تخمین ظرفیت تبادل کاتیونی خاک با استفاده از رگرسیون و شبکه عصبی و اثر تفکیک داده‌ها بر دقت و صحت توابع

رضا مهاجر، محمدحسن صالحی* و حبیب‌اله بیگی هرچگانی[1]

(تاریخ دریافت: ۱۳۸۶/۱۲/۸ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۸۷/۱۰/۲۹)

چکیده

منظور نمودن شاخص‌های حاصل‌خیزی خاک از جمله ظرفیت تبادل کاتیونی(CEC) می‌تواند در ارتقا و افزایش کیفیت نقشه‌های خاک مفید باشد. برای اندازه‌گیری CEC که زمان‌بر و پرهزینه است می‌توان از برآورد آن از طریق توابع انتقالی استفاده کرد. در این تحقیق، ابتدا چند محدوده (Delineation) از دو واحد نقشه همگون (Consociation)، شامل دو فامیل خاک واقع در دشت شهرکرد، یک واحد نقشه شامل سری شهرک و دیگری شامل سری چهارمحال، مشخص شد. سپس، از اعماق صفر تا۲۰ و۳۰ تا۵۰ سانتی‌متری محدوده‌ها نمونه‌گیری و چند ویژگی فیزیکی- شیمیایی هر نمونه در آزمایشگاه اندازه‌گیری شد. سه ویژگی درصد رس، درصد ماده آلی و رطوبت در پتانسیل ۱۵۰۰- کیلو پاسکال بیشترین هم‌بستگی را با CEC نشان دادند. توابع انتقالی با استفاده از رگرسیون خطی و شبکه عصبی استخراج شد. در این مطالعه، برای تمام مدل‌های شبکه عصبی یک لایه میانی به همراه یک گره کافی به نظر رسید. در هر دو روش، مدلی که شامل پارامترهای زود یافت ماده آلی و رس بود به وسیله روش رگرسیون با R^2=۰/۸۱ و RMSE =۷/۲ و از طریق شبکه عصبی با ضریب یادگیری ۰/۳ و تعدادتکرار(Epoch) ۴۰ و R^2=۰/۸۸ وRMSE =۰/۳۴ بهترین و دقیق‌ترین تخمین را در بین مدل‌ها جهت تخمین CEC نشان داد. تفکیک داده برحسب لایه و فامیل باعث افزایش دقت و صحت توابع گردید. تکنیک شبکه عصبی در مقایسه با رگرسیون، مدل‌هایی با R^2 بیشتر و RMSE کمتر تولید کرد.

واژه‌های کلیدی: ظرفیت تبادل کاتیونی، توابع انتقالی، رگرسیون، شبکه عصبی، تفکیک خاک

مقدمه

نقشه‌های خاک برای اهداف مختلف کشاورزی، منابع طبیعی، عمران و محیط زیست مورد استفاده قرار می‌گیرند. بنابراین، کیفیت آنها از اهمیت خاصی برخوردار است (۲۱). استفاده از شاخص‌های حاصل‌خیزی خاک می‌تواند در ارتقای کیفیت نقشه‌های خاک مفید باشد.

اندازه‌گیری برخی از شاخص‌های حاصل‌خیزی خاک به دلیل زمان بر بودن و هزینه زیاد در تهیه نقشه‌های خاک کمتر مد نظر قرار می‌گیرد (۱۹). از جمله این شاخص‌ها که اهمیت بسیاری در حاصل‌خیزی خاک دارد ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC و Cation Exchange Capacity) است. ظرفیت تبادل کاتیونی، مقدار کاتیون تبادلی است که در یک pH

۱. به ترتیب دانشجوی دکتری و استادیاران خاک‌شناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد

* : مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: mehsalehi@yahoo.com

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2025-11-02]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1388.13.49.6.8]

مشخص در واحد وزن خاک نگه‌داشته می‌شود (۲۳). به دلیل مشکلات بیان شده در اندازه‌گیری ویژگی‌هایی چون CEC، برای تخمین دقیق این نوع ویژگی‌ها باید به دنبال راه حل‌های مناسب، ساده و کم هزینه بود. به همین منظور، استفاده از روش‌های تخمین غیر مستقیم مورد توجه قرار گرفته است. برای نخستین بار، بوما (۸) روابط رگرسیونی میان متغیرهای زودیافت (متغیرهایی که اندازه‌گیری آنها به راحتی انجام می‌شود) ودیریافت خاک(متغیرهایی که اندازه‌گیری آنها زمان بر و به سختی انجام می‌شود) را به دست آورد و آنها را توابع تبدیلی خاک (Pedotransfer Functions, PTFs) نامید. توابع تبدیلی(انتقالی) به طور موفقیت آمیزی در زمینه‌های مختلف علوم خاک به کار رفته است(۱۴ و ۲۳).

یکی از روش‌های استخراج توابع انتقالی خاک، رگرسیون است. در این روش، رابطه بین یک متغیر وابسته و تعدادی متغیر مستقل در قالب یک رابطه تعیین می‌شود (۱۵). استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی (Artifical Neural Networks, ANN) یکی دیگر از روش‌های به دست آوردن توابع انتقالی خاک است که در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته است. این تکنیک عموماً در مطالعات هیدرودینامیکی و پیش‌بینی خصوصیات رطوبتی خاک مورد مطالعه قرار گرفته است. برخی از تحقیقات نشان داده که برای به دست آوردن توابع انتقالی، این تکنیک دقیق‌تر و قابل اعتمادتر از روش رگرسیون است (۴ و ۲۲). این روش توسط پژوهشگران مختلف از جمله تاماری و همکاران (۲۵)، محمدی (۱۷)، پاچپسکی و رالز (۲۰)، امینی و همکاران (۴) و مردون و همکاران (۱۶) جهت تخمین شاخص‌های مختلف به کار گرفته شده است.

مطالعات نشان داده است که رده‌بندی خاک‌ها بر اساس تاکسونومی و یا گروه‌بندی بر اساس افق‌های مشخصه، از آنجایی که باعث همگون شدن خصوصیات خاک‌ها می‌شود، منجر به کاهش تغییرات در خصوصیات خاک می‌گردد و توابع انتقالی حاصل جهت تخمین CEC می‌تواند به مقدار قابل توجهی دقیق‌تر و صحیح‌تر باشد (۶ و ۱۰).

از بررسی منابع چنین بر می‌آید که تاکنون توابع انتقالی جهت تخمین CEC برای هیچ نوع از خاک‌های استان چهارمحال و بختیاری استخراج نشده است. لذا، این تحقیق به استخراج این توابع به دو روش برازش رگرسیون و شبکه عصبی می‌پردازد. هم‌چنین، تاکنون توابع انتقالی تخمین CEC در سطوح پایین رده‌بندی از جمله فامیل مقایسه نشده‌اند و آنچه بیشتر مورد توجه محققین قرار گرفته است، اثر تفکیک خاک تا سطح رده روی توابع انتقالی رگرسیونی بوده است(۱۴ و ۲۳). هدف اصلی از این تحقیق بررسی تأثیر تفکیک خاک‌ها به فامیل و لایه‌های سطحی و عمقی بر نوع مدل و دقت توابع انتقالی به دو روش رگرسیون و شبکه عصبی مصنوعی است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه، محدوده‌های مختلف (Delineation) از دو واحد نقشه همگون (Consociation) خاک با دو سری خاک شهرک و چهار محال را شامل می‌شود که در اطراف دشت شهرکرد استان چهار محال و بختیاری واقع شده است. میانگین بارندگی این منطقه ۳۲۰ میلی‌متر و ارتفاع آن از سطح دریا ۲۰۶۰ متر است. رژیم رطوبتی و حرارتی این دو سری خاک به ترتیب زریک (Xeric) و مزیک (Mesic) است. کاربری اراضی کشاورزی آبی گندم، یونجه و مرتع است.

