بررسی دقت روشهای مختلف در تعیین ضرایب شبیه منحنی رطوبتی ون‌گنوختن

حسین باقری*[۱]، حمید زارع ابیانه[۲]، پیمان افراسیاب[۳]، علی افروزی[۴]

تاریخ دریافت: ۹۳/۳/۱۴ تاریخ پذیرش: ۹۴/۳/۲۴

چکیده

منحنی رطوبتی آب‌خاک از ویژگیهای مهم فیزیکی- آبشناسی خاک می باشد که در مسائل مختلف آب و خاک کاربردهای فراوانی داشته و بطور گسترده به وسیله‌ی شبیه ون‌گنوختن براورد می‌گردد. این پژوهش به‌منظور براورد منحنی مشخصه‌ی رطوبتی خاک با استفاده از روشهای مختلف تعیین ضرایب شبیه ون‌گنوختن انجام گردید. بدین ترتیب، برای تعیین ضرایب شبیه ون‌گنوختن روشهای حل معکوس، شبیه H5 برنامه‌ی رزتا، دو نقطه‌ای و دو نقطه‌ای-رزتا مورد استفاده قرار گرفتند. با استفاده از این ضرایب، عملکرد و دقت روشها در تخمین منحنی رطوبتی با ضریب همبستگی (R^2)، خطای میانگین مطلق باقیمانده (MAE)، مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE)، ضریب آکائیک (AIC) و بازده شبیه (EF) مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفتند. بررسی نتایج کلی نشان داد که، مقادیر فراسنجهای آماری R^2، EF، MAE (cm^3/cm^3)، RMSE (cm^3/cm^3)، و AIC برای روش حل معکوس به‌ترتیب برابر ۰/۹۹۷، ۰/۹۸۱، ۰/۰۱۳، ۰/۰۲۰ و ۷۳۴۴- ، برای روش دونقطه‌ای-رزتا برابر با ۰/۹۸۳، ۰/۸۹۸، ۰/۰۲۶، ۰/۰۴۷ و ۵۷۵۴-، برای روش دو نقطه‌ای به ترتیب برابر ۰/۹۸۰، ۰/۸۷۹، ۰/۰۲۷، ۰/۰۵۱ و ۵۵۹۵- و برای روش رزتا به ترتیب برابر ۰/۹۷۸، ۰/۸۵۹، ۰/۰۳۹، ۰/۰۵۵ و ۵۴۴۰- بودند. مطابق این نتایج، روشهای معکوس، دو نقطه‌ای-رزتا و دو نقطه‌ای به‌ترتیب از بالاترین دقت در تخمین منحنی برخوردار بوده، و برنامه‌ی رزتا کمترین دقت را در این امر داشته است. اما مقایسه‌ی دقت روشها در بافتهای مختلف نشان داد که حل معکوس در تمامی بافتها کمترین خطا را داشته، و برنامه‌ی رزتا برای گروه بافتی درشت، روش دو نقطه‌ای-رزتا برای گروه بافتی میانه و روش دو نقطه‌ای برای گروه بافتی ریز توصیه شدند.

واژه‌های کلیدی: روش دو نقطه‌ای، حل معکوس، برنامه رزتا، منحنی رطوبتی

[۱]- دانشجوی دکتری رشته آبیاری و زهکشی، دانشگاه بوعلی سینا همدان

[۲]- دانشیار آبیاری و زهکشی، دانشگاه بوعلی، دانشکده‌ی کشاورزی، گروه مهندسی آب

[۳]- استادیار آبیاری و زهکشی، دانشگاه زابل،دانشکده‌ی آب و خاک، گروه مهندسی آب

[۴]- دانشجوی دکتری رشته آبیاری و زهکشی دانشگاه بوعلی سینا همدان

*- نویسنده مسوول مقاله:bagheri.hossein@live.com

مقدمه

منحنی رطوبتی آب خاک[1] (SWRC) از ویژگیهای مهم فیزیکی-هیدرولیکی خاک می‌باشد که مبین رابطه‌ی بین مکش (توان ماتریک) با رطوبت حجمی آن است. از جمله عوامل موثر بر SWRC، می‌توان به بافت، ساختمان، تخلخل و شکل خلل و فرج اشاره کرد (رمضانی و همکاران، ۱۳۹۰؛ مالایا و اگروهدیپ، ۲۰۱۲). دانش SWRC در مسائل مربوط به سامانه‌های آبیاری و زهکشی، شبیه‌های حرکت آب و املاح و مسائل مختلف آب و خاک کاربرد دارد که از راه اندازه‌گیری مستقیم و یا شبیه‌سازی به‌صورت غیر مستقیم قابل دست‌یابی است. تبیین رفتار منحنی مشخصه‌ی رطوبتی خاک از راه مستقیم به‌رغم دقت، به‌دلیل هزینه‌بر بودن و زمان‌بر بودن، موجب تمایل پژوهش‌گران به روشهای غیر مستقیم شده است (فولادمند، ۱۳۹۳). روشهای غیر مستقیم متعددی برای براورد SWRC وجود دارد و بسته به نوع اطلاعات می‌توان از شبیه‌هایی نظیر ون‌گنوختن، کمپل، بروکس و کوری، گاردنر، وایازی‌های خطی و غیر خطی، شبکه‌های هوشمند عصبی و توابع انتقالی استفاده کرد. شبیه ون‌گنوختن از جمله شبیه‌هایی است که به‌دلیل پیوستگی آن، در بازه‌ی نقطه اشباع تا نقطه‌ی پژمردگی دایم در اکثر بافتها، جهت براورد رطوبت در مکشهای مختلف، بطور گسترده استفاده می‌شود (عباسی، ۱۳۸۶). این شبیه، اساسی فیزیکی داشته و برای به‌کارگیری آن لازم است تا ضرایب آن برای هر بافت خاک تعیین شود. برای این منظور، روشها مختلفی از جمله حل معکوس، دو نقطه‌ای، توابع انتقالی، وایازی خطی و غیر خطی و روشهای مبتنی بر هوش مصنوعی ارائه شده اند.

زاچمن و همکاران (۱۹۸۱) اولین افرادی بودند که از روش حل معکوس برای تعیین فراسنجهای جریان غیر اشباع استفاده کردند. ریتر و همکاران (۲۰۰۳) در مطالعه‌ی خود بیان نمودند که حل معکوس توانسته است در تعیین ضرایب هیدرولیکی (θ_s، α، n) موفق عمل نماید. مطالعات دیگری نیز به‌منظور تعیین فراسنجهای هیدرولیکی با روش حل معکوس صورت گرفته است (وروگت و همکاران، ۲۰۰۳؛ پان و وو، ۱۹۹۹؛ لامبت و همکاران، ۲۰۰۲). برای تعیین SWRC با کاربرد معکوس، نرم‌افزار منحنی رطوبتی[2] (RETC) به وسیله‌ی ون‌گنوختن و همکاران (۱۹۹۱) ارائه شده است که با استفاده از روش بهینه‌سازی تابع هدف به‌صورت خطی و با حداقل نمودن مربعات خطا، ضرایب مجهول شبیه ون‌گنوختن را براورد می‌کند.

رمضانی و همکاران (۱۳۹۲) یک روش دو نقطه‌ای را برای تعیین این ضرایب پیشنهاد کرده و بیان نمودند که این روش به‌دلیل نیاز به اطلاعات فقط دو نقطه از SWRC، نسبت به حل معکوس، که نیاز به اطلاعات حداقل سه نقطه از این منحنی دارد، می‌تواند مورد توجه بیشتری واقع گردد. ایشان اندیشه‌ی خود را از مطالعه‌ی کریسول و پایدار (۱۹۹۶)، که یک روش دو نقطه‌ای را برای پیش‌بینی فراسنجهای مجهول شبیه کمپل ارائه داده بودند، برگرفتند.

