

## اندازه‌گیری و شبیه‌سازی حرکت آب در خاک و جذب آب توسط ریشه در آبیاری جویچه‌ای یک در میان

رحمان باریده<sup>1</sup>، سینا بشارت<sup>2\*</sup>

تاریخ دریافت: 1395/5/31 تاریخ پذیرش: 1395/10/11

### چکیده

از آن‌جا که پایش مستقیم و داده‌برداری در مزرعه هزینه‌بر و در همه مزارع قابل اجرا نیست بهره‌گیری از مدل‌های ریاضی ضروری به نظر می‌رسد. در این تحقیق به بررسی نحوه توزیع رطوبت و جذب ریشه در روش‌های آبیاری جویچه‌ای معمولی (EFI)، یک در میان متغیر (AFI) و یک در میان ثابت (FFI) و همچنین واسنجی و اعتبارسنجی مدل HYDRUS-2D به منظور بررسی کاربردی بودن آن در روش‌های فوق پرداخته شد. داده‌های میدانی در فصل کشت و در سه روش فوق تحت کشت گیاه ذرت جمع‌آوری شد. برای فهم بهتر رفتار مدل نتایج بدست آمده در دو سناریو ارزیابی گردید. در سناریو اول، مدل فقط با استفاده از داده‌های آبیاری معمولی و در سناریو دوم، برای هر یک از روش‌های آبیاری به صورت مستقل واسنجی (33 درصد داده‌ها) و اعتبارسنجی (67 درصد داده‌ها) شد. تخمین پارامترها بر اساس خصوصیات خاک از پایگاه داده Rosetta صورت گرفت و در مرحله بعد توسط روش حل معکوس در HYDRUS-2D بهینه شدند. برای مدل مذکور نتایج توسط شاخص‌های  $R^2$ ، nRMSE، EF و CRM با هم مورد مقایسه قرار گرفتند. نتایج اندازه‌گیری نشان داد که با توجه به نصف شدن مقدار آب آبیاری جذب ریشه در AFI تفاوت معنی‌داری با EFI نداشت و بیش‌ترین مقدار جذب در عمق 30 سانتی‌متری مشاهده گردید. مقدار  $R^2$  در بازه 0/72 تا 0/89 و nRMSE در بین 0/046 و 0/078 مشاهده شد. بر اساس مقادیر nRMSE توانایی شبیه‌سازی در رده عالی قرار گرفت. همچنین نتایج نشان داد که با واسنجی مدل توسط داده‌های اولیه به صورت جداگانه برای هر روش آبیاری باعث افزایش دقت مدل می‌شود.

واژه‌های کلیدی: آبیاری جویچه‌ای یک‌درمیان متغیر و ثابت، ذرت، حل معکوس، HYDRUS-2D

### مقدمه

پیشنهاد کردند. در این روش گیاهان به مقدار کم‌تر از نیاز خود آب دریافت می‌کنند که تاثیر زیادی بر روی کاهش محصول نخواهد داشت.

یکی از سیستم‌های آبیاری سطحی که در بسیاری از مناطق مورد استفاده قرار می‌گیرد آبیاری جویچه‌ای است. استفاده از کم‌آبیاری به دو صورت، کم‌آبیاری معمولی (DI) و آبیاری ناقص ریشه (PRD) صورت می‌گیرد. این روش توسط محققین زیادی مورد بررسی قرار گرفت و نتایج رضایت بخشی به دست آمد (Kang et al., 2000 ; Sepaskhah and Khajehabdollahi., 2005 ; Kirda et al., 2005 ; Kaman et al., 2006 ; Sepaskhah and Parand., 2008 ; Sepaskhah and Hosseini., 2006). اکبری نودهی (1393) و استخروبی و همکاران (1393) به بررسی تاثیر روش‌های آبیاری جویچه‌ای و کم‌آبیاری بر عملکرد و کارایی مصرف آب ذرت، سیال و همکاران به تاثیر آبیاری جویچه‌ای یک در میان بر افزایش بهره‌وری آب در بامیه نسبت به روش آبیاری معمولی پرداختند که نتایج همه محققان حاکی از عملکرد رضایت بخش این روش بوده

به دلیل رشد سریع جمعیت در جهان در نتیجه افزایش مصرف غذایی و هم‌زمان با آن کم شدن منابع آب در اثر استفاده غیر اصولی و بکارگیری روش‌های آبیاری بدون توجه به راندمان و کارایی مصرف آب، کشاورزی قادر به پاسخگویی غذایی نیست. برای حل این مشکل روش‌های متعددی برای افزایش کارایی مصرف آب از جمله روش‌های آبیاری تحت فشار ارایه شد. اما به دلیل هزینه اجرای این سیستم‌ها امکان بهره‌گیری از آن در همه جا وجود ندارد و مناطق زیادی از آبیاری سطحی و سنتی استفاده می‌کنند که دارای راندمان و بهره‌وری کمی هستند. در نتیجه دانشمندان راه حل کم‌آبیاری را

1- دانشجوی کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه  
2- استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه  
(\* - نویسنده مسئول: Emial: s.besharat@urmia.ac.ir

