} = \rho_b / \rho_{b-ref} \quad (4)$$

که در آن ρ_b چگالی ظاهری (Mg m^{-3})، ρ_{b-ref} چگالی ظاهری مرجع^۳ (Mg m^{-3}) می‌باشند که ρ_{b-ref} از معادله زیر محاسبه شد (۱۶):

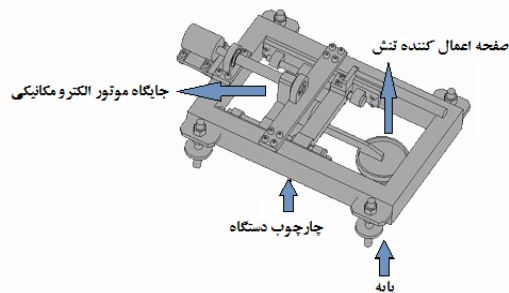
$$\rho_{b-ref} = 1/882 - 0.0083 \text{ Clay\%} \quad (5)$$

شاخص نرمال‌شده پوشش گیاهی (NDVI)

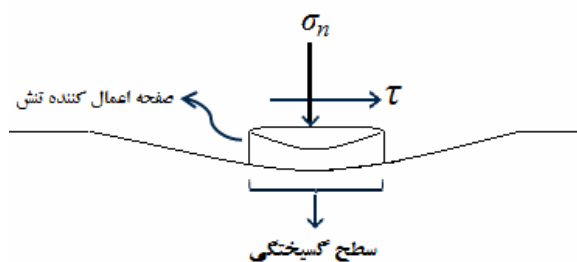
در واقع شاخص پوشش گیاهی یک شاخص عددی است که با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای امکان مطالعه گسترده پوشش گیاهی و کسب اطلاعات درباره وضعیت پوشش گیاهی مانند میزان و پراکنش را فراهم می‌سازد (۲). اساس کار این شاخص بر تفاوت بازتاب در طول موج‌های قرمز و مادون قرمز نزدیک برای خاک و گیاه می‌باشد. در این پژوهش از تصاویر ماهواره‌ای سنجنده ETM^+ برای محاسبه شاخص نرمال‌شده پوشش گیاهی استفاده شد و این شاخص برای ۱۰۰ نقطه مورد مطالعه محاسبه شد. مقادیر NDVI بین ۱ تا -۱ بوده و با فرمول زیر محاسبه می‌شود (۲):

$$NDVI = \frac{(NIR - R)}{(NIR + R)} \quad (6)$$

متصل است و آن را در سطح خاک به طور افقی جابه‌جا کرده و تنش برشی اعمال می‌کند، و (۳) دیتالاگر جهت قرائت و ذخیره اطلاعات نیروی اعمال‌شده افقی ارسالی توسط نیروسنج (شکل ۲). شکل ۴ چگونگی برش خاک توسط دستگاه جعبه برش مستقیم را به صورت شماتیک نشان می‌دهد.



شکل ۳- تصویر شماتیک دستگاه جعبه برش مستقیم ساخته‌شده در این پژوهش



شکل ۴- تصویر شماتیک چگونگی برش خاک در محل توسط دستگاه جعبه برش مستقیم

اندازه‌گیری مقاومت برشی در صحرا در ۱۰۰ نقطه در شرایط اشباع انجام شد. در نقاط مورد نظر، پیش از آغاز اندازه‌گیری مقاومت برشی توسط آب به آرامی (بدون ایجاد روان‌آب) اقدام به اشباع‌نمودن خاک سطحی شد. سپس دستگاه جعبه برش در نقطه اشباع‌شده قرار گرفته و به کمک پایه‌ها در خاک ثابت و تراز شد. پس از اعمال نیروی عمودی از طریق قراردادن وزنه‌ها بر روی جعبه برش دستگاه (تنش عمودی روی سطح برش)، نیروی افقی توسط موتور اعمال شده و گسیختگی برشی در خاک سطحی رخ داد. انجام آزمایش در هر مکان، در سه نقطه با سه نیروی عمودی (سه وزنه متفاوت) انجام شد. بنابراین مجموعاً ۳۰۰ آزمایش برش مزرعه‌ای انجام گرفت. تنش عمودی و تنش برشی نیز به ترتیب زیر محاسبه شدند (۴):

$$\sigma_n = \frac{\text{نیروی عمودی}}{\text{سطح مقطع عمود عمود عمل کننده تنش}} = \text{تنش عمودی} \quad (1)$$

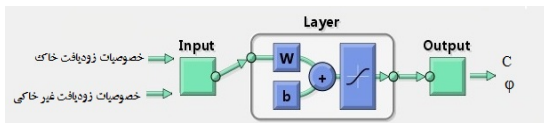
و نیروی عمودی mg که در آن m جرم وزنه و g شتاب گرانش می‌باشند.

1- Failure envelope

2- Relative bulk density

3- Reference bulk density

شبکه برای پارامترهای مورد پیش‌بینی بر اساس کم‌ترین میزان ریشه میانگین مربعات خطا^۲ (RMSE) و بیش‌ترین مقدار ضریب تبیین (R^۲) انتخاب گردیدند.



