

اشتقاق توابع انتقالی برای برآورد پایداری خاکدانه‌های تر با استفاده از ابعاد فرکتالی ذرات و خاکدانه‌ها

شکراله اصغری^{۱*}، مجتبی علی محمدی^۲، عباس احمدی^۳، ناصر دواتگر^۴

تاریخ دریافت: ۹۵/۰۱/۱۴

تاریخ پذیرش: ۹۵/۰۸/۲۶

- ^۱ - دانشیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی
- ^۲ - دانشجوی سابق کارشناسی ارشد گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی
- ^۳ - استادیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز
- ^۴ - استادیار پژوهش موسسه تحقیقات برنج کشور، رشت
- * مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: shasghari@uma.ac.ir

چکیده

هدف از این پژوهش بررسی تأثیر ابعاد فرکتالی ذرات و خاکدانه‌ها به عنوان متغیرهای اضافی بر بهبود دقت برآورد میانگین وزنی قطر خاکدانه‌های تر (MWD_{wet}) با به‌کارگیری توابع انتقالی رگرسیونی و شبکه عصبی مصنوعی بود. به این منظور، تعداد ۹۰ نمونه خاک از اراضی زراعی، مرتعی و جنگلی استان اردبیل برداشته شد. توزیع اندازه ذرات اولیه خاک (۲-۰ mm) و خاکدانه‌ها (۷۵/۰-۴ mm) تعیین و به ترتیب مدل فرکتالی ینگ و همکاران و ریئو و اسپوزیتو به این توزیع‌ها برازش داده شد و ابعاد فرکتالی ذرات و خاکدانه‌ها به دست آمد. پارامتر MWD_{wet} نیز به روش الگوریتم اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که بین MWD_{wet} تر و ابعاد فرکتالی ذرات و خاکدانه‌ها به ترتیب همبستگی مثبت و منفی معنی‌دار وجود دارد. استفاده از بعد فرکتالی خاکدانه‌ها به عنوان یک متغیر ورودی باعث افزایش ضریب تبیین (R^2) از ۰/۷۱ به ۰/۸۰ در تابع رگرسیونی و از ۰/۷۸ به ۰/۹۵ در تابع شبکه عصبی در مرحله آموزش گردید. افزودن بعد فرکتالی خاکدانه‌ها به عنوان تخمین‌گر سبب افزایش اعتبار توابع ایجاد شده نگردید. همچنین توابع ایجاد شده با شبکه عصبی دارای دقت بیشتری نسبت به توابع رگرسیونی بودند به طوری که میزان R^2 در داده‌های سری آموزش برای تابع شبکه عصبی ۰/۹۵ و تابع رگرسیونی ۰/۸۰ به دست آمد.

واژه‌های کلیدی: رگرسیون، شبکه عصبی مصنوعی، کاربری اراضی، میانگین وزنی قطر خاکدانه‌های تر، نظریه فرکتالی

Derivation of Pedotransfer Functions for Estimating Wet Aggregate Stability Using Fractal Dimensions of Particles and Aggregates

Sh Asghari^{1*}, M Alimohammadi², A Ahmadi³, N Davatgar⁴

Received: 02 April 2016

Accepted: 16 November 2016

¹ Assoc. Prof., Dept. of Soil Sciences and Engin., Faculty of Agric., and Natural Resources, Univ., of Mohaghegh Ardabili, Iran

² Former M.Sc. Student, Dept. of Soil Sciences and Engin., Faculty of Agric., and Natural Resources, Univ., of Mohaghegh Ardabili, Iran

³ Assis. Prof., Dept. of Soil Sciences and Engin., Faculty of Agric., Univ., of Tabriz, Iran

⁴ Assis. Prof., Rice Research Institute, Rasht, Iran

* Corresponding Author, Email: shasghari@uma.ac.ir

Abstract

The aim of this study was to investigate the effect of fractal dimensions of particles (D_y) and aggregates (D_f) as extra inputs on improvement of the estimation accuracy of wet mean weight diameter of aggregates (MWD_{wet}) using regression and artificial neural network (ANN) pedotransfer functions (PTFs). Consequently, 90 soil samples were taken from agricultural, range and forest lands of Ardabil Province. Yang et al. and Rieu & Sposito fractal models were fitted to the primary particles (0-2 mm) and aggregates (0-4.75 mm) size distribution data, respectively, and the D_y and D_f values were obtained. The MWD_{wet} value was also determined by the wet sieving method. The results indicated that there was a significant positive correlation between wet MWD_{wet} and D_y values and a negative correlation between wet MWD_{wet} and D_f values. Using D_f as an input variable increased the R^2 criteria from 0.71 to 0.80 in regression-PTF and from 0.78 to 0.95 in ANN-PTF at training stage. Adding D_f as a predictor could not increase the validity of the developed PTFs. The PTF developed by ANN had higher accuracy than the PTF developed by regression method. The R^2 values for training stage in ANN-PTF with using of D_f as predictor was 0.95 and in regression-PTF was 0.80.

Keywords: Artificial neural network, Fractal theory, Land use, Regression, Wet Mean weight diameter of aggregates,

رگرسیون و شبکه های عصبی مصنوعی^۲ (ANN) برای تخمین MWD_{wet} با دقت قابل قبول سودمند خواهد بود. علی جان پور شلمانی و همکاران (۱۳۹۰) از ۱۰۰ نمونه خاک برداشته شده از اراضی جنگلی استان گیلان برای برآورد پایداری خاکدانه ها بر مبنای میانگین هندسی قطر^۳ (GMD) خاکدانه ها استفاده کردند. آن ها بر اساس

مقدمه

از میانگین وزنی قطر خاکدانه های تر^۱ (MWD_{wet}) در ارزیابی وضعیت پایداری ساختمان خاک استفاده می شود. اندازه گیری مستقیم این ویژگی در آزمایشگاه کاری پرزحمت و زمان بر است. همچنین این ویژگی دارای تغییرات مکانی و زمانی وسیع در مقیاس مزرعه-ای می باشد لذا استفاده از روش های غیرمستقیم مانند

²- Artificial neural networks

³- Geometric mean diameter

¹- Wet mean weight diameter of aggregates

هدایت هیدرولیکی و خاکدانه‌های درشت ($> 0.25 \text{ mm}$) همبستگی منفی و با جرم مخصوص ظاهری و تخلخل کل خاک همبستگی مثبت دارد.

در مجموع بررسی منابع نشان داد اگرچه از شاخص بعد فرکتالی خاکدانه‌ها در مدل‌سازی برخی ویژگی‌های دیریافت خاک استفاده شده است اما این مطالعات محدود بوده و براساس دانسته‌های در دسترس از ابعاد فرکتالی ذرات و خاکدانه‌ها در برآورد پایداری خاکدانه‌ها در آب (MWD_{wet}) به‌ویژه در شرایط کاربری‌های مختلف اراضی و منطقه اقلیمی خاص استان اردبیل استفاده نشده است. بنابراین پژوهش حاضر با اهداف زیر صورت پذیرفت: (۱) ارزیابی تأثیر کاربرد شاخص‌های ابعاد فرکتالی ذرات و خاکدانه‌ها به‌عنوان متغیرهای زودیاقت جدید بر دقت برآورد (MWD_{wet}) (۲) مقایسه دقت توابع انتقالی ایجاد شده با روش رگرسیونی و شبکه‌های عصبی مصنوعی.

