ارزیابی توابع انتقالی مختلف برای برآورد منحنی رطوبتی خاک در شهرستان نقده

سکینه رضوی قلعه جوق، علی رسول‌زاده[۱] *و محمدرضا نیشابوری

دانشجوی سابق کارشناسی ارشد رشته علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه محقق اردبیلی.

arazavi@gmail.com

دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه محقق اردبیلی.

arasoulzadeh@gmail.com

استاد گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز.

neysham@hotmail.com

چکیده

دانستن ویژگی‌های هیدرولیکی خاک نظیر منحنی رطوبتی خاک پیش شرط لازم در مدل کردن حرکت آب و انتقال املاح در خاک است. روش‌های مستقیم به منظور برآورد این ویژگی‌های هیدرولیکی پرهزینه و زمان‌بر است. لذا، در این رابطه روش‌های غیرمستقیم نظیر توابع انتقالی مورد استفاده قرار می‌گیرد. به منظور برآورد منحنی رطوبتی خاک، توابع انتقالی رزتا ، سویل پار-۲ و توابع انتقالی رگرسیونی مختلف مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفت. منحنی رطوبتی خاک با استفاده از ستون آب آویزان برای مکش‌های کمتر از یک متر آب و صفحه فشاری برای مکش‌های بیش از یک متر آب تا ۱۵ بار اندازه‌گیری شد. برای ارزیابی توابع انتقالی یادشده از معیارهای آماری ریشه مربعات خطا (RMSE)، میانگین خطای مطلق (MAE)، ضریب کارآیی اصلاح شده (E') و شاخص مطابقت اصلاح شده (d') استفاده شد. نتایج نشان داد نرم‌افزار رزتا با میانگین مقادیر معیارهای آماری RMSE، MAE، E' وd' به ترتیب برابر با ۰/۰۳۱۰، ۰/۰۲۴۷، ۰/۷۹۵۶ و ۰/۹۰۳۷ در شبیه سازی منحنی رطوبتی خاک برای منطقه مورد پژوهش از دقت بالایی نسبت به بقیه توابع انتقالی برخوردار است. نتایج پژوهش حاضر ارجحیت شبکه‌های عصبی مصنوعی را برای برآورد منحنی رطوبتی خاک نسبت به توابع انتقالی رگرسیونی با تعداد پارامترهای ورودی بیشتر را نشان داد. نتایج همچنین نشان داد تابع انتقالی کمپل تعدیل شده در این پژوهش بعد از رزتا با مقادیر RMSE، MAE، E' وd' به ترتیب برابر با ۰/۰۶۸۵، ۰/۰۵۳۰، ۰/۵۵۶۱ و ۰/۸۰۷۵ برآورد مناسب‌تری از منحنی رطوبتی برای خاک‌های منطقه‌ی مورد پژوهش ارایه می‌دهد.

واژه های کلیدی: شبکه عصبی مصنوعی، رزتا، سویل پار-۲، کمپل تعدیل شده.

---

۱ – آدرس نویسنده مسئول: اردبیل، انتهای خیابان دانشگاه، دانشگاه محقق اردبیلی، دانشکده کشاورزی، گروه مهندسی آب، صندوق پستی ۱۷۹

* دریافت: آبان ۱۳۹۱ و پذیرش: آبان ۱۳۹۲

مقدمه

منحنی رطوبتی خاک یکی از مشخصات هیدرولیکی خاک است که دانستن آن به منظور بررسی بسیاری از فرآیندهای آب و خاک نظیر مدل کردن حرکت آب و انتقال املاح در خاک، مدل کردن حرکت آب‌های زیر زمینی حائز اهمیت می‌باشد. تعیین مستقیم منحنی رطوبتی خاک زمان‌بر و پرهزینه است. بنابراین، تلاش‌ها به سمت استفاده از روش‌های غیرمستقیم نظیر توابع انتقالی به منظور برآورد این ویژگی‌ها گسترش یافته است.

توابع انتقالی ویژگی‌های زود یافت خاک نظیر توزیع اندازه ذرات، جرم مخصوص ظاهری و محتوای مواد آلی را به منظور برآورد ویژگی‌های دیر یافت خاک نظیر منحنی رطوبتی خاک مورد استفاده قرار می‌دهند.راولز- براکنسیک (۱۹۸۵) توابع انتقالی را برای برآورد پارامترهای مدل‌های منحنی رطوبتی خاک و هدایت هیدرولیکی غیراشباع بروکز – کوری (۱۹٦٤)، کمپل(۱۹۷٤) و ون‌گنوختن(۱۹۸۰) بر اساس ویژگی‌هایی از خاک که استفاده از آن‌ها به سادگی امکان‌پذیر است نظیر درصدهای شن، رس، و تخلخل خاک ارایه کردند.سکستون و همکاران (۱۹۸٦) توابع انتقالی ارایه نمودند که می‌توان با استفاده از آن برای اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی اشباع و غیراشباع و منحنی رطوبتی خاک برای محدوده گسترده‌ای از بافت خاک استفاده کرد.مایر و جارویس (۱۹۹۹) توابع انتقالی را برای برآورد پارامترهای مدل منحنی رطوبتی خاک هاتسون-کاس (شکل تعدیل شده مدل کمپل(۱۹۷٤)) ارایه دادند.

نامبردگان از درصد توزیع اندازه ذرات خاک، جرم مخصوص ظاهری و محتوای کربن آلی استفاده کرده و معادلات رگرسیونی چندگانه از یک زیر مجموعه‌ای از سری داده‌های خصوصیات فیزیکی خاک‌های انگلیس و ولز بدست آوردند. مانیام و همکاران (۲۰۰۷) توانایی سه مدل ون‌گنوختن(۱۹۸۰)، واکلین (۱۹۸۳) و کمپل (۱۹۷٤) را در تخمین منحنی مشخصه خاک‌های شنی نیجر آزمودند. ایشان به این نتیجه رسیدند مدل کمپل با مقادیر RMSE حدود $m^3 .m^{-3}$ ۰/۰٦-۰/۰۵ گزینه مناسب‌تری نسبت به مدل ون‌گنوختن با مقادیر RMSE حدود m^{-3} . m^3 ۰/۰۷-۰/۰٦ در تخمین منحنی رطوبتی خاک می‌باشد.وستن و همکاران (۲۰۰۱) توابع انتقالی را برای برآورد محتوای رطوبت در مکش ۳۳ و ۱۵۰۰ کیلو پاسکال ارایه کرده و دقت و اعتبار توابع انتقالی را مورد بحث و بررسی قرار داده و نتیجه گرفتند که توابع انتقالی ابزار خوبی برای برآورد نقاط خاصی از منحنی رطوبتی خاک با دقت مناسب است.