شکل ۵- ساختار شبکه عصبی پیش‌خور برای مدل‌سازی پارامترهای مقاومت برشی خاک توسط ویژگی‌های زودبافت خاکی و غیرخاکی

ارزیابی دقت مدل‌ها

در نهایت جهت مقایسه و انتخاب روش‌های مناسب و بهینه مدل‌سازی از شاخص‌های ضریب تبیین (R^۲) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) استفاده شد (۳۰):

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{N}} \quad (۷)$$

که در این رابطه، Y_i : مقدار اندازه‌گیری شده، \hat{Y}_i : مقدار پیش‌بینی شده، N: تعداد کل داده‌های اندازه‌گیری شده می‌باشند.

تجزیه حساسیت^۳

تجزیه حساسیت فرآیندی است بسیار ارزشمند که اطلاعات ارزشمندی درباره میزان حساسیت مدل به متغیرهای ورودی آن در اختیار طراح مدل قرار می‌دهد. با شناسایی میزان تأثیر متغیرهای ورودی بر دقت پیش‌بینی مدل، می‌توان متغیرهای کم‌اثر را از شبکه حذف و مدل ساده‌تری را بسط و گسترش داد. در این پژوهش فرآیند تجزیه حساسیت به روش StatSoft انجام شد (۲۲). مقادیر ضریب حساسیت متغیرهای ورودی در روش StatSoft از تقسیم‌نمودن خطای کل شبکه در غیاب یک متغیر بر خطای کل شبکه در حضور تمامی متغیرهای ورودی، به دست می‌آید. بر اساس این روش اگر مقدار ضریب حساسیت یک متغیر بیش‌تر از یک باشد، آن متغیر سهم زیادی در توضیح تغییرپذیری پارامترهای خروجی (مقاومت برشی خاک سطحی) دارد (۲۹).

نتایج و بحث

ویژگی‌های عمومی منطقه

ویژگی‌های خاک‌های منطقه مورد بررسی که برای ایجاد توابع انتقالی خاک و مدل‌سازی مقاومت برشی خاک سطحی منطقه مورد استفاده قرار گرفتند، در جدول ۱ آمده است.

تعیین نوع کاربری و سازند زمین‌شناسی

تعیین نوع کاربری در حین انجام مطالعات صحرایی، برای هر نقطه در صحرا انجام گردید. نوع سازند زمین‌شناسی نیز با استفاده از نقشه زمین‌شناسی با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰۰ منطقه برای هر نقطه مشخص شد. منطقه مورد مطالعه بر روی هشت سازند زمین‌شناسی واقع شده است که پراکنش نقاط نمونه‌برداری بر روی این سازندها به ترتیب زیر می‌باشد. ۲۷ نقطه بر روی سازند بختیاری (pl^c_b)، ۷ نقطه بر روی سازند شهبازان (E_{sh}^{dl})، ۱ نقطه بر روی سازند تاربور (K_{11}^{lm})، ۴ نقطه بر روی سازند آسماری (om_a^{ml})، ۲۶ نقطه بر روی سازند گورپی (K_{gu}^{sh})، ۱ نقطه بر روی سازند سنگ آهک خاکستری ($K_{11}^{sh.s}$)، ۲۸ نقطه بر روی پادگانه قدیمی (Q_1^1) و ۶ نقطه بر روی پادگانه جوان (Q_2^1) قرار دارند.

مدل‌سازی توسط توابع انتقالی خاک

در این پژوهش دو روش مدل‌سازی رگرسیون خطی (MLR) و شبکه عصبی مصنوعی (ANNs) مورد بررسی و آزمون قرار گرفت: الف) از روش رگرسیون چندمتغیره گام به گام جهت انجام مدل‌سازی و برقراری ارتباط خطی بین ویژگی‌های زودبافت شامل درصد ذرات اولیه، درصد سنگ‌ریزه، درصد مواد آلی و آهک و درصد رس ریز و مقاومت برشی سطح خاک استفاده شد. جهت انجام مدل‌سازی رگرسیونی نرم‌افزار SAS 9.0 مورد استفاده قرار گرفت.

ب) به منظور طراحی شبکه عصبی مصنوعی، ویژگی‌های زودبافت خاک شامل درصد ذرات اولیه، درصد سنگ‌ریزه، درصد مواد آلی و آهک و درصد رس ریز و هم‌چنین پارامترهای زودبافت غیرخاکی شامل نوع کاربری، نوع سازند زمین‌شناسی و شاخص نرمال‌شده پوشش گیاهی به عنوان پارامترهای ورودی (تخمین‌گرها) و فاکتورهای مقاومت برشی خاک (c و ϕ) به عنوان پارامترهای خروجی در نظر گرفته شدند. شبکه‌هایی با ۲۵ نرون در لایه ورودی و یک نرون در لایه خروجی طراحی گردید. در این راستا ۶۰ درصد داده‌ها جهت آموزش، ۲۰ درصد داده‌ها جهت انجام فرآیند اعتبارسنجی و ۲۰ درصد به عنوان آزمون مدل انتخاب گردیدند. شبکه عصبی توسط نرم‌افزار MATLAB R2009a اجرا شده و فرآیندهای آموزش، اعتبارسنجی و آزمون مدل انجام گرفت. نوع شبکه مورد استفاده Multilayer perceptron network (MLP) می‌باشد (شکل ۵). قاعده آموزشی Levenberg-Marquardt و توابع انتقالی Tansing برای فرآیند آموزش به کار گرفته شدند. تعداد عناصر پردازش لایه پنهان نیز از ۱ تا $2n+1$ تعداد نرون‌های ورودی می‌باشد و تعداد لایه‌های مخفی نیز از یک تا سه بار در فرآیند آموزش و آزمون مدل تکرار شده و در نهایت بهترین ساختارهای