مواد و روش‌ها

نمونه‌برداری و تعیین ویژگی‌های خاک

برای انجام این پژوهش تعداد ۹۰ نمونه خاک به‌طور تصادفی از سه منطقه واقع در استان اردبیل (۳۰ نمونه از هر منطقه) شامل اراضی جنگلی فندقلو (مختصات جغرافیایی ۳۸ درجه و ۲۳ دقیقه عرض شمالی و ۴۸ درجه و ۳۲ دقیقه طول شرقی)، اراضی زراعی دشت اردبیل (مختصات جغرافیایی ۳۸ درجه و ۱۵ دقیقه عرض شمالی و ۴۸ درجه و ۱۶ دقیقه طول شرقی) و اراضی مرتعی سرعین (مختصات جغرافیایی ۳۸ درجه و ۹ دقیقه عرض شمالی و ۴۸ درجه و ۴ دقیقه طول شرقی) برداشته شد. نمونه‌های خاک با کمترین دست‌خوردگی و احتیاط کامل به مقدار حدود ۳ کیلوگرم و نمونه‌های خاک دست‌نخورده با استفاده از استوانه‌های فولادی به قطر و ارتفاع ۵ سانتی‌متر از عمق ۱۰-۰ سانتی‌متر خاک برداشته شد. نمونه‌های دست‌خورده در آزمایشگاه هوا خشک گردید سپس

آماره‌های ریشه دوم میانگین مربعات خطا^۴ (RMSE) و برتری نسبی^۵ (RI) نتیجه گرفتند که توابع انتقالی شبکه عصبی مصنوعی با متغیرهای ورودی مقاومت مکانیکی خاک، درصد شن، pH و کربنات کلسیم معادل برای برآورد GMD نسبت به توابع انتقالی رگرسیونی برتری دارد. نتایج پژوهش امیر عابدی (۱۳۹۱) در خاک‌های زراعی دشت اردبیل نشان داد توابع انتقالی شبکه عصبی در مقایسه با توابع رگرسیونی به‌علت داشتن R^2 بالاتر (۰/۸۸ در مقابل ۰/۸۱) و RMSE پایین‌تر (۰/۴۲ در مقابل ۰/۵۴) با متغیرهای ورودی کربن آلی، رس و جرم مخصوص ظاهری از دقت بالاتری در برآورد MWD_{wet} برخوردار می‌باشند. اصغری و همکاران (۱۳۹۵) گزارش کردند که متغیرهای مستقل نسبت رس به سیلت، کربن آلی و جرم مخصوص ظاهری نسبی تخمین‌گرهای مناسبی برای برآورد MWD_{wet} در اراضی جنگلی فندقلوی اردبیل می‌باشد. سپاسخواه و همکاران (۲۰۰۰) تأثیر مدیریت‌های مختلف را بر برخی شاخص‌های ساختمان خاک نظیر بعد فرکتالی اندازه-تعداد (D_n) و اندازه-جرم (D_m) خاکدانه‌ها و نیز MWD خشک بررسی نموده و مشاهده کردند که با افزودن مالچ به خاک، MWD خشک افزایش ولی D_n و D_m کاهش یافتند. آن‌ها بیان کردند که D_m معیار مناسب‌تری در مقایسه با MWD خشک در توصیف ساختمان خاک است. گولسر (۲۰۰۶) گزارش نمود که افزایش کربن آلی و MWD و نیز کاهش جرم مخصوص ظاهری خاک از طریق افزایش تعداد خاکدانه‌های درشت موجب کاهش بعد فرکتالی خاکدانه‌ها گردید. زوو و همکاران (۲۰۰۷) نیز نشان دادند که بعد فرکتالی خاکدانه‌ها معیار مناسب‌تری برای توصیف توزیع اندازه خاکدانه‌ها در مقایسه با MWD خشک و GMD می‌باشد. نتایج پژوهش ذوالفقاری و همکاران (۲۰۱۶) نیز نشان داد که ابعاد فرکتالی خطی (D_l) و غیرخطی (D_{nl}) با MWD ، ماده آلی،

^۴- Root mean square error

^۵- Relative importance

ریئو و اسپوزیتو (۱۹۹۱) با جزئی اصلاحات در اندازه الک‌ها، طبق روابط زیر محاسبه شد:

$$N(d_i) = \frac{M(d_i)}{d_i^3 \delta_i} \quad i=1,2,3, \dots \quad [1]$$

$$N(> d_i) = k(d_i)^{-D_f} \quad [2]$$

در روابط بالا، $N(d_i)$ ، $M(d_i)$ ، d_i و δ_i به ترتیب تعداد، جرم (g)، میانگین حسابی قطر (cm) و چگالی ($g \text{ cm}^{-3}$) خاکدانه‌ها در هر کلاس اندازه نام می‌باشد. کلاس ۱ شامل خاکدانه‌های بزرگ‌ترین کلاس اندازه است. $N(> d_i)$: تعداد تجمعی خاکدانه‌های بزرگ‌تر از d_i ، D_f و k به ترتیب شیب و عرض از مبدأ خط رگرسیونی $N(> d_i)$ در مقابل d_i در مقیاس لگاریتمی است.

توسعه توابع انتقالی رگرسیونی و شبکه عصبی مصنوعی

داده‌ها در نرم‌افزار Neurosolution 5 به‌طور تصادفی به دو گروه آموزشی (۷۲ داده) و آزمون (۱۸ داده) تقسیم شدند. ابتدا همبستگی جزء بین متغیرهای مستقل یا زودیافت تعیین شد. در صورت عدم وجود همبستگی بین آن‌ها، مدل رگرسیونی برای داده‌ها برازش داده شد. در صورت وجود همبستگی خطی بین متغیرهای مستقل، استفاده هم‌زمان از آن‌ها به‌عنوان تخمین‌گر در یک مدل رگرسیونی ممکن است موجب بروز خطای هم‌راستایی خطی چندگانه گردد. برای تعیین وجود هم‌راستایی چندگانه یا وجود رابطه خطی بین متغیرهای مستقل از آزمون بارلت استفاده شد (احمدی ۱۳۸۸). در این پژوهش از رگرسیون گام به گام ریج در نرم‌افزار Statistica با روش پس‌خور گام به گام^۷ برای برآورد MWD_{wet} از روی متغیرهای زودیافت ورودی شامل شن، سیلت، رس، d_g و σ_g ، D_p ، D_b ، n ، کربن آلی، کربنات کلسیم معادل، D_f و D_y استفاده شد. مدل شبکه عصبی مصنوعی ایجاد شده برای برآورد MWD_{wet} بر اساس متغیرهای ورودی فوق‌الذکر نیز از