در طول سی سال گذشته توابع انتقالی زیادی توسعه داده شده اند (گوپتا و لارسن، ۱۹۷۹؛ وریکن و همکاران، ۱۹۸۹؛ خالق پناه و همکاران، ۱۳۹۱؛ حق وردی و همکاران، ۱۳۹۰) و بسیاری از آنها با داده‌های آزمایشگاهی و مزرعه‌ای مورد آزمایش قرار گرفتند (جعفری گیلانده و همکاران، ۱۳۹۲؛ فولادمند و هادی‌پور، ۱۳۹۰؛ راجکای و همکاران، ۲۰۰۴؛ کرنلیس و همکاران، ۲۰۰۱). به‌منظور به‌دست آوردن این توابع، از فراسنجهای زود یافت خاک، مثل مقدار ماده‌ی آلی، چگالی ظاهری، توزیع اندازه ذرات استفاده می‌شود (وانگ و همکاران، ۲۰۱۲). والکزاک و همکاران (۲۰۰۶) برای تخمین میزان رطوبت موجود در خاک از ویژگیهای فیزیکی بخش جامد خاک استفاده نموده و بیان کردند که توابع انتقالی توسعه یافته برای این منظور به‌خوبی توانسته‌اند اندازه‌ی رطوبت موجود در خاک را براورد کنند. یکی از پرکاربردترین توابع انتقالی توسعه‌یافته به وسیله‌ی شاپ و همکاران (۲۰۰۱) در قالب برنامه‌ی رزتا ارائه گردیده است، که از مهمترین موارد استفاده‌های آن تعیین فراسنجهای شبیه ون‌گنوختن می‌باشد. این برنامه شامل پنج شبیه H1، H2، H3، H4 و H5 می‌باشد که ماهیت شبکه‌ی عصبی مصنوعی داشته، و براساس بانک اطلاعاتی گروه کشاورزی ایالات متحده

[1] soil water retention curve

[2] retention curve

آمریکا[1] (USDA) ایجاد شده است. جعفری گیلانده و همکاران (۱۳۹۲) در بررسی چندین توابع انتقالی به این نتیجه رسیدند که توابع انتقالی شبیه پنجم (H5) برنامه‌ی رزتا از جمله بهترین توابع در تخمین منحنی رطوبتی می‌باشد.

اگرچه اهمیت تعیین منحنی رطوبتی در مطالعات مختلفی تایید شده (تسیامپوسی و همکاران، ۲۰۱۳؛ باگارلو و لووینو، ۲۰۱۲؛ عباسی و همکاران، ۲۰۱۱؛ والکزاک و همکاران، ۲۰۰۶؛ خلوسی و همکاران، ۲۰۰۶؛ مدیا و همکاران، ۲۰۰۲) و شبیه فیزیکی ون‌گنوختن به‌عنوان یک روش مناسب برای این مهم بیان گردیده است، اما همواره انتخاب یک روش مناسب برای تخمین ضرایب شبیه ون‌گنوختن به‌منظور براورد SWRC در بافتهای مختلف از اهداف مطالعات آب و خاک بوده است، بنابراین، پژوهش حاضر، با هدف مقایسه روش‌های حل معکوس، دونقطه‌ای، توابع انتقالی شبیه H5 رزتا و یک روش ترکیبی از روشهای دونقطه‌ای و شبیه H5 رزتا در براورد SWRC به‌کمک تعیین ضرایب شبیه ون‌گنوختن انجام گردید. همچنین، کارآیی این روشها نسبت به نوع و تعداد داده مورد نیاز در هر روش، برای بافتهای مختلف بررسی شد.

مواد و روشها

برای انجام این پژوهش از برخی ویژگیهای فیزیکی و هیدرولیکی ۷۰ نمونه خاک از پایگاه داده خاک غیر اشباع[2] (UNSODA) استفاده گردید. توزیع بافتی نمونه خاکهای مورد استفاده در این پژوهش، شامل سه گروه بافتی درشت، متوسط و ریز می‌باشد که در شکل (۱) نشان داده شده است. گروه بافتی درشت، دارای ۱۷ نمونه خاک از بافتهای شنی، متوسط شنی و شن میانه، گروه بافتی میانه شامل ۴۶ نمونه خاک با بافتهای میانه، لایی میانه، میانه رس شنی، لوم رسی و لایی، و گروه بافتی ریز در برگیرنده‌ی ۷ نمونه خاک با بافت رسی می‌باشد.

همچنین، برخی اطلاعات تکمیلی نمونه‌ی خاکهای مورد استفاده، مانند درصد اندازه‌ی ذرات، چگالی ظاهری، تخلخل و درصد ماده‌ی آلی به تفکیک گروه‌های بافتی در جدول (۱) آمده اند.

در این مطالعه برای براورد SWRC از شبیه ون‌گنوختن استفاده شد که شکل کلی آن به‌صورت زیر می‌باشد:

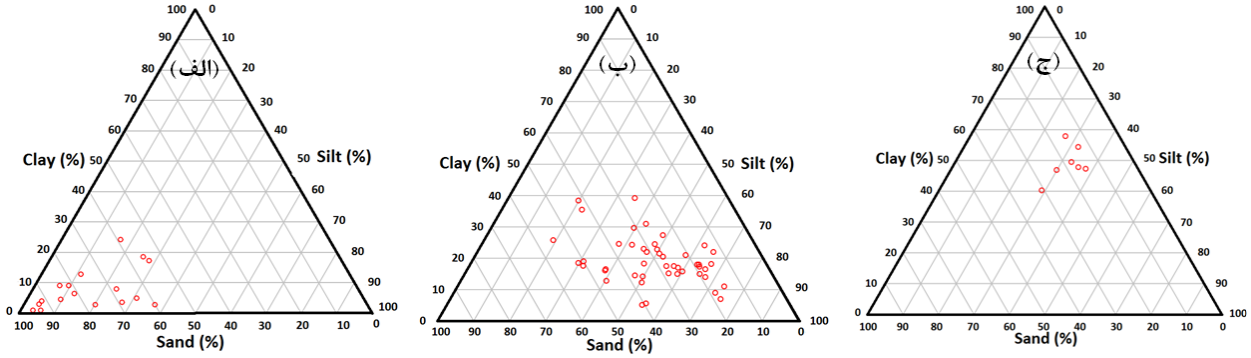
$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1+(\alpha h)^n)^m} \; ; m = 1 - 1/n \qquad (۱)$$

در آن θ_s و θ_r به‌ترتیب، میزان رطوبت اشباع و باقی‌مانده خاک بر حسب cm^3/cm^3 و فراسنجهای α، n و m، فراسنجهای تجربی می‌باشند. برای تخمین این ضرایب به‌منظور براورد SWRC، از چهار روش حل معکوس، توابع انتقالی شبیه H5 برنامه رزتا، دو نقطه‌ای و دونقطه‌ای-رزتا استفاده گردید. در روش حل معکوس، فراسنجهای شبیه ون‌گنوختن با استفاده از نرم‌افزار RETC، به‌گونه‌ای بهینه شد که اختلاف بین داده‌های اندازه‌گیری و تخمینی به‌عنوان یک تابع هدف حداقل شود. تابع هدف ($\varphi(q,b)$) مورد استفاده در این روش به‌صورت زیر می‌باشد:

$$\varphi(q,b) = \sum_{j=1}^{\beta} v_j \sum_{i=1}^{\gamma} w_{ij}[q_j^*(z,t_i) - q_j(z,t_i,b)]^2 \qquad (۲)$$

که در آن $b(\theta_r, \theta_s, \alpha, m, n)$ بردار عوامل مشخصه مجهول، $q_j^*(z,t_i)$ مقادیر اندازه‌گیری شده‌ی رطوبت در عمق z و زمان t_i، β و γ به‌ترتیب تعداد گروه داده اندازه‌گیری و تعداد قرائت داده‌ها برای هر گروه داده، v_j و w_{ij} نیز به‌ترتیب ضرایب وزنی برای قرائت iام و نوع داده اندازه‌گیری در گروه jام و قرائت iام است.