2- Root mean square errors
3- Sensitivity analysis

1- Multiple stepwise regression

جدول ۲- نتایج بهترین ساختارهای شبکه عصبی مصنوعی برای پیش‌بینی پارامترهای مقاومت برشی خاک سطحی در منطقه مورد مطالعه

مدل	متغیر	تابع محرک	نرون پنهان	Epoch	ورودی	RMSE	R ²
۱	c	Tansing	۲۰	۱۰۰۰۰	۱۴	۳/۰۵	۰/۹۰
۲	φ	Tansing	۳۰	۱۰۰۰۰	۱۴	۱/۶۷	۰/۹۲

جدول ۳- نتایج روش رگرسیون چندمتغیره خطی برای پیش‌بینی پارامترهای مقاومت برشی خاک سطحی در منطقه مورد مطالعه

مدل	متغیر	RMSE	R ²
۱	c	۵/۹۳	۰/۴۳***
۲	φ	۳/۸۶	۰/۵۹***

***- نشان‌دهنده معنی‌دار بودن در سطح احتمال ۰/۱ درصد می‌باشد.

هرچه R² یک مدل بیش‌تر و RMSE آن کم‌تر باشد، دقت تخمین مدل زیادت‌ر خواهد بود. در این بخش، بهترین مدل‌های رگرسیون خطی و شبکه عصبی مورد مقایسه قرار گرفتند. نتایج ارائه‌شده نشان داد که مدل‌های MLR قادر به توجیه ۴۳ تا ۵۷ درصد از تغییرات مقاومت برشی خاک سطحی می‌باشند، در حالی که ANNs دقت زیادی (۹۰ تا ۹۲ درصد) در پیش‌بینی مقاومت برشی خاک دارد. نتایج بیان‌کننده این واقعیت است که مدل‌های ANNs توانایی بالاتری در پیش‌بینی داشته و در مقایسه با روش‌های MLR قوی‌تر عمل می‌کنند. علت توانایی بیش‌تر ANNs در تخمین به دلیل توانمندی این روش در استخراج روابط غیرخطی موجود بین پارامترهای مقاومت برشی و عوامل خاکی و محیطی می‌باشد. شکل‌های ۶ و ۷ مقایسه مقادیر اندازه‌گیری‌شده و پیش‌بینی‌شده پارامترهای مقاومت برشی توسط روش‌های ANNs و MLR را نشان می‌دهند.

خلیل مقدم و همکاران (۱۸) از شبکه عصبی مصنوعی و رگرسیون برای پیش‌بینی بخش c مقاومت برشی استفاده نمود. نتایج آنها نشان داد که در صورت استفاده از پارامترهای NDVI، شیب زمین، کربنات کلسیم و رس خاک، مدل رگرسیونی ۲۷ درصد و مدل شبکه عصبی مصنوعی ۴۴ درصد از تغییرات را توجیه می‌نمایند. آنها همچنین علت توانایی بیش‌تر شبکه عصبی در تخمین را در نظر گرفتن روابط غیرخطی دانست.

گوکتپا و همکاران (۱۲)، در پژوهشی در زمینه تخمین مقاومت برشی خاک دریافتند که مدل‌های ANNs بهتر از مدل‌های رگرسیونی مقاومت برشی رس‌ها را پیش‌بینی می‌کنند. کلکن و همکاران (۱۷) نیز بیان کردند که برای تخمین مقاومت فشاری غیرمحصور خاک، مدل‌های ایجادشده توسط ANNs کارآمدتر می‌باشند.