پس از بررسی نقشه‌های خاک استان در مقیاس $\frac{1}{50000}$ دو خاک غالب از محدوده‌های مختلف دو واحد نقشه همگون انتخاب گردید. انتخاب این دو خاک به نحوی بود که علی‌رغم تفاوت در فامیل، تحت گروه آنها یکسان باشد. رده‌بندی دو خاک غالب انتخاب شده به شرح زیر گزارش شده است (۱):

خاک اول: سری شهرک با فامیل:

Fine, Mixed, Mesic Typic Calcixerepts

خاک دوم: سری چهارمحال با فامیل:

Fine, Carbonatic, Mesic Typic Calcixerepts

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2025-11-02]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1388.13.49.6.8]

نمونه‌برداری خاک در دو عمق صفر تا ۲۰ و ۳۰ تا ۵۰ سانتی‌متری به طریق تصادفی انجام شد به طوری که از هر خاک ۶۰ نمونه (۳۰ نمونه از هر عمق) انتخاب گردید. نمونه‌برداری از این اعماق به این دلیل بود که عمق صفر تا ۲۰ سانتی‌متر به منظور تفکیک لایه سطحی از لایه‌های عمقی و عمق ۳۰ تا ۵۰ سانتی‌متر برای در نظر گرفتن بخش کنترل (control section) فامیل خاک بوده است. پس از آماده‌سازی نمونه‌ها، علاوه بر تعیین ظرفیت تبادل کاتیونی، مشخصه‌هایی از خاک که بر اساس مطالعات انجام شده براین خصوصیت مؤثر هستند، در آزمایشگاه اندازه‌گیری شدند. این مشخصه‌ها شامل بافت، درصد مواد آلی، درصد آهک، کلسیم و منیزیم تبادلی، pH و درصد رطوبت در مکش ۱۵۰۰ کیلو پاسکال(pwp) بودند. بافت به روش هیدرومتری (۱۱)؛ مواد آلی به روش واکلی- بلاک (۱۸)؛ آهک به روش تیتراسیون برگشتی (۱۲)، کلسیم و منیزیم تبادلی به روش کمپلکسومتری(۲۷)، pH به روش الکترومتری در مخلوط ۱:۵ (نسبت خاک به آب) تعیین شد. درصد رطوبت در مکش ۱۵۰۰ کیلو پاسکال با استفاده از یک محفظه فشاری و به روش وزنی به دست آمد (۹). پس از اندازه‌گیری و انجام محاسبات اولیه، از نرمال بودن توزیع داده‌ها اطمینان حاصل گردید. برای پردازش داده‌ها از دو نرم افزار 6.0 STATISTICA و JMP 5.0 ، استفاده شد. با استفاده از مدل رگرسیون خطی چندگانه، ابتدا مهم‌ترین مدل‌های رگرسیون خطی ارائه شده در منابع برای سطوح مختلف تفکیک (برای هر فامیل، لایه سطحی و لایه زیرین هر فامیل، لایه‌های سطحی و زیرین دو فامیل و کل نمونه‌ها) واسنجی شدند.

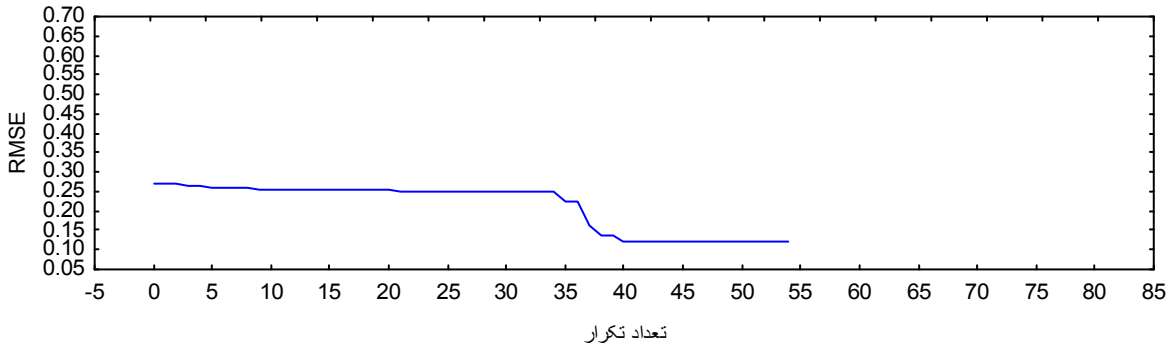
برای مدل‌سازی شبکه عصبی مصنوعی از نرم افزار JMP 5.0 استفاده شد. این نرم‌افزار یک مدل شبکه عصبی با الگوریتم FFBP (Feed-Forward Back Propagation) برازش می‌دهد که می‌تواند یک لایه ورودی، یک لایه پنهان با تابع فعال- سازی(تابع تحریک) سیگموئیدی و یک لایه خروجی داشته باشد. از آنجایی که الگوریتم FFBP در اغلب مطالعات مشابه با تحقیق حاضر در خاک‌شناسی مورد استفاده قرار گرفته است (۴) لذا از این الگوریتم برای آموزش شبکه مورد استفاده قرار گرفت. لایه ورودی می‌تواند بیش از یک ورودی، لایه خروجی بیش از یک خروجی و لایه پنهان می‌تواند بیش از یک نرون داشته باشد. در این تحقیق، ضریب یادگیری و تعداد تکرار(Epoch) به ترتیب ۰/۳ و ۴۰ انتخاب گردید. برای انتخاب تعداد تکرار مناسب از نمودار خطا برحسب تعداد تکرار استفاده شد (شکل۱). در این مرحله، داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار Excel تصادفی شد و به دو دسته تقسیم گردید به نحوی که ۸۰ داده اول به عنوان داده‌های آموزشی(Training) و ۴۰ داده باقی‌مانده به عنوان داده‌های آزمونی(Test) مورد استفاده قرار گرفت. برای آموزش شبکه از قانون یادگیری دلتا استفاده شد. برای انتخاب تعداد نرون مناسب، از نمودارهای پروفیلر (Profiler diagram) نرم‌افزار JMP 5.0 و هم‌چنین ترسیم نمودار خطا بر حسب تعداد نرون‌های لایه میانی استفاده شد (شکل۲). با استفاده از این نمودارها می‌توان از بیش برازشی(Overfiting) یا کم برازشی(Underfiting) مدل شبکه عصبی جلوگیری کرد. در این مطالعه، برای تمام مدل‌های شبکه عصبی یک نرون (گره) کافی به نظر رسید. مدل‌های شبکه عصبی برای هر فامیل، لایه سطحی و لایه زیرین هر فامیل، لایه‌های سطحی و زیرین دو فامیل و کل نمونه‌ها برازش شدند.

در برازش مدل‌های شبکه عصبی از متغیرهای مستقلی که بر اساس مطالعات محققین در تخمین CEC مؤثر هستند به عنوان ورودی مدل استفاده گردید و CEC به عنوان تنها خروجی مدل در نظر گرفته شد. به منظور بررسی اثر تفکیک خاک بر کیفیت برازش مدل‌ها و نیز مقایسه دو روش برازش توابع انتقالی از شاخص‌های بهبود نسبی R^2 (Relative Improvement, RI) و جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) استفاده شد. شاخص بهبود نسبی R^2 به شکل زیر محاسبه گردید(۴):

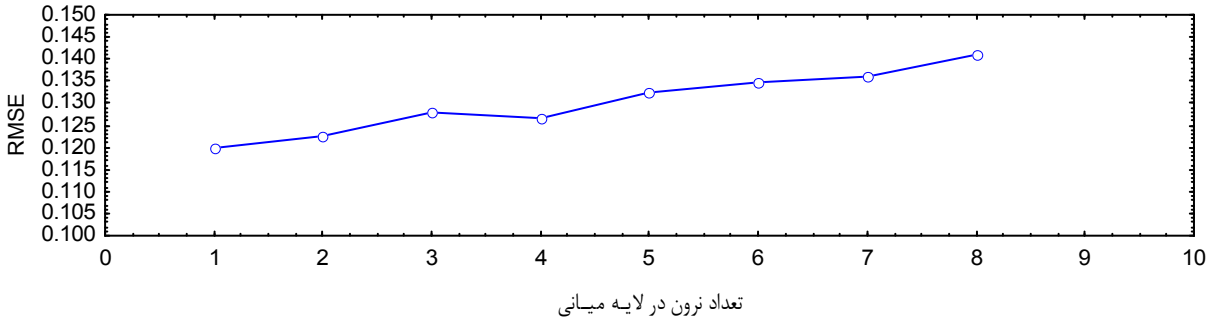
$$\text{بهبود نسبی } R^2 \text{ (RI)} = \left[\frac{R^2 \text{ مدل شبکه عصبی} - R^2 \text{ مدل رگرسیونی}}{R^2 \text{ مدل رگرسیونی}}\right] \quad [۱]$$

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2025-11-02]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1388.13.49.6.8]



شکل۱. نمودار خطا (RMSE) بر حسب تعداد تکرار



شکل۲. نمودار خطا (RMSE) برحسب تعداد نرون‌های لایه میانی

نتایج و بحث

خلاصه آماری ویژگی‌های اندازه‌گیری شده دو فامیل خاک در جداول ۱ و۲ آورده شده است. در هر دو فامیل CEC بیشترین ضریب تغییرات را نشان می‌دهد. ضریب تغییرات آهک و کاتیون‌های تبادلی بین دو فامیل مشابه است (جداول۱ و۲). به طور کلی ضریب تغییرات ویژگی‌های اندازه‌گیری شده (شن، سیلت، رس، ماده آلی وPWP) در فامیل دوم کوچک‌تر است.