[1] United states department of agriculture
[2] Unsaturated Soil Database



شکل ۱- توزیع نمونه خاک‌های مورد مطالعه در مثلث بافت خاک برای گروه‌های بافتی درشت (الف)، میانه (ب) و ریز (ج).

جدول ۱. اطلاعات برخی از ویژگیهای فیزیکی نمونه خاک‌های مورد بررسی.

گروه بافتی		اندازه ذرات (درصد) رس	سیلت	شن	چگالی ظاهری (گرم بر سانتی‌متر مکعب)	تخلخل (درصد)	ماده آلی (درصد)
ریز	حداقل	۴۰/۳	۲۶/۹	۱۳/۳	۱/۰۳	۴۴/۵	۰/۵۰
	میانگین	۴۹/۰	۳۲/۱	۱۸/۸	۱/۲۲	۵۳/۲	۲/۴۶
	حداکثر	۵۷/۹	۳۷/۹	۳۰/۷	۱/۵۱	۶۲/۳	۴۰
میانه	حداقل	۵/۱	۱۹/۲	۱۲/۵	۰/۵۹	۳۵/۴	۰/۱۰
	میانگین	۱۹/۳	۵۰/۵	۳۰/۲	۱/۳۰	۵۱/۸	۲/۳۸
	حداکثر	۳۹/۲	۷۵/۰	۵۵/۰	۱/۷۲	۹۱/۵	۱۰/۳۰
درشت	حداقل	۱/۰	۳/۵	۵۴/۴	۱/۱۳	۳۴/۱	۰/۱۰
	میانگین	۷/۹	۱۶/۴	۷۵/۸	۱/۴۱	۴۶/۶	۱/۱۷
	حداکثر	۲۴/۳	۳۷/۲	۹۵/۵	۱/۷۶	۵۶/۷	۳/۳۰

روش دیگری که برای تخمین ضرایب معادله (۱) انتخاب شد، توابع انتقالی شبیه H5 برنامه‌ی رزتا بود. بر اساس مطالعه‌ی شاپ و همکاران (۲۰۰۱)، شبیه H5 نسبت به بقیه شبیه‌های برنامه از بیشترین دقت برای تخمین ویژگیهای هیدرولیکی خاک برخوردار می‌باشد؛ بنابراین، برای تخمین دقیقتر فراسنجهای رابطه‌ی ون‌گنوختن شبیه H5 استفاده گردید، که به شش فراسنج ورودی از قبیل، درصد شن، لایی، رس، چگالی ظاهری، مقادیر رطوبت در ظرفیت زراعی و نقطه‌ی پژمردگی نیاز دارد.

راهکار بعدی مورد استفاده، روش دو نقطه‌ای می‌باشد که بر اساس اطلاعات رطوبتی دو نقطه از SWRC عمل می‌کند، که در آن نقاط رطوبتی ظرفیت زراعی و پژمردگی دایم مورد استفاده قرار می گیرند. با فرض $\theta_r = 0$، استفاده از تخلخل معادل رطوبت اشباع (θ_s) و قرار دادن عبارت $n = 1/(1-m)$ در رابطه (۱)، شکل معادله ون‌گنوختن ساده‌تر خواهد شد. حال برای دو نقطه‌ی مذکور، معادلات به صورت زیر در آمده که فقط دو مجهول (α و m) خواهد داشت:

$$\theta_1 = \frac{\emptyset}{(1+(\alpha h_1)^{1/(1-m)})^m} \quad (۳)$$

$$\theta_2 = \frac{\emptyset}{(1+(\alpha h_2)^{1/(1-m)})^m} \quad (۴)$$

که در آن θ_1 مقدار رطوبت حجمی اندازه‌گیری (cm^3/cm^3) در مکش h_1 و θ_2 مقدار رطوبت حجمی اندازه‌گیری (cm^3/cm^3) در مکش h_2 می‌باشد.

زمانی‌که مقدار رطوبت اشباع یا مقدار تخلخل خاک مورد نظر، در دسترس نباشد، می‌توان مقادیر رطوبت اشباع به‌دست آمده به وسیله‌ی شبیه H5 برنامه‌ی رزتا را با کاربرد دونقطه‌ای جایگزین نمود. به‌علاوه، می‌توان مقدار رطوبت باقی‌مانده‌ی براورد شده به وسیله‌ی برنامه رزتا را جانشین مقدار رطوبت باقیمانده (صفر) در روش دو نقطه‌ای نمود تا به‌عنوان روش دو نقطه‌ای-رزتا مورد

بررسی و ارزیابی قرار گیرد. معادلات این روش به‌صورت زیر می‌باشند:

$$\theta_1 = \theta_{rR} + \frac{\theta_{sR} - \theta_{rR}}{(1 + (\alpha h_1)^{1/(1-m)})^m} \quad (۵)$$

$$\theta_2 = \theta_{rR} + \frac{\theta_{sR} - \theta_{rR}}{(1 + (\alpha h_2)^{1/(1-m)})^m} \quad (۶)$$

در معادلات فوق θ_{sR} و θ_{rR} به‌ترتیب مقادیر رطوبت اشباع و باقی‌مانده تخمین زده شده به وسیله‌ی برنامه‌ی رزتا با کاربرد cm^3/cm^3 می‌باشد.

از آن جا که جفت معادلات ۳ و ۴، ۵ و ۶ غیر خطی می‌باشند، با استفاده از افزونه سلور[1] اکسل، و با کمینه‌سازی مربعات خطا به‌عنوان تابع هدف، ضرایب مجهول جفت معادلات فوق (m ،α) حاصل خواهند شد.

به‌منظور مقایسه و ارزیابی دقت روشهای مورد استفاده در براورد SWRC از فراسنجهای آماری ضریب همبستگی[2] (R^2)، خطای میانگین مطلق باقیمانده[3] (MAE)، مجذور میانگین مربعات خطا[4] (RMSE)، ضریب آکائیک[5] (AIC) و بازده شبیه‌سازی[6] (EF) در قالب معادلات زیر استفاده گردید.

$$R^2 = \left(\sum_1^n O_i P_i\right)^2 / \left(\sum_1^n {O_i}^2 \sum_1^n {P_i}^2\right) \quad (۷)$$

$$MAE = \left(\sum_1^n |O_i - P_i|\right)/n \quad (۸)$$

$$RMSE = SQRT\left(\left(\sum_1^n (O_i - P_i)^2\right)/n\right) \quad (۹)$$

$$AIC = n * Ln\left(\frac{\sum_1^n (O_i - P_i)^2}{n}\right) + 2P_m \quad (۱۰)$$

$$EF = \left(\sum_1^n (O_i - \bar{O})^2 - \sum_1^n (P_i - O_i)^2\right) / \sum_1^n (O_i - \bar{O})^2 \quad (۱۱)$$

که در آنها: فراسنجهای O_i، P_i، $\bar{O}$، n و P_m به‌ترتیب مقادیر اندازه‌گیری، پیش‌بینی، میانگین مقادیر اندازه‌گیری رطوبت، تعداد اندازه‌گیریها و تعداد فراسنجهای شبیه مورد استفاده می‌باشند. بهترین مقادیر برای فراسنجهای MAE و RMSE، صفر و برای R^2 و EF، یک می‌باشد. همچنین، هر چه ضریب آکائیک (AIC) کوچکتر باشد، نشان از پیش‌بینی دقیق‌تر شبیه خواهد داشت.