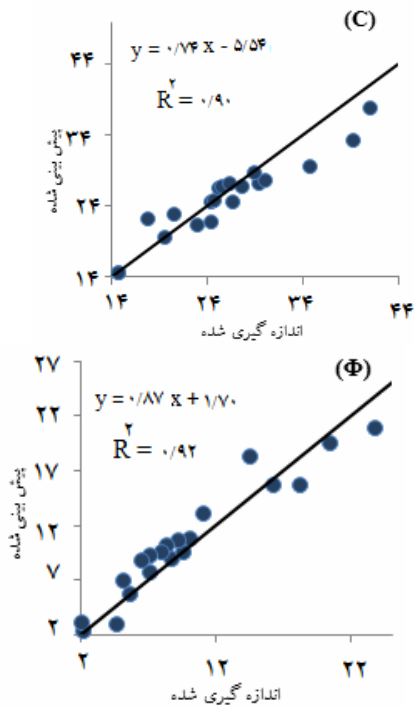
بر اساس توزیع اندازه ذرات خاک، کلاس بافت‌های غالب خاک-های منطقه شامل رسی، لومی، لوم رسی، لوم رسی سیلتی و لوم رسی شنی است. با توجه به مقادیر حداقل، حداکثر و میانگین نسبت رس ریز به کل رس می‌توان دریافت که بخش مهمی از رس خاک‌های منطقه دارای اندازه کوچک‌تر از ۰/۰۰۰۲ میلی متر (رس‌های کلوئیدی) می‌باشند. میزان حجمی سنگ‌ریزه نیز بیان‌کننده پراکندگی مناسب این پارامتر در این منطقه احتمالاً به دلیل تنوع در نوع مواد مادری و فرآیندهای متنوع رسوب‌گذاری است. کربن آلی خاک بین ۰/۱۷ تا ۴/۸۶ درصد متغیر بود، که کم‌ترین مقادیر آن مربوط به کاربری کشت آبی (باغات سیب) می‌باشد. مقادیر زیاد کربنات کلسیم در خاک‌های منطقه مورد مطالعه به وجود مواد مادری غنی از گچ و آهک با مقادیر زیاد کربنات کلسیم مربوط می‌شود. نتایج ضریب چولگی و کشیدگی (بین +۱ و -۱) برای تمامی متغیرها نشان داد که تمامی متغیرهای بررسی‌شده دارای توزیع نرمال می‌باشند.

پیش‌بینی مقاومت برشی خاک با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی و رگرسیون چند متغیره

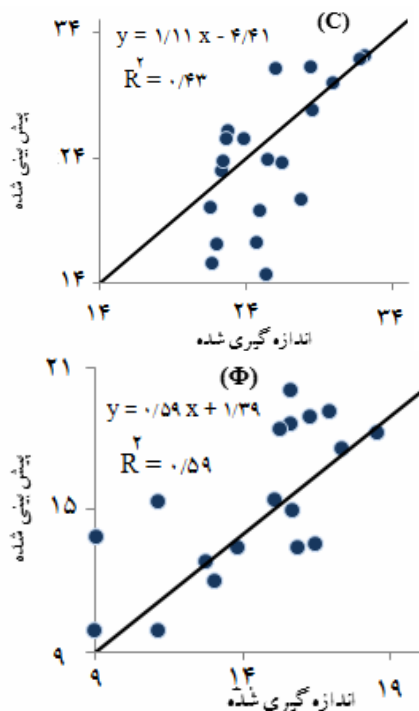
دو روش مدل‌سازی MLR و ANNs برای پیش‌بینی هر یک از پارامترهای مقاومت برشی مورد بررسی و آزمون قرار گرفتند. انتخاب بهترین شبکه برای پیش‌بینی و مدل‌سازی پارامترهای مورد بررسی بر اساس کم‌ترین مقدار RMSE و بیش‌ترین مقدار R² انجام شد. تابع محرک استفاده‌شده برای تمامی مدل‌سازی‌های انجام‌شده توسط شبکه عصبی، Tansing می‌باشد.

۲۰ نرون در لایه پنهان و ۱۰۰۰۰ تکرار بهینه و یک لایه خروجی شامل پارامتر چسبندگی خاک (c) می‌باشد. همچنین در مدل بدست-آمده توسط شبکه عصبی برای پیش‌بینی پارامتر زاویه اصطکاک داخلی (φ)، ۳۰ نرون در لایه پنهان و ۱۰۰۰۰ تکرار بهینه و یک لایه خروجی شامل پارامتر φ می‌باشد (جدول ۲).

جدول ۳ نتایج مربوط به مدل‌سازی به روش MLR را برای برقراری ارتباط خطی بین ویژگی‌ها و پارامترهای مقاومت برشی خاک سطحی نشان می‌دهد. به منظور ارزیابی و مقایسه عملکرد روش‌های MLR و ANNs برای پیش‌بینی و مدل‌سازی پارامترهای c و φ از R² و RMSE و ترسیم مقادیر اندازه‌گیری‌شده در برابر مقادیر پیش-بینی‌شده استفاده شد.



شکل ۶- شکل اعتبارسنجی مقادیر پیش‌بینی شده پارامترهای ϕ (°) و c (hPa) در برابر مقادیر اندازه‌گیری شده در مدل‌سازی توسط ANNs در منطقه مورد مطالعه (خط موجود در شکل‌ها خط ۱:۱ است).



شکل ۷- شکل اعتبارسنجی مقادیر پیش‌بینی شده پارامترهای ϕ (°) و c (hPa) در برابر مقادیر اندازه‌گیری شده در مدل‌سازی توسط رگرسیون چندمتغیره خطی در منطقه مورد مطالعه (خط موجود در شکل‌ها خط ۱:۱ است).

