

تخمین هدایت هیدرولیکی اشباع در برخی از خاک‌های استان ایلام با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی و روش‌های رگرسیونی

علی حکمت‌زاد^۱، مسعود داوری^{۲*}، محمدعلی محمودی^۳ و کمال نبی‌الهی^۳

۱) دانش‌آموخته کارشناسی ارشد؛ گروه علوم و مهندسی خاک؛ دانشکده کشاورزی؛ دانشگاه کردستان؛ سنندج؛ ایران

۲*) استادیار گروه علوم و مهندسی خاک؛ دانشکده کشاورزی؛ دانشگاه کردستان؛ سنندج؛ ایران

نویسنده مسئول مکاتبات: m.davari@uok.ac.ir

۳) استادیار گروه علوم و مهندسی خاک؛ دانشکده کشاورزی؛ دانشگاه کردستان؛ سنندج؛ ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۱۱/۱۸ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۱۲/۱۷

چکیده:

هدایت هیدرولیکی اشباع (K_s) یکی از ورودی‌های مهم در مدل‌سازی جریان آب و انتقال آلاینده‌ها در خاک، طراحی سیستم‌های آبیاری و زهکشی، مدل‌سازی آب‌های زیرزمینی و فرایندهای زیست‌محیطی است. اندازه‌گیری مستقیم K_s در مزرعه و آزمایشگاه میسر می‌باشد؛ لیکن، معمولاً زمان‌بر، پرهزینه و دشوار بوده و در سطوح بزرگ نیز غیرعملی است. افزون بر این، به دلیل غیرهمگن بودن خاک و خطاهای آزمایشگاهی، تا حدودی این اندازه‌گیری‌ها غیرقابل اعتماد هستند. یکی از راه‌های غلبه بر این مشکل، استفاده از روش‌های غیرمستقیم همچون توابع انتقالی خاک می‌باشد. از آنجایی که تاکنون در منطقه مورد مطالعه توابعی انتقالی جهت برآورد K_s پیشنهاد نشده است؛ لذا در این پژوهش با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی و رگرسیون‌های آماری و بهره‌گیری از تعدادی محدود یا مجموعه‌ای وسیع‌تر از ویژگی‌های زودیافت خاکی، توابعی انتقالی برای برآورد K_s تبیین و کارایی آن‌ها ارزیابی شد. بدین منظور، هدایت هیدرولیکی اشباع ۹۵ نقطه محل از زیرحوزه‌های آبخیز چرداول - چمشیر در استان ایلام با استفاده از پرماتر گلف اندازه‌گیری شد. همچنین برخی از ویژگی‌های زودیافت خاک این نقاط مطالعاتی نیز تعیین شد. سپس اعتبار توابع اشتقاق یافته در تعیین K_s ، با استفاده از جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین خطا (ME) و ضریب همبستگی پیرسون (r) ارزیابی شد. با توجه به نتایج، K_s با میانگین هندسی قطر ذرات و مقدار شن دارای بیشترین همبستگی بود (به ترتیب دارای r معادل ۰/۵۸ و ۰/۵۶). نتایج نشان داد در صورت دسترسی به تعداد کمی از ویژگی‌های زودیافت خاکی، توابع انتقالی رگرسیونی و شبکه عصبی مصنوعی می‌توانند K_s را با دقت نسبتاً خوبی پیش‌بینی کنند (به ترتیب دارای $r_{R-val} = ۰/۸۵$ و $RMSE_{R-val} = ۶/۸۱$ mm/hr و $r_{ANN-test} = ۰/۸۷$ و $RMSE_{ANN-test} = ۱۰/۸۰$ mm/hr). این در حالی است که با توجه به نتایج، در صورت استفاده از ویژگی‌های زودیافت بیشتر، دقت پیش‌بینی K_s توسط مدل شبکه عصبی در هر دو مرحله آموزش و آزمون افزایش یافت ($r_{train} = ۰/۹۲$ ، $RMSE_{train} = ۴/۳۶$ mm/hr و $r_{test} = ۰/۸۹$ و $RMSE_{test} = ۷/۱۷$ mm/hr). در مجموع نتایج نشان دادند که شبکه‌های عصبی مصنوعی در مقایسه با مدل‌های رگرسیونی خطی دارای کارایی نسبتاً بهتر در تخمین هدایت هیدرولیکی اشباع خاک می‌باشند.

کلید واژه‌ها: توابع انتقالی خاک؛ پرماتر گلف؛ شبکه‌های عصبی؛ ویژگی‌های زودیافت خاک؛ هدایت هیدرولیکی اشباع

مقدمه

شبیه‌سازی فرسایش و روان‌آب، مدل‌سازی جریان آب

در سفره‌های زیرزمینی و همچنین طراحی سیستم‌های

آبیاری و زهکشی در خاک کاربرد دارد (Bagarello et

al., 2009). این در حالی است که اندازه‌گیری مستقیم

هدایت هیدرولیکی اشباع (K_s)، به‌عنوان یکی از

ویژگی‌های مهم هیدرودینامیکی خاک، در مطالعه

حرکت آب در خاک، انتقال نمک‌ها و آلاینده‌ها،

ارائه می‌دهند (Bruand *et al.*, 2003). حال آن‌که توابع انتقالی پیوسته (Continuous PTFs)، امکان برآورد ویژگی‌های دیریافت خاک را از روی ویژگی‌های زودیافت در کلیه‌ی نقاط مثلث بافت خاک به‌طور پیوسته فراهم می‌آورند (Al Majou *et al.*, 2008). توابع کلاسی در مقایسه با توابع پیوسته ارزان و سریع بوده، لیکن دارای دقت کمتری می‌باشند. مدل‌های رگرسیونی چندگانه خطی و غیرخطی، رگرسیون‌های درختی و شبکه‌های عصبی مصنوعی از جمله روش‌های نوین بسط PTFs می‌باشند. تجزیه و تحلیل‌های رگرسیونی، روشی آماری برای بررسی و مدل‌سازی رابطه بین متغیرهای مستقل و وابسته هستند. در روش‌های آماری، واقعیت پدیده یا پدیده‌ها با بهره‌گیری از روابط یا معادلاتی جبری بیان شده که فرضیات اصلی مسأله در آن‌ها نیز لحاظ شده است (Rezaei Arshad *et al.*, 2013). این در حالی است که شبکه‌های عصبی مصنوعی یک شبکه به‌هم پیوسته از واحدهای پردازش به‌نام سلول‌های عصبی بوده، که خود شبیه سلول‌های عصبی بیولوژیک مغز انسان عمل می‌کنند. در شبکه‌های عصبی سعی بر این است که ساختاری پی‌ریزی شود که همچون مغز انسان، قدرت یادگیری، تعمیم و تصمیم‌گیری را داشته باشد. در این گونه ساختارها هدف بر این است که با معرفی عملکرد یک سیستم پویا، مدل را آموزش و چگونگی عملکرد سیستم را در حافظه مدل ذخیره کرده و از آن در مواردی که در قبل با آن مواجه نشده است، استفاده کرد (Lim and Kolay, 2009). اجزای یک شبکه عصبی مصنوعی عبارتند از مجموعه‌ای از ورودی‌ها، واحدهای خروجی و واحدهای پنهان، که خروجی‌ها و ورودی‌ها را با هم مرتبط می‌سازد. در واقع واحدهای پنهان با استفاده از اطلاعاتی که از بخش ورودی می‌گیرند، اطلاعات خروجی که ویژگی‌های دیریافت خاک می‌باشند، را برآورد می‌کنند

این پارامتر پرهزینه، زمان‌بر و دشوار می‌باشد (Patil and Singh, 2016). به‌دلیل وابستگی بالای هدایت هیدرولیکی اشباع خاک به فراوانی نسبی ذرات و ساختمان خاک، این ویژگی دارای تغییرپذیری مکانی زیادی است. در سطوح بزرگی همچون حوزه‌های آبخیز که تغییرپذیری مکانی خاک زیاد بوده یا در خاک‌هایی که به شدت تحت تأثیر فعالیت‌های انسان قرار دارند، به‌منظور تعیین هدایت هیدرولیکی اشباع خاک اندازه‌گیری‌های زیادی نیاز است (قربانی دشتکی و همکاران، ۱۳۹۱). این تغییرپذیری زمانی و مکانی هدایت هیدرولیکی اشباع خاک سبب می‌شود اندازه‌گیری مستقیم و دقیق چنین ویژگی، با انجام نمونه‌برداری‌هایی فراوان میسر شود (Islam *et al.*, 2006). در سال‌های اخیر استفاده از روش‌های غیرمستقیم برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع خاک که کم‌هزینه، سریع و به‌آسانی قابل دسترس باشند، مورد توجه محققین خاک و آب قرار گرفته است (Qiao *et al.*, 2018). از این روش‌های غیرمستقیم، کم‌هزینه، سریع و در عین حال دقیق می‌توان به توابع انتقالی خاک (Pedotransfer functions, PTFs) اشاره کرد. در توابع انتقالی با استفاده از داده‌های زود یافت خاک همچون توزیع اندازه ذرات، جرم مخصوص ظاهری، تخلخل و مقدار ماده آلی، برخی خصوصیات دیریافت خاک همچون ویژگی‌های هیدرولیکی و مکانیکی تخمین زده می‌شود. استفاده از نتایج حاصل از توابع انتقالی، به‌عنوان ورودی مدل‌های مختلف در مقیاس حوزه‌های آبخیز و منطقه‌ای می‌تواند بسیار مفید باشد (بابائیان و همکاران، ۱۳۹۲). توابع انتقالی خاک را براساس روش بنیان آن‌ها می‌توان به دو گروه کلاسی و پیوسته تقسیم‌بندی کرد (Wösten *et al.*, 2001). توابع انتقالی کلاسی (Class PTFs) توابعی هستند که به‌طور ساده، میانگینی از ویژگی‌های دیریافت خاک را برای هر کلاس بافتی

(۱۹۹۶)، Schaap و Leij (۱۹۹۸)، Minasny و همکاران (۲۰۰۴)، Parasuraman و همکاران (۲۰۰۶)، Rogiers و همکاران (۲۰۱۲) و Xu و همکاران (۲۰۱۷) اشاره کرد. در ایران نیز نواییان و همکاران (۱۳۸۳)، قنبریان علویجه و همکاران (۱۳۸۸)، نصرتی کاریزک و همکاران (۱۳۹۱)، خاشعی سیوکی و همکاران (۱۳۹۴) و خلیلی مقدم و همکاران (۱۳۹۴) هدایت هیدرولیکی خاک را با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی برآورد کردند. این محققین نشان دادند که در بیشتر موارد شبکه‌های عصبی مصنوعی نسبت به روش‌های رگرسیونی در برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع خاک دارای عملکرد بهتری می‌باشند. امروزه شبکه‌های عصبی مصنوعی یک ابزار مناسب برای مدل‌سازی پیچیده روابط غیرخطی "ورودی‌ها - خروجی‌های" وابسته به هم می‌باشند. یکی از مهم‌ترین این شبکه‌های عصبی مصنوعی، شبکه پرسپترون چندلایه (Multi-layer perceptron MLP) بوده که در مدل‌سازی فرایندهای هیدرولوژیک و اکولوژیک بسیار کارآمد می‌باشد (Schaap and Leij, 1998). این شبکه‌ها شامل مجموعه‌ای از واحدهای حسی (نرون‌های پایه) بوده که متشکل از یک لایه ورودی، یک یا چند لایه پنهان و یک لایه خروجی می‌باشند. علایم ورودی در خلال شبکه و در مسیری رو به جلو به صورت لایه به لایه منتشر می‌شود (Xu et al., 2017).