بخشی از آن، به‌منظور اندازه‌گیری برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی از الک ۲ mm عبور داده شد. بخشی دیگر برای اندازه‌گیری میانگین وزنی قطر خاکدانه‌های تر (MWD_{wet}) از الک ۴/۷۵ mm عبور داده شد. جرم مخصوص ظاهری (D_b) به‌روش استوانه (بلک و هارتگ ۱۹۸۶a) در نمونه‌های دست‌نخورده تعیین گردید. منحنی توزیع اندازه ذرات^۶ (PSD) شن، سیلت و رس به‌روش هیدرومتر در قرائت ۹ زمانه (گی و اور ۲۰۰۲)، جرم مخصوص حقیقی (D_p) به‌روش پیکنومتر (بلک و هارتگ ۱۹۸۶b)، کربن آلی به‌روش والکلی و بلک (۱۹۳۴)، کربنات کلسیم معادل به‌روش تیتراسیون با اسید (نلسون ۱۹۸۲) اندازه‌گیری شد. تخلخل کل (n) از روی داده‌های جرم مخصوص ظاهری و حقیقی ($n = 1 - \frac{D_b}{D_p}$) محاسبه گردید. میانگین هندسی قطر (d_g) و انحراف استاندارد هندسی (σ_g) ذرات اولیه خاک از روی درصدهای شن، سیلت و رس محاسبه شد (کمپل ۱۹۸۵). میانگین وزنی قطر خاکدانه‌های تر (MWD_{wet}) به‌روش یودر (۱۹۳۶) اصلاح شده با استفاده از دستگاه الک تر با قطر سوراخ الک‌ها به ترتیب از بالا به پایین ۲، ۱، ۰/۵، ۰/۲۵ و ۰/۱۰۶ میلی‌متر اندازه‌گیری شد. برای این منظور ۵۰ گرم خاکدانه گذرانده شده از الک ۴/۷۵ mm بر روی سری الک‌ها در داخل سطل آب مقطر به مدت ۵ دقیقه با شدت ۳۰ نوسان در هر دقیقه و به ارتفاع ۳۷ mm به‌طور عمودی تکان داده شد. شاخص MWD_{wet} پس از تصحیح وزن آون خشک خاکدانه‌ها به وزن شن محاسبه گردید. بعد فرکتالی ذرات خاک (D_y) از روی داده‌های PSD و با استفاده از مدل یانگ و همکاران (۱۹۹۳) به‌دست آمد. بعد فرکتالی خاکدانه‌ها (D_f) در خاکدانه‌های کوچک‌تر از ۴/۷۵ mm که بر روی سری الک‌های ۲، ۱، ۰/۵، ۰/۲۵ و ۰/۱۰۶ میلی‌متر در روش الک خشک غربال شده بودند با به‌کارگیری مدل

^۱- Backward stepwise

^۶- Particle size distribution

مثل R^2 ، RMSE و AIC نمی‌توانند میزان صحت برآورد دو تابع را از نظر آماری مقایسه کنند (بیات و همکاران ۲۰۱۵).

نتایج و بحث

جدول ۱ نشان می‌دهد که در داده‌های آموزش مقادیر شن از ۴۵/۰۱ تا ۹۹/۵۲ درصد، سیلت از ۰/۴۸ تا ۴۹/۴۳ درصد، رس از ۰/۰۰ تا ۷/۶۵ درصد، جرم مخصوص ظاهری از ۰/۶۴ تا $۱/۴۲ \text{ g cm}^{-3}$ و جرم مخصوص حقیقی از ۱/۲۳ تا $۲/۶۹ \text{ g cm}^{-3}$ متغیر بود. مقادیر پایین جرم مخصوص ظاهری و حقیقی مربوط به خاک‌های اراضی جنگلی فندقلو می‌باشد که میزان کربن آلی در آن‌ها بالا بود. نتایج مشابهی در خصوص مقادیر این ویژگی‌ها توسط اصغری و همکاران (۱۳۹۴) و اصغری و همکاران (۲۰۱۶) در منطقه فندقلوی استان اردبیل گزارش گردیده است. دامنه تغییرات تخلخل کل از ۰/۳۰ تا $۰/۶۵ \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ، میانگین هندسی قطر ذرات از ۰/۱۱ تا ۱/۰۱ mm، انحراف معیار هندسی از ۱/۳۷ تا ۲۷/۱۵، کربن آلی از ۰/۰۹ تا ۶/۳۷ درصد و کربنات کلسیم معادل از ۰/۱۷ تا ۲۵/۵۳ درصد بود. در داده‌های آزمون نیز مقادیر شن از ۵۵/۹۳ تا ۹۷/۹ درصد، سیلت از ۱/۷۲ تا ۴۰/۱۱ درصد، رس از ۰/۲۱ تا ۷/۳۶ درصد، جرم مخصوص ظاهری از ۰/۵۴ تا $۱/۲۴ \text{ g cm}^{-3}$ و جرم مخصوص حقیقی از ۱/۳۷ تا $۲/۶۹ \text{ g cm}^{-3}$ در نوسان بود. دامنه تغییرات تخلخل کل از ۰/۳۹ تا $۰/۶۳ \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ، میانگین هندسی قطر از ۰/۱۶ تا ۰/۹۴ mm، انحراف معیار هندسی از ۲ تا ۲۶/۶۳، کربن آلی از ۰/۸۹ تا ۶/۱۱ درصد و کربنات کلسیم معادل از ۰/۱۸ تا ۲۳/۱۲ درصد بود. دامنه تغییرات بعد فرکتالی ذرات اولیه (D_y) از ۲/۲۵ تا ۲/۶۲ و بعد فرکتال خاکدانه‌ها (D_f) از ۱/۵۳ تا ۴/۵۳ در داده‌های سری آموزش به دست آمد. در داده‌های سری آزمون نیز دامنه تغییرات D_y از ۲/۲۸ تا ۲/۵۷ و D_f از ۱/۵۸ تا ۴/۵۱ بود. نتایج حاصل از این پژوهش در مورد ابعاد فرکتالی با یافته‌های بیات

نوع شبکه پیش‌خور تعمیم یافته^۱ با ساختار الگوریتم ۳ لایه دارای ۹ نرون در لایه پنهان و تابع فعال‌ساز تانژانت بود که با استفاده از نرم‌افزار Neurosolution 5 ایجاد گردید.

ارزیابی توابع انتقالی

برای ارزیابی صحت برآورد توابع انتقالی از آماره‌های مختلفی شامل ضریب تبیین (R^2)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین خطا^۲ (ME)، میانگین هندسی نسبت خطا^۳ (GMER)، انحراف معیار هندسی نسبت خطا^۴ (GSDER) و معیار اطلاعات آکائیک آکائیک (AIC) استفاده شد (احمدی ۱۳۸۸). هر چه در یک تابع انتقالی R^2 بیشتر، RMSE کمتر و ME به صفر نزدیک‌تر باشد تابع ارائه شده مناسب‌تر است. اگر مقدار آماره ME منفی باشد مدل دارای کم‌تخمینی و اگر مثبت باشد دارای بیش‌تخمینی است. آماره GMER نشان دهنده میزان انطباق بین مقادیر اندازه‌گیری و برآورد شده MWD_{wet} است. اگر GMER برابر یک باشد، نشان دهنده انطباق کامل بین مقادیر اندازه‌گیری و برآورد شده است. اگر GMER بزرگ‌تر از یک باشد بیان‌گر بیش تخمینی و اگر کوچک‌تر از یک باشد بیان‌گر کم-تخمینی است. آماره GSDER معیاری از پخشیدگی داده‌ها است اگر این آماره نزدیک به یک باشد نشان‌دهنده پخشیدگی کمتر و هر چه اختلاف از یک بیشتر باشد نشان‌دهنده انحراف بیشتر تخمین داده‌ها است. آماره AIC در بررسی قدرت پیش‌بینی توابع انتقالی کاربرد دارد، هرچه این معیار کوچک‌تر باشد مدل قدرت پیش‌بینی بالاتری دارد. برای آزمون این‌که آیا اختلاف بین دو تابع تخمین‌گر MWD_{wet} از نظر آماری معنی‌دار است یا نه از آزمون مورگان-گرنجر-نیوبولد^۵ (MGN) استفاده گردید (دی‌بولد و ماریانو ۲۰۰۲). سایر آماره‌ها

¹- Generalized feed forward

²- Mean error

³- Geometric mean error ratio

⁴- Geometric standard deviation of error ratio

⁵- Morgan-Granger-Newbold

مقادیر بعد فرکتالی خاکدانه‌ها را بین ۰/۶۷ تا ۰/۳۷ گزارش نمود. احمدی و همکاران (۲۰۱۱) بعد فرکتالی خاکدانه‌ها را در روش الک خشک بین ۲/۷۹ تا ۴/۴۰ به دست آوردند.