با بررسی تحقیقات انجام شده در زمینه آبیاری یک در میان و استفاده از مدل HYDRUS و نتایج رضایت بخش به دست آمده مشاهده شد که در هیچ تحقیقی بررسی کارایی مدل با استفاده از اطلاعات اولیه و بررسی چگونگی روند شبیه‌سازی در ادامه فصل رشد وجود ندارد و در همه پژوهش‌ها در کل فصل رشد داده‌ها جمع‌آوری شد و به صورت تصادفی جهت واسنجی و شبیه‌سازی مورد استفاده قرار گرفت. بنابراین در تحقیقات قبلی به این سوال پاسخ داده نشده است که آیا واسنجی و اعتبار سنجی مدل با استفاده از داده‌های محدود قابل قبول است و آیا در روش‌های مختلف آبیاری واسنجی فقط یک بار و در یک روش آبیاری انجام شود یا باید به صورت جداگانه برای هر روش انجام گیرد. بر این اساس هدف از این تحقیق اندازه‌گیری و شبیه‌سازی حرکت آب با در نظر گرفتن مقدار جذب بود در این تحقیق مدل با استفاده از اطلاعات اولیه واسنجی و روند شبیه‌سازی در آبیاری‌های بعدی مورد بررسی قرار گرفت. همچنین مدل برای هر روش آبیاری به صورت جداگانه واسنجی و مورد استفاده قرار گرفت که در صورت پاسخ‌گویی صحیح مدل می‌توان با هزینه کم در داده‌برداری و با اطلاعات اولیه از این مدل جهت مدیریت آب در مزرعه استفاده کرد.

## مواد و روش‌ها

### اندازه‌گیری‌های میدانی

آزمایش‌های مزرعه‌ای به منظور گردآوری داده‌های لازم در مزارع شهرستان بوکان از توابع استان آذربایجان غربی در موقعیت جغرافیایی با طول جغرافیایی 46 درجه شرقی و عرض جغرافیایی 36 درجه شمالی در ارتفاع 1351 متر بالاتر از سطح دریا انجام شد. به منظور تعیین بافت خاک مزرعه سه نمونه خاک دست خورده از عمق‌های 0-30، 30-60 و 60-90 سانتی‌متری توسط آگر تهیه و بافت خاک با روش هیدرومتری تعیین شد. رطوبت اشباع و جرم مخصوص ظاهری با نمونه‌برداری و رطوبت ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی توسط نرم افزار RETC و پایگاه داده Rosetta و معادله وان-گنوختن بدست آمد (جدول 1). گیاه ذرت در 15 اردیبهشت به صورت خشکه‌کاری در 12 ردیف به فواصل 70 سانتی‌متر و فاصله بوته 15 سانتی‌متر در عمق 5 سانتی‌متری کشت شد. گیاه ذرت تا 31 تیرماه 1394 به صورت مشابه و با تامین کل نیاز آبی، آبیاری شد. آب مورد نیاز از چاه برداشت و جهت کنترل آب ورودی به هر جویچه از سیفون استفاده گردید. اندازه‌گیری‌ها از 31 تیر به مدت یک ماه صورت گرفت. تیمارها مشتمل بر آبیاری جویچه‌ای معمولی و آبیاری جویچه‌ای یک در میان متغیر و ثابت بود. در آبیاری جویچه‌ای معمولی (EFI) همه جویچه‌ها آبیاری شده و محصول، تحت هیچ‌گونه تنشی نبوده است.

است (Siyal et al., 2016). در اصل مفهوم PRD اولین بار توسط گرایمز و همکاران در آمریکا بر روی مزرعه پنبه در آبیاری جویچه‌ای یک در میان انجام شد و به دنبال آن سپاسخواه و همکاران، سپاسخواه و سیچانی در ایران به بررسی این روش پرداختند. بعدها برخی مطالعات در استرالیا انجام شد (Grimes et al., 1968 ; Kriedmann and Goodwin., 2003 ; Loveys et al., 2000 ; Sepaskhah and Sichani., 1976 ; Sepaskhah et al., 1976). اما هنوز اطلاعات کافی جهت طراحی این روش به صورت دقیق وجود ندارد (Sepaskhah et al., 2010) و پایش مستقیم توزیع و جذب ریشه در طول دوره رشد گیاه هزینه زیادی در بر خواهد داشت و در همه مزارع قابل اجرا نیست. بنابراین بهره‌گیری از مدل‌های ریاضی راه‌حل مناسبی به نظر می‌رسد. یکی از مدل‌های شبیه‌سازی حرکت آب در خاک مدل HYDRUS-2D است (Simunek et al., 2006) که برای شبیه‌سازی توزیع رطوبت و املاح در همه روش‌های آبیاری مورد استفاده قرار گرفته است و نتایج قابل قبولی را ارائه داده است. بشارت و همکاران (1393) به ارزیابی HYDRUS-2D در نفوذ آب به خاک با استفاده از اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی در لایسمتر وزنی، سلامتی و همکاران (1393) از مدل HYDRUS-1D برای شبیه‌سازی انتقال آب و نیترات در آبیاری جویچه‌ای نیشکر و پور-یزدان‌خواه و همکاران (1393) به شبیه‌سازی رطوبت خاک تحت یک منبع خطی در خاک سنگین با استفاده از مدل HYDRUS-2D پرداختند و در همه تحقیقات مدل در شبیه‌سازی از دقت بالایی برخوردار بوده است. جوادزاده‌شاخالی و همکاران (1395) به شبیه‌سازی رطوبت حجمی خاک با مدل HYDRUS-2D از منبع تغذیه خطی با شوری‌های متفاوت آب آبیاری و مقایسه با مشاهدات میدانی پرداختند. نتایج آن‌ها نشان دهنده توانمندی بالای مدل در شبیه‌سازی رطوبت حجمی خاک با استفاده از برآورد پارامترهای هیدرولیکی خاک به روش حل معکوس می‌باشد. در تحقیقی برای مقایسه روش‌های مختلف برآورد ویژگی‌های هیدرولیکی خاک که شامل روش نیمه تجربی آریا و همکاران (1999)، توابع انتقالی و مدل‌سازی معکوس بود، رطوبت خاک در زیر جویچه توسط مدل HYDRUS-2D شبیه‌سازی شد، نتایج نشان داد که روش آریا و همکاران (1999) و مدل‌سازی معکوس با کمترین RMSE بیشترین تطابق را با داده‌های اندازه‌گیری شده دارند (عباسی، 1387). دب و همکاران در شبیه‌سازی توزیع مکانی و زمانی نیترات در آبیاری جویچه‌ای معمولی در ناحیه ریشه بیان کردند که بیشترین آبشویی در اعمال کود در مراحل اولیه رشد رویشی رخ داده است (Deb et al., 2015). سیمونک و همکاران در شبیه‌سازی نحوه توزیع نیترات با سناریوهای مختلف کودآبیاری بیان کردند که بیشترین و کمترین جذب املاح زمانی رخ داده که کودآبیاری به ترتیب در وسط و انتهای چرخه آبیاری اعمال شده است (Simunek et al., 2016).