بحث و نتایج

همان‌گونه که توزیع بافتی نمونه های، خاک در شکل (۱) نشان می‌دهد، سعی شد تا اکثر ردیفهای بافتی، مورد مطالعه قرار گیرند. بطوری‌که، تعداد نمونه خاک مورد بررسی، ۹ بافت از مجموع ۱۲ردیف بافتی را شامل شد، که نشان‌دهنده‌ی تنوع بافتی مناسب برای این پژوهش است. جدول (۲) دامنه‌ی تغییرات فراسنجهای θ_r، θ_S، α و m شبیه ون‌گنوختن با روشهای مختلف، را نشان می‌دهد. همان‌طور که از جدول (۲) ملاحظه می‌گردد، و در انگاره و عمل نیز همین گونه است، تغییرات فراسنجهای θ_r، θ_S و m بین صفر و یک، و دامنه‌ی تغییرات فراسنج α از صفر تا بی‌نهایت است؛ بنابراین، مطابق جدول فوق، انتظار می‌رود که انحراف معیار فراسنج α نسبت به بقیه فراسنجها بیشتر باشد. تغییرات زیاد این ضریب در روش دو نقطه‌ای، و حتی دونقطه ای-رزتا، گواه این مطلب است. به‌نظر می‌رسد که حذف رطوبت باقیمانده از شبیه، و استفاده از تخلخل به‌عنوان رطوبت اشباع (روابط ۳ و ۴)، موجب کاهش درجه‌ی آزادی روش دو نقطه‌ای شده که تغییرات زیادی را در میانگین و انحراف معیار فراسنج α به‌دنبال داشته است، در حالی‌که در روش ترکیبی دو نقطه‌ای-رزتا استفاده از ضریب θ_{rR} ، تغییرات بسیار کمتری را در فراسنج α موجب شده است. از آن جا که روش معکوس همانند برنامه‌ی رزتا تمامی ضرایب را تخمین می‌زند، بنابراین، درجه‌ی آزادی بیشتری را از لحاظ تعداد داده ورودی نسبت به دو روش دیگر خواهد داشت، که موجب شده است تا تغییرات در فراسنج α کمتر گردد. همچنین، فراسنج α در برنامه‌ی رزتا نسبت به بقیه روشها کمترین میانگین و انحراف معیار را داشته است. رمضانی و همکاران (۱۳۹۲) در این‌باره بیان کردند که محدود کردن تغییرات این ضریب در هنگام آموزش شبکه عصبی در برنامه‌ی رزتا، موجب ایجاد محدودیت این روش در تخمین ضرایب شبیه ون‌گنوختن شده است.

[1] Solver
[2] fitting appropriateness coefficient
[3] magnitude of absolute error
[4] root of mean squares of error
[5] Akaike information coefficient
[6] efficiency of modeling

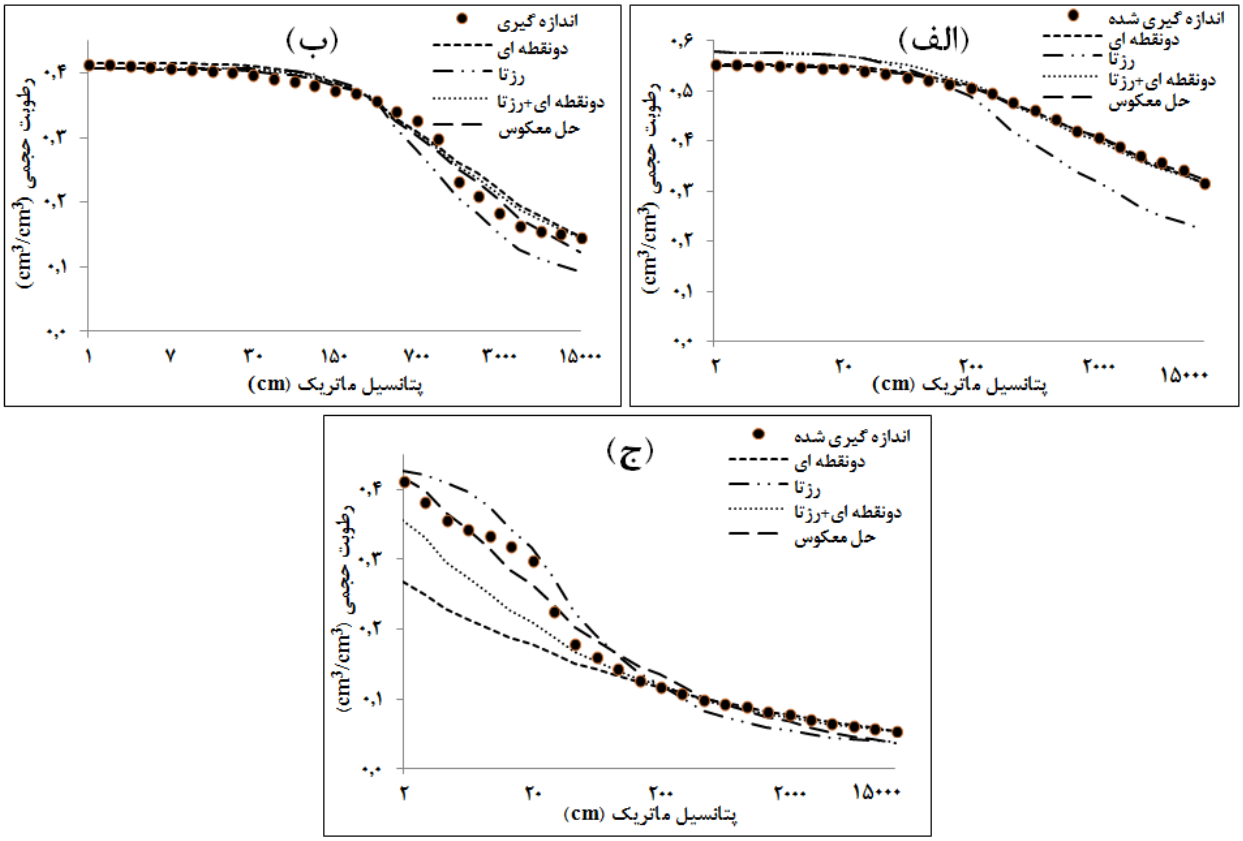
مقایسه روشهای مختلف شبیه‌سازی SWRC برای هر سه گروه بافتی در جدول (۳) آمده است. مطابق این جدول در گروه بافتی ریز مشاهده می‌شود که مقادیر فراسنجهای آماری R^2، MAE (cm^3/cm^3)،RMSE (cm^3/cm^3)، AIC و EF برای روش حل معکوس به‌ترتیب برابر با ۰/۹۹۹۷، ۰/۰۰۰۷، ۰/۰۰۳، ۱۱۱۶۱- و ۰/۹۹۶، برای روش دونقطه‌ای برابر ۰/۹۹۹۳، ۰/۰۰۱، ۰/۰۰۴، ۱۰۲۷۹- و ۰/۹۸۹؛ برای روش دو نقطه‌ای-رزتا برابر با ۰/۹۹۸؛ ۰/۰۰۱۷، ۰/۰۰۷، ۹۴۴۰- و ۰/۹۷۲ و برای برنامه رزتا برابر با ۰/۹۸۵، ۰/۰۰۶، ۰/۰۲، ۷۳۱۳- و ۰/۷۳۴ می‌باشند. بنابراین، روش معکوس از بالاترین دقت در تخمین SWRC در این گروه بافتی برخوردار بوده و روش دو نقطه‌ای با اختلاف خیلی اندک نسبت به روش معکوس با دقت زیادی توانسته است SWRC را شبیه‌سازی نماید. روش دونقطه‌ای-رزتا نیز از دقت نسبتا خوبی برخوردار می‌باشد، اما با توجه به نیاز به داده‌ی بیشتر و دقت پایینتر نسبت با کاربرد دو نقطه‌ای، استفاده آن در گروه بافتی ریز توصیه نمی‌شود، در این میان، برنامه‌ی رزتا پایینترین دقت را داشته است. برای تحلیل این نتایج، شکل (۲) مورد استفاده واقع گردید. در این شکل منحنیهای رطوبتی اندازه‌گیری شده و تخمین زده شده با روشهای مختلف برای سه نوع بافت (این سه بافت بطور تصادفی انتخاب گردیده اند) به‌عنوان نماینده‌ی سه گروه بافتی نشان داده شده است. شکل (الف-۲) SWRC یک نمونه خاک از گروه بافتی ریز را نشان می‌دهد. مطابق آن مشاهده می‌شود که منحنیهای تخمین زده شده با کاربردهای معکوس و دو نقطه‌ای بهترین تطبیق را با داده‌های واقعی دارند. در حالی‌که برنامه‌ی رزتا در تخمین رطوبت در مکشهای زیاد از دقت بسیار پایینی برخوردار بوده و مقادیر رطوبت را کمتر از مقدار واقعی تخمین زده است. برعکس، در مکشهای کم و نزدیک به نقطه‌ی اشباع، مقادیر رطوبت را بیشتر از مقدار واقعی براورد کرده است. بررسی روش دونقطه‌ای-رزتا در این حالت نیز نشان می‌دهد که اگرچه این روش در مکشهای زیاد موفق عمل نموده است، اما در مکشهای نزدیک به نقطه اشباع، با پیروی از روش رزتا، مقدار رطوبت را بیش از مقدار واقعی تخمین زده است. با توجه به این موضوع به‌نظر می‌رسد که تعیین دقیق نقطه، اشباع نسبت به نقطه پژمردگی دایم از اهمیت ویژه‌ای در روش دونقطه‌ای-رزتا برخوردار است.