در ایران نیز اخیراً فولادمند و هادی‌پور (۲۰۱۲) دوازده تابع انتقالی پارامتریک را برای تخمین منحنی رطوبتی خاک روی ۳۰ نمونه خاک با بافت‌های مختلف، مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان داد توابع انتقالی پارامتریک مدل ون‌گنوختن مناسب‌تر از توابع انتقالی پارامتریک مدل‌های کمپل و بروکز –کوری است(٦). حق وردی و همکاران(۲۰۱۲) از توابع انتقالی پارامتریک برای تخمین منحنی رطوبتی خاک استفاده کرده و نشان دادند توابع پارامتریک در روش کمپل (۱۹۸۵) بالاترین دقت و در روش وریکن و همکاران (۱۹۸۹) ضعیف‌ترین دقت را داشتند(۷).

رمضانی و همکاران (۲۰۱۱) از روش رگرسیون خطی چند متغیره به منظور توسعه توابع انتقالی نقطه‌ای برای خاک‌های شور و شور- سدیمی استفاده کردند. نتایج به دست آمده نشان داد توابع انتقالی توسعه یافته، رطوبت را در مکش‌های ۱۰، ۱۰۰، ۳۰۰، ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۵۰۰ کیلوپاسکال به‌طور قابل توجهی بهتر از مدل رزتا تخمین می‌زند. همچنین، نتایج این پژوهشگران نشان داد مدل رزتا رطوبت را در مکش ۳۳ کیلوپاسکال بهتر از توابع انتقالی توسعه یافته برآورد می‌کند.

به منظور استفاده آسان از توابع انتقالی با ماهیت شبکه عصبی مصنوعی، شاپ و همکاران (۲۰۰۱) برنامه کامپیوتری به نام رزتا[1] را توسعه دادند (۲۲). شاپ و لیج

[1] Rosetta

(۱۹۹۸)، میناسنی و همکاران (۱۹۹۹)، پاچپسکی و همکاران (۱۹۹٦) از شبکه‌های عصبی مصنوعی به منظور برآورد خصوصیات دیر یافت خاک استفاده کردند و گزارش کردند شبکه‌های عصبی مصنوعی می‌توانند پارامترهای دیر یافت خاک را با دقت قابل قبولی برآورد کنند (۲۱ ،۱۳ و ۱۵). برنامه کامپیوتری سویل پار-۲[1] به طور ساده برخی خصوصیات هیدرولیکی خاک نظیر منحنی رطوبتی خاک را با استفاده از ویژگی‌های زود یافت خاک برآورد می‌کند(۱). کیفیت برآورد توابع انتقالی وابسته به مجموعه داده‌های است که برای اشتقاق آن‌ها استفاده می‌شود. بنابراین، باید کارایی توابعی که در نقاط مختلف دنیا ارایه شده، برای داده‌های محلی مورد سنجش قرار گیرد(۷).

بنابراین، هدف پژوهش حاضر، برآورد منحنی رطوبتی خاک با استفاده از توابع انتقالی مختلف شامل نرم‌افزارهای رزتا و سویل پار-۲ و توابع انتقالی رگرسیونی راولز- براکنسیک (۱۹۸۵) و سکستون و همکاران (۱۹۸٦) برای دشت سولدوز شهرستان نقده است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد پژوهش و روش نمونه‌برداری

منطقه مورد پژوهش دشت سولدوز در استان آذربایجان غربی در شهرستان نقده قرار گرفته است. این منطقه، جزء مناطق استپی سرد است که دارای زمستان‌های سرد و مرطوب و تابستان‌های نسبتاً گرم است. متوسط بارندگی سالیانه منطقه حدود ۳٦۰ میلی متر است. با استفاده از نقشه‌های استان، از منطقه مورد پژوهش که شامل برخی اراضی کشاورزی دشت سولدوز واقع در شهرستان نقده است تعداد ۱۰ نمونه خاک از نقاط مختلف دشت، به صورت دست خورده و دست نخورده به طور تصادفی، ازعمق ۱۰-۰ سانتی‌متردر سه تکرار تهیه شد.جرم مخصوص ظاهری و جرم مخصوص حقیقی به ترتیب با روش‌های خشک کردن نمونه خاک دست نخورده درآون (روش استوانه) و پیکنومتر اندازه‌گیری شد (۹). توزیع اندازه ذرات (شامل درصدهای شن، سیلت و رس) و محتوای مواد آلی بر روی نمونه‌های دست خورده به ترتیب با روش‌های هیدرومتری قرائت چهار زمانه و والکلی بلاک(۱۹۳٤) به دست آمدند (۲۵). منحنی رطوبتی خاک (مکش- رطوبت) با استفاده از ستون آب آویزان (برای مکش‌های کمتر از یک متر آب) و صفحه فشاری (برای مکش‌های بیش از یک متر آب) تا ۱۵ بار اندازه-گیری شد.

توابع انتقالی

شبکه‌ی عصبی مصنوعی (ANN) مدلی ریاضی است که توانایی مدل‌سازی و ایجاد روابط ریاضی غیر خطی برای درون‌یابی را دارد. این مدل از سه لایه ورودی، خروجی و پنهان تشکیل شده است اصطلاحاً به آن شبکه عصبی پروسپترون (در این مطالعه پروسپترون چند لایه مورد مطالعه قرار گرفته است) اطلاق می‌شود. در نرم‌افزار رزتا پنج تابع انتقالی به صورت سلسله مراتبی به منظور برآورد منحنی رطوبتی خاک و هدایت هیدرولیکی اشباع و غیر اشباع ارایه شده است.

سلسله مراتبی بودن توابع انتقالی این امکان را فراهم می‌آورد تا بتوان پارامترهای منحنی مشخصه ون-گنوختن و هدایت هیدرولیکی اشباع را با استفاده از داده-های ورودی محدود (فقط کلاس‌های بافتی) تا خیلی گسترده (بافت، جرم مخصوص ظاهری و یک یا دو نقطه از منحنی رطوبتی خاک) برآورد نمود. در این پژوهش، از نرم‌افزار رزتا به منظور برآورد پارامترهای منحنی رطوبتی خاک ون‌گنوختن (۱۹۸۰) جدول (۱) استفاده شد.ورودی-های استفاده شده برای رزتا در این پژوهش درصد شن، سیلت، رس و جرم مخصوص ظاهری می‌باشد. چون هدف ارزیابی منحنی رطوبتی خاک برآورد شده با استفاده از توابع انتقالی است لذا از اطلاعات دو نقطه از منحنی

[1] Soil Par -2

رطوبتی خاک اندازه‌گیری شده، به عنوان ورودی مدل استفاده نشد.