مختلف در جویچه آبیاری شده، جویچه آبیاری نشده و روی پشته هر یک از تیمارها، از آگر استفاده گردید. نمونه‌ها در عمق‌های 10، 30، 50 و 70 سانتی‌متری زیر سطح خاک به فواصل زمانی 1، 3، 5 و 9 روز بعد از آبیاری و در سه نوبت آبیاری برداشت گردید. در مجموع 416 نمونه رطوبتی جمع‌آوری شد. به منظور محاسبه تبخیر از سطح خاک از میکروولایسیمتر با شعاع 5 و ارتفاع 15 سانتی‌متر (Chen et al., 2015) استفاده شد و مقدار جذب بر اساس بیلان رطوبتی و تغییرات رطوبت خاک محاسبه گردید.

در آبیاری یک در میان ثابت (FFI)، در کل فصل رشد یکی از دو جویچه کنار هم آبیاری می‌شود و دیگری کاملاً خشک باقی می‌ماند و در آبیاری یک در میان متغیر (AFI)، از هر دو جویچه کنار هم در هر نوبت آبیاری به صورت متناوب یکی از آن‌ها آبیاری و دیگری خشک باقی می‌ماند (Kang et al., 2000; Devkota et al., 2015). برای تعیین نیاز آبی و دور آبیاری (10 روز به دست آمد) از نسخه 8 نرم‌افزار CROPWAT استفاده شد و جهت تعیین زمان قطع آب از معادله کاستیاکف-لوپس که به وسیله استوانه‌های مضاعف محاسبه گردید استفاده شد. به منظور اندازه‌گیری رطوبت خاک در نقاط

جدول 1- خصوصیات فیزیکی خاک و درصد رطوبت در نقاط مهم هیدرولیکی خاک مزرعه مورد مطالعه

عمق (cm)	رس %	سیلت %	شن %	چگالی ظاهری (gr/cm <sup>3</sup> )	رطوبت اشباع (cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )	ظرفیت مزرعه (cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )	رطوبت پژمردگی (cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )	بافت خاک
30-0	28	50	22	1/29	45	35/9	20/32	رس لوم
60-30	33	51	16	1/32	46	36/5	20/32	سیلت رس لوم
90-60	33	46	21	1/32	46	36/5	20/32	رس لوم

و  $z$ ،  $(L)$ ،  $x$  و  $z$  به ترتیب فاصله عرضی و ارتفاعی از مبدا مختصات  $(L)$ ،  $P_x$  و  $P_z$  پارامترهای تجربی (-)،  $x^*$  و  $z^*$  پارامترهای تجربی  $(L)$  است.

#### هندسه و شرایط مرزی

هندسه شبیه‌سازی شده در آبیاری معمولی و یک در میان در شکل 1 نشان داده شده است. هندسه پروفیل خاک طوری در نظر گرفته شد که پروفیل توزیع ریشه به صورت متقارن در زیر پشته قرار گیرد. در آبیاری یک در میان تبخیر از سطح خاک فقط در جویچه‌تر در نظر گرفته شد و در آبیاری معمولی در هر دو جویچه اعمال شد. در اعمال شرایط مرزی مقدار جذب ریشه در کل دوره شبیه‌سازی وارد شد که مقدار آن به علت عدم جذب ریشه در روز آبیاری صفر در نظر گرفت. مقدار تبخیر از سطح خاک نیز در کل دوره وارد گردید که پس از گذشت 5 روز از آبیاری مقدار آن صفر شد.

#### واسنجی و اعتبارسنجی

در ابتدا پارامترهای هیدرولیکی با استفاده از پایگاه داده Rosetta و مشخصات در دسترس خاک تخمین زده شد و به عنوان فرض اولیه در HYDRUS-2D مورد استفاده قرار گرفت (عباسی و تاجیک 1386، سلامتی و همکاران 1394). در مرحله بعد این پارامترها برای هر لایه به روش حل معکوس بهینه شدند (Kandelous and Simunek 2010؛ جوادزاده و همکاران 1395). در روش حل معکوس اطلاعات رطوبتی خاک در نقاط مشاهده‌ای و در زمان‌های مختلف برای مدل تعریف شد و مقادیر خصوصیات هیدرولیکی توسط

#### مدل HYDRUS-2D

##### معادلات حاکم

حرکت آب در خاک بر اساس اطلاعات میدانی با استفاده از مدل HYDRUS-2D شبیه‌سازی شد. معادله حاکم برای جریان آب در خاک معادله دو بعدی ریچاردز می‌باشد (معادله 1).

