

## روش جدید برآورد پارامترهای هیدرولیکی با اندازه‌گیری رطوبت خاک در مزرعه

شاهرخ زندپارسا<sup>\*</sup>، سعیده پرویزی، علیرضا سپاسخواه و علی اکبر کامگار حقیقی<sup>۱</sup>

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۷/۳؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۱/۲۹)

### چکیده

در این پژوهش، مقادیر رطوبت و دمای خاک در اعماق و زمان‌های مختلف با حل معادله ریچاردز با روش عددی صریح تفاضل‌های محدود در محیط برنامه‌نویسی Visual Studio C# نوشته شد. برای برآورد پارامترهای هیدرولیکی خاک شامل  $a_v$  و  $n_v$  (ضرایب معادله ون‌گنوختن) و  $K_s$  (هدایت هیدرولیکی اشباع)، پس از مرطوب کردن نیم‌رخ خاک، مقادیر رطوبت و دما در اعماق مختلف به ترتیب توسط دستگاه TDR و دستگاه ثابت اندازه‌گیری گردید. با بهینه نمودن یک پارامتر و ثابت منظور کردن بقیه پارامترها، تابع هدف (ریشه متوسط خطا بین مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده رطوبت خاک) با روش نیوتن-رافسون به حداقل رسانیده شد. سپس، با جایگزینی مقدار بهینه شده این پارامتر، مشابه این کار برای پارامترهای دیگر انجام شد. بهینه کردن پارامترها تا تغییرات ناچیز تابع هدف تکرار شد. نتایج نشان داد که با استفاده از مدل SWCT (Soil Water Content and Temperature)، اندازه‌گیری رطوبت خاک و تهیه اطلاعات هواشناسی شامل مقادیر حداقل و حداکثر دما، فشار بخار هوا، بارندگی و تابش خورشیدی می‌توان عوامل هیدرولیکی خاک (پارامترهای معادله ون‌گنوختن) را بهینه نمود. در نهایت، طی سه فصل بهار، تابستان و پاییز سال ۱۳۹۴، مقادیر برآوردی و اندازه‌گیری شده رطوبت و دمای خاک تا عمق ۷۰ سانتی‌متر، مورد مقایسه قرار گرفتند. مقادیر رطوبت خاک در اعماق ۵، ۳۵ و ۷۰ سانتی‌متری با مقدار نرمال شده RMSE به ترتیب برابر ۰/۰۹۰، ۰/۰۵۶ و ۰/۰۹۶ و دمای خاک در اعماق ۵، ۱۵ و ۲۵ سانتی‌متری با RMSE به ترتیب برابر ۲/۰، ۱/۱۷۵ و ۱/۵ درجه سانتی‌گراد در سطح مطلوب و اسنجی شدند. در این پژوهش، مقادیر ضرایب هیدرولیکی خاک در مقایسه با سایر مدل‌های پیشین، در محدوده وسیع‌تری از رطوبت بین حالت اشباع تا هواخشک برآورد گردید.

واژه‌های کلیدی: مدل SWCT، تابع هدف، روش معکوس، رطوبت خاک، دمای خاک

۱. گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز

\*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: zandparsa@yahoo.com

## مقدمه

و فشار آب خاک در زمان‌های مختلف استفاده شده و پارامترهای هیدرولیکی خاک برآورد می‌گردد. van Genuchten (۱۴) مدلی با عنوان RETC در شرایط آزمایشگاه ارائه داد که می‌توان با وارد کردن داده‌های مقدار آب و فشار آب خاک، پارامترهای هیدرولیکی خاک از جمله  $a_v$ ،  $n_v$ ،  $\theta_r$  و  $\theta_s$  را برآورد نمود. Zand-Parsa (۱۷) در مدل ESHPIIM، مقدار پارامترهای هیدرولیکی معادله ون‌گنوختن را با استفاده از روش نیوتن-رافسون در دو حالت بهینه نمود. در حالت اول، تنها از داده‌های آب خاک و در حالت دوم از داده‌های آب خاک و فشار آب خاک استفاده نمود. ایشان با اجرای مدل در حالت دوم به نتایج بهتری دست یافتند.

مهد و زندپارسا مدل ESHPIIM2 را ارائه نمودند که در آن از الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی استفاده شد (۹). این روش در حقیقت اقتباسی از تکثیر کروموزوم‌ها در طبیعت است که اساس آن بر انتخاب، بقا و تکامل استوار می‌باشد. روش فوق برای توابع هدف مبهم و مشتق‌ناپذیر مناسب است. مزیت الگوریتم ژنتیک، توانایی یافتن کمینه نهایی توابع و همچنین عدم نیاز به داده ورودی می‌باشد که البته همین مسئله باعث افزایش زمان اجرای مدل می‌شود. از معایب دیگر این مدل آن است که در ازای اجرای هر بار مدل، جواب‌های کاملاً یکسان حاصل نمی‌شود که این مسئله به دلیل ماهیت الگوریتم ژنتیک می‌باشد.

یانگ و یو از الگوریتم‌های هوشمند مانند IPSO (Improved Particle Swarm Optimization)، الگوریتم ژنتیک (GA) و الگوریتم شبیه‌سازی بازگشتی (SA) در برآورد پارامترهای مدل ون‌گنوختن (vG) برای منحنی رطوبتی خاک (SWRC) در چهار نوع بافت خاک در چین استفاده نمودند (۱۶). برای مقایسه پارامترهای برآورد شده برنامه کامپیوتری RETC و تابع انتقالی Rosetta نیز مورد استفاده قرار گرفتند. برای چهار بافت خاک، الگوریتم هوشمند IPSO مقدار پارامترهای مدل vG را با  $R^2$  و NRMSE بیشتری نسبت به الگوریتم‌های GA و SA برآورد نمود. مقادیر رطوبت خاک

تاکنون مدل‌های مختلفی برای بیان روابط آب در خاک ارائه شده است. از آنجایی که در کشاورزی در غالب مواقع خاک در حالت غیراشباع می‌باشد، لذا بحث پیرامون روابط آب در خاک در حالت غیراشباع از اهمیت بیشتری برخوردار است. در تمام معادلات ارائه شده در این زمینه، ضریبی وجود دارند، که به‌عنوان ضرایب ثابت معادله در نظر گرفته می‌شوند. در پژوهش‌هایی که در زمینه روابط آب و خاک انجام می‌گیرد، این ضرایب را عوامل هیدرولیکی می‌نامند. در میان معادلات ارائه شده معادله ون‌گنوختن از سایرین پرکاربردتر می‌باشد، به همین دلیل ضرایب این معادله شامل  $a_v$  ضریب ثابت  $(m^{-1})$ ،  $n_v$  ضریب ثابت (بدون بعد)،  $\theta_r$  و  $\theta_s$  به‌ترتیب بیانگر رطوبت باقی‌مانده و رطوبت اشباع  $(m^3 m^{-3})$  به‌همراه هدایت هیدرولیکی اشباع خاک  $(k_s, ms^{-1})$  به‌عنوان عوامل هیدرولیکی خاک شناخته می‌شوند. اهمیت تعیین عوامل هیدرولیکی خاک از آن رو است که با داشتن این عوامل و همچنین حل معادله ریچاردز می‌توان مقدار رطوبت را در زمان‌های مختلف پیش‌بینی نمود. در علوم آب و خاک، تعیین پارامترهای هیدرولیکی خاک و در پی آن یافتن منحنی مشخصه و هدایت هیدرولیکی خاک، نقش مهمی در محاسبات مربوط به این علوم دارد که از جمله این موارد می‌توان به طراحی سیستم‌های آبیاری و زهکشی، انتقال آلاینده‌ها در خاک و مسائل هیدرولوژی اشاره کرد.

برای برآورد عوامل هیدرولیکی خاک روش‌های گوناگونی ارائه شده است که از آن جمله می‌توان به روابط تجربی، روابط تحلیلی و همچنین روش‌های معکوس اشاره نمود. از آنجایی که استفاده از روابط تجربی و تحلیلی با دشواری‌هایی پرشمار همراه است، استفاده از روش معکوس مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. در اغلب مدل‌های معکوس، مقدار رطوبت خاک تنها از حالت اشباع تا ظرفیت زراعی برآورد می‌گردد و انتقال بخار و انرژی حرارتی در انتقال رطوبت خاک مدنظر نیست. در واقع، در روش معکوس، از داده‌های مقدار آب خاک

مقدار رطوبت و دمای خاک در شرایط زمین بایر در اعماق مختلف ارائه شد (۳). این مدل در محیط برنامه نویسی Visual Studio C# بازنویسی گردید. فلوجارت مدل جدید، همراه با روش بهینه‌سازی پارامترهای هیدرولیکی معادله ون‌گنوختن در خاک در شکل (۱) آورده شده است. این مدل شامل یک برنامه اصلی و زیربرنامه‌های آب خاک، دمای خاک، تابش خورشیدی، تابش خالص خورشیدی، تبخیر و گرمای محسوس می‌باشد.