(۱۳۸۷) در ۱۴۶ نمونه خاک برداشته شده از مناطق مختلف غرب و شمال غرب ایران و نیز احمدی و همکاران (۲۰۱۱) در ۳۶ سری خاک از استان آذربایجان شرقی همخوانی دارد. بیات (۱۳۸۷) دامنه

جدول ۱- آماره‌های توصیفی متغیرهای اندازه‌گیری شده در داده‌های سری آموزش و سری آزمون.

متغیر	واحد	آموزش			آزمون				
		میانگین	کمینه	بیشینه	انحراف معیار	میانگین	کمینه	بیشینه	انحراف معیار
S	%	۷۹/۶۵	۴۵/۰۱	۹۹/۵۲	۰/۱۶	۸۱/۴۷	۵۵/۹۳	۹۷/۹	۰/۱۶
Si	%	۱۸/۳۱	۰/۴۸	۴۹/۴۳	۰/۶۴	۱۶/۴۴	۱/۷۲	۴۰/۱۱	۰/۷۴
C	%	۲/۰۴	۰/۰۰	۷/۶۵	۰/۷۹	۲/۰۸	۰/۲۱	۷/۳۶	۱/۰۱
d _g	mm	۰/۴۹	۰/۱۱	۱/۰۱	۰/۴۶	۰/۵۳	۰/۱۶	۰/۹۴	۰/۴۶
σ _g	-	۱۲	۱/۳۷	۲۷/۱۵	۰/۵۱	۱۰/۷۸	۲	۲۶/۶۳	۰/۶۷
D _b	g cm ⁻³	۱/۰۶	۰/۶۴	۱/۴۲	۰/۱۶	۰/۹۵	۰/۵۴	۱/۲۴	۰/۲۲
D _p	g cm ⁻³	۲/۶۳	۱/۲۳	۲/۶۹	۰/۱۸	۲/۰۹	۱/۳۷	۲/۶۹	۰/۲۲
n	cm ³ cm ⁻³	۰/۵۱	۰/۳۰	۰/۶۵	۰/۱۵	۰/۵۴	۰/۳۹	۰/۶۳	۰/۱۳
OC	%	۲/۲۷	۰/۰۹	۶/۳۷	۰/۷۸	۲/۹	۰/۸۹	۶/۱۱	۰/۷۴
CaCO ₃	%	۱۱/۳۶	۰/۱۷	۲۵/۵۳	۰/۷۵	۱۰/۰۲	۰/۱۸	۲۳/۱۲	۰/۸۶
D _y	-	۲/۴	۲/۲۵	۲/۶۲	۰/۰۳	۲/۳۹	۲/۲۸	۲/۵۷	۰/۰۳
D _f	-	۳/۲۱	۱/۵۳	۴/۵۳	۰/۱۸	۳/۲	۱/۵۸	۴/۵۱	۰/۲۸
MWD _{wet}	mm	۰/۸۴	۰/۲۶	۳	۰/۷۶	۱/۱۸	۰/۲۹	۲/۹۱	۰/۱۶

S: شن، Si: سیلت، C: رس، d_g: میانگین هندسی قطر ذرات، σ_g: انحراف استاندارد هندسی ذرات، D_b: جرم مخصوص ظاهری، D_p: جرم مخصوص حقیقی، n: تخلخل کل، OC: کربن آلی، CaCO₃: کربنات کلسیم معادل، D_y: بعد فرکتالی ذرات اولیه، D_f: بعد فرکتالی خاکدانه‌ها، MWD_{wet}: میانگین وزنی قطر خاکدانه‌های تر.

دامنه مجاز D می‌تواند برابر $0 \leq D \leq 3+r$ باشد (r پارامتر مقیاس است) و از آنجا که r همیشه مثبت است بنابراین بعد فرکتال بیش از ۳ نیز قابل تصور است. به عبارت دیگر بعد فرکتال خاکدانه وابسته به مقیاس بوده و بسته به حد بالایی r تعیین می‌گردد. مقادیر بزرگ D نیز شاید

در محاسبات بعد فرکتالی، مقادیر بیش از ۳ با فرضیات نظری سازگاری ندارد. پرفکت و همکاران (۱۹۹۳) مقادیر بعد فرکتالی (D) بزرگتر از ۳ را چنین توجیه می‌کنند که دامنه مجاز D برابر $0 \leq D \leq 3$ است اما اگر احتمال خرد شدن خاکدانه‌ها وابسته به مقیاس باشد

درشت، کاهش بعد فرکتالی خاکدانه با افزایش کربن آلی دور از انتظار نیست. پرفکت و کای (۱۹۹۱) گزارش کردند که با افزایش ماده آلی در خاک، خاکدانه‌های درشت افزایش پیدا کرده و در نتیجه بعد فرکتالی خاکدانه‌ها کاهش می‌یابد. بعد فرکتالی ذرات اولیه (D_v) بیشترین همبستگی مثبت معنی‌دار را با درصد رس ($r=0.769^{**}$) و منفی معنی‌دار را با درصد شن ($r=-0.56^{**}$) داشت. این موضوع قابلیت مدل فرکتالی را در شبیه‌سازی کلاس بافت خاک بیان می‌کند. این نتایج با یافته‌های احمدی و همکاران (۱۳۸۹) و بیات (۱۳۸۷) هم‌خوانی دارد. این محققان گزارش کردند که بعد فرکتالی ذرات اولیه خاک با رس و سیلت همبستگی مثبت و معنی‌دار و با شن همبستگی منفی و معنی‌دار دارد. میانگین وزنی قطر خاکدانه‌های تر (MWD_{wet}) بیشترین همبستگی منفی و معنی‌دار ($r=-0.82^{**}$) را با بعد فرکتالی خاکدانه‌ها (D_f) داشت این یافته بیان‌گر آن است که هرچه بعد فرکتالی خاکدانه‌ها بزرگ‌تر باشد اندازه خاکدانه‌ها کوچک‌تر بوده و MWD_{wet} کاهش می‌یابد. گولسر (۲۰۰۶) و ذوالفقاری و همکاران (۲۰۱۶) نیز رابطه همبستگی منفی بین بعد فرکتالی خاکدانه‌ها با MWD_{wet} به‌دست آوردند. همبستگی مثبت و معنی‌دار ($r=-0.24^{**}$) بین بعد فرکتالی ذرات اولیه خاک (D_v) با MWD_{wet} یافت شد؛ این نکته بیان‌گر آن است که با کاهش اندازه ذرات و افزایش فراوانی رس و سیلت در خاک، بعد فرکتالی ذرات افزایش و به دلیل نقش مثبت رس و سیلت در خاکدانه‌سازی، MWD_{wet} نیز افزایش یافته است. به عبارت دیگر خاک‌های ریز بافت دارای بعد فرکتالی ذرات اولیه کوچک‌تری هستند.

توابع انتقالی رگرسیونی

از بین ۱۰ متغیر زودیافت ورودی به تابع انتقالی ۱، تنها کربن آلی در بهترین معادله رگرسیونی وارد گردید (جدول ۲). دلیل عدم ورود سایر متغیرها در تابع ۱ علی‌رغم رابطه معنی‌دار آن‌ها با MWD_{wet} وجود هم‌راستایی بین آن‌ها بود. همچنین تابع انتقالی ۲ با وارد نمودن ۱۰ متغیر زودیافت تابع ۱ و نیز ابعاد فرکتالی

ناشی از خطای ایجاد شده توسط روش برازش و یا این‌که ناشی از وابسته بودن احتمال خرد شدن خاکدانه‌ها به اندازه خاکدانه باشد. مقادیر کوچک‌تر D_f بیان‌گر آن است که در توزیع اندازه خاکدانه‌ها، اجزای درشت حالت غالب دارند (احمدی و همکاران ۲۰۱۱).