آکوتیس و دونتلی (۲۰۰۳) نرم‌افزار سویل پار-۲ را برای برآورد پارامترها و توابع هیدرولیکی خاک ارایه دادند (۱). این نرم‌افزار با توابع رگرسیونی، قادر به محاسبه پارامترهای مدل‌های منحنی رطوبتی خاک کمپل (۱۹۷٤)، کمپل اصلاح شده به وسیله هاتسون-کاس(۱۹۸۷) (که از این بعد در این پژوهش به طور اختصار مدل هاتسون-کاس نامیده شده است) و همچنین بروکز-کوری (۱۹٦٤) و ون‌گنوختن (۱۹۸۰) با استفاده از مشخصات زود یافت خاک نظیر جرم مخصوص ظاهری، درصدهای شن، رس و سیلت و درصد ماده آلی است(۱).

در جدول (۱) مدل‌های یاد شده ارایه شده است. سویل پار-۲ پارامترهای مدل منحنی رطوبتی خاک کمپل و هاتسون-کاس را با استفاده از توابع انتقالی رگرسیونی ارایه شده به ترتیب به وسیله کمپل و همچنین مایر محاسبه می‌کند (۵ و ۱۲). این نرم‌افزار برای محاسبه پارامترهای معادله منحنی مشخصه بروکز - کوری از توابع انتقالی رگرسیونی ارایه شده به وسیله راولز - براکنسیک و برای محاسبه ضرایب معادله منحنی مشخصه ون‌گنوختن از توابع انتقالی رگرسیونی وریکن استفاده می‌کند (۱۸ و ۲٤). لذا، در این پژوهش، با استفاده از نرم‌افزار سویل‌پار-۲، چهار نوع منحنی رطوبتی خاک (کمپل، هاتسون-کاس، بروکز -کوری و ون‌گنوختن) شبیه‌سازی شد (٤ ،۸، ۳ و ۲۳). توابع انتقالی برای تخمین پارامترهای مدل‌های کمپل و بروکز -کوری از توزیع اندازه ذرات و جرم مخصوص ظاهری و برای تخمین پارامترهای مدل هاتسون-کاس و ون‌گنوختن علاوه بر توزیع اندازه ذرات و جرم مخصوص ظاهری از محتوای کربن آلی نیز به عنوان ورودی استفاده می‌کند. از توابع انتقالی راولز - براکنسیک به منظور برآورد پارامترهای منحنی رطوبتی خاک ون‌گنوختن و کمپل استفاده شد (۱۷).

در این توابع درصد رس، درصد شن و تخلخل کل به عنوان ورودی مورد استفاده قرار گرفتند. سکستون و همکاران (۱۹۸٦) توابع انتقالی را برای برآورد پتانسیل ماتریک در محدوده‌ی وسیعی از بافت خاک ارایه نمودند که در دامنه‌ی وسیعی از رطوبت خاک قابل استفاده می‌باشند (۲۰). منحنی پیشنهادی سکستون و همکاران از سه قسمت نقطه‌ی اشباع تا نقطه‌ی ورود هوا (مقدار ثابت)، نقطه‌ی ورود هوا تا فشار۱۰ کیلوپاسکال (رابطه خطی)، فشار ۱۰ کیلوپاسکال تا فشار ۱۵۰۰ کیلوپاسکال و بزرگتر تشکیل شده است. با استفاده از این توابع و مقادیر درصد شن و رس، منحنی رطوبتی خاک با تابع انتقالی سکستون و همکاران شبیه‌سازی شد.

جدول ۱- مدل‌های منحنی رطوبتی خاک مورد استفاده در این پژوهش

نام مدل	معادله
ون‌گنوختن (۱۹۸۰)	$\theta=(\theta_s-\theta_r)\left(\frac{1}{1+(\alpha h)^n}\right)^m+\theta_r \quad ,m=1-\frac{1}{n}$
بروکز - کوری (۱۹۶۴)	$\theta=(\theta_s-\theta_r)\left(\frac{h_b}{h}\right)^{\lambda}+\theta_r$
کمپل (۱۹۸۵)	$\theta=\theta_s\left(\frac{h_b}{h}\right)^{\frac{1}{b}}$
هاتسون-کاس (۱۹۸۷)	$\theta=\theta_s-\frac{\theta_s h^2[1-(\theta_i/\theta_s)]}{h_b{}^2(\theta_i/\theta_s)^{-2b}} \quad \theta\geq\theta_i$
	$\theta=\theta_s(h/h_b)^{\frac{-1}{b}} \quad \theta<\theta_i$
	$\theta_i=\frac{2b\theta_s}{1+2b}$

θ میزان رطوبت حجمی در مکش h؛ θ_s و θ_r به ترتیب رطوبت حجمی اشباع و باقی مانده در خاک؛ h_b مکش ورود هوا؛ θ_i رطوبت در یک نقطه تطابق؛ α، n، m، λ و b ضرایب مدل‌ها می باشند

معیارهای آماری

برای مقایسه منحنی رطوبتی خاک اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه با منحنی رطوبتی خاک شبیه‌سازی شده به وسیله توابع انتقالی مختلف، از چهار معیار آماری استفاده شد. معیار MAE[1] میانگین خطای مطلق است که مقدار صفر نشانگر تطبیق کامل مقادیر تخمین زده شده و اندازه‌گیری شده است و مقادیر بیش از صفر، نشاندهنده انحراف نتایج شبیه سازی شده از مقادیر اندازه‌گیری شده می‌باشد. E' ضریب کارآیی اصلاح شده بوده و محدوده آن از یک تا منفی بی‌نهایت است. E' برابر با یک نشاندهنده برابری مقادیر تخمین زده شده با اندازه‌گیری بوده و هر چه مقدر آن از یک کمتر باشد دقت مقادیر تخمین زده شده کمتر می‌باشد. d' شاخص مطابقت اصلاح شده است که محدوده آن از صفر تا یک است. مقدار d' هر چه بیشتر باشد یعنی مقادیر تخمین زده شده به مقادیر اندازه-گیری شده نزدیک‌تر می‌باشد (۱۹).

$$MAE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left|O_i - S_i\right| \qquad (۱)$$

$$E' = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}\left|O_i - S_i\right|}{\sum_{i=1}^{n}\left|O_i - O'\right|} \qquad (۲)$$

$$d' = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}\left|O_i - S_i\right|}{\sum_{i=1}^{n}\left(\left|S_i - O'\right| + \left|O_i - O'\right|\right)} \qquad (۳)$$

که در آن‌ها:

O: مقادیر اندازه‌گیری شده، S: مقدار برآورد شده، O': میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده و n تعداد زوج مقادیر اندازه‌گیری شده - برآورد شده رطوبت می‌باشد.