با بررسی پژوهش‌های انجام شده در گذشته می‌توان دریافت که بیشتر توابع انتقالی پیشنهادی جهت برآورد ویژگی‌های دیررفت خاک، با محدودیت‌های همچون وابستگی به نوع و میزان دقت روش اندازه‌گیری آن پارامتر و دقت شخص آزمایش‌گر، عدم نظر گرفتن ساختمان و مینرالوژی رس‌ها، وابستگی زمانی توابع (به دلیل وجود اثرات فرسایش و شخم)، نبودن اطلاعات جانبی و تکمیلی راجع به شرایط خاک نمونه‌برداری شده

(Minasny et al., 2004). در یک مدل شبکه عصبی مصنوعی نرون‌هایی با ویژگی‌های مشابه در گروه‌هایی تحت‌عنوان لایه به صورت مرتب قرار می‌گیرند. هر یک از نرون‌های لایه ورودی در وزنی ضرب می‌شوند. مقدار این وزن‌ها تعیین کننده تأثیر هر متغیر بر میزان عملکرد لایه ورودی است. هر عنصر پردازش‌گر یا نرون از دو بخش تشکیل شده است. در بخش نخست، مجموع وزنی مقادیر ورودی توسط تابع جمع محاسبه می‌شود. سپس حاصل این تابع از تابع دیگری تحت عنوان تابع فعالیت عبور کرده و به این ترتیب خروجی نرون حاصل می‌شود. تابع فعالیت که اصطلاحاً تابع آستانه یا تابع انتقال نیز نامیده شده شبیه یک فیلتر غیرخطی است و موجب می‌شود تا خروجی نرون در یک محدود خاص عددی قرار گیرد (Xu et al., 2017). مهم‌ترین موضوع در مدل شبکه‌های عصبی مصنوعی، انتخاب ورودی‌های مناسب به مدل برای رسیدن به خروجی‌های مدنظر است. افزون بر این، ساختار شبکه‌های عصبی مصنوعی و چگونگی انتخاب ارتباط بین نرون‌ها و وزنی که هر نرون به خود اختصاص می‌دهد، دارای اهمیت زیادی می‌باشد (فلامکی و اسکندری، ۱۳۹۱). Ahuja و همکاران (۱۹۸۹)، Jarvis و همکاران (۲۰۰۲)، Merdun و همکاران (۲۰۰۶)، Amirun و Amin (۲۰۰۹) و Zhao و همکاران (۲۰۱۶) روش‌های رگرسیون خطی و غیرخطی را برای تخمین هدایت هیدرولیکی خاک پیشنهاد کردند. لیکن، به دلیل توانایی شبکه‌های عصبی مصنوعی در مدل‌سازی فرایندهای بسیار پیچیده، که تعداد عوامل تأثیرگذار در آن‌ها زیاد است، استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی در علوم خاک گسترش یافته است. در همین راستا، به تدریج برای برآورد هدایت هیدرولیکی خاک از شبکه‌های عصبی مصنوعی نیز استفاده گردید که از جمله آن‌ها می‌توان به پژوهش‌های Tamari و همکاران

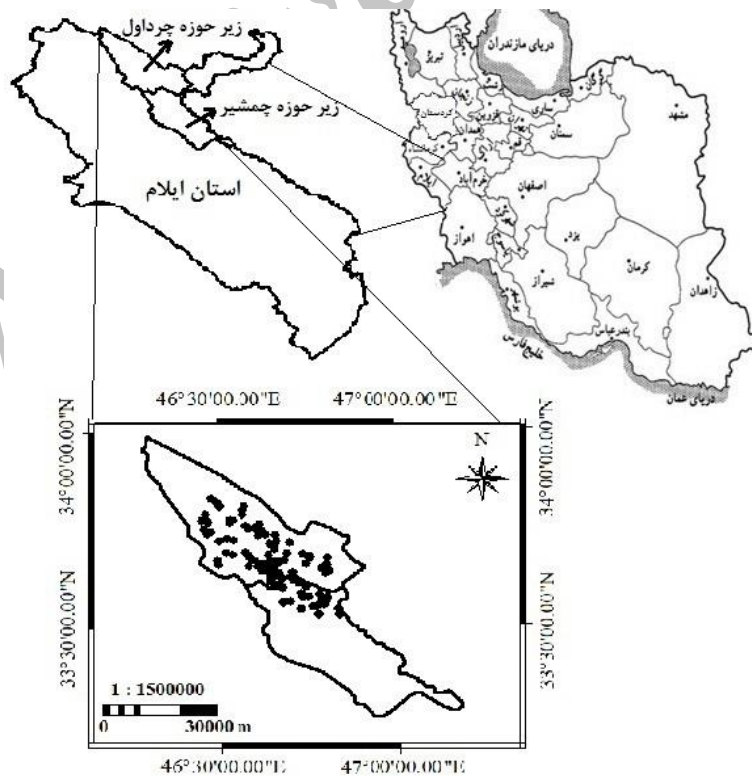
محدود و یا مجموعه‌ای وسیع‌تر از پارامترهای زود یافت خاکی، ارزیابی نمود.

مواد و روش‌ها

معرفی منطقه مورد مطالعه: منطقه مورد مطالعه

بخش‌هایی از اراضی واقع در زیرحوزه‌های آبخیز چرداول و چمشیر در استان ایلام می‌باشد (شکل ۱). این منطقه از نظر موقعیت جغرافیایی حد فاصل $33^{\circ}16'21''/44''$ تا $33^{\circ}59'13''/49''$ عرض شمالی و $46^{\circ}17'04''/86''$ تا $47^{\circ}10'45''/82''$ طول شرقی قرار دارد. مساحت منطقه مورد مطالعه به‌صورت تقریبی معادل $1880/85$ کیلومتر مربع بوده، بیشینه و کمینه درجه حرارت میانگین سالانه به‌ترتیب ۲۵ و ۱۱ درجه سانتی‌گراد و متوسط بارندگی سالانه نیز ۵۰۰ میلی‌متر می‌باشد. رژیم رطوبتی و حرارتی خاک این منطقه به ترتیب زیریک (Xeric) و مزیک (Mesic) است. سیمای اراضی منطقه تپه‌ای و کوهستانی و جهت شیب غالب نیز به سمت شمال شرقی می‌باشد.

و یا وضعیت پوشش گیاهی و سطح زمین مواجه هستند (بابائیان و همکاران، ۱۳۹۲). این موضوع بیان‌گر آن است که به دلیل وجود تغییرپذیری زیاد مکانی ویژگی‌های خاک به‌ویژه هدایت هیدرولیکی اشباع، معمولاً توابع انتقالی پیشنهادی این ویژگی در دیگر نقاط ایران، منحصر به آن مناطق بوده، لذا استفاده از این توابع در خاک‌های سایر مناطق همچون استان ایلام می‌تواند با عدم قطعیت و اطمینان زیادی همراه باشد. بنابراین، با توجه به محدود بودن پژوهش‌های مشابه در منطقه مورد مطالعه و با توجه به دشواری، زمان‌بر بودن و هزینه بالای روش‌های مستقیم اندازه‌گیری K_s ، در این پژوهش تلاش شد: الف- با بهره‌گیری از روش‌های رگرسیونی و شبکه‌های عصبی مصنوعی، توابعی انتقالی برای پیش‌بینی هدایت هیدرولیکی اشباع برخی از خاک‌های استان ایلام پیشنهاد کرد. ب- کارایی شبکه‌های عصبی مصنوعی را در برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع خاک، با استفاده از تعدادی



شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه در استان ایلام و ایران

روش مدل‌سازی توابع انتقالی خاک: توابع انتقالی

خاک با استفاده از روش‌های رگرسیون خطی چندگانه (Multiple Linear Regression: MLR) و شبکه‌های عصبی مصنوعی (Artificial Neural Networks: ANNs) ایجاد شدند. برای اشتقاق توابع انتقالی پیشنهادی بر مبنای رگرسیون خطی چندگانه از نرم افزار SPSS 18.0 و بر مبنای شبکه عصبی مصنوعی از نرم‌افزار Matlab استفاده گردید. شبکه‌های عصبی مورد استفاده از نوع پرسپترون چندلایه (MLP) با الگوریتم آموزشی لوبز - مارکواریت است. روش ورود داده‌ها بدین گونه بود که به صورت تصادفی ۷۰ درصد داده‌ها برای آموزش و ۳۰ درصد نیز برای آزمون شبکه انتخاب شدند. تقسیم نمودن داده‌ها به دو بخش آموزش و آزمون و استفاده نکردن از داده‌های آزمون در فرایند آموزش، معمولی‌ترین روش برای تخمین خطای تعمیم‌سازی در شبکه‌های عصبی مصنوعی می‌باشد (خلیلی مقدم و همکاران، ۱۳۹۴). شایان ذکر است که پیش از آموزش شبکه، داده‌های ورودی به آن نرمال شدند. هدف از نرمال‌سازی داده‌ها این است که به اعدادی از صفر تا یک تبدیل شوند. زیرا در این پژوهش برای عناصر پردازشگر (نرون‌ها) در لایه پنهان، تابع آستانه از نوع سیگموئیدی بوده که خروجی آن بین صفر تا یک می‌باشد. از این رو داده‌های ورودی به این تابع نیز بایستی اعدادی بین صفر و یک باشند (Xu et al., 2017). بنابراین در این پژوهش به منظور نرمال‌سازی داده‌ها از رابطه زیر استفاده گردید:

$$y_{norm} = \left[\frac{y - y_{min}}{y_{max} - y_{min}} \right] \quad (1)$$

که در آن، y_{norm} مقدار نرمال شده ورودی y ، y_{max} بیشینه و y_{min} کمینه داده‌های اولیه می‌باشد.

داده‌های زودیافت خاکی ورودی به مدل‌ها نیز شامل درصد شن، سیلت و رس، میانگین و انحراف معیار

کلاس‌های بافتی خاک‌های منطقه مورد مطالعه نیز شامل لوم رسی، لوم رس سیلتی، رس سیلتی، لوم، رس و لوم شنی می‌باشد. کاربری‌های اراضی غالب نیز مرتع، جنگل و اراضی زراعی است. اراضی زراعی در این منطقه به‌طور معمول تحت کشت گندم، جو، برنج و باغات میوه می‌باشد.

