

## تحلیل دینامیکی تأثیر مدیریت آبیاری بر دماهای آستانه‌ی خاک با مدل HYDRUS2D

فاطمه کاراندیش<sup>1</sup>

تاریخ دریافت: 1395/8/21 تاریخ پذیرش: 1396/6/17

### چکیده

دماهای آستانه‌ی خاک یکی از مهم‌ترین مؤلفه‌های اثرگذار بر ویژگی‌های بیولوژیکی گیاهان بوده و تا حد زیادی می‌تواند رشد ریشه و در پی آن، جذب آب و عناصر غذایی از خاک را متاثر سازد. از آنجایی که رطوبت خاک، سهم مهمی در کنترل دمای خاک دارد، پیش‌بینی آثار محتمل اعمال یک استراتژی معین آبیاری می‌تواند امکان انتخاب شیوه‌ی مناسب با هدف افزایش کارایی مصرف آب و عناصر غذایی را فراهم سازد. بنابراین در این پژوهش، از مدل HYDRUS-2D، برای تحلیل دینامیکی تأثیر استراتژی‌های مختلف آبیاری بر تغییرات زمانی و مکانی دمای خاک و عدم قطعیت‌های حاکم در فرآیند شبیه‌سازی استفاده شد. داده‌های هم‌زمان دمای خاک و رطوبت، در شبکه‌ی منظمی از سنسورهای هوشمند IDRG SMS T-2 در محدوده‌ی ریشه‌ی گیاه ذرت تحت تیمارهای آبیاری کامل (FI)، کم‌آبیاری معمولی (DI) و آبیاری ناقص ریشه (PRD) در فصل زراعی 1389 جمع‌آوری شد. واسنجی مدل بر اساس داده‌های پیوسته قرائت شد طی 10 فرآیند آبیاری در هر تیمار و صحت‌سنجی بر اساس تغییرات روزانه‌ی دمای خاک صورت گرفت. در ادامه، تحلیل عدم قطعیت مدل در شبیه‌سازی دما بر اساس محاسبه‌ی واریانس خطا در بدهای مکانی و زمانی صورت گرفت. بر اساس معیارهای جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) و ضریب کارایی مدل (EF) در مرحله‌ی صحت‌سنجی، مدل HYDRUS-2D با دقت بالایی قادر به شبیه‌سازی دمای خاک ( $RMSE=0.02-0.42^{\circ}C$ ,  $EF=0.71-0.92$ ) بوده و کم‌ترین و بیش‌ترین مقدار میانگین RMSE در تخمین رژیم گرمایی خاک به ترتیب در تیمارهای FI و PRD بدست آمد. کم‌ترین دامن‌هی عدم قطعیت مدل در شبیه‌سازی دمای خاک در تیمارهای FI، PRD و DI در محدوده‌ی عمقی 60-80 سانتی‌متری مشاهده شد و مقادیر خطا در این تیمارها به ترتیب در محدوده‌های  $0.6 \pm 0.2$ ،  $5/9 \pm 2/3$  و  $5/4 \pm 2$  درصد قرار داشت. همچنین، بیش‌ترین مقادیر آن در تیمارهای FI، PRD و DI به ترتیب در محدوده‌های عمقی 0-20، 20-40 و 40-60 سانتی‌متری وجود داشت و مقادیر آن به ترتیب معادل  $9 \pm 5$ ،  $-0/6 \pm 3/04$  و  $-13/7 \pm 5/3$  درصد بود. بر اساس نتایج این پژوهش، اعمال PRD می‌تواند با کنترل دماهای آستانه در محدوده‌ی 9-28 درجه‌ی سانتی‌گراد، از تعداد روزهای تنش کاسته و شرایط مطلوب‌تری را برای رشد ریشه، به ویژه در محدوده‌های عمقی فراتر از 40 سانتی‌متری در خاک فراهم آورد.

واژه‌های کلیدی: آبیاری ناقص ریشه، تغییرات مکانی و زمانی دما، عدم قطعیت، مدل HYDRUS2D.

### مقدمه

ریشه و پیشی‌گرفتن آن از رشد ساقه است (Lathi et al., 2005)، افزایش ذخیره‌ی بیوماس در ریشه در مقایسه با اندام هوایی (Pregitzer et al., 2000) و افزایش تراکم ریشه (Callejas et al., 2009) و جذب آب و عناصر غذایی در لایه‌هایی پایینی خاک (Pregitzer et al., 2000) گزارش شده است. از این‌رو، تغییرات مکانی و زمانی دما در خاک تحت کشت‌های مختلف، گاهی به صورت مستقیم و بر مبنای داده‌های مشاهده‌ای دما (Todd et al., 2009; Abzhalimov., 2007; Li et al., 2009) و گاهی به صورت غیرمستقیم با اندازه‌گیری برخی پارامترهای موثر بر دما (Kasubuchi., 1982) تعیین شده است.

میزان رطوبت خاک یکی از پارامترهای مهمی است که رژیم گرمایی در پروفیل خاک را کنترل می‌کند (Dourado-Neto et al., 2009; Hlavinka et al., 1999). بررسی رابطه‌ی عمق آب آبیاری

رژیم گرمایی، یکی از پارامترهای اثرگذار بر بسیاری از ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک بوده و با مکانیزم‌های متعددی می‌تواند رشد گیاه را تحت تأثیر قرار دهد (Karandish and Shahnazari., 2016). الگوی رشد ریشه تا حد زیادی متأثر از دماهای آستانه خاک است و تغییر الگوی دمایی خاک با تأثیر بر آن جذب آب و عناصر غذایی از خاک را متاثر خواهد ساخت (Lathi et al., 2005; Callejas et al., 2009; Barber et al., 2000; Psarras et al., 1988). در بسیاری از پژوهش‌های پیشین، شرایط مطلوب دمایی در خاک، مهم‌ترین عامل آغاز زود هنگام رشد

1- عضو هیئت علمی گروه مهندسی آب دانشگاه زابل

Email: Karandish\_h@yahoo.com

علی‌رغم اهمیت مدل‌سازی انتقال دما به منظور اطلاع از وضعیت دمایی خاک تحت استراتژی‌های نوین آبیاری، تاکنون پژوهشی در زمینه‌ی مدل‌سازی تغییرات دمایی خاک تحت استراتژی‌های مختلف آبیاری صورت نگرفته است. این در حالی است که کسب چنین دانشی برای تخمین شدت تلفات محصول در نتیجه‌ی ایجاد شرایط دمایی نامناسب تحت یک رژیم آبیاری معین، جایگاه ویژه‌ای در فرآیند تصمیم‌گیری برای اعمال استراتژی‌های مدیریتی مختلف با هدف حفظ منافع اقتصادی دارد. همچنین، عدم قطعیت خروجی‌های مدل توانمندی چون HYDRUS-2D در شبیه‌سازی رژیم گرمایی خاک نیز کم‌تر مورد توجه محققان بوده است. بنابراین در این پژوهش، پس از واسنجی و صحت‌سنجی مدل HYDRUS-2D در شبیه‌سازی رژیم گرمایی خاک، حساسیت مدل به پارامترهای موجود در معادلات انتقال گرما و عدم قطعیت موجود در خروجی‌های مدل برای سناریوهای آبیاری منتخب ارزیابی خواهد شد.