تفاوت معنی‌داری (L=٪۹۹) در ماده آلی، رس و مجموع کلسیم منیزیم تبادلی میان دو لایه سطحی و زیرین هر فامیل دیده شد. اختلاف معنی‌دار میانگین رس دو لایه در هر دو فامیل دلیلی بر وجود رس بیشتر(تقریباً ۸ تا ۱۲ درصد) در لایه‌های زیرین است. هم‌چنین اختلاف معنی‌دار میانگین ماده آلی دولایه در هر دو فامیل دلیل بر افزون بودن ماده آلی (حدود ۰/۷ درصد) در سطح نسبت به عمق است(جداول ۱و ۲).

وجود تفاوت معنی‌دار میان CEC دو فامیل خاک می‌تواند به دلیل بیشتر بودن ماده آلی، رس و pH در هر دو لایه فامیل اول نسبت به دو لایه فامیل دوم باشد(جداول ۱ و ۲) اگرچه نوع رس و نوع ماده آلی نیز می‌تواند باعث ایجاد تفاوت معنی‌دار CEC گردد(۲۴). هم‌چنین به نظر می‌رسد وجود تفاوت معنی‌دار در آهک برای دو فامیل (نتایج نشان داده نشده است)، به دلیل کلاس کانی شناسی کربنتیک (Carbonatic) در فامیل دوم باشد که ناشی از شستشوی آهک از افق‌های سطحی و یا وجود آهک بیشتر در مواد مادری است.

احتمال می‌رود وجود اختلاف معنی‌دار میان ماده آلی دو عمق به خاطر روند معمول توزیع موادآلی در پروفیل خاک باشد زیرا مقدار مواد آلی در سطح خاک بیشتر از عمق است(۱۳). احتمالاً علت بالاتر بودن رس در لایه زیرین هر فامیل نسبت به لایه سطحی ناشی از پدیده انتقال است که باعث جابه‌جایی رس از افق‌های سطحی(اپی‌پدون‌ها) به عمق‌های پایین‌تر و تجمع آن در افق‌های تحت الارضی می‌گردد(۵).

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2025-11-02]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1388.13.49.6.8]

جدول۱. خلاصه آماری ویژگی‌های اندازه‌گیری شده فامیل اول و اختلاف میانگین‌های هر ویژگی در دو لایه سطحی و عمقی

ویژگی	میانگین			حداکثر	حداقل	ضریب تغییرات	میانگین دو لایه	
	لایه سطحی	لایه عمقی	فامیل	فامیل	فامیل	فامیل	اختلاف*	سطح معنی‌داری
٪ شن	۲۳/۶	۱۵	۱۹/۳	۳۵/۳	۵/۷	۳۹/۷	۸/۶	ns
٪ سیلت	۴۲/۷	۳۹/۷	۴۱/۲	۶۵/۴	۲۷/۳	۲۲/۸	۳	ns
٪ رس	۳۳/۷	۴۵/۳	۳۹/۵	۶۳/۷	۲۴/۶	۲۱/۷	−۱۱/۶	٪۹۹
٪ ماده آلی	۱/۸	۱/۱	۱/۴	۲/۹	۰/۳۲	۳۴/۷	۰/۷۳	٪۹۹
%PWP(g/g)	۱۹/۲	۱۹/۳	۱۹/۲	۲۷/۶	۱۲/۴	۱۶/۶	−۰/۱	ns
pH	۷/۸	۸/۰	۷/۹	۸/۴	۷/۲	۲/۵	−۰/۱	ns
$\%CaCO_3$	۲۲/۱	۲۵/۰	۲۳/۴	۳۹/۰	۱۲/۵	۲۸/۲	−۲/۹	ns
CEC ($cmol_c$/kg soil)	۳۶/۵	۳۷/۰	۳۶/۷	۶۹/۲	۱۴/۷	۳۹/۸	−۰/۵	ns

*: اختلاف میانگین منفی به معنی بزرگ‌تر بودن مقدار ویژگی در لایه زیرین است.

ns: از لحاظ آماری معنی‌دار نیست.

جدول۲ . خلاصه آماری ویژگی‌های اندازه‌گیری شده فامیل دوم و اختلاف میانگین‌های هر ویژگی در دو لایه سطحی و عمقی

ویژگی	میانگین			حداکثر	حداقل	ضریب تغییرات	میانگین دو لایه	
	لایه سطحی	لایه عمقی	فامیل	فامیل	فامیل	فامیل	اختلاف*	سطح معنی‌داری
٪ شن	۲۵/۴	۲۴/۴	۲۴/۹	۴۲/۶	۱۱/۵	۲۲/۶	۰/۱	ns
٪ سیلت	۴۱/۸	۳۵/۱	۳۸/۴	۵۳/۶	۲۲/۰	۱۵/۷	۶/۷	ns
٪ رس	۳۲/۸	۴۰/۵	۳۶/۷	۴۹/۷	۲۴/۶	۱۱/۳	−۷/۷	٪۹۹
٪ ماده آلی	۱/۶	۰/۹۴	۱/۲۷	۲/۴	۰/۶۳	۱۸	۰/۷	٪۹۹
%PWP(g/g)	۲۰/۰	۱۹/۴	۱۹/۷	۲۶/۵	۱۲/۴	۱۳/۶	۰/۶	ns
pH	۷/۶	۷/۷	۷/۷	۸/۰	۷/۱	۳/۶	−۰/۱	ns
$\%CaCO_3$	۲۳/۰	۳۱/۲	۲۷/۱	۴۵/۰	۱۴/۰	۲۷/۳	−۸/۳	ns
CEC ($cmol_c$/kg soil)	۳۱/۵	۳۰/۵۶	۳۱/۰	۷۱/۴	۹/۷	۵۴/۴	۰/۹	ns

*: اختلاف میانگین منفی به معنی بزرگ‌تر بودن مقدار ویژگی در لایهٔ زیرین است.

ns: از لحاظ آماری معنی‌دار نیست.

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2025-11-02]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1388.13.49.6.8]

نوربخش و همکاران(۳) نیز تفاوت معنی‌داری میان دو افق Aو B از نظر مقدار رس و ماده آلی گزارش کرده‌اند ولی میان CEC دو افق تفاوت معنی‌داری مشاهده نکردند. به نظر می‌رسد که اگرچه کمتر بودن ماده آلی لایه زیرین باعث کاهش CEC در این لایه می‌شود از طرف دیگر وجود رس بیشتر در لایه زیرین باعث افزایش CEC می گردد و به نحوی تأثیر متقابل این دو ویژگی باعث می‌شود CEC لایه سطحی و زیرین در هر یک از دو فامیل تفاوت معنی‌داری نشان ندهد.

هم‌بستگی ویژگی‌های خاک‌ها

ضرایب هم‌بستگی خطی (پیرسون) بین ویژگی‌های هر خاک در جدول۳ آورده شده است. این ضرایب نشان می‌دهند، هم‌بستگی ظرفیت تبادل کاتیونی با مقادیر ماده آلی، رس و PWP در هر دو فامیل مثبت و معنی‌دار است (L=٪۹۵). هم‌بستگی مثبت CEC با رس و ماده آلی به دلیل مشارکت آنها در ایجاد بارهای منفی و پدیده تبادل کاتیونی است که در مطالعات بسیاری از پژوهشگران به آن اشاره شده است (۳ ، ۷ ، ۱۴ و ۲۸).

