

مدل سازی برآورد رطوبت ظرفیت زراعی در خاک‌های مختلف مناطق نیمه خشک

امید شیخ‌اسماعیلی^{۱*}، عبدعلی ناصری^۲، هادی معاضد^۳، فریبرز عباسی^۴ و خلیل ازدری^۵

۱- نویسنده مسئول، دانشجوی دکتری آبیاری و زهکشی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز

۲- استاد گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز

۳- استاد گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز

۴- رئیس و عضو هیئت علمی مرکز تحقیقات کشاورزی آب و خاک کرج

۵- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شاهرود

تاریخ پذیرش: ۹۴/۱۰/۱۳

تاریخ دریافت: ۹۴/۱/۲۲

چکیده

مدل سازی جریان آب در ناحیه غیراشباع محیط‌های متخلخل نیازمند آگاهی از برخی خصوصیات هیدرولیکی خاک نظیر منحنی نگهداشت آب و ظرفیت نگهداری آب در خاک است. تخمین غیرمستقیم این ویژگی‌ها بر پایه مشخصات زود یافت خاک در قالب توابع انتقالی به عنوان راه حلی کم هزینه و سریع در آبیاری و زهکشی بسیار مفید و پرکاربرد شده است. این تحقیق با هدف ارائه تابع انتقالی مناسب از طریق مدل سازی ریاضی برای برآورد رطوبت ظرفیت زراعی خاک‌های استان خوزستان در شرایط آزمایشگاهی و مزرعه انجام پذیرفت. به منظور رصد وضعیت رطوبتی خاک‌ها در هر دو مدل فیزیکی و مزرعه آزمایشی اقدام به کارگذاری حسگرهای دفنی دستگاه انعکاس سنجی زمانی امواج در اعماق مختلف و انجام آبیاری قطره‌ای از نوع نقطه‌ای-سطحی با دبی چهار لیتر در ساعت شد. سپس، ویژگی‌های فیزیکی خاک همراه با مقادیر رطوبت در مکش‌های معین برای تعیین پارامترهای هیدرولیکی مدل رطوبتی ون گنوختن- معلم به کمک نرم افزار RETC اندازه‌گیری شد. نتایج این پژوهش در ارزیابی عملکرد چندین نوع تابع انتقالی نقطه‌ای معروف نشان داد که مدل‌های نیمه تجربی متکی بر اصول فیزیکی که در سطح مزرعه مورد آزمایش قرار گرفته‌اند، می‌تواند جایگزینی مناسب برای روش‌های سنتی تخمین رطوبت ظرفیت زراعی باشد؛ به طوری که، تابع انتقالی توارکاوی و همکاران با آماره‌های ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده (۳/۱ درصد) و خطای استاندارد (۰/۵ درصد) توانست رطوبت ظرفیت زراعی را با دقت بسیار خوبی نسبت به دو روش شبکه عصبی رزتا یا رابطه دکستر برآورد نماید. بر این اساس، به منظور بهبود دقت برآورد رطوبت ظرفیت زراعی، دو تابع انتقالی در قالب روابط رگرسیونی بر پایه پارامترهای مدل ون گنوختن و نیز متغیرهای زود یافت خاک برای منطقه نیمه خشک استان خوزستان پیشنهاد شده است. نتایج توابع انتقالی حاصله به وضوح اثر منفی تراکم خاک و میزان شن را بر رطوبت ظرفیت زراعی نشان داد. بر عکس، میزان رس و سیلت به طور معنی‌دار دارای تأثیر مثبت و افزایشی بر رطوبت ظرفیت زراعی داشت.

کلید واژه‌ها: بافت خاک، تابع انتقالی، مدل نیمه تجربی، منحنی رطوبتی خاک.

Modeling for Estimation of the Field Capacity Moisture of Different Soils in Semi-arid Area

O. Shekhesmaeili^{1*}, A. A. Naseri², H. Moazed³, F. Abbasi⁴ and K. Azhdari⁵

1* - Ph.D Student in Irrigation and Drainage, Water Sciences Engineering Faculty, Shahid Chamran University of Ahvaz.

2-Professor of Water Sciences Engineering Faculty, Shahid Chamran University of Ahvaz.

3- Professor of Water Sciences Engineering Faculty, Shahid Chamran University of Ahvaz.

4-Professor of Irrigation Engineering, Chief of Agricultural Engineering Research Institute (AERI).

5-Associate professor of Irrigation and Drainage Engineering of Shahrood University.

Received: 11 April 2015

Accepted: 3 January 2016

Abstract

Modeling of water flow through vadose zone under unsaturated conditions necessitates the knowledge of soil hydraulic properties, which are water retention curve and water field capacity of soil. Indirect prediction of these characteristics based on readily available soil properties in the form of pedotransfer functions (PTFs) as a fast and low-cost solution has been widely practiced and very useful in irrigation and drainage. This study aimed to present the proper PTFs using mathematical modelling for estimating soil moisture at point of field capacity for Khuzestan province soils under laboratory and field conditions. The buried probes of the time domain reflectometry device (TDR) were inserted at various depths in order to monitor soil moisture conditions in both the physical model and experimental field under a surface-point source drip irrigation with discharge rates of 4 lph. Then, physical soil properties and soil water contents at their specific matric potentials were measured to calculate the hydraulic parameters of Van Genuchten-Mualem model with the RETC program. The results of this research to evaluate the performance of several well-known Point-PTFs showed that quasi-empirical models based on physical principles that have been tested in the field can be a good alternative to traditional methods for estimating water field capacity of soil. So that, the PTF of Twarakavi et al. could carefully predict that water field capacity of soil with indices of normalized root mean square error (3.1 percent) and standard error (0.5 percent) and more accurate than Rosetta artificial neural network approach or Dexter equation. Accordingly, another two PTFs were proposed to improve the accuracy of the water field capacity prediction in the form of regression equations on the basis of the parameters of Van Genuchten model and readily available soil properties for the semi-arid region of Khuzestan province. Results of obtained PTFs showed clearly negative effects of soil compaction and the amount of sand on the water field capacity of soil. On the contrary, the amount of clay and silt had positive and increasing effects on the water field capacity of soil, significantly.

Keywords: Soil texture, Pedotransfer function, Semi-empirical model, Soil moisture curve.

خصوصیات فیزیکی و بعضاً برخی شاخص‌های کیفی در منحنی مشخصه رطوبتی خاک‌ها قابل بررسی و ارزیابی است. بنابراین، برآورد دقیق منحنی‌های مشخصه رطوبتی و هدایت هیدرولیکی برای بافت خاک مورد مطالعه در منطقه می‌تواند نقشی بسیار مهم و کلیدی در مدل‌سازی حرکت آب و املاح در محیط‌های متخلخل ایفا نماید (کالسیو و همکاران^۵، ۲۰۱۱). به عبارت دیگر، اهمیت فراوان این منحنی‌ها در آبیاری و زهکشی به خاطر تبیین تأثیر ساختمان خاک، تخلخل، توزیع اندازه خلل و فرج و جذب سطحی بر وضعیت رطوبتی خاک است (رایینز و ویگانند^۶، ۱۹۹۰). اولین اصطلاح تعریف شده برای رطوبت خاک توسط بریگز و مک‌لین^۷ (۱۹۱۰) با عنوان "رطوبت معادل"^۸، شامل "مقدار رطوبت باقیمانده در خاک اشباع (بر حسب درصد)، پس از ۳۰ دقیقه چرخش در سانتیفیوژی با نیروی گریز از مرکز ۱۰۰۰ برابر گرانش ثقل زمین" ارائه شد. لکن، محققین به دلیل کاربردی نبودن رطوبت معادل در مزرعه به ویژه در خاک‌های درشت بافت به تشریح اصطلاح "ظرفیت زراعی"^۹ که توسط وی میر و هندریکسون^{۱۰} (۱۹۳۱) مطرح شده بود روی آوردند.