مقادیر MWD_{wet} برای داده‌های سری آموزش از ۰/۲۶ تا ۳ mm و برای داده‌های سری آزمون از ۰/۲۹ تا ۲/۹۱ mm متغیر بود (جدول ۱). مقادیر بزرگ‌تر MWD_{wet} مربوط به خاک‌های اراضی جنگلی فندقلو می‌باشد که میزان کربن آلی آن‌ها بیشتر از سایر مناطق بود و مقادیر کوچک‌تر MWD_{wet} مربوط به اراضی دشت اردبیل است که میزان کربن آلی آن‌ها کمتر از بقیه اراضی تعیین گردید. در پژوهش‌های قبلی نیز میانگین MWD_{wet} برای اراضی دشت اردبیل برابر با ۰/۵۱ mm (امیرعابدی ۱۳۹۱) و اراضی جنگلی فندقلو برابر با ۱/۲۸ (اصغری و همکاران ۱۳۹۳) گزارش گردیده است. محدوده تغییرات بیشتر متغیرها و نیز میانگین آن‌ها در داده‌های آموزش و آزمون تقریباً یکسان می‌باشد (جدول ۱). با توجه به این که خاک‌های مورد مطالعه از سه منطقه با کاربری متفاوت نمونه برداری شده است، اختلاف زیاد مقادیر میانگین ویژگی‌های D_p ، D_b ، σ_g در داده‌های سری آموزش و آزمون می‌تواند به دلیل تفرق زیاد خاک‌ها از لحاظ ویژگی‌های اندازه گیری شده باشد. در هر دو سری آموزش و آزمون میانگین درصد شن بیشتر از رس و سیلت است و توزیع بافتی خاک-های مورد مطالعه نشان داد که بیشتر نمونه‌ها در کلاس‌های بافتی درشت تا متوسط قرار دارند. بنابراین متغیرهای زودیافت مرسوم و نیز ابعاد فرکتالی مورد استفاده در آموزش و آزمون توابع انتقالی رگرسیونی و شبکه عصبی از پراکنش و توزیع نسبتاً مناسبی برخوردار هستند و قابلیت کاربرد در برآورد MWD_{wet} توسط توابع انتقالی ایجاد شده را دارند.

همبستگی بین متغیرها

بعد فرکتالی خاکدانه‌ها (D_f) بیشترین همبستگی منفی و معنی‌دار را با کربن آلی ($r=-0.75^{**}$) نشان داد. با توجه به اثر مثبت کربن آلی در تشکیل خاکدانه‌های

در سری آزمون بیانگر بیش‌برآوردی MWD_{wet} توسط هر دو تابع ۱ و ۲ می‌باشد. مقادیر آماره AIC در هر دو سری آزمون و آموزش نیز برای تابع ۲ (با استفاده از D_f) کوچک‌تر از مقادیر آن برای تابع ۱ بوده که ارجحیت تابع ۲ را نسبت به تابع ۱ نشان می‌دهد. آماره GMER برای تابع ۲ (با استفاده از D_f) در داده‌های سری آموزش کمتر از مقادیر آن برای تابع ۱ بوده که نشان می‌دهد تابع ۲ دارای کم‌برآوردی بیشتری نسبت به تابع ۱ است. آماره GSDER نیز در دو سری آموزش و آزمون برای تابع ۲ بزرگ‌تر از یک هستند که نشان از پخشیدگی بالا در داده‌های تخمینی است.

ذرات اولیه خاک (D_y) و خاکدانه‌ها (D_f) در مدل‌سازی رگرسیونی ایجاد گردید تا تأثیر ورود D_f و D_y به‌عنوان تخمین‌گر بر دقت مدل‌ها ارزیابی شود. به این ترتیب، تابع ۲ با وارد شدن متغیر کربن آلی و بعد فرکتالی خاکدانه‌ها ایجاد گردید (جدول ۲). استفاده از D_f برای برآورد MWD_{wet} در داده‌های سری آموزش سبب افزایش R^2 از ۰/۷۱ به ۰/۸۰ و کاهش RMSE از ۰/۳۴ به ۰/۲۸ mm در تابع ۲ در مقایسه با تابع ۱ گردید (جدول ۳). در داده‌های سری آزمون نیز در تابع ۲ در مقایسه با تابع ۱، R^2 از ۰/۸۶ به ۰/۸۷ و افزایش RMSE از ۰/۴۹ به ۰/۴۵ mm کاهش یافت. مقادیر منفی ME در سری آموزش بیانگر کم‌برآوردی و مقادیر مثبت ME

جدول ۲- توابع انتقالی رگرسیونی بهینه برای برآورد میانگین وزنی قطر خاکدانه‌های تر (MWD_{wet}).

تابع	معادله رگرسیونی خطی	متغیرهای زودیافت به‌کار رفته
۱	$MWD_{wet}=0.16 + 0.3 OC$	S, Si, C, d_g , σ_g , D_b , D_p , n, OC, $CaCO_3$
۲	$MWD_{wet}=1.85 + 0.19 OC - 0.45 D_f$	S, Si, C, d_g , σ_g , D_b , D_p , n, OC, $CaCO_3$, D_f , D_y

تابع ۱: بدون استفاده از D_f ، تابع ۲: با استفاده از D_f . توصیف علائم متغیرها در زیر جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۳- آماره‌های ارزیابی توابع انتقالی رگرسیونی برای برآورد میانگین وزنی قطر خاکدانه‌های تر (MWD_{wet}).

داده	تابع	R^2	RMSE (mm)	ME (mm)	AIC	GMER	GSDER	MGN
آموزش	۱	۰/۷۱	۰/۳۴	-۰/۰۲	-۸۵/۳۷	۱/۰۴	۱/۵۰	۲/۷۲**
	۲	۰/۸۰	۰/۲۸	-۰/۰۱	-۱۱۲/۲۹	۰/۹۶	۱/۸۸	
آزمون	۱	۰/۸۶	۰/۴۹	۰/۱۵	-۸/۸۵	۰/۹۹	۱/۴	۲/۸۸ ^{ns}
	۲	۰/۸۷	۰/۴۵	۰/۲۲	-۱۲/۱۰	۰/۸۱	۱/۳۹	

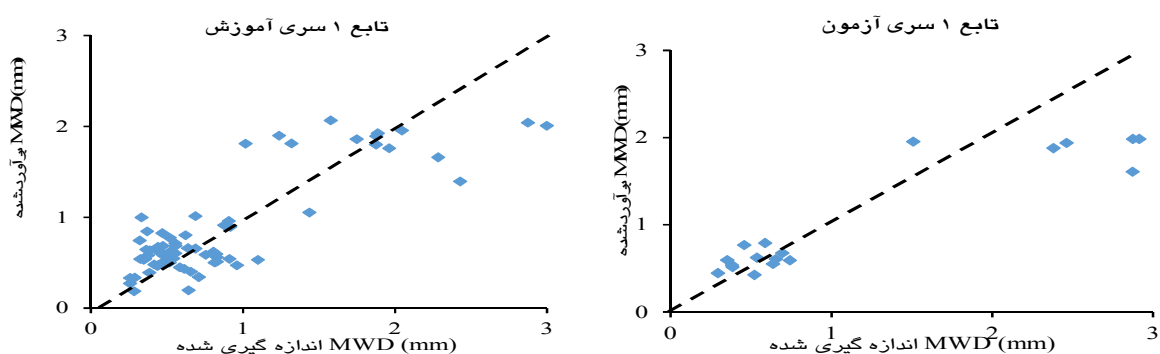
تابع ۱: بدون استفاده از D_f ، تابع ۲: با استفاده از D_f ، R^2 : ضریب تبیین، RMSE: ریشه میانگین مربعات خطا، ME: میانگین خطا، AIC: معیار اطلاعات آکائیک، GMER: میانگین هندسی نسبت خطا، GSDER: انحراف معیار هندسی نسبت خطا، MGN: آزمون مورگان-گرنجر-نیوبولد، ns: غیر معنی‌دار، **: معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد.