### حرکت آب مایع و بخار آب

آب در خاک در جهت گرادیان هیدرولیکی حرکت می‌کند. معادله حاکم بر حرکت آب در خاک در شرایط اشباع و غیراشباع، معادله داری می‌باشد (۷). معادله حاکم بر حرکت یک‌بعدی آب مایع و بخار آب در منافذ خاک (درجهت عمودی و منفی در جهت پایین) به صورت زیر است (۱۲):

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\frac{\partial q_L}{\partial z} - \frac{\partial q_v}{\partial z} - SW \quad [1]$$

که در آن  $\theta$  رطوبت حجمی کل ( $m^3 m^{-3}$ )،  $q_L$  و  $q_v$  به ترتیب جریان آب مایع و بخار آب ( $ms^{-1}$ )،  $t$  زمان ( $s$ )،  $z$  مختصات عمودی مثبت در جهت رو به بالا ( $m$ ) و  $SW$  میزان جذب (که به‌طور معمول عبارت است از جذب آب توسط ریشه در واحد حجم در واحد زمان) ( $s^{-1}$ ) می‌باشند. رطوبت حجمی کل به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$\theta = \theta_L + \theta_v \quad [2]$$

که در آن  $\theta_L$  رطوبت حجمی آب به صورت مایع ( $m^3 m^{-3}$ ) و  $\theta_v$  رطوبت حجمی بخار آب ( $m^3 m^{-3}$ ) می‌باشند. با شبیه‌سازی جریان آب به صورت مایع تحت اثر ثقل و دمای خاک و همچنین جریان بخار آب در نهایت تغییرات رطوبت خاک شبیه‌سازی می‌گردد که مشروح آن در کمالی و زندپارسا آمده است (۸).

### انتقال گرما در خاک

مدل انتقال گرما، تفکیک انرژی گرمایی در لایه سطحی خاک و

شبیه‌سازی شده به وسیله IPSO با  $R^2$  برابر ۰/۹۹ بسیار نزدیک به مقادیر اندازه‌گیری شده بودند. این در حالی است که در تمام الگوریتم‌ها، مقدار رطوبت باقی مانده خاک ( $\theta_r$ ) قابل به دست آوردن نبود.

کمالی و زندپارسا مدل EISHP را جهت برآورد پارامترهای هیدرولیکی خاک به روش معکوس با استفاده از بهینه نمودن هر پارامتر در شرایط مزرعه ارائه نمودند (۸). ایشان از یک نوع روش ریاضی برای کمینه کردن تابع هدف استفاده کردند. مدل ارائه شده توسط ایشان، بر خلاف مدل ESHPM2، در ازای ورودی‌های مختلف، جواب‌های یگانه‌ای نتیجه داد. نکته قابل توجه این بود که تفاوت‌های ناچیز تابع هدف می‌توانست باعث ایجاد تفاوتی چشمگیر در پارامترهای هیدرولیکی شود. در این مدل، بهینه‌سازی  $\theta_r$  و  $\theta_s$  به صورت همزمان نتایج مطلوبی حاصل نمی‌کرد. بنابراین Kamali و Zand-Parsa پیشنهاد نمودند که مقادیر هر دو پارامتر از اندازه‌گیری به دست آیند و در بهینه‌سازی دخالت داده نشوند (۸).

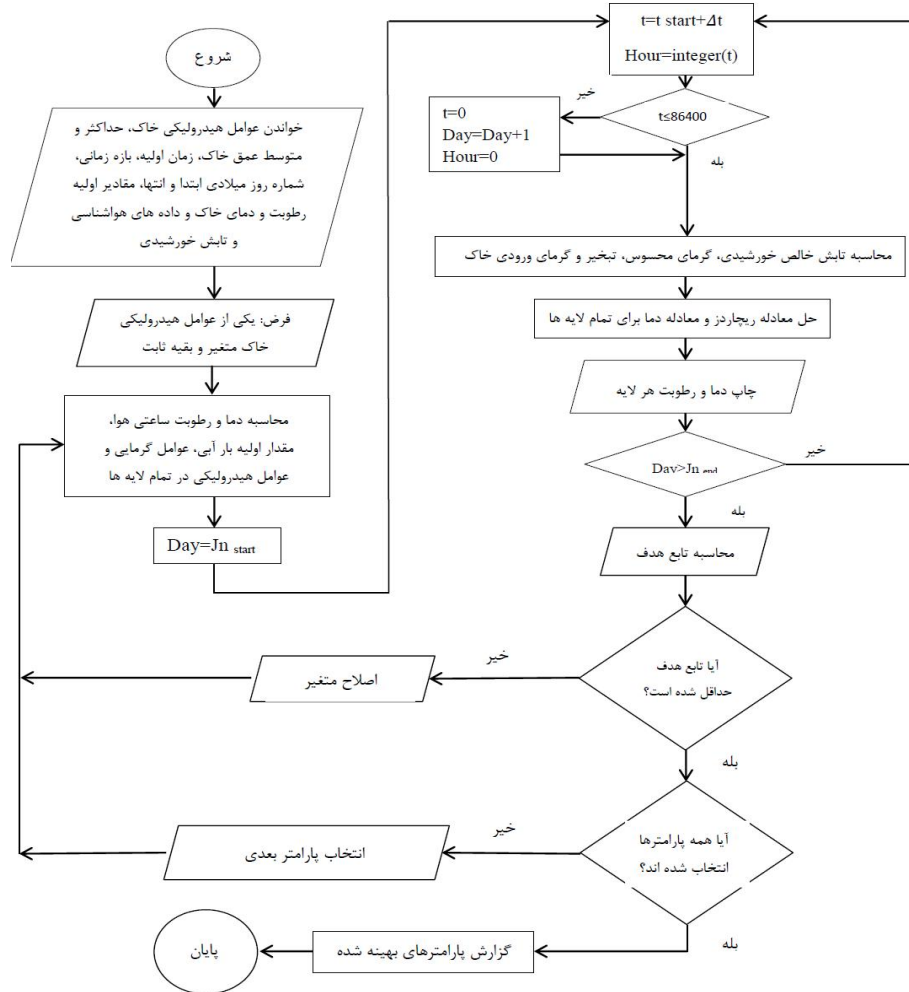
Banimahd و Zand-Parsa برای برآورد نیم‌رخ رطوبت و دمای خاک با منظور کردن جریان مایع و بخار آب در شرایط زمین بایر، مدل SWCT (Soil Water Content and Temperature) را ارائه نمودند (۳). در این مدل، مقدار رطوبت خاک از حالت اشباع تا رطوبت هواخشک برآورد شده و محدوده وسیع‌تری را نسبت به سایر مدل‌ها در بر می‌گیرد. در مدل SWCT، معادلات با روش عددی تفاضل‌های محدود حل شده و مقادیر رطوبت و دمای خاک در اعماق و زمان‌های مختلف برآورد می‌شوند.

با توجه به موارد ذکر شده، در پژوهش حاضر، برای برآورد پارامترهای هیدرولیکی معادله ون‌گنوختن در خاک با استفاده از روش بهینه‌سازی هر پارامتر، از مدل SWCT استفاده گردید که انتقال بخار و انرژی حرارتی را در انتقال رطوبت خاک در نظر می‌گیرد.

### مواد و روش‌ها

#### ساختار مدل

مدل SWCT در محیط برنامه‌نویسی Visual Basic 6.0 برای برآورد



شکل ۱. فلوجارت مدل SWCT همراه با روش بهینه‌سازی عوامل هیدرولیکی معادله ون‌گنوختن در خاک

### تبادل انرژی سطحی

بارش، آبیاری، تبخیر و جریان‌های گرمایی سطحی به‌عنوان شرایط مرزی برای جریان آب مایع، بخار آب و انتقال گرما در خاک‌های مزرعه‌ای به کار برده می‌شوند. تبخیر و جریان گرما می‌تواند از تعادل انرژی سطحی به‌صورت زیر محاسبه شود (۵)، (۱۰ و ۱۳):

$$R_n - H - LE - G = 0 \quad [4]$$

که  $R_n$  تابش خالص ( $Jm^{-2}s^{-1}$ )،  $H$  گرمای محسوس ( $Jm^{-2}s^{-1}$ )،  $LE$  جریان گرمای نهان تبخیر ( $Jm^{-2}s^{-1}$ ) و  $G$  جریان گرمای خاک ( $Jm^{-2}s^{-1}$ ) می‌باشند.  $R_n$  و  $G$  در جهت رو به پایین مثبت و  $H$  و  $LE$  در جهت رو به بالا مثبت هستند.

توزیع دمای خاک را توصیف می‌نماید. تفکیک انرژی گرمایی در لایه سطحی خاک و در نتیجه توزیع دما به‌طور مستقیم یا غیرمستقیم بر رشد گیاهان و بسیاری از فعالیت‌های بیولوژیک، شیمیایی و فیزیکی خاک تأثیر می‌گذارد (۴). معادله حاکم بر حرکت انرژی گرمایی در خاک‌های با رطوبت مختلف به قرار زیر است (۱۲):

$$\frac{\partial S_h}{\partial t} = -\frac{\partial q_h}{\partial z} - Q \quad [3]$$

که  $S_h$  ذخیره گرما در خاک ( $Jm^{-3}$ )،  $q_h$  جریان گرمایی کل ( $Jm^{-2}s^{-1}$ ) و  $Q$  مقدار انرژی جذب شده یا خارج شده ( $Jm^{-3}s^{-1}$ ) می‌باشند.