مقدمه

بافت خاک را می‌توان مهمترین ویژگی فیزیکی پایدار خاک دانست که در اغلب پژوهش‌ها و طرح‌های اجرایی به ویژه در تهیه منحنی مشخصه رطوبتی^۱ کاربرد دارد (پاچسکی و رالز^۲، ۲۰۰۴). زیرا، روی سایر ویژگی‌های خاک مانند جرم مخصوص ظاهری، ذخیره رطوبتی، ساختمان، نفوذپذیری، ظرفیت تبادل کاتیونی و مقدار ماده آلی تأثیر می‌گذارد. بافت خاک همچنین روی سهولت کار در مزرعه، جوانه‌زدن بذور و رشد گیاهان مؤثر است. مکنزی و مک‌لیود^۳ (۱۹۸۹) طی تحقیقات خود در استرالیا اعلام نمودند که بافت خاک می‌تواند بهترین ابزار برای برآورد رطوبت قابل دسترس خاک در نظر گرفته شود. خاک‌های رسی چون آب بیشتری در خود نگه می‌دارند، پس از آبیاری یا بارندگی، زمان لازم برای رسیدن به رطوبت مطلوب عملیات زراعی یا اصطلاحاً حالت گاورو^۴ در آنها طولانی‌تر از دیگر بافت‌ها است. همچنین، ظرفیت نگهداری آب، ذخیره عناصر غذایی و حاصلخیزی خاک‌های ریز بافت بیشتر از خاک‌های درشت بافت می‌باشد. لکن، سرعت حرکت آب و هوا و نفوذ ریشه در آنها، متناسب با افزایش مقدار رس و فشردگی خاک کاهش می‌یابد. اکثر این

5-Calciu et al.

6-Robbins and Wiegand

7-Briggs and McLane

8-Equivalent moisture

9-Field capacity

10-Veihmeyer and Hendrickson

1-Soil Water Retention Curve

2-Pachepsky and Rawls

3-McKenzie and MacLeod

4-Tillage

می‌یر و جی^۷ (۱۹۹۹) مقادیر هدایت هیدرولیکی غیراشباع 0.001 ، 0.01 و 0.1 سانتی‌متر در روز را با توجه به سرعت نفوذ نهایی آب در خاک‌های مختلف به ترتیب برای تعیین رطوبت در نقطه ظرفیت زراعی مزرعه در خاک‌های شنی، لومی و رسی مناسب دانستند. بر این اساس، پژوهشگران دیگری نظیر راتلیف و همکاران^۸ (۱۹۸۳) پیشنهاد کردند زمانی رطوبت خاک در نقطه ظرفیت زراعی مزرعه در نظر گرفته شود که میزان تغییرات سرعت نفوذ آب در خاک، حین زهکشی، تقریباً به 0.1 تا 0.2 درصد در روز برسد. البته، این محدوده تغییرات ناچیز هم ناشی از خطای انجام آزمایش‌ها می‌تواند باشد (پاچپسکی و رالز، ۲۰۰۴). به عبارت دیگر، سرعت حرکت آب در خاک در نقطه ظرفیت زراعی مزرعه به مقدار تقریباً ثابتی در حد صفر می‌رسد.

محققینی، نظیر توارکاو و همکاران^۹ (۲۰۰۹) سعی در تعیین ظرفیت زراعی مزرعه از روی منحنی مشخصه رطوبتی نمودند. برای این کار، آنها با استفاده از بهینه‌سازی پارامترهای معادله ون گنوختن^{۱۰} (۱۹۸۰) به کمک نرم‌افزار رزتا^{۱۱} نسخه ۲۰۰۱، برای ۱۲ کلاس بافت خاک‌های آمریکا به تخمین منحنی مشخصه هدایت هیدرولیکی ون گنوختن- معلم^{۱۲} و جایگذاری مقادیر متفاوت ضریب زهکشی (0.001 ، 0.01 ، 0.1 سانتی‌متر در روز) به جای هدایت هیدرولیکی غیراشباع، گرادیان هیدرولیکی واحد در حالت جریان موئینگی، نچاب (۱۹۹۸)، به صورت زیر پرداختند:

$$q_{fc} = K_s \cdot \left(\frac{\theta_{fc} - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^l \cdot \left[1 + \left(1 - \left(\frac{\theta_{fc} - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^{1/m} \right)^m \right]^{-2} \quad (1)$$

سپس، با استفاده از نرم‌افزار Hydrus-1D و کاربرد روش حل معکوس متوجه شدند که دبی 0.1 سانتی‌متر در روز، برخلاف نظر می‌یر و جی (۱۹۹۹)، نسبت به مقادیر 0.1 و 0.001 سانتی‌متر در روز می‌تواند ملاک بهتری برای تخمین ظرفیت زراعی مزرعه باشد. در نهایت، تابع انتقالی زیر را ارائه نمودند:

$$S_{fc} = \left(\frac{\theta_{fc} - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right) = n^{-0.60(2 + \log K_s)} \quad (2)$$

که در آنها، q_{fc} : ضریب زهکشی در نقطه ظرفیت زراعی، K_s : هدایت هیدرولیکی اشباع، θ_{fc} : رطوبت ظرفیت زراعی، θ_s : رطوبت اشباع خاک، θ_r : رطوبت باقی‌مانده در خاک، m : شاخص تقارن منحنی مشخصه رطوبتی، l : شاخص پیوستگی خلل و فرج خاک، S_{fc} : درجه اشباع نسبی در نقطه ظرفیت زراعی و n : شاخص توزیع اندازه منافذ خاک می‌باشد.

ظرفیت زراعی مزرعه هنوز هم پرکاربردترین پارامتر طراحی برنامه‌ریزی آبیاری است که تاکنون توصیف کمی دقیقی برای آن ارائه نشده است (نواک و هاوریل^۱، ۲۰۰۶).

در تعریف کلاسیک، زمانی رطوبت خاک در نقطه ظرفیت زراعی است که تخلیه آب ثقلی از خلل و فرج درشت پایان یافته باشد و انتقال بخش اعظم رطوبت خاک از خلل و فرج ریز تحت تأثیر نیروی موئینگی رخ دهد (وی میر و هندریکسون، ۱۹۳۱). لذا، این تعریف مبهم بر اساس "خروج آب ثقلی" باعث شده که برآورد ظرفیت زراعی مزرعه تنها به استناد تجارب موردی انجام پذیرد. زیرا، جریان آب در خاک ذاتاً پدیده‌ای پویا بوده و حتی در حالت بخار نیز به طور پیوسته ادامه می‌یابد. با این تفسیر، هدایت هیدرولیکی آب در خاک هیچ‌گاه به صفر نمی‌رسد. حال سوال اساسی این‌جاست که، پس چه زمانی و در چه مقداری از هدایت هیدرولیکی به ظرفیت زراعی مزرعه می‌توان رسید.

هیلل^۲ (۱۹۹۸) معتقد است در وهله اول، چون هنوز هیچ سیستم آزمایشگاهی استاندارد برای تشخیص و تعیین همه ویژگی‌های پویایی آب در خاک به طور درجا وجود ندارد. لذا، ظرفیت زراعی مزرعه بایستی در مزرعه اندازه‌گیری شود تا جنبه پویایی آب در خاک به طور واقعی لحاظ شده باشد. سپس، این روش مزرعه‌ای استاندارد شده در قالب دستورالعملی منطقی قابل تکرار باشد (کلوت^۳، ۱۹۸۶). بنابراین، نیاز به ارائه تعریفی کاربردی‌تر به لحاظ کمی به دلیل این واقعیت است که ظرفیت زراعی مزرعه یک ویژگی بسیار مهم و ضروری برای برآورد آب قابل دسترس و تعیین عمق آبیاری برای زراعت و مدیریت کشاورزی می‌باشد (کونگ و همکاران^۴، ۲۰۱۴؛ تاییکسیرا و همکاران^۵، ۲۰۱۴).