علاوه بر معیارهای یاد شده، از جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) برای رطوبت حجمی ($cm^3.cm^{-3}$) به منظور ارزیابی دقت برآوردها استفاده شد(۱۱).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(O_i - S_i\right)^2} \qquad (٤)$$

نتایج و بحث

برخی پارامترهای فیزیکی زود یافت، اندازه-گیری شده برای منطقه مورد پژوهش، در جدول (۲) ارایه شده است. این پارامترها در نرم‌افزارهای رزتا و سویل پار-۲ و توابع انتقالی راولز - براکنسیک و همچنین سکستون و همکاران به عنوان پارامترهای ورودی، برای برآورد منحنی رطوبتی خاک به کار می‌روند.

شکل (۱) منحنی رطوبتی خاک اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه به همراه منحنی مشخصه برآورد شده به وسیله نرم‌افزارهای سویل پار- ۲ و رزتا برای خاک‌های منطقه مورد پژوهش را نشان می‌دهد. در شکل (۱) منحنی‌های برآورد شده به وسیله سویل پار-۲ با استفاده از معادلات کمپل، بروکز- کوری و هاتسون - کاس به ترتیب با علائم SOILPAR2-Cam،SOILPAR2-BC وSOILPAR2-HC و منحنی شبیه سازی شده با مدل ون‌گنوختن که پارامترهای آن با نرم‌افزار رزتا برآورد شده، با علامت ROSETTA نشان داده شده است. در نرم‌افزار سویل پار-۲، مدل ون‌گنوختن، که پارامترهای آن به وسیله تابع انتقالی وریکن (۱۹۸۹) برآورد می شود (۲۳ و ۲٤)، به جز برای خاک منطقه المهدی با بافت لوم شنی برای سایر خاک‌ها شبیه‌سازی بسیار ضعیفی انجام داده است که علت آن برآورد خیلی کم برای پارامتر α می-باشد.

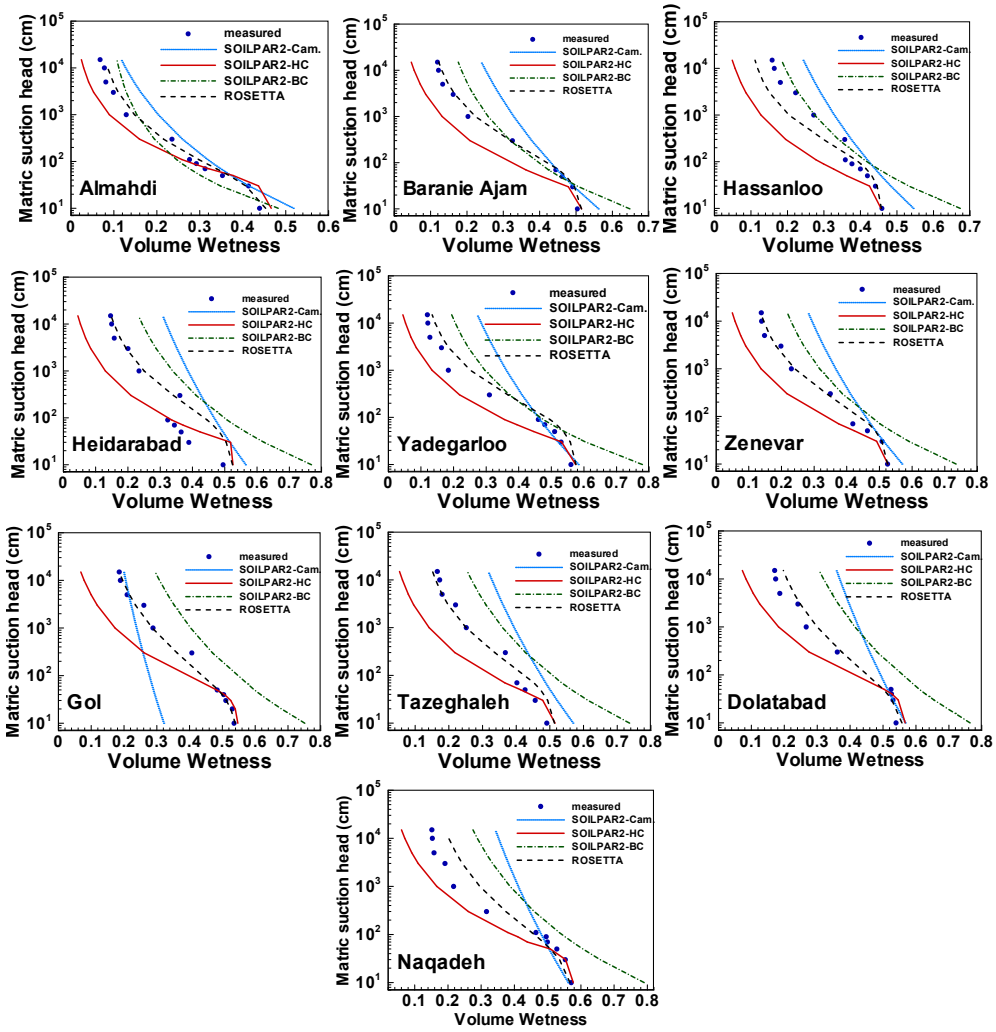
بنابراین، تنها مقادیر معیارهای آماری آن در جدول (۳) درج شده و از ارایه منحنی آن روی شکل (۱) به علت قرار نگرفتن در چهارچوب شکل اجتناب شده است. این موضوع در مطالعات مردون و همکاران(۲۰۰٦) و لی و همکاران (۲۰۰۷) نیز مشاهده شده بود (۱٤ و ۱۰).

[1] Mean Absolut Error

جدول۲- مقادیر برخی خصوصیات فیزیکی زود یافت مورد استفاده در توابع انتقالی

منطقه	شن (٪)	سیلت (٪)	رس (٪)	کلاس بافت	جرم مخصوص ظاهری ($g.cm^{-3}$)	جرم مخصوص حقیقی ($g.cm^{-3}$)	ماده آلی (٪)	تخلخل کل (٪)
حسنلو	۲۳	۴۷	۳۰	Clay loam	۱/۳۷	۲/۵۷	۲/۰۷	۰/۴۶
تازه قلعه	۷	۵۰	۴۳	Silty clay	۱/۲۱	۲/۵۷	۳/۰۳	۰/۵۲
یادگارلو	۲۰	۴۸	۳۲	Silty clay loam	۱/۰۷	۲/۵۸	۱/۳۴	۰/۵۸
بارانی عجم	۳۶	۳۴	۳۲	Clay loam	۱/۲۳	۲/۶۱	۱/۶۸	۰/۵۲
المهدی	۶۶	۲۰	۱۴	Sandy loam	۱/۴۳	۲/۷۱	۱/۰۱	۰/۴۷
زینه‌ور	۱۷	۴۷	۳۶	Silty clay loam	۱/۱۸	۲/۵۵	۱/۳۴	۰/۵۳
نقده	۵	۴۳	۵۲	Silty clay	۱/۰۲	۲/۴۹	۲/۱۳	۰/۵۸
حیدرآباد	۷	۵۳	۴۰	Silty clay loam	۱/۱۶	۲/۵۲	۱/۴۶	۰/۵۳
گل	۳	۴۳	۵۴	Silty clay	۱/۱۳	۲/۵۶	۳/۳۶	۰/۵۵
دولت آباد	۳	۴۱	۵۶	Silty clay	۱/۰۷	۲/۵۵	۴/۰۹	۰/۵۷