هم‌بستگی مثبت و معنی‌دار CEC با PWP به خاطر تأثیر مشترک آن دو از رس و ماده آلی است. در واقع CEC نه تنها نقش ماده آلی را در خود به همراه دارد بلکه نقش مقدار و نوع رس نیز در آن لحاظ شده است. نجفی (۲) نیز در نتایج خود به ضریب هم‌بستگی بالا(r=۰/۹۰) میان CEC وPWP دست یافت. تفکیک لایه‌های هر فامیل تأثیری روی ضریب هم‌بستگی میان CEC وPWP نشان نداد، به گونه‌ای که تفاوت معنی‌داری میان ضرایب هم‌بستگی این دو ویژگی در دو فامیل و لایه‌های آنها در سطح ۹۰٪ هم مشاهده نشد.

ضریب هم‌بستگی CEC با ماده آلی در هر دو فامیل از لایه سطحی به لایه زیرین روند کاهشی داشته و این کاهش در سری شهرک شدید و معنی‌دار (L=٪۹۵) بوده است. این در حالی است که ضریب هم‌بستگی میان CEC و رس در هر دو فامیل از لایه سطحی به لایه زیرین روند افزایشی داشته است به گونه‌ای که تفاوت معنی‌داری (L=٪۹۵) میان ضریب هم‌بستگی CEC با رس در دو لایه فامیل دوم مشاهده شد (جدول ۳). به نظر می‌رسد بیشتر بودن ماده آلی در لایه سطحی و مقدار رس در لایه عمقی هم‌چنین نوع ماده آلی یا میزان تجزیه آن و نیز احتمالاً میزان تحول و هوادیدگی در رس بین دو لایه دلیل اصلی متفاوت بودن ضریب هم‌بستگی در این دو لایه باشد. این نتایج با نتایج به دست آمده از تحقیق ویلدینگ و روتلج (۲۸) و نوربخش و همکاران (۳) هم خوانی دارد. در مجموع تفکیک هر فامیل به دو لایه باعث افزایش قابل توجه ضرایب هم‌بستگی CEC با رس و به ویژه با ماده آلی گردیده است.

برازش توابع انتقالی جهت تخمین CEC با استفاده از رگرسیون

در ادامه تعدادی از مدل های خطی که سایر محققین جهت تخمین CEC به دست آورده‌اند، واسنجی شده‌اند. در این مدل‌ها عمدتاً از درصد ماده آلی و درصد رس و در برخی از PWP جهت تخمین CEC استفاده شده است. این مدل‌ها عبارت‌اند از:

مدل (۱) $CEC=Bo+B1\ (\%OM)$

مدل (۲) $CEC=Bo+B1\ (\%Clay)$

مدل (۳) $CEC=Bo+B1\ (\%Clay) + B2(\%\ OM)$

مدل (۴) $CEC=Bo+B1\ (\%OM)+B2(\%PWP)$

نتایج برازش این مدل‌ها در جداول ۴ تا ۷ آورده شده است. اگر هیچ گونه تفکیکی در سطح فامیل و لایه‌ها انجام نگیرد مدل‌های (۱) و(۲) در تخمین CEC برای کل نمونه ها یکسان و ضعیف عمل کرده‌اند (توابع ۱ و۱۰). نتایج جداول ۴ و ۵ نشان می‌دهند که اگرچه تفکیک خاک به دو فامیل باعث بهبود مدل‌های (۱) و (۲) نشده ولی تفکیک هر فامیل به دو لایه سطحی و عمقی باعث افزایش R^2 و کاهش RMSE و نهایتاً بهبود این دو مدل گردیده است. در عین حال مدل (۱) برای لایه سطحی و مدل (۲) برای لایه‌ی عمقی مناسب‌تر است. با این حال عملکرد مدل (۱) در لایه‌ی سطحی خیلی بهتر از عملکرد مدل (۲) در لایه عمقی است (توابع ۵ و ۸). در لایه‌های زیرین دو

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2025-11-02]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1388.13.49.6.8]

جدول۳ . ضرایب هم‌بستگی(r) CEC با ویژگی‌های مرتبط خاک در سطوح مختلف تفکیک

سطح تفکیک	OM	PWP	Clay	Sand	Silt	Ca+Mg	Ca	Mg	$CaCO_3$	pH
همه نمونه‌ها(n=۱۲۰) (بدون تفکیک)	۰/۵۳*	۰/۷۳*	۰/۵۱*	−۰/۳۰*	۰/۱۶	۰/۱۹*	۰/۱۹*	۰/۰۹	−۰/۱۵	۰/۱
فامیل‌اول(سری‌شهرک) (n=۶۰)	۰/۵۸*	۰/۷۸*	۰/۵۱*	−۰/۲	۰/۱۱	۰/۲۱	۰/۰۹	۰/۰۱	−۰/۱۷	۰/۰۷
لایه سطحی فامیل اول (n=۳۰)	۰/۸۹*	۰/۷۷*	۰/۶۶*	−۰/۲۳	۰/۳۲	۰/۲۵	۰/۰۹	۰/۰۶	−۰/۲۹	۰/۰۳
لایه زیرین فامیل اول (n=۳۰)	۰/۷۰*	۰/۸۰*	۰/۷۳*	−۰/۱۶	۰/۱۷	۰/۲۱	۰/۰۸	۰/۰۵	−۰/۰۱	۰/۱۱
فامیل‌دوم(سری‌چهارمحال) (n=۶۰)	۰/۵۰*	۰/۷۵*	۰/۵۳*	−۰/۲۹	۰/۱۹	۰/۱۵	۰/۲۵	۰/۱۲	−۰/۰۷	۰/۰۲
لایه سطحی‌فامیل دوم (n=۳۰)	۰/۸۶*	۰/۷۶*	۰/۵۸*	−۰/۲۱	۰/۰۴	۰/۱۳	۰/۲۸	۰/۰۳	−۰/۰۳	۰/۰۵
لایه زیرین فامیل دوم (n=۳۰)	۰/۸۲*	۰/۷۶*	۰/۸۱*	−۰/۳۵	۰/۳۱	۰/۱۹	۰/۳۳	۰/۱۸	−۰/۱۵	۰/۰۰

*: در سطح ۹۵ درصد معنی‌دار هستند.

جدول۴ . نتایج واسنجی مدل(۱):$CEC=B_o+B_1$ (%OM)؛ برای فامیل‌ها و لایه‌ها (۳ و ۷)

شماره تابع	سطح تفکیک	ضرایب مدل		R^2	RMSE
		B_o	B_1		
۱	بدون تفکیک	۸/۷	۱۸/۵	۰/۲۸*	۱۴/۰
۲	دو فامیل لایه سطحی	−۲۸	۳۶/۴	۰/۷۵**	۸/۸
۳	دو فامیل لایه زیرین	۴۹/۷	۱۶/۲	۰/۵۲*	۱۱/۸
۴	فامیل اول(سری شهرک)	۱۴/1	۱۵/۷۵	۰/۳۱**	۱۲/۳
۵	فامیل اول لایه سطحی	−۲۰	۳۱/۶	۰/۷۹**	۷/۴
۶	فامیل اول لایه زیرین	۰/۳۲	۳۴/۱۲	۰/۴۷ns	۱۰/۱
۷	فامیل دوم(سری چهارمحال)	۳/۶	۲۱/۵	۰/۲۵ns	۱۵/۹
۸	فامیل دوم لایه سطحی	−۴۸/۴	۴۹/۸	۰/۷۳**	۹/۰
۹	فامیل دوم لایه زیرین	-۴۵	۱۸/۸۶	۰/۶۷**	۱۱/۳

CEC برحسب $cmol_c/kg$ soil ؛ ماده آلی برحسب درصد

ضرایبی که زیرآنها خط کشیده شده است از لحاظ آماری معنی دار نیستند.

** و*: به ترتیب در سطح ۹۵٪ و۹۹٪ معنی‌دار هستند.

ns: به معنای معنی‌دار نبودن از لحاظ آماری است.