## مواد و روش‌ها

### جمع‌آوری داده‌های مزرعه‌ای

طی یک فصل زراعی در سال 1389، پژوهشی با سه تیمار مشتعل بر آبیاری کامل (FI) با هدف 100 درصد تامین نیاز آبی گیاه، کم‌آبیاری معمولی (DI) و آبیاری ناقص ریشه (PRD) با تامین 75 درصد از نیاز آبی گیاه و با سه تکرار در مزرعه‌ی تحقیقاتی واقع در دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری صورت گرفت. این منطقه، با داشتن میانگین بارش 700 میلی‌متر و بر اساس طبقه‌بندی دومارتن، دارای اقلیم مرطوب می‌باشد (Karandish and Simunek., 2016a). در ابتدای فصل کشت، نمونه‌های خاک از محدوده‌های عمقی 20 سانتی‌متری تا عمق 100 سانتی‌متر در هر تیمار برداشت و علاوه بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی در آن‌ها، منحنی‌های مشخصه مشاهداتی با استفاده از دستگاه صفحات فشاری و با تعیین نقاط رطوبتی متناظر در 11 نقطه‌ی فشاری بدست آمد. سپس با استفاده از آن‌ها، ویژگی‌های هیدرولیکی خاک در هر عمق در مدل ون‌گنوختن-معلم با مدل RETC تعیین شد. ویژگی‌های فیزیکی خاک در محدوده‌ی 0-100 سانتی‌متری در جدول 1 ارائه شد.

و دمای خاک نشان داد که اعمال عمق‌های بیش‌تر آب می‌تواند به دلیل افزایش رطوبت در لایه‌ی 0-30 سانتی‌متری، دامنه‌ی نوسانات دمایی را کنترل نموده و حدود دماهای آستانه را کاهش دهد (Abdel-Nasser et al., 1984). اگر شرایط دمایی در اعماق خاک برای رشد ریشه مطلوب باشد، این احتمال وجود دارد که گیاه با گسترش سیستم ریشه‌ی خود و جذب آب از لایه‌های آبدارتر پایینی، کمبود جذب آب از لایه‌های سطحی را جبران نموده و آسیب‌های تنش رطوبتی را کاهش دهد. در پژوهشی بر روی گیاه ذرت تحت استراتژی‌های مختلف آبیاری این نتیجه حاصل شد که اعمال آبیاری ناقص ریشه می‌تواند با بهبود وضعیت دما در عمق‌های بالاتر از 40 سانتی‌متر در خاک، جذب آب و نیتروژن از این لایه‌ها را بهبود داده و از کاهش معنی‌دار محصول جلوگیری نماید (Karandish and Shahnazari., 2016). به این ترتیب، پیش‌بینی پروفیل دما در خاک می‌تواند از یک‌سو زمینه‌ی لازم برای اعمال مدیریت بهینه‌ی آبیاری جهت حفظ منافع اقتصادی و زیست‌محیطی را فراهم آورد و از سوی دیگر، باعث صرفه‌جویی در مصرف آب در بخش کشاورزی گردد. با این وجود، کسب چنین دانشی مستلزم انجام پژوهش‌های مزرعه‌ای و صرف هزینه‌های گزاف در تأمین داده‌های مورد نیاز برای انجام چنین تحلیل‌هایی می‌باشد. این در حالی است که در بسیاری از موارد، تصمیم‌گیری در مورد اعمال یک شیوه‌ی مدیریتی، نیازمند دانستن تغییرات دمایی خاک پیش از اجرای طرح می‌باشد. در چنین شرایطی، استفاده از مدل‌های شبیه‌ساز جریان گرما در خاک، می‌تواند کمک شایانی به تخمین وضعیت محتمل تحت اعمال سناریوهای متعدد نماید.

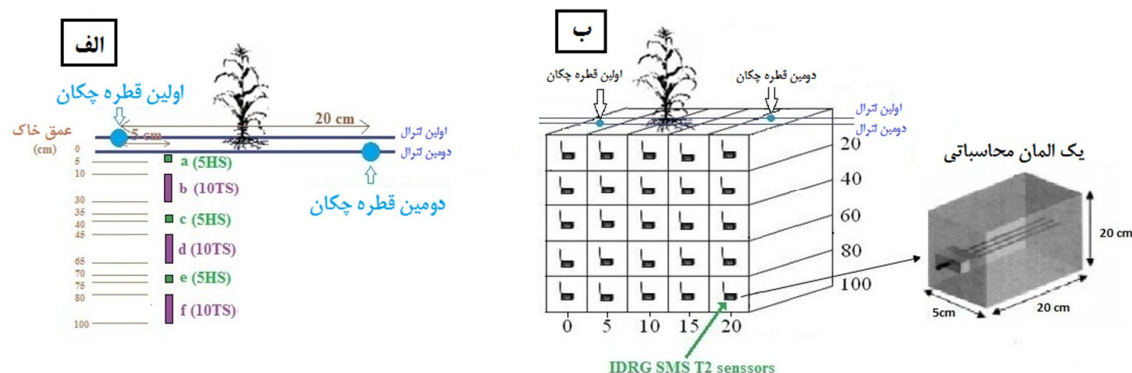
مدل HYDRUS-2D یکی از مدل‌های توانا در شبیه‌سازی جریان آب، املاح و گرما در خاک بوده و توسط سیمونک و همکاران در سال 2008 توسعه داده شده است (Simunek et al., 2008). در برخی پژوهش‌های معدود و غالباً با هدف کاهش خطا در تخمین پارامترهای هیدرولیکی خاک با مدل‌سازی معکوس، به شبیه‌سازی شار گرما در خاک با استفاده از نسخه‌های یک‌بعدی و دو بعدی مدل HYDRUS-2D پرداخته شده است (Nakhaei and Simunek., 2014). با این وجود، بررسی پژوهش‌های پیشین نشان می‌دهد که

جدول 1- ویژگی‌های فیزیکی خاک در محدوده‌ی عمقی 0-100 سانتی‌متری

عمق (cm)	بافت خاک	شن (%)	سیلت (%)	رس (%)	ظرفیت مزرعه (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	نقطه پژمردگی (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	چگالی ظاهری (gr cm <sup>-1</sup> )
0-20	لومرسی شنی	49	22	27	0/30	0/15	1/4
20-40	لومرسی	40	25	35	0/32	0/14	1/38
40-60	لومرسی	30	36	34	0/32	0/14	1/35
60-80	لومرسی	37	30	33	0/32	0/14	1/37
80-100	لومرسی	36	28	34	0/32	0/14	1/37

25 سنسور IDR GSMST-2 (Karandish., 2016) مطابق شکل 1 در محدوده‌ی ریشه نصب شد. اندازه‌گیری دما به صورت روزانه قبل و بعد از هر نوبت آبیاری صورت گرفت. همچنین، برای واسنجی مدل HYDRUS-2D، در هر یک از تیمارها، 10 واقعه‌ی آبیاری در طول فصل کشت با شدت‌های مختلف انتخاب شد و سپس، الگوی تغییرات دما در زمان‌های قبل از آبیاری، بلافاصله بعد، 2، 6، 12، 24، 48 و 96 ساعت پس از آبیاری با استفاده از سنسورهای نصب‌شده در خاک اندازه‌گیری شد.