با توجه به شکل (۱) تابع انتقالی رزتا نتیجه مناسبی را برای برآورد منحنی رطوبتی خاک ارایه داده است. به دنبال آن منحنی مشخصه برآورد شده با مدل هاتسون-کاس نسبت به مدل‌های منحنی مشخصه بروکز – کوری و کمپل شبیه سازی نسبتاً مناسبی برای کل خاک‌های منطقه ارایه داده است. مدل سویل پار هاتسون-کاس به دلیل این‌که از تابع دو قسمتی، به صورت نمایی و هذلولی برای برآورد منحنی مشخصه استفاده می‌کند، نسبت به سایر مدل‌های موجود در سویل پار (شامل بروکز –کوری و کمپل) که فقط از تابع نمایی، برای برآورد منحنی مشخصه استفاده می‌کند، نتایج بهتری ارایه داده است. شکل (۱) نشان می‌دهد که در اکثر خاک‌ها، مدل سویل پار هاتسون-کاس قسمت هذلولی منحنی مشخصه (مکش‌های تقریباً کمتر از مکش ورود هوا) را با دقت بیشتری نسبت به قسمت نمایی (مکش‌های بالاتر از مکش ورود هوا) را برآورد می‌کند.



شکل۱- منحنی رطوبتی خاک اندازه‌گیری و برآورد شده با نرم‌افزارهای سویل پار-۲ و رزتا برای خاک‌های مختلف

شکل (۲) منحنی رطوبتی خاک اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه به همراه منحنی برآورد شده به وسیله‌ی توابع انتقالی راولز- براکنسیک (۱۷) و سکستون و همکاران(۲۰) برای خاک‌های منطقه مورد پژوهش را نشان می‌دهد. در این شکل، منحنی‌های شبیه‌سازی شده به وسیله تابع انتقالی راولز- براکنسیک با استفاده از معادلات ون‌گنوختن و کمپل به ترتیب با علائم R&B-vG ، R&B-Cam و منحنی شبیه‌سازی شده با تابع سکستون و همکاران با علایم Saxton نشان داده شده است. مشاهده شکل‌ها نشان دهنده این موضوع است که تابع انتقالی راولز- براکنسیک در مجموع برای همه‌ی مناطق نسبت به سکستون و همکاران برآورد بهتری انجام می‌دهد. برای مقایسه عملکرد نرم‌افزار رزتا، سویل پار-۲، راولز- براکنسیک و سکستون و همکاران (۱۹۸۶) در برآورد منحنی رطوبتی خاک، مقادیر معیارهای آماری شامل RMSE، MAE، E' و d' برای هر خاکی به طور جداگانه محاسبه شده و سپس برای نتیجه‌گیری، میانگین و انحراف معیار این معیارها برای کل منطقه مورد پژوهش محاسبه شد جدول (۳). مقایسه همزمان مجموع معیارهای آماری RMSE، MAE، E' و d' نشان داد که تابع انتقالی رزتا با کمترین مقادیر میانگین معیارهای آماریِ RMSE، MAE (به ترتیب برابر با ۰/۰۳۱۰ و ۰/۰۲۴۷)، و بیشترین مقادیر E' و d' (به ترتیب برابر با ۰/۷۹۵۶ و ۰/۹۰۳۷) مناسب‌ترین عملکرد را در برآورد منحنی رطوبتی خاک نسبت به سایر

توابع انتقالی دارد. انحراف معیار محاسبه شده نیز دارای مقادیر پایینی بوده و به ترتیب برابر با ۰/۰۱۸۳، ۰/۰۱۳٦ ، ۰/۰۱٤۳۲ و ۰/۰٥۸٦ است که نشاندهنده عملکرد بهتر نرم‌افزار رزتا برای تمامی خاک‌های منطقه‌ی مورد پژوهش است. از میان توابع موجود در نرم‌افزار سویل پار، تابع انتقالی مایر – جارویس، ارایه شده به منظور برآورد پارامترهای مدل هاتسون – کاس، بهترین برآورد و تابع انتقالی وریکن، ارایه شده به منظور برآورد پارامترهای مدل ون‌گنوختن، ضعیف‌ترین برآورد را برای منطقه مورد پژوهش ارایه نمود.

حق وردی و همکاران (۲۰۱۲) نشان دادن تابع انتقالی وریکن برای خاک‌های شمال و شمال شرق ایران ضعیف‌ترین برآورد را دارد (۷). مقایسه میانگین مقادیر معیارهای آماری برای مدل‌های دیگر موجود در نرم‌افزار سویل پار –۲ (کمپل و بروکز – کوری) نشان می‌دهد، مدل بروکز – کوری توانایی بیشتری نسبت به مدل کمپل در شبیه سازی منحنی مشخصه برای خاک‌های منطقه مورد پژوهش دارد. هرچند شبیه سازی ضعیفی (همراه با بیش برآورد) با هر دو مدل صورت گرفته است. مقایسه میانگین مقادیر معیارهای آماریِ RMSE، MAE، E' و d' برای مدل‌های برآورد شده با تابع انتقالی راولز– براکنسیک (۱۸) نشان داد مدل ون‌گنوختن با مقادیر معیارهای آماریِ RMSE، MAE، E' و d' به ترتیب برابر با ۰/۰٦۹۱، ۰/۰٦۱۳، ۰/٥۲۹۹ و ۰/۷۸۳۰ به طور کلی توانایی بیشتری نسبت به مدل کمپل در برآورد منحنی مشخصه برای خاک‌های منطقه مورد پژوهش دارد.

هر چند با توجه به شکل (۲) مدل کمپل– راولز منحنی مشخصه را در مکش‌های بالا با دقت بیشتری نسبت به مدل ون‌گنوختن برآورد می‌کند. مدل ون‌گنوختن مکش‌های بالا را به طور ضعیفی شبیه سازی کرده است.مانیام و همکاران به نتایجی مشابه با نتایج یادشده رسیدند. در پژوهش ایشان نیز مدل ون‌گنوختن منحنی مشخصه را برای رژیم‌های مرطوب‌تر(مکش‌های پایین‌تر) بهتر برآورد کرده است در حالی‌که برای رژیم‌های خشک (مکش‌های بالاتر) بیش برآورد ارایه داده است (۱۱). همچنین میانگین و انحراف معیار مقادیر معیارهای آماری برای منحنی مشخصه شبیه سازی شده با توابع انتقالی سکستون در جدول (۳) ارایه شده است. برای منحنی مشخصه برآورد شده با این توابع انتقالی، میانگین مقادیر معیارهای آماریِ RMSE، MAE، E' و d' به ترتیب برابر با ۰/۰۹۳۸، ۰/۰۷۳۱، ۰/٤۱٤٦ و ۰/۷۱۰٦ است. مقادیر نشان دهنده این مطلب است که شبیه‌سازی خوبی به وسیله تابع انتقالی سکستون و همکاران برای خاک‌های مناطق مورد پژوهش ارایه شده است.