## تابش

مخصوص هوا در فشار ثابت  $(\text{kgm}^{-3})$ ،  $C_p$  گرمای ویژه در فشار ثابت  $(\text{MJkg}^{-1}\text{°C}^{-1})$ ،  $e_a$  و  $e_{sv}$  به ترتیب فشار بخار سطح خاک و هوا  $(\text{kPa})$ ،  $r_a$  مقاومت آئروپنمیک و  $r_s$  مقاومت سطحی خاک در برابر تبخیر  $(\text{sm}^{-1})$  و  $\gamma_s$  ثابت سایکرومتری  $(\text{kPa}^\circ\text{C}^{-1})$  می‌باشند.

## تابع هدف

برای برآورد پارامترهای هیدرولیکی خاک به روش معکوس بایستی مقادیر به‌دست آمده از روش اندازه‌گیری، با مقادیر برآورد شده توسط مدل، با یکدیگر مقایسه شوند. مقایسه بین مقادیر اندازه‌گیری شده و برآورد شده، توسط یک تابع هدف انجام می‌پذیرد. مقادیر اندازه‌گیری شده می‌تواند رطوبت خاک، فشار آب خاک، دبی خروجی و هر پارامتر مرتبط با منحنی مشخصه آب خاک را شامل شوند. برای به‌دست آوردن مناسب‌ترین مقادیر برآوردی، بایستی از یک سری معادلاتی که خروجی متناسب با مقادیر اندازه‌گیری شده را می‌دهند، استفاده نمود. در پژوهش حاضر، به‌علت اینکه مقادیر اندازه‌گیری شامل رطوبت و دمای خاک می‌باشند، لذا از معادله ریچاردز (۱۱) و ون‌گونختن و همکاران (۱۴) استفاده گردید. با توجه به مطالب بیان شده، در روش معکوس، نحوه کار به این شکل است که پارامترهای هیدرولیکی خاک  $(\alpha_v, n_v, K_s, \theta_r, \theta_s)$  را بایستی طوری برآورد نمود که تابع هدف یا مقدار RMSE به مقدار حداقل خود برسد. تابع هدف به‌صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$\text{RMSE} = \left( \frac{\sum_{i=1}^{n_1} \sum_{j=1}^{n_2} (\theta_{i,j}^o - \theta_{i,j}^c)^2}{n_1 \times n_2} \right)^{1/5} \quad [8]$$

که  $\theta$  رطوبت خاک  $(\text{m}^3\text{m}^{-3})$ ،  $n_1$  تعداد مراحل اندازه‌گیری و  $n_2$  تعداد لایه‌هایی که در آنها رطوبت خاک اندازه‌گیری شده است، می‌باشند. همچنین بالانویس‌های 0 و c به ترتیب نشان‌دهنده مقادیر اندازه‌گیری شده و برآورد شده رطوبت خاک می‌باشند. از معادله (۹) مشخص می‌شود که تابع هدف به مقادیر رطوبت خاک بستگی داشته و از آنجایی که مقدار

تابشی که به یک سطح عمود بر پرتوهای خورشیدی در بالای جو زمین برخورد می‌کند ثابت خورشیدی نامیده می‌شود و در حدود  $0.82 \text{ MJm}^{-2} \text{ min}^{-1}$  می‌باشد. مقدار تابش بیرون جو وابسته به زاویه بین پرتوهای خورشید و سطح زمین می‌باشد. این زاویه در طول روز و در عرض‌های جغرافیایی متفاوت در فصل‌های مختلف تغییر می‌کند. Allen و همکاران تابش خورشیدی رسیده به سطح افقی در بالای جو زمین را به‌عنوان تابش بیرون جو ( $R_a$ ) تعریف کردند (۲). مقدار آن برای دوره زمانی ساعتی یا کمتر از معادله ارائه شده توسط آلن و همکاران (۲) محاسبه می‌گردد. یکی از معادلات ارائه شده برای برآورد تابش خورشیدی، معادله Angstrom-PreScott می‌باشد. این معادله برای منطقه باجگاه با در نظر گرفتن ساعات سوختگی کارت آفتاب‌نگار، برای برآورد تابش خورشیدی به شکل زیر اصلاح شده است:

$$R_s = R_a \left( 0.346 + 0.495 \frac{t_s}{6} \right) \quad [5]$$

که  $R_s$  تابش خورشیدی یا تابش طول موج کوتاه  $(\text{Jm}^{-2}\text{s}^{-1})$  و  $t_s$  مدت زمان سوخته شدن کارت آفتاب‌نگار در هر ساعت است (min). در نهایت، تابش خالص  $(R_n, \text{Wm}^{-2})$  به‌صورت زیر تعیین می‌گردد (۶):

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad [6]$$

که  $R_{ns}$  تابش خالص با طول موج کوتاه  $(\text{Wm}^{-2})$  و  $R_{nl}$  تابش خالص با طول موج بلند  $(\text{Wm}^{-2})$  می‌باشند. در این پژوهش، جریان گرمای نهان تبخیر  $\text{MJm}^{-2}\text{s}^{-1}$  خاک بایر با استفاده از معادله پنمن-مانتیت برآورد گردیده و هر دو مقاومت  $r_s$  و  $r_a$  مطابق روش Kamali و Zand-Parsa (۸) به شکل زیر برآورد می‌شوند:

$$\text{LE} = \frac{\Delta(R_n - G) + \rho_a C_p ((e_{sv} - e_a) / r_a)}{\Delta + \gamma_s (1 + (r_s / r_a))} \quad [7]$$

که  $\Delta$  شیب منحنی فشار بخار اشباع در برابر دمای خاک  $(\text{kPa}^\circ\text{C}^{-1})$ ،  $R_n$  تابش خالص  $(\text{MJm}^{-2}\text{s}^{-1})$ ،  $G$  جریان گرمای سطحی خاک  $(\text{MJm}^{-2}\text{s}^{-1})$ ،  $\rho_a$  میانگین جرم

خاک توسط دستگاه دمانگار نوع 258 Ua ساخت شرکت Lambrecht کشور آلمان انجام شد. پروب‌های دستگاه TDR در سه عمق ۵، ۳۵ و ۷۰ سانتی‌متر خاک و حسگرهای دستگاه دمانگار در عمق‌های ۵، ۱۵ و ۲۵ سانتی‌متر قرار گرفتند. داده‌های هواشناسی از قبیل دمای حداقل و حداکثر، رطوبت نسبی حداقل و حداکثر، سرعت باد و بارش در ماه‌های مختلف به کار رفته شده در مدل در سال ۱۳۹۴ از ایستگاه هواشناسی دانشکده کشاورزی دانشگاه شیراز جمع‌آوری شده است. برای واسنجی مدل از داده‌های فوق استفاده شد.

#### بررسی آماری بین نتایج اندازه‌گیری شده و برآورد شده

اولین شاخص آماری که برای برآورد کردن عملکرد مدل به کار گرفته می‌شود شاخص توافق می‌باشد که به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad [9]$$

که  $P_i$  مقدار برآورد شده توسط مدل و  $O_i$  مقدار اندازه‌گیری شده با میانگین  $\bar{O}$  می‌باشد. شاخص  $d$  بین صفر و یک متغیر است و زمانی توافق بهتری را بین داده‌های اندازه‌گیری شده و برآورد شده نشان می‌دهد که به یک نزدیک‌تر باشد (۱۵).

پارامتر آماری دیگری که برای ارزیابی صحت مدل به کار گرفته می‌شود عبارت است از مقدار نرمال شده جذر میانگین مربعات خطا که به صورت زیر بیان می‌گردد:

$$NRMSE = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}}}{\bar{O}} \quad [10]$$

که  $P_i$  و  $O_i$  به ترتیب مقادیر برآورد شده و اندازه‌گیری شده پارامترها،  $n$  تعداد کل داده‌ها و  $\bar{O}$  متوسط مقادیر اندازه‌گیری شده می‌باشند. NRMSE تفاوت نسبی داده‌های برآورد شده را در برابر داده‌های اندازه‌گیری شده نشان می‌دهد. مقادیر برآورد شده شامل بسیار خوب با NRMSE کمتر از ۰/۱، خوب با

رطوبت خاک نیز به خصوصیات هیدرولیکی خاک وابسته است، لذا می‌توان بیان داشت که تابع هدف به صورت تابعی از خصوصیات هیدرولیکی خاک قابل تعریف می‌باشد. از این رو تابع هدف را می‌توان به صورت جداگانه بهینه نمود.