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2025-11-02]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1388.13.49.6.8]

جدول۵ . نتایج واسنجی مدل(۲): $CEC=B_o+B_1\ (\%Clay)$؛ برای فامیل‌ها و لایه‌ها (۷)

شماره تابع	سطح تفکیک	ضرایب مدل		R^2	RMSE
		B_o	B_1		
۱۰	بدون تفکیک	−۱۰/۸	۱/۱۷	۰/۲۸ ns	۱۴/۳
۱۱	دو فامیل لایه سطحی	−۴۶	۲/۲	۰/۳۸**	۱۳/۰
۱۲	دو فامیل لایه زیرین	−۴۶	۱/۸۵	۰/۵۴**	۱۱/۵
۱۳	فامیل اول(سری شهرک)	۲/۳	۰/۸۷	/۲۶ ns	۱۲/۷
۱۴	فامیل اول لایه سطحی	−۲۹/۴	۲	۰/۴۳ ns	۱۲/۲
۱۵	فامیل اول لایه زیرین	−۲۵/۴	۱/۳۷	۰/۵۴*	۹/۴
۱۶	فامیل دوم (سری چهارمحال)	−۲۸	۱/۶	۰/۲۸*	۱۵/۵
۱۷	فامیل دوم لایه سطحی	−۵۶/۶	۲/۷	۰/۳۴*	۱۴/۱
۱۸	فامیل دوم لایه زیرین	−۹۱/۲۵	۳	۰/۶۵**	۱۱/۶

CEC: برحسب $cmol_c/kg\ soil$؛ رس برحسب درصد

ضرایبی که زیرآنها خط کشیده شده است از لحاظ آماری معنی‌دار نیستند.

**و *: به ترتیب در سطح ۹۵٪ و۹۹٪ معنی‌دار می‌باشند وns به معنای معنی‌دار نبودن از لحاظ آماری می‌باشد.

جدول۶ . نتایج واسنجی مدل(۳): $CEC=B_o+B_1\ (\%OM)+B_2(\%Clay)$ برای فامیل‌ها ولایه‌ها (۳، ۷ و ۲۸)

شماره تابع	سطح تفکیک	ضرایب مدل			R^2	RMSE
		B_o	B_1	B_2		
۱۹	بدون تفکیک	-۵۱/۲	۲۲/۸	۱/۴	۰/۶۷**	۹/۵
۲۰	دو فامیل لایه سطحی	-۴۳	۳۱/۷	۰/۶۸	۰/۷۵**	۸/۴
۲۱	دو فامیل لایه زیرین	-۴۶/۵	۲۹/۶	۱/۱۷	۰/۶۵**	۱۰/۰
۲۲	فامیل اول(سری شهرک)	-۳۵/۱	۱۹/۵	۱/۱۱	۰/۷۲**	۷/۹
۲۳	فامیل اول لایه سطحی	−۳۰/۹۷	۲۷/۸	۰/۵۱	۰/۸۱**	۷/۲
۲۴	فامیل اول لایه زیرین	-۳۰	۲۰/۴	۰/۹۷	۰/۶۶**	۸/۳
۲۵	فامیل دوم(سری چهارمحال)	-۹۰	۳۰/۶۵	۲/۲۴	۰/۷۴**	۹/۴
۲۶	فامیل دوم لایه سطحی	-۷۴/۴۴	۴۳/۵	۱/۱	۰/۷۸**	۸/۳
۲۷	فامیل دوم لایه زیرین	−۸۵/۲	۴۹	۱/۷	۰/۷۸**	۹/۳

CEC: برحسب $cmol_c/kg\ soil$؛ رس و ماده آلی برحسب درصد

ضرایبی که زیر آنها خط کشیده شده است از لحاظ آماری معنی‌دار نیستند.

** و * : به ترتیب در سطح ۹۵٪ و ۹۹٪ معنی‌دار می‌باشند وns به معنای معنی‌دار نبودن از لحاظ آماری است.

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2025-11-02]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1388.13.49.6.8]

جدول۷ . نتایج واسنجی مدل(۴): $CEC=B_o+B_1 (\%OM) +B_2(\%PWP)$؛ برای فامیل‌ها و لایه‌ها (۱۳)

شماره تابع	سطح تفکیک	ضرایب مدل			R^2	RMSE
		B_o	B_1	B_2		
۲۸	بدون تفکیک	-۴۲/۴	۱۵/۴	۳/۳	۰/۵۸**	۱۰/۸
۲۹	دو فامیل لایه سطحی	-۴۲/۶	۴۹	۱/۶	۷۷۰**	۸/۰
۳۰	دو فامیل لایه زیرین	-۴۲/۲	۲۹/۱۴	۲/۴	۶۶۰**	۱۰/۰
۳۱	فامیل اول(سری شهرک)	-۳۱/۵	۱۲/۳	۳	۰/۶۵**	۸/۸
۳۲	فامیل اول لایه سطحی	-۳۳/۵	۴۳	۱/۲۸	۰/۸۱**	۷/۰
۳۳	فامیل اول لایه زیرین	-۲۶	۲	۲/۵	۰/۷۰**	۷/۸
۳۴	فامیل دوم(سری چهارمحال)	-۵۷/۷	۱۳/۲	۴	۰/۶۰**	۱۱/۸
۳۵	فامیل دوم لایه سطحی	-۶۶/۵	۶۴/۵	۱/۸۸	۰/۷۸**	۸/۳
۳۶	فامیل دوم لایه زیرین	-۶۱/۴	۹۷	۲	۰/۷۳**	۱۰/۴

CEC : برحسب cmolc/kg soil ؛ ماده آلی برحسب درصد ؛ PWP به درصد رطوبت وزنی

** و * : به ترتیب در سطح ۹۵٪ و۹۹٪ معنی‌دار هستند.

ns : به معنای معنی‌دار نبودن از لحاظ آماری می‌باشد.

مدل ۱ و۲ تقریباً یکسان عمل می‌کنند(مقایسه توابع ۶ و ۱۵ با توابع ۹ و ۱۸).

نوربخش و همکاران (۳) در یکی از توابع خود با استفاده از رگرسیون گام به گام نشان دادند که هیچ ویژگی دیگری به جزء ماده آلی نمی‌تواند وارد مدل گردد. آنها در نهایت توانستند با استفاده از ماده آلی CEC را برای ۸۵ نمونه خاک با pH< ۷ تخمین بزنند و به ضریب تعیین ۰/۴۶ و خطای استاندارد تخمین ۱۱/۵۹ دست یافتند. بل و کولن توانستند در ۲۹ نمونه خاک ورتی‌سول با استفاده از ویژگی رس در معادله خود CEC را تخمین و به ضریب تعیین ۰/۷۷ و خطای استاندارد تخمین ۱/۸ دست یافتند(۷).

این نتایج با ضرایب هم‌بستگی میان CEC با دو ویژگی ماده آلی ورس که در جدول ۳ ارائه شد هم خوانی دارد چرا که ضرایب هم‌بستگی میان CEC با ماده آلی در لایه‌های سطحی نسبت به لایه‌های زیرین بیشتر است. به نظر می رسد که عملکرد مدل (۱) تماماً به لایه‌بندی مربوط است و تفکیک خاک‌ها در سطح فامیل چندان مؤثر نیست. هم‌چنین می‌توان گفت که در این دو فامیل بر اساس ضرایب هم‌بستگی ماده آلی، نسبت به رس متغیر اثرگذارتری جهت تخمین CEC است.

استفاده توأم از دو متغیر درصد ماده آلی ودرصد رس باعث بهبود پیش‌بینی CEC می‌شود (مدل۳، جدول۶). کیفیت برازش مدل(۳) بدون تفکیک به مراتب از کیفیت برازش مدل‌های ساده (۱) و(۲) بیشتر است. تفاوت در آماره‌های R^2 و RMSE مربوط به مدل (۳) با دو مدل (۱) و(۲) منعکس شده است به طوری R^2 از ۰/۲۸ به۰/۶۷ افزایش و RMSE از ۱۴ به ۹/۵ کاهش یافته است.

در مجموع تفکیک خاک به فامیل و فامیل به لایه‌های سطحی و عمقی می‌تواند کیفیت مدل (۳) را به خصوص در لایه‌های سطحی بهبود دهد (توابع ۲۳ و۲۶). در این میان، تابع شماره ۲۴ با تفکیک فامیل به لایه بهبود نیافته است. احتمال

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2025-11-02]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1388.13.49.6.8]

می‌رود که تنوع کانی‌های رسی منطقه، عامل اصلی در ایجاد این نتیجه باشد. از آنجایی که معمولاً داده‌های بافت و ماده آلی موجود و یا اندازه‌گیری آنها راحت‌تر از اندازه‌گیری CEC است، استفاده از مدل (۳) عملی و مفید به نظر می‌رسد.

