

## تخمین سطح تنش رطوبتی خاک با استفاده از مدل HYDRUS2D و سیستم استنتاج عصبی - فازی

فاطمه کاراندیش\*<sup>۱</sup> و پرویز حقیقت‌جو<sup>۲</sup>

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۱۲/۰۵ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۵/۲۹)

### چکیده

در این پژوهش، به منظور تعیین طول دوره‌ی تنش در طول فصل کشت، قابلیت مدل‌های HYDRUS2D و ANFIS در شبیه‌سازی روند تغییرات زمانی رطوبت خاک و اجزای بیلان آب تحت آبیاری کامل و کم‌آبیاری معمولی در دو سطح ۷۵ (DI75) و ۵۵ درصد (DI55) در یک مزرعه‌ی ذرت با یکدیگر مقایسه شدند. بدین منظور، طی دو فصل زراعی داده‌های رطوبت خاک با استفاده از رطوبت‌سنج TRIME-FM برای واسنجی و صحت‌یابی مدل HYDRUS2D برداشت شد. همچنین، شبیه‌سازی تغییرات زمانی رطوبت خاک با مدل ANFIS با توابع عضویت مختلف و با متغیرهای مستقل روز بعد از کاشت، ضریب درجه-روز، سطح تنش و عمق آب آبیاری انجام شد. مقایسه‌ی معیارهای ارزیابی جذر میانگین مربعات خطا (2mm-8/21)، خطای انحراف (1/6 mm<sup>۷-۱۰</sup>) و ضریب کارایی مدل (1-0/63) در شبیه‌سازی طول دوره‌ی تنش، رطوبت و اجزای بیلان خاک، امکان جایگزینی مدل ANFIS با مدل پیچیده‌ی HYDRUS2D را در شرایط معرفی متغیرهای مستقل مناسب را نشان می‌دهد. همچنین، علی‌رغم اعمال زود هنگام‌تر تیمارها در فصل دوم، عدم تغییر بازه‌ی تنش رطوبتی در تیمار DI75 در دو فصل (از روز ۸۲ تا انتهای فصل کاشت)، امکان کاهش سطح آب مصرفی و یا تغییر زمان اعمال کم‌آبیاری را نشان می‌دهد. بر اساس نتایج این پژوهش، مدل ANFIS می‌تواند پاسخگوی نیاز در این راستا باشد.

**واژه‌های کلیدی:** اجزای بیلان آب، رطوبت خاک، کم‌آبیاری، ضریب درجه-روز رشد، ANFIS

۱- استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده‌ی آب و خاک، دانشگاه زابل (مکاتبه کننده)

۲- استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده‌ی آب و خاک، دانشگاه زابل

\* پست الکترونیک: [F.Karandish@uoz.ac.ir](mailto:F.Karandish@uoz.ac.ir)

## مقدمه

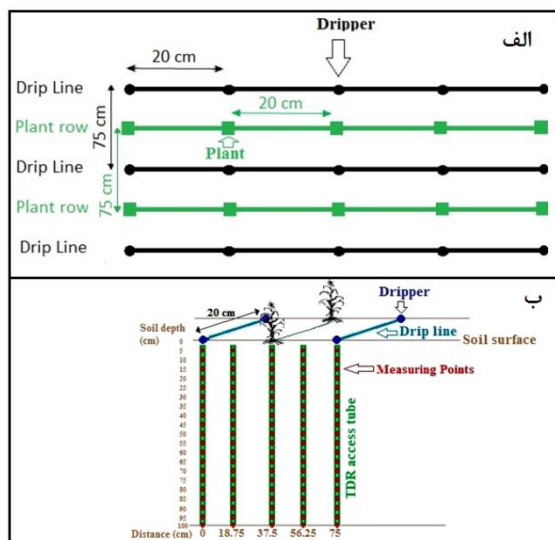
تخمین دقیق میزان رطوبت خاک، یکی از راهکارهای اساسی در آبیاری دقیق و کاهش تلفات در بخش کشاورزی، به‌عنوان بزرگ‌ترین بخش مصرف‌کننده آب شیرین در جهان می‌باشد که این مساله، همگام با رشد روزافزون جمعیت و نیاز به افزایش تولید، می‌تواند راهی مؤثر به سوی نیل به امنیت غذایی محسوب شود. از آنجایی که ارتباط مستقیم و معنی‌داری بین میزان آب مصرفی گیاه و عملکرد محصول وجود دارد (Payero *et al.*, 2003; Stone 2003; Klocke *et al.*, 2004; 2006)، دانستن میزان رطوبت خاک قبل از آبیاری، امکان آبیاری دقیق و به اندازه نیاز واقعی گیاه را فراهم آورده و ضمن صرفه‌جویی در میزان آب مصرفی، از کاهش معنی‌دار محصول و خسارت‌های اقتصادی نیز جلوگیری می‌کند (Karandish *et al.*, 2012 & 2013). همچنین، علاوه بر موارد مذکور، دانستن مقدار رطوبت خاک می‌تواند در دامنه گسترده‌ای از مسائل همچون تعیین حجم گسترش ریشه از طریق مدل‌سازی معکوس (Hupet *et al.*, 2002; Vrugt *et al.*, 2001)، تخمین و مدل‌سازی موقعیت جبهه‌ی رطوبتی در خاک (Malamos, 2007; Gardenas *et al.*, 2005; Cote *et al.*, 2003) و پژوهش‌های هیدرولوژیکی مورد استفاده قرار بگیرد.

یکی از مهم‌ترین کاربردهای تعیین رطوبت خاک، تعیین سطح تنش رطوبتی و استفاده از رابطه‌ی بیلان برای تعیین میزان ضریب تنش در شرایط اعمال کم‌آبیاری می‌باشد. کم‌آبیاری برای دستیابی به توسعه‌ی پایدار کشاورزی در شرایط بحران آب، امری اجتناب‌ناپذیر است. به‌همین دلیل، باید مدیریتی اتخاذ شود که کم‌ترین خسارت اقتصادی در نتیجه‌ی تنش در این روش مدیریتی متوجه زارعان گردد. حساسیت به کم‌آبی در گیاهان مختلف یکسان نبوده و شروع دوره‌ی تنش در آستانه‌های رطوبتی مختلفی رخ می‌دهد. برای ذرت، زمانی که ۵۵ درصد از رطوبت قابل دسترس گیاه در خاک تخلیه شود (Allen *et al.*, 1998)، تنش آغاز شده و با ادامه‌ی آن، شدت جذب آب به وسیله‌ی گیاه کاهش می‌یابد (Allen *et al.*, 1998). هرچه مدت زمان تنش بیش‌تر باشد، مقدار کاهش محصول نیز بیش‌تر خواهد بود. وقتی آبیاری کم‌تر از حد نیاز گیاه انجام می‌شود، گیاه تلاش می‌کند تا آب مورد نیاز خود را از ذخایر رطوبتی خاک تأمین کند