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ K(h) \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ K(h) \frac{\partial h}{\partial z} + K(h) \right] - S \quad (1)$$

که در آن  $\theta$  درصد رطوبت حجمی  $(L^3L^{-3})$ ،  $h$  بار فشار آب در خاک  $(L)$ ،  $t$  زمان  $(T)$ ،  $K$  هدایت هیدرولیکی غیراشباع  $(LT^{-1})$ ،  $x$  جهت افقی و  $z$  جهت عمودی را نشان می‌دهد. همچنین  $S$  مقدار جذب آب توسط گیاه را بیان می‌کند  $(L^3L^3T^{-1})$  و از معادله 2 بدست آمد (Feddes et al., 1978).

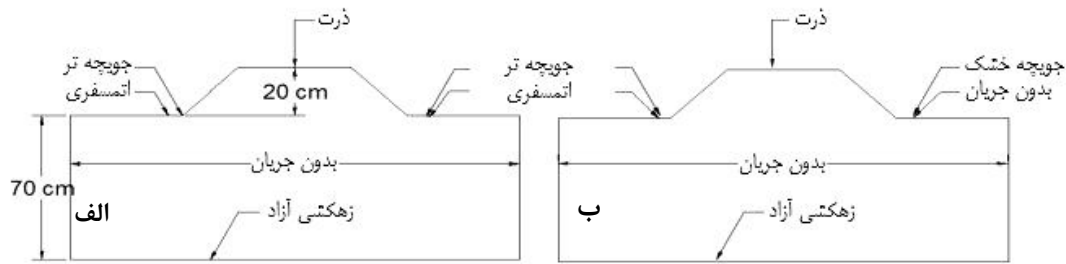
$$S(h) = \alpha(h)b(x, z)L_t T_p \quad (2)$$

در این رابطه،  $T_p$  ترقق پتانسیل گیاه  $(TL^{-1})$  که با استفاده از داده‌های هواشناسی و نرم‌افزار Cropwat محاسبه شد،  $\alpha(h)$  تابع تنش آب که از پایگاه داده مدل استفاده شد  $(h_1=-10 \text{ cm}$ ،  $h_2=-25 \text{ cm}$ ،  $h_3=-500 \text{ cm}$  و  $h_4=-8000 \text{ cm})$  (Simunek et al., 2016)،  $L_t$  عرض سطح سایه انداز گیاه  $(L)$  و  $\beta(x, z)$  تابع نرمال توصیف توزیع مکانی جذب آب  $[L^{-2}]$  که از مدل دوبعدی ورات و همکاران به صورت معادله 3 استفاده شد (Vrugt et al., 2001 and 2002).

$$\beta(x, z) = \left[ 1 - \frac{z}{Z_m} \right] \left[ 1 - \frac{x}{X_m} \right] e^{-\left( \frac{P_z}{Z_m} |z^* - z| + \frac{P_x}{X_m} |x^* - x| \right)} \quad (3)$$

که در آن  $Z_m$  و  $X_m$  به ترتیب بیشینه طول ریشه در جهت‌های  $x$

نرم افزار واسنجی و برای سه عمق 0-30، 30-60 و 60-90 سانتی-متری و در سه روش آبیاری بدست آمد.



شکل 1- هندسه شبیه‌سازی و شرایط مرزی، آبیاری معمولی (الف) و آبیاری یک در میان (ب)

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

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (7)$$

که در آن‌ها،  $n$  تعداد مشاهدات،  $O_i$  مقدار مشاهده‌ای داده،  $\bar{O}$  میانگین مقادیر مشاهده‌ای داده،  $P_i$  مقدار پیش‌بینی شده برای داده مورد نظر است.

## نتایج و بحث

در این بخش ابتدا به بررسی و مقایسه مقادیر رطوبت اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده پرداخته خواهد شد و در مرحله بعد دقت مدل و در نهایت مقادیر جذب ریشه اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

در جدول 2 مقادیر پارامترهای هیدرولیکی به دست آمده با استفاده از حل معکوس در سه روش آبیاری نشان داده شده است. شکل‌های 2، 3 و 4 داده‌های رطوبتی اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده را به تفکیک عمق، در سه آبیاری نشان می‌دهند. اطلاعات این شکل‌ها، میانگین داده‌های رطوبتی در جویچه خشک، پشته و جویچه تر و در هر عمق را نشان می‌دهد. همچنین پارامترهای آماری جهت ارزیابی در جدول 3 نشان داده شده است. در آبیاری معمولی (شکل 2) به دلیل مشابه بودن روش واسنجی مدل در هر دو سناریو، مقادیر شبیه‌سازی منطبق بر هم می‌باشند که یکی از آن‌ها مورد استفاده قرار گرفت. آبیاری اول جهت واسنجی مدل، مورد استفاده قرار گرفت که مقدار  $R^2$  و EF به ترتیب برابر 0/88 تا 0/92 محاسبه شد و درصد خطا برابر 0/047 بدست آمد. همچنین با توجه به شاخص CRM کم‌برآوردی مشاهده شد. مقادیر  $R^2$  در شبیه‌سازی نوبت دوم و سوم به ترتیب برابر 0/85 و 0/77 بدست آمد و درصد خطا نیز با اعمال آبیاری‌ها افزایش یافت و در هر دو نوبت مدل کم‌برآوردی داشته است.