جدول ۱- توصیف آماری ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک و برخی پارامترهای ورودی در مدل‌سازی در ۱۰۰ نقطه نمونه برداری شده

متغیرهای مستقل و وابسته	واحد	میانگین	میان	ضریب تغییرات	انحراف معیار	کمینه	بیشینه	چولگی	کشیدگی
چسبندگی (c)	hPa	۲۵/۳	۲۵/۷	-۰/۲۵	۶/۵	۸/۴	۴۱	-۰/۸۱	-۰/۰۹
زاویه اصطکاک (phi)	(°)	۱۲/۵	۱۱/۵	-۰/۴۶	۵/۸	-۰/۷	۳۰/۱	۰/۷۴	-۰/۶۵
رطوبت کل	(%)	۳۶/۵	۳۲/۹	-۰/۳۰	۱۱/۰۰	۲۰/۳	۶۲/۴	۰/۶۰	-۰/۵۰
شن	(%)	۳۰/۳	۳۹/۰	-۰/۳۲	۹/۷۰	۱۴/۶	۴۸/۱	۰/۲۱	-۰/۹۵
رطوبت ریز	(%)	۱۸/۳	۱۶/۹	-۰/۳۴	۶/۳۰	۴/۷	۲۹/۷	-۰/۰۱	-۰/۹۲
نسبت رطوبت ریز به کل رطوبت	-	۰/۵	۰/۵	-۰/۲۶	۰/۸۲	۰/۲۳	۰/۷۳	۰/۳۳	-۰/۵۱
سنگریزه	(%)	۳۳/۴	۳۲/۰	-۰/۳۸	۹/۰۶	۹/۰	۴۸/۰	۰/۷۳	-۰/۰۹
ماده آلی	(%)	۱/۹	۱/۵	-۰/۶۳	۱/۲۰	۰/۲۰	۴/۸۰	۰/۶۳	-۰/۶۴
آهک	(%)	۲۶/۰	۱۷/۵	-۰/۵۰	۱۳/۰۰	۰/۹۸	۶۲/۵۰	۰/۳۰	-۰/۲۶
چگالی ظاهری	T Mg/m	۱/۳	۱/۳	-۰/۱۰	۰/۸۳	۰/۹۸	۱/۹۰	۰/۹۱	۰/۳۶
NDVI	-	-۰/۰۵	-۰/۰۱	-۰/۲۰	-۰/۰۱	-۰/۱۳	۰/۳۱	-۰/۲۸	-۰/۷۱
چگالی ظاهری نسبی	-	۰/۸	۰/۸	-۰/۱۱	۰/۰۹	۰/۵۷	۱/۱۶	۰/۸۴	-۰/۰۲

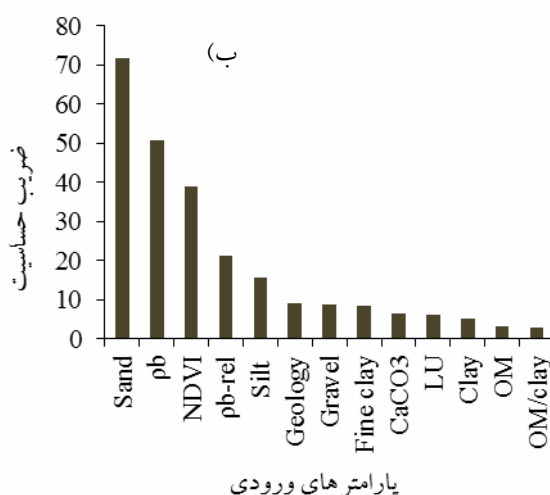
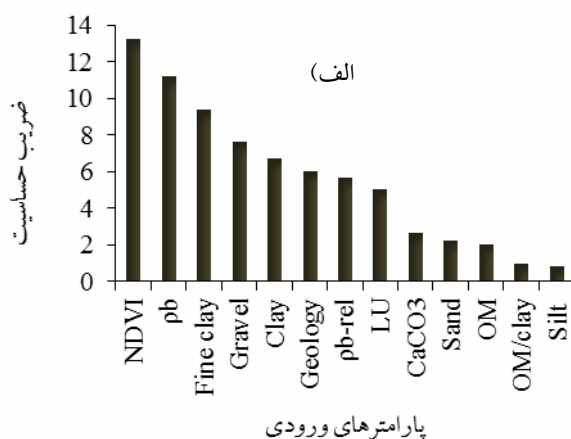
NDVI : شاخص پوشش گیاهی

در مدل‌سازی شبکه عصبی انجام شده و مقادیر ضریب حساسیت متغیرها محاسبه گردید. هیستوگرام تجزیه حساسیت برای پارامترهای c و ϕ به ترتیب در شکل‌های ۸-الف و ۸-ب نشان داده شده است. همان‌طور که شکل ۸-الف نشان می‌دهد، تنها دو پارامتر نسبت OM/clay و میزان سیلت دارای حساسیت کم‌تر از ۱ هستند؛ بنابراین این دو ورودی در تغییرپذیری میزان چسبندگی خاک سطحی نقش مؤثری ندارند. ولی شاخص پوشش گیاهی، چگالی ظاهری و میزان رس ریز نیز از جمله فاکتورهایی هستند که بیش‌ترین تأثیر را بر پیش‌بینی میزان چسبندگی خاک دارند. پیش‌بینی c در این منطقه همچنین به دیگر پارامترها شامل درصد سنگ‌ریزه و رس، نوع ماده مادری، چگالی ظاهری نسبی، نوع کاربری اراضی و تا حدود کمی به کربنات کلسیم، شن و درصد ماده آلی خاک بستگی دارد.