(Karandish, 2016) و تا زمانی که مقدار رطوبت موجود در خاک از حد تخلیه‌ی مجاز کم‌تر نشود، شدت جذب نیز کاهش نخواهد یافت. بنابراین، تنظیم زمان اعمال کم‌آبیاری می‌تواند در مدیریت کم‌آبیاری مؤثر باشد. از این‌رو، دانستن روند تغییرات زمانی رطوبت در خاک در طول فصل کشت برای تعیین طول دوره‌ی تنش اهمیت می‌یابد. پژوهشگران متعددی به ارایه‌ی مدل‌هایی جهت تعیین میزان رطوبت موجود در خاک با روش‌های متعددی پرداختند (Birchak *et al.*, 1974; Bishop, 1995; Dasberg & Hopman, 1992; Looor, 1964). مدل HYDRUS2D یکی از مدل‌های عددی دقیق برای پیش‌بینی موقعیت جبهه‌ی رطوبتی در خاک و شبیه‌سازی حرکت آب در خاک تحت روش‌های مختلف آبیاری بوده که توسط سیمیونک و همکاران توسعه داده شد (Simunek *et al.*, 1999). این مدل، حرکت دو بعدی آب در خاک را بر اساس معادله‌ی ریچاردز شبیه‌سازی کرده و قادر است برای دامنه‌ی وسیعی از شرایط اولیه و مرزی متفاوت و در انواع خاک‌ها مورد استفاده قرار بگیرد. توانایی مدل مذکور در بسیاری از تحقیق‌های پیشین در تخمین میزان رطوبت خاک با خطای ناچیز تحت شرایط اولیه و مرزی متفاوت به اثبات رسیده است (Gardenas *et al.*, 2005; Ajdary *et al.*, 2007; Tafteh & Sepaskhah, 2012). خان‌محمدی و همکاران (Khanmohammadi *et al.*, 2012) توانایی مدل HYDRUS2D را در شبیه‌سازی پروفیل رطوبتی خاک تحت آبیاری قطره‌ای با نوار تیپ به اثبات رساندند. با این وجود، حجم گسترده‌ی داده‌های ورودی مورد نیاز مدل، مراحل زمان‌بر و دشوار واسنجی و صحت‌یابی از جمله محدودیت‌های کاربرد چنین روش‌هایی می‌باشد.

استفاده از روش‌های هوش مصنوعی و منطق فازی، به‌دلیل قابلیت یادگیری و تعمیم نتایج، روشی ساده می‌باشد که در صورت اطمینان از شبیه‌سازی‌ها، می‌تواند به ازای متغیرهای مستقل مناسب، در تخمین میزان رطوبت خاک مورد استفاده قرار بگیرد. از جمله این روش‌ها، می‌توان به سامانه‌ی استنتاج تطبیقی عصبی - فازی اشاره نمود که با ترکیب دو روش شبکه‌ی عصبی و منطق فازی، به ابزاری قدرتمند جهت پیش‌بینی متغیرهای خروجی بر اساس داده‌های عددی تبدیل شده است. مروری بر تحقیق‌های گذشته نشان می‌دهد که

سپس، بذر ذرت رقم سینگل کراس ۷۰۴ دانه‌ای در هر دو فصل زراعی ۱۳۸۹ و ۱۳۹۰ اوایل اردیبهشت با فواصل ۷۵ سانتی‌متر بین ردیف و ۲۰ سانتی‌متر روی ردیف، در حدفاصل بین لترال‌های آبیاری کاشت شد (شکل ۱-ب).



شکل ۱- شمای ردیف‌های کاشت و لترال‌ها (الف) و نحوه‌ی نصب سنسورهای TDR (ب)

Fig.1. Scheme of plant row and laterals (a) and TDR sketch (b)

در طول فصل کاشت، آبیاری در تیمار FI به صورت یک روز در میان با هدف رساندن میزان رطوبت خاک به حد ظرفیت زراعی انجام و نیاز آبی خالص گیاه در این تیمار با استفاده از رابطه زیر محاسبه شد:

$$I_n = \sum_{i=1}^n (\theta_{FCi} - \theta_{Bli}) \times D_i \quad (1)$$

در این رابطه،  $\theta_{FCi}$  رطوبت حجمی خاک در حد ظرفیت زراعی،  $\theta_{Bli}$  رطوبت حجمی خاک قبل از آبیاری،  $D_i$  عمق هر لایه از خاک (میلی‌متر)،  $I_n$  عمق خالص آبیاری (میلی‌متر) و  $i$  شماره هر لایه از خاک می‌باشد. با استفاده از رطوبت‌سنج TRIME-FM در تیمار FI تعیین شد. قبل از شروع دوره‌ی اعمال تیمار، تمام تیمارها عمق آب یکسانی مطابق با مقدار آن در تیمار FI دریافت داشتند. در طول دوره‌ی اعمال تیمار (۱۰۷-۵۵ و ۱۱۰-۴۵ روز بعد از کاشت در فصل‌های اول و دوم)، تیمارهای DI75 و DI55 به ترتیب برابر ۷۵ و ۵۵ درصد از عمق آب محاسبه شده در تیمار FI را دریافت نمودند.

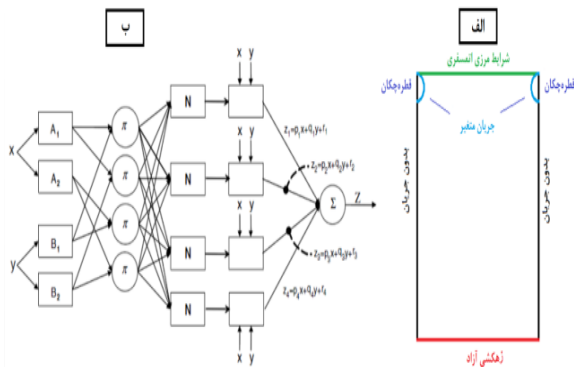
قابلیت این مدل در شبیه‌سازی رطوبت خاک و متعاقباً تخمین سطح تنش رطوبتی در شرایط کم‌آبیاری تاکنون مورد بررسی قرار نگرفته است. به همین منظور، در این پژوهش، به بررسی قابلیت این سیستم در مقایسه با مدل HYDRUS2D در تعیین روند تغییرات زمانی رطوبت خاک در طول فصل کاشت ذرت طی دو فصل زراعی و تعیین طول دوره‌ی تنش تحت کم‌آبیاری در دو سطح ۵۵ و ۷۵ درصد پرداخته شد.

## مواد و روش‌ها مشخصات طرح

داده‌های مورد نیاز در این پژوهش، بر اساس طرحی که طی دو فصل زراعی در یک مزرعه‌ی ذرت، تحت آبیاری قطره‌ای سطحی با فواصل قطره‌چکان ۲۰ سانتی‌متر و دبی دو لیتر بر ساعت و با دور آبیاری یک روز در میان انجام شد، تأمین گردید. پژوهش در قالب یک طرح بلوک کامل تصادفی در زمینی با ابعاد ۴۹۵ مترمربع، با سه تیمار آبیاری کامل (FI) و کم‌آبیاری معمولی در دو سطح ۵۵ درصد (DI55) و ۷۵ درصد (DI75) در سه تکرار انجام شد. پس از انجام عملیات خاک‌ورزی در سطح مزرعه و قبل از کاشت گیاه، در ابتدای پژوهش، نمونه‌ی خاک از لایه‌ی سطحی برای تعیین نیاز کودی گیاه برداشت و سپس با استفاده از اوگر چهار اینچی، از فواصل عمقی ۲۰ cm تا عمق ۱۰۰ cm برای تعیین منحنی مشخصه‌ی رطوبتی، ظرفیت زراعی، نقطه‌ی پژمردگی، چگالی ظاهری خاک و درصد اجزای تشکیل‌دهنده‌ی آن برداشت شد. منحنی مشخصه با استفاده از دستگاه صفحات فشاری در مکش‌های ۰، ۰/۳، ۰/۴، ۰/۸، ۱، ۲، ۴، ۶، ۸، ۱۲ و ۱۵ بار تعیین شد. لازم به ذکر است که برای تعیین چگالی ظاهری خاک، از استوانه‌ی نمونه‌گیر استفاده شد. همچنین، میزان رطوبت در فشار ۰/۳ و ۱۵ بار به ترتیب، معادل میزان رطوبت در ظرفیت مزرعه و نقطه‌ی پژمردگی در نظر گرفته شد. پس از نصب سیستم آبیاری و قبل از کاشت گیاه، به منظور تعیین مقدار رطوبت خاک، در یک تکرار از هر تیمار، پنج لوله دسترسی<sup>۱</sup> مربوط به رطوبت-سنج الکترومغناطیس TRIME-FM (IMKO, Germany) در حد فاصل دو لترال در خاک نصب شد (شکل ۱-الف).