واسنجی مدل به روش حل معکوس و در دو سناریو انجام شد. سناریو اول (S1): در ابتدا مدل با استفاده از داده‌های آبیاری اول روش EFI واسنجی شد و جهت اعتبارسنجی در شبیه‌سازی آبیاری‌های بعدی و در روش‌های AFI و FFI نیز مورد استفاده قرار گرفت. سناریو دوم (S2): در این سناریو مدل با استفاده از اطلاعات اندازه‌گیری در آبیاری اول روش‌های AFI، FFI و EFI جهت اعتبارسنجی در شبیه‌سازی نوبت‌های بعدی آبیاری مورد استفاده قرار گرفت. در نهایت نتایج این دو سناریو با داده‌های میدانی به صورت هم‌زمان مورد مقایسه قرار گرفت (نتایج شبیه‌سازی در روش آبیاری معمولی به دلیل مشابه بودن واسنجی در هر دو سناریو، بر هم منطبق بوده است و در شکل‌های مربوطه فقط یکی از سناریوها نشان داده شده است).

## ارزیابی مدل

در تحقیق حاضر، به منظور ارزیابی قابلیت کاربرد مدل در برآورد مقدار رطوبت خاک، از شاخص  $nRMSE$ ،  $R^2$  و CRM استفاده شد (معادلات 4 - 7). اگر مقدار  $nRMSE$  کم‌تر از 0/1 باشد نشان دهنده شبیه‌سازی عالی مدل، بین 0/1 تا 0/2 شبیه‌سازی خوب، بین 0/2 تا 0/3 شبیه‌سازی متوسط و بیش‌تر از 0/3 نشان دهنده شبیه‌سازی ضعیف است (Bannayan et al., 2009؛ جوادزاده و همکاران 1395).  $R^2$  بیان‌کننده روند شبیه‌سازی است و هرچه به یک نزدیک‌تر باشد روند شبیه‌سازی دقیق‌تر است. مقدار CRM نشان‌دهنده بیش‌برآوردی و کم‌برآوردی مدل می‌باشد که اگر برابر صفر باشد نشان دهنده تطابق کامل بین مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی است و EF بیان‌کننده کارایی مدل است (بشارت و همکاران 1390).

$$nRMSE = \frac{RMSE}{\bar{O}} \quad (4)$$

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

و جهت اعتبارسنجی مورد استفاده قرار گرفتند. مقادیر  $R^2$ ، nRMSE در مرحله واسنجی برای آبیاری یک در میان متغیر و ثابت به ترتیب برابر 0/87، 0/05 و 0/89، 0/046 بدست آمد. همچنین در هر دو روش آبیاری بیش‌برآوردی مشاهده گردید. در سناریو دوم مقدار مقادیر شاخص‌های  $R^2$  و EF بیش‌تر و nRMSE کم‌تر از سناریو اول در کل آبیاری‌ها بدست آمد. با توجه به شکل 3 و 4 در سناریو دوم دقت بیش‌تری نسبت به سناریو اول شبیه‌سازی مشاهده می‌شود. در این روش نیز دقت مدل در لایه‌های بالا بیش‌تر از لایه‌های پایین مشاهده شد. به طور کلی در همه شکل‌ها شیب تغییرات رطوبت در عمق 10 سانتی‌متری و روز 1 تا 5 به دلیل وجود تبخیر از سطح خاک بیش‌تر از روزهای 6 تا 10 است.

در شکل 3 و 4 روند تغییرات رطوبت اندازه‌گیری و شبیه‌سازی در دو سناریو، برای آبیاری یک در میان متغیر و ثابت نشان داده شده است. در سناریو اول و با توجه به جدول 3 مقدار خطا در دو روش آبیاری بیش‌تر از آبیاری معمولی مشاهده گردید و به طور کلی بیش-برآوردی مشاهده شد. بازه تغییرات EF و  $R^2$  به ترتیب برابر 0/66 تا 0/75 و 0/7 تا 0/81 مشاهده شد. همچنین با توجه به شکل 3 و 4 مشاهده می‌شود که دقت شبیه‌سازی در عمق 50 و 70 سانتی‌متری کم‌تر از عمق‌های 10 و 30 سانتی‌متری است و بیش‌تر بیش‌برآوردی در لایه‌های پایین مشاهده شد.