روش نمونه برداری و اندازه‌گیری ویژگی‌های

خاک: منطقه مورد مطالعه براساس ویژگی‌های توپوگرافی، زمین‌شناسی، کاربری اراضی و قابلیت اراضی به واحدهای کاری مجزایی تفکیک شد. سپس در این واحدهای کاری ۹۵ نقطه محل برای نمونه‌برداری به صورت تصادفی طبقه‌بندی شده با در نظر گرفتن سطح آن تعیین گردید. در این پژوهش هدایت هیدرولیکی اشباع خاک در عمق ۳۰ سانتی متری همه مکان‌های نمونه‌برداری با استفاده از نفوذسنج گلف اندازه‌گیری شد. شایان ذکر است که از همان محل اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی اشباع خاک نیز نمونه‌هایی دست‌خورده برداشت شد. نمونه‌ها پس از انتقال به آزمایشگاه و هوا خشک کردن از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شدند. در این پژوهش برای اندازه‌گیری پارامترهای زود یافت خاک همچون توزیع اندازه‌ی ذرات خاک از روش هیدرومتری، کربن آلی خاک از روش والکلی - بلک، جرم ویژه ظاهری خاک از روش کلوخه، جرم ویژه حقیقی خاک از روش پیکنومتر، رطوبت معادل ظرفیت زراعی با دستگاه صفحات فشاری (Pressure plate) و تخلخل کل خاک نیز از طریق محاسبه نسبت جرم ویژه ظاهری (ρ_b) به جرم ویژه حقیقی (ρ_s) و استفاده از رابطه $n=1-\rho_b/\rho_s$ به دست آمد. همچنین تخلخل مؤثر با استفاده از تخلخل کل و رطوبت معادل ظرفیت زراعی (θ_{FC}) و بهره‌گیری از رابطه $\theta_e = \theta_{FC} - n$ محاسبه شد (Dane and Topp, 2002). برای محاسبه‌ی میانگین هندسی و انحراف معیار هندسی قطر ذرات خاک نیز از روابط پیشنهادی شیرازی و بورسما استفاده شده است (Shirazi and Borsema, 1984).

نتایج و بحث

توصیف آماری ویژگی‌های اندازه‌گیری شده خاکی و ارزیابی همبستگی بین هدایت هیدرولیکی اشباع با این ویژگی‌ها

نتایج آماره‌های توصیفی داده‌های زودیافت خاکی و هدایت هیدرولیکی اشباع که در ایجاد توابع انتقالی به کار رفته‌اند، در جدول ۱ ارائه شده است. همان‌گونه که در این جدول مشاهده می‌شود آستانه‌ی کمینه و بیشینه هدایت هیدرولیکی اشباع خاک بین ۰/۶ تا ۵۵/۵ میلیمتر بر ساعت متغیر می‌باشد. انحراف معیار حاصل از داده‌های هدایت هیدرولیکی اشباع نیز معادل ۱۲/۱۱ و ضریب تغییرات آن نیز ۱۲۵ درصد است. با توجه به نتایج حاصل از جدول ۱، مقدار رس و شن خاک‌های مورد مطالعه به ترتیب در دامنه‌هایی از ۶۱-۸ و ۶۳-۲/۷۱ درصد متغیر بوده که خود تأییدی بر این موضوع است که خاک‌های مورد مطالعه محدوده‌ای وسیع از کلاس‌های بافتی را در بر می‌گیرند. میانگین جرم ویژه ظاهری و حقیقی خاک‌ها نیز به ترتیب معادل ۱/۳۵ و ۲/۶۰ گرم بر سانتی‌متر مکعب به دست آمد. مقدار میانگین ماده آلی خاک‌ها در منطقه مورد مطالعه نیز برابر ۱/۸۳ درصد اندازه‌گیری شده، که این مقدار کمتر از حد بهینه ماده آلی در خاک می‌باشد. میانگین مقدار تخلخل کل و مؤثر خاک‌ها نیز به ترتیب معادل ۴۹ و ۱۲/۸ درصد بود. ضریب تغییرات (CV) برای همه ویژگی‌های خاکی (به استثنای جرم ویژه ظاهری و حقیقی و تخلخل کل) بیشتر از ده درصد می‌باشد. این بدین معنی است که بیشتر متغیرهای اندازه‌گیری شده در منطقه مورد مطالعه از تغییرپذیری متوسط و قوی برخوردار می‌باشند. زیرا با توجه به Hamilton (۱۹۹۰)، اگر قدر مطلق CV متغیری کمتر از ۱۰٪ باشد آن متغیر دارای تغییرپذیری ضعیفی است، اگر بین ۱۰ تا ۱۰۰٪ قرار گیرد تغییرپذیری آن متوسط و در غیر این صورت متغیر دارای تغییرپذیری قوی می‌باشد. بالا بودن ضریب تغییرات بیانگر وجود تغییرات مکانی زیاد ویژگی‌های تعیین شده در منطقه مورد مطالعه می‌باشد.

هندسی قطر ذرات، d_{10} ، d_{30} ، d_{50} ، d_{60} ، جرم ویژه ظاهری، درصد ماده آلی، تخلخل کل و مؤثر بود.

شاخص‌های ارزیابی: توابع انتقالی خاک به طور معمول با میزان تطابق بین مقادیر اندازه‌گیری و برآورد شده ارزیابی می‌شوند. کمتر بودن اختلاف بین مقادیر اندازه‌گیری و برآورد شده، دقت توابع پیشنهادی را در برآورد پارامترهای موردنظر نشان می‌دهد. در این پژوهش جهت ارزیابی نتایج حاصل از مدل‌های رگرسیونی و شبکه عصبی مصنوعی و مقایسه آن با داده‌های واقعی اندازه‌گیری شده از آماره‌های ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE: Root mean square error)، میانگین خطا (ME: Mean error) و ضریب همبستگی پیرسون (r) استفاده شد. در زیر بیان ریاضی این شاخص‌های آماری ارائه شده است:

$$RMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (E_i - M_i)^2}{n} \right]^{1/2} \quad (2)$$

$$ME = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (E_i - M_i)}{n} \right] \quad (3)$$

$$r = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (E_i - \bar{E})(M_i - \bar{M})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (E_i - \bar{E})^2 \sum_{i=1}^n (M_i - \bar{M})^2}} \right] \quad (4)$$

که در آن‌ها، M_i مقادیر اندازه‌گیری شده‌ی متغیر، E_i مقادیر پیش‌بینی شده آن و n تعداد کل نمونه‌ها می‌باشد. با توجه به این آماره‌ها مدلی دارای نتایج بهتری است که کمترین مقدار RMSE و ME (مقادیر نزدیک به صفر) و r نزدیک به ۱ داشته باشد.

جدول ۱. برخی پارامترهای زود یافت خاکی استفاده شده در رگرسیون خطی چندگانه و شبکه‌های عصبی مصنوعی جهت برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع خاک

داده‌های اندازه‌گیری شده					ویژگی‌های مورد بررسی
ضریب تغییرات (%)	انحراف معیار	میانگین	حداکثر	حداقل	
۱۲۵	۱۲/۱۱	۹/۷۸	۵۵/۵	۰/۶	هدایت هیدرولیکی اشباع (mm/hr)
۲۸/۷	۱۰/۲	۳۵/۶	۶۱	۸	رس (%)
۱۵/۲	۷/۱	۴۶/۶	۶۶	۲۷	سیلت (%)
۵۲/۸	۹/۴۴	۱۶/۸۸	۶۳	۲/۷۱	شن (%)
۱۰۴/۷	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۱۹	۰/۰۰۱۸	میانگین هندسی قطر ذرات (mm)
۲۰/۸	۲/۲	۱۰/۶	۱۵/۵	۶۲	انحراف معیار هندسی قطر ذرات
۶/۴۶	۰/۰۸۶	۱/۳۲۷	۱/۴۹۳	۱/۰۱۵	جرم ویژه ظاهری (g/cm ³)
۲/۶۴	۰/۰۷	۲/۶۰	۲/۸۰	۲/۴۰	جرم ویژه حقیقی (g/cm ³)
۵۱/۶	۰/۹۴	۱/۸۱	۵/۳۸	۰/۵۰	ماده آلی (%)
۵/۶	۰/۰۲۷	۰/۴۸۹	۰/۵۸۴	۰/۴۴۳	تخلخل کل (cm ³ /cm ³)
۴۴/۰۲	۰/۰۵۶	۰/۱۲۷	۰/۳۲	۰/۰۱	تخلخل موثر (cm ³ /cm ³)

مثبت و معنی‌داری در سطح ۰/۰۱ درصد وجود دارد (به ترتیب دارای r معادل ۰/۳۴، ۰/۴۹، ۰/۵۸ و ۰/۴۷). براساس این نتایج، هدایت هیدرولیکی اشباع با میانگین هندسی قطر ذرات خاک دارای بیشترین همبستگی می‌باشد ($r = ۰/۵۸^{**}$). پارامترهای d_p و σ_p که بازگوکننده تخلخل و به تبع آن ساختمان خاک بوده و برگرفته از فراوانی نسبی ذرات خاک می‌باشند، به‌طور مثبت و معنی‌داری بر هدایت هیدرولیکی اشباع خاک تأثیر می‌گذارند. بدین‌گونه که با افزایش d_p یعنی میانگین هندسی قطر ذرات خاک، اندازه خلل و فرج خاک بیشتر و به تبع آن هدایت هیدرولیکی اشباع خاک افزایش می‌یابد. این یافته‌ها با نتایج حاصل از پژوهش نوابیان و همکاران (۱۳۸۳) سازگاری دارد. افزایش σ_p نیز که به معنی افزایش عدم یکنواختی ذرات خاک می‌باشد، می‌تواند در خاک‌های ریز و متوسط بافت مورد مطالعه، باعث افزایش تخلخل خاک گشته و هدایت هیدرولیکی اشباع را افزایش دهد. نتایج جدول ۲ همچنین نشان داد هدایت هیدرولیکی اشباع در خاک‌های مورد مطالعه، با جرم ویژه ظاهری، تخلخل کل و مؤثر و ماده آلی خاک همبستگی معنی‌داری نداشت. شاید بتوان علت نبود همبستگی معنی‌دار بین

در جدول ۲ ضریب همبستگی پیرسون بین هدایت هیدرولیکی اشباع و ویژگی‌های مبنایی خاک ارائه شده است. همان‌گونه که در این جدول مشاهده می‌شود، مقدار رس با هدایت هیدرولیکی اشباع دارای همبستگی منفی و معنی‌داری است ($r = -۰/۴۱^{**}$). این در حالی است که همبستگی شن با هدایت هیدرولیکی اشباع مثبت و معنی‌دار می‌باشد ($r = ۰/۵۶^{**}$). این نتایج با یافته‌های Jarvis و همکاران (۲۰۰۲) و Vereecken و همکاران (۱۹۹۰) همخوانی دارد. هدایت هیدرولیکی اشباع در خاک به‌شدت تحت تأثیر بافت و ساختمان خاک است. هدایت هیدرولیکی اشباع در خاک‌های درشت بافت بیشتر از خاک‌های ریز بافت می‌باشد. زیرا جریان اشباع آب در خاک بیشتر از طریق منافذ درشت خاک صورت می‌گیرد. از آنجایی تعداد منافذ درشت در خاک‌های درشت بافت و بین ذرات شن بیشتر از خاک‌های ریز بافت و بین ذرات رس است، از این نظر هدایت هیدرولیکی اشباع در خاک‌های شنی بیشتر از خاک‌های رسی می‌باشد. با توجه به نتایج، بین هدایت هیدرولیکی اشباع خاک و ویژگی‌های زود یافتی همچون d_{10} ، d_{50} و میانگین و انحراف معیار هندسی قطر ذرات خاک همبستگی‌های