1- Access tube, TRIME-FMA

آبیاری در تمام تیمارها تعیین شده و برای واسنجی استفاده شد. صحت‌سنجی نیز بر اساس داده‌های روزانه رطوبت صورت گرفت.



شکل ۲- محدوده‌ی مدل‌سازی در HYDRUS2D (الف) و ساختار شبکه استنتاج تطبیقی عصبی-فازی ANFIS (ب)  
Fig.2. Modeling geometry in HYDRUS2D (a) and Adaptive ANFIS architecture

### سیستم استنتاج عصبی-فازی

از میان روش‌های نوین مدل‌سازی، سامانه‌های فازی به دلیل توانایی پیاده‌سازی دانسته‌های انسانی بر اساس قواعد فازی، غیرخطی بودن و قابلیت سازش‌پذیری این سیستم‌ها و دقت بیشتر آن‌ها در شرایط محدودیت داده‌ها، از جایگاه ویژه‌ای برخوردارند. از سویی دیگر، شبکه‌های عصبی مصنوعی به دلیل قابلیت‌های آموزش‌پذیری با استفاده از الگوهای مختلف آموزشی می‌تواند ارتباط مناسب بین متغیرهای ورودی و خروجی برقرار سازند. لذا، از ترکیب این دو روش، سامانه‌ی استنتاج تطبیقی عصبی-فازی، به‌عنوان ابزاری قدرتمند جهت پیش‌بینی متغیرهای خروجی بر اساس داده‌های عددی موجود به وجود آمد. ساختار مناسب سامانه عصبی-فازی متناسب با داده‌های ورودی، درجه عضویت، قوانین و توابع درجه عضویت خروجی انتخاب می‌شود (Chen et al., 2006; Jang et al., 1993; Tutmez et al., 2006). شکل ۲ به‌عنوان نمونه، نمایشی از معماری شبکه عصبی-فازی با دو ورودی، یک خروجی و دو قانون می‌باشد. شرح کاملی از این سیستم را می‌توان در پژوهش‌های پیشین یافت (Chen et al., 2006; Jang et al., 1993; Tutmez et al., 2006). به منظور شبیه‌سازی رطوبت خاک، چهار متغیر روز بعد از کاشت (DAP)، درجه-روز رشد (GDD)، عمق آب آبیاری (In) و سطح کاهش رطوبت نسبت به آبیاری کامل (WD) به‌عنوان متغیر

### شبیه‌سازی با مدل HYDRUS2D

مدل HYDRUS2D یک مدل عددی دقیق برای تعیین حرکت آب و املاح در خاک است که توسط سیمونک و همکاران (Simunek et al., 1999) توسعه داده شد. جریان آب در محیط غیر اشباع خاک در این مدل با رابطه ریچاردز توصیف می‌شود (Simunek et al., 1999):

(۱-۲)

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial r} \left( K_r(h) \frac{\partial h}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_z(h) \frac{\partial h}{\partial z} \right) - \frac{\partial K}{\partial z} - WU(h, r, z)$$

که در آن،  $\theta$  رطوبت حجمی  $[l^3 l^{-3}]$ ،  $K$  تابع هدایت هیدرولیکی غیراشباع  $[l t^{-1}]$ ،  $h$  فشار هیدرواستاتیک  $[l]$ ،  $z$  فاصله شعاعی،  $z$  فاصله عمودی،  $t$  زمان  $[t]$  و  $WU(h, r, z)$  میزان جذب آب به‌وسیله ریشه  $[T^{-1}]$  می‌باشد. معادله‌ی ریچاردز در مدل HYDRUS2D با روش المان‌های محدود گالرکین با شمای توصیف‌شده توسط سلیا و همکاران (Celia et al., 1990) حل می‌شود.

محدوده‌ی مدل‌سازی با HYDRUS2D در شکل ۲ نشان داده شده است. شرایط اولیه، به‌صورت مقدار رطوبت در نقاط مشاهداتی (شکل ۱- الف) به مدل معرفی گردید. شرایط مرزی به‌صورت شرایط اتمسفری در سطح خاک، دبی متغیر در محل قطره‌چکان‌ها، زهکشی آزاد در مرز انتهایی نمونه و جریان صفر در مرزهای اطراف در محدوده‌ی مدل‌سازی تعریف شد. قبل از واسنجی، حساسیت خروجی‌های مدل به هفت پارامتر موجود در مدل ون-گنوختن-معلم، که به‌عنوان تابع رطوبتی در خاک تعریف شده است، با استفاده از روش کمی، تعیین شد. سپس، بر اساس نتایج به‌دست آمده، سه پارامتر هدایت هیدرولیکی اشباع ( $k_s$ )، رطوبت اشباع ( $\theta_s$ ) و رطوبت باقیمانده ( $\theta_r$ )، برای واسنجی مدل به روش حل معکوس انتخاب شد. به‌منظور تعیین مقدار اولیه این پارامترها، منحنی مشخصه‌ی رطوبتی در محدوده‌های عمقی ۲۰ cm با استفاده از دستگاه صفحات فشاری تعیین و سپس، مقدار این پارامترها در مدل ون-گنوختن-معلم با استفاده از برنامه RETC، تعیین شد، (به‌منظور واسنجی مدل HYDRUS2D، علاوه بر اندازه‌گیری‌های روزانه‌ی رطوبت خاک، منحنی پیشروی رطوبتی در چندین نوبت در طول فصل کشت، در زمان‌های یک ساعت قبل از آبیاری، بلافاصله بعد، ۲، ۶، ۱۲، ۲۴ و ۴۸ ساعت بعد از

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}_i)^2} \quad (5)$$

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n O_i - P_i}{n} \quad (6)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{n}} \quad (7)$$

که در آن‌ها،  $O_i$  و  $P_i$  به ترتیب مقادیر اندازه‌گیری شده و برآورد شده میزان نفوذ (یا سرعت نفوذ) در زمان  $i$  ام،  $\bar{O}_i$  میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده میزان نفوذ (یا سرعت نفوذ) در زمان  $i$  ام و  $n$  تعداد داده‌ها می‌باشد. مقادیر کم‌تر معیارهای MBE و RMSE و همچنین مقادیر نزدیک‌تر به یک برای پارامتر EF نشان‌دهنده برتری مدل خواهد بود.