#### روش بهینه‌سازی

برای یافتن خصوصیات هیدرولیکی خاک به روش معکوس، نیاز به یک روش بهینه‌سازی می‌باشد. در این پژوهش از روش ارائه شده توسط کمالی و زندپارسا (۸) برای حداقل کردن تابع هدف استفاده گردید. در این روش، فرض شد که معادله ریچاردز، تابعی است از یک پارامتر (به عنوان مثال هدایت هیدرولیکی اشباع خاک)، و بقیه پارامترها دارای مقدار ثابتی هستند (که به طور فرضی در ابتدای حل وارد معادله شدند). در این حالت، مقدار حداقل تابع هدف تعیین گردید. پس از این مرحله، مشابه این کار برای پارامترهای دیگر انجام شد. پس از اینکه این کار برای تمام پارامترها انجام شد، مجدداً همین سیکل، تا زمانی که تغییرات تابع هدف ناچیز گردد، تکرار شد.

#### اندازه‌گیری‌های مزرعه‌ای

در این پژوهش، برای برآورد پارامترهای هیدرولیکی خاک، با در نظر گرفتن تبخیر از سطح خاک بایر، کرتی با ابعاد  $1 \times 1$  متر، بدون گیاه، در ضلع شمال غربی ایستگاه هواشناسی دانشکده کشاورزی دانشگاه شیراز واقع در  $16$  کیلومتری شمال شرقی شیراز با طول جغرافیایی  $52^{\circ} 32'$  و عرض جغرافیایی  $29^{\circ} 36'$  و ارتفاع  $1810$  متر از سطح دریا، برای انجام اندازه‌گیری‌ها انتخاب شد. در کرت مذکور، تا عمق حدوداً یک متر، رطوبت خاک نزدیک به اشباع رسانیده شد. به دلیل پایین بودن سطح ایستابی، خاک دارای زهکشی آزاد بوده و باران‌های زمستانه نفوذ یافته در خاک با وجود زهکشی ثقلی در خاک ذخیره شد. لایه سطحی خاک در مقابل تابش مستقیم خورشید قرار گرفته و در اثر تابش رطوبت خاک تبخیر گردید. اندازه‌گیری رطوبت توسط دستگاه TDR و اندازه‌گیری دمای

هیدرولیکی خاک شامل  $\alpha_v$ ،  $n_v$  و  $K_s$  با استفاده از مدل بهینه گردیدند و مقادیر دو پارامتر رطوبت اشباع خاک و رطوبت باقی مانده در بهینه‌سازی دخالت داده نشدند. برای اطمینان از یگانه بودن نتایج حاصل، بهینه‌یابی  $10^6$  مرتبه با مقادیر مختلف  $\alpha_v$ ،  $n_v$  و  $K_s$  تکرار گردید. نتایج حاصل نشان داد که مقادیر بهینه شده پارامترهای فوق از تکرارهای مختلف با هم برابر و برای پارامترهای  $\alpha_v$ ،  $n_v$  و  $K_s$  به ترتیب برابر  $1/269 \text{ m}^{-1}$ ،  $1/312$  و  $2/31 \times 10^{-6} \text{ ms}^{-1}$  بودند. در ادامه، برای بررسی بهتر نتایج، بین مقادیر به دست آمده برای پارامترهای هیدرولیکی و مقدار تابع هدف متناظر ارائه شده توسط مدل SWCT و نتایجی که در گذشته توسط مدل‌های ESHPM2، ESHPM4 و ESHPM5 به دست آمده است، مقایسه‌ای صورت گرفت. این نتایج به شکل جدول (۱) گزارش شده است.

در ردیف اول از جدول (۱)، از داده‌های حاصل از آزمایش کیف بوختر و سلول فشاری نمونه خاک سری دانشکده (۸) استفاده شده است. این داده‌ها در برنامه RETC وارد گردیده و مقادیر بهینه  $\alpha_v$ ،  $n_v$  و  $\theta_r$  به دست آمده است. در این حالت نیز، به دلیل آنکه مقدار رطوبت اشباع در اختیار بوده، از بهینه نمودن این پارامتر خودداری شده است. در ردیف دوم، از داده‌های حاصل از آزمایش در مزرعه برای به دست آوردن پارامترهای هیدرولیکی به وسیله برنامه RETC (۸) استفاده شده است. در این حالت، مقدار هدایت هیدرولیکی اشباع توسط مهبد (۹) به وسیله نفوذ سنج گلف گزارش شده است. ردیف سوم جدول فوق، مربوط به پارامترهای بهینه شده از مدل ESHPM2 می‌باشد که توسط مهبد و زندپارسا (۹) گزارش شده است و در آن مقدار رطوبت باقی مانده برابر  $0/1$  فرض شده بود.

در ردیف‌های چهارم، پنجم و ششم نتایج حاصل از مدل ESHPM4 (۸) در سه حالت الف) سه عامل بهینه  $\alpha_v$ ،  $n_v$  و  $K_s$  و  $\theta_r = 0/1$  در حالت اول، ب) چهار عامل بهینه شده  $\alpha_v$ ،  $n_v$ ،  $K_s$  و  $\theta_r$  در حالت دوم و ج) سه عامل بهینه  $\alpha_v$ ،  $n_v$  و  $K_s$  و برآورد مقدار  $\theta_r = 0/068$  از منحنی مشخصه آب

NRMSE بین  $0/1$  الی  $0/2$ ، نسبتاً خوب با NRMSE بین  $0/2$  الی  $0/3$  و بد با NRMSE بزرگ‌تر از  $0/3$  می‌باشند.

پارامتر بعدی، میانگین خطای اریب است که به صورت زیر محاسبه می‌شود (۱۵):

$$MBE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i) \quad [11]$$

زمانی که میانگین خطای اریب (MBE) صفر باشد، نشان‌دهنده این است که متوسط مقادیر اندازه‌گیری شده و برآورد شده برابر هستند. اگر مقدار MBE مثبت گردد، یعنی مقادیر برآورد شده از مقادیر اندازه‌گیری شده بیشتر می‌باشند و اگر MBE منفی گردد، یعنی مقادیر برآورد شده از مقادیر اندازه‌گیری شده کمتر می‌باشند.

پارامتر آماری چهارم که برای ارزیابی صحت مدل به کار گرفته شدند عبارت است از میانگین مربعات خطا:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}} \quad [12]$$

هرچه مقدار RMSE کمتر باشد نشانه تطابق بهتر مدل با مقادیر اندازه‌گیری شده می‌باشد.

## نتایج و بحث

بهینه‌سازی پارامترهای منحنی مشخصه آب خاک با استفاده از

### مدل SWCT

مدل SWCT، با اعمال داده‌های ورودی مورد نیاز شامل داده‌های هواشناسی، پارامترهای هیدرولیکی فرضی خاک شامل  $\alpha_v$ ،  $n_v$  و  $K_s$ ، دما و رطوبت اولیه خاک در اعماق مورد بررسی با در نظر گرفتن حرکت بخار آب در خاک اجرا گردید. از آنجایی که مقدار رطوبت اشباع خاک ( $\theta_s$ ) نیز مورد نیاز است، از مقادیر گزارش شده توسط مهبد (۹) استفاده شد. مقدار میانگین مقادیر ذکر شده به عنوان رطوبت اشباع خاک سری دانشکده، در ورودی مدل SWCT قرار گرفت. مقدار رطوبت باقی مانده ( $\theta_r$ ) به دست آمده براساس منحنی مشخصه اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه با استفاده از سلول فشاری و قرار دادن اطلاعات در مدل RETC نیز به عنوان ورودی در مدل استفاده گردید. سپس پارامترهای

جدول ۱. مقایسه بین مقادیر تابع هدف (RMSE) به دست آمده از مدل SWCT با در نظر گرفتن حرکت بخار آب در خاک، برای سه عامل بهینه شده  $\alpha_v$ ،  $n_v$  و  $K_s$  با مقادیر به دست آمده از مدل‌های ESHPM2، ESHPM4 و ESHPM5 در محدوده رطوبتی خاک بین

#### حالت‌های اشباع تا ظرفیت زراعی

$\theta_r$	$\theta_s$	$n_v$	$\alpha_v$	$K_s$	RMSE	روش
( $m^3 m^{-3}$ )	( $m^3 m^{-3}$ )		( $m^{-1}$ )	( $m s^{-1}$ )	( $m^3 m^{-3}$ )	
۰/۰۶۸	۰/۴۳	۱/۳۸۶	۱/۳۱۳	-	-	RETIC با اطلاعات آزمایشگاه
۰/۰۰۰	۰/۴۳	۱/۵۶۸	۰/۷۱۰	$3/12 \times 10^{-6}$	-	RETIC با اطلاعات مزرعه
۰/۱۰۰	۰/۴۳	۱/۳۱۸	۱/۳۹۵	$2/62 \times 10^{-6}$	$3/453 \times 10^{-2}$	مهید، حالت اول
۰/۱۰۰	۰/۴۳	۱/۳۳۲	۱/۳۶۳	$2/35 \times 10^{-6}$	$3/416 \times 10^{-2}$	کمالی، حالت اول
۰/۰۰۰	۰/۴۳	۱/۲۸۵	۱/۱۴۵	$2/26 \times 10^{-6}$	$3/367 \times 10^{-2}$	کمالی، حالت دوم
۰/۰۶۸	۰/۴۳	۱/۳۱۸	۱/۲۹۸	$2/32 \times 10^{-6}$	$3/402 \times 10^{-2}$	کمالی، حالت سوم
۰/۱۰۰	۰/۴۳	۱/۳۴۸	۱/۲۵۹	$9/27 \times 10^{-6}$	$3/394 \times 10^{-2}$	میرصفی، حالت اول
۰/۰۶۸	۰/۴۳	۱/۳۲۳	۱/۱۹۵	$8/53 \times 10^{-7}$	$3/372 \times 10^{-2}$	میرصفی، حالت سوم
۰/۰۶۸	۰/۴۳	۱/۳۱۲	۱/۲۶۹	$2/31 \times 10^{-6}$	$3/233 \times 10^{-2}$	SWCT