آبیاری با استفاده از سیستم آبیاری قطره‌ای سطحی انجام شد. برای هر ردیف کشت، دو لترال حاوی قطره‌چکان‌هایی با دبی دو لیتر بر ساعت و با فواصل 40 سانتی‌متر داخل لوله‌ها اختصاص داده شد. پس از نصب سیستم آبیاری، شش سنسور رطوبت‌سنج Decagon (Germany) برای اندازه‌گیری رطوبت خاک جهت محاسبه‌ی عمق آبیاری در تیمار FI در فاصله‌ی افقی بین محل کاشت و قطره‌چکان و در فواصل عمقی مطابق با شکل 1 در محدوده‌ی ریشه‌ی گیاه نصب شد. قرائت این سنسورها پیش از هر نوبت آبیاری در کل فصل رشد انجام شد. همچنین، به منظور اندازه‌گیری دمای خاک، در هر تیمار،



شکل 1- موقعیت سنسورهای Decagon: (الف) IDR GSMST-2 و (ب) در محدوده‌ی ریشه‌ی ذرت

شبیه‌سازی دینامیکی دمای خاک با مدل HYDRUS-2D (Simunek et al., 2008) یکی از مدل‌های توانا در شبیه‌سازی جریان دوبعدی آب، اصلاح و گرما در خاک است که می‌تواند در محدوده‌ی وسیعی از شرایط مرزی به کار گرفته شود. جریان آب در این مدل، با رابطه‌ی ریچاردز (2) شبیه‌سازی می‌شود:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) - \frac{\partial k}{\partial z} - WU(h, x, z) \quad (2)$$

که در آن،  $\theta$  رطوبت حجمی ( $L^3 L^{-3}$ )،  $K$  هدایت هیدرولیکی غیراشباع ( $LT^{-1}$ )،  $h$  فشار رطوبت خاک ( $L$ )،  $x$  فاصله‌ی افقی ( $L$ )،  $z$  فاصله‌ی عمودی ( $L$ )،  $t$  زمان ( $T$ ) و  $WU(h, x, z)$  جذب آب به‌وسیله‌ی ریشه ( $LT^{-1}$ ) را نشان می‌دهد.  $WU$  با رابطه‌ی 3 محاسبه می‌شود:

$$WU(h, x, z) = \gamma(h) RDF(x, z) WT_{pot} \quad (3)$$

که در آن،  $\gamma(h)$  تابع بدون بعد تنش رطوبتی در خاک (Feddes et al., 1978)،  $RDF$  توزیع جذب آب نرمال شده ( $L^{-2}$ )،  $T_{pot}$  حداکثر شدت تعرق ( $LT^{-1}$ ) و  $W$  عرض سطحی از خاک ( $L$ ) که تعرق از آن صورت می‌گیرد. در این پژوهش، از تابع وراگت و همکاران برای توصیف توزیع ریشه در خاک استفاده شد (Vrugt et al., 2001). میزان نحوه‌ی تخمین  $T_{pot}$  در پژوهش کاراندیش و سیمونک ارایه

ذرت سینگل کراس رقم 704، در تاریخ 5 خرداد 1389 با فواصل بین و روی ردیف  $20 \times 60$  سانتی‌متر کاشت شد. نیاز آبیاری روزانه در تیمار FI بر اساس رابطه‌ی 1 تعیین شد:

$$I_{nFI} = \sum_{j=1}^6 ((\theta_{FCj} - \theta_{BIj}) \times D_j) \quad (1)$$

که در آن،  $I_{nFI}$  نیاز آبیاری خالص (mm) به  $\theta_{FCj}$  و  $\theta_{BIj}$  ترتیب، مقادیر حجمی رطوبت در حد ظرفیت مزرعه و قبل از آبیاری (%).  $D$  عمق خاک و  $J$  شماره‌ی لایه‌های خاک در محدوده‌ی ریشه (شکل 1-الف) می‌باشد. از ابتدای فصل کشت تا 55 روز بعد از آن، تمام تیمارها حجم آب یکسانی را دریافت داشتند. در بازه‌ی زمانی 55 روز بعد از کاشت تا انتهای فصل رشد (دوره‌ی تنش)، در هر نوبت آبیاری، 75 درصد از حجم آبیاری خالص محاسبه شده در تیمار FI در تیمارهای DI و PRD اعمال شد. برخلاف تیمارهای FI و DI، در هر نوبت آبیاری در طول دوره‌ی تنش، به منظور خشک نگاه داشتن بخشی از ریشه، جریان تنها در نیمی از لترال‌ها در تیمار PRD وجود داشت و سمت خشک و تر در این تیمار به صورت هفتگی جابجا می‌شد. برداشت در تاریخ 18 شهریور انجام شد. جزئیات اجرای طرح در پژوهش کاراندیش (Karandish., 2016) ارایه شده است.

## نتایج و بحث

### تحلیل کارایی مدل HYDRUS2D در شبیه‌سازی دینامیک آب و گرما

به منظور واسنجی مدل، داده‌های هم‌زمان رطوبتی و دمایی ثبت شده طی 10 رویداد آبیاری در زمان‌های قبل از آبیاری، بلافاصله بعد، یک، دو، چهار و شش ساعت پس از آبیاری استفاده شد. در فرآیند مدل‌سازی معکوس، ابتدا مدل بر اساس داده‌های هیدرولیکی شامل رطوبت اشباع، رطوبت باقیمانده و هدایت هیدرولیکی اشباع خاک کالیبره شد. سپس، در مرحله دوم، مقادیر پارامترهای b1، b2 و b3 در تابع هدایت‌پذیری گرمایی برای نیل به بیش‌ترین انطباق بین مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده‌ی دمای خاک بهینه شد. شکل 2، به عنوان نمونه، توزیع مکانی مقادیر شبیه‌سازی شده دمای خاک و تطابق آن با مقادیر مشاهده‌ای بلافاصله بعد از آبیاری در یکی از رویدادهای مذکور را تحت تیمارهای مختلف نشان می‌دهد. اگرچه این تطابق در تیمار FI بیش‌تر است ( $R^2=0.99$ )، ولی مقادیر بالای ضریب همبستگی در تیمارهای PRD (0/94) و DI (0/92) حاکی از دقت قابل قبول مدل در شبیه‌سازی تغییرات مکانی دما است. همچنین، میانگین مقادیر محاسبه‌شده‌ی ضریب کارایی مدل (0/86-0/99) بر اساس داده‌های موجود در 10 رویداد منتخب نیز این نتیجه را تأیید می‌کند (جدول 2). بر اساس جدول 2، دامنه‌ی تغییرات جذرمیانگین مربعات خطا در زمان‌های بلافاصله بعد، 1، 2، 4 و 6 ساعت بعد از آبیاری در 10 رویداد منتخب در تیمارهای FI، PRD و DI به ترتیب  $0.06-0/1$  °C،  $0/09-0/16$  °C و  $0/05-0/11$  °C می‌باشد. به نظر می‌رسد بالاتر بودن تغییرات رطوبتی پس از آبیاری در تیمار PRD باعث افزایش دامنه‌ی نوسانات دمایی شده و این مساله، خطای شبیه‌سازی در این تیمار را تا حدی افزایش داده است. دامنه‌ی محدودتر خطا در تیمار DI نیز موید این یافته است.