## نتایج و بحث

### واسنجی و صحت‌یابی مدل HYDRUS2D

مقادیر اولیه و واسنجی شده‌ی سه خصوصیت  $K_s$ ،  $\theta_s$  و  $\theta_r$  در جدول ۱ ارائه شد. مقدار واسنجی شده‌ی آن‌ها در محدوده‌ی عمقی (۲۰-۰) سانتی‌متری به ترتیب ۱/۳، ۰/۴۷ و ۰/۱ سانتی‌متر بر روز و در محدوده‌ی عمقی ۱۰۰-۲۰ سانتی‌متری به ترتیب ۱، ۰/۴۷ و ۰/۰۷ سانتی-متر بر روز به دست آمد که به خوبی در محدوده پیشنهاد شده برای آن‌ها قرار دارد. مقدار  $\theta_r$  برای بافت لوم رسی-شنی بین ۰/۰۴ تا ۰/۱ و برای بافت لوم رسی بین ۰/۰۶۵ تا ۱/۴ سانتی‌متر مکعب بر سانتی‌متر مکعب گزارش شد (Ajdari et al., 2007; Carsel & Parrish, 1988; Tafteh & Sepaskhah, 2012). همچنین مقادیر  $K_s$  به ترتیب بین ۰/۳۴ تا ۱/۴ برای خاک لوم رسی-شنی و بین ۰/۵ تا ۱/۱ سانتی‌متر بر روز برای خاک لوم رسی گزارش شد. میزان رطوبت اشباع نیز به ترتیب بین ۰/۳۹ تا ۰/۴۸ سانتی‌متر مکعب بر سانتی‌متر مکعب برای خاک لوم رسی-شنی و بین ۰/۴۱ تا ۰/۴۷ سانتی‌متر مکعب بر سانتی‌متر مکعب برای خاک لوم رسی گزارش شد (Carsel & Parrish, 1988; Tafteh & Sepaskhah, 2012).

واسنجی خصوصیات هیدرولیکی خاک، میزان خطا را به کم‌تر از ۱۰ درصد در شبیه‌سازی رطوبت خاک کاهش داد. داد. شکل ۳ به عنوان نمونه، مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده‌ی رطوبت در محل قطره‌چکان در حین واسنجی را برای یکی از پروفیل‌های رطوبتی در حفاصل یک ساعت قبل تا ۴۸ ساعت بعد از آبیاری در تیمار FI

مستقل و داده‌های روزانه‌ی رطوبت خاک قبل و بعد از آبیاری به عنوان متغیر وابسته در نظر گرفته شد. WD برای تیمارهای FI، DI75 و DI55 به ترتیب ۱، ۰/۷۵ و ۰/۵۵ می‌باشد. ضریب درجه-روز رشد با استفاده از رابطه ذیل محاسبه شد:

$$GDD = \frac{T_{min} + T_{max}}{2} - T_b \quad (4)$$

که در آن،  $T_{min}$  و  $T_{max}$  به ترتیب مقادیر دمایی حداقل و حداکثر روزانه و  $T_b$  دمایی پایه برای رشد گیاه ذرت (هشت درجه سانتی‌گراد، FAO, 2010) می‌باشد. مقدار متغیرهای مستقل و وابسته در محدوده‌ی صفر تا یک نرمال شد. سپس، داده‌های روزانه‌ی رطوبت در قبل و بعد از آبیاری در تیمارهای FI و DI55 در تعیین تابع عضویت مناسب مورد استفاده قرار گرفت. بدین منظور، در محیط MATLAB، کل داده‌های روزانه‌ی رطوبت خاک در طول دوره‌ی تنش، به صورت تصادفی، به سه بخش داده‌های آموزش، آزمون و کنترل، به ترتیب با نسبت ۷۵، ۲۵ و ۲۵ درصد از کل داده‌ها، تقسیم شد. سپس بر اساس معیارهای ارزیابی و با امتحان کلیه‌ی توابع، تابعی که کم‌ترین خطا را به همراه داشت، به عنوان تابع عضویت مناسب انتخاب شد. به منظور ارزیابی نهایی نتایج، داده‌های رطوبت خاک در تیمار DI75 با استفاده از توابع منتخب شبیه‌سازی شد و با در نظر گرفتن ضریب تخلیه‌ی رطوبتی ۵۵ درصد برای گیاه ذرت، زمان شروع تنش و تعداد روزهای آن در طول دوره‌ی اعمال تیمار تعیین شد.

### معیارهای ارزیابی

مقادیر به دست آمده از مدل‌های ANFIS<sup>۲</sup> و HYDRUS2D، بر اساس سه معیار ضریب کارایی مدل (EF)<sup>۳</sup>، جذر میانگین مجموع مربعات خطا (RMSE<sup>۴</sup>) و میانگین خطای انحراف (MBE<sup>۵</sup>) با داده‌های مشاهده‌ای مقایسه شد (Nash & Sutcliffe, 1970; Ghorbani-Dashtaki, 2009). مقادیر کم‌تر MBE و RMSE و مقادیر نزدیک‌تر به یک برای EF نشانه‌ی برتری مدل خواهد بود (Parchami et al., 2013; Ghorbani-Dashtaki et al., 2009; Nash & Sutcliffe, 1970).

2 - Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS)

3 - Efficiency (EF)

4 - Root Mean Square Error (RMSE)

5 - Mean Bias Error

نشان می‌دهد. این شکل انطباق قابل قبولی بین مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده رطوبت در محدوده‌ی عمقی (۸۰-۰) سانتی‌متری را نشان می‌دهد. قابلیت مدل HYDRUS2D در شبیه‌سازی جریان آب در خاک تحت سیستم آبیاری قطره‌ای سطحی در پژوهش اژدری و همکاران (Ajdari et al., 2007) نیز گزارش شد. همچنین، خان‌محمدی و همکاران (Khanmohammadi et al., 2012) توانایی مدل HYDRUS2D را در شبیه‌سازی پروفیل رطوبتی خاک تحت آبیاری قطره‌ای با نوار تیپ به اثبات رساندند. ونگ و همکاران (Wang et al., 2014) نشان دادند که این مدل می‌تواند تغییرات رطوبت خاک تحت آبیاری قطره‌ای سطحی را به خوبی به ازای دی‌های متفاوت جریان در یک مزرعه‌ی ذرت شبیه‌سازی کند.

جدول ۱- مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده هدایت هیدرولیکی اشباع (Ks)، رطوبت اشباع ( $\theta_s$ ) و رطوبت باقی‌مانده خاک ( $\theta_r$ )

Table 1: Observed and simulated values of saturated hydraulic conductivity (Ks), saturated soil water content ( $\theta_s$ ) and residual soil water content ( $\theta_r$ )