و تخلخل کل و مؤثر از توزیع نرمال تبعیت کردند. لیکن، هدایت هیدرولیکی اشباع، میانگین هندسی قطر ذرات و درصد ماده آلی با اعمال تبدیل لگاریتم طبیعی و فراوانی نسبی شن و d_{10} با اعمال تبدیل ریشه مربعات به صورت نرمال درآمدند. Tietje و Hennings (۱۹۹۶) و Jarvis و همکاران (۲۰۰۲) نیز بیان داشتند که هدایت هیدرولیکی اشباع از توزیعی لگاریتمی پیروی می‌کند. در زمان برقراری رگرسیون خطی چندگانه، هرگاه بین دو یا چند متغیر همبستگی قوی وجود داشته باشد همراستایی چندگانه به وجود می‌آید. به دلیل مشکلاتی که همراستایی چندگانه در تفسیر و برآورد متغیرهای وابسته ایجاد می‌کند باید از به کار گرفتن آن اجتناب کرد. در این پژوهش برای ارزیابی آزمون همراستایی بین متغیرهای مستقل از نرم افزار SPSS 18 و فاکتور عامل تورم واریانس (VIF: Variance inflation factor) استفاده شد. در صورتی که شاخص VIF متغیر مستقلی کمتر از ۱۰ باشد، بدین معنی است که این متغیر مستقل با دیگر متغیرها دارای همبستگی نمی‌باشد. نتایج بدست آمده نشان داد که بین درصد رس و سیلت و میانگین هندسی قطر ذرات خاک همراستایی وجود دارد. به همین دلیل پارامترهایی که تأثیر کمتری بر هدایت هیدرولیکی اشباع خاک داشته و از سویی دیگر دارای همراستایی بالایی بودند از فهرست متغیرهای ورودی حذف شدند.

هدایت هیدرولیکی اشباع و تخلخل خاک را این‌گونه بیان کرد که اغلب خاک‌های مورد مطالعه دارای کلاس بافتی سنگین تا نیمه سنگین بوده، که خود دارای تخلخل ریز بیشتر و ضریب اعوجاج بالاتری می‌باشند. این در حالی است که جریان اشباع آب در خاک عمدتاً از منافذی با قطر زیاد و اعوجاج کمتر صورت می‌گیرد. لازم به ذکر است که مواد آلی نیز به دلیل کم بودن مقدار آن‌ها در خاک‌های مورد مطالعه، تأثیر معنی‌داری بر هدایت هیدرولیکی اشباع خاک نداشتند. این نتایج با یافته‌های قربانی دشتکی و همکاران (۱۳۹۱) همخوانی دارد.

پیش‌بینی هدایت هیدرولیکی اشباع خاک با استفاده از رگرسیون‌های خطی چندگانه

نخستین گام در تجزیه و تحلیل داده‌ها در آزمون‌های آماری نرمال کردن داده‌ها است؛ زیرا آزمون‌های فرض خود براساس نرمال بودن توزیع داده‌ها پی‌ریزی شده‌اند. نرمال نبودن داده‌ها آزمون‌های فرض و تجزیه و تحلیل‌ها آن‌ها را غیرمعتبر می‌سازد (قربانی دشتکی و همکاران، ۱۳۹۱). بنابراین، از آنجایی که نرمال بودن متغیرها از فرضیات تجزیه و تحلیل‌های رگرسیونی است، فرض نرمال بودن داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار Minitab ارزیابی شد. بررسی توزیع داده‌های اندازه‌گیری شده نشان داد از بین داده‌های زودپافت و دیرپافت اندازه‌گیری شده در این پژوهش، پارامترهای فراوانی نسبی سیلت و رس، جرم ویژه ظاهری و حقیقی، انحراف معیار هندسی قطر ذرات

جدول ۲. ضریب همبستگی پیرسون بین ویژگی‌هایی مبنایی خاک و هدایت هیدرولیکی اشباع

OC	n_e	n	Bd	σ_g	d_g	d_{50}	d_{10}	Sand	Silt	Clay	K_s
-۰/۰۴	۰/۱۷	۰/۰۷	-۰/۱۱	۰/۴۷**	۰/۵۸**	۰/۴۹**	۰/۳۴**	۰/۵۶**	-۰/۱۰	-۰/۴۱**	K_s

**، * و ns: به ترتیب بیان‌گر معنی‌داری در سطوح ۱ و ۵ درصد و غیرمعنی‌دار بودن.

K_s : هدایت هیدرولیکی اشباع خاک، Clay: رس، Silt: سیلت، Sand: شن، d_{10} و d_{50} : قطری که به ترتیب ۱۰ و ۵۰ درصد ذرات به صورت وزنی از آن کوچک‌تر بوده، d_g : میانگین هندسی قطر ذرات خاک، σ_g : انحراف معیار هندسی اندازه ذرات خاک، Bd: جرم مخصوص ظاهری خاک، n: تخلخل کل، n_e : تخلخل مؤثر و OM: ماده آلی خاک می‌باشد.

خاک بیان کرده‌اند. در این پژوهش، با لحاظ نمودن فرض عدم استقلال خطاها و عدم همراستایی بین متغیرهای مستقل، مهمترین ویژگی‌های زودیافت خاکی مورد استفاده برای برآورد K_s درصد شن، جرم ویژه ظاهری، قطری که ۱۰ درصد ذرات خاک به صورت وزنی از آن کوچکتر بوده و درصد ماده آلی خاک به دست آمد. شایان ذکر است که ۱۰ پارامتر زودیافت باقیمانده مؤثر یا غیرمؤثر بر هدایت هیدرولیکی اشباع خاک، از زیرمجموعه متغیرهای ورودی به مدل حذف گردیدند. در جدول ۳ توابع انتقالی پیشنهادی (PTFs) برآورد کننده هدایت هیدرولیکی اشباع خاک همراه با آماره‌های ارزیابی آن‌ها ارائه شده است.

تجزیه و تحلیل‌های آماری نشان داد که پارامترهای معادله‌های ارائه شده در جدول بالا در سطح یک درصد معنی‌دار هستند. شایان ذکر است که در معادلات پیشنهاد شده افزون بر d_{10} و درصد شن، پارامترهای جرم ویژه ظاهری و درصد ماده آلی خاک نیز وارد شده که تأثیر آن‌ها بر هدایت هیدرولیکی اشباع خاک معنی‌داری نبود (جدول ۲). این موضوع می‌تواند احتمالاً به دلیل اثرات متقابل متغیرهای مستقل بر هم باشد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود تأثیر d_{10} بر روی هدایت هیدرولیکی اشباع خاک بیشترین و تأثیر شن و ماده آلی کمترین مقدار است. با توجه به این معادلات تأثیر d_{10} و درصد شن بر روی K_s مثبت و تأثیر جرم ویژه ظاهری و ماده آلی خاک بر آن منفی است.

از دیگر فرضیاتی که در رگرسیون مدنظر قرار می‌گیرد فرض استقلال خطاها از یکدیگر است. در صورتی که خطاها با هم همبستگی داشته باشند نمی‌توان از رگرسیون استفاده نمود. در این پژوهش برای ارزیابی استقلال خطاها از یکدیگر از آزمون دوربین - واتسون استفاده شد. با توجه به اینکه مقدار این آماره (معادل ۲/۱) بین ۱/۵ تا ۲/۵ قرار دارد، فرض عدم وجود همبستگی بین خطاها رد نشده و می‌توان از تجزیه و تحلیل‌های رگرسیونی استفاده کرد. در این پژوهش مدل‌های رگرسیونی خطی چندگانه جهت برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع خاک با استفاده از متغیرهای خاکی و بهره‌گیری از روش گام‌به‌گام ورود متغیرها (Stepwise method) به دست آمد. Amirun و Amin (۲۰۰۹) بهترین مدل رگرسیونی برآورد کننده هدایت هیدرولیکی اشباع خاک‌های شالیزار را از نوع گام‌به‌گام با متغیرهای ورودی درصد ماده آلی، جرم ویژه ظاهری، درصد رس و میانگین هندسی اندازه ذرات خاک گزارش کرده‌اند. Rezaei Arshad و همکاران (۲۰۱۳) نیز درصد شن، تخلخل کل، درصد ماده آلی و درصد سنگریزه را به عنوان مؤثرترین متغیرهای ورودی برای برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع خاک بیان کردند. Names و همکاران (۲۰۰۵) داده‌های فراوانی شن، سیلت و رس و جرم ویژه ظاهری خاک را به عنوان معمولی‌ترین داده‌های ورودی توابع انتقالی پیش‌بینی کننده هدایت هیدرولیکی اشباع

جدول ۳. توابع انتقالی اشتقاق یافته به منظور برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع خاک

مدل	PTFs	r	RMSE
۱	$\ln K_s = 0.88 + 0.62 Sa^{0.5}$	۰/۵۳	۱/۰۲
۲	$\ln K_s = 3.44 + 0.62 Sa^{0.5} - 3.26 Bd$	۰/۵۸	۰/۹۸
۳	$\ln K_s = 3.27 + 0.54 Sa^{0.5} - 3.31 Bd + 38.78 d_{10}^{0.5}$	۰/۶۳	۰/۹۴
۴	$\ln K_s = 3.80 + 0.53 Sa^{0.5} - 3.53 Bd + 42.43 d_{10}^{0.5} - 0.51 \ln OM$	۰/۶۷	۰/۹۰

K_s : هدایت هیدرولیکی اشباع خاک (mm/hr)، Sa: درصد شن، Bd: جرم ویژه ظاهری خاک (gr/cm^3)، d_{10} : قطری که ۱۰ درصد ذرات به صورت وزنی از آن کوچکتر بوده (mm) و OM: درصد ماده آلی خاک می‌باشد. واحد RMSE همان واحد $\ln K_s$ یعنی $\ln (mm/hr)$ است.

می‌باشد. در محیط پیچیده‌ای همچون خاک، ماده آلی نه تنها پتانسیل هدایت هیدرولیکی خاک را با ایجاد منافذی درشت‌تر افزایش داده، بلکه با افزایش ظرفیت نگهداری آب در خاک نیز، می‌تواند گذردهی آب آزاد را از خاک کاهش دهد. افزون بر این، ماده آلی خاک می‌تواند از طریق بهبود شرایط ساختمانی خاک بر توزیع اندازه منافذ خاک نیز تأثیر داشته باشد. بهبود شرایط ساختمانی خاک با افزایش مواد آلی می‌تواند کلوخه‌ها و ترک‌های درشت موجود در خاک را با مواد خاکدانه‌ای دارای مسیره‌های گذردهی نازک‌تر و اعوجاج بیشتر جایگزین کند. مقدار تأثیر مواد آلی بر ساختمان خاک در خاک‌های مختلف متفاوت بوده و نمی‌توان برای کلاس‌های بافتی مشخص، وجود چنین رابطه‌ی معکوس بین OM و K_s را گزارش کرد (Names et al., 2005).