متخصصین فنون و معیارهای کمی متفاوتی برای برآورد ظرفیت زراعی مزرعه ارائه داده‌اند که شامل سنجش پتانسیل ماتریک خاک، به طور مثال ۱۰۰، ۳۳۰ و ۵۰۰ سانتی‌متر به ترتیب برای خاک‌های شنی، لومی و رسی (پاچپسکی و رالز، ۲۰۰۴)، مدت زمان زهکشی پس از آبیاری، مانند ۲۴، ۴۸ و ۷۲ ساعت به ترتیب برای خاک‌های مذکور (کلوت، ۱۹۸۶) و بالاخره رسیدن به سرعت نفوذ پایه، مثلاً 0.05 سانتی‌متر در روز (هیلل، ۱۹۹۸؛ کونگ و همکاران، ۲۰۱۴ و نچاب^۶، ۱۹۹۸).

نچاب (۱۹۹۸) به لحاظ پویایی جریان آب در خاک به این نتیجه رسید زمانی رطوبت خاک مزرعه به نقطه ظرفیت زراعی مزرعه می‌رسد که دبی جریان غیراشباع در واحد سطح یا اصطلاحاً ضریب زهکشی (q_{fc}) خاک مربوطه با میزان سرعت تبخیر و تعرق روزانه یکسان شود.

7-Meyer and Gee
8-Ratiff et al.
9-Twarakavi et al.
10-Van Genuchten
11-Rosetta
12-Van Genuchten-Mualem

1-Novak and Havrila
2-Hillel
3-Klute
4-Cong et al.
5-Teixeira et al.
6-Nachabe

همکاران^{۱۳} (۱۹۸۹) برای ۴۷۴۳۵ نمونه خاک از بانک اطلاعاتی اداره حفاظت منابع طبیعی آمریکا اعلام نمودند این روابط همگی میزان رطوبت را حدود ۰/۸ الی ۲/۸ درصد کمتر از مقادیر واقعی برآورد می‌کنند. همچنین، آنها اعلام نمودند که افزایش تعداد و نوع برخی متغیرهای ورودی در این توابع انتقالی ضروری نبوده و تأثیری معنی‌دار بر دقت برآوردها ندارد. از سوی دیگر، هر چند برخی خصوصیات شیمیایی خاک‌ها نظیر میزان کربن آلی یا ظرفیت تبادل کاتیونی نیز بعضاً معرف‌های خوبی برای برآورد میزان رطوبت مزرعه توسط خاکشناسان گزارش شده است (تسیب و همکاران^{۱۴}، ۱۹۹۹). لیکن، نمی‌توان از آنها به عنوان پارامترهای ثابت و پایدار برای برنامه‌ریزی آبیاری استفاده نمود زیرا مقادیر آنها طی عملیات کشت و کار در فصول مختلف به طور قابل توجهی تغییر پیدا می‌کند. همچنین، برخی پژوهشگران نظیر اسپینو و نوادیالو^{۱۵} (۱۹۹۴) در تحقیقات خود اعلام کردند تأثیری مثبت و معنی‌دار از مواد آلی بر میزان ظرفیت زراعی مزرعه مشاهده نکردند. در واقع، اهمیت ارائه این گونه توابع انتقالی و با نمایش منحنی رطوبتی به صورت تابع ریاضی در این است که می‌توان از آنها برای تخمین رطوبت و حرکت املاح در نیمرخ خاک با استفاده از مدل‌های نرم‌افزاری انتقال املاح استفاده نمود (سیمونک و همکاران^{۱۶}، ۲۰۰۵). از سوی دیگر، روش‌های آزمایشگاهی و صحرایی برای اندازه‌گیری مستقیم این ویژگی زمان‌بر و پرهزینه می‌باشند. هر چند، محلی بودن اعتبار توابع انتقالی را می‌توان از مهمترین نقاط ضعف آنها دانست و بایستی با احتیاط و تنها برای تخمین ساده در سایر مناطق با سری خاک متفاوت به کار برد. لذا، اثر منطقه‌ای بودن توابع انتقالی از یک سو و محدود بودن توابع انتقالی توسعه یافته برای برآورد خصوصیات هیدرولیکی خاک‌های ایران از دیگر سو، می‌تواند بیانگر اهمیت مطالعه و پژوهش در خصوص توابع انتقالی باشد (ساکستون و رالز^{۱۷}، ۲۰۰۶). بر این اساس، تاکنون دستورالعمل جامع و مشخصی ارائه نشده است که نشان دهد توابع انتقالی خاک‌های مختلف در چه مناطقی و تحت چه شرایطی قابلیت کاربرد دارند (پاچپسکی و رالز، ۲۰۰۴). همچنین، مشابه بودن برخی شرایط خاک‌ها و تناسب اقلیمی هرگز نمی‌تواند تضمینی برای مناسب بودن روابط استخراج شده در سایر مناطق نیز باشد. لذا، این موضوع نشان‌دهنده ضرورت دستیابی به روابط خاص خاک‌های هر منطقه است. هدف از این پژوهش به‌دست آوردن توابع انتقالی مناسب از طریق مدل‌های شبیه‌سازی ریاضی و صحت‌سنجی آن‌ها با استفاده از شرایط آزمایشگاهی و مزرعه‌ای بود. برای نیل به این هدف روش‌های مرسوم برآورد رطوبت ظرفیت مزرعه‌ای نیز مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفتند.

تابع انتقالی در نرم‌افزار رزتا نسخه ۲۰۰۱، با ماهیت شبکه عصبی مصنوعی توسط شاپ و همکاران^۱ (۲۰۰۱) در آزمایشگاه شوری خاک آمریکا بسط و توسعه یافت. به طور کلی، همه پژوهشگران به این نتیجه رسیده‌اند که معمولاً وقتی تعداد پارامترهای ورودی به بیش از سه پارامتر می‌رسد توابع انتقالی مبتنی بر شبکه عصبی بهتر از مدل‌های رگرسیونی عمل می‌کند (بیکر و ایسون^۲، ۲۰۰۸). در واقع، تخمین ویژگی‌های هیدرولیکی دیریافت خاک^۳ مانند منحنی رطوبتی با استفاده از برخی اطلاعات موجود و زودبافتی^۴ نظیر بافت خاک که اندازه‌گیری آنها سریع، آسان و کم‌هزینه است معمولاً به وسیله روابط رگرسیونی صورت می‌پذیرد که به توابع انتقالی^۵ (PTFs) موسومند (بوما^۶، ۱۹۹۰). به همین منظور در دهه اخیر، روش‌های غیرمستقیم نظیر توابع انتقالی برای تخمین ویژگی‌های کمی و کیفی خاک‌ها به طور چشمگیری مورد توجه محققین قرار گرفته و توسعه پیدا کرده‌اند (توارکاو و همکاران، ۲۰۰۹). حال و همکاران^۷ (۱۹۷۷) نیز به ارائه روابطی بین بافت خاک و بسیاری از ویژگی‌های هیدرولیکی آن مانند رطوبت در نقطه پژمردگی، ظرفیت زراعی و رطوبت قابل دسترس در خاک‌های مناطق انگلستان و ولز پرداختند.