آماره MGN در سری آزمون معنی‌دار نشده است. با توجه به آماره‌های ارزیابی در جدول ۳ می‌توان بیان نمود هر چند استفاده از D_f موجب افزایش صحت در

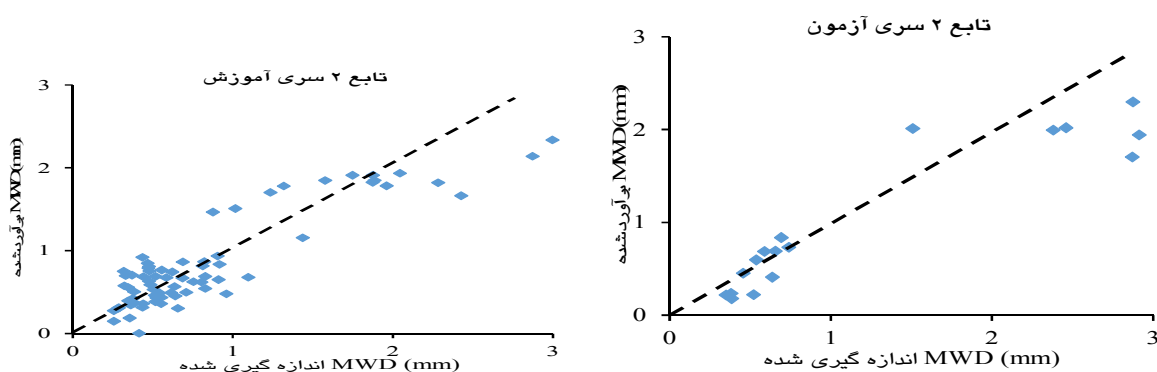
معنی‌داری آماره MGN (جدول ۳) در سطح احتمال ۱ درصد در سری آموزش نشان‌دهنده آن است که از لحاظ آماری دقت تابع ۲ بیشتر از تابع ۱ می‌باشد اما

نیز پراکنش مقادیر اندازه‌گیری و برآورد شده MWD_{wet} توسط توابع انتقالی رگرسیونی را حول محور ۱ به ۱ نشان می‌دهد. با توجه به این شکل مشاهده می‌شود مقادیر برآوردی تابع انتقالی ۲ انطباق بیشتری با مقادیر اندازه‌گیری شده دارند.

سری آموزش گردیده است اما در مجموع تابع ارائه شده دارای قدرت پیش‌بینی کمی است. شاپ و بوئتن (۱۹۹۶) بیان کردند که تفاوت زیاد بین آماره‌های ارزیابی سری آموزش و آزمون نشان‌گر عدم تعمیم‌پذیری و اعتبار اندک مدل ارائه شده است. شکل ۱



الف) تابع انتقالی رگرسیونی بدون کاربرد D_f



ب) تابع انتقالی رگرسیونی با کاربرد D_f

شکل ۱- مقادیر اندازه‌گیری و برآورد شده میانگین وزنی قطر خاکدانه‌های تر (MWD_{wet}) به وسیله توابع رگرسیونی بدون کاربرد D_f (تابع ۱) و با کاربرد D_f (تابع ۲). خط چین بیانگر محور ۱:۱ است.

آموزش و آزمون به ترتیب در سطح احتمال ۱ و ۵ درصد معنی‌دار شد (جدول ۴) که به معنی بهبود دقت تخمین MWD_{wet} با به‌کارگیری D_f از لحاظ آماری است. به دلیل عدم وجود مطالعه در زمینه استفاده از D_f به عنوان متغیر ورودی در برآورد پایداری خاکدانه‌ها توسط توابع شبکه عصبی مصنوعی، امکان مقایسه دقیق نتایج این قسمت با یافته‌های سایر محققان میسر نشد. شکل ۲ مقادیر اندازه‌گیری و برآورد شده MWD_{wet} توسط توابع شبکه عصبی را نشان می‌دهد. با

توابع انتقالی شبکه عصبی مصنوعی

دقت توابع انتقالی شبکه عصبی با کاربرد D_f به عنوان تخمین‌گر افزایش یافت (جدول ۴) به طوری که در داده‌های سری آموزش مقادیر R^2 از ۰/۷۸ به ۰/۹۵ افزایش و مقادیر RMSE از ۰/۲۹ به ۰/۱۵ کاهش یافت همچنین مقادیر GSDER در تابع ۲ به یک نزدیک‌تر است که نشان از انطباق بیشتر مقادیر تخمینی با مقادیر اندازه‌گیری شده در تابع ۲ نسبت به تابع ۱ است. بررسی نتایج آزمون MGN برای داده‌های سری

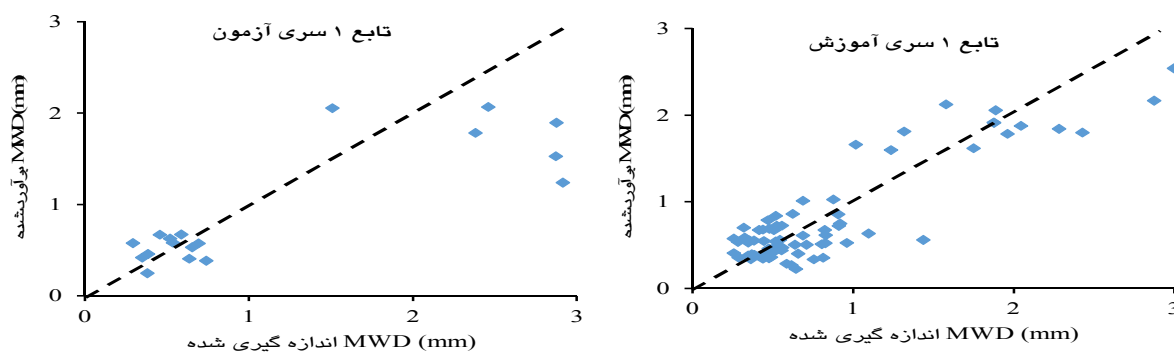
D_f کمتر است. تأمل در شکل ۲ و نیز مقادیر آماره آکائیک (جدول ۴) نشان می‌دهد که تابع ۲ از لحاظ دقت برتر از تابع ۱ می‌باشد.