همان‌گونه که در جدول ۳ مشاهده می‌شود هر چهار تابع انتقالی پیشنهاد شده برای خاک‌های مورد مطالعه، از دقت پیش‌بینی نسبتاً متوسطی برخوردار می‌باشند. زیرا با توجه به Hamilton (۱۹۹۰)، ضریب همبستگی این توابع در محدوده‌ای از ۰/۵۳ تا ۰/۶۷ واقع شده که دارای دقت پیش‌بینی متوسطی می‌باشند. هر چند بایستی ذکر کرد که مدل ϵ با $r = 0.67$ و $RMSE = 0.90 \text{ Ln (mm/hr)}$ در مقایسه با دیگر مدل‌های پیشنهادی دارای دقت بالاتری در برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع خاک می‌باشد. ضریب همبستگی ۰/۶۷ معادل با ضریب تبیین ۰/۴۵، بدین معنی است که این مدل توانسته اندکی کمتر از نصف تغییرات هدایت هیدرولیکی اشباع خاک را در منطقه مورد مطالعه توجیه کند. به‌نظر می‌رسد این مقدار توجیه واریانس توسط چنین مدلی، نسبتاً قابل قبول باشد. در نهایت حدود ۵۵ درصد از تغییرپذیری هدایت هیدرولیکی اشباع خاک توسط این مدل تبیین نگردید. این موضوع می‌تواند به دلیل وجود روابط غیر خطی بین این پدیده و ویژگی‌های زودیافت خاک باشد که در مدل‌های رگرسیونی خطی در نظر گرفته نمی‌شود.

از نظر فیزیکی بین هدایت هیدرولیکی اشباع خاک از یک سو و پارامترهای زودیافت d_{10} ، درصد شن و جرم ویژه ظاهری خاک رابطه‌ای ذاتی وجود دارد. بدین ترتیب که برای یک خاک معین، با افزایش d_{10} و درصد شن، بایستی هدایت هیدرولیکی اشباع خاک افزایش یابد. معادلات بدست آمده در این پژوهش نیز در برگیرنده این بنیان فیزیکی می‌باشند. لیکن برای جرم ویژه ظاهری و ماده آلی خاک نتایج عکس به‌دست آمده است. بدین معنی که با افزایش جرم ویژه ظاهری و ماده آلی خاک مقدار K_s کاهش می‌یابد. قربانی دشتکی و همکاران (۱۳۹۱) نیز بین هدایت هیدرولیکی اشباع و جرم ویژه ظاهری خاک همبستگی منفی گزارش کردند. این محققین این همبستگی بالای منفی را چنین تفسیر کردند که با کاهش جرم ویژه ظاهری، تخلخل خاک و احتمالاً درشت‌مویینه‌های خاک بیشتر و در نتیجه هدایت هدایت هیدرولیکی اشباع خاک افزایش می‌یابد. Mbagwu و Auerswald (۱۹۹۹) و Lado و همکاران (۲۰۰۴) در پژوهش‌های خود گزارش کرده‌اند که افزایش ماده آلی خاک می‌تواند منجر به افزایش هدایت هیدرولیکی اشباع شود. این پژوهش‌گران بنیان ذاتی حاکم بر چنین فرضی را این‌گونه عنوان کردند که ماده آلی خاک با بهبود خاکدانه‌سازی و افزایش تخلخل می‌تواند منجر به افزایش هدایت هیدرولیکی خاک شود. این در حالی است که Rawls و همکاران (۲۰۰۴) و Names و همکاران (۲۰۰۵) نتایجی مخالف با این یافته‌ها به‌دست آوردند. توابع انتقالی پیشنهادی توسط این محققین، مقدار K_s برخی از کلاس‌های بافتی معین را با افزایش مقدار ماده آلی کمتر پیش‌بینی کردند. توابع انتقالی که این اواخر توسعه یافته دلایلی قوی از این واقعیت، که برای دامنه‌ای وسیع از خاک‌ها، می‌تواند بین OM و K_s رابطه‌ای منفی وجود داشته باشد، را گزارش کرده‌اند. یک توضیح احتمالی بر این موضوع می‌تواند ناشی از این واقعیت باشد که ماده آلی دارای ظرفیت بالایی برای نگهداری آب در خاک

مورد مطالعه، d_{10} و جرم ویژه ظاهری و تا حدودی درصد شن بیشترین اثر را بر هدایت هیدرولیکی اشباع داشته است. هر چند d_{10} در مقایسه با دو ویژگی دیگر بیشترین مقدار از تغییرات هدایت هیدرولیکی اشباع خاک را توجیه کرده است. ضرایب مربوط به توابع پی‌ریزی شده نشان می‌دهد با افزایش d_{10} ، درصد شن و کاهش جرم ویژه ظاهری خاک، هدایت هیدرولیکی اشباع خاک افزایش می‌یابد. Wosten و همکاران (۲۰۰۱)، Vereecken و همکاران (۱۹۹۰)، Slazar و همکاران (۲۰۰۸)، Jabro (۱۹۹۲) و قربانی دشتکی و همکاران (۱۳۹۱) نیز به نتایجی مشابه دست یافتند. در شکل ۲، نمودار پراکنش ۱:۱ مقادیر واسنجی و دقت‌آزمایی تابع پیشنهادی ۳ در برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع خاک در برابر مقادیر اندازه‌گیری شده آنها ارائه شده است. همان‌گونه که در این شکل و جداول (۲ و ۳) مشاهده می‌شود، مقادیر آماره r داده‌های واسنجی و دقت‌آزمایی مدل پیشنهادی ۳ در برآورد K_s بیشترین مقدار می‌باشد. این بدین معنی است که این تابع انتقالی در مقایسه با دیگر توابع پیشنهادی، در برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع خاک دارای تخمین اندکی بهتر می‌باشد. در مجموع نتایج بیان‌گر این موضوع است که در صورت دسترسی به ویژگی‌های زودیافت d_{10} ، جرم ویژه ظاهری، درصد شن و مقدار ماده آلی، می‌توان هدایت هیدرولیکی اشباع خاک‌های منطقه مورد مطالعه را با بهره‌گیری از توابع پیشنهادی (مدل ۱ تا ۴) با دقت نسبتاً قابل قبولی پیش‌بینی کرد.

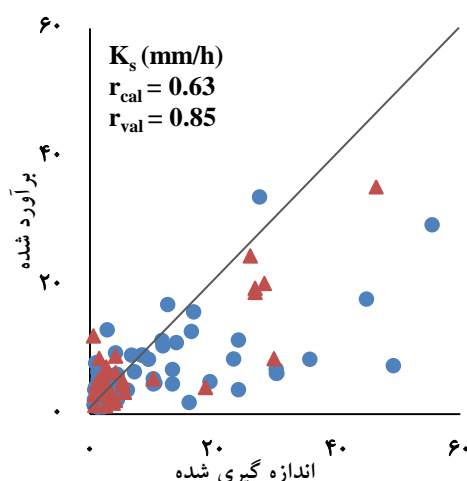
در جدول ۴، نتایج دقت‌آزمایی توابع رگرسیونی پیشنهادی در برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع خاک برای سری داده‌های آزمون، بر اساس آماره‌های مختلف ارائه شده است. همان‌گونه که در این جدول مشاهده می‌شود ضریب همبستگی همه توابع انتقالی پیشنهادی برای خاک‌های مورد مطالعه، بیشتر از ۰/۷۵ می‌باشد. این بدین معنی است که این توابع در برآورد K_s در مرحله ارزیابی، از دقت پیش‌بینی متوسط تا خوبی برخوردار می‌باشند. با توجه به نتایج حاصل از آماره RMSE، بیشترین مقدار RMSE مربوط به مدل ۱ (معادل ۸/۲۲ mm/hr) و کمترین مقدار آن مربوط به مدل ۳ (معادل ۶/۸۱ mm/hr) می‌باشد. مقادیر میانگین خطا (ME) در این جدول نیز نشان می‌دهد، همگی توابع اشتقاق یافته در پیش‌بینی هدایت هیدرولیکی اشباع خاک دارای کم‌برآوردی می‌باشند. با توجه به نتایج، بیشینه حالت کم‌برآوردی برای مدل ۴ و کمینه حالت کم‌برآوردی نیز برای مدل ۱ به‌دست آمد. در مجموع با توجه به این آماره‌ها می‌توان بیان کرد، تابعی که در آن d_{10} ، جرم ویژه ظاهری و درصد شن (مدل ۳) لحاظ شده است، عملکرد بهتری در مقایسه با دیگر توابع پیشنهادی در برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع خاک داشته است. این تابع دارای کمینه مقدار خطا و بیشینه مقدار ضریب همبستگی در مرحله دقت‌آزمایی بوده است. هر چند بایستی یادآوری کرد که اختلاف بین این مدل پیشنهادی در برآورد K_s با مدل ۴ چندان قابل توجه نمی‌باشد. این نتایج نشان می‌دهد که در خاک‌های

جدول ۴. دقت‌آزمایی توابع رگرسیونی خطی پیشنهادی به‌منظور برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع خاک با استفاده از سری داده‌های اعتبارسنجی

(n = ۲۸)

مدل	r	RMSE	آماره‌ها	ME
۱	۰/۷۵	۸/۲۲		-۰/۸۸
۲	۰/۷۵	۸/۰۷		-۱/۲۷
۳	۰/۸۵	۶/۸۱		-۱/۲۹
۴	۰/۸۴	۷/۲۷		-۱/۳۵

واحد RMSE و ME همان واحد K_s یعنی mm/hr است. آماره‌ها برای متغیر K_s که تبدیل برگشتی مناسب بر روی آن‌ها اعمال گردیده، محاسبه شده است.