پس از واسنجی مدل، از مقادیر روزانه‌ی اندازه‌گیری شده دمای خاک در طول فصل رشد برای صحت‌سنجی مدل استفاده شد. شکل 3 مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده میانگین دمای خاک قبل از هر نوبت آبیاری در محدوده‌های عمقی مختلف در طول فصل رشد را برای تیمارهای مختلف به تصویر می‌کشد. علی‌رغم توانایی مدل در شبیه‌سازی روند تغییرات زمانی دما، دقت شبیه‌سازی با مدل HYDRUS2D در لایه‌ی سطحی (0-20 سانتی‌متر) کم‌تر از دیگر محدوده‌های عمقی بود. از آن‌جایی که بیش‌ترین تغییرات رطوبتی به دلایلی همچون جذب آب به‌وسیله‌ی ریشه، تبخیر از سطح خاک، بارندگی و آبیاری، اغلب در 25 درصد اولیه‌ی محدوده‌ی ریشه رخ می‌دهد، و همچنین به دلیل همبستگی خطی تغییرات دما با رطوبت در این پژوهش ( $R^2=0/92$ )، می‌توان این‌گونه ادعان داشت که افزایش دامنه‌ی نوسانات رطوبتی، دقت شبیه‌سازی تغییرات دمای

شد (Karandish and Simunek., 2016a,b). شار گرما در خاک در مدل HYDRUS-2D با رابطه‌ی ذیل توصیف می‌شود (Sopchleous, 1979):

$$C(\theta) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \lambda_{ij}(\theta) \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) - C_w q_i \frac{\partial T}{\partial x_i} \quad (4)$$

که در آن،  $\lambda_{ij}(\theta)$  هدایت گرمایی ظاهری خاک ( $MLT^{-3}K^{-1}$ ) و  $C(\theta)$  و  $C_w$  ظرفیت گرمایی حجمی ( $ML^{-1}T^{-2}K^{-1}$ ) در محیط خاک و در فاز مایع می‌باشند. ظرفیت گرمایی از حاصل‌ضرب چگالی ظاهری و ظرفیت گرمایی جرمی تعیین می‌شود. در رابطه‌ی فوق، اولین ترم در سمت راست، جابجایی گرما با فرآیند انتقال و ترم دو جابجایی گرما در نتیجه‌ی جریان توده‌ای (حرکت گرما با آب) را نشان می‌دهد. در این رابطه، از حرکت گرما به صورت بخار صرف‌نظر شده است. ظرفیت گرمایی حجمی را می‌توان با استفاده از رابطه‌ی ذیل برآورد نمود:

$$C(\theta) = C_n \varepsilon_n + C_o \varepsilon_o + C_w \varepsilon_w + C_g \varepsilon_g \quad (5)$$

که در آن،  $\varepsilon$  کسر حجمی و اندیس‌های  $n$ ،  $w$ ،  $o$ ،  $m$  به ترتیب، مبین فاز جامد، مواد آلی، مایع و گاز می‌باشند. مقدار هدایت گرمایی ظاهری ( $\lambda_{ij}(\theta)$ ) با استفاده از رابطه‌ی ذیل برآورد می‌شود (Simunek and Suarez., 1993):

$$\lambda_{ij}(\theta) = \lambda_T C_w |q| \delta_{ij} + (\lambda_L - \lambda_T) C_w \frac{q_j q_i}{|q|} + \lambda_0(\theta) \delta_{ij} \quad (6)$$

که در آن،  $q$  شدت جریان ( $LT^{-1}$ )،  $\delta_{ij}$  تابع دلتای کروونکر و  $\lambda_L$  و  $\lambda_T$  ضرایب پخشیدگی طولی و عرضی ( $L$ ) می‌باشند. مقدار هدایت گرمایی ( $\lambda_0(\theta)$ ) با استفاده از رابطه‌ی ساده ذیل برآورد می‌شود (Chung and Horton, 1987):

$$\lambda_0(\theta) = b_1 + b_2 \theta + b_3 \theta^{0.5} \quad (7)$$

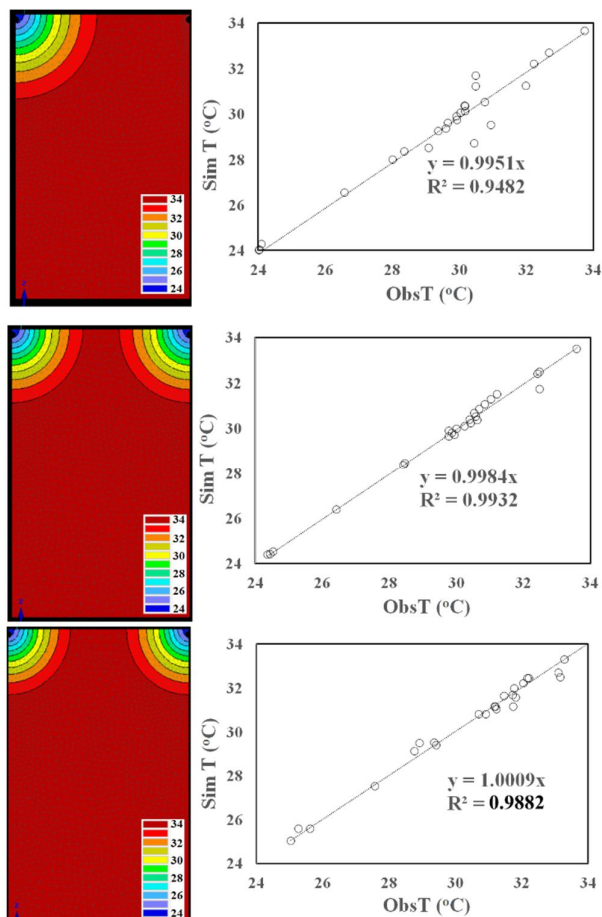
که در آن،  $b_1$ ،  $b_2$  و  $b_3$  ( $MLT^{-3}K^{-1}$ ) ضرایب تجربی بوده و در مرحله‌ی واسنجی، با فرآیند مدل‌سازی معکوس بهینه خواهند شد. در هر دو مرحله‌ی واسنجی و صحت‌سنجی مدل، از داده‌های هم‌زمان رطوبت و دمای خاک که در رویدادهای منتخب قرائت شد، استفاده شد. دمای اندازه‌گیری شده در پروفیل خاک و در شروع فرآیند شبیه‌سازی به عنوان شرایط اولیه وارد مدل شد. شرایط مرزی نوع سوم برای دما در هر دو مرز بالادست و پایین‌دست انتخاب و در سایر مرزها شرایط بدون جریان انتخاب شد.

### معیارهای ارزیابی و تحلیل عدم قطعیت

به منظور ارزیابی دقت مدل HYDRUS-2D از معیارهای جذر میانگین مجذور مربعات خطا (RMSE) و ضریب کارایی مدل (EF) استفاده شد. همچنین برای تعیین دامنه‌ی عدم‌قطعیت در فرآیند شبیه‌سازی دمای خاک، جذر واریانس خطا در بعدهای زمانی و مکانی محاسبه شد (Karandish et al., 2016).

نتایج آن در شکل 4 ارائه شد. کمترین دامنه‌ی عدم قطعیت مدل در شبیه‌سازی دمای خاک در تیمارهای FI، PRD و DI در محدوده‌ی عمقی 60-80 سانتی‌متری مشاهده شد و مقادیر خطا در این تیمارها به ترتیب در محدوده‌های  $0.06 \pm 0.2$ ،  $5/9 \pm 2/3$  و  $-5/4 \pm 2$  درصد قرار داشت.