به طور کلی، با مقایسه همزمان میانگین و انحراف معیار مربوط به هر چهار معیار آماری RMSE، MAE، E' و d' برای تمام توابع انتقالی بحث شده می‌توان ترتیب رزتا، راولز– براکنسیک (۱۹۸٥)، سکستون، و سویل پار– ۲ را برای آن‌ها از نظر عملکرد آن‌ها در برآورد منحنی مشخصه برای خاک‌های منطقه‌ی مورد پژوهش گزارش کرد. هر چند با توجه به شکل‌های (۱) و (۲)، برای برخی مناطق خاص و مدل‌های خاص (برای مثال برای خاک منطقه‌ی حسنلو تابع انتقالی راولز براکنسیک – مدل ون‌گنوختن نسبت به سایر توابع انتقالی در اولویت قرار دارد) این رتبه بندی تغییر خواهد کرد و در مجموع برای کل مناطق رتبه بندی فوق صادق می‌باشد. در جدول (۳) همچنین مقادیر محک‌های آماری برای تابع انتقالی کمپل (۱۹۸٥) که پارامترهای منحنی مشخصه کمپل (۱۹۷٤) را برآورد می‌کند، ارایه شده است (تابع سویل پار–کمپل). کمپل (۱۹۸٥) تابع انتقالی زیر را برای برآورد شیب معادله منحنی مشخصه کمپل (۱۹۷٤) ارایه کرده است.

$$b = -2h_{es} + 0.2\delta_g \qquad (٥)$$

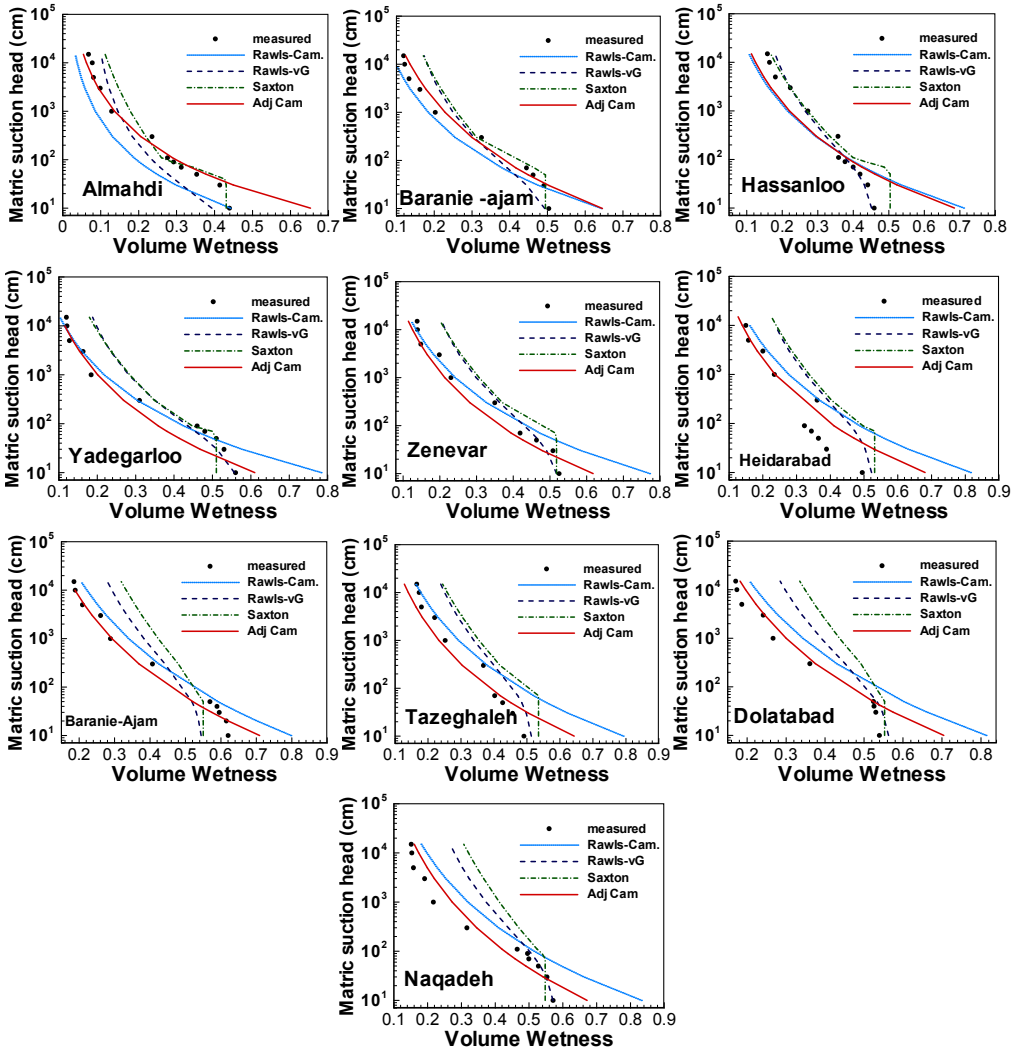
که در آن:

δ_g انحراف معیار قطر ذرات، h_{es} مکش ورود هوا درجرم مخصوص استاندارد (۱/۳ گرم بر سانتیمتر مکعب) و b شیب معادله کمپل می باشد. با توجه به مقادیر محک-های آماری از جدول (۳) و منحنی مشخصه شبیه سازی

شده با تابع انتقالی یادشده در شکل (۱) (مشخص شده با علایم SOILPAR2-Cam.) به وضوح روشن است که تابع انتقالی کمپل (۱۹۸۵) برای برآورد منحنی رطوبتی خاک برای خاک‌های منطقه مورد پژوهش سازگار نمی‌باشد. لذا با استفاده از SPSS، تابع انتقالی تعدیل شده ذیل برای دشت سولدوز در شهرستان نقده به شرح ذیل به دست آمد.

$$b = -0.1779h_{es} + 0.5750\delta_g \qquad R^2 = 0.908 \qquad (۶)$$

منحنی رطوبتی خاک برآورد شده با تابع انتقالی کمپل تعدیل شده معادله (۶) با علایم Adj.Cam در شکل (۲) نشان داده شده است. مقادیر میانگین و انحراف معیار مربوط به معیارهای آماری RMSE، MAE، E' و d' برای تابع یادشده در جدول (۳) ارایه شده است. پایین‌تر بودن مقادیر میانگین RMSE، MAE و بالاتر بودن مقادیر میانگین E' و d' نشان دهنده دقت بیشتر تابع انتقالی کمپل تعدیل شده نسبت به توابع انتقالی موجود در برنامه سویل پار۲، راولز- براکنسیک و سکستون و همکاران است.