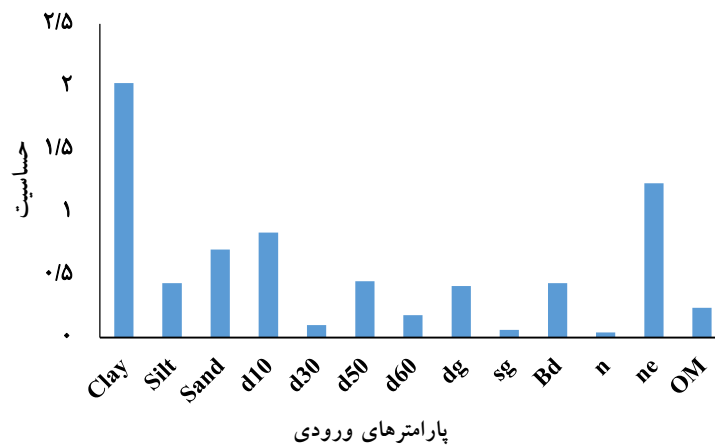


شکل ۲. نمودار دقت نتایج واسنجی (●) ودقت آزمایی (▲) مقادیر اندازه‌گیری شده K_s (mm/h) در برابر مقادیر برآوردی آن با بهره‌گیری از مدل پیشنهادی (۳)

نمودن خطای کل شبکه در غیاب یک متغیر ورودی به خطای کل شبکه بدست می‌آید. براساس این روش، هرچه مقدار ضریب حساسیت یک متغیر از یک بیشتر باشد، آن متغیر در تبیین متغیر وابسته دارای سهم بیشتری است (خاشعی سیوکی و همکاران، ۱۳۹۴). نتایج آنالیز حساسیت شبکه عصبی پی‌ریزی شده به متغیرهای ورودی خاکی در شکل ۳ ارائه شده است. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود، در بین پارامترهای ورودی خاکی، شبکه عصبی پی‌ریزی شده جهت برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع بیشترین حساسیت را به پارامترهای درصد رس، تخلخل مؤثر، d_{10} و درصد شن دارد. شایان ذکر است که توابع رگرسیون اشتقاق یافته برای برآورد K_s نیز به دو پارامتر d_{10} و درصد شن حساسیت بالایی داشتند. پس از تعیین مؤثرترین متغیرهای مستقل، به‌منظور برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع در خاک‌های مورد مطالعه شبکه‌های عصبی مختلفی پی‌ریزی و آزمون شدند. شبکه‌های عصبی پی‌ریزی شده در این پژوهش، پرسپترون چند لایه (MLP) با الگوریتم آموزشی لوبنبرگ - مارکواریت می‌باشد.

پیش‌بینی هدایت هیدرولیکی اشباع خاک با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی

در صورتی که تعداد محدودی از پارامترهای زودیافت خاکی در دسترس بوده و تعیین مقدار K_s نیز امری ضروری باشد؛ در این حالت بایستی مدلی بر مبنای شبکه عصبی با تعداد ورودی‌ها کم پی‌ریزی و کارایی آن را ارزیابی کرد. بدین دلیل، در این پژوهش تلاش شد افزون بر استفاده از تمامی پارامترهای زودیافت اندازه‌گیری شده برای ایجاد مدل شبکه عصبی، مدلی را با پارامترهای ورودی کم نیز پی‌ریزی نمود. مبنای گزینش مؤثرترین پارامترهای مستقل در تخمین هدایت هیدرولیکی اشباع خاک توسط شبکه عصبی، آنالیز حساسیت بود. فرآیند آنالیز حساسیت، که با بهره‌گیری از نرم افزار Nerosolution 5.0 انجام شد، اطلاعاتی ارزشمند راجع به میزان حساسیت مدل به متغیرهای ورودی در اختیار طراح و کاربر مدل قرار می‌دهد. با شناسایی میزان تأثیر متغیرهای ورودی بر دقت پیش‌بینی مدل، می‌توان متغیرهای کم‌اثر را از شبکه حذف و مدلی ساده‌تر را بسط و توسعه داد. برای انجام آنالیز حساسیت معمولاً بدین صورت اقدام می‌شود که مقادیر ضریب حساسیت متغیرهای ورودی از تقسیم



شکل ۳. آنالیز حساسیت متغیرهای خاکی ورودی به شبکه عصبی مصنوعی (Clay: رس، Silt: سیلت، Sand: شن، d_{10} ، d_{30} ، d_{50} و d_{60} : قطری که به ترتیب ۱۰، ۳۰، ۵۰ و ۶۰ درصد ذرات به صورت وزنی از آن کوچک‌تر بوده، d_g : میانگین هندسی قطر ذرات خاک، s_g : انحراف معیار هندسی قطر ذرات خاک، Bd : جرم مخصوص ظاهری خاک، n : تخلخل کل، n_e : تخلخل مؤثر و OM : ماده آلی خاک می‌باشد).

ارائه شده است. در شکل ۴- الف همچنین، نمودار پراکنش ۱:۱ مقادیر آموزش و آزمون این شبکه عصبی پی‌ریزی شده در برآورد K_s در برابر مقادیر اندازه‌گیری شده آنها ارائه شده است. با توجه نتایج حاصل از جدول ۵ و شکل ۴-الف، مقادیر r و $RMSE$ شبکه عصبی پی‌ریزی شده برای برآورد K_s در سری داده‌های آموزش به ترتیب معادل 0.72 و $7/56$ mm/hr و در سری داده‌های آزمون نیز معادل 0.87 و $10/80$ mm/hr می‌باشد. ارزیابی آماره ME نیز نشان داد که مدل شبکه عصبی پی‌ریزی شده با 0.18 و $3/09$ mm/hr- میانگین خطا، دارای حالت بیش‌برآوردی و کم‌برآوردی K_s به ترتیب در سری داده‌های آموزش و آزمون می‌باشد. مقادیر بالای ضریب همبستگی و خطای پایین شبکه پی‌ریزی شده در مرحله آموزش و آزمون بیان‌گر این موضوع است که مدل شبکه عصبی پی‌ریزی شده با مؤثرترین داده‌های ورودی (پارامترهای درصد رس، تخلخل مؤثر، d_{10} و درصد شن)، با دقت نسبتاً خوبی توانسته هدایت هیدرولیکی اشباع را با استفاده از ویژگی‌های زودیافت خاک پیش‌بینی کند. Ghanbarian-Alavijeh و همکاران (۲۰۱۰) با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی و بهره‌گیری از ویژگی‌های توزیع

آرایش بهینه انتخاب شده نیز دارای ۴ نرون در لایه ورودی (پارامترهای مؤثر درصد رس، تخلخل مؤثر، d_{10} و درصد شن)، ۲ نرون در لایه پنهان با تابع هدف تانژانت سیگموئید و یک نرون در لایه خروجی با تابع هدف خطی بود (۱-۲-۴): چهار پارامتر مؤثر ورودی، دو نرون در لایه پنهان و یک خروجی). تعداد تکرارها نیز برای رسیدن به حداقل میزان خطا و حداکثر پایداری شبکه معادل ۱۰۰۰ دور (اپک) در نظر گرفته شد. شایان ذکر است که تعداد نرون‌های لایه پنهان نیز از روش سعی و خطا و با استفاده از آماره میانگین مربعات خطا (MSE: Mean square error) تعیین گردید. کمینه مقدار میانگین مربعات خطای شبکه‌های طراحی شده برای برآورد K_s مربوط به شبکه‌ای با ۲ نرون در لایه مخفی بود. این بدین معنی است که شبکه عصبی پی‌ریزی شده با ۲ نرون در لایه پنهان، دارای بالاترین قدرت تعمیم‌دهی در بین شبکه‌های هم‌نوع خود می‌باشد.

در جدول ۵، بهترین آرایش شبکه عصبی گزینش شده (با بهره‌گیری از داده‌های مؤثر زودیافت خاکی) جهت برآورد K_s به همراه شاخص‌های آماری مورد استفاده برای تعیین کارایی این شبکه در هر دو مرحله آموزش و آزمون

اندازه ذرات خاک، چگالی ظاهری، تخلخل مؤثر و منحنی رطوبتی خاک، هدایت هیدرولیکی اشباع خاک‌های پایگاه داده‌ای UNSODA را با دقت بالایی برآورد کردند (RMSE= ۰/۰۰۱ و $r=0/98$) (Navi و همکاران (۲۰۰۹)) نیز مقدار خطای ۰/۰۲ تا ۰/۰۶ را برای برآورد K_s با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی و بهره‌گیری از داده‌های زودپیافت خاکی به‌دست آوردند. Rezaei Arshad و همکاران (۲۰۱۳) نیز با بهره‌گیری از شبکه عصبی مصنوعی و برخی از داده‌های زودپیافت خاکی، K_s را با دقت نسبتاً خوبی برآورد کردند ($R^2=0/65$ و $0/04$ RMSE= شیرانی و رفیع نژاد (۱۳۹۰)) برخی ویژگی‌های دیرپیافت خاک‌های استان کرمان همچون PWP، FC و CEC را با استفاده از توابع انتقالی رگرسیونی و شبکه‌های عصبی مصنوعی برآورد کردند. این محققین نشان داد مدل‌های رگرسیونی هنگامی از دقت بالاتری برخوردار بوده که تعداد ویژگی‌های زودپیافت ورودی به آن‌ها زیاد نباشند. این در حالی است که در صورت زیاد بودن تعداد ویژگی‌های زودپیافت اندازه‌گیری شده، شبکه‌های عصبی مصنوعی نتایجی بسیار دقیق‌تر برای برآورد این ویژگی‌های دیرپیافت ارائه می‌کنند. در این پژوهش نیز بهترین مدل شبکه عصبی برای برآورد K_s هنگامی حاصل آمد که همه ویژگی‌های زودپیافت خاکی اندازه‌گیری شده وارد مدل شدند. آرایش بهینه این شبکه، MLP دارای ۱۳ نرون در لایه ورودی (کل پارامترهای زودپیافت خاکی اندازه‌گیری شده)، ۲ نرون در لایه پنهان و یک نرون در

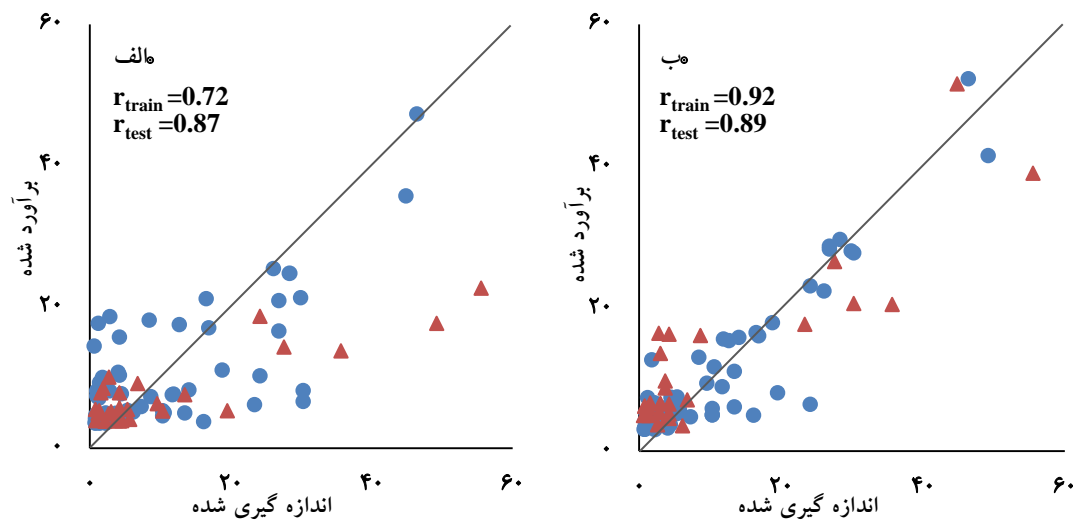
لایه خروجی (هدایت هیدرولیکی اشباع) بود (۱-۲-۱۳): سیزده پارامتر ورودی، ۲ نرون در لایه پنهان و ۱ خروجی). در جدول ۵، بهترین آرایش شبکه عصبی گزینش شده (با بهره‌گیری از کل داده‌های زودپیافت خاکی) جهت برآورد K_s به همراه شاخص‌های آماری مورد استفاده برای تعیین کارایی این شبکه در هر دو مرحله آموزش و آزمون ارائه شده است. در شکل ۴-ب نیز، نمودار پراکنش ۱:۱ مقادیر آموزش و آزمون مدل شبکه عصبی در برآورد K_s در برابر مقادیر اندازه‌گیری شده آنها ارائه شده است. نتایج حاصل از جدول ۵ و شکل ۴-ب نشان می‌دهد مقادیر r و RMSE شبکه عصبی پی‌ریزی شده برای برآورد K_s با استفاده از کل داده‌های زودپیافت خاکی در سری داده‌های آموزش به‌ترتیب معادل ۰/۹۲ و ۴/۳۶ mm/hr و در سری داده‌های آزمون نیز معادل ۰/۸۸ و ۷/۱۷ mm/hr می‌باشد. ارزیابی آماره ME نیز بیان‌گر این موضوع است که مدل شبکه عصبی پی‌ریزی شده در هر دو مرحله آموزش و آزمون دارای بیش‌برآوردی است. با توجه به نتایج، مقدار این بیش‌برآوردی در مرحله آموزش بیشتر از مرحله آزمون می‌باشد. مقادیر بالای ضریب همبستگی و خطای پایین شبکه عصبی پی‌ریزی شده بیان‌گر این موضوع است که مدل شبکه عصبی با استفاده از کل ویژگی‌های زودپیافت خاکی توانسته هدایت هیدرولیکی اشباع خاک را در هر دو مرحله آموزش و آزمون با دقت بالایی پیش‌بینی کند.