خاک در لایه‌ی سطحی را تا حدی کاهش داده است. با این وجود، مدل HYDRUS2D به خوبی قادر به شبیه‌سازی روند تغییرات زمانی دما در تمام تیمارها بوده و خطای اندک شبیه‌سازی در تمام تیمارها و محدوده‌های عمقی قابل قبول است. این یافته با نتایج پژوهشگران پیشین مطابقت داد (Nakhaei and Simunek., 2014).  
به منظور تعیین دامنه‌ی عدم قطعیت مدل HYDRUS2D در تخمین دمای خاک، واریانس خطا در تیمارهای مختلف محاسبه و



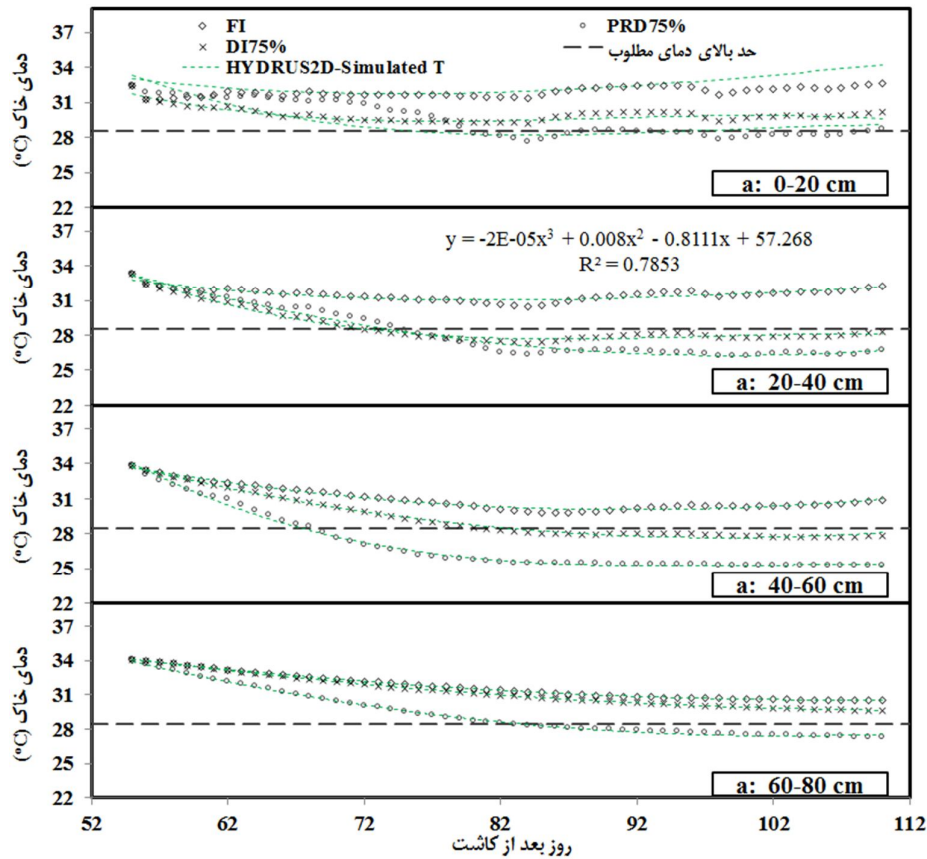
شکل 2- تطابق مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده‌ی دمای خاک در نقاط مشاهده‌ای در محدوده‌ی ریشه‌ی ذرت بلافاصله بعد از آبیاری در تیمارهای مختلف

جدول 2- مقایسه‌ی مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده‌ی دمای خاک در مراحل واسنجی و صحت‌سنجی بر اساس معیارهای ارزیابی

تیمار	(1)		(2)		(3)		(4)		(5)	
	EF	RMSE	EF	RMSE	EF	RMSE	EF	RMSE	EF	RMSE
FI	0/97	0/1	0/94	0/06	0/95	0/09	0/94	0/08	0/89	0/07
PRD	0/88	0/12	0/99	0/09	0/96	0/19	0/93	0/16	0/86	0/15
DI	0/88	0/11	0/92	0/05	0/93	0/08	0/94	0/07	0/95	0/09

\* (1) بلافاصله بعد از آبیاری اول، (2) 1 ساعت بعد، (3) 2 ساعت بعد، (4) 4 ساعت بعد، (5) 6 ساعت بعد از آبیاری اول

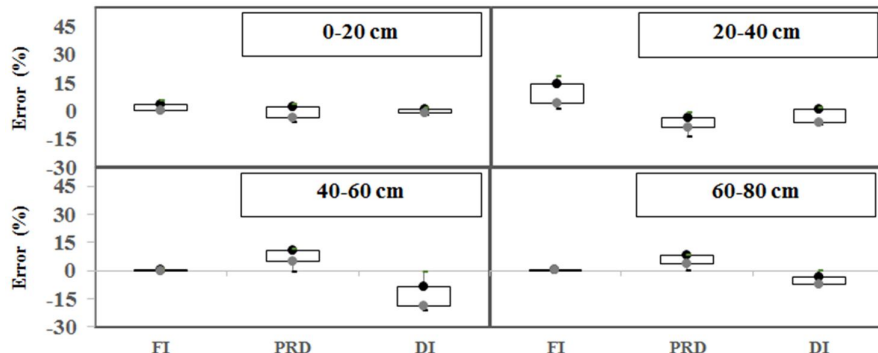
\*\* RMSE جذرمیانگین مربعات خطا (°C) و EF ضریب کارایی مدل



شکل 3- مقایسه‌ی مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده‌ی دمای خاک با مدل HYDRUS2D در مرحله‌ی صحت‌سنجی

اندک در حین مدل‌سازی با HYDRUS2D در پژوهش‌های دیگری نیز گزارش شده است (Karandish and Simunek., 2016b). در پژوهش مذکور، ضمن به‌کارگیری مدل HYDRUS2D در شبیه‌سازی رطوبت خاک در مقایسه با دیگر مدل‌ها، دامنه‌ی اندک عدم-قطعیت مدل در تخمین نوسانات رطوبتی خاک تحت مدیریت‌های مختلف آبیاری به اثبات رسیده است.

همچنین، بیش‌ترین مقادیر آن در تیمارهای FI، PRD و DI به ترتیب در محدوده‌های عمقی 0-20، 20-40 و 40-60 سانتی‌متری وجود داشت و مقادیر آن به ترتیب معادل  $9 \pm 5$ ،  $-0/6 \pm 3/04$  و  $-13/7 \pm 5/3$  درصد بود. با این وجود، مقادیر اندک میانگین خطا و دامنه‌ی محدود عدم‌قطعیت مدل در تمام محدوده‌های عمقی و تحت تیمارهای مختلف، حاکی از سطح اعتماد بالای نتایج شبیه‌سازی دمای خاک با مدل HYDRUS2D می‌باشد. وجود دامنه‌ی عدم قطعیت

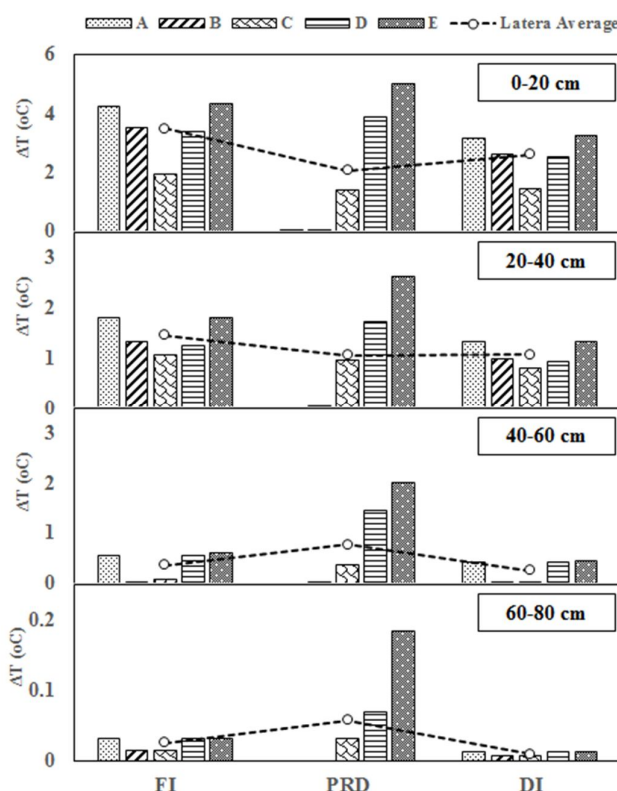


شکل 4 - دامنه‌ی عدم قطعیت مدل HYDRUS2D در تخمین دمای خاک در محدوده‌های عمقی و تیمارهای مختلف