بررسی روشهای مختلف تخمین SWRC برای بافتهای میانه در جدول (۳) نشان داده شده است، که در آن، مقادیر فراسنجهای آماری R^2، MAE (cm^3/cm^3)، RMSE (cm^3/cm^3)، AIC و EF برای روش حل معکوس به‌ترتیب برابر با ۰/۹۹۷، ۰/۰۰۸، ۰/۰۱۸، ۷۹۸۷- و ۰/۹۸۱؛ برای روش دو نقطه‌ای-رزتا برابر با ۰/۹۹، ۰/۰۱۵، ۰/۰۳۸، ۶۶۱۸- و ۰/۹۱۹؛ برای روش دونقطه‌ای برابر با ۰/۹۸۸، ۰/۰۱۶، ۰/۰۴۳، ۶۳۷۹- و ۰/۸۹۵؛ و در برنامه‌ی رزتا برابر با ۰/۹۸۲، ۰/۰۲۵، ۰/۰۵۳، ۵۹۷۴- و ۰/۸۴ می‌باشند. بنابراین، بعد از روش معکوس، روش دونقطه‌ای-رزتا از بالاترین دقت برخوردار بوده است. روش دو نقطه‌ای با اختلاف بسیار اندک نسبت به آن در جایگاه بعدی قرار گرفته، و برنامه‌ی رزتا نیز کمترین دقت را در تخمین SWRC داشته است. با این حال، مشخص است که اختلاف روشها در این گروه بافتی بسیار اندک است. شکل (ب-۲) که منحنی رطوبتی یک نمونه خاک از گروه بافتی میانه را نشان می‌دهد، به‌وضوح این مطلب را بیان می‌کند. در این شکل مشاهده می‌شود که تمامی روشها از دقت مناسبی در تخمین SWRC برخوردار می‌باشند، با این حال برنامه‌ی رزتا مقدار رطوبت در مکشهای زیاد را با اختلاف کمی نسبت به مقدار واقعی براورد کرده است.

بررسی دقت روشهای مختلف تخمین SWRC برای گروه بافتی درشت در جدول (۳) نشان می‌دهد که مقادیر فراسنجهای آماری R^2، MAE (cm^3/cm^3)، RMSE (cm^3/cm^3)، AIC و EF در روش حل معکوس به‌ترتیب برابر با ۰/۹۹۱، ۰/۰۰۴، ۰/۰۲۸، ۸۰۴۰- و ۰/۹۶۷؛ در برنامه‌ی رزتا برابر ۰/۹۵۷، ۰/۰۰۸، ۰/۰۶، ۶۵۸۷- و ۰/۸۴۶، در روش دو نقطه‌ای-رزتا برابر با ۰/۹۳۹، ۰/۰۰۹، ۰/۰۷۱، ۶۲۶۷- و ۰/۷۸۳ و در روش دونقطه‌ای برابر با ۰/۹۳۳، ۰/۰۱، ۰/۰۷۶، ۶۱۴۴- و ۰/۷۵۳؛ می‌باشند. با توجه به فراسنجهای آماری، بعد از روش معکوس، برنامه‌ی رزتا از بالاترین دقت در تخمین این منحنی برخوردار بوده و روش دو نقطه‌ای کمترین دقت را در این گروه بافتی داشته است. با مراجعه به شکل (ج-۲) مشاهده می‌شود که تمامی روشها در مکشهای زیاد از دقت مناسبی در تخمین

SWRC برخوردار می‌باشند اما در مکشهای نزدیک به نقطه‌ی اشباع، روش دو نقطه‌ای و پس از آن روش دونقطه ای-رزتا نتوانسته اند منحنی مذکور را به خوبی شبیه سازی کنند، در حالی که استفاده از برنامه‌ی رزتا نتایج قابل قبولتری را نسبت به این دو روش ارائه نموده است.

نتایج مقایسه کلی روشهای مختلف تخمین رطوبت در جدول (۳) نشان داده شده است. در این روش مقایسه‌ی تخمین رطوبت در مکشهای مختلف، در تمامی بافتها بدون گروه‌بندی با روش‌های مختلف صورت گرفته است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، تمامی فراسنجهای ارزیابی، نشان از برتری روش حل معکوس در تخمین رطوبت دارند، زیرا بدون استثنا بیشترین مقادیر R^2 و EF و کمترین مقادیر MAE، RMSE و AIC را به خود اختصاص داده است. بعد از روش معکوس، روش دونقطه‌ای-رزتا سپس روش دونقطه‌ای با اختلاف کم با آن از بالاترین دقت برخوردار بودند در حالی که استفاده از برنامه‌ی رزتا برای براورد رطوبت کمترین دقت را داشته است؛ بنابراین، توصیه می‌شود از آن جا که روش حل معکوس به داده‌های بیشتری نیاز دارد، در صورت نبودن این داده‌ها، از روش دو نقطه‌ای-رزتا و دو نقطه‌ای استفاده شود. رمضانی و همکاران (۱۳۹۲) نیز بیان کردند که روش دو نقطه‌ای توانسته است با دقت بسیار بالاتری نسبت به برنامه‌ی رزتا، SWRC را براورد کند.