در سناریو دوم شبیه‌سازی مدل با استفاده از اطلاعات آبیاری اول برای هر نوع آبیاری واسنجی شد و دو نوبت آبیاری بعدی شبیه‌سازی

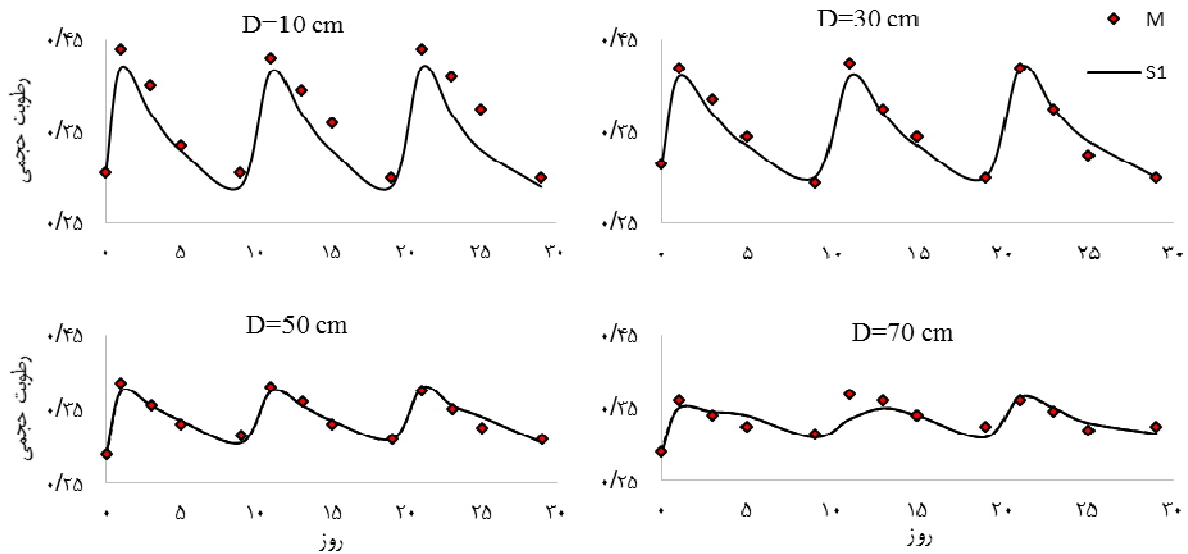
جدول 2- مقادیر پارامترهای هیدرولیکی به دست آمده با استفاده از حل معکوس در سه روش آبیاری

عمق	پارامتر (واحد)	EFI	AFI	FFI
30-0	$\theta_r$ ( $cm^3/cm^3$ )	0/01542	0/0135	0/0134
	$\theta_s$ ( $cm^3/cm^3$ )	0/45	0/45	0/45
	$\alpha$ (-)	0/00675	0/00658	0/00663
	n (-)	1/719	1/748	1/755
	$K_s$ (cm/day)	2/22	1/665	1/665
60-30	$\theta_r$ ( $cm^3/cm^3$ )	0/0138	0/0129	0/013
	$\theta_s$ ( $cm^3/cm^3$ )	0/46	0/46	0/46
	$\alpha$ (-)	0/00726	0/00761	0/00758
	n (-)	1/776	1/763	1/76
	$K_s$ (cm/day)	2/22	1/628	1/58
90-60	$\theta_r$ ( $cm^3/cm^3$ )	0/013	0/01149	0/01155
	$\theta_s$ ( $cm^3/cm^3$ )	0/46	0/46	0/46
	$\alpha$ (-)	0/00783	0/00773	0/0077
	n (-)	1/741	1/865	1/86
	$K_s$ (cm/day)	2/8	5/142	5/09

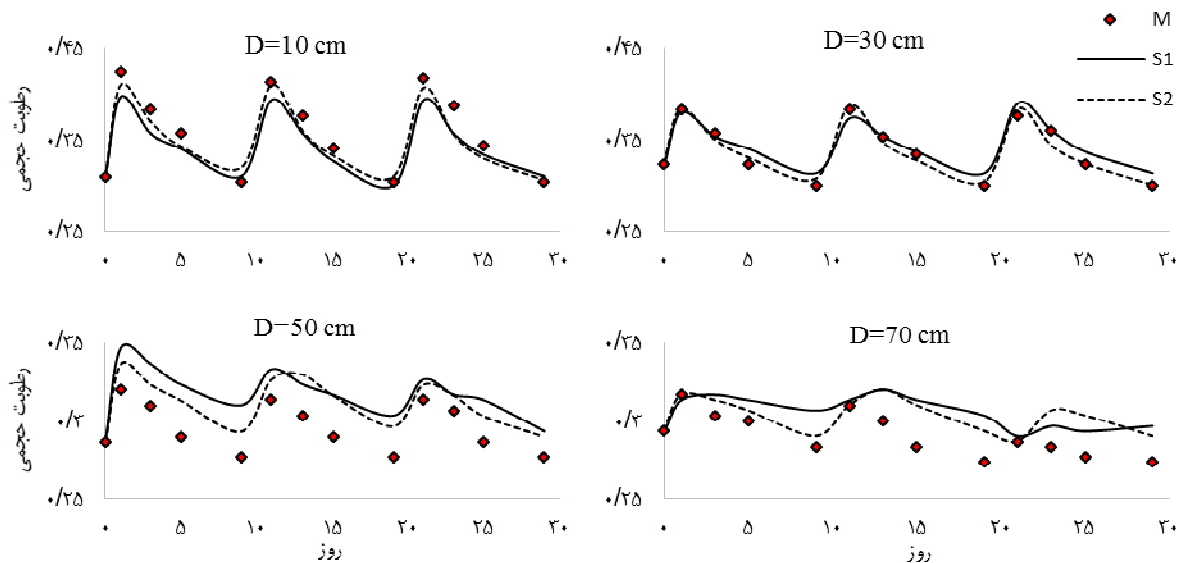
رطوبت اولیه تمام نقاط در مدل باشد.