مدل ون‌گنوختن (۱۹۸۰) یکی از معتبرترین و رایج‌ترین مدل‌های تخمین منحنی مشخصه رطوبتی خاک است زیرا شکلی سیگموئیدی و پیوسته از آن برآورد می‌کند و دارای انعطاف‌پذیری بالا، استفاده از دامنه مکش‌های زیاد و قابلیت برآزش در خاک‌های متفاوت است. همچنین پارامترهای این مدل مفهوم فیزیکی دارند. دکستر^۸ (۲۰۰۴) با دو بار مشتق‌گیری از معادله ون‌گنوختن (۱۹۸۰) توانست رابطه زیر را از طریق یافتن نقطه عطف منحنی مشخصه رطوبتی به عنوان رطوبت مطلوب برای زمان اجرای عملیات زراعی یا گاورو شدن ارائه نماید:

$$\theta_{inf} = (\theta_s - \theta_r) \left[1 + \frac{1}{m} \right]^{-m} + \theta_r \quad m = 1 - \frac{1}{n} \quad (3)$$

شاپ و همکاران^۹ (۲۰۰۴) نیز با بررسی چند تابع انتقالی منحنی رطوبتی معتبر نظیر رالز و براکنسیک^{۱۱} (۱۹۸۵)، وستن و همکاران^{۱۱} (۱۹۹۹)، کاسبای و همکاران^{۱۲} (۱۹۸۴) و ویریکن و

- 1-Schaap *et al.*
- 2-Baker and Ellison
- 3-Costly measured properties
- 4-Readily available soil properties
- 5-Pedotransfer functions (PTFs)
- 6-Bouma
- 7-Hall *et al.*
- 8-Dexter
- 9-Schaap *et al.*
- 10-Rawls and Brakensiek
- 11-Wosten *et al.*
- 12-Cosby *et al.*

13-Vereecken *et al.*14-Tessier *et al.*

15-Epebinue and Nwadialo

16-Simunek *et al.*

17-Saxton and Rawls

۳×۴ متر مربع و عمق یک متر با استفاده از بیل مکانیکی در این مزرعه آزمایشی شد. سپس، سه بافت خاک در سه بخش مجزا و در کنار هم با لایه‌های ۱۰ سانتی‌متری ریخته و با غلطک دستی ۱۰۰ کیلوگرمی کوبیده شد.

برای ایجاد شرایط زهکشی آزاد نیز در کف گودال از ماسه بادی به ارتفاع ۱۰ سانتی متر و یک لوله زهکش سوراخ دار پلاستیکی به قطر ۱۵ سانتی متر و طول چهار متر دارای فیلتر مصنوعی از الیاف پشمی استفاده شد. به طور همزمان، تحت شرایط کنترل شده آزمایشگاهی نیز برای مدل فیزیکی با بدنه‌ای از جنس آهن و نمای پلکسی‌گلاس به ابعاد ۱×۱/۵ متر مربع و عمق ۰/۸ متر همراه با چند مجرای خروجی برای زهکشی آزادانه و ماسه بادی به عمق پنج سانتی متر در کف آن تعبیه شد (شکل ۲). همچنین، به منظور جلوگیری از بروز جریان‌های ترجیحی در حین آزمایش با استفاده از روغن جلا و پاشیدن ماسه بادی به دیواره‌ها، سطوحی نسبتاً زبر ایجاد شد.

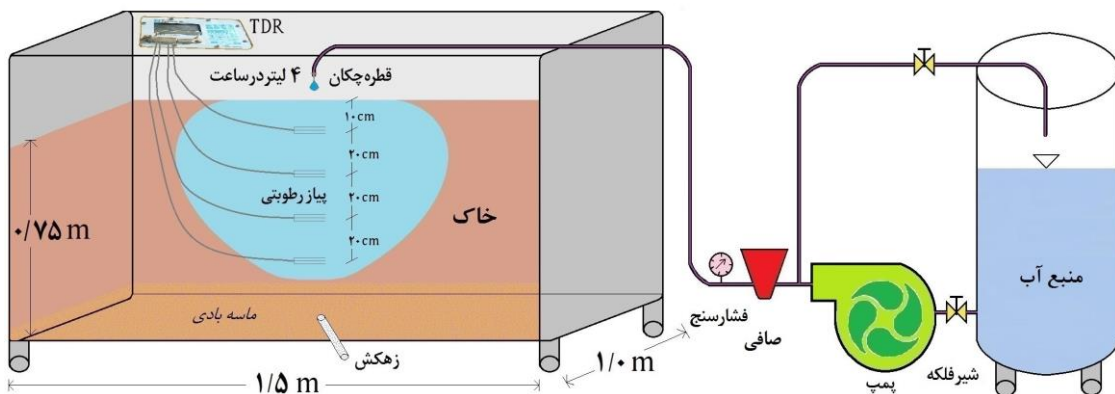
مواد و روش‌ها

منطقه پژوهش و نمونه‌برداری خاک

در این پژوهش، سه نوع بافت خاک اراضی زراعی مناطق نیمه خشک استان خوزستان مورد بررسی قرار گرفت. در مرکز استان (حوزه کارون)، از خاک مزرعه آزمایشی دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران در حاشیه رودخانه کارون اهواز با بافت لومی استفاده شد. دو نوع بافت خاک دیگر، شامل بافت لومی شنی از غرب استان (حوزه کرخه)، واقع در دشت باغه حد فاصل شهرستان‌های شوش و بستان و بافت شنی لومی نیز از جنوب شرق استان (حوزه زهره و خیرآباد)، دشت خیرآباد حوالی شهرستان امیدیه به مزرعه آزمایشی یاد شده حمل شد (شکل ۱). ابتدا، پیش از انجام آزمایش‌ها ضروری بود تا خاک زراعی سطحی در عمق کمتر از ۳۰ سانتی متر با استفاده از شخم، دیسک و سپس گاواهن دوار به حالت پودری درآمده تا به راحتی از الک شماره ۱۰ (دو میلی‌متر) عبور داده شوند. به منظور انجام آزمایش‌ها در شرایط واقعی مزرعه، اقدام به حفر گودالی به ابعاد



شکل ۱- موقعیت اراضی تأمین خاک‌های طرح در استان خوزستان



شکل ۲- شمایی از مدل فیزیکی آزمایشگاهی

اندازه‌گیری ویژگی‌های فیزیکی و هیدرولیکی خاک

هرچند هدف اصلی از کاربرد توابع انتقالی منحنی مشخصه رطوبتی خاک آن است که دیگر نیازی به اندازه‌گیری‌های پرهزینه و وقت‌گیر نباشد، لیکن ضروری است ابتدا منحنی مشخصه آب خاک و سایر ویژگی‌های فیزیکی‌شیمیایی تعدادی از خاک‌های آن منطقه خاص اندازه‌گیری شود و پس از ارزیابی توابع انتقالی موجود روی داده‌های اندازه‌گیری شده، مناسب‌ترین تابع را برای منطقه تعیین نمود تا از آن به بعد بتوان از آن توابع برای تخمین منحنی مشخصه آب خاک استفاده نمود.

به منظور بررسی میزان رطوبت حین آبیاری و پس از آن در هنگام زهکشی، اقدام به کارگذاری حسگرهای دفنی دستگاه انعکاس‌سنجی زمانی امواج^۱ (TDR) در اعماق ۱۰، ۳۰، ۵۰ و ۷۰ سانتی‌متر در هر دو مدل فیزیکی و مزرعه آزمایشی حین خاکریزی شد. مهمترین ویژگی‌های بارز این روش را می‌توان دقت و قابل اطمینان بودن آن دانست که قادر به اندازه‌گیری مقادیر رطوبت و املاح به طور همزمان در خاک است (هارت و لوری^۲، ۱۹۹۸). در انتهای کار آماده‌سازی، اقدام به چهار نوبت آبیاری هفتگی با عمق ۱۰ سانتی‌متر برای آیشویی خاک‌ها شد. از سوی دیگر، خیس و خشک شدن متوالی خاک‌ها طی یک ماه منجر به تشکیل خاکدانه‌ها و ساختمانی طبیعی همراه با ایجاد نشست اولیه و شرایط رطوبتی یکنواخت در نیمرخ آنها شد. سپس، نمونه‌برداری از خاک‌ها برای تعیین شرایط اولیه پیش از شروع آزمایش‌ها انجام پذیرفت.