هرگاه اندازه‌گیری PWP مقدور و یا داده‌های مربوط به PWP و درصد ماده آلی در دسترس باشد می‌توان از مدل (۴) نیز استفاده کرد (جدول۷). دراین مدل از دو متغیر مستقل درصد ماده آلی و PWP استفاده شده است. هرچند تفکیک بر اساس فامیل باعث برازش ضعیف‌تر این مدل نسبت به مدل (۳) می‌شود. بنابراین، اگر در این مدل فقط از لایه‌بندی استفاده شود، نتایج مشابه با نتایج مدل (۳) خواهد بود. در مجموع، در این مدل تفکیک خاک به دو فامیل و هم‌چنین هر فامیل به لایه‌های سطحی وعمقی باعث بهبود کیفیت برازش مدل (۴) گردیده است (جدول۷). همان‌گونه که نتایج جداول ۶ و ۷ نیز نشان می‌دهند در همه توابع، ضریب تعیین در سطح ۹۹٪ معنی‌دار می‌باشند ولی در مدل‌های ۱و ۲ که نتایج آن در جداول ۴ و ۵ آمده است علاوه بر کمتر بودن ضرایب تعیین، در بعضی از توابع، این ضریب حتی در سطح ۹۰٪ نیز معنی‌دار نشده است و این خود اهمیت استفاده از این سه ویژگی(ماده آلی، رس و PWP) را با یکدیگر در مدل‌ها جهت تخمین CEC نشان می‌دهند. در نهایت می‌توان مدل‌های (۳) و(۴) را در صورت امکان اندازه‌گیری PWP از بهترین مدل‌ها جهت تخمین CEC دانست. سیبولد و همکاران (۲۳) نیز به این نکته اشاره نموده و بیان می‌کنند که ویژگی رس از آنجایی که قابل دسترس بوده و اطلاعات آن اغلب وجود دارد، بر ویژگی PWP ترجیح داده می‌شود.

ضریب ماده آلی نسبت به ضریب رس توابع، در نتایج مانریک و همکاران (۱۴) نیز در حدود ۲۰ برابر به دست آمد. آنها دلیل این موضوع را وجود شواهدی مبنی بر غالب بودن اسید فولویک در ترکیبات آلی خاک‌ها به خاطر داشتن گروه‌های کربوکسیل بیشتر نسبت به اسید هومیک دانستند ولی بل و کولن (۷) در توابع خود ضریب رس را بیشتر از ضریب ماده آلی به دست آوردند که متناقض با نتایج تحقیق حاضر است. طبق نتایج آنها وجود ارتفاع بالاو دمای پایین و هم‌چنین بارندگی زیاد باعث می‌شوند که سرعت تجزیه مواد آلی بسیار کم شود و به همین دلیل اثر موادآلی بر CEC کاهش یابد.

حدود RMSE در تحقیق حاضر با اکثر توابع حاصل از نتایج نوربخش و همکاران (۳) هم خوانی دارند. در تحقیق آنها برای دو رده آریدی سول (با استفاده از ماده آلی و رس) و آلفی سول (با استفاده از ماده آلی) RMSE به ترتیب برابر ۸/۴۲ و ۱۱/۵۹ به دست آمد. بل و کولن (۷) با به کاربردن دو ویژگی ماده آلی و رس درتوابع به RMSE کمتری نسبت به نتایج تحقیق حاضر (در حدود ۱/۵) و R^2 بالاتری (در حدود ۰/۸۵)دست یافتند. سیبولد و همکاران (۲۳) با برازش مدل‌های نمایی و تعداد زیادی داده با استفاده از سه ویژگی درصد کربن آلی، PWP و pH در خاک‌های آندی‌سول آمریکا به میانگین RMSE برابر ۰/۳ و میانگین R^2 برابر ۰/۷ دست یافتند.

در تحقیق حاضر بیشترین R^2 به دست آمده ۰/۸۱ است که فقط در دو مورد (توابع ۲۳ و۳۲) به دست آمده است. بنابراین، به نظر می‌رسد که عوامل دیگری نیز در تعیین CEC این دو فامیل خاک نقش دارند. برای تخمین CEC در این خاک‌ها شاید تعیین نوع رس، سطح ویژه (۲۶) و تعیین نوع ماده آلی بتواند در تخمین و یا تفسیر بهتر نتایج کمک کند.

برازش توابع انتقالی تخمین CEC با استفاده از روش شبکه عصبی مصنوعی

در برازش مدل‌های شبکه عصبی از همان متغیرهای مستقل درصد رس، ماده آلی و PWP به عنوان ورودی استفاده گردید وCEC به عنوان تنها خروجی مدل در نظر گرفته شد. لذا مدل‌های (۱) الی (۴) این بار به روش شبکه عصبی برازش شدند. نتایج در جداول ۸ تا ۱۱ آورده شده‌اند.

همان‌گونه که در جداول ۸ و ۹ مشاهده می‌شود تفکیک

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2025-11-02]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1388.13.49.6.8]

جدول۸ . مدل شبکه عصبی تخمین CEC با استفاده از درصد مادهی آلی خاک (مدل ۱)

شماره تابع	سطح تفکیک	R^2	RMSE
۳۷	بدون تفکیک	۰/۳۲	۰/۸۱
۳۸	دو فامیل لایه سطحی	۰/۸۴	۰/۴۰
۳۹	دو فامیل لایه زیرین	۰/۵۵	۰/۶۷
۴۰	فامیل اول(سری شهرک)	۰/۳۶	۰/۸۰
۴۱	فامیل اول لایه سطحی	۰/۸۹	۰/۳۲
۴۲	فامیل اول لایه زیرین	۰/۴۸	۰/۷۳
۴۳	فامیل دوم (سری چهارمحال)	۰/۲۸	۰/۸۲
۴۴	فامیل دوم لایه سطحی	۰/۸۲	۰/۴۲
۴۵	فامیل دوم لایه زیرین	۰/۷۸	۰/۴۵

جدول۹ . مدل شبکه عصبی تخمین CEC با استفاده از درصد رس خاک (مدل ۲)

شماره تابع	سطح تفکیک	R^2	RMSE
۴۶	بدون تفکیک	۰/۲۹	۰/۸۵
۴۷	دو فامیل لایه سطحی	۰/۳۹	۰/۷۸
۴۸	دو فامیل لایه زیرین	۰/۵۷	۰/۶۶
۴۹	فامیل اول(سری شهرک)	۰/۲۶	۰/۸۶
۵۰	فامیل اول لایه سطحی	۰/۴۴	۰/۷۶
۵۱	فامیل اول لایه زیرین	۰/۵۴	۰/۷۰
۵۲	فامیل دوم (سری چهارمحال)	۰/۳۷	۰/۸۰
۵۳	فامیل دوم لایه سطحی	۰/۴۰	۰/۷۸
۵۴	فامیل دوم لایه زیرین	۰/۷۵	۰/۵۰

جدول۱۰ . مدل شبکه عصبی تخمین CEC با استفاده از درصد رس و درصد مادهی آلی خاک (مدل ۳)

شماره تابع	سطح تفکیک	R^2	RMSE
۵۵	بدون تفکیک	۰/۷۳	۰/۳۸
۵۶	دو فامیل لایه سطحی	۰/۸۵	۰/۳۸
۵۷	دو فامیل لایه زیرین	۰/۷۵	۰/۵۰
۵۸	فامیل اول(سری شهرک)	۰/۷۴	۰/۵۱
۵۹	فامیل اول لایه سطحی	۰/۹۰	۰/۳۱
۶۰	فامیل اول لایه زیرین	۰/۶۷	۰/۵۸
۶۱	فامیل دوم (سری چهارمحال)	۰/۷۷	۰/۴۶
۶۲	فامیل دوم لایه سطحی	۰/۸۳	۰/۴۱
۶۳	فامیل دوم لایه زیرین	۰/۸۸	۰/۳۴

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2025-11-02]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1388.13.49.6.8]

جدول۱۱ . مدل شبکه عصبی تخمین CEC با استفاده از درصد ماده آلی خاک و PWP (مدل۴)