جدول ۵. بهترین شبکه عصبی گزینش شده برای برآورد K_s با استفاده از داده‌های مؤثر زودپیافت خاکی (۴ ورودی) و کل داده‌های زودپیافت خاکی (۱۳ ورودی) و نتایج شاخص‌های آماری مورد استفاده برای ارزیابی کارایی این شبکه‌ها در هر دو مرحله آموزش (۶۷ = n) و

آزمون (۲۸ = n)

آموزش		آزمون		توابع آستانه	آرایش شبکه	نوع شبکه
ME	RMSE	R	r			
۳/۰۹	۱۰/۸۰	۰/۸۷	۰/۷۲	Tansig-purelin	۴-۲-۱	MLP
۲/۰۷	۷/۱۷	۰/۸۹	۰/۹۲		۱۳-۲-۱	

واحد RMSE و ME همان واحد K_s یعنی mm/hr است. آماره‌ها برای متغیر K_s که تبدیل برگشتی مناسب بر روی آن‌ها اعمال گردیده، محاسبه شده است.



شکل ۴- نمودار دقت نتایج آموزش (●) و آزمون (▲) مقادیر اندازه‌گیری شده K_s (mm/hr) در برابر مقادیر برآوردی آن با بهره‌گیری از شبکه عصبی مصنوعی و داده‌های مؤثر زودیاخت خاکی (الف) و کل داده‌های زودیاخت خاکی (ب)

روابط پیچیده عنوان کرد. شایان ذکر است که مدل رگرسیونی خطی چندگانه به دلیل دارا بودن RMSE و ME پایین در مرحله آزمون، نسبت به مدل شبکه عصبی مصنوعی با داده‌های مؤثر ورودی خاکی دارای دقت و کارایی بالاتری در برآورد K_s می‌باشد. این در حالی است که در سری داده‌های آموزش نتایجی مغایر با این موضوع بدست آمده و کارایی مدل شبکه عصبی از رگرسیون خطی چندگانه بیشتر است. این یافته‌ها با نتایج Merdun و همکاران (۲۰۰۶) که در آن روش‌های رگرسیونی در پیش‌بینی پارامترهای هیدرولیکی خاک نسبت به شبکه‌های عصبی مصنوعی دارای عملکرد بهتری بودند، سازگاری دارد. در مجموع می‌توان این‌گونه بیان کرد که استفاده از کل داده‌های زودیاخت خاکی به‌عنوان پارامتر ورودی به شبکه عصبی مصنوعی، توانسته دقت برآوردهای هدایت هیدرولیکی اشباع خاک‌های منطقه مورد مطالعه را افزایش دهد. حال آن‌که با توجه به نتایج، در صورتی که تعداد پارامترهای زودیاخت اندازه‌گیری شده زیاد نباشد، روش‌های رگرسیونی در برآورد K_s از دقت به‌نسبت قابل قبول‌تری برخوردار می‌باشند. هرچند، برآوردهای شبکه‌های عصبی مصنوعی از K_s نیز می‌تواند قابل قبول باشد.

مقایسه نتایج حاصل از روش‌های رگرسیونی با شبکه‌های عصبی مصنوعی پی‌ریزی شده و انتخاب بهترین مدل

در جدول ۶ ارزیابی کارایی توابع انتقالی اشتقاق یافته توسط رگرسیون خطی چندگانه و شبکه‌های عصبی مصنوعی در برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع خاک با استفاده از آماره‌های r ، RMSE و ME ارائه شده است. هرچه ضریب همبستگی از مقدار بالاتر، ME و RMSE از مقدار کمتری برخوردار باشند، نشان‌دهنده دقت بالای مدل پیشنهادی می‌باشد. بنابراین، با توجه به r بالاتر و ME و RMSE پایین‌تر مدل شبکه عصبی با کل داده‌های زودیاخت ورودی، این مدل در مقایسه با مدل رگرسیونی خطی چندگانه و مدل شبکه عصبی با داده‌های ورودی مؤثر خاکی، در پیش‌بینی K_s خاک‌های منطقه مورد مطالعه از دقت بالاتری برخوردار می‌باشد. این نتایج با یافته‌های Leij و Schaap (۱۹۹۸) همخوانی دارد. این محققین بیان کردند در صورت استفاده از داده‌های ورودی بیشتر، دقت پیش‌بینی ویژگی‌های هیدرولیکی خاک توسط شبکه‌های عصبی مصنوعی افزایش می‌یابد. دلیل این امر را شاید بتوان لحاظ نمودن تعداد داده‌های ورودی بیشتر در مدل و در نظر گرفتن روابط غیرخطی بین این پدیده‌ها و توانایی شبکه‌های عصبی مصنوعی در مدل‌سازی این

جدول ۶. مقایسه توابع رگرسیونی خطی چندگانه و شبکه‌های عصبی مصنوعی پی‌ریزی شده به منظور برآورد هدایت هیدرولیکی

اشباع خاک

آماره‌ها			تابع انتقالی پیشنهادی
ME	RMSE	r	
-۳/۲۳	۱۰/۱۴	۰/۶۳	رگرسیون خطی چندگانه (مدل ۳)
۰/۱۸	۷/۵۶	۰/۷۲	شبکه عصبی با داده‌های مؤثر خاکی
۰/۴۷	۴/۳۶	۰/۹۲	شبکه عصبی با کل داده‌های خاکی
-۱/۲۹	۶/۸۱	۰/۸۵	رگرسیون خطی چندگانه (مدل ۳)
-۳/۰۹	۱۰/۸۰	۰/۸۷	شبکه عصبی با داده‌های مؤثر خاکی
۲/۰۷	۷/۱۷	۰/۸۹	شبکه عصبی با کل داده‌های خاکی

واحد RMSE و ME همان واحد K_s یعنی mm/hr است.

نتیجه گیری کلی

نشان داد PTF ایجاد شده بر مبنای شبکه‌های عصبی MLP با کل داده‌های ورودی خاکی بهتر از PTF ایجاد شده بر مبنای شبکه‌های عصبی MLP با داده‌های ورودی مؤثر خاکی K_s را پیش‌بینی کرده و دقت تخمین را به‌طور معنی‌داری بهبود می‌بخشد. این در حالی است که استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی و بهره‌گیری از داده‌های مؤثر ورودی خاکی، نیز می‌تواند منجر به دستیابی به برآوردهایی نسبتاً خوب از K_s در خاک‌های منطقه مورد مطالعه گردد. در مجموع نتایج این پژوهش نشان داد کارایی شبکه‌های عصبی مصنوعی در برآورد K_s بهتر از رگرسیون‌های خطی چندگانه می‌باشد.

پارامترهای d_{10} ، جرم ویژه ظاهری، درصد شن و درصد ماده آلی به‌عنوان مؤثرترین پارامترهای ورودی به مدل‌های رگرسیونی خطی در برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع خاک شناخته شدند. نتایج پژوهش حاضر نشان داد توابع انتقالی (PTFs) پیشنهادی بر مبنای رگرسیون‌های خطی چندگانه و با استفاده از داده‌های زودیافت خاکی، از دقت پیش‌بینی نسبتاً خوبی در برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع خاک (K_s) برخوردار می‌باشند. از میان پارامترهای خاکی بررسی شده، انحراف معیار هندسی قطر ذرات، درصد شن، d_{10} و درصد رس نیز مؤثرترین پارامترهای ورودی به شبکه‌های عصبی مصنوعی می‌باشند. نتایج

منابع مورد استفاده

- بابائیان، ا.، همایی، م. و نوروزی، ع. ا. ۱۳۹۲. ارزیابی توابع انتقالی طیفی و توابع انتقالی خاک در پیش‌بینی نگهداشت آب در خاک. نشریه حفاظت منابع آب و خاک. ۳(۳): ۲۵-۴۳.
- خاشعی سیوکی، ع.، جلالی موخر، و.، نوفرستی، ع. م. و رضانی، ی. ۱۳۹۴. ارزیابی روش غیرپارامتریک k - نزدیک ترین همسایه و سیستم‌های شبکه عصبی مصنوعی برای برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع خاک. مجله الکترونیک مدیریت خاک و تولید پایدار، ۵(۳): ۸۱-۹۵.
- خلیلی مقدم، ب.، افیونی، م.، جلالیان، ا.، عباسپور، ک. و دهقانی، ا. ا. ۱۳۹۴. کاربرد روش‌های رگرسیونی و شبکه‌های عصبی به منظور تخمین هدایت هیدرولیکی اشباع خاک منطقه زاگرس مرکزی. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب و خاک ۷۱: ۲۲۷-۲۱۷.
- شیرانی، ح. و رفیع‌نژاد، ن. ۱۳۹۰. برآورد برخی ویژگی‌های دیریافت خاک‌های استان کرمان با استفاده از توابع انتقالی رگرسیونی و شبکه عصبی مصنوعی. مجله پژوهش‌های خاک، ۲۵(۴): ۳۶۰-۳۴۹.