برای تهیه منحنی رطوبتی خاک‌ها با استفاده از نمونه‌های دست‌نخورده در مکش‌های صفر، ۲، ۱۰، ۲۰، ۴۰، ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ سانتی‌متر از دستگاه جعبه‌شنی و در مکش‌های بالاتر شامل ۳۰۰، ۱۰۰۰، ۵۰۰۰، ۱۰۰۰۰ و ۱۵۰۰۰ سانتی‌متر نیز از دستگاه صفحات فشاری استفاده شد. در ادامه، این داده‌ها برای استخراج ضرائب مدل ون‌گونختن (۱۹۸۰) با اجرای نرم‌افزار RETC (ون‌گونختن و همکاران، ۱۹۹۱) مورد استفاده قرار گرفت:

$$\theta_h = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha h)^n]^m} \quad n > 1 \quad m = 1 - \frac{1}{n} \quad (۴)$$

لذا، ترسیم منحنی مشخصه رطوبتی خاک‌ها طبق مدل ون‌گونختن (۱۹۸۰) با استفاده از محیط نرم‌افزاری اکسل^۳ انجام شد. همچنین معادله‌های منحنی مشخصه هدایت هیدرولیکی خاک‌ها نیز با جایگذاری این ضرائب در مدل ون‌گونختن - معلم (۱۹۸۰) با فرض ۰/۵ برای پارامتر l حاصل شد (معلم^۴، ۱۹۷۶):

$$K_h = K_s \cdot \left(\frac{\theta_h - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^l \cdot \left[1 - \left(1 - \left(\frac{\theta_h - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^{1/m} \right)^m \right]^2 \quad (۵)$$

همچنین، میزان هدایت هیدرولیکی اشباع خاک‌ها در مزرعه آزمایشی به روش چاهک معکوس و برای مدل فیزیکی نیز به روش آزمایشگاهی بار ثابت با استفاده از نمونه‌های دست‌نخورده در سه تکرار انجام پذیرفت.

برای رصد تغییرات زمانی وضعیت رطوبت خاک به لحاظ مقدار و موقعیت آن در هر دو مدل فیزیکی و مزرعه آزمایشی، در سری اول انجام آزمایش‌ها، پس از اتمام ۱۰ ساعت آبیاری با سیستم قطره‌ای موجود که دارای دبی چهار لیتر در ساعت از نوع سطحی - نقطه‌ای تنظیم‌کننده فشار بود اقدام به قرائت رطوبت خاک‌ها در بازه‌های زمانی دو ساعته طی پنج روز، از ساعت هشت صبح الی هشت شب شد. سپس در سری دوم، به منظور رصد وضعیت رطوبتی در شب‌های سری اول، اقدام به آبیاری شبانه از ساعت هشت شب الی شش صبح به مدت ۱۰ ساعت و انجام قرائت‌ها در بازه‌های زمانی دو ساعته طی روز شد. میزان رطوبت کلیه خاک‌ها در حالت ظرفیت زراعی نیز پس از اتمام هر آبیاری در عمق ۲۰ سانتی‌متر (پاچسکی و رالز، ۲۰۰۴) از میانگین قرائت‌های دستگاه انعکاس‌سنجی زمانی امواج در اعماق ۱۰ و ۳۰ سانتی‌متر حاصل شد. در اولین بازه زمانی دو ساعته که اختلاف مقادیر قرائت شده دستگاه انعکاس‌سنجی زمانی امواج کمتر از یک درصد بود به عنوان ملاک انتخاب مقادیر رطوبت در نقطه ظرفیت زراعی برای هر بافت خاک در نظر گرفته شد. واسنجی دستگاه انعکاس‌سنجی زمانی امواج نیز پس از اتمام هر سری آزمایش برای خاک مربوطه انجام شد.

این آزمایش‌ها به صورت فاکتوریل با ۱۸ نمونه شامل عوامل فیزیکی زودبافت خاک (جرم مخصوص ظاهری و میزان شن، سیلت و رس) در قالب طرح بلوک‌های کاملاً تصادفی طراحی و در هر دو مدل فیزیکی و مزرعه آزمایشی با سه تکرار انجام پذیرفت. همچنین، در حین آزمایش‌ها نیز سطح خاک برای جلوگیری از تبخیر، با ورقه‌های ایزوگام پوشانده شد.

معیارهای ارزیابی

به منظور ارزیابی و نیز کسب تابع انتقالی مناسب با استفاده از مدل‌سازی ریاضی که بتواند برآوردی صحیح و اصولی از میزان ظرفیت زراعی مزرعه ارائه نمایند از تجزیه و تحلیل‌های آماری فراوانی استفاده شد که در ذیل به آنها اشاره می‌شود:

الف- انواع روابط ریاضی اعم از خطی و غیرخطی، توانی و لگاریتمی برای یافتن معادله تابع انتقالی بین میزان ظرفیت زراعی مزرعه با پارامترهای مهم زودبافت خاک شامل بافت (درصد شن، سیلت و رس) و جرم مخصوص ظاهری با استفاده از رگرسیون چندمتغیره در محیط نرم‌افزارهای آماری ای‌اس‌پی‌اس^۵ و اکسل مورد بررسی قرار گرفت.

1-Time Domain Reflectometry (TRASE SYSTEM
6050X1 made in Soil Moisture Co.)

2-Hart and Lowery

3-Excel

4-Mualem

5-SPSS

ارزیابی توابع انتقالی بر آورد رطوبت ظرفیت زراعی

با بررسی نتایج تحلیل‌های آماری سه تابع انتقالی شامل توارکاو و همکاران (۲۰۰۹)، رزتا (۲۰۰۱) و دکستر (۲۰۰۴) ملاحظه شد که مقادیر ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده (۳/۱ درصد) و خطای استاندارد (۰/۵ درصد) برای تابع انتقالی توارکاو و همکاران (۲۰۰۹) با کمترین انحراف نسبت به نتایج مشاهداتی در مقایسه با دو تابع انتقالی دیگر مطلوب‌تر بوده و برآورد دقیق‌تری از میزان ظرفیت زراعی مزرعه ارائه کرده است. هر چه مقدار این آماره‌ها کمتر بوده و به صفر نزدیک‌تر باشد بیانگر برآورد دقیق‌تر و نزدیک‌تر به واقعیت است. به طوری که، مقادیر ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده زیر ۱۰ درصد نشان‌دهنده دقیق بودن مدل، ۱۰ الی ۲۰ درصد مناسب، ۲۰ الی ۳۰ درصد دقت متوسط و بیش از ۳۰ درصد نشانه ضعیف بودن مدل است. برای تابع انتقالی رزتا (۲۰۰۱) نیز مقادیر ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده (۵/۲ درصد) و خطای استاندارد (۰/۷۱ درصد) به دست آمد. بنابراین، ارجحیت شبکه‌های عصبی مصنوعی مانند نرم‌افزار رزتا (۲۰۰۱) که در هر دو روش توارکاو و همکاران (۲۰۰۹) و تابع انتقالی رزتا (۲۰۰۱) به کار رفت نسبت به مدل‌های رگرسیونی نظیر روش دکستر (۲۰۰۴) در برآورد ظرفیت زراعی مزرعه و منحنی مشخصه رطوبتی قابل استنتاج است. تخمین قابل قبول مدل رزتا می‌تواند به دلیل وجود ماهیت علمی قوی و محدوده وسیع نمونه خاک‌های استفاده شده در مرحله آموزش مدل باشد. در آموزش مدل رزتا از خاک‌های قاره آسیا نیز استفاده شده است (بورگسن و شاپ، ۲۰۰۵). پژوهش محققینی همچون ایبرو و همکاران (۲۰۱۳) و میناسنی و همکاران (۱۹۹۹) تأیید نمودند که مدل‌های رگرسیونی قادر به برآورد مناسب پارامترهای معادله ون گنوختن (۱۹۸۰) نیستند زیرا ارتباط خطی بین ویژگی‌های خاک برقرار نیست. همچنین، بخشی از کاهش توان تبیین مدل‌های رگرسیونی پی‌ریزی شده نظیر روش رابطه دکستر (۲۰۰۴)، را نیز می‌توان به وجود روابط غیرخطی پیچیده بین ویژگی‌های دیربافت و زودبافت نسبت داد که مدل‌های رگرسیونی خطی قادر به استخراج این روابط نیستند (سای، ۲۰۰۶). به نحوی که، تابع انتقالی دکستر (۲۰۰۴) در مقایسه با مدل‌های دیگر پراکندگی بیشتری را نسبت به نتایج مشاهداتی ایجاد نموده و دارای بیشترین مقدار آماره‌های ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده (۹/۷ درصد) و خطای استاندارد (۱/۷۵ درصد) بود. در رابطه کلی برای هر سه نوع خاک، مقدار این آماره‌ها برای تابع دکستر (۲۰۰۴) در حالت بهینه زمانی حاصل شد که به میزان ۴/۵ درصد از مقادیر برآوردی برای رطوبت بهینه گاورو شدن (طبق رابطه ۳) کسر شد. در جدول (۲)

ب- برای اشتقاق یک تابع انتقالی بر اساس متغیرهای مستقل و وابسته مورد نظر، از روش رگرسیون حداقل مربعات جزئی^۱ با هدف کمینه کردن مجموع مربعات خطا استفاده شد. در روش رگرسیون خطی چندگانه، متغیرها باید از توزیع نرمال پیروی کرده و مستقل از یکدیگر باشند و تا حد ممکن از متغیرهایی که با وابستگی خطی چندگانه دارند در معادله‌ها استفاده نمی‌شود.