شکل ۲- منحنی رطوبتی خاک اندازه‌گیری و برآورد شده با توابع انتقالی راولز- براکنسیک، سکستون و کمپل تعدیلی برای خاک‌های مختلف

دلیل این‌که تابع انتقالی کمپل نسبت به تابع انتقالی رزتا نتایج بهتری ارایه نداده است، شاید این عامل باشد که تابع انتقالی کمپل (۱۹۸۵) محتوای رطوبت در مکش‌های کمتر از مکش ورود هوا را نمی‌تواند برآورد

کند. برآوردهای انجام شده با رزتا به میزان بالایی قابل قبول است، در حالی‌که با وجود این‌که برخی توابع انتقالی رگرسیونی (وریکن و مایر جارویس) تعداد پارامترهای ورودی بیشتری نیز برای شبیه سازی مدل‌ها مورد استفاده قرار داده‌اند ولی به طور کلی این امر موجب افزایش دقت شبیه‌سازی‌ها نسبت به نرم‌افزار رزتا نشده است. همچنین نتایج تابع انتقالی سکستون و همکاران با متغیرهای ورودی کمتری نسبت به تابع انتقالی مایر جارویس با یکدیگر مشابه می‌باشد. این موضوع نشان می‌دهد همیشه برای به دست آوردن برآوردهای بهتر نیاز به استفاده از توابع انتقالی با تعداد ورودی‌های بیشتر نمی‌باشد.

جدول ۳- نتایج معیارهای آماری منحنی رطوبتی خاک برآورد شده با نرم‌افزارهای رزتا، سویل پار۲، تابع انتقالی رگرسیونی راولز - براکنسیک، سکستون و همکاران و کمپل تعدیل شده برای خاک‌های مختلف پژوهش

	RMSE	MAE	E'	d'
تابع انتقالی- مدل	(انحراف معیار) میانگین	(انحراف معیار) میانگین	(انحراف معیار) میانگین	(انحراف معیار) میانگین
سویل پار- ون‌گنوختن	۰/۲۲۹۱ (۰/۰۶۸۳)	۰/۱۸۸۸ (۰/۰۵۶۳)	۰/۲۱۴۸ (۰/۵۰۵۷)	۰/۳۹۷۰ (۰/۱۸۴۱)
سویل پار- بروکز کوری	۰/۱۰۶۶ (۰/۰۳۸۹)	۰/۰۹۲۸ (۰/۰۳۷۴)	۰/۲۹۸۸ (۰/۳۶۴۸)	۰/۶۷۰۴ (۰/۱۳۰۶)
سویل پار- کمپل	۰/۱۰۸۹ (۰/۰۳۳۰)	۰/۰۹۳۶ (۰/۰۲۸۰)	۰/۲۹۵۸ (۰/۲۹۸۷)	۰/۶۲۱۵ (۰/۱۲۱۰)
سویل پار- هاتسون کاس	۰/۰۷۷۳ (۰/۰۲۰۱)	۰/۰۶۶۸ (۰/۰۱۷۰)	۰/۴۷۵۹ (۰/۲۳۳۱)	۰/۷۷۹۵ (۰/۰۸۲۰)
راولز- ون‌گنوختن	۰/۰۶۹۱ (۰/۰۲۶۹)	۰/۰۶۱۳ (۰/۰۲۳۲)	۰/۵۲۹۹ (۰/۱۸۹۲)	۰/۷۸۳۰ (۰/۰۸۸۱)
راولز- کمپل	۰/۰۹۱۱ (۰/۰۲۱۱)	۰/۰۷۱۴ (۰/۰۲۲۱)	۰/۴۱۶۱ (۰/۲۶۵۲)	۰/۷۵۴۰ (۰/۰۸۴۹)
سکستون	۰/۰۹۳۸ (۰/۰۳۷۵)	۰/۰۷۳۱ (۰/۰۳۳۶)	۰/۴۱۴۶ (۰/۳۴۴۴)	۰/۷۱۰۶ (۰/۱۴۸۰)
رزتا	۰/۰۳۱۰ (۰/۰۱۸۳)	۰/۰۲۴۷ (۰/۰۱۳۶)	۰/۷۹۵۶ (۰/۱۴۳۲)	۰/۹۰۳۷ (۰/۰۵۸۶)
کمپل تعدیل شده	۰/۰۶۸۵ (۰/۰۱۹۰)	۰/۰۵۳۰ (۰/۰۲۰۵)	۰/۵۵۶۱ (۰/۲۳۲۷)	۰/۸۰۷۵ (۰/۰۸۶۲)

با توجه به شکل (۱) مشاهده شد خاک‌های منطقه مورد پژوهش، تطابق بسیار خوبی بین منحنی مشخصه اندازه‌گیری شده و برآورد شده با رزتا برای تمامی انواع بافت‌ها ارایه داده‌اند. دلیل برآوردهای بسیار خوب در تابع رزتا را شاید بتوان به هوشمند بودن نحوه تجزیه و تحلیل داده‌ها و الگوریتم توانمند به کار رفته در توسعه آن نسبت داد. علاوه بر این، از آنجا که در آموزش شبکه عصبی رزتا از خاک‌های قاره آسیا نیز استفاده شده است شاید دلیل برآورد بهتر را بتوان به این عامل نیز نسبت داد (۲).

مبنی براین که توابع انتقالی ویژگی‌های هیدرولیکی مربوط به خاک‌هایی که از آن منشأ می‌گیرند را بهتر برآورد می‌کنند. یافته‌های پاچپسکی و همکاران و میناسنی و همکاران (۱۵ و ۱۳) با نتایج پژوهش حاضر تطابق دارد. پژوهشگران یاد شده از شبکه‌های عصبی مصنوعی به منظور برآورد ویژگی‌های هیدرولیکی استفاده کرده و به این نتیجه رسیدند که وقتی تعداد پارامترهای ورودی به بیش از سه پارامتر می‌رسد، شبکه عصبی مصنوعی معمولاً نتایج بهتری نسبت به روش رگرسیونی ارایه می‌دهد.