رطوبتی از ۰/۰۶۸ تا ۰/۴۳ برآورد شدند. این در حالی است که در سایر مدل‌ها رطوبت خاک در محدوده رطوبتی بین اشباع تا نقطه ظرفیت زراعی برآورد شدند. همان‌طور که در جدول (۱) ملاحظه می‌گردد، علت تفاوت در مقادیر پارامترها، تفاوت در تئوری و ماهیت مدل SWCT با مدل‌های فوق می‌باشد.

چنانچه در جدول (۱) مشاهده می‌گردد، هدایت هیدرولیکی برآورد شده در تمام حالت‌ها از مقدار اندازه‌گیری شده توسط نفوذسنج گلف کمتر می‌باشد. برای توجیه این مسئله می‌توان به این نکته اشاره نمود که هدایت هیدرولیکی اشباع به ساختمان خاک، به‌خصوص خلل و فرج درشت، وابستگی زیادی دارد و از آنجایی که اندازه‌گیری‌های رطوبت و فشار آب خاک انجام شده در مزرعه در حالت غیراشباع انجام شده است و در حالت غیراشباع خلل و فرج درشت خاک از آب تهی می‌شوند، لذا مقدار به دست آمده برای هدایت هیدرولیکی از حالت اشباع کمتر می‌باشد (۹).

#### رطوبت برآورد شده خاک

مدل SWCT با اعمال داده‌های ورودی مورد نیاز در اعماق

خاک در حالت سوم گردآوری شده است.

در ردیف‌های هفتم و هشتم، نتایج حاصل از مدل ESHPM5 (۱) در دو حالت الف) سه عامل بهینه  $\alpha_v$ ،  $n_v$  و  $K_s$  و  $\theta_r = 0/1$  در حالت اول و ب) سه عامل بهینه  $\alpha_v$ ،  $n_v$  و  $K_s$  و برآورد مقدار  $\theta_r = 0/068$  از منحنی مشخصه آب خاک در حالت سوم درج گردیده است.

در ردیف نهم از جدول فوق، نتایج حاصل از مدل SWCT ارائه گردیده است. از آنجایی که، تمام اندازه‌گیری‌های رطوبت و فشار آب خاک در مزرعه، در حالت‌های نزدیک به اشباع و ظرفیت زراعی بوده است، از این رو به نظر می‌رسد که برآورد مقدار رطوبت باقی‌مانده براساس اطلاعات رطوبتی به دست آمده از خاک در شرایط مزرعه، از نظر علمی صحیح نباشد و بهتر است رطوبت باقی‌مانده براساس اطلاعات اندازه‌گیری شده منحنی مشخصه رطوبتی خاک در آزمایشگاه یا مقدار برآورد شده برای بافت‌های مختلف خاک، به مدل داده شود. لذا در این پژوهش نیز، رطوبت باقی‌مانده در بهینه‌سازی دخالت داده نشد. در مدل SWCT پارامترهای هیدرولیکی خاک در محدوده

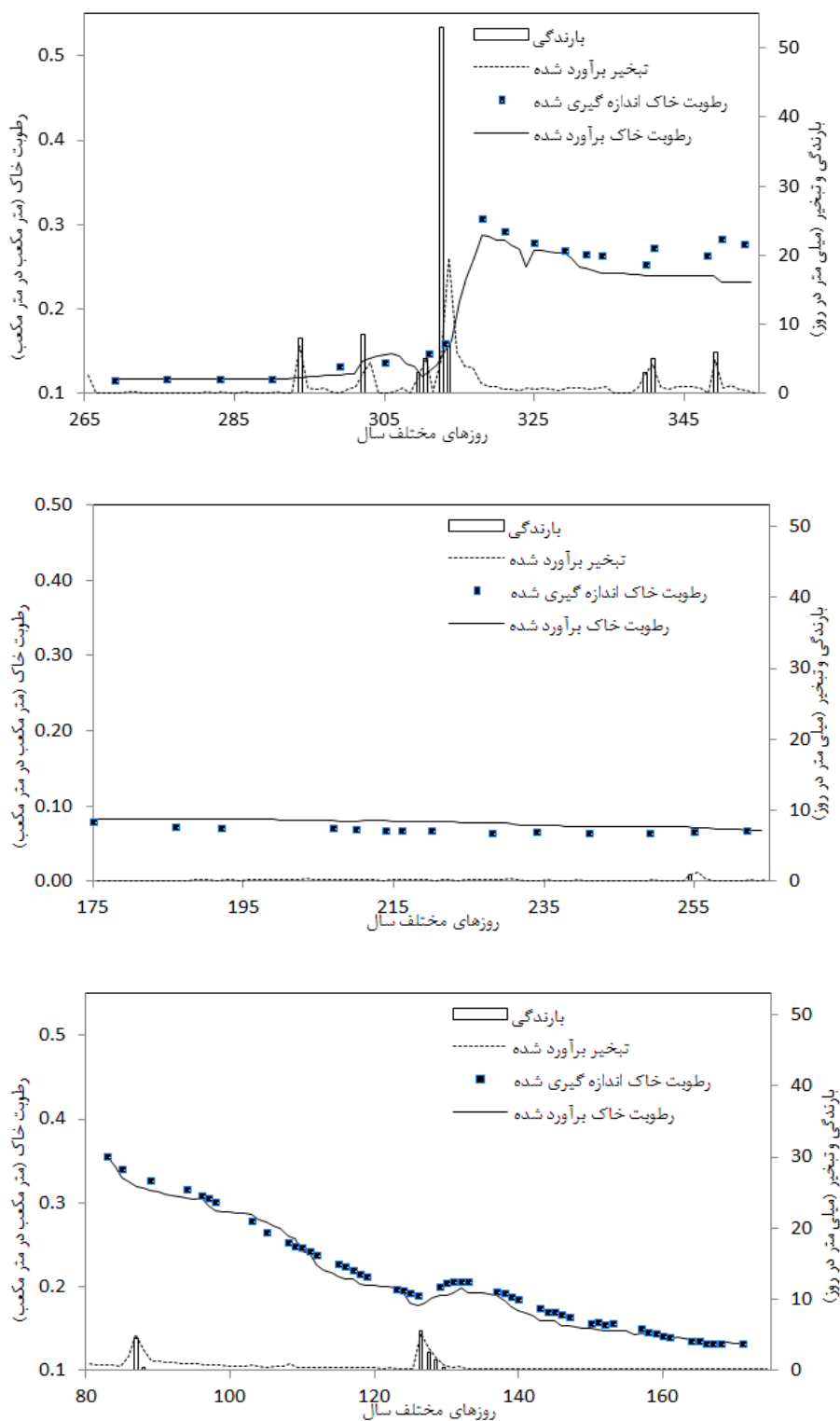


حرکت بخار آب کم می‌باشد، ولی این مقدار کم نیز در لایه سطحی در رطوبت‌های کم خاک نمایان می‌شود. از طرفی، اثر تبخیر در مدل تنها در لایه سطحی خاک وارد می‌گردد و باعث کاهش رطوبت خاک می‌شود. در نتیجه، کاهش رطوبت خاک در لایه‌های عمیق‌تر به شدت لایه سطحی نبوده و به کندی صورت می‌گیرد. بین مقادیر اندازه‌گیری شده و برآورد شده رطوبت خاک نزدیکی مناسبی وجود دارد تا جایی که رطوبت خاک خیلی کاهش نمی‌یابد و با کاهش رطوبت خاک این نزدیکی کمتر می‌گردد. در فصل بهار، در صورت نبودن بارش، با گذر زمان، رطوبت خاک با حرکت آب به سمت اعماق و تبخیر از سطح خاک کاهش می‌یابد و نتایج شبیه‌سازی شده مدل SWCT به خوبی قادر به نشان دادن روند این تغییرات می‌باشد. این در حالی است که مقدار برآورد شده با مقدار اندازه‌گیری شده آن اندکی تفاوت دارد و این موضوع در تمام لایه‌های مورد بررسی مشاهده می‌شود.