شکل ۲- مقایسه منحنی‌های رطوبتی اندازه‌گیری شده و تخمین زده شده با روش‌های مختلف برای گروه بافتی ریز (الف)، میانه (ب) و درشت (ج).

جدول ۲- دامنه تغییرات فراسنجهای شبیه ون‌گنوختن در روش‌های مختلف.

فراسنج	روش	حداقل	میانگین	حداکثر	انحراف از معیار
θ_r	معکوس	۰/۰۰۰	۰/۰۱۰	۰/۱۷۱	۰/۰۳۲
	دونقطه	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰
	رزتا	۰/۰۲۱	۰/۰۶۶	۰/۶۸	۰/۰۷۸
	ترکیبی دو نقطه‌ای-رزتا	۰/۰۲۱	۰/۰۶۶	۰/۶۸	۰/۰۷۸
θ_S	معکوس	۰/۳۴۴	۰/۴۸۷	۰/۸۳۷	۰/۰۹۸
	دونقطه	۰/۳۴۱	۰/۵۰۷	۰/۹۱۵	۰/۱۰۴
	رزتا	۰/۳۳۳	۰/۴۵۱	۰/۶۶	۰/۰۷۴
	ترکیبی دو نقطه‌ای-رزتا	۰/۳۳۳	۰/۴۵۱	۰/۶۶	۰/۰۷۴
α	معکوس	۰/۰۰۱	۰/۰۸۵	۰/۷۴۱	۰/۱۴۶
	دونقطه	۰/۰۰۱	۱۳۸۸۳۵۱	۹۷۱۸۲۷۶۳	۱۱۶۱۵۵۵۹
	رزتا	۰/۰۰۱	۰/۰۱۶	۰/۰۶۸	۰/۰۱۸
	دو نقطه‌ای-رزتا	۰/۰۰۲	۰/۷۱۷	۴۷/۷۱۸	۵/۷۰۰
m	معکوس	۰/۰۳۸	۰/۱۸۷	۰/۵۴۲	۰/۱۰۱
	دونقطه	۰/۰۴۸	۰/۱۷۸	۰/۳۸۰	۰/۰۶۴
	رزتا	۰/۱۰۷	۰/۳۱۴	۰/۶۰۸	۰/۱۰۷
	دو نقطه‌ای-رزتا	۰/۰۶۶	۰/۲۴۶	۰/۷۸۲	۰/۱۱۳

جدول ۳- مقایسه روش‌های مختلف براورد منحنی رطوبتی برای هر گروه بافتی.

گروه	روش	فراسنجهای ارزیابی				
		R^2	MAE (cm^3/cm^3)	RMSE (cm^3/cm^3)	AIC	EF
بافت ریز	معکوس	۰/۹۹۹۷	۰/۰۰۰۷	۰/۰۰۳	-۱۱۱۶۱	۰/۹۹۶
	دونقطه	۰/۹۹۹۳	۰/۰۰۱	۰/۰۰۴	-۱۰۲۷۹	۰/۹۸۹
	رزتا	۰/۹۸۵	۰/۰۰۶	۰/۰۲۰	-۷۳۱۳	۰/۷۳۴
	دو نقطه‌ای-رزتا	۰/۹۹۸	۰/۰۰۱۷	۰/۰۰۷	-۹۴۴۰	۰/۹۷۲
بافت میانه	معکوس	۰/۹۹۷	۰/۰۰۸	۰/۰۱۸	-۷۹۸۷	۰/۹۸۱
	دونقطه	۰/۹۸۸	۰/۰۱۶	۰/۰۴۳	-۶۳۷۹	۰/۸۹۵
	رزتا	۰/۹۸۲	۰/۰۲۵	۰/۰۵۳	-۵۹۷۴	۰/۸۴۰
	دو نقطه‌ای-رزتا	۰/۹۹۰	۰/۰۱۵	۰/۰۳۸	-۶۶۱۸	۰/۹۱۹
بافت درشت	معکوس	۰/۹۹۱	۰/۰۰۴	۰/۰۲۸	-۸۰۴۰	۰/۹۶۷
	دونقطه	۰/۹۳۳	۰/۰۱۰	۰/۰۷۶	-۶۱۴۴	۰/۷۵۳
	رزتا	۰/۹۵۷	۰/۰۰۸	۰/۰۶۰	-۶۵۸۷	۰/۸۴۶
	دو نقطه‌ای-رزتا	۰/۹۳۹	۰/۰۰۹	۰/۰۷۱	-۶۲۶۷	۰/۷۸۳
مقایسه کلی (تمامی بافت‌ها)	معکوس	۰/۹۹۷	۰/۰۱۳	۰/۰۲۰	-۷۳۴۴	۰/۹۸۱
	دونقطه	۰/۹۸۰	۰/۰۲۷	۰/۰۵۱	-۵۵۹۵	۰/۸۷۹
	رزتا	۰/۹۷۸	۰/۰۳۹	۰/۰۵۵	-۵۴۴۰	۰/۸۵۹
	دو نقطه‌ای-رزتا	۰/۹۸۳	۰/۰۲۶	۰/۰۴۷	-۵۷۵۴	۰/۸۹۸

نکته‌ی قابل توجه دیگری که در جدول (۳) به چشم می‌خورد دقت بالاتر تمامی روشها در گروه بافتی ریز نسبت به گروه بافتی درشت در براورد SWRC می‌باشد. دلیل آن را می‌توان در شکل منحنی رطوبتی انواع بافتها جستجو کرد. در واقع، شیب منحنی رطوبتی در خاکهای رسی، به‌دلیل توزیع یکنواخت‌تر خلل و فرج و جذب سطحی بیشتر رطوبت خاک، ملایمتر و شکل آن ساده‌تر می‌باشد. این موضوع موجب شده است تا اکثر روشها دقت

قابل قبولی را در براورد SWRC داشته باشند. اما در خاکهای شنی، به‌دلیل وجود خلل و فرج درشت، در مکش معینی رطوبت زیادی به‌یک‌باره تخلیه گردیده، که موجب تندتر شدن شیب منحنی مشخصه می‌شود. بنابراین، منحنی این دسته بافتها به شکل S نزدیک شده و دقت روشها در براورد SWRC، بویژه در مکشهای نزدیک نقطه اشباع، کمتر می‌گردد (شکل ج-۲).