ج- برای ارزیابی نتایج از آماره‌های ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده^۲ ($NRMSE$) و خطای استاندارد^۳ (SE) به صورت روابط زیر استفاده شد (پاچپسکی و رالز، ۲۰۰۴):

$$NRMSE = \frac{100}{M} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (E_i - M_i)^2} \quad (6)$$

$$SE = \sqrt{\frac{1}{N-2} \left[\sum_{i=1}^n (E_i - \bar{E})^2 - \frac{\left[\sum_{i=1}^n (M_i - \bar{M})(E_i - \bar{E}) \right]^2}{\sum_{i=1}^n (M_i - \bar{M})^2} \right]} \quad (7)$$

که در آنها، E_i و M_i : به ترتیب درصد رطوبت حجمی ظرفیت زراعی مزرعه تخمین زده شده و اندازه‌گیری شده خاک، \bar{E} و \bar{M} : نیز به ترتیب میانگین مقادیر آنها و N : تعداد داده‌ها است.

د- معنی دار بودن ضرایب رگرسیونی روابط حاصله، برای ارزیابی درجه صحت آنها، با استفاده از آزمون تی استیودنت^۴ در سطح پنج درصد انجام شد.

نتایج و بحث

ویژگی و مشخصات خاک‌ها

در جدول (۱) برخی مشخصات فیزیکی خاک‌های مورد استفاده در مزرعه آزمایشی و مدل فیزیکی در آزمایشگاه خاکشناسی ارائه شده است. بر اساس جدول (۱)، در خاک‌های لومی شنی و شنی لومی مشاهده می‌شود مقادیر رطوبت اشباع دو برابر میزان ظرفیت زراعی مزرعه است (رابینز و ویگان، ۱۹۹۰). در حالی که، این نسبت برای خاک لومی تقریباً ۱/۵ بود. همچنین، بر اساس مشخصات هیدرولیکی مندرج در جدول (۲) می‌توان مشاهده کرد که هر چه بافت خاک سنگین‌تر باشد به طور ملموسی به زمان (t_{fc}) و مقدار مکش ماتریک (η_{fc}) بیشتری در نقطه ظرفیت زراعی مزرعه نیاز است.

5-Borgesens and Schaap

6-Obiero et al.

7-Minasny et al.

8-Sy

1-Partial Least Square Method

2-Normalized Root Mean Square Error

3-Standard Error

4-Student t-Test

شیخ اسماعیلی و همکاران: مدل سازی برآورد رطوبت ظرفیت زراعی در...

مدل فیزیکی است که به مقدار پیشنهادی (۰/۰۱) توسط توارکاوی و همکاران (۲۰۰۹) بسیار نزدیک است. با این روال، مطابق نظر می یرو جی (۱۹۹۹)، به نظر می رسد که افزایش مقدار هدایت هیدرولیکی در نقطه رطوبت ظرفیت زراعی ناشی از سبک تر شدن بافت خاک نظیر لومی شنی و شنی لومی حکایت از این دارد که احتمالاً مقدار هدایت هیدرولیکی در نقطه رطوبت ظرفیت زراعی در خاک خیلی سبک (شنی) به ۰/۱ سانتی متر در روز و بر عکس، در خاک های سنگین رسی به ۰/۰۰۱ سانتی متر در روز نزدیک شود. بر این اساس، ادامه پژوهش حاضر با انجام آزمایش های گسترده تر برای خاک های شنی و رسی قابل پیشنهاد است.

مشاهده می شود که در روش دکستر (۲۰۰۴)، میزان رطوبت در نقطه عطف منحنی (θ_{inf}) در خاک های لومی تنها دو درصد بیشتر از ظرفیت زراعی مزرعه (جدول ۱) بود. در حالی که، این تفاوت در خاک های سبک تر مانند لومی شنی و شنی لومی تقریباً به ۶/۵ درصد رسید. رطوبت بهینه گاورو شدن به اعتقاد پاچپسکی و رالز (۲۰۰۴) تنها حدود دو الی سه درصد از ظرفیت زراعی مزرعه خاک بیشتر است.

بررسی مقادیر متفاوت هدایت هیدرولیکی غیراشباع نیز در نقطه ظرفیت زراعی مزرعه در جدول (۲) نشان می دهد مقدار هدایت هیدرولیکی در نقطه رطوبت ظرفیت زراعی (K_{fc}) در خاک لومی ۰/۰۹۴ سانتی متر در روز، حاصل میانگین شرایط مزرعه و

جدول ۱- مشخصات و خصوصیات فیزیکی خاک های اجرای طرح

بافت خاک	ذرات (درصد)			جرم مخصوص ظاهری (گرم بر سانتی مترمکعب)	رطوبت اشباع (درصدحجمی)	رطوبت ظرفیت زراعی (درصدحجمی)
	رس	سیلت	شن			
لومی	۲۰	۴۲	۳۸	۱/۵۳	۳۹/۳	۲۵/۴
	۱۷	۴۳	۴۰	۱/۶۵	۳۵/۱	۲۲/۵
لومی شنی	۱۰	۳۰	۶۰	۱/۵۴	۴۰/۸	۲۱/۹
	۱۲	۲۹	۵۹	۱/۴۵	۴۲/۰	۲۲/۴
شنی لومی	۸	۱۳	۷۹	۱/۵۵	۳۸/۰	۱۸/۶
	۷	۱۲	۸۱	۱/۷۰	۳۴/۵	۱۷/۰

جدول ۲- پارامترهای معادله ون گنوختن (۱۹۸۰) و برخی مشخصات هیدرولیکی خاک ها

بافت خاک	θ_{inf}	h_{fc}	t_{fc}	k_{fc}	k_s	θ_r	α	n
لومی	۲۷/۴	۳۴۰	۵۵	۰/۰۱۱۱	۶/۵۰	۵/۰	۰/۰۱۱	۱/۳۹۱
	۲۴/۷	۳۶۰	۶۶	۰/۰۰۷۷	۵/۹۰	۴/۸	۰/۰۱۲	۱/۳۷۹
لومی شنی	۲۷/۹	۲۱۸	۴۴	۰/۰۱۴۸	۳۸/۵	۴/۰	۰/۰۲۶۳	۱/۴۰
	۲۸/۷	۲۱۶	۴۰	۰/۰۱۷۸	۴۳/۴	۴/۲	۰/۰۲۵۹	۱/۴۱
شنی لومی	۲۵/۴	۱۳۰	۱۹	۰/۰۳۶۰	۸۹/۱	۳/۲	۰/۰۴۲۵	۱/۴۶۲
	۲۳/۲	۱۳۶	۲۲	۰/۰۲۴۲	۷۰/۱	۳/۰	۰/۰۴۳۱	۱/۴۴۶

واحد متغیرها شامل: میزان رطوبت خاک در نقطه عطف منحنی مشخصه رطوبتی (θ_{inf}) و رطوبت باقی مانده در خاک (θ_r) به درصد حجمی، مکش خاک در نقطه رطوبت ظرفیت زراعی (h_{fc}) به سانتی متر، زمان رسیدن رطوبت خاک به ظرفیت زراعی (t_{fc}) به ساعت، هدایت هیدرولیکی در نقطه رطوبت ظرفیت زراعی (K_{fc}) و هدایت هیدرولیکی اشباع (K_s) به سانتی متر در روز، عکس مکش خاک در نقطه ورود هوا (α) به معکوس سانتی متر، شاخص توزیع اندازه منافذ خاک (n) بی بعد.