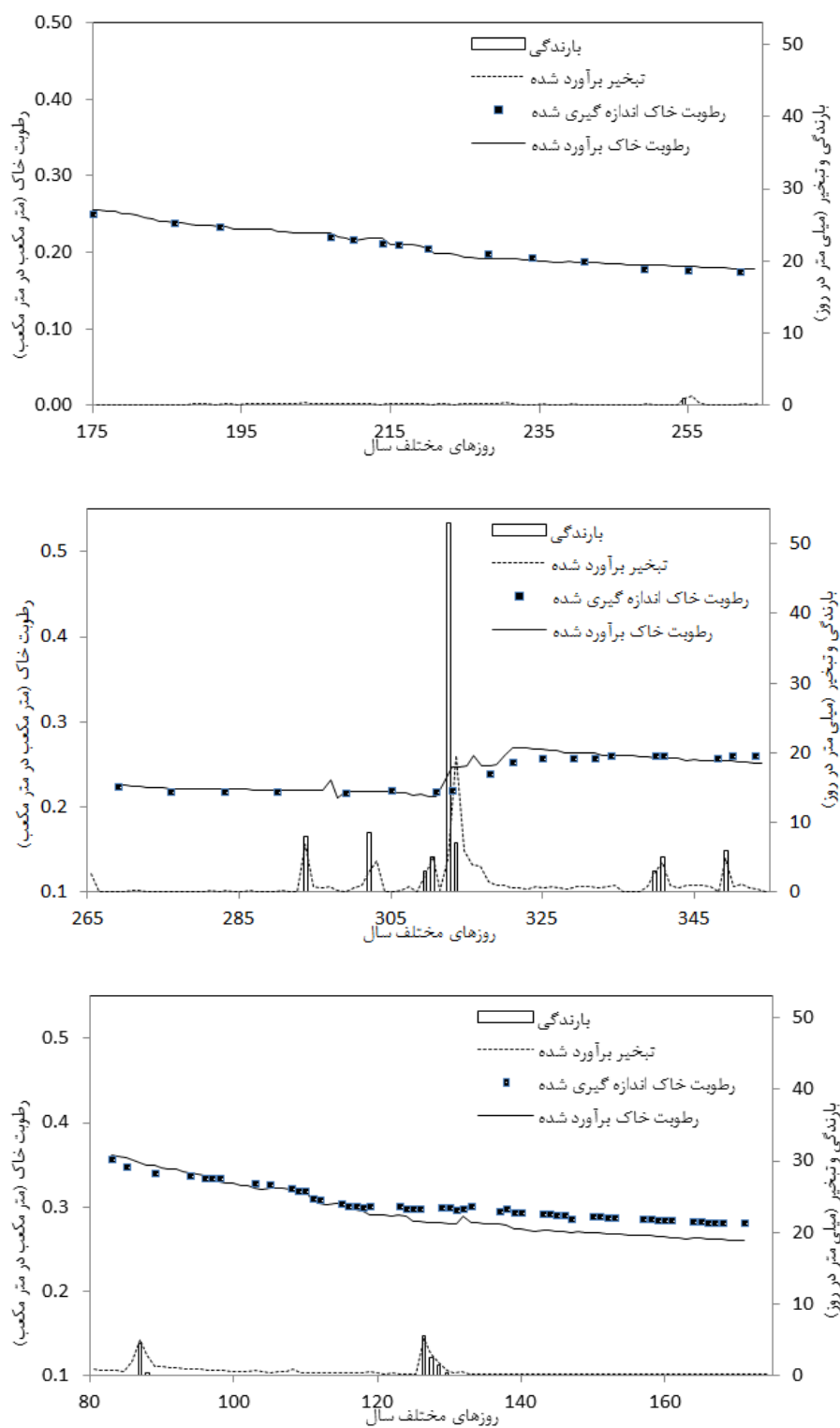
به دلیل اینکه تابع هدف تعریف شده در مدل، برای بهینه‌سازی پارامترهای منحنی مشخصه آب خاک براساس رطوبت خاک اندازه‌گیری شده و برآورد شده توسط مدل تعریف گردید، لذا برای مقایسه مقادیر رطوبت حجمی خاک اندازه‌گیری شده ( $\theta_m$ ) و برآورد شده ( $\theta_p$ ) با در نظر گرفتن حرکت بخار آب در خاک، از شاخص‌های آماری NRMSE، d، و MBE استفاده شد. نتایج حاصل از تحلیل‌های آماری در عمق ۵ سانتی‌متری خاک، با NRMSE برابر ۰/۰۹۰ و در اعماق ۳۵ و ۷۰ سانتی‌متری با NRMSE به ترتیب برابر ۰/۰۹۶ و ۰/۰۵۶ توافق بسیار خوبی را نشان دادند. این مقادیر دلیلی بر دقت مناسب مدل در برآورد رطوبت خاک و در نتیجه بهینه‌سازی مناسب پارامترهای هیدرولیکی خاک می‌باشند. مقدار شاخص توافق (d) در اعماق ۵، ۳۵ و ۷۰ سانتی‌متر به ترتیب برابر با ۰/، ۰/۸۹۶ و ۰/۸۹۴ می‌باشد که در واقع بیان‌کننده آن است که بین مقادیر اندازه‌گیری شده و برآورد شده رطوبت خاک با در نظر گرفتن حرکت بخار حداقل توافق برابر با ۸۹/۴ درصد می‌باشد که دلیل بر دقت خوب مدل در برآورد رطوبت ۹۹۰ خاک

مورد بررسی اجرا گردید و مقادیر رطوبت خاک با در نظر گرفتن حرکت بخار آب در خاک برآورد شد. از آنجایی که در این مدل برخلاف سایر مدل‌هایی که تاکنون در این زمینه ارائه شده است، مقدار تبخیر از سطح خاک را نیز در بهینه‌سازی پارامترهای هیدرولیکی خاک دخالت می‌دهد، لذا در این بخش از پژوهش، مقدار رطوبت خاک اندازه‌گیری شده و برآوردی توسط مدل SWCT، مقایسه می‌شوند. تغییرات بارش، تبخیر برآورد شده توسط مدل SWCT، رطوبت حجمی خاک اندازه‌گیری شده و برآورد شده با در نظر گرفتن حرکت بخار آب در خاک در عمق ۵، ۳۵ و ۷۰ سانتی‌متری در روزهای مختلف فصل بهار، تابستان و پاییز ۱۳۹۴ به ترتیب در شکل‌های (۲) الی (۴) نشان داده شده است.