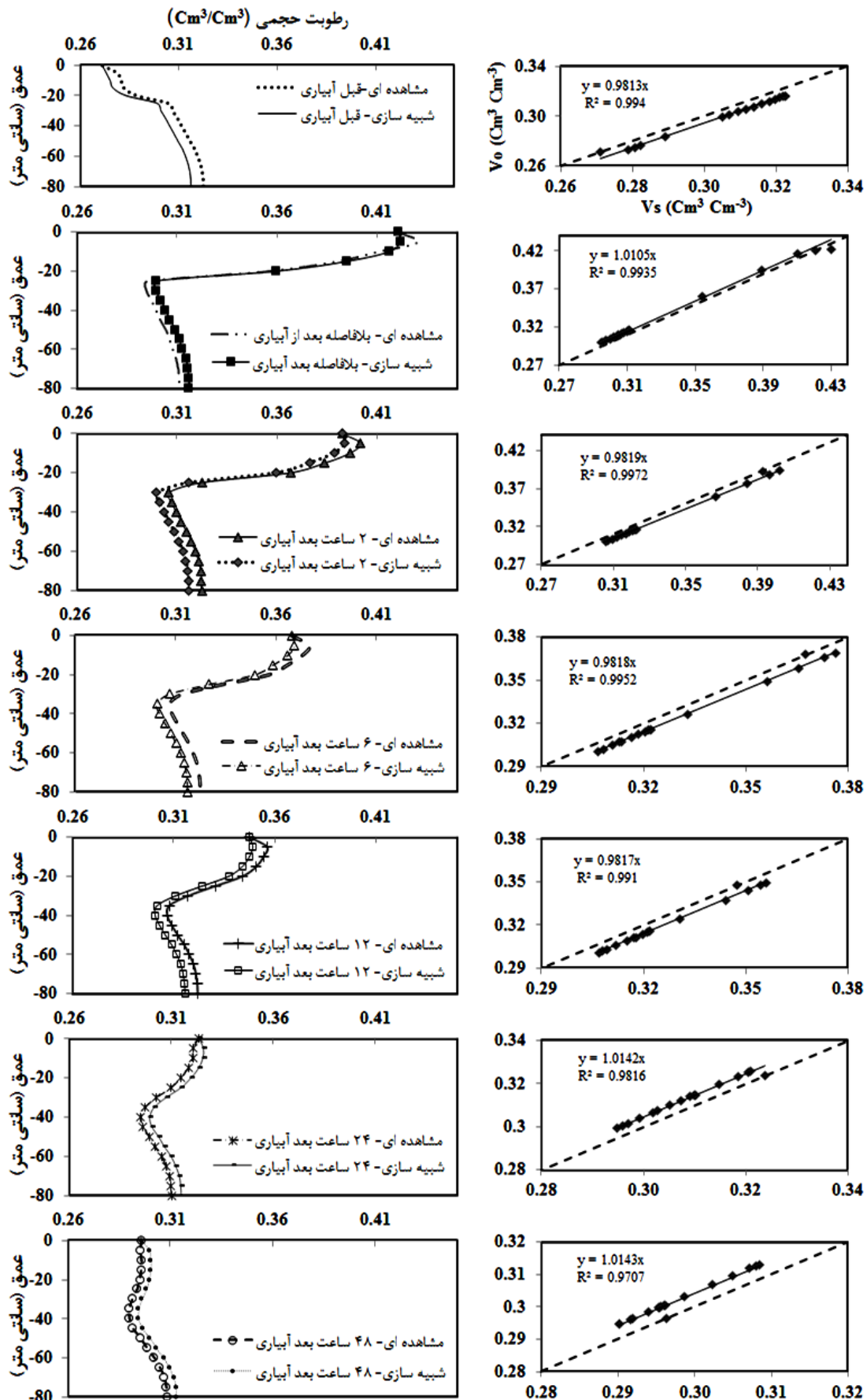
Ks (cm.day <sup>-1</sup> )		$\theta_s$ (cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )		$\theta_r$ (cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )		لایه خاک (cm)
مشاهده‌ای	شبیه‌سازی شده	مشاهده‌ای	شبیه‌سازی شده	مشاهده‌ای	شبیه‌سازی شده	
1.3	1.1	0.47	0.45	0.1	0.07	0-20
1	0.8	0.47	0.48	0.07	0.09	20-80

پس از واسنجی پارامترهای هیدرولیکی خاک، به منظور صحت‌یابی مدل HYDRUS2D، روند تغییرات رطوبت خاک تحت تیمارهای مختلف در طول دوره‌ی اعمال تیمار شبیه‌سازی شد. سپس، مقادیر شبیه‌سازی شده‌ی گذر آب و رطوبت خاک در محدوده‌های عمقی ۲۰ سانتی‌متری تا عمق ۸۰ سانتی‌متری خاک و مجموع تبخیر- تعرق گیاه ذرت با مقادیر مشاهده‌ای آن‌ها مقایسه شد (جدول ۲). محدوده‌ی تغییرات RMSE برای پارامترهای گذر آب، رطوبت خاک و تبخیر- تعرق به ترتیب بین ۰/۸۳-۰/۰۱، ۰/۳۸-۲/۵ و ۰/۷-۱۱/۵ میلی‌متر و محدوده‌ی تغییرات MBE برای این پارامترها به ترتیب برابر ۰/۰۹-۰/۹۵، ۰/۴۸-۰/۴۲ و ۰/۶۵-۱۱ بود. بهترین شبیه‌سازی برای پارامترهای رطوبت خاک و تبخیر- تعرق در تیمار DI75 و برای پارامتر گذر آب در تیمار FI مشاهده شد. اختلاف کم‌تر از ۱۰ درصد بین مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده‌ی این پارامترها، دقت بالای مدل در شبیه‌سازی اجزای بیلان آب را نشان می‌دهد که این نتیجه بایافته‌های پیشین مطابقت دارد (Cote et al., 2003; Ajdari et al., 2007; Rahil et al., 2007; Crevoisier., 2008; Siyal et al., 2009; mobarak et al., 2009; Tafteh et al., 2012).

جدول ۲- مقادیر معیارهای جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) و میانگین خطای انحراف (MBE) در مقایسه‌ی مقادیر واقعی گذر آب، رطوبت و تبخیر- تعرق فصلی با مقادیر شبیه‌سازی شده‌ی آن‌ها با مدل HYDRUS2D

Table 2: The values of root mean squared error (RMSE) and mean bias error (MBE) when comparing observed drainage water, soil water content and seasonal evapotranspiration with the simulated ones by HYDRUS2D

فصل دوم (Second growing season)						فصل اول (First growing season)						عمق خاک (cm)	پارامتر (Parameter)
DI55		DI75		FI		DI55		DI75		FI			
MBE	RMSE	MBE	RMSE	MBE	RMSE	MBE	RMSE	MBE	RMSE	MBE	RMSE	Soil Depth (cm)	
0.72	0.61	0.5	0.36	0.13	0.03	0.75	0.65	0.12	0.2	0.2	0.1	0-20	
0.91	0.79	0.55	0.42	0.09	0.01	0.95	0.83	0.4	0.31	0.16	0.06	20-40	گذر آب
0.12	0.01	0.39	0.32	0.09	0.01	0.7	0.62	0.38	0.25	0.11	0.01	40-60	Drainage water (mm)
0.1	0.01	0.15	0.02	0.09	0.01	0.37	0.22	0.6	0.45	0.11	0.01	60-80	
4.2	2.1	2.5	1.18	0.89	1.18	0.81	0.71	0.53	0.43	1.1	0.8	0-20	رطوبت خاک
0.55	0.48	0.58	0.38	1.2	0.38	0.92	0.7	0.58	0.44	1.2	0.85	20-40	Soil
0.63	0.43	0.68	0.48	0.8	0.48	0.7	0.6	0.7	0.51	0.85	0.78	40-60	Moisture (mm)
0.85	0.63	0.52	0.41	0.75	0.41	3.5	2.5	3.0	1.9	0.48	0.28	60-80	
7.5	8.4	0.85	0.7	11	10.2	9.2	8.8	0.65	0.7	10.0	11.5		تبخیر-تعرق کل (ET) (mm)



شکل ۳- مقایسه‌ی جبهه‌ی رطوبتی مشاهده‌ای ( $V_o$ ) و شبیه‌سازی شده ( $V_s$ ) با مدل HYDRUS2D در تیمار FI  
 Fig.3: Comparing the observed ( $V_o$ ) and simulated ( $V_s$ ) wetting front by HYDRUS2D in FI treatment