شماره تابع	سطح تفکیک	R^2	RMSE
۶۴	بدون تفکیک	۰/۶۳	۰/۶۰
۶۵	دو فامیل لایه سطحی	۰/۸۵	۰/۳۸
۶۶	دو فامیل لایه زیرین	۰/۷۲	۰/۵۳
۶۷	فامیل اول(سری شهرک)	۰/۶۸	۰/۵۶
۶۸	فامیل اول لایه سطحی	۰/۹۰	۰/۳۰
۶۹	فامیل اول لایه زیرین	۰/۷۳	۰/۵۲
۷۰	فامیل دوم (سری چهارمحال)	۰/۶۵	۰/۵۷
۷۱	فامیل دوم لایه سطحی	۰/۸۲	۰/۴۲
۷۲	فامیل دوم لایه زیرین	۰/۸۳	۰/۴۱

خاک به لایه‌های سطحی و زیرین مؤثر و تفکیک بر اساس فامیل غیر مؤثر بوده است. در این روش هم، مدل (۱) در لایه سطحی به مراتب بهتر عمل می‌کند و جداسازی لایه‌ها در هر فامیل باعث بهبود نسبی مدل (۲) به ویژه در لایه زیرین شده است (جدول ۹). در مجموع مدل (۱) نسبت به مدل (۲) عملکرد بهتری داشته است.

مطابق جدول ۱۰ بهترین مدل‌ها آنهایی هستند که ورودی‌های آن شامل ماده آلی و رس می‌باشند(مدل۳). در اکثر موارد، تفکیک خاک‌ها بر اساس فامیل و عمق، موجب افزایش R^2، کاهش RMSE و بهبود برازش مدل‌ها گردیده است. به عبارت دیگر، همان‌طور که انتظار می‌رفت ماده آلی و رس ورودی‌های مناسبی برای شبکه عصبی جهت تخمین CEC می‌باشند. همانند روش رگرسیون (جدول۷)، تفکیک خاک به دو لایه و به ویژه لایه‌بندی در هر فامیل خاک باعث بهبود کیفیت برازش مدل(۴) گردیده است (جدول۱۱).

به طور کلی از مقایسه نتایج جداول ۴ تا ۱۱ چنین برداشت می‌شود که در هردو روش رگرسیون و شبکه عصبی، تفکیک خاک بر اساس فامیل و عمق می تواند باعث بالارفتن R^2 و افزایش دقت (کاهش RMSE) توابع گردد. مانریک و همکاران (۱۴) نیز در تحقیق خود به این نتیجه رسیدند که سهم رس و ماده آلی در تخمین CEC در روابط رگرسیونی با تفکیک نمودن خاک‌ها بر اساس رده به طور معنی‌داری افزایش می‌یابد. شکل۳ خطوط رگرسیونی و مقادیر R^2 را بین CEC محاسبه شده از شبکه عصبی بهCEC اندازه‌گیری شده برای داده‌های آموزشی و آزمونی برای مدل(۳) نشان می‌دهند.

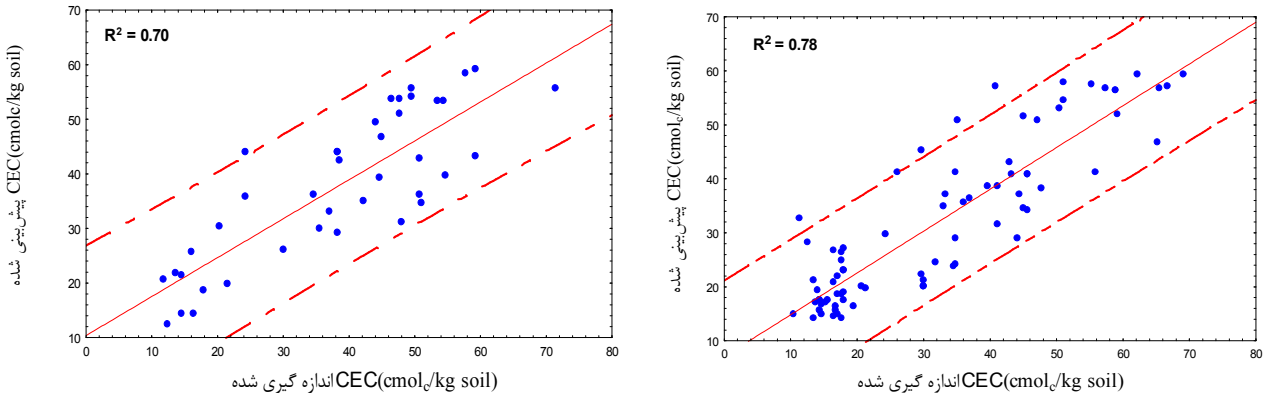
مقایسه دو روش برازش مدل‌های تخمین CEC

بهبود نسبی R^2 و RMSE به دنبال تفکیک خاک و استفاده از روش شبکه عصبی در مقابل رگرسیون با استفاده از مدل(۳) در جدول ۱۲ آمده است. اگر از روش شبکه عصبی برای برازش یک مدل خاص استفاده شود شاخص R^2 در مقایسه با روش رگرسیون در تمام سطوح تفکیک افزایش نشان می‌دهد. به موازات افزایش R^2، مقادیر RMSE مدل‌ها در تمام سطوح تفکیک در مدل‌سازی شبکه عصبی به شدت (بین ۱/۵ تا ۱۳ واحد CEC)کاهش پیدا کرده است. از بررسی نتایج به دست آمده از دو روش می‌توان چنین برداشت نمود که شبکه عصبی CEC را با صحت و دقت بالاتری تخمین می‌زند.

امینی و همکاران (۴) نیز نشان دادند که استفاده از مدل شبکه عصبی با الگوریتم FFBP نسبت به روش رگرسیون، CEC را با دقت قابل قبول‌تری پیش‌بینی می‌کند. اگرچه نتایج این پژوهشگران بر اساس ۸ گره در لایه پنهان به دست آمده است ولی در تحقیق حاضر CEC تنها با استفاده از یک

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2025-11-02]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1388.13.49.6.8]



شکل۳. نمودار مقادیر R^2 برای داده‌های آموزشی(سمت راست) و آزمونی(سمت چپ) مدل ۳ در محدوده ۵٪±

جدول۱۲ . مقایسه دو روش رگرسیون وشبکه عصبی در برازش مدل $CEC=B_0+B_1(\%Clay)+B_2(\%OM)$ برای سطوح مختلف تفکیک خاک به فامیل و لایه‌ها

سطح تفکیک خاک	برتری روش شبکه عصبی بر روش رگرسیون	
	افزایش R^2 (٪)	واحد کاهش RMSE
بدون تفکیک	۹	۹/۱
دو فامیل لایه سطحی	۱۳/۳	۸
دو فامیل لایه زیرین	۱۵/۴	۹/۵
فامیل اول(سری شهرک)	۲/۷	۷/۴
فامیل اول لایه سطحی	۱۱	۶/۹
فامیل اول لایه زیرین	۱/۵	۷/۷
فامیل دوم(سری چهارمحال)	۴	۸/۹
فامیل دوم لایه سطحی	۶/۴	۷/۹
فامیل دوم لایه زیرین	۱۳	۹

گره با R^2 بزرگ‌تر و RMSE کمتر تخمین زده شده است. به نظر می‌رسد علت اصلی دقت بالاتر مدل‌ها در تحقیق حاضر نسبت به نتایج آن پژوهشگران به رغم استفاده از گره کمتر، تفکیک خاک‌ها و یا همگنی بیشتر در خصوصیات خاک‌ها باشد. در مطالعه امینی و همکاران(۴) نمونه‌ها از مناطق مختلف با تفاوت زیاد در دامنه خصوصیات جمع‌آوری شده بود که این خود می‌تواند عدم یک‌نواختی ویژگی‌ها به خصوص در خاک‌های اریدی‌سول را افزایش دهد(۲۲).