در تحلیل و مقایسه‌ی روشهای مختلف تعیین SWRC می‌توان بیان داشت که روشهای بررسی شده‌ی حل معکوس، دو نقطه‌ای و دو نقطه‌ای-رزتا ماهیتی ریاضی-فیزیکی دارند. از آن جا که روش معکوس از تمامی داده‌های اندازه‌گیری شده برای تخمین SWRC استفاده می‌کند، دور از انتظار نیست که کمترین میزان خطا را در براورد SWRC داشته باشد. اما بر عکس روشهای دو نقطه‌ای و دو نقطه ای-رزتا فقط از دو نقطه از SWRC استفاده می‌کنند که به‌تبع نسبت به حل معکوس از دقت کمتری برخوردار خواهند بود. به‌علاوه، این دو روش در هر بافت، فقط دو مجهول دارند، بنابراین، هر چه شکل SWRC به سمت خطی شدن میل کند، دقت این روشها بالاتر خواهد رفت (بافتهای رسی)، و بر عکس هر چه SWRC به شکل S نزدیکتر گردد (گروه بافتی درشت) از میزان دقت آنها در براورد SWRC کاسته خواهد شد. در طرف دیگر، برنامه‌ی رزتا از لحاظ ساختاری با بقیه روشها متفاوت است، زیرا ماهیت شبکه عصبی داشته و بر اساس برخی از ویژگیهای فیزیکی و هیدرولیکی بانک اطلاعاتی USDA ایجاد گردیده است. عملکرد متفاوت برنامه‌ی رزتا برای تعیین SWRC در بافت‌های مختلف را می‌توان با توجه به مطالب زیر توجیه نمود. در بین عوامل موثر بر منحنی رطوبتی، بافت خاک تعیین کننده میزان رطوبت در مکشهای زیاد است (میرزاخانی، ۱۳۸۲). همچنین، ساختمان خاک تعیین کننده میزان رطوبت در مکشهای کم می‌باشد (بای‌بوردی، ۱۳۸۳) و هر چه میزان ماده آلی و مقدار رس خاک کمتر باشد پایداری آن کمتر می‌شود (تاجیک، ۱۳۸۳). در بافتهای سبک، به‌علت میزان کم رس و تجزیه‌ی سریعتر مواد آلی (صفادوست، ۱۳۹۲) اثرات این عوامل در ساختمان و به پیرو آن در SWRC کمتر می‌شود. وجود این شرایط موجب شده است تا داده‌های ورودی شبیه H5 برنامه‌ی رزتا، برای براورد SWRC در بافت‌های درشت کافی بوده و این برنامه توانسته باشد دقت قابل قبولی را در این گونه بافتها به‌منظور تخمین SWRC ارائه کند. اما در بافت‌های ریز اثرات عواملی مثل، میزان ماده‌ی آلی، در ساختمان خاک، و به‌تبع آن SWRC افزایش می‌یابد، که حتی اثرات آن از اثر مقدار رس در ساختمان خاک نیز بیشتر است (نیکپور و همکاران، ۱۳۹۰). حال نبود ماده‌ی آلی به‌عنوان یک فراسنج ورودی در برنامه رزتا، موجب شده است تا مقدار رطوبت براورد شده با کاربرد این روش در مکشهای زیاد، بویژه برای بافتهای ریز کمتر از مقدار واقعی براورد گردد، به‌خصوص این که مقدار ماده‌ی آلی در مطالعه مزبور بین ۰/۱ تا ۱۰/۳ درصد، برای گروه بافتی ریز و میانه متغیر بوده است. این مطلب در شبیه آبشناسی[1] ساکستون و رائولز (۲۰۰۶) نیز به چشم می‌خورد. طبق این شبیه در بافتهای رسی با افزایش ماده‌ی آلی، مقادیر رطوبت در مکشهای زیاد نسبت به مکشهای نزدیک نقطه‌ی ظرفیت زراعی، بیشتر افزایش می‌یابد. رمضانی و همکاران (۱۳۹۰) عدم استفاده از ماده‌ی آلی را در شبیه رزتا به‌عنوان یک منبع ایجاد خطا در تخمین ضرایب شبیه ون‌گنوختن برشمردند. امامی و آستارایی (۲۰۱۲) نیز بیان کردند که مواد آلی از عوامل مهم در تغییر ضرایب شبیه ون‌گنوختن می‌باشند که θ_r و θ_S را افزایش داده و ضریب α را کاهش می‌دهد. همچنین، شاپ و همکاران (۲۰۰۱) در مطالعه‌ی خود بیان کرده بودند که برنامه‌ی رزتا مقدار رطوبت را کمتر از مقدار واقعی براورد می‌کند.

نتیجه گیری

در این پژوهش، روشهای مختلف تعیین ضرایب شبیه ون‌گنوختن به‌منظور تخمین SWRC مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفتند. نتایج نشان دادند که روش حل معکوس از بیشترین دقت برای تمامی بافتها در تخمین ضرایب شبیه ون‌گنوختن و SWRC برخوردار بوده، اما به تعداد نقاط کافی (حداقل سه نقطه) از SWRC احتیاج دارد، که استفاده‌ی محدودتر از آن را در تخمین SWRC به‌دنبال خواهد داشت. پس از این روش، استفاده از برنامه-

[1] SPAW hydrology

ی رزتا برای گروه بافتی درشت پیشنهاد گردید؛ زیرا عوامل موثر و شدت تاثیر آنها بر SWRC، در این گونه بافتها نسبت به بافتهای سنگینتر کمتر بوده و به‌پیرو این امر به‌نظر می‌رسد داده‌های مورد استفاده در برنامه‌ی رزتا توانایی تخمین مناسب SWRC را داشته باشند. از طرف دیگر، در بافتهای درشت تغییرات رطوبت با مکش زیاد بوده و منحنی حالت S شکل به‌خود می‌گیرد، که روشهای ریاضی دونقطه‌ای و دونقطه‌ای-رزتا با توجه به درجه‌ی آزادی کمشان نتوانسته‌اند دقت خوبی را در تخمین SWRC در این شرایط داشته باشند. اما در بافتهای سنگینتر، عوامل موثر بر منحنی و شدت تاثیر آنها بیشتر شده، که امر موجب گردیده تا در مکشهای کم، که مقدار نگهداشت رطوبت به ویژگیهای ساختمانی خاکها مربوط می‌شود، برنامه‌ی رزتا عملکرد پایینتری را از خود نشان داده، و برای این گونه خاکها توصیه نگردد. به‌نظر می‌رسد که برای استفاده از برنامه‌ی رزتا در خاکهای سنگینتر، نیاز به این است که عوامل دیگری از قبیل ماده‌ی آلی نیز به این شبیه اضافه گردد. در صورتی که در این گونه خاکها شکل منحنی با خروج از حالت S شکل، یکنواختتر شده، و این امر باعث شده است تا روش دو نقطه‌ای-رزتا برای گروه بافتی میانه، و روش دونقطه‌ای برای گروه بافتی ریز، عملکرد بهتری را از خود نشان داده و برای این گونه خاکها پیشنهاد گردند.

منابع

۱. بای‌بوردی م، ۱۳۸۳. اصول مهندسی آبیاری (جلد اول). انتشارات دانشگاه تهران. چاپ هشتم. ۶۷۲ ص.

۲. تاجیک ف، ۱۳۸۳. ارزیابی پایداری خاکدانه‌ها در برخی مناطق ایران. علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی. ۸(۱): ۱۰۷-۱۲۲

۳. جعفری گیلانده، ص.، ع. رسول‌زاده. و ح، خداوردیلو. ۱۳۹۲. ارزیابی برخی توابع انتقالی برای شبیه‌سازی جریان غیرماندگار آب در خاک. نشریه حفاظت منابع آب و خاک. ۲(۴): ۱-۱۳

۴. حق‌وردی، ا، ب، قهرمان. م، جلینی. ع.ا. خشنودی یزدی. و ز، عربی. ۱۳۹۰. مقایسه روش های مختلف هوش مصنوعی در شبیه سازی منحنی مشخصه رطوبتی خاک (مطالعه موردی :شمال و شمال شرق ایران). مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک. ۱۸(۲): ۶۵-۸۴

۵. خالق‌پناه، ن، م، شرفا. و س، تیموری. ۱۳۹۱. تخمین منحنی رطوبتی تعدادی از خاک‌های شور و شور و سدیمی با استفاده از توابع انتقالی. مجله پژوهش‌های خاک (علوم خاک و آب). ۲۶(۴): ۳۹۱-۴۰۲