## تأثیر مدیریت آبیاری بر تغییر دما

همان‌گونه که در شکل 1 نشان داده شد، برای تفسیر نتایج، کل محدوده‌ی ریشه به 25 المان تقسیم شد که هر یک محدوده‌ای به حجم  $5 \times 20 \times 20$  سانتی‌متر مکعب را شامل می‌شود. تغییرات مکانی دما به صورت میانگین در این المان‌ها محاسبه شد. برای تفکیک محدوده‌های خیس و خشک در تیمار PRD، پنج موقعیت افقی شامل مکان‌های A (محل قطره‌چکان خشک)، B، C، D و E به ترتیب به فاصله‌ی 5، 10، 15 و 20 سانتی‌متر از مکان قطره‌چکان خشک، تعریف شد. این در حالی‌است که در تیمارهای FI و DI، هر دو مکان A و E، معرف مکان قطره‌چکان‌های در حال تراوش می‌باشند. بر اساس داده‌های محاسبه شده برای کل دوره‌ی تنش (55 تا 107 روز بعد از کاشت) و صرف‌نظر از نوع تیمار، بیش‌ترین تغییرات دما پس از آبیاری در تمام محدوده‌های عمقی (بیش از 50 درصد از کل تغییرات دما در محدوده‌ی ریشه) در محل قطره‌چکان در حال تراوش رخ داده و با فاصله گرفتن از آن، دامنه‌ی تغییرات دما محدود شد (شکل 5). در تیمارهای FI و DI، کم‌ترین تغییرات دما در فاصله‌ی 10 سانتی‌متری

از محل قطره‌چکان در حال تراوش و در تیمار PRD در فاصله‌ی 20 سانتی‌متری از آن رخ داد. علاوه بر آن، توجه به تغییرات عمقی دما نشان داد که در تمام تیمارها، کم‌ترین و بیش‌ترین تغییرات دما به ترتیب در محدوده‌های عمقی 0-20 و 80-100 سانتی‌متری رخ داده و بیش از 90 درصد از تغییرات دما در نتیجه‌ی آبیاری منسوب به محدوده‌ی عمقی 0-60 سانتی‌متری بود. بسیاری از پژوهشگران پیشین، ارتباط خطی بین میزان رطوبت و دمای خاک را نشان دادند (Nainanayake et al., 2008; Roxy et al., 2010; Karandish and Shahnazari., 2016). طی پژوهشی در مزرعه‌ی ذرت، افزایش نوسانات دمایی در مراحل اولیه‌ی رشد گیاه، به دلیل تغییرات رطوبتی بیش‌تر در لایه‌های سطحی خاک گزارش شده است (Duna et al., 2010). افزایش دامنه‌ی تغییرات دما به دلایلی هم‌چون آبیاری، بارندگی و جذب آب توسط ریشه نیز در پژوهش‌های پیشین گزارش شده است (Dourado-Neto et al., 1999; Hlavinka et al., 2009).



شکل 5- میانگین تغییرات دما در المان‌های محاسباتی پس از آبیاری تحت تیمارهای مختلف و در طول دوره‌ی اعمال تنش (در تیمار PRD، A محل خشک و B، C، D و E به ترتیب 5، 10، 15 و 20 سانتی‌متر پس از آن هستند. در تیمار FI و DI، هر دو محل A و E محل تراوش قطره‌چکان هستند)

نتایج، پیش‌روی افقی بیش‌تر رطوبت تحت تیمار PRD را به اثبات می‌رساند (Karandish and Shahnazari., 2016). صرف‌نظر از فواصل افقی، اعمال تیمار PRD همچنین باعث افزایش معنی‌داری تغییرات دمایی در بخش مرطوب در محدوده‌های عمقی مختلف شد. شرایط رطوبتی مطلوب در لایه‌های مختلف خاک در تیمار PRD باعث شد که مقدار تغییرات دما در سمت مرطوب این تیمار در محدوده‌های عمقی 0-20، 20-40، 40-60 و 60-80 سانتی‌متری به ترتیب، 1/07، 1/29، 3/1 و 3/67 برابر بیش‌تر از مقدار متناظر آن در تیمار FI و به ترتیب، 1/43، 1/74، 4/29 و 9/63 برابر بیش‌تر از مقدار متناظر آن در تیمار DI باشد.

برای تحلیل تأثیر رژیم‌های مختلف آبیاری بر تغییرات دمایی خاک، مقایسه‌ی آماری بین مقادیر تغییرات افقی و عمقی دما در تیمارهای مختلف صورت گرفت (جدول 3). در محدوده‌ی عمقی 0-100 سانتی‌متری، میانگین تغییرات دما در محل قطره‌چکان در حال تراوش (E) و 5 سانتی‌متر بعد از آن (D)، به ترتیب 1/46 و 1/37 برابر بیش‌تر از تیمار FI و به ترتیب 1/97 و 1/85 برابر بیش‌تر از تیمار DI بوده و این اختلاف در سطح 5 درصد، معنی‌دار بود. اگرچه اختلاف معنی‌داری در میزان تغییرات دما در فاصله‌ی 10 سانتی‌متری بعد از قطره‌چکان در حال تراوش بین تیمارهای PRD و FI مشاهده نشد، لکن این اختلاف بین تیمارهای PRD و FI معنی‌دار بود. این

جدول 3- مقایسه‌ی آماری تغییرات دما در محدوده‌های افقی و عمقی در المان‌های C، D و E (سمت مرطوب در تیمار PRD) تحت رژیم‌های مختلف آبیاری

موقعیت	FI	PRD	DI	
مکان افقی (0-100 cm)	<sup>a</sup> 0/62	<sup>a</sup> 0/55	<sup>b</sup> 0/46	C
	<sup>b</sup> 1/04	<sup>a</sup> 1/43	<sup>c</sup> 0/77	D
	<sup>b</sup> 1/35	<sup>a</sup> 1/98	<sup>c</sup> 1/00	E
محدوده‌ی عمقی در محل CDE (cm)	<sup>a</sup> 3/21	<sup>a</sup> 3/42	<sup>b</sup> 2/39	0-20
	<sup>b</sup> 1/37	<sup>a</sup> 1/77	<sup>c</sup> 1/02	20-40
	<sup>b</sup> 0/41	<sup>a</sup> 1/28	<sup>b</sup> 0/3	40-60
	<sup>b</sup> 0/03	<sup>a</sup> 0/09	<sup>c</sup> 0/01	60-80
	<sup>b</sup> 0/00	<sup>a</sup> 0/02	<sup>b</sup> 0/00	80-100

مناسب برای رشد ریشه‌ی ذرت و بر اساس شکل 3، در 60 درصد از بازه‌ی زمانی اعمال تنش، مقدار متوسط دما در تیمار PRD کم‌تر از آستانه‌ی حداکثر بوده و این مدت زمان، در حد قابل توجهی بیش‌تر از سایر تیمارها بود. علاوه بر آن، اعمال تیمار PRD باعث کنترل دما در بازه‌ی مطلوب در لایه‌های عمیق شد. در طول دوره‌ی تنش، میانگین دما در لایه‌های 0-20، 20-40، 40-60 و 60-80 سانتی‌متری در این تیمار به ترتیب، 29/5، 28/2، 27/1 و 29/3 درجه‌ی سانتی‌گراد بود که این مقادیر بین 13-2 درصد کم‌تر از مقادیر متناظر در تیمارهای FI و DI بود. بیش‌ترین اختلاف دما بین تیمارهای مذکور در عمق‌های فراتر از 40 سانتی‌متر مشاهده شد.