- فلامکی، ا. و اسکندری، م. ۱۳۹۱. تخمین ضریب توزیع خاک-آب فلزات سنگین با کاربرد شبکه‌های عصبی مصنوعی. نشریه حفاظت منابع آب و خاک. ۲(۱): ۲۵-۳۶.
- قربانی دشتکی، ش.، دهقانی بانیانی، س.، خداوردی‌لو، ح.، محمدی، ج. و خلیل مقدم، ب. ۱۳۹۱. برآورد هدایت آبی اشباع و عکس طول درشت موینگی خاک با استفاده از توابع انتقالی خاک. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم خاک و آب، ۱۶(۶۰): ۱۵۷-۱۴۵.
- قنبریان علویجه، ب.، لیاقت، ع. و سهرابی، س. ۱۳۸۸. کاربرد شبکه عصبی مصنوعی در پیش بینی هدایت هیدرولیکی اشباع با استفاده از پارامترهای فیزیکی خاک. مجله تحقیقات مهندسی کشاورزی، ۱۰(۱): ۹۷-۱۱۲.
- نصرتی کاریزک، ف.، موحدی نایینی، ع.، هزارجریب، ا.، روشنی، ق. و دهقانی، ا.ا. ۱۳۹۱. استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی برای برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع از ویژگی‌های زودیافت خاک. مجله الکترونیک مدیریت خاک و تولید پایدار، ۲(۱): ۹۵-۱۱۰.
- نوایان، م.، لیاقت، ع. و همایی، م. ۱۳۸۳. تخمین هدایت هیدرولیکی اشباع با استفاده از توابع انتقالی. مجله پژوهشی مهندسی کشاورزی ۴(۱۶): ۱-۱۲.
- Ahuja, L.R., Cassel, D.K., Bruce R.R. and Barnes. B.B. 1989. Evaluation of spatial distribution of hydraulic conductivity using effective porosity data. *Soil Science*, 148: 404-411.
- Aimrun, W. and Amin, M.S.M. 2009. Pedo-transfer function for saturated hydraulic conductivity of lowland paddy soils. *Paddy Water Environmental*, 7: 217-225.
- Al Majou, H., Bruand, A. and Duval, O. 2008. Use of in situ volumetric water content at field capacity to improve prediction of soil water retention properties. *Canadian Journal of Soil Science*. 88: 533-541.
- Bagarello, V., Sferlazza, S. and Sgroi, A. 2009. Comparing two methods of analysis of single-ring infiltrometer data for a sandy-loam soil. *Geoderma*, 149: 415-420.
- Bruand, A., Fernández, P.P. and Duval, O. 2003. Use of class pedotransfer functions based on texture and bulk density of clods to generate water retention curves. *Soil Use and Management*, 19: 232-242.
- Dane, J.H. and Topp, C.G., (eds.). 2002. *Methods of Soil Analysis: Part 4 Physical Methods* Madison, WI: Soil Science Society of America, Soil Science Society of America Book Series Number 5, ISBN 0-89118-810-X, 1692 p.
- Ghanbarian-Alavijeh, B., Liaghat, A.M. and Sohrabi, S. 2010. Estimating Saturated Hydraulic Conductivity from Soil Physical Properties using Neural Networks Model. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 4(2): 58- 63.
- Hamilton, L.C. 1990. *Modern data analysis. A first course in applied statistics*, pp 684.
- Islam, N., Wallender, W.W., Mitchell, J.P., Wicks, S. and Howitt, R.E. 2006. Performance evaluation of methods for the estimation of soil hydraulic parameters and their suitability in a hydrologic model. *Geoderma*, 134: 135-151.
- Jabro, J.D. 1992. Estimation of saturated hydraulic conductivity of soils from particle size distribution and bulk density data. *Transaction of American Society of Agricultural Engineers*. 35(2): 557-560.
- Jarvis, N.J., Zavattaro, L., Rajkai, K., Reynolds, W.D., Olsen, P.-A., McGechen, M., Mecke, M. and Mohanty, B. Leeds-Harrison P.B. and Jacques, D. 2002. Indirect estimation of near-saturated hydraulic conductivity from readily available soil information. *Geoderma*, 108, 1-17.
- Lado, M., Paz, A. and Ben-Hur, M. 2004. Organic matter and aggregate size interactions in saturated hydraulic conductivity. *Soil Science Society of America Journal*, 68: 234-242.
- Lim, D. and Kolay, P. 2009. Predicting Hydraulic Conductivity (K) of Tropical Soils by Using Artificial Neural Network (ANN). *UNUMAS E-Journal of Civil Engineering*, 1(1), 1-6.
- Mbagwu, J.S.C., and Auerswald, K. 1999. Relationship of percolation stability of soil aggregates to land use, selected properties, structural indices and simulated rainfall erosion. *Soil and Tillage Research*, 50: 197-206.
- Merdun, H., Çınar, Ö., Meral, R. and Apan, M. 2006. Comparison of artificial neural network and regression pedotransfer functions for prediction of soil water retention and saturated hydraulic conductivity. *Soil and Tillage Research*, 90: 108-116.

- Minasny, B., Hopmans, J., Harter, T., Eching, S., Tuli, A. and Denton, M. 2004. Neural networks prediction of soil hydraulic functions for alluvial soils using multistep outflow data. *Soil Science Society of America Journal*, 68: 417-429.
- Navi, K., Twarakavi, C., Šimůnek, J. and Schaap, M.G. 2009. Development of Pedotransfer Functions for Estimation of Soil Hydraulic Parameters using Support Vector Machines. *Soil Science Society of America Journal*. 73:1443-1452.
- Nemes, A., Rawls, W.J. and Pachepsky, Y.A. 2005. Influence of organic matter on the estimation of saturated hydraulic conductivity. *Soil Science Society of America Journal*, 69(4):1330-1337.
- Parasuraman, K., Elshorbagy, A. and Cheng Si, B. 2006. Estimating saturated hydraulic conductivity in spatially variable fields using neural network ensembles. *Soil Science Society of America Journal*, 70: 1851-1859.
- Patile, N.G. and Singh, S.K. 2016. Pedotransfer functions for estimating soil hydraulic properties: A review. *Pedosphere*, 26(4): 417-430.
- Qiao, J., Zhu, Y., Jia, X., Huang, L. and Shao, M. 2018. Estimating the spatial relationships between soil hydraulic properties and soil physical properties in the critical zone (0-100m) on the Loess Plateau, China: A state-space modeling approach, *CATENA*, 10: 385-393.
- Rawls, W.J., Nemes, A. and Pachepsky, Y.A., 2004. Effect of soil organic carbon on soil hydraulic properties. *Developments in soil Science*, 30: 95-114.
- Rezaei Arshad, R., Sayyad, Gh., Mosaddeghi, M., and Gharabaghi, B. 2013. Predicting Saturated Hydraulic Conductivity by Artificial Intelligence and Regression Models. *ISRN Soil Science*, 2013: 1-8.
- Rogiers, B., Mallants, D., Batelaan, O., Gedeon, M., Huysmans, M. and Dassargues, A. 2012. Estimation of hydraulic conductivity and its uncertainty from grain-size data using GLUE and artificial neural networks. *Mathematical Geosciences*, 44: 739-763.
- Schaap, M.G. and Leij, F.J. 1998. Using neural networks to predict soil water retention and soil hydraulic conductivity. *Soil and Tillage Research*, 47: 37-42.
- Shirazi, M.A. and Boersma, L. 1984. A unifying quantitative analysis of soil texture. *Soil Science Society of America Journal*, 48: 142-147.
- Slazar, O., Wesström, I. and Joel, A. 2008. Evaluation of drainmod using saturated hydraulic conductivity estimated by a pedotransfer function model. *Agricultural water management*, 95(10): 1135-1143.
- Tamari, S., Wösten, J.H.M. and Ruiz-Suarez, J.C. 1996. Testing an artificial neural network for predicting soil hydraulic conductivity. *Soil Science Society of America Journal*, 60(6): 1732-1741.
- Tietje, O. and Hennings, V. 1996. Accuracy of the saturated hydraulic conductivity prediction by pedo-transfer functions compared to the variability within FAO textural classes. *Geoderma*, 69: 71-84.
- Vereecken, H., Maes J. and Feyen, J. 1990. Estimating unsaturated hydraulic conductivity from easily measured soil properties. *Soil Science*, 149(1): 1-12.
- Wösten, J., Pachepsky, Y.A. and Rawls, W. 2001. Pedotransfer functions: bridging the gap between available basic soil data and missing soil hydraulic characteristics. *Journal of hydrology*, 251: 123-150.
- Xu, C., Xu, X., Liu, M., Liu, W., Yang, J., Luo, W., Zhang, R. and Kiely, G. 2017. Enhancing pedotransfer functions (PTFs) using soil spectral reflectance data for estimating saturated hydraulic conductivity in southwestern China, *CATENA*: 158: 350-356.
- Zhao, C., Shao, M., Jia, X., Nasir, M. and Zhang, C. 2016. Using pedotransfer functions to estimate soil hydraulic conductivity in the Loess Plateau of China, *CATENA*, 143: 1-6.



ISSN 2251-7480

estimation of saturated hydraulic conductivity in some soils of Ilam province using artificial neural networks and regression methods

Ali Hekmatzad¹, Masoud Davari^{2*}, Mohammad Ali Mahmoudi³ and Kamal Nabiollahi³

1) Former MSc. Student, Department of Soil Science and Engineering, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran

2*) Assistant Professor, Department of Soil Science and Engineering, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran

*Corresponding author email: davari_ma@yahoo.com

3) Assistant Professor, Department of Soil Science and Engineering, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran

Received: 06-02-2017

Accepted: 08-03-2018

Abstract

Saturated hydraulic conductivity (K_s) is one of the essential input for water flow and solute transport modelling, irrigation and drainage design, groundwater modeling and environmental processes. Direct measurement of K_s is possible, but that is usually time consuming, tedious, expensive and impractical for larger scale studies. Also, these methods are partly unreliable because of soil heterogeneity and experimental errors. One solution to govern this problem is using indirect methods such as pedo-transfer functions (PTFs). Since PTFs have not yet been developed to soils in the study area, this study evaluates and describes neural network and statistical regression PTFs to predict K_s from limited or more extended sets of the readily available soil properties. For this purpose, K_s from 95 points of Sirwan-Chardawel sub-basins in Ilam province were measured using Guelph permeameter. Also, some of the readily available soil parameters were obtained. The accuracy and reliability of the derived PTFs were evaluated using root mean square error (RMSE), mean error (ME) and Pearson correlation coefficient (r). The highest correlation coefficients of 0.58 and 0.56 were found between K_s and geometric mean particle diameter and sand content, respectively. The results indicated that artificial neural network and regression PTFs can predict K_s with relatively good accuracy even if a few readily available soil properties are measured ($r_{R-val}=0.85$, $RMSE_{R-val}=6.81$ mm/hr and $r_{ANN-test}=0.87$, $RMSE_{ANN-test}=10.80$ mm/hr). However, based upon results, the prediction accuracy of ANN model at both training and testing stages increased if more readily available soil properties are used ($r_{train}=0.92$, $RMSE_{train}=4.36$ mm/hr and $r_{test}=0.89$, $RMSE_{test}=7.17$ mm/hr). In general, it was found that ANNs method had better performance than linear regression model in predicting K_s .

Keywords: Guelph parameter, readily available soil properties, pedo-transfer functions, neural networks, saturated hydraulic conductivity