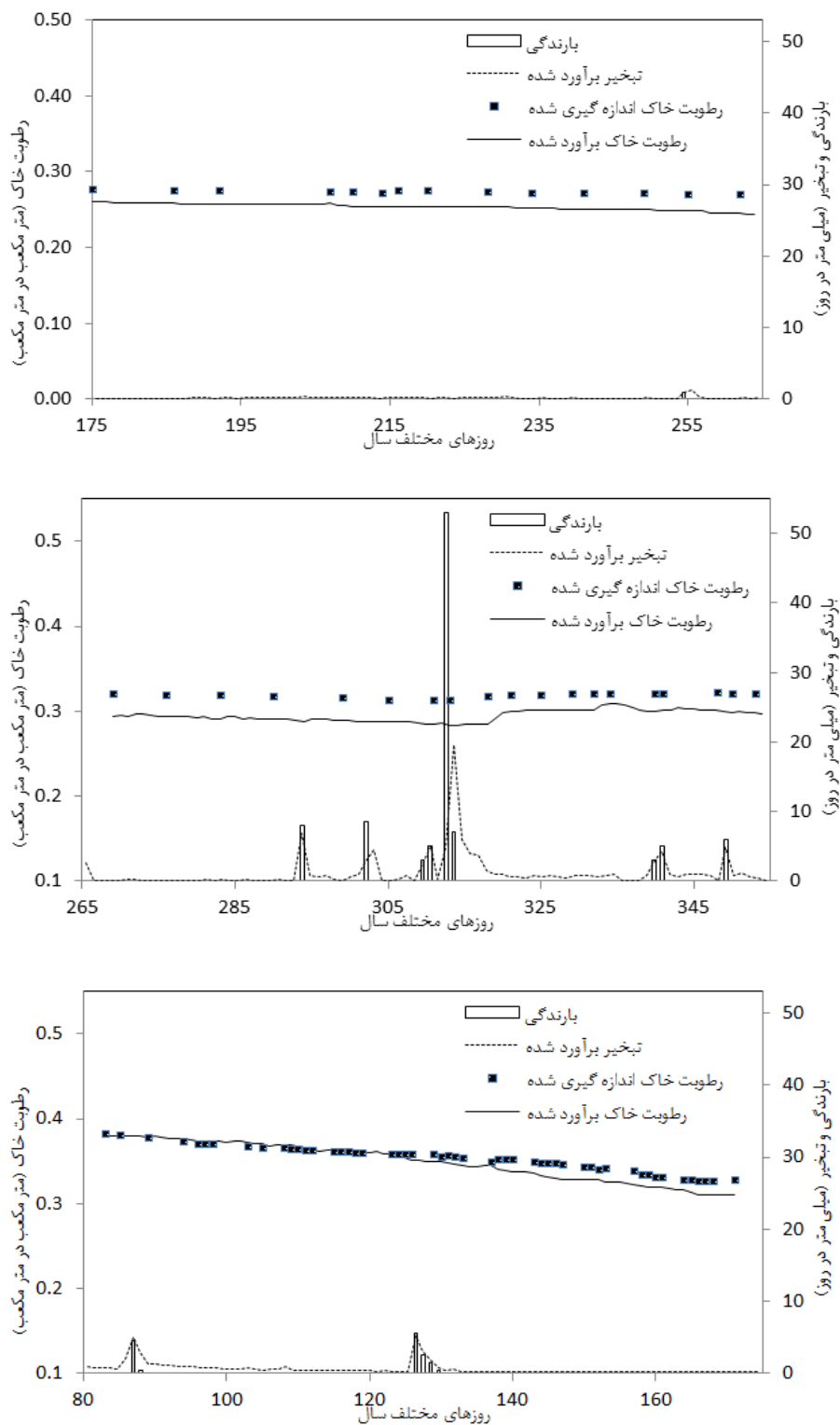
بارش و تبخیر بر تغییرات رطوبت خاک اثر دارند. بارش باعث افزایش رطوبت خاک شده و بعد از اتمام بارش، میزان رطوبت خاک کاهش می‌یابد. این تغییرات در عمق ۵ سانتی‌متری شکل (۲) به وضوح مشاهده می‌شود. اثر بارش (افزایش رطوبت) در اعماق پایین‌تر (۳۵ و ۷۰ سانتی‌متری) نسبت به عمق سطحی (۵ سانتی‌متری) تأخیر دارد. در اثر بارندگی، آب بلافاصله به لایه سطحی خاک نفوذ می‌کند و رطوبت خاک سریعاً در این لایه افزایش می‌یابد. تبخیر از سطح خاک و انتقال رطوبت خاک (به سمت اعماق) کاهش رطوبت در لایه سطحی را باعث می‌شود. انتقال آب به لایه‌های عمیق‌تر تحت تأثیر گرادیان هیدرولیکی (پتانسیل ثقلی و فشاری) انجام می‌گیرد. این انتقال آب از لایه‌های سطحی باعث افزایش رطوبت خاک در لایه‌های عمیق‌تر شده و به همین دلیل است که افزایش رطوبت در لایه‌های عمیق‌تر نسبت به لایه سطحی با تأخیر زمانی همراه است. همچنین کاهش رطوبت در لایه‌های خاک تحت تأثیر حرکت آب به صورت مایع و بخار می‌باشد که به علت بالا بودن رطوبت در لایه‌های پایین‌تر، انتقال آب به صورت بخار کمتر می‌باشد و مؤثرترین عامل کاهش رطوبت در لایه‌های عمیق خاک، انتقال آب به صورت مایع می‌باشد. هرچند در لایه سطحی خاک نیز مقدار انتقال رطوبت از طریق



شکل ۲. مقادیر بارندگی، تبخیر، رطوبت خاک اندازه گیری شده و برآورد شده با منظور کردن پارامترهای بهینه شده هیدرولیکی در مدل SWCT در عمق ۵ سانتی متری (بهار، تابستان و پاییز ۱۳۹۴)



شکل ۳. مقادیر بارندگی، تبخیر، رطوبت خاک اندازه‌گیری شده و برآورد شده با منظور کردن پارامترهای بهینه شده هیدرولیکی در مدل SWCT در عمق ۳۵ سانتی‌متری (بهار، تابستان و پاییز ۱۳۹۴)



شکل ۴. مقادیر بارندگی، تبخیر، رطوبت خاک اندازه گیری شده و برآورد شده با منظور کردن پارامترهای بهینه شده هیدرولیکی در مدل SWCT در عمق ۷۰ سانتی متری (بهار، تابستان و پاییز ۱۳۹۴)

جدول ۲. نتایج آزمون آماری رطوبت خاک در اعماق مختلف خاک با در نظر گرفتن حرکت بخار آب در خاک (بهار، تابستان و پاییز ۱۳۹۴)

عمق (cm)	MBE ( $m^3 m^{-3}$ )	NRMSE	d
۵	-۰/۰۰۵	۰/۰۹۰	۰/۹۹۰
۳۵	-۰/۰۱۴	۰/۰۹۶	۰/۸۹۶
۷۰	-۰/۰۱۳	۰/۰۵۶	۰/۸۹۴

جدول ۳. نتایج آزمون آماری دمای خاک در اعماق مختلف خاک با در نظر گرفتن حرکت بخار آب در خاک (بهار، تابستان و پاییز ۱۳۹۴)

عمق (cm)	MBE ( $^{\circ}C$ )	RMSE ( $^{\circ}C$ )	d
۵	۱/۵۵۵	۲/۰۰۰	۰/۹۹۰
۱۵	۰/۷۱۳	۱/۱۷۵	۰/۹۹۴
۲۵	۰/۶۷۵	۱/۴۷۴	۰/۹۸۹

می‌باشد. مقدار MBE در اعماق ۵، ۳۵ و ۷۰ سانتی‌متری به ترتیب برابر با -۰/۰۰۵، -۰/۰۱۴ و -۰/۰۱۳ محاسبه گردید. این مقادیر نشان‌دهنده اختلافی کم، مبنی بر دقت مناسب مدل در برآورد رطوبت خاک می‌باشد. نتایج تحلیل‌های آماری در جدول (۲) آورده شده است.

نتایج حاصل نشان داد که در نظر گرفتن حرکت بخار آب در لایه سطحی روی رطوبت خاک تأثیر دارد. زیرا در لایه سطحی، مقدار رطوبت خاک به اندازه‌ای کم می‌شود که می‌تواند حرکت پخشیدگی بخار را شامل شود و در لایه‌های عمیق‌تر که درصد رطوبت خاک بیشتر است حرکت بخار آب در مقدار رطوبت خاک، تأثیر قابل ملاحظه‌ای ندارد.

دمای برآورد شده خاک

با در نظر گرفتن حرکت بخار آب در خاک، برای بررسی نزدیکی مقادیر برآورد شده با مقادیر اندازه‌گیری شده دمای خاک از شاخص‌های RMSE، d و MBE استفاده شده و نتایج آن در جدول (۳) گزارش شده است. مقدار RMSE در عمق‌های ۵، ۱۵ و ۲۵ سانتی‌متری به ترتیب برابر ۲/۰۰۰، ۱/۱۷۵ و ۱/۴۷۴ درجه سانتی‌گراد است. مقدار این شاخص در عمق ۵ سانتی‌متری که تغییرات دمای خاک بسیار زیاد است مناسب بوده ولی در عمق‌های ۱۵ و ۲۵ سانتی‌متری خاک توافق بسیار مناسبی نشان می‌دهد. مقدار MBE در سه عمق ۵، ۱۵ و ۲۵ سانتی‌متری به ترتیب برابر با ۱/۵۵۵، ۰/۷۱۳ و ۰/۶۷۵ درجه سانتی‌گراد می‌باشد که در این حالت نیز اختلاف زیاد دمای اندازه‌گیری شده و برآورد شده در عمق ۵ سانتی‌متری بیشتر خود را نشان می‌دهد و در دو عمق ۱۵ و ۲۵ سانتی‌متری خاک توافق مناسبی بین مقادیر اندازه‌گیری شده و برآورد شده ارائه شد. این در حالی است که بنی‌مهد و زندپارسا (۳) در پژوهش خود مقدار دمای خاک را در دو فصل سرد و گرم با شاخص‌های RMSE و MBE به شکل جداگانه مورد بررسی قرار دادند و با توجه به مقدار خطای در حدود دو درجه سانتی‌گراد بیان نمودند که مقادیر برآورد شده در شبیه‌سازی نسبتاً مورد قبول بوده است. مقدار شاخص توافق (d) در عمق‌های ۵، ۱۵ و ۲۵ سانتی‌متری به ترتیب برابر با ۰/۹۹۰، ۰/۹۹۴ و ۰/۹۸۹ می‌باشد که این مقادیر بیانگر توافق خوب دمای خاک اندازه‌گیری شده و برآورد شده با مدل SWCT در

می‌باشد. مقدار MBE در اعماق ۵، ۳۵ و ۷۰ سانتی‌متری به ترتیب برابر با -۰/۰۰۵، -۰/۰۱۴ و -۰/۰۱۳ محاسبه گردید. این مقادیر نشان‌دهنده اختلافی کم، مبنی بر دقت مناسب مدل در برآورد رطوبت خاک می‌باشد. نتایج تحلیل‌های آماری در جدول (۲) آورده شده است.

نتایج حاصل نشان داد که در نظر گرفتن حرکت بخار آب در لایه سطحی روی رطوبت خاک تأثیر دارد. زیرا در لایه سطحی، مقدار رطوبت خاک به اندازه‌ای کم می‌شود که می‌تواند حرکت پخشیدگی بخار را شامل شود و در لایه‌های عمیق‌تر که درصد رطوبت خاک بیشتر است حرکت بخار آب در مقدار رطوبت خاک، تأثیر قابل ملاحظه‌ای ندارد.