نتیجه گیری

نتایج نشان داد که تابع انتقالی مناسب برای برآورد منحنی رطوبتی خاک در منطقه مورد پژوهش، نرم-افرار رزتا است. نرم‌افرار رزتا با استفاده از درصد شن، سیلت، رس و جرم مخصوص ظاهری منحنی رطوبتی خاک ون‌گنوختن را با دقت بالایی برای تمام خاک‌های منطقه یادشده شبیه‌سازی نمود. نتایج این پژوهش ارجحیت شبکه‌های عصبی مصنوعی را نسبت به مدل‌های رگرسیونی در برآورد منحنی رطوبتی خاک نشان داد. به منظور به دست آوردن برآوردهای دقیق از توابع انتقالی، همیشه نیاز به استفاده از داده‌های ورودی بیشتری نمی-باشد. مدل رزتا با داشتن توزیع اندازه ذرات و جرم

مخصوص ظاهری به عنوان پارامترهای ورودی برآوردهای بهتری نسبت به توابع انتقالی وریکن برای مدل ون‌گنوختن و مایر- جارویس برای مدل هاتسون-کاس با تعداد ورودی‌های بیشتر (شامل توزیع اندازه ذرات و جرم مخصوص ظاهری به اضافه محتوای مواد آلی) ارایه داده است. همچنین، نتایج این پژوهش تأیید کرد که برای استفاده از توابع انتقالی برای هر منطقه باید ابتدا این توابع را مورد آزمون قرار داد و سپس مورد استفاده قرار داد.چنانچه نتایج پژوهش حاضر نیز نشان داد تعدیل تابع انتقالی کمپل، منجر به نتایج رضایتبخشی برای خاک‌های منطقه‌ی مورد پژوهش شد.

فهرست منابع

1. Acutis, M. and M. Donatelli. 2003. SOILPAR 2.00: Software to estimate soil hydrological parameters and functions. *European Journal of Agronomy*, 18: 373-377.
2. Borgesen, C.D. and M.G. Schaap. 2005. Point and parameter pedotransfer functions for water retention predictions for Danish soils. *Geoderma*, 127:154-167.
3. Brooks, R.H. and A.T. Corey. 1964. Hydraulic properties of porouse media. Colorado State University. Hydrological Paper No. 3.
4. Campbell, C.S. 1974. A simple method for determining unsaturated conductivity from moisture retention data. *Soil Science*, 117:311-314.
5. Campbell, C.S. 1985. Soil physics with basic. Elsevier , New York.
6. Fooladmand, H. R., and S. Hadipour. 2012. Evaluation of parametric pedotransfer functions for estimating soil water characteristic curve in Fars province, *Journal of Science and Technology of Agriculture and Natural Resources, Water and Soil Science,* 15:58. 25-37.
7. Haghverdi, A., B. Ghahreman, A.A. Khoshnood Yazdi, M. Joleini and Z. Arabi. 2012. Evaluation and comparison between some point and parametric pedotransfer functions in predicting soil water contents in different matric potentials. *Journal of Water and Soil Conservation*, 19(2):1-22.
8. Hutson, J.L. and A. Cass. 1987. A retentivity function for use in soil-water simulation models. *Soil Science*, 38: 105-113.
9. Jacob, H. and G. Clarke. 2002. Methods of soil analysis, Part 4, Physical Method Soil Science Society of America, Inc. Madison, Wisconsin, USA.
10. Li, Y., D. Chen, R.E. White, A. Zhu and J. Zhang. 2007. Estimating soil hydraulic properties of Fengqiu county soils in the north china plain using pedotransfer functions. *Geoderma*, 138: 261-271.
11. Manyam, C., C.L. Morgan, J.L. Heilman, D. Fatondji, B. Gerard and W.A. Payne. 2007. Modeling hydraulic properties of sandy soils of Niger using pedotransfer functions. *Geoderma*, 141: 407- 415.
12. Mayr, T., and N.J. Jarvis. 1999. Pedotransfer functions to estimate soil water retention parameters for a modified Brooks-corey type model. *Geoderma*, 91(1-2): 1-9.
13. Minasny, B., A.B. Mc Bratney and K.L. Bristaw. 1999. Comparison of different approaches to the development of pedotransfer functions for water retention curves. *Geoderma*, 93: 225-253.
14. Merdun, H., O. Cinar, R. Meral and M. Apan. 2006. Comparison of artificial neural network and regression pedotransfer function for prediction of soil water retention and saturated hydraulic conductivity. *Soil and Tillage Research*, 90:108-116.
15. Pachepsky, Ya.A., D. Timline and G. Varallyay. 1996. Artificial neural networks to estimate soil water retention from easily measurable data. *Soil Science*, 60:727-733.

16. Ramezani, M., Ghanbarian- Alavijeh, B., Liaghat, A. M., and Salehi Khoshkroudi, Sh. 2011. Developing pedotransfer functions for saline ans saline-Alkali soils. *Journal of Water and Irrigation Management,* 1(1): 99-110.
17. Rawls, W.J. and D.L. Brakensiek. 1985. Prediction of soil water properties for hydrologic modeling. In: E. Jones and T. J. Ward (eds.) Watershed Management in the Eighties, Proceedings of a Symposium ASCE. 30 Apr.- 2 May. 293-299.
18. Rawls, W.J. and D.L. Brakensiek. 1989. Estimation of soil water retention and hydraulic properties. In: Morel-Seytoux, h.J. (ed), Unsaturated flow in hydraulic modeling. Theory and Practice, Kluwer Academic Publishers, 275-300.
19. Salazar, O., I. Wesstrom and A. Joel. 2008. Evaluation of drainmod using saturated hydraulic conductivity estimated by a pedotransfer function model. *Agricultural Water Management*, 95: 1135 – 1143.
20. Saxton, K.E., W.J. Rawls, J.S. Romberger and R.I. Papendick. 1986. Estimating generalized soil water characteristics from texture. *Soil Science Society of America Journal*, 50: 1301-1036.
21. Schaap, M.G. and F.J. Leij. 1998. Using neural networks to predict soil water retention and soil hydraulic conductivity. *Soil and Tillage Research*, 47: 37-42.
22. Schaap M.G., F.J. Leij, and M.T. van Genuchten. 2001. ROSETTA: a computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions. *Journal of Hydrology*, 251: 163-176.
23. van Genuchten, M.T. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, 44: 892-898.
24. Vereecken, H., J. Maes, J. Feyen and P. Darius. 1989. Estimating the soil moisture retention characteristics from texture, bulk density, and carbon content. *Soil Science*, 148: 389–403.
25. Walkley, A., and I.A. Black. 1934. An examination of the Degtjareff method for determining organic carbon in soils: Effect of variations in digestion conditions and of inorganic soil constituents. *Soil Science*, 63:251-263
26. Walckzak, R.J., F. Moreno, C. Stawinski, E. Fernandez and J.L. Arrue. 2006. Modelling of soil water retention curve using soil phase parameters. *Journal of Hydrology*, 329: 527-533.
27. Wosten, J.H.M., Ya.A. Pachepsky and W.J. Rawles. 2001. Pedotransfer functions: bridging the gap between available basic soil data and missing soil hydraulic characteristics. *Journal of Hydrology*, 251(3-4): 123-150.