## ارزیابی مدل ANFIS

Gauss2mf با ترکیب  $2 \times 2 \times 2$  با حداقل خطا در سه مرحله‌ی آموزش (  $RMSE=0.2 \text{ mm}$ ,  $MBE=1.25 \times 10^{-5}$  )، آزمون (  $mm$ ,  $EF=1$ ,  $RMSE=1.47 \text{ mm}$ ,  $MBE=0.1$  ) و کنترل (  $mm$ ,  $EF=0.99$ ,  $RMSE=2.4 \text{ mm}$ ,  $MBE=-$  ) بیش‌ترین دقت را در شبیه‌سازی رطوبت خاک داشت. مقادیر  $MBE$  نشان می‌دهد که این مدل در فصل دوم اغلب کم‌برآوردگر بود. همچنین بر اساس معیارهای ارزیابی، شبیه‌سازی رطوبت خاک در فصل دوم، تا حدی بهتر از مقادیر آن در فصل اول بود که دلیل آن را می‌توان به بیشتر بودن تعداد داده‌ها در مرحله‌ی آموزش به دلیل طولانی‌تر بودن طول دوره‌ی تنش نسبت داد. به‌منظور ارزیابی نهایی مدل ANFIS، مقادیر رطوبت خاک در تیمار DI75 بر اساس توابع منتخب در دو فصل زراعی شبیه‌سازی شد. انطباق بالای مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی رطوبت خاک در این مرحله، کارآیی توابع منتخب را نشان می‌دهد (شکل ۴).

نتایج ارزیابی مدل ANFIS در شبیه‌سازی رطوبت خاک در جدول ۳ ارائه شد. در فصل اول، در تمام توابع عضویت‌ها، ترکیب  $2 \times 2 \times 2$  برای متغیرهای ورودی، کم‌ترین مقادیر  $RMSE$  (  $0.19-1.7/25 \text{ mm}$  ) و  $MBE$  (  $0.94-1$  ) را به همراه داشت. همچنین با این ترکیب، تابع عضویت Gaussmf بیش‌ترین دقت و تابع عضویت Gauss2mf کم‌ترین دقت را به همراه داشت. بر اساس (جدول ۳)، در این تابع، میزان رطوبت خاک بر اساس معیار  $MBE$ ، اغلب بیش‌برآورد شد. لکن مقادیر ناچیز خطا در هر سه مرحله‌ی آموزش (  $RMSE=19.0 \text{ mm}$ ,  $MBE=10^{-7} \text{ mm}$ ,  $EF=1$  )، آزمون (  $RMSE=2.87 \text{ mm}$ ,  $MBE=-0.66 \text{ mm}$ ,  $EF=0.98$  ) و کنترل (  $RMSE=3.73 \text{ mm}$ ,  $MBE=-0.17$  )  $EF=0.98$  (  $mm$ ,  $EF=0.98$  ) حاکی از دقت بالای این روش در تخمین میزان رطوبت می‌باشد. در فصل دوم، تابع عضویت

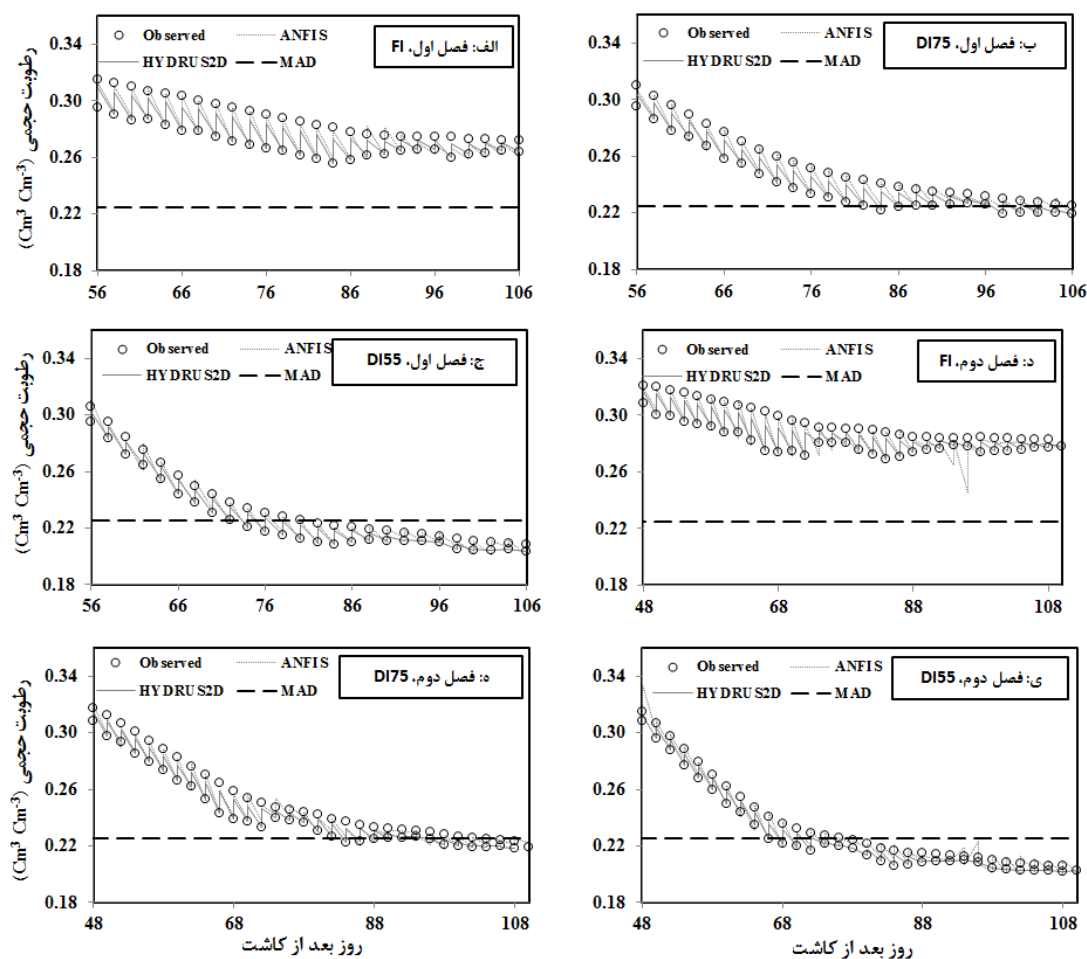
جدول ۳- ارزیابی توابع عضویت (MF) و ترکیب‌های مختلف ورودی در شبیه‌سازی رطوبت خاک با ANFIS

Table 3: Evaluating different type and number of membership function for simulating soil water content with ANFIS