وجود روند دمایی متفاوت تحت تیمار PRD می‌تواند به این دلیل باشد که در این تیمار، تنها نیمی از سیستم ریشه در هر نوبت، آبیاری شده و نیم دیگر خشک باقی می‌ماند. به این ترتیب، پیش‌روی افقی و عمودی رطوبت در هر نوبت آبیاری بیش‌تر بوده و متعاقباً، کاهش بیش‌تری در دمای خاک ایجاد می‌کند. امکان استفاده از مدیریت آبیاری برای کنترل دمای خاک در حد مطلوب برای رشد گیاه در پژوهش‌های دیگری نیز گزارش شده است (Nainanayakeet al., 2010; Roxy et al., 2008). در حقیقت، افزایش هدایت گرمایی

گسترش دامنه‌ی نوسانات دمایی در محدوده‌های عمقی و افقی، شرایط مناسب‌تری را از دیدگاه دماهای آستانه‌ی خاک برای رشد ریشه‌ی گیاه ذرت تحت تیمار PRD فراهم آورد. بسیاری از پژوهشگران پیشین، دماهای آستانه‌ی حداقل و حداکثر در خاک برای رشد ریشه‌ی ذرت را به ترتیب 9 و 28 درجه‌ی سانتی‌گراد گزارش نموده‌اند (Walker., 1969; Barber et al., 1988). کاهش دمایی آستانه‌ی حداقل به کم‌تر از 9 درجه‌ی سانتی‌گراد باعث کاهش جذب آب به دلیل تغییرساختار غشای سلولی و یا کاهش ویسکوزیته‌ی آب در خاک و کاهش نفوذپذیری ریشه (Lambers et al., 1998) خواهد شد. همچنین دماهای فراتر از 28 درجه‌ی سانتی‌گراد، می‌تواند باعث کاهش جذب آب شود (Karandish and Shahnazari., 2016). نگاهی به روند تغییرات مقادیر متوسط دمای روزانه‌ی خاک در محدوده‌ی ریشه در شکل 3 نشان می‌دهد دامنه‌ی تغییرات دمایی خاک در محدوده‌ی عمقی 0-80 سانتی‌متر در تیمارهای PRD و DI به ترتیب 27/3-34، 25/2-34 و 29/8-34 درجه‌ی سانتی‌گراد بوده و مقادیر متوسط دما در طول دوره‌ی تنش در تیمارهای مذکور به ترتیب 29/8، 28/5 و 31/5 درجه‌ی سانتی‌گراد بود. به لحاظ آستانه‌های 9-28 درجه‌ی سانتی‌گراد به عنوان محدوده‌ی دمایی



- Dourado-Neto, D., Timm, L.C., Oliveira, J.C.M., Reichardt, K., Bacchi, O.O.S., Tominaga, T.T., Cássaro, F.A.M. 1999. State-space approach for the analysis of soil water content and temperature in a sugarcane crop. *Scientia Agricola*. 56: 1215-1221.
- Duna, W and Chen, L. 2010. Spatiotemporal distribution pattern of soil temperature in forest gap in Pinuskoraiensis-dominated broadleaved mixed forest in Xiao Xing'an Mountains, China. 19th World Congress of Soil Science, Soil Solutions for a Changing World.
- Feddes, R.A., Kowalik, P.J., Zaradny, H. 1978. Simulation of field water use and crop yield. In: *Simulation Monographs*. Wageningen: Centre for Agricultural Publishing and Documentation. 189p.
- Hlavinka, P., Trnka, M., Balek, J., Zalud, Z., Hayes, M., Svoboda, M and Eitzinger, J. 2009. Modeling of soil water content and soil temperature at selected U.S. and central European stations using Soil Clim model. *Geophysics Research Abstract*. 11: EGU2009-11217.
- Karandish, F. 2016. Improved soil-plant water dynamics and economic water use efficiency in a maize field under locally water stress. *Archive of Agronomy and Soil Sciences*. 62.9: 1311-1323.
- Karandish, F., Simunek, J. 2016a. A field-modeling study for assessing temporal variations of soil-water-crop interactions under water-saving irrigation strategies. *Agricultural Water Management*. 178: 291-303.
- Karandish, F., Simunek J. 2016b. Numerical and machine-learning modeling of soil water content for sustainable water management in agriculture under water stress, *Journal of Hydrology*. 543: 892-909.
- Karandish, F., Shahnazari, B. 2016. Soil temperature and maize nitrogen uptake improvement under partial root zone drying. *Pedosphere*. 26.6: 872-886.
- Karandish, F., Mousavi, S.S., Tabari, H. 2016. Climate change uncertainty and risk assessment in Iran during 21th century: evapotranspiration and green water deficit analysis. *Theoretical and Applied Climatology*, DOI: 10.1007/s00704-016-2008-2.
- Kasubuchi, T. 1982. Heat conduction of soils. *Bull NatlInstAgricSciSer B*. (In Japanese). 33: 1-54.
- Kozłowski, T.T and Pallardy, S.G. 1997. *Physiology of woody plants*. Academic Press, San Diego. 2nd edition. ISBN 0-12-424162-X.
- Lambers, H., Chapin, F.S and Pons, T.L. 1998. *Plant physiological ecology*. Springer, New York. ISBN 0-387-98326-0.
- Lathi, M., Aphalo, P.J., Finer, L., Ryyppo, A., Lehto, T and Mannerkoski, H. 2005. Effects of soil temperature on shoot and root growth and nutrient uptake of 5-year-old Norway spruce seedlings. *Tree Physiology*. 25:

خاک خشک بعد از آبیاری می‌تواند باعث کنترل مطلوب دمای خاک در مقادیری پایین‌تر از آستانه‌ی حداکثر برای رشد مناسب ریشه‌ی گیاه شود (Kasubuchi., 1982). به این ترتیب، استفاده از روش آبیاری ناقص ریشه، می‌تواند راهی برای بهبود وضعیت دمایی خاک در کشت ذرت و در نهایت، کنترل مقادیر جذب آب و اصلاح در حد مطلوب شود (Karandish and Shahnazari., 2016).