بسالت‌پور و همکاران (۵) با کاربرد مدل‌های MLR و ANNs در تخمین بخش چسبندگی (c) مقاومت برشی خاک سطحی، به آزمون و مقایسه این روش‌ها پرداختند. آن‌ها در این مطالعه از NDVI، شن ریز، ماده آلی، کربنات کلسیم و رس به عنوان پارامترهای ورودی به مدل‌ها استفاده کرده و دریافتند که MLR ۱۶/۸ درصد، و ANNs ۷۳/۹ درصد از تغییرات c را توجیه می‌نمایند. آن‌ها همچنین بیان داشتند که توانایی ANNs در بررسی روابط غیرخطی بسیار بیش‌تر از روش MLR می‌باشد و این عامل سبب حصول نتیجه بهتر در پیش‌بینی مقاومت برشی توسط شبکه عصبی شده است.

نتایج تجزیه حساسیت

در این مرحله فرآیند تجزیه حساسیت به روش StatSoft برای مدل‌های برتر تخمینی دو پارامتر c و ϕ نسبت به متغیرهای ورودی



شکل ۸- هیستوگرام ضرایب حساسیت چسبندگی (c) (الف)، زاویه اصطکاک داخلی (ϕ) (ب) خاک سطحی؛ در آن، Clay: درصد رس، CaCO_3 : درصد کربنات کلسیم، Fine clay: درصد رس ریز، Geology: نوع ماده مادری، Gravel: درصد سنگ‌ریزه، NDVI: شاخص نرمال‌شده پوشش گیاهی، OM: درصد مواد آلی، OM/clay: نسبت ماده آلی به کل رس، Sand: درصد شن، Silt: درصد سیلت، p_b : چگالی ظاهری، و p_{b-rel} : چگالی ظاهری نسبی می‌باشند.

(۱۸) نیز به پیش‌بینی c توسط ANNs پرداخته و پس از انجام تجزیه حساسیت دریافتند که شیب و NDVI از مهم‌ترین ویژگی‌های لازم جهت پیش‌بینی c محسوب می‌شوند. بسالت‌پور و همکاران (۵) از شبکه عصبی مصنوعی برای پیش‌بینی مقاومت برشی خاک سطحی استفاده کرده و بیان داشتند که شاخص پوشش گیاهی یکی از مهم‌ترین پارامترها برای پیش‌بینی مقاومت برشی خاک می‌باشد.

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که شاخص پوشش گیاهی (NDVI)، چگالی ظاهری و میزان رس ریز فاکتورهایی هستند که بیش‌ترین تأثیر را بر میزان چسبندگی خاک (c) در منطقه سمیرم دارند. همچنین نوع کاربری زمین، کربنات کلسیم، شن و درصد ماده آلی دارای کم‌ترین تأثیر بر چسبندگی خاک سطحی بوده‌اند. تنها دو پارامتر نسبت OM/clay و میزان سیلت دارای حساسیت کم‌تر از ۱ بوده و بنابراین در تغییرپذیری میزان چسبندگی خاک سطحی نقش مؤثری ندارند. نتایج در مورد پارامتر ϕ نشان داد که میزان شن، چگالی ظاهری و شاخص پوشش گیاهی تأثیرگذارترین عوامل بر مقاومت اصطکاکی خاک سطحی می‌باشند. همچنین نسبت OM/clay و میزان ماده آلی دارای کم‌ترین تأثیر بر زاویه اصطکاک داخلی بوده‌اند. همچنین نتایج مقایسه روش‌های مدل‌سازی در این پژوهش، نشان‌دهنده دقت مناسب شبکه عصبی مصنوعی نسبت به رگرسیون چندمتغیره در پیش‌بینی پارامترهای مقاومت برشی خاک است. توانایی زیاد شبکه عصبی در استخراج روابط پیچیده غیرخطی بین پارامترها، برای این تکنیک امکان مدل‌سازی بهتر و دقیق‌تر مقاومت برشی خاک سطحی در منطقه مورد بررسی را فراهم می‌کند.

با توجه به شکل ۸-ب، پارامتر ϕ به تمامی فاکتورهای ورودی حساسیت نشان داده است. بنابراین تمامی پارامترهای ورودی تأثیر معنی‌داری بر دقت پیش‌بینی مدل داشته‌اند. با این وجود میزان شن، چگالی ظاهری و شاخص پوشش گیاهی دارای بیش‌ترین تأثیر بوده‌اند. همچنین نسبت OM/clay و میزان ماده آلی دارای کم‌ترین تأثیر بر زاویه اصطکاک داخلی بوده‌اند.

با توجه به نتایج بدست‌آمده می‌توان بیان کرد که در میان ویژگی‌های خاک، توزیع اندازه ذرات و چگالی ظاهری تأثیرگذارترین ویژگی‌ها بر پارامترهای مقاومت برشی خاک سطحی در منطقه سمیرم می‌باشند. این مسئله می‌تواند به هم‌بستگی زیاد مقاومت برشی با مشخصه‌های بافت خاک مربوط باشد. هورن و همکاران (۱۴) بیان کردند که تغییرات مقاومت برشی در خاک‌های زراعی قویاً به شکل و اندازه ذرات شن خاک بستگی دارد. شاینبرگ و همکاران (۲۸) گزارش کردند که توزیع اندازه ذرات مهم‌ترین ویژگی ذاتی تأثیرگذار بر مقاومت برشی خاک می‌باشد. لئونارد و ریچارد (۲۰)، نیز دریافتند که c و ϕ تحت تأثیر بافت خاک می‌باشند.