EF			MBE			RMSE			ترکیب*	تابع	
کنترل	آزمون	آموزش	کنترل	آزمون	آموزش	کنترل	آزمون	آموزش			
0.98	0.97	1	-0.19	1.06	$1.96 \times 10^{-5}$	3.83	3.31	0.73	$2 \times 2 \times 2$	Gbel	فصل اول
0.94	0.87	0.99	-2.56	-0.9	$2 \times 10^{-4}$	6.29	6.96	1.94	$3 \times 3 \times 3$	lmf	
0.63	0.74	1	3.33	1.71	$8.34 \times 10^{-6}$	16.4	9.67	0.93	$4 \times 4 \times 4$		
0.98	0.98	1	-0.17	-0.66	$1.0 \times 10^{-7}$	3.73	2.87	0.19	$2 \times 2 \times 2$	Gaus	
0.95	0.92	1	-2.95	1.02	$1.67 \times 10^{-5}$	6.15	5.47	0.83	$3 \times 3 \times 3$	smf	
0.98	0.81	1	0.34	2.07	$7.7 \times 10^{-7}$	4.05	8.14	0.28	$4 \times 4 \times 4$		
0.98	0.96	1	0.49	-7.92	$-2.96 \times 10^{-6}$	4.1	17.25	1.86	$2 \times 2 \times 2$	Gaus	فصل دوم
0.98	0.02	1	0.49	-9.06	$1.84 \times 10^{-5}$	4.1	18.6	0.8	$3 \times 3 \times 3$	s2mf	
0.98	-0.15	1	1.55	-6.87	$-3.01 \times 10^{-6}$	7.32	20.17	0.32	$4 \times 4 \times 4$		
0.99	0.99	1	-1.22	0.08	$1.2 \times 10^{-5}$	5.96	2.17	0.3	$2 \times 2 \times 2$	Gbel	
0.98	0.95	0.999	-2.12	-1.2	$1.6 \times 10^{-5}$	8.71	6.72	0.68	$3 \times 3 \times 3$	lmf	
0.99	0.76	0.996	-1.26	0.12	$2.4 \times 10^{-5}$	6.6	14.2	1.74	$4 \times 4 \times 4$		
1	1	1	-0.89	-0.57	$1.2 \times 10^{-5}$	4.21	1.97	0.32	$2 \times 2 \times 2$	Gaus	فصل دوم
0.95	0.95	0.999	-4.49	-0.67	$2 \times 10^{-5}$	14.2	6.43	0.63	$3 \times 3 \times 3$	smf	
0.97	0.89	0.996	-0.95	0.8	$2 \times 10^{-5}$	11.2	9.38	1.75	$4 \times 4 \times 4$		
1	0.99	1	-0.20	0.1	$1.2 \times 10^{-5}$	4.2	1.47	0.20	$2 \times 2 \times 2$	Gaus	
0.99	0.87	0.999	-0.27	1.09	$2 \times 10^{-5}$	5.76	10.3	0.63	$3 \times 3 \times 3$	s2mf	
0.87	0.81	0.996	11.1	-0.9	$2 \times 10^{-5}$	21.9	12.7	0.32	$4 \times 4 \times 4$		

\* منظور از ترکیب، تعداد توابع عضویتی است که در شبکه‌ی عصبی-فازی برای هر متغیر ورودی در نظر گرفته می‌شود.





شکل ۴- مقایسه‌ی مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی رطوبت خاک با مدل‌های ANFIS و HYDRUS2D در تیمارهای مختلف در روز های مختلف پس از کاشت (DAP)

Fig.4. Comparing the observed and simulated soil water content with HYDRUS2D and ANFIS under different treatments on different days after planting

مختلف در طول دوره‌ی شبیه‌سازی را نشان می‌دهد. بر اساس تخلیه‌ی مجاز رطوبتی ۵۵ درصد برای گیاه ذرت، در روزهایی که میزان رطوبت متوسط در محدوده‌ی عمقی (۸۰-۰) سانتی‌متری کم‌تر از ۲۲/۵ درصد باشد، تنش رطوبتی وجود خواهد داشت. به این ترتیب، روزهای تحت تنش در تیمارهای DI75 و DI55 در فصل زراعی اول به ترتیب در محدوده‌ی زمانی ۸۲-۱۰۷ و ۷۲-۱۰۷ روز بعد از کاشت و در فصل زراعی دوم، به ترتیب در محدوده‌ی زمانی ۸۲-۱۱۰ و ۶۶-۱۱۰ روز بعد از کاشت بود. شکل ۴ نشان می‌دهد که محدوده‌ی تنش در مدل‌های ANFIS و HYDRUS2D اختلاف معنی‌داری با یکدیگر نداشته و ANFIS نتایج قابل اعتمادی را ارائه داده است. اگرچه اعمال تیمارها در فصل دوم ۱۰ روز زودتر از فصل اول شروع شد، اما طول دوره‌ی تنش در تیمار DI75 در دو فصل اختلاف معنی‌داری با یکدیگر نداشتند که دلیل آن

#### مقایسه HYDRUS2D و ANFIS و تعیین محدوده تنش

مقایسه‌ی معیارهای ارزیابی در مدل‌های ANFIS و HYDRUS2D نشان می‌دهد که انتخاب متغیرهای مستقل مناسب، می‌تواند دقت شبیه‌سازی با ANFIS را افزایش داده و از حجم داده‌های مورد نیاز در مدل HYDRUS2D بکاهد. مقادیر GDD در حقیقت، نیاز آبی گیاه را در مراحل مختلف رشد به مدل معرفی کرده و متغیرهای سطح تنش و مقدار عمق آب آبیاری، نشان می‌دهد که نیاز آبیاری تا چه حد تامین شده است. قیصری و همکاران (Gheysari *et al.*, 2012) نیز بیان داشتند که GDD می‌تواند شبیه‌سازی عملکرد محصول با ANFIS در تیمارهای تحت تنش را افزایش دهد. (شکل ۴) روند تغییرات مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده‌ی رطوبت با مدل‌های ANFIS و HYDRUS2D در تیمارهای

### نتیجه‌گیری کلی

این پژوهش، با هدف قابلیت کاربرد سیستم استنتاج عصبی- فازی در مدیریت کم‌آبیاری در مقایسه با مدل عددی و دقیق HYDRUS2D و بر اساس داده‌های به دست آمده طی دو فصل زراعی در یک مزرعه‌ی ذرت تحت تیمارهای آبیاری کامل و کم‌آبیاری در دو سطح ۷۵ و ۵۵ درصد انجام شد. مقایسه‌ی روند تغییرات زمانی رطوبت و اجزای بیلان رطوبت خاک در این مدل‌ها بر اساس داده‌های مشاهده‌ای، امکان استفاده از مدل ANFIS در تعیین زمان بهینه‌ی اعمال کم‌آبیاری در طول فصل رشد و تعیین سطح کاهش آب را به اثبات رساند. همچنین به کارگیری متغیرهای مستقل مناسب، ساده و زودیافت در مدل ANFIS، امکان تعریف سناریوهای مدیریتی با این مدل در محدوده‌ی کالیبره شده و کاهش دشواری‌های مدل‌سازی را نشان می‌دهد.

می‌تواند خنک‌تر بودن هوا و کم‌تر بودن نیاز آبی گیاه ذرت در طول فصل کشت دوم باشد. در چنین شرایطی، می‌توان با همین سطح کاهش آب، حتی تیمارها را زودتر نیز اعمال نمود و یا سطح کاهش آب را افزایش داد. با این وجود، باید توجه داشت که اگر تیمارها بدون توجه به وضعیت تخلیه‌ی رطوبتی خاک بیش از اندازه زود اعمال شوند و یا کاهش عمق آب آبیاری، زیاد باشد، افزایش طول دوره‌ی تنش باعث اثرات نامطلوبی بر میزان عملکرد محصول خواهد شد (Karandish *et al.*, 2012). بنابراین، باید ابتدا زمان بهینه‌ی اعمال تیمار و عمق آب آبیاری در کم‌آبیاری تعیین شود. بر اساس نتایج این پژوهش، مدل ANFIS می‌تواند پاسخگوی نیاز در این راستا باشد.