نتیجه‌گیری

به طور کلی، تفکیک خاک‌ها بر اساس فامیل و تفکیک هر خاک و فامیل به لایه‌های زیرین و سطحی موجب افزایش دقت مدل‌ها در تخمین CEC شده است. دلیل اصلی افزایش دقت مدل‌ها را می‌توان به افزایش همگنی و یک‌نواختی ویژگی‌ها و هم‌چنین کاهش نسبی اختلاط اثرات این ویژگی‌ها پس از انجام تفکیک در بین گروه‌ها دانست. هم‌چنین، در هر دو روش رگرسیون و شبکه عصبی استفاده توأم از دو ویژگی ماده آلی و

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2025-11-02]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1388.13.49.6.8]

رس منجر به تخمین بهتری از CEC شد. در عین حال برای ایجاد توابع انتقالی CEC ، روش شبکه عصبی بر روش رگرسیون برتری دارد.

یکی از نواقص شبکه عصبی این است که برخلاف رگرسیون نمی‌تواند یک روش صریح برای انتخاب متغیرهای ورودی مؤثر همانند روش رگرسیون با حذف گام به گام متغیرهای غیر مؤثر فراهم نماید. برای رفع این اشکال شبکه عصبی و استفاده از مزایای آن پیشنهاد می‌شود که انتخاب مدل مناسب جهت تخمین CEC در دو مرحله انجام شود: در مرحله اول، متغیرها با استفاده از رگرسیون گام به‌گام، انتخاب و در مرحله دوم این متغیرها با استفاده از نرم افزار شبکه عصبی برازش شوند. با این حال از مزیت‌های شبکه عصبی این است که نیازمند تعیین یک تابع خاص برای بیان رابطه میان داده‌های ورودی و خروجی نیست و دیگر آن‌که شبکه‌های عصبی حداکثر اطلاعات را از داده‌های ورودی استخراج می‌کند(۲۲).

توصیه می‌شود برای بالابردن کیفیت و ارتقای نقشه‌های خاک (در استان چهار محال و بختیاری) این پژوهش برای خاک‌های دیگر این استان در مقیاسی وسیع‌تر و با تعداد نمونه بیشتر و هم‌چنین در اعماق بیشتر(حداقل ۱۰۰سانتی‌متر) انجام گیرد.

سپاسگزاری

اندازه‌گیری رطوبت در مکش ۱۵۰۰ کیلو پاسکال به وسیله دستگاه صفحه فشاری آزمایشگاه فیزیک خاک دانشگاه صنعتی اصفهان انجام گرفت. بدین وسیله از همکاری دکتر مجید افیونی استاد دانشگاه صنعتی اصفهان و مهندس صدر ارحامی کارشناس آزمایشگاه فیزیک خاک آن دانشگاه قدردانی می‌گردد. از آقای دکتر حسین شریعتمداری نیز به خاطر مشاورت در انجام این تحقیق سپاسگزاریم.

منابع مورد استفاده

۱. محنت کش، ع. ۱۳۷۸. ارزیابی کیفی، کمّی و اقتصادی تناسب اراضی منطقه شهرکرد برای محصولات زراعی مهم منطقه. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان.

۲. نجفی، پ. ۱۳۸۴. پیش بینی منحنی رطوبتی خاک با استفاده از توابع انتقالی و شبکه عصبی مصنوعی و ارزیابی دقت آن. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد.

۳. نوربخش، ف.، ا. جلالیان و ح. شریعتمداری. ۱۳۸۲. تخمین گنجایش تبادل کاتیونی خاک با استفاده از برخی ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک. علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی ۳: ۱۰۷-۱۱۷.

4. Amini, M., K. C. Abbaspour, H. Khademi, N. Fathianpour, M. Afyuni and R. Schulin. 2005. Neural network models to predict cation exchange capacity in arid regions of Iran. Eur. J. Soil Sci. 56:551-559.
5. Arnaud, R. J. and G. A. Septon. 1972. Contribution of clay and organic matter to cation exchange capacity of chernozemic soils. Can. J. Soil Sci. 52:124-126.
6. Asadu, C. L. A. and F. O. R. Akamigbo. 1990. Relative contribution of organic matter and clay fractions to cation exchange capacity of soils in southern Nigeria. Samaru. J. Agric. Res. 7:17-23.
7. Bell, M. A. and J. Van keulen. 1995. Soil pedotransfer functions for four Mexican soils. Soil Sci. Soc. Am. J. 59:865-871.
8. Bouma, J. 1989. Using soil survey data for quantitative land evaluation. Adv. in Soil Sci. 9:177-213.
9. Cassel, D.K. and D.R. Nielsen. 1986. Field capacity and available water capacity. PP. 901–926. *In*: Klute, A. (Ed.), Methods of Soil Analysis. Part 1, second ed. Agron. Monogr. 9. ASA and SSSA, Madison, WI.
10. Drake, E. H. and H. L. Motto. 1982. An analysis of the effect of clay and organic matter content on the cation exchange capacity of New Jersey soils. J. Soil. Sci. 133:281-288.
11. Forster, J. C. 1998. Soil physical analysis. PP. 105-115. *In*: Alef, K. and P. Nannipieri (Eds.), Methods in Applied Soil Microbiology and Biochemistry, Academic Press, London.
12. Loeppert, R. H. and D. L. Suarez. 1996. Carbonate and Gypsum, PP. 437-474. *In*: Spark, D.L., (Ed.), Methods of

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2025-11-02]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1388.13.49.6.8]

Soil Analysis. Part 3, American Society of Agronomy Inc, Madison, WI, USA.
13. Magdof, F. and R. R. Weil. 2004. Soil Organic Matter in Sustainable Agriculture, CRC PRESS, Washington, DC. 398 p.
14. Manrique, L. A., C. A. Jones and P. T. Dyke. 1991. Predicting cation exchange capacity from soil physical and chemical properties. Soil Sci. Soc. Am. J. 55:787-794.
15. McBratney, A. B., B. Minasny, S. R. Cattle and R. W. Vervoot. 2002. From pedotransfer function to soil inference system. Geoderma 109:41-73.
16. Merdun, H., Ö. Cinar and M. Apan. 2006. Comparison of artifical neural network and regression pedotransfer functions for prediction of soil water retention and saturated hydraulic conductivity. Soil and Tillage Res. 90:108-116.
17. Mohammadi, J. 2002. Testing artificial neural networks for predicting soil water retention characteristics from soil physical and chemical properties. 17th WCSS, Paper No. 210, Thailand.
18. Nelson, D. W. and L. P. Sommers. 1986. Total carbon, organic carbon and organic matter. PP. 539-579. *In*: A. C. Page (Ed.), Methods of Soil Analysis. Part 2, Am. Soc. Agron., Madison, Wisconsin, USA.
19. Oberthur, T., A. Dobermam and H. V. Neue. 1996. How good is a reconnaissance soil map for agronomic purposes? Soil Use and Manag. 12:33-43.
20. Pachepsky, Y. A. and W. J. Rawls. 2003. Soil structure and pedotransfer functions. Eur. J. Soil Sci. 54:443- 451.
21. Rogowski, A. S. and J. K. Wolf. 1994. Incorporating variability in soil map units delineation. Soil Sci. Soc. Am. J. 58:163-174.
22. Schaap, M. G., F. L. Leij and M. Th. van Genuchten. 1998. Neural network analysis for hierarchical prediction of soil hydraulic properties. Soil Sci. Soc. Am. J. 62:847-855.
23. Seybold, C. A., R. B. Grossman and T. G. Reinsch. 2005. Predicting Cation Exchange Capacity for soil survey using linear models. Soil Sci. Soc. Am. J. 69:856-863.
24. Stewart, W. M. and L. R. Hossner 2001. Factors affecting ratio of cation exchange capacity to clay content in lignite overburden. J. Environ. Qual. 30:1143-1149.
25. Tamari, S., J. H. M. Wosten and J. C. Ruiz-Suarez. 1996. Testing an artificial neural networks for predicting soil hydraulic conductivity, Soil Sci. Soc. Am. J. 60:1732-1741.
26. Thompson, M. L., H. Zhang, M. Kazemi and J. A. Sandor. 1989. Contribution of organic matter to cation exchange capacity and specific surface area of fractionated soil materials. Soil. Sci. 148:250-256.
27. USDA, NSCS, NSSC. 1996. Soil survay labratory methods manual, Soil survay investigations reports, No 42, version 3.
28. Wilding, L. P. and E. M. Rutledge. 1966. Cation exchange capacity as a function of organic matter, total clay, and various clay fractions in a soil toposequence. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 30:782-785.

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2025-11-02]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1388.13.49.6.8]