توجه به این شکل مشاهده می‌شود که برای داده‌های آموزشی، انطباق داده‌ها حول محور ۱ به ۱ در تابع ۱ (بدون استفاده از D_f) در مقایسه با تابع ۲ (با استفاده از

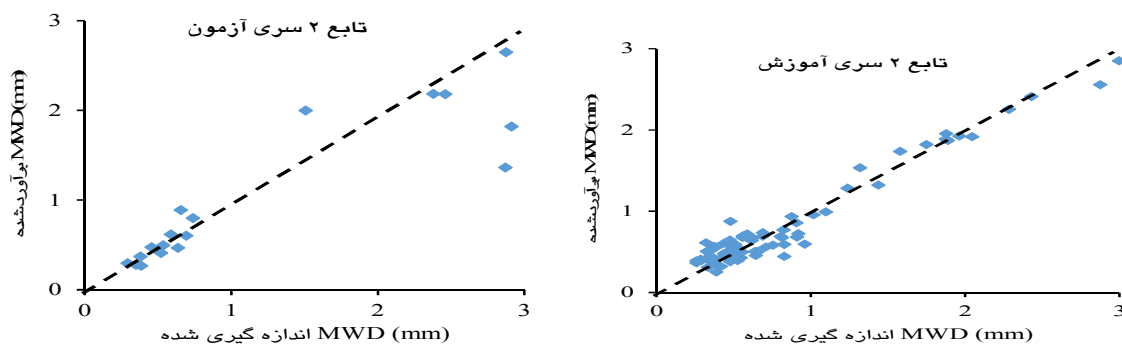
جدول ۴- آماره‌های ارزیابی توابع انتقالی شبکه عصبی ارائه شده برای برآورد میانگین وزنی قطر خاکدانه‌های تر.

داده	تابع	R^2	RMSE (mm)	ME (mm)	AIC	GMER	GSDER	MGN
آموزش	۱	۰/۷۸	۰/۲۹	۰/۰۰۵	-۱۰۵/۷۵	۰/۹۸	۱/۵۱	
	۲	۰/۹۵	۰/۱۵	-۰/۰۰۱	-۲۰۶/۸۶	۱/۰۲	۱/۲۸	۲/۷۲**
آزمون	۱	۰/۷۳	۰/۶۱	۰/۲۵	-۰/۶۵	۰/۹۱	۱/۵۰	
	۲	۰/۸۱	۰/۴۷	۰/۱۷	-۱۰/۰۳	۰/۹۲	۱/۲۲	۲/۸۸*

تابع ۱: بدون استفاده از D_f ، تابع ۲: با استفاده از D_f ، توصیف علائم در زیر جدول ۴ آورده شده است.



الف) تابع انتقالی ANN بدون کاربرد D_f



ب) تابع انتقالی ANN با کاربرد D_f

شکل ۲- مقادیر اندازه‌گیری و برآورد شده میانگین وزنی قطر خاکدانه‌های تر (MWD_{wet}) به وسیله توابع شبکه عصبی مصنوعی (ANN) الف) بدون کاربرد D_f (تابع ۱) و ب) با کاربرد D_f (تابع ۲). خط چین بیانگر محور ۱:۱ است.

مقایسه توابع انتقالی رگرسیونی و شبکه عصبی
مصنوعی در برآورد میانگین وزنی قطر خاکدانه‌های تر

تابع شبکه عصبی مصنوعی در برآورد MWD_{wet} دارای دقت بیشتری نسبت به توابع رگرسیونی می‌باشد (جدول ۵) به طوری که بر اساس سری آموزش، R^2 برای تابع رگرسیونی برابر $0/80$ و برای تابع شبکه عصبی مصنوعی برابر $0/95$ می‌باشد. همچنین مقادیر RMSE و ME برای تابع رگرسیونی به ترتیب برابر $0/28$ و $0/01$ بوده اما برای تابع شبکه عصبی مصنوعی به ترتیب برابر $0/15$ و $0/001$ است. مقادیر آماره AIC نیز برای تابع ایجاد شده با روش رگرسیونی برابر $112/29$ و برای تابع شبکه عصبی مصنوعی برابر $206/86$ است که نشان‌دهنده مناسب‌تر بودن تابع شبکه عصبی برای برآورد MWD_{wet} می‌باشد. مقادیر GSDER و GMER برای تابع شبکه عصبی به 1 نزدیک‌تر است که نشان‌گر انطباق بیشتر مقادیر اندازه‌گیری شده و تخمینی MWD_{wet} توسط مدل شبکه عصبی مصنوعی است. نتیجه آزمون MGN در سطح احتمال 1 درصد معنی‌دار شده است (جدول ۵) که نشان‌دهنده دقت بیشتر مدل شبکه عصبی مصنوعی نسبت به رگرسیون در داده‌های آموزشی MWD_{wet} از لحاظ آماری است. برخی محققان اظهار داشته‌اند که علت دقت بالای توابع انتقالی شبکه عصبی مصنوعی نسبت به

توابع انتقالی رگرسیونی این است که شبکه عصبی ابتدا الگویی به شبکه عرضه می‌کند و خروجی آن را محاسبه کرده سپس خروجی را با مقادیر اندازه‌گیری شده مقایسه می‌کند و ضرایب وزنی شبکه را به نوعی تغییر می‌دهد که کمترین اختلاف بین مقادیر پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده باشد (میناسنی و همکاران ۲۰۰۴). علی‌جان‌پور شلمانی و همکاران (۱۳۹۰) و امیر عابدی (۱۳۹۱) نیز گزارش نمودند توابع شبکه عصبی به علت داشتن R^2 بالاتر و RMSE پایین‌تر در مقایسه با توابع رگرسیونی دارای دقت بیشتری در برآورد پایداری خاکدانه‌ها بودند. در سری آزمون عکس نتیجه حاصله برای سری آموزش به دست آمده است و مقادیر آماره MGN نیز بیان‌گر آن است که اگر چه تابع ایجاد شده با شبکه عصبی دارای دقت بیشتری نسبت به مدل رگرسیونی است اما با توجه به عدم معنی‌داری آزمون MGN دو مدل از لحاظ آماری دارای اعتبار یکسانی در تخمین پارامتر مورد نظر می‌باشند. نتایج مطالعات قبلی نشان داده است که اگر مدل خاصی دارای دقت بیشتری است حتماً الزامی نیست دارای اعتبار بیشتری نیز باشد چون آزمون مدل‌ها در تشخیص روابط بین داده‌هایی صورت می‌گیرد که در ارائه مدل استفاده نشده‌اند (رضائی و سلطانی ۱۳۷۷، علی‌جان‌پور شلمانی و همکاران ۱۳۹۰).

جدول ۵- مقایسه آماری تأثیر استفاده از D_f بر دقت تخمین MWD_{wet} توسط توابع رگرسیونی و ANN.

داده	تابع	R^2	RMSE (mm)	ME (mm)	AIC	GMER	GSDER	MGN
آموزش	رگرسیونی	$0/80$	$0/28$	$0/01$	$112/29$	$0/96$	$1/88$	
	ANN	$0/95$	$0/15$	$0/001$	$206/86$	$1/02$	$1/28$	$2/72^{**}$
آزمون	رگرسیونی	$0/87$	$0/45$	$0/22$	$12/10$	$0/81$	$1/39$	
	ANN	$0/81$	$0/47$	$0/17$	$10/03$	$0/92$	$1/22$	$2/88^{ns}$

توصیف علائم در زیر جدول ۳ آورده شده است.

نتیجه‌گیری کلی

نتایج نشان داد که بین MWD_{wet} و بعد فرکتالی ذرات و خاکدانه‌ها به ترتیب همبستگی مثبت و منفی معنی‌دار وجود داشته و افزودن بعد فرکتالی خاکدانه‌ها (D_f) به عنوان تخمین‌گر سبب افزایش دقت توابع انتقالی ایجاد شده برای برآورد MWD_{wet} گردید. همچنین دقت توابع انتقالی ایجاد شده با استفاده از روش شبکه

عصبی مصنوعی بیشتر از توابع ایجاد شده با روش رگرسیونی بود اما اعتبار هیچ یک از توابع فوق از لحاظ آماری تفاوت معنی‌داری نداشت. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که کربن آلی خاک در این خاک‌ها به تنهایی می‌تواند در ایجاد توابع انتقالی مورد استفاده قرار گرفته و عامل مهمی در پایداری خاکدانه‌های خاک‌های مورد مطالعه می‌باشد.