مدل سازی بر آورد رطوبت ظرفیت زراعی

برای دست یابی به یک مدل جامع ریاضی متشکل از عوامل مهم فیزیکی مانند بافت خاک و برخی ویژگی های هیدرولیکی نظیر هدایت هیدرولیکی به عنوان مهمترین متغیرهای مستقل مؤثر بر میزان ظرفیت نگهداری آب در خاک از رگرسیون چند متغیره غیرخطی به روش گام به گام با حداقل مربعات جزئی استفاده شد. در این مدل سازی، ابتدا سعی شد به منظور بهبود تابع توارکاوی و همکاران (۲۰۰۹) به رابطه ای مشابه با ضرایب خاص خاک های استان خوزستان دست یافت. لذا، رابطه (۸) با درجه دقت بالا از لحاظ آماری (با خطای استاندارد و ضریب تعیین به ترتیب ۰/۰۰۵ و ۰/۹۷۸) حاصل شد:

$$S_{fc} = \left(\frac{\theta_{fc} - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right) = n^{-0.532(2.282 + \log K_s)} \quad (8)$$

در تحلیل دقت بالای این تابع انتقالی می توان ادعا نمود که در واقع، پارامترهای معادله ون گنوختن (۱۹۸۰) به نوعی در برگزیده همه خصوصیات فیزیکی خاک ها می باشد. در حالی که، سایر توابع انتقالی نظیر پاچپسکی و رالز (۲۰۰۴) یا ویریکن و همکاران (۱۹۸۹) که تنها بر اساس درصد ذرات بافت خاک و یا برخی کمیت های شیمیایی نظیر مقدار کربن و مواد آلی حاصل شده اند احتمالاً از این درجه دقت و اعتبار برای طیف گسترده ای از خاک های مناطق مختلف برخوردار نیستند.

در ادامه، به منظور ارائه تابع انتقالی ساده تر که تنها با استفاده از ویژگی های زود یافت نظیر درصد ذرات تشکیل دهنده بافت خاک و جرم مخصوص ظاهری بتواند برآوردی مناسب از میزان ظرفیت زراعی مزرعه ارائه نماید رابطه زیر حاصل شد که اتفاقاً به لحاظ شاخص های آماری (با خطای استاندارد و ضریب تعیین به ترتیب ۰/۰۰۵ و ۰/۹۷۸) دارای همان دقت رابطه قبلی است:

$$\theta_{fc} = 0.174C + 0.083L - 0.032S - 11.867\rho_a + 37.378 \quad (9)$$

که در آن C، L و S: به ترتیب درصد ذرات رس، سیلت و شن خاک بوده و ρ_a : جرم مخصوص ظاهری خاک بر حسب گرم بر سانتی متر مکعب است.

میناسنی و همکاران (۱۹۹۹) نیز توابع انتقالی رگرسیون خطی را با وجود عملکرد پایین تر نسبت به شبکه عصبی مصنوعی توصیه نمودند. در این پژوهش، به وضوح اثر تراکم خاک و تنوع بافتی با میزان شن، سیلت و رس متفاوت در رابطه (۹) نمایان است. به طوری که، آزمون F مشخص نمود هر چهار متغیر مستقل شامل جرم مخصوص ظاهری و میزان شن، سیلت و رس در سطح پنج درصد تأثیر معنی داری بر ظرفیت نگهداری آب در خاک دارند. در رابطه (۹)، ضریب منفی (۰/۰۳۲) حاکی از همبستگی منفی معنی دار (در سطح یک درصد) بین درصد ذرات شن و میزان ظرفیت زراعی مزرعه است (اپینیو و نوادیالو، ۱۹۹۴).

در واقع، تخلیه سریع آب در خاک های شنی به علت خلل و فرج بزرگ تری که تنها برای تهویه مناسبند به همراه سطح ویژه کم ذرات شن باعث اثرات منفی زیادی در ظرفیت نگهداری آب خاک و تلفات نفوذ عمقی داشت. این تأثیر منفی مانند پژوهش محققینی نظیر رالز و پاچپسکی^(۲۰۰۲) و مردون و همکاران^(۲۰۰۶) به طور کاملاً معنی دار مشاهده شد. از سوی دیگر، افزایش مقدار رس با ضریب بالاتر (۰/۱۷۴) نسبت به ذرات سیلت و شن اثری مثبت بر میزان گنجایش ظرفیت زراعی مزرعه خاک ها داشته که با نتایج اپینیو و نوادیالو (۱۹۹۴) و رالز و پاچپسکی (۲۰۰۲) مطابقت دارد. در واقع، وجود ذرات رس به دلیل ایجاد خلل و فرج ریزتر که مناسب برای نگهداری آب هستند به علت سطح ویژه بیشتر، اثربخشی بیشتری پیدا می کند. در پژوهش های دیگری نظیر کازمیر و همکاران^(۲۰۰۱) و رقاوندرا و همکاران^(۲۰۰۷) نیز نشان داده شد که درصد رس موجود در بافت خاک از مهمترین عوامل مؤثر بر ظرفیت زراعی مزرعه می باشد. همچنین، نتایج تحقیق ابیرو و همکاران (۲۰۱۳) و مردون و همکاران (۲۰۰۶) نشان داد که افزایش جرم مخصوص ظاهری حاکی از تراکم بیشتر خاک و از بین رفتن فضای خلل و فرج است که منجر به کاهش معنی دار ظرفیت نگهداری آب در خاک می شود.

نتیجه گیری و پیشنهادها

به طور کلی، نتایج این پژوهش در ارزیابی عملکرد چندین تابع انتقالی نقطه ای معروف به منظور برآورد میزان ظرفیت زراعی مزرعه در خاک های مناطق مختلف استان خوزستان نشان داد که مدل های نیمه تجربی متکی بر اصول فیزیکی که مانند روش پیشنهادی توارکاوی و همکاران (۲۰۰۹) در سطح مزرعه مورد بررسی و آزمایش قرار گرفته اند می تواند جایگزینی مناسب برای روش های سنتی تخمین ظرفیت نگهداری آب در خاک باشند. علاوه بر آن، دو تابع انتقالی دیگر حاصله از این پژوهش، تنها با استفاده از پارامترهای معادله ون گنوختن (۱۹۸۰) یا درصد ذرات بافت خاک و جرم مخصوص ظاهری توانستند میزان رطوبت ظرفیت زراعی خاک های خوزستان را با دقت بالایی برآورد نمایند. بر این اساس، بهترین مدل برای تخمین رطوبت ظرفیت زراعی هنگامی که دست آمد که همه پارامترهای فیزیکی زود یافت خاک مانند میزان شن، سیلت، رس و جرم مخصوص ظاهری وارد مدل شدند. این امر نشان دهنده اهمیت استفاده از تعداد بیشتر ویژگی های مهم زود یافت خاک در افزایش دقت مدل رگرسیونی است.

1-Rawls and Pachepsky

2-Merdun et al.

3-Cazemier et al.

4-Raghavendra et al.

تشکر و قدردانی

از همکاری صمیمانه آقای دکتر بیژن حقیقتی و کارشناسان آزمایشگاه خاکشناسی مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان چهارمحال و بختیاری تشکر و قدردانی می‌گردد.

نتایج این مدل سازی می‌تواند به عنوان ابزاری کارآمد و سودمند، کمک شایانی به کارشناسان طراح و بهره برداران به منظور برنامه ریزی آبیاری در خاک‌های مختلف استان خوزستان نماید. در پایان پیشنهاد می‌شود این روش پژوهش روی خاک‌های لایه‌ای و یا با بافت سنگین تر نیز انجام پذیرد تا بتوان به تابع انتقالی جامع تری برای برآورد میزان رطوبت ظرفیت زراعی در همه خاک‌های کشور دست یافت.