۶. رمضانی، م.، ش، صالحی‌خشکرودی. و ع، لیاقت. ۱۳۹۲. برآورد منحنی مشخصه رطوبتی خاک با استفاده از اندازه‌گیری دو نقطه‌ای. مجله پژوهش آب در کشاورزی، ۲۷(۳): ۳۳۷-۳۴۶

۷. رمضانی، م.، ب، قنبریان علویجه. ع، لیاقت. و ش.ص. خشکرودی. ۱۳۹۰. برآورد توابع انتقالی به منظور تخمین منجنی مشخصه رطوبتی خاک‌های شور و شور-سدیمی. مجله آب و آبیاری. ۱(۱): ۹۹-۱۱۰

۸. صفادوست، آ، ۱۳۹۲. اثر مدیریت زراعی و بافت خاک بر برخی ویژگی‌های ساختمانی خاک. مجله پژوهش‌های خاک (علوم خاک و آب). ۲۷(۳): ۳۲۷-۳۳۴

۹. عباسی، ف، ۱۳۸۶. فیزیک خاک پیشرفته. انتشارات دانشگاه تهران. چاپ اول. ۲۵۰ ص.

۱۰. فولادمند، ح.ر. ۱۳۹۳. تخمین منحنی مشخصه‌ی آب خاک بر مبنای منحنی دانه‌بندی و نسبت پوکی متغیر برای خاکهای موردد مطالعه در منطقه مرودشت در استان فارس. مجله مهندسی منابع آب. ۷(۲۱): ۲۷-۳۶

۱۱. فولادمند، ح.ر و س، هادی‌پور. ۱۳۹۰. ارزیابی توابع انتقالی فراسنجیک برای تخمین منحنی مشخصه آب خاک در استان فارس. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی. علوم آب و خاک. سال پانزدهم. ۵۸: ۲۵-۳۷

۱۲. قنبریان علویجه، ب. و ع. لیاقت، ۱۳۹۰. ارزیابی توابع انتقالی و تاثیر ماده آلی در پیش بینی رطوبت اشباع خاک. نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، ۲۵(۵): ۱۰۱۶-۱۰۲۴

۱۳. میرزاخانی، ر، ۱۳۸۲. آشنایی با فیزیک خاک. مرکز نشر دانشگاهی. چاپ اول. ۳۸۷ ص.

۱۴.نیکپور، م، ع.ا، محبوبی. م.ر. مصدقی. و آ، صفادوست. ۱۳۹۰. بررسی اثر ویژگی‌های ذاتی خاک بـر پایـداری ساختمان برخی از خاک‌های اسـتان همـدان. مجلـه علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعـی، علـوم آب و خاک. سال پانزدهم. ۵۸: ۸۵-۹۶

15. Abbasi, Y., B. Ghanbarian-Alavijeh. A.M. Liaghat and M. Shorafa, 2011. Evaluation of pedotransfer functions for estimating soil water retention curve of saline and saline-alkali soils of Iran. Pedosphere 21(2): 230-237
16. Bagarello, V., and M. Lovino. 2012. Testing the BEST procedure to estimate the soil water retention curve. Geoderma, 187-188: 67-76
17. Cornelis, W.M., J. Ronsyn. M. Van Meirvenne. and R. Hartmann. 2001. Evaluation of pedotransfer functions for predicting the soil moisture retention curve. Soil Sci. Soc. Am. J. 65: 638-648
18. Cresswell, H.P. and Z. Paydar. 1996. Water retention in Australian soils. I. Description and prediction using parametric functions. Aust. J Soil Res, 34:195–212
19. Emami, H., and A.R. Astaraei. 2012. Effect of organic and inorganic amendments on parameters of water retention curve, bulk density and aggregate diameter of a saline-sodic Soil. J. Agr. Sci. Tech. 14: 1625-1636
20. Gupta, SC., and W.E. Larson 1979. Estimating soil water retention characteristics from particle size distribution, organic matter percent and bulk density. Water Res. Res. 15: 1633-1635
21. Khlosi, M., W.M., Cornelis. D. Gabriels. and G. Sin. 2006. Simple modification to describe the soil water retention curve between saturation and oven dryness. Water Resour Res, 42:1-5.
22. Lambot, S., M, Javaux. F, Hupet. and M. Vanclooster. 2002. A global multilevel coordinate search procedure for estimating the unsaturated soil hydraulic properties. Water Resour. Res., 38: 1224, doi: 10. 1029/ 2001 WR 001224
23. Malaya, C., and S. Sreedeep. 2012. Critical review on the parameters influencing soil-water characteristic curve. J Irri and Drain Eng. 138: 55-62
24. Media, H., M, Tarawally. A. del Valle. and M. E. Ruiz. 2002. Estimating soil water retention curve in rhodic ferralsols from basic soil data. Geoderma 108: 277-285.
25. Pan, L., and L. Wu. 1999. Inverse estimation of hydraulic parameters by using simulated annealing and downhill simplex method. In Proc Int. Workshop on Characterization and Measurements of the Hydraulic Properties of Unsaturated Porous Media, Eds. M.Th. van Genuchten, F. Leij, and L. Wu, pp. 769-782, Univ. Calif., Riverside
26. Rajkai, K., S. Kabos. and M.Th. van Genuchten, 2004. Estimating the water retention curve from soil properties: comparison of linear, nonlinear and concomitant variable methods. Soil & Tillage Research, 79:145–152
27. Ritter, A., F, Hupet. R, Munoz-Carpena. S, Lambot. and M. Vanclooster. 2003. Using inverse methods for estimating soil hydraulic properties from field data as an alternative to direct methods. Agric. Water Manage. 59: 77-96
28. Saxton, K.E. and W.J. Rawls. 2006. Soil water characteristic Estimates by texture and organic matter for hydrologic Solution. Soil Sci. Soc. Am. J. 70:1569-11578
29. Schaap, M.G, F. J. Leij. and M.Th. van-Genuchten, 2001. Rosetta: A computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions. J Hydrol, 251:163-176
30. Tsiampousi, A., L. Zdravkovic. and D.M. Potts 2013. A three-dimensional

hysteretic soil-water retention curve. Geotechnique 63: 155-164

31. Van Genuchten M.Th., F.J, Leij and S.R. Yates 1991. The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils. EPA/600/2-91/065, US Salinity Laboratory, USDA-ARS, Riverside, CA.
32. Vereecken, H., J, Feyen. J. Maes and P. Darius. 1989 Estimating the soil moisture retention characteristic from texture, bulk density, and carbon content. Soil Sci. 148: 389-403.
33. Vrugt, J.A., H.V, Gupta. W. Bouten. and S. Sorooshian. 2003. A shuffled complex evolution metropolis algorithm for optimization and uncertainty assessment of hydrologic model parameters. Water Resour. Res. 39, 1201, doi:10.1029/2002WR001642
34. Walczak, R.T., F, Moreno. C, Slawinskia, E. Fernandez. and Arrue JL. 2006. Modeling of soil water retention curve using soil solid phase parameters. J. Hydrol. 329: 527-533.
35. Wang, G., Y. Zhang. and N. Yu. 2012. Prediction of soil water retention and available water of sandy soils using pedotransfer functions. Procedia Eng. 37: 49–53.
36. Zachmann, D.W., P. C. DuChateau, and A. Klute, 1981. The calibration of the Richards flow equation for a draining column by parameter identification. Soil Sci. Soc. Am. J., 45: 1012-1016