## نتیجه‌گیری

در این پژوهش، بر اساس داده‌های جمع‌آوری شده در یک مزرعه ذرت، تحت رژیم‌های آبیاری کامل، کم‌آبیاری معمولی و آبیاری ناقص ریشه، قابلیت مدل HYDRUS2D در شبیه‌سازی تغییرات مکانی و زمانی دمای خاک بررسی شد و سپس، تأثیر مدیریت آبیاری بر کنترل دماهای آستانه‌ی خاک تحلیل گردید. مقادیر اندک معیارهای جذر میانگین مربعات خطا و ضرایب کارایی مدل نزدیک به یک در مراحل واسنجی و صحت‌سنجی از یک‌سو، و دامنه‌ی محدود عدم قطعیت مدل در شبیه‌سازی تغییرات زمانی دمای خاک در محدوده‌های عمقی مختلف از سوی دیگر، دلالت بر کارایی مدل HYDRUS2D در شبیه‌سازی دمای خاک دارند. تحلیل نتایج بدست آمده در این پژوهش نشان داد توسعه‌ی پیشروی افقی و عمودی رطوبت در خاک پس از هر نوبت آبیاری در تیمار آبیاری ناقص ریشه، دامنه‌ی تغییرات دما به ویژه در عمق‌های پایین‌تر خاک را افزایش داده و دماهای آستانه خاک را در حد مطلوب برای رشد ریشه‌ی گیاه کنترل می‌کند. به این ترتیب، اعمال مدیریت صحیح آبیاری، می‌تواند گزینه‌ی مطلوبی برای بهبود رشد گیاه ذرت و فراهم شدن شرایط مناسب برای توسعه‌ی سطح زیرکشت آن در منطقه مطالعاتی محسوب شود.

## منابع

- Abzhalimov, R.S. 2007. Calculation of the negative-temperature distribution of soils over the depth of frost. *Soil. Mechanics and Foundation Engineerig*. 44.1: 31-37.
- Barber, S.A., Mackey, A.D., Kuchenbuch, R.O and Barraclough, P.B. 1988. Effect of soil temperature and water on maize root growth. *Plant Soil*. 111: 267-269.
- Callejas, R., Pablo Canales, P and Victor Garcia, D.E., Cortazar, G.D.C. 2009. Relationship between root growth of Thompson seedless grapevines and soil temperature. *Chillinan Journal of Agricultural Research*. 69.4: 496-502.
- Chung, S.O., Horton, R. 1987. Soil heat and water flow with a partial surface mulch. *Water Resource Researches*. 23. 12: 2175-2186.

- Simunek,J., Van Genuchten,M.Th., ejna,M. 2008. Development and applications of the HYDRUS and STANMOD software packages and related codes, *Vadose Zone Journal*, 7(2), 587-600.
- Simunek,J., Suarez,D.L. 1993. The UNSATCHEM-2D code for simulating two-dimensional variably saturated water flow, heat transport, carbon dioxide production and transport, and multicomponent solute transport with major ion equilibrium and kinetic chemistry. Version 1.1, Research Report No. 128, U. S. Salinity Laboratory, USDA, ARS, Riverside, California.
- Sophocleous,M. 1979. Analysis of water and heat flow in unsaturated-saturated porous media. *Water Resource Researches*. 15. 5. 1195-1206.
- Todd,R.W., Evett,S.R., Howell,T.A and Klocke,N.L. 2000. Soil temperature and water evaporation of small steel and plastic lysimeters replaced daily. *Journal of Soil Sciences*. 165 .11: 890-895.
- Vrugt,J.A., Hopmans,J.W., Simunek,J. 2001. Calibration of a two-dimensional root water uptake model. *Soil Soil Sciences of America Journal*. 65 .4: 1027-1037.
- Walker,J.M. 1969. One-degree increments in soil temperatures affect maize seeding behavior. *Soil Science Society of America Proceeding*. 33: 729-736.
- 115-122.
- Li,S., Yang,W and Zhang,X. 2009. Soil temperature distribution around a U-tube heat exchanger in a multi-function ground source heat pump system. *Applied Thermal Eng*. 29.17-18: 3679-3686.
- Nainanayake, A., Ranasinghe, C. S. and Tennakoon, N. A. 2008. Effects of drip irrigation on canopy and soil temperature, leaf gas exchange, flowering and nut setting of mature coconut (*Cocosnucifera L.*). *Journal of National Sciences Foundation of Sri Lanka*. 36.1: 43-50.
- Nakhaei,M., Simunek,J .2014. Parameter estimation of soil hydraulic and thermal property functions for unsaturated porous media using the HYDRUS-2D code. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*. 62.1: 7-15.
- Psarras,G., Merwin,I.A., Lakso,A.N and Ray,J.A. 2000. Root growth phenology, root longevity and rhizosphere respiration of field grown “Mutsu” apple trees on “Mailing 9” rootstock. *Journal of American Society of Horticultural Sciences*. 125: 596-602.
- Pregitzer,K.S., King,J.S., Burton,A.J and Brown,S.E. 2000. Responses of tree fine roots to temperature. *New Phycologist*. 147: 105-115.
- Roxy,M.S., Sumithranand,V.B andRenuka,G. 2010. Variability of soil moisture and its relationship with surface albedo and soil thermal diffusivity at Astronomical Observatory, Thiruvananthapuram, south Kerala. *Journal of Earth System Sciences*. 119 .4: 507-517.

## Application of HYDRUS2D for Dynamical Assessment of the Influence of Irrigation Management on Controlling Soil Cardinal Temperatures

F. Karandish<sup>1\*</sup>

Received: Nov.11, 2016

Accepted: Nov.22, 2017

### Abstract

Soil cardinal temperatures are one of the affective factors on biological properties of crops and highly affect root growth and consequently, water and nutrient uptake. Since soil water content has a considerable contribution in controlling soil temperature, predicting the probable consequences of applying a specific irrigation strategy may help with selecting a suitable method aiming at increasing water and nutrient use efficiency. Therefore, in this research, HYDRUS2D was applied for dynamical assessment of the influence of different irrigation strategies on the spatial and temporal pattern of soil temperature variations and the projected uncertainties through the simulation approach. Simultaneous soil water content and soil temperature data was collected by using IDRG SMS T-2 sensors installed in maize rooting zone under full irrigation (FI), deficit irrigation (DI) and partial root-zone drying (PRD) during 2010 growing season. Simultaneous soil water content and soil temperature data was collected by using IDRG SMS T-2 sensors installed in maize rooting zone. The calibration process was done using the continues data collected after 10 irrigation events in all treatments, and the validation process was carried out using daily variations of soil temperature. Finally, the model uncertainty was assessed by calculating the spatial and temporal error variance. Based on the root mean square error (RMSE) and model efficiency (EF) in the validation process, HYDRUS2D could accurately simulate soil temperature (RMSE=0.02-0.42 °C, EF=0.71-0.92) and the minimum and maximum RMSE in estimation soil thermal regimes was corresponded to FI and PRD treatments, respectively. the lowest uncertainty domain for simulating soil temperature under FI, PRD and DI treatments was observed in 60-80 cm soil depth, and the estimated errors for these treatments were, respectively,  $0.6\pm 0.2$ ,  $5.9\pm 2.3$  and  $-5.4\pm 2$  percentage, respectively. Moreover, the highest uncertainty domain for FI, PRD and DI treatments was corresponded to 20-40 cm, 0-20 cm and 60-80 cm soil depth, respectively, and accounted for  $9\pm 5$ ,  $-0.6\pm 3.04$  and  $-13.7\pm 5.3$  percentage, respectively. Based on the results, applying PRD would decrease the number of stress days through controlling soil cardinal temperatures in the domain of 9-28 °C which led to providing a better condition for root growth especially in the soil depths beyond 40 cm.

**Keywords:** HYDRUS2D, Partial Root-zone Drying, Spatial and Temporal Variation of Temperature, Uncertainty

---

1- Assistant Professor, Water Engineering Department, University of Zabol  
(\* - Corresponding Author Email: F.Karandish@uoz.ac.ir and Karandish\_h@yahoo.com)