منابع

- 1- Baker, L. and D. Ellison. 2008. Optimisation of pedotransfer functions using an artificial neural network ensemble method. *Geoderma Journal*, 144:212-224.
- 2- Borgesen, C. D. and M. G. Schaap. 2005. Point and parameter pedotransfer functions for water retention predictions for Danish soils. *Geoderma Journal*, 127:154-167.
- 3- Bouma, J. 1990. Using morphometric expressions for macropores to improve soil physical analyses of field soils. *Geoderma Journal*, 46:3-13.
- 4- Briggs, L. J. and J. W. Mc Lane. 1910. Moisture equivalent determinations and their application. In: *Proceedings of American Society of Agronomy*, 2:138-147.
- 5- Calciu, I., Simota, C., Vizitiu, O. and I. Pănoiu. 2011. Modelling of soil water retention properties for soil physical quality assessment. *Research Journal of Agricultural Science*, 43(3):35-43.
- 6- Cazemier, D. R., Lagacherie, P. and R. M. Clouaire. 2001. A possibility theory approach for estimating available water capacity from imprecise Information contained in soil data bases. *Geoderma Journal*, 103:113-132.
- 7- Cong, Z. T., Lu, H. F. and G. H. Ni. 2014. A simplified dynamic method for field capacity estimation and its parameter analysis. *Water Science and Engineering Journal*, 7(4):351-362.
- 8- Cosby, B. J., Hornberger, G. M., Clapp, R. B. and T. R. Ginn. 1984. A statistical exploration of the relationship of soil moisture characteristics to the physical properties of soils. *Water Resources Research Journal*, 20 (6):682-690.
- 9- Dexter, A. R. 2004. Soil physical quality. Part I: Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. *Geoderma Journal*, 120:201-214.
- 10-Epebinue, O. and B. Nwadialo. 1994. Predicting soil water availability from texture and organic matter content for Nigerian soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis Journal*, 24:633-640.
- 11-Hall, D. G., Reeve, M. J., Tomasson, A. J. and V. F. Wright. 1977. Water retention, porosity and density of field soils. *Technical Monograph, No. 9, Soil Survey of England and Wales, Harpenden.*
- 12-Hart, G. L. and G. Lowery. 1998. Measuring instantaneous solute flux and loading with time domain reflectometry. *Soil Science Society of America Journal*, 62:23-35
- 13-Hillel, D. 1998. *Environmental soil physics*. Academic Press, San Diego, CA.
- 14-Klute, A. 1986. *Methods of soil analysis. Part I: Physical and mineralogical properties*. 2nd ed. Agronomy, vol. 9, American Society of Agronomy and Soil Science of America, Madison, WI.
- 15-McKenzie, N. J. and D. A. MacLeod. 1989. Relationships between soil morphology and soil properties relevant to irrigated and dryland agriculture. *Australia Journal of Soil Resources*, 27:235-258.

- 16-Merdun, H., Cinar, O., Meral, R. and M. Apan. 2006. Comparison of artificial neural network and regression pedotransfer functions for prediction of soil water retention and saturated hydraulic conductivity. *Soil and Tillage Resources Journal*, 90:108-116.
- 17-Meyer, P. D. and G. Gee. 1999. Flux-based estimation of field capacity, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 125(7):595-599.
- 18- Minasny, B., McBratney, A. B. and K. L. Bristow. 1999. Comparison of different approaches to the development of pedotransfer functions for water-retention curves. *Geoderma Journal*, 93:225-253.
- 19- Mualem, Y. 1976. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resources Research Journal*, 12:513-522.
- 20- Nachabe, M. H. 1998. Refining the definition of field capacity in the literature. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 124(4):230-232.
- 21- Novák, V. and J. Havrila. 2006. Method to estimate the critical soil water content of limited availability for plants. *Biologia Journal*, 61(19):289-293.
- 22- Obiero, J. P. O., Gumbe, O. L., Omuto, C. T., Hassan, M. A. and J. O. Agullo. 2013. Development of pedotransfer functions for saturated hydraulic conductivity. *Open Journal of Modern Hydrology*, 3:154-164.
- 23- Pachepsky, Ya. A. and W. J. Rawls. 2004. Development of pedotransfer functions in soil hydrology. *Developments in Soil Science*, Elsevier, Amsterdam, Vol. 30, 498p.
- 24- Raghavendra, B. J., Mohanty, B. P. and E. P. Springer. 2007. Multiscale pedotransfer function for soil water retention. *Vadose Zone Journal*, 6:868-878.
- 25- Ratliff, L. F., Ritchie, J. T. and D. K. Cassel. 1983. Field-measured limits of soil water availability as related to laboratory-measured properties. *Soil Science Society American Journal*, 47:770-775.
- 26- Rawls, W. J. and D. L. Brakensiek. 1985. Prediction of soil water properties for hydrologic modeling. In: Jones, E., Ward, T. J. (eds.), *Watershed Management, Eighties, Proceedings of the Symposium of ASCE*, Denver, CO, New York.
- 27- Rawls, W. J. and Y. A. Pachepsky. 2002. Soil consistence and structure as predictors of water retention. *Soil Science Society of America Journal*, 66:1115-1126.
- 28- Robbins, C. W. and C. L. Wiegand. 1990. Field and laboratory measurements. In K. K. Tanji, Eds. *Agricultural Salinity Assessment and Management*. ASCE, New York, NY, pp. 201-219.
- 29- Saxton, K. E. and W. J. Rawls. 2006. Soil water characteristic estimates by texture and organic matter for hydrologic solutions. *Soil Science Society of America Journal*, 70:1569-1578.
- 30- Schaap, M. G., Leij, F. J. and M. Th. van Genuchten. 2001. *ROSETTA*: A computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions. *Journal of Hydrology*, 251:163-176.
- 31- Schaap, M. G., Nemes, A. and M. Th. van Genuchten. 2004. Comparison of models for indirect estimation of water retention and available water in surface soils, *Vadose Zone Journal*, 3:1455-1463.
- 32- Simunek, J., Van Genuchten, M. Th. and M. Sejna. 2005. The *HYDRUS-1D* software package for simulating the one-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably saturated media. Version 3.0, *HYDRUS Software Series 1*. Department of Environmental Sciences, University of California Riverside, Riverside, CA, 270 P.

- 33- Sy, N. L. 2006. Modelling the infiltration process with a multi-layer perceptron artificial neural network. *Hydrology Science*, 51(1):3-20.
- 34- Teixeira, W. G., Ceddia, M. B., Ottoni, M. V. and G. K. Donnagema. 2014. Application of soil physics in environmental analyses: measuring, modelling and data integration. Springer Press, Heidelberg, Germany.
- 35- Tessier, D., Bigorre, F. and A. Bruand. 1999. Exchange capacity: a tool for predicting the physical properties of soils. *Reports of the Agriculture Academy of France*, 85:37-46.
- 36- Twarakavi, N. K. C., Simunek, J. and M. Schaap. 2009. Development of pedotransfer functions for estimation of soil hydraulic parameters using support vector machines, *Soil Science Society of America Journal*, 73:1443-1452.
- 37- Van Genuchten, M. Th. 1980. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, 44:892-898.
- 38- Van Genuchten, M. Th., Leij, F. J. and S. R. Yates. 1991. The *RETSC* code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils. Report of the Environmental Protection Agency, No. 600/2-91/065, USA Salinity Laboratory, USDA.
- 39- Veihmeyer, F. J. and Hendrickson, A. H. 1931. The moisture equivalent as a measure of the field capacity of soils. *Soil Science Journal*, 32:181-193.
- 40- Vereecken, H., Maes, J., Feyen, J. and P. Darius. 1989. Estimating the soil moisture retention characteristics from texture, bulk density and carbon content. *Soil Science Journal*, 148:389-403.
- 41- Wösten, J. H. M., Lilly, A., Nemes, A. and C. Le Bas. 1999. Development and use of a database of hydraulic properties of European soils. *Geoderma Journal*, 90:169-185.