در مطالعه حاضر، برای مقایسه مقادیر شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده رطوبت، از nRMSE استفاده شد که براساس طبقه‌بندی بنایان و هوگنوم، شبیه‌سازی مدل در رده عالی قرار می‌گیرد (Bannayan and Hoogenboom., 2009). با وجود این که خاک مورد مطالعه در این تحقیق یک بافت لایه-لایه بوده و در خاک‌های لایه-لایه، به طور معمول تغییرات رطوبت بین لایه‌ها پیوسته نیست و اغلب سبب ناپایداری در حل عددی می‌شود، با این وجود مدل توانست با کیفیت قابل قبولی شبیه‌سازی رطوبت را انجام دهد که با یافته‌های جوادزاده و همکاران (1395) در بررسی اعتبار مدل HYDRUS-2D در شبیه‌سازی رطوبت در خاکی با بافت متفاوت و استفاده از روش حل معکوس توانایی مدل را در رده عالی قرار دادند مطابقت دارد.

در شکل 5 و 6 داده‌های رطوبتی اندازه‌گیری و شبیه‌سازی نشان داده شده است. با توجه به شکل 5 چون مدل برای آبیاری معمولی واسنجی شده دقت مدل و روند شبیه‌سازی در آن بیش‌تر از دو روش آبیاری دیگر است و در آبیاری یک در میان دقت مدل کاهش یافته است. اما با توجه به شکل 6 که در آن مدل برای هر نوع آبیاری به صورت جداگانه واسنجی شد در مرحله شبیه‌سازی دقت مدل افزایش یافت. روند قابل توجهی در شکل‌ها است به این صورت که در تمام آبیاری‌ها در شکل‌های 5 و 6 شبیه‌سازی در رطوبت‌های پایین کم-برآورد بوده و با افزایش رطوبت شبیه‌سازی بیش‌برآوردی داشته است. یکی از دلایل آن می‌تواند تغییرات مکانی و ناهمگنی موجود در ساختمان خاک مانند وجود عواملی نظیر سنگ، مواد آلی و ریشه درختان باشد. عامل دیگر می‌تواند به دلیل عدم نظر گرفتن جداگانه



شکل 2- تغییرات رطوبت اندازه‌گیری (M) و شبیه‌سازی در روش آبیاری جویچه‌ای معمولی



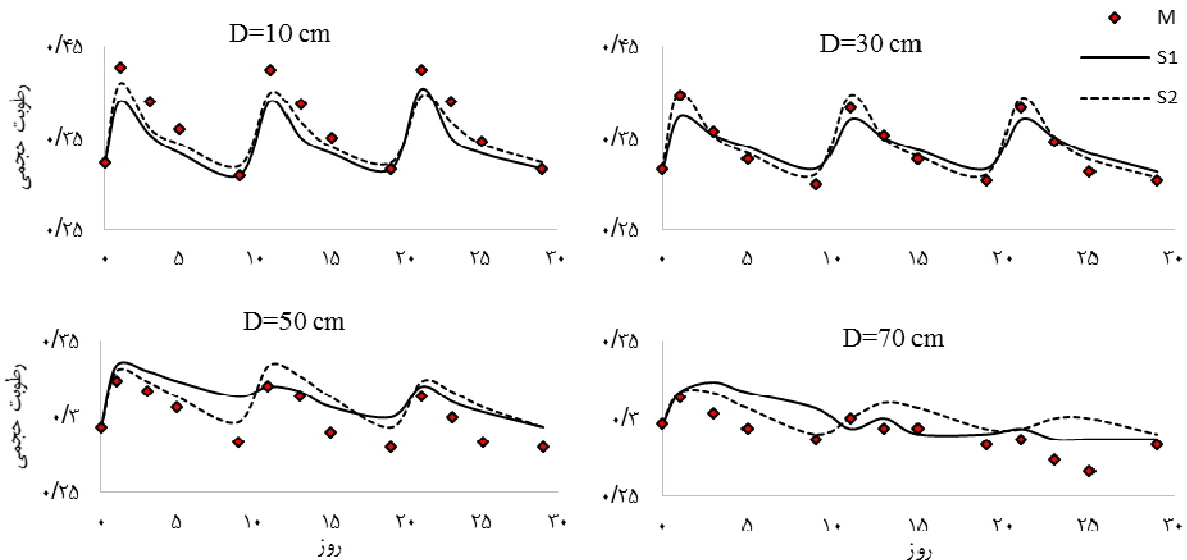
شکل 3- مقایسه رطوبت اندازه‌گیری (M) و شبیه‌سازی در دو سناریو در روش آبیاری جویچه‌ای یک در میان متغیر

مواجه نشد. در روش آبیاری یک در میان متغیر مقدار جذب در زیر جویچه تر و پشته تقریباً برابر و تا عمق 30 سانتی‌متری مشاهده شد و در جویچه خشک و لایه‌های 50 و 70 سانتی‌متری مقدار جذب به حداقل خود رسید. در آبیاری یک در میان ثابت روند مشابهی با روش یک در میان متغیر وجود داشت با این تفاوت که مقدار جذب در جویچه خشک کم‌تر از روش یک در میان متغیر بود. براساس پژوهش‌های انجام شده توسط کومونو و همکاران برای فصل‌ها و رطوبت‌های مختلف، حداکثر جذب ریشه در 40 سانتی‌متری از سطح

شکل‌های 7، 8 و 9 مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی جذب تجمعی در دوره آزمایش را به ترتیب در روش‌های آبیاری معمولی، یک در میان متغیر و یک در میان ثابت در جویچه تر، جویچه خشک و پشته نشان می‌دهند. بر اساس داده‌های اندازه‌گیری شده بیش‌ترین مقدار جذب به دلیل تراکم ریشه در زیر پشته‌ها و در هر سه روش آبیاری مشاهده گردید. در آبیاری معمولی حداکثر مقدار جذب در جویچه و پشته تا عمق 30 سانتی‌متری مشاهده شد همچنین به دلیل آبیاری کافی جذب ریشه با کمبود رطوبت و تنش در لایه‌های پایین

کردند که حداکثر جذب در عمق 25 تا 30 سانتی‌متری اتفاق می‌افتد.