### References

- Ajdary, K., Singh, D.K., Singh, A.K., Khanna, M. (2007). Modeling of nitrogen leaching from experimental onion field under drip fertigation. *Agric. Water Manage.* 89, 15–28.
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. FAO, Rome, 300(9), D05109.
- Birchak, J. R., Gardner, C. G., Hipp, J. E., & Victor, J. M. (1974). High dielectric constant microwave probes for sensing soil moisture. *Proceedings of the IEEE*, 62(1), 93-98.
- Bishop, C. M. (1995). *Neural networks for pattern recognition*. Oxford university press.
- Celia, M.A., Bouloutas, E.T., Zarba, R.L. 1990. A general mass-conservative numerical solution for the unsaturated flow equation. *Water Resour. Res.* 26, 1483–1496.
- Cote, C. M., Bristow, K. L., Charlesworth, P. B., Cook, F. J., & Thorburn, P. J. (2003). Analysis of soil wetting and solute transport in subsurface trickle irrigation. *Irrigation Science*, 22(3-4), 143-156.
- Dasberg, S., & Hopmans, J. W. (1992). Time domain reflectometry calibration for uniformly and nonuniformly wetted sandy and clayey loam soils. *Soil Science Society of America Journal*, 56(5), 1341-1345.
- Malamos, N. (2007). Estimation of width and depth of the wetted soil volume under a surface emitter, considering root water-uptake and evaporation. *Water resources management*, 21(8), 1325-1340.
- FAO. (2010). *AQUACROP Annexes: Reference Manual*, 50p.
- Gardenas, A. I., Hopmans, J. W., Hanson, B. R., & Šimůnek, J. (2005). Two-dimensional modeling of nitrate leaching for various fertigation scenarios under micro-irrigation. *Agricultural water management*, 74(3), 219-242.
- GHORBANI, D. S., HOMAELI, M., & Mahdian, M. H. (2009). Estimating soil water infiltration parameters using Artificial Neural Networks.
- Gilley, J. R., Watts, D. G., & Sullivan, C. Y. (1980). Management of irrigation agriculture with a limited water and energy supply. Institute of Agriculture and Natural Resources, University of Nebraska-Lincoln, 168.

- Hupet, F., Lambot, S., Javaux, M., & Vanclooster, M. (2002). On the identification of macroscopic root water uptake parameters from soil water content observations. *Water resources research*, 38(12).
- Besharat, S., Khanmohammadi, N., Rezaie, H., & Behmanesh, J. (2012). Evaluation of soil water profile simulations in drip irrigation based on soil hydraulic properties with experimental observations. In *Soil and Water Engineering. International Conference of Agricultural Engineering-CIGR-AgEng 2012: agriculture and engineering for a healthier life*, Valencia, Spain, 8-12 July 2012 (pp. C-1035). CIGR-EurAgEng.
- Karandish, F., Mirlatifi, S.M., Shahnazari, A., Abbasi, F., Gheysari, M. (2012). Effect of partial root-zone drying (PRD) and deficit irrigation on Nitrogen uptake and leaching in maize. *Journal of Water and Irrigation Management*, 2(2), 85-98.
- Karandish, F., Mirlatifi, S.M., Shahnazari, A., Abbasi, F., Gheysari, M. (2013). Investigating the influence of partial root-zone drying and deficit irrigation on water productivity, maize yield and yield components. *Journal of Water and Soil Researches*, 44(1), 33-44.
- Karandish F. 2016. Improved soil-plant water dynamics and economic water use efficiency in a maize field under locally water stress. *Arch Agronomy Soil Science*. 1-13.
- Klocke, N. L., Schneekloth, J. P., Melvin, S. R., Clark, R. T., & Payero, J. O. (2004). Field scale limited irrigation scenarios for water policy strategies. *Applied engineering in agriculture*, 20(5), 623.
- Nash, J. E., & Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I—A discussion of principles. *Journal of hydrology*, 10(3), 282-290.
- Parchami-Araghi, F., Mirlatifi, S. M., Dashtaki, S. G., & Mahdian, M. H. (2013). Point estimation of soil water infiltration process using Artificial Neural Networks for some calcareous soils. *Journal of Hydrology*, 481, 35-47.
- Payero, J. O., Melvin, S. R., Irmak, S., & Tarkalson, D. (2006). Yield response of corn to deficit irrigation in a semiarid climate. *Agricultural Water Management*, 84(1), 101-112.
- Robins, J. S., & Domingo, C. E. (1953). Some effects of severe soil moisture deficits at specific growth stages in corn. *Agronomy Journal*, 45(12), 618-621.
- Schneekloth JP, Klocke NL, Hergert GW, Martin DL, Clark RT .1991. Crop rotations with full and limited irrigation and dryland management. *Trans. ASAE* 34: 2372-2380.
- Simunek, J., Sejna, M., van Genuchten, M.Th. (1999). The HYDRUS-2D Software Package for Simulating Two-Dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variable Saturated Media. Version 2.0. IGWMCTPS-53, International Ground Water Modeling Center, Colorado School of Mines, Golden, Colorado, pp. 1-251.
- Stone, L. R. (2003, February). Crop water use requirements and water use efficiencies. In *Proceedings of the 15th annual Central Plains irrigation conference and exposition*. February (pp. 4-5).
- Tafteh, A., Sepaskhah, A.R. 2012. Application of HYDRUS-1D model for simulating water and nitrate leaching from continuous and alternate furrow irrigated rapeseed and maize fields. *Agricultural Water Management*, 113: 19- 29.
- Vrugt, J. A., Hopmans, J. W., & Simunek, J. (2001). Calibration of a two-dimensional root water uptake model. *Soil Science Society of America Journal*, 65(4), 1027-1037.
- Wang, Z., Li, J., & Li, Y. (2014). Simulation of nitrate leaching under varying drip system uniformities and precipitation patterns during the growing season of maize in the North China Plain. *Agricultural Water Management*, 142, 19-28.

## Estimating the water stress in soil using HYDRUS2D and Adaptive Neuro-Fuzzy Interference System

Fatemeh Karandish<sup>1\*</sup>, Parviz Haghghatju<sup>2</sup>

(Received: February 2015

Accepted: August 2015)

### Abstract

Most In this research, the ability of HYDRUS2D and ANFIS models for simulating temporal variations of soil water content and soil water balance components under full irrigation and water deficit irrigation with two levels of 75 and 55 percentage in a maize field were compared to determine water stress duration in the growing season. To do so, soil water content was measured using TRIME-FM TDR sensors during two growing seasons for calibrating and validating HYDRUS2D model. Also, soil water content was simulated using ANFIS with different type of membership functions and using independent variables of days after planting, GDD, irrigation depth and water stress level. Comparing root mean square error, mean bias error and model efficiency coefficient indices for simulating soil water content stress period duration, soil water content and soil water balance components demonstrated the possibility of using ANFIS instead of a complicated model such as HYDRUS2D when defining the suitable independent variables. Despite 10 days sooner application of treatments in second growing season, the same water stress duration under DI75 treatment for both growing season (i.e. since 82 DAP till harvest) shows that it is possible to apply treatments either sooner or with higher intensity when applying deficit irrigation. Based on the results, ANFIS model could be used for these purposes.

**Keywords:** ANFIS, Deficit irrigation, GDD, Soil water content, water balance components.

---

1-Assistant Professor, Water Engineering Department, Water and Soil Faculty, University of Zabol, Zabol, Iran

2-Assistant Professor, Water Engineering Department, Water and Soil Faculty, University of Zabol, Zabol, Iran

\* Corresponding Author: [F.Karandish@uoz.ac.ir](mailto:F.Karandish@uoz.ac.ir)