همان‌طور که نتایج شکل ۸ نشان می‌دهد، پس از توزیع اندازه ذرات، چگالی ظاهری و چگالی ظاهری نسبی از مهم‌ترین فاکتورها جهت پیش‌بینی پارامترهای مقاومت برشی خاک سطحی در منطقه مورد مطالعه شناخته شدند. همچنین الیوت و همکاران (۶) و لی و همکاران (۲۱) نیز بیان کردند که مقاومت برشی خاک سطحی تحت تأثیر چگالی ظاهری خاک می‌باشد.

همچنین نتایج تجزیه حساسیت نشان داد که در منطقه مورد مطالعه شاخص نرمال شده پوشش گیاهی (NDVI) یکی از مهم‌ترین پارامترها در پیش‌بینی مقاومت برشی خاک، به ویژه c ، می‌باشد. فان و سو (۷)، فرانتی و همکاران (۱۰)، و لئونارد و ریچارد (۲۰) نیز بیان کردند که پوشش گیاهی از طریق شبکه ریشه‌ای خود نقش بسیار مهمی در مقاومت برشی و پایداری خاک دارد. خلیل‌مقدم و همکاران

منابع

- ۱- خلیل‌مقدم ب. ۱۳۸۸. برآورد مقاومت برشی، هدایت هیدرولیکی اشباع و نفوذپذیری خاک با استفاده از توابع انتقالی خاک و شبکه عصبی مصنوعی. پایان‌نامه دکتری خاکشناسی. دانشکده کشاورزی. دانشگاه صنعتی اصفهان.
- ۲- علوی‌پناه ک. ۱۳۸۲. کاربرد سنجش از دور در علوم زمین (علوم خاک). انتشارات دانشگاه تهران.
- ۳- گروه کارشناسان. ۱۳۷۷. طرح مرتع‌داری سرتنگ شهرستان سمیرم. اداره مرتع‌داری واحد تهیه طرح‌های مرتع‌داری. اداره کل منابع طبیعی استان اصفهان.
- ۴- وفائیان م. ۱۳۷۶. خواص مهندسی خاک. نشر ارکان اصفهان.
- 5- Besalatpour A., Hajabbasi M.A., Ayoubi S., Afyuni M., Jalalian A. and Schulin R. 2012. Soil shear strength prediction using intelligent systems: artificial neural networks and an adaptive neuro-fuzzy inference system. Soil Sci. Plant Nutr. 58: 149-160.
- 6- Elliott W., Liebenow A., Laflen J. and Kohl K. 1989. A Compendium of Soil Erodibility Data from Wepp