#### دمای برآورد شده خاک

با در نظر گرفتن حرکت بخار آب در خاک، برای بررسی نزدیکی مقادیر برآورد شده با مقادیر اندازه‌گیری شده دمای خاک از شاخص‌های RMSE، d و MBE استفاده شده و نتایج آن در جدول (۳) گزارش شده است. مقدار RMSE در عمق‌های ۵، ۱۵ و ۲۵ سانتی‌متری به ترتیب برابر ۲/۰۰۰، ۱/۱۷۵ و ۱/۴۷۴ درجه سانتی‌گراد است. مقدار این شاخص در عمق ۵ سانتی‌متری که تغییرات دمای خاک بسیار زیاد است مناسب بوده ولی در عمق‌های ۱۵ و ۲۵ سانتی‌متری خاک توافق بسیار مناسبی نشان می‌دهد. مقدار MBE در سه عمق ۵، ۱۵ و ۲۵ سانتی‌متری به ترتیب برابر با ۱/۵۵۵، ۰/۷۱۳ و ۰/۶۷۵ درجه سانتی‌گراد می‌باشد که در این حالت نیز اختلاف زیاد دمای اندازه‌گیری شده و برآورد شده در عمق ۵ سانتی‌متری بیشتر خود را نشان می‌دهد و در دو عمق ۱۵ و ۲۵ سانتی‌متری خاک توافق مناسبی بین مقادیر اندازه‌گیری شده و برآورد شده ارائه شد. این در حالی است که بنی‌مهد و زندپارسا (۳) در پژوهش خود مقدار دمای خاک را در دو فصل سرد و گرم با شاخص‌های RMSE و MBE به شکل جداگانه مورد بررسی قرار دادند و با توجه به مقدار خطای در حدود دو درجه سانتی‌گراد بیان نمودند که مقادیر برآورد شده در شبیه‌سازی نسبتاً مورد قبول بوده است. مقدار شاخص توافق (d) در عمق‌های ۵، ۱۵ و ۲۵ سانتی‌متری به ترتیب برابر با ۰/۹۹۰، ۰/۹۹۴ و ۰/۹۸۹ می‌باشد که این مقادیر بیانگر توافق خوب دمای خاک اندازه‌گیری شده و برآورد شده با مدل SWCT در

در خاک در کل لایه‌ها ناچیز شده و در بهینه‌سازی پارامترهای هیدرولیکی خاک تأثیری نداشته و این پارامترها تنها تحت تأثیر حرکت آب مایع در خاک قرار گرفتند. در نهایت، با فرض یکنواختی خصوصیات فیزیکی خاک تا عمق ۷۰ سانتی‌متر، مقادیر برآورد شده رطوبت و دمای خاک در اعماق اندازه‌گیری شده توسط دستگاه TDR و اندازه‌گیری شده توسط دستگاه ثبات طی سه فصل بهار، تابستان و پاییز سال ۱۳۹۴ و اسنچی گردید.

سه فصل بهار، تابستان و پاییز ۱۳۹۴ رطوبتی خاک از حالت اشباع تا هواخشک و لحاظ کردن تبخیر در محاسبات لایه سطحی خاک، نسبت به مدل‌هایی که تاکنون در این زمینه ارائه شده‌اند، ارجحیت دارد. نتایج حاصل از خروجی مدل نشان داد که حرکت بخار آب در خاک، تنها در رطوبت لایه سطحی خاک و رطوبت‌های نزدیک به حالت هوا خشک تأثیر دارد. اما از آنجایی که مقدار تابع هدف براساس رطوبت خاک برآورد شده در تمام لایه‌ها تعریف گردیده، لذا تأثیر حرکت بخار آب

### منابع مورد استفاده

۱. میرصفی، ز. س. ۱۳۹۲. برآورد پارامترهای هیدرولیکی خاک با استفاده از سطح ویژه هوا - مایع در اطراف ذرات آن به روش معکوس. پایان‌نامه کارشناسی ارشد. بخش مهندسی آب. دانشکده کشاورزی. دانشگاه شیراز.
2. Allen, R. G., L. S. Pereira, D. Raes and M. Smith. 1998. Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements. Irrigation and Drainage Paper 56. FAO, Rome, 300(9), 1-15.
3. Banimahd S. A. and Sh. Zand-Parsa. 2013. Simulation of evaporation, coupled liquid water, water vapor and heat transport through the soil medium, Agric. Water. Manage. 130: 168-177.
4. Barber, S. A. and J. B. Peterson. 1995. Soil Nutrient Bioavailability a Mechanistic Approach. John Wiley and Sons. New Yourk.
5. Boulet, G., I. Braud and M. Vauclin. 1997. Study of the mechanisms of evaporation under arid conditions using a detailed model of the soil-atmosphere continuum. Application to the EFEDA I experiment. J. Hydro. 193(1): 114-141.
6. Brutsaert, W. 1982. Evaporation into the Atmosphere: Theory, History, and Applications D. Reidel Publ., Dordrecht, the Netherlands.
7. Hillel, D. 1998. Environmental Soil Physics: Fundamentals, Applications, and Environmental Considerations. Academic Press. Amrica.
8. Kamali, H. R. and Sh. Zand-Parsa. 2016. Optimization of a new inverse method for estimation of individual soil hydraulic parameters under field condition. Transactions of the ASABE. 95:1-10.
9. Mahbod, M. and Sh. Zand-Parsa. 2010. Prediction of soil hydraulic parameters by inverse method using genetic algorithm under field conditions. Archives Agro. Soil Sci. 56(1): 13-28.
10. Noborio, K., K. J. McInnes and J. L. Heilman. 1996. Two-Dimensional Model for Water, Heat, and Solute Transport in Furrow-Irrigated Soil: I. Theory. Soil Sci. Soc. Am. J. 60(4): 1001-1009.
11. Richards, L. A. 1931. Capillary conduction of liquids through porous mediums. J. Appl. Phy. 1(5): 318-333.
12. Saito, H., J. Simunek and B. P. Mohanty. 2006. Numerical analysis of coupled water, vapor, and heat transport in the vadosezone. Vadose. Zone J. 5: 784-800.
13. Van Bavel C. H. M. and I. Hillel. 1976. Calculating Potential and Actual Evaporation From a Bare Soil Surface by Simulation of Concurrent Flow of Water and Heat. Agricul. Meteo. 17:453-476.
14. Van Genuchten, M. Th. 1980. A Closed-Form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. Soil Sci. Soc. Am. J. 44: 892-898.
15. Willmott, C. J. 1981. On the validation of models. Phys. Geogr. 2: 184-194.
16. Yang X. and X. You. 2013. Estimating parameters of van genuchten model for soil water retention curve by intelligent algorithms. Appl. Math. Inf. Sci. 7(5): 1977-1983.
17. Zand-Parsa, Sh. 2001. A simulation model for prediction of water and nitrogen effects on corn yield. PhD. Thesis. Irrigation Department, Shiraz University.

## A New Method for Estimating Hydraulic Parameters by Measuring Soil Moisture in the Field

Sh. Zand-Parsa\*, S. Parvizi, A. R. Sepaskhah and A. A Kamgar Haghighi

(Received: Sept. 24-2016; Accepted: April 18-2017)

### Abstract

In this study, the values of moisture and soil temperature were estimated at different depths and times under unsteady conditions by solving the Richards' equation in an explicit finite difference method provided in Visual Studio C#. For the estimation of soil hydraulic parameters, including  $a_v$  and  $n_v$  (coefficients of van Genuchten's equation) and  $K_s$  (saturated hydraulic conductivity), soil moisture and temperature at different depths were measured by TDR probes and the stability apparatus, respectively. The objective function [equal to Root Mean Square Error (RMSE)] was minimized by the optimization of a parameter separately, using the Newton-Raphson method, while, the other parameters were considered as the constant values. Then, by replacing the optimized value of this parameter, the same was done for other parameters. The procedure of optimization was iterated until reaching minor changes to the objective function. The results showed that soil hydraulic parameters (coefficients of van Genuchten's equation) could be optimized by using the SWCT (Soil Water Content and Temperature) model with measuring the soil water content at different depths and meteorological parameters including the minimum and maximum temperature, air vapor pressure, rainfall and solar radiation. Finally, the measured values of soil moisture and temperature were compared to the depth of 70cm in spring, summer, and autumn of 2015. The values of the normalized RMSE of soil water content were 0.090, 0.096 and 0.056 at the soil depths of 5, 35 and 70 cm, respectively, while the values of the normalized RSME of soil temperatures were 2.000, 1.175 and 1.5 °C at these depths, respectively. In this research, the values of soil hydraulic parameters were compared with other previous models in a wider range of soil moisture varying from saturation to air dry condition, as more preferred in soil researches.

**Keywords:** SWCT model, Objective function, Inverse method, Soil water content, Soil temperature.

---

1. Dept. of Water Eng., Faculty of Agric., Shiraz Univ., Shiraz, Iran.

\*: Corresponding Author, Email: zandparsa@yahoo.com