منابع مورد استفاده

- احمدی ع، ۱۳۸۸. کارآیی شبکه‌های عصبی مصنوعی در شبیه‌سازی فرسایش خاک و رواناب با به‌کارگیری ابعاد فرکتالی. پایان‌نامه دکتری فیزیک و حفاظت خاک، دانشکده کشاورزی دانشگاه تبریز.
- احمدی ع، نیشابوری مر و اسدی ح، ۱۳۸۹. ارتباط بعد فرکتالی توزیع اندازه ذرات با برخی خصوصیات فیزیکی خاک. نشریه دانش آب و خاک، جلد ۲۰/۱، شماره ۴، صفحه‌های ۷۳ تا ۸۱.
- اصغری ش، دیزجقربانی‌ا قدم ث و اسمعیلی عوری ا، ۱۳۹۳. بررسی تغییرات مکانی برخی شاخص‌های کیفیت فیزیکی خاک در منطقه فندقلوی اردبیل با استفاده از زمین‌آمار. نشریه آب و خاک، جلد ۲۸، شماره ۶، صفحه‌های ۱۲۷۱ تا ۱۲۸۳.
- اصغری ش، هاشمیان صوفیان س، گلی کلانپا ا و محب‌الدینی م، ۱۳۹۴. اثرات تغییر کاربری اراضی بر شاخص‌های کیفیت خاک در شرق استان اردبیل. نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، جلد ۲۲، شماره ۳، صفحه‌های ۱ تا ۱۹.
- اصغری ش، روزبان ا و خداوردی‌لو ح، ۱۳۹۵. اشتقاق توابع انتقالی برای برآورد مقاومت فروری، پایداری خاکدانه و پارامترهای مدل منحنی رطوبتی و ن‌گن‌وختن در اراضی جنگلی فندقلوی اردبیل. نشریه دانش آب و خاک، جلد ۲۶، شماره ۱/۲، صفحه‌های ۱۲۹ تا ۱۴۸.
- امیر عابدی ح، ۱۳۹۱. تخمین برخی خصوصیات فیزیکی و هیدرولیکی خاک‌های منتخب از دشت اردبیل با استفاده از روش‌های شبکه عصبی و رگرسیونی. پایان‌نامه کارشناسی ارشد فیزیک و حفاظت خاک، دانشکده کشاورزی دانشگاه محقق اردبیلی.
- بیات ح، ۱۳۸۷. ایجاد توابع انتقالی برای پیش‌بینی منحنی رطوبتی از طریق شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANNs) و مدیریت گروهی داده‌ها (GMDH) با استفاده از پارامترهای فرکتالی و تجزیه به مؤلفه‌های اصلی. پایان‌نامه دکتری فیزیک و حفاظت خاک، دانشکده کشاورزی دانشگاه تبریز.
- رضایی ع و سلطانی ا، ۱۳۷۷. مقدمه‌ای بر تحلیل رگرسیون کاربردی. انتشارات دانشگاه صنعتی اصفهان.
- علی‌جان‌پور شلمانی ع، شعبانپور م، اسدی ح و باقری ف، ۱۳۹۰. تخمین پایداری خاکدانه در خاک‌های جنگلی استان گیلان به‌وسیله شبکه‌های عصبی مصنوعی و توابع انتقالی رگرسیونی. نشریه دانش آب و خاک، جلد ۲۱، شماره ۳، صفحه‌های ۱۵۳ تا ۱۶۲.
- Ahmadi A, Neyshabouri MR, Rouhipour H and Asadi H, 2011. Fractal dimension of soil aggregates as an index of soil erodibility. *Journal of Hydrology* 400: 305–311.
- Asghari Sh, Ahmadnejad S and Keivan Behjou F, 2016. Deforestation effects on soil quality and water retention curve parameters in eastern Ardabil, Iran. *Eurasian Soil Science* 49(3): 338–346.
- Bayat H, Ebrahimi E, Ersahin S, Hepper EN, Singh DN, Amer AN and Yukselen-Aksoy Y, 2015. Analyzing the effect of various soil properties on the estimation of soil specific surface area by different methods. *Applied Clay Science* 116–117: 129–140.
- Blake GR and Hartge KH, 1986a. Bulk Density. Pp. 363-375. In: Klute A (ed). *Methods of Soil Analysis. Part 1. Physical and Mineralogical Methods*. Agron. Monogr. 9. ASA-SSSA. Madison, WI.

- Blake GR and Hartge KH, 1986b. Particle Density. Pp. 377-382. In: Klute A (ed), *Methods of Soil Analysis. Part 1. Physical and Mineralogical Methods*. Agron. Monogr. 9. ASA-SSSA. Madison, WI.
- Campbell GS, 1985. *Soil Physics with Basic: Transport Models for Soil-Plant System*. Elsevier, New York.
- Diebold FX and Mariano RS, 2002. Comparing predictive accuracy. *Journal of Business & Economic Statistics* 20: 134-144.
- Gee GW and Or D, 2002. Particle-size analysis. Pp. 255-293. In: Dane JH and Topp GC (eds). *Methods of Soil Analysis. Part 4. Physical Methods*. SSSA Book Series No. 5. Soil Science Society of America, Madison, WI.
- Gulser C, 2006. Effect of forage cropping treatments on soil structure and relationships with fractals. *Geoderma* 131: 33-44.
- Minasny B, Hopmans JW, Harter T, Eching SO, Tuli A and Denton MA, 2004. Neural network predication of soil hydraulic function for alluvial soils using multistep outflow data. *Soil Science Society of America Journal* 68: 417-429.
- Nelson RE, 1982. Carbonate and gypsum. Pp. 181-197. In: Buxton DR (ed). *Methods of Soil Analysis. Part 2. Chemical Methods*. Agronomy Handbook. No. 9. ASA & SSSA, Madison, WI.
- Perfect E and Kay BD, 1991. Fractal theory applied to soil aggregation. *Soil Science Society of America Journal* 55: 1522-1558.
- Perfect E, Kay BD and Rasiah V, 1993. Multifractal model for soil aggregate and fragmentation. *Soil Science Society of America Journal* 57: 896-900.
- Rieu M and Sposito G, 1991. Fractal fragmentation, soil porosity and soil water properties: II. Application. *Soil Science Society of America Journal* 55: 1239-1244.
- Schapp MG and Boutten W, 1996. Neural network analysis for hierarchical prediction of hydraulic properties. *Soil Science Society of America Journal* 62: 847-855.
- Sepaskhah AR, Moosavi SAA and Boersman L, 2000. Evaluation of fractal dimensions for analysis of aggregate stability. *Iranian Agricultural Research* 19: 99-114.
- Walkley AJ and Black IA, 1934. Estimation of soil organic carbon by the chromic acid titration method. *Soil Science* 37: 29-38.
- Yang PL, Luo YP, Shi YC, 1993. Soil fractal character token by particle-mass distribution. *Chinese Science Bulletin* 38(20):1896-1899.
- Yoder RE, 1936. A direct method of aggregate analysis of soils and study of the physical nature of erosion losses. *Journal of American Society of Agronomy* 28: 337-351.
- Zhou H, Lu YZ, Yang ZC and Li BG, 2007. Influence of conservation tillage on soil aggregates, organic carbon features in north China plain. *Agricultural Sciences in China* 8: 1099-1106.
- Zolfaghari AS, Taghizadeh-Mehrjardi R, Asadzadeh F and Hajabbasi MA, 2016. Soil structure changes due to different land-use practices in the central Zagruos region, Iran. *Archives of Agronomy and Soil Science* 62(2): 163-175.