- Cropland Soil Field Erodibility Experiments 1987 and 1988.
<http://topsoil.nserl.purdue.edu/nserlweb/weppmain/comp/comp.html>.
- 7- Fan C.C. and Su C.F. 2008. Role of roots in shear strength of root-reinforced soils and with high moisture content. *Ecol. Eng.* 33: 157–166.
 - 8- Florineth F. 2005. Stato dell'arte dell'ingegneria naturalistica per il consolidamento dei fenomeni franosi. *Convegno Applicazioni delle tecniche di ingegneria naturalistica nei settori infrastrutturali e del territorio*. Bologna, Giugno. pp 23–24.
 - 9- Franti T.G., Laflen J.M. and Watson D.A. 1999. Predicting soil detachment from high discharge concentrated flow. *Trans. ASAE*. 42: 329–335.
 - 10- Franti T.G., Laflen J.M. and Watson D.A. 1985. Soil erodibility and critical shear under concentrated flow. *ASAE Summer Meet. The Ohio State University, Columbus, OH, USA*. 256 pages.
 - 11- Gee G.W. and Bauder J.W. 1986. Particle Size Analysis. In: Klute, A. (Ed.), *Methods of Soil Analysis: Part 1. Physical and Mineralogical Methods*. Agronomy Handbook, No 9. ASA/SSSA, Madison, WI, pp. 383–411.
 - 12- Goktepe A.B., Altun S., Altintas G. and Tan O. 2008. Shear strength estimation of plastic clays with statistical and neural approaches. *Build. Environ.* 43: 849–860.
 - 13- Habibagahi G. and Bamdad A. 2003. A neural network framework for mechanical behavior of unsaturated soils. *Can. Geotech. J.* 40: 684–693.
 - 14- Horn R., Fleige H. and Richter F.H. 2005. Prediction of mechanical strength of arable soils and its effects on physical properties at various map scales. *Soil Till. Res.* 82: 47–56.
 - 15- Johnson C.E., Grisso R.D., Nichols T.A. and Bailey A.C. 1987. Shear measurement for agricultural soils-A Review. *Trans. ASAE*. 30: 935–938.
 - 16- Jones C.A. 1983. Effect of soil texture on critical bulk densities for root growth. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 47: 1208–1211.
 - 17- Kalkan E., Akbulut S., Tortum A. and Celik S. 2009. Prediction of the unconfined compressive strength of compacted granular soils by using inference systems. *Environ. Geol.* 58: 1429–1440.
 - 18- Khalilmoghadam B., Afyuni M., Abbaspour K.C., Jalalian A., Dehghani A.A. and Schulin R. 2007. Estimation of surface shear strength in Zagros region of Iran - A comparison of artificial neural networks and multiple-linear regression models. *Geoderma*. 153: 29–36.
 - 19- Keller T. and Håkansson I. 2010. Estimation of reference bulk density from soil particle size distribution and soil organic matter content. *Geoderma*. 153: 398–406.
 - 20- Léonard J. and Richard G. 2004. Estimation of runoff critical shear stress for soil erosion from soil shear strength. *Catena*. 57: 233–249.
 - 21- Ley G.J., Mullins C.A. and Lal R. 1993. Effects of soil properties on the strength of weakly structured tropical soils. *Soil Till. Res.* 28: 1–13.
 - 22- Liu J., Goering C.E. and Tian L. 2001. A neural network for setting target yields. *Am. Soc. Agri. Bio. Eng.* 44: 705–713.
 - 23- Luk S.H. and Hamilton H. 1986. Experimental effects of antecedent moisture and soil strength on erosion of two Luvisols, Ontario. *Geoderma*. 37: 29–43.
 - 24- Merz W. and Bryan R. 1993. Critical conditions for rill initiation on sandy loam brunisols: laboratory and field experiments in southern Ontario, Canada. *Geoderma*. 57: 357–385.
 - 25- Nelson D.W., and Sommers L.P. 1986. Total carbon, organic carbon and organic matter. In: *Methods of Soil Analysis: Part 2. Chemical Methods* (ed. A.L. Page), pp. 539–579. *Agronomy Handbook No. 9*, ASA/SSSA, Madison, WI.
 - 26- Nelson R.E. 1982. Carbonate and gypsum. In: *Methods of Soil Analysis: Part 2. Chemical Methods* (ed. A.L. Page), pp. 181–197. *Agronomy Handbook No. 9*, ASA/SSSA, Madison, WI.
 - 27- Raus G. and Govers G. 1988. Hydraulic and soil mechanical aspects of till generation on agricultural soils. *J. Soil Sci.* 39: 111–124.
 - 28- Shainberg I., Laflen J.M., Bradford J.M. and Norton L.D. 1994. Hydraulic flow and water quality characteristics in rill erosion. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58: 1007–1012.
 - 29- StatSoft I. 2004. *Electronic statistics textbook* (Tulsa, OK, USA), <http://www.statsoft.com/textbook/stathome.html>
 - 30- Wösten J.H.M., Pachepsky Ya.A., and Rawls W.J. 2001. Pedotransfer functions: Bridging the gap between available basic soil data and missing soil hydraulic characteristics. *J. Hydrol.* 251: 123–150.
 - 31- Zhang B., Zhao Q.G., Horn R. and Baumgartl T. 2001. Shear strength of surface soil as affected by soil bulk density and soil water content. *Soil Till. Res.* 59: 97–106.

Surface Shear Strength Modeling Using Soil and Environmental Attributes in Landscape Scale (Semirrom District, Isfahan Province)

Sh. Havaee¹ - S. Ayoubi^{2*} - M.R. Mosaddeghi³

Received: 24-05-2013

Accepted: 17-02-2014

Abstract

Soil surface shear strength is an important parameter for prediction of soil erosion, but its direct measurement is difficult, time-consuming and costly in the watershed scale. This study was done to predict soil surface shear strength using artificial neural networks (ANNs) and multiple linear regression (MLR) and to rank the most important soil and environmental attributes affecting the shear strength. A direct shear box was designed and constructed to measure *in situ* soil surface shear strength. The device can determine two soil shear strength parameters i.e. cohesion (c) and angle of internal friction (ϕ). The study area (3500 km²) was located in Semirrom region, Isfahan province. Soil surface shear strength was determined using the shear box at 100 locations. Soil samples were also collected from 0-5 cm layer of the same 100 locations at which the surface shear strength was measured using the shear box. Particle size distribution, fine clay content, organic matter content (OM), carbonate content, bulk density and gravel content were determined on the collected soil samples. Normalized difference vegetation index (NDVI), the type of land use and geology were also determined. The MLR and ANNs were used to model/predict soil surface shear strength (c and ϕ). In order to compare the modeling methods, coefficient of determination and root mean square errors were used as efficacy indices. The results showed that ANN models were more feasible in predicting soil shear strength parameters than MLR models due to capability of ANN models in deriving nonlinear and complex relations between the parameters. Results of sensitivity analysis for ANN models indicated that NDVI, bulk density and fine clay content are more effective parameters in predicting c in the studied region. Also it was found that sand content, bulk density and NDVI were more effective parameters and OM/clay ratio and organic matter content were less effective parameters in predicting ϕ in the region.

Keywords: Soil surface shear strength, Artificial neural network, Cohesion, Angle of internal friction, Sensitivity analysis

1- PhD Student, Department of Soil Science, College of Agriculture, Vali-e-Asr University (VRU), Rafsanjan, Iran

2,3- Associate Professors, Department of Soil Science, College of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

(* - Corresponding Author Email: ayoubi@cc.iut.ac.ir)