خاک اتفاق می‌افتد و می‌توان جذب ریشه را به این ناحیه محدود کرد (Koumanov et al., 1997). بشارت و همکاران (1390) نیز بیان



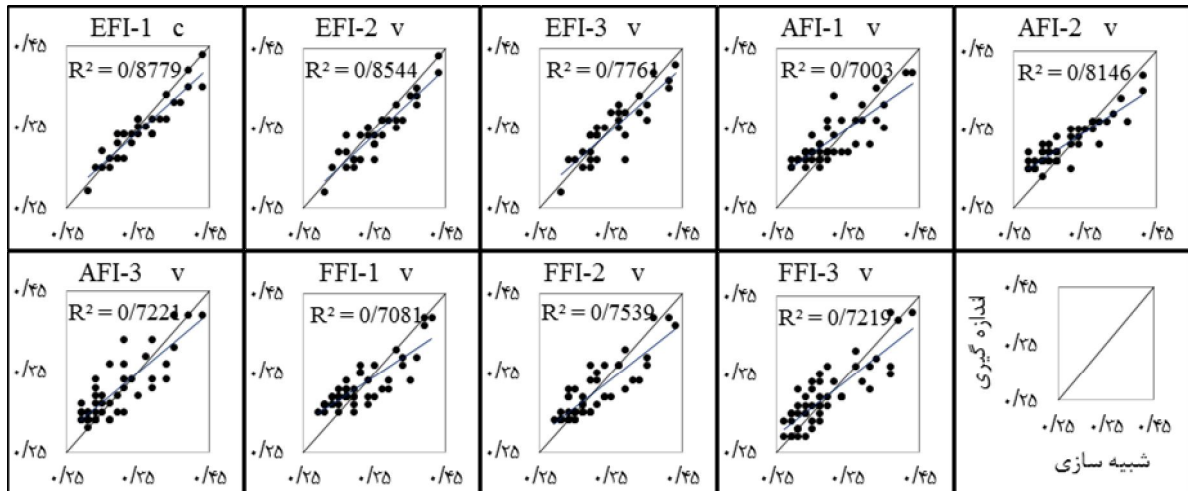
شکل 4- مقایسه رطوبت اندازه‌گیری (M) و شبیه‌سازی در دو سناریو در روش آبیاری جویچه‌ای یک در میان ثابت

جدول 3- ارزیابی مقادیر رطوبت برآوردی در سه روش آبیاری و دو شبیه‌سازی

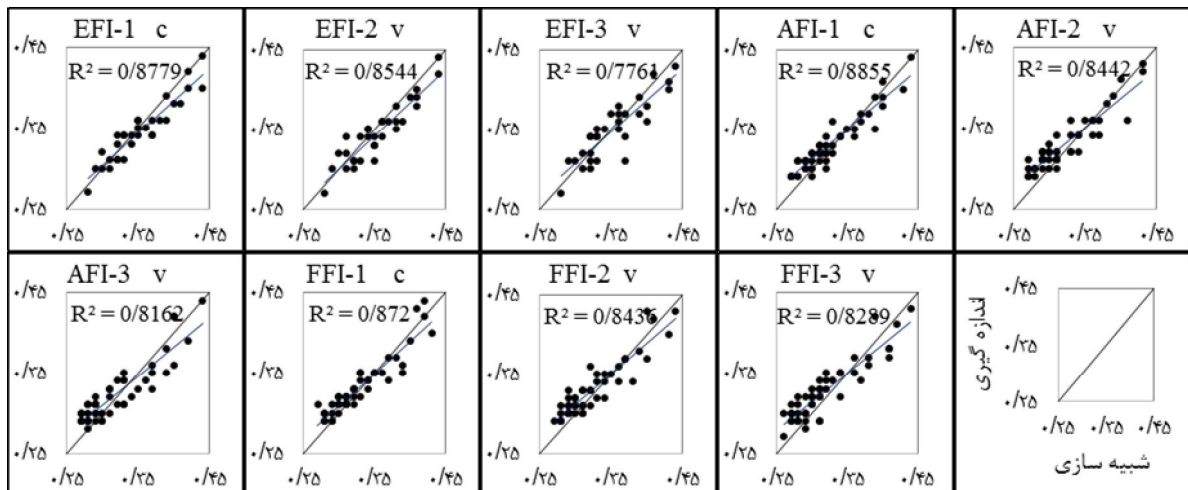
سناریو دوم		سناریو اول			پارامتر	نوبت آبیاری
FFI	AFI	FFI	AFI	EFI		
0/853	0/86	0/68	0/66	0/926	EF	اول
0/89	0/87	0/7	0/7	0/88	R <sup>2</sup>	
-0/015	-0/01	-0/012	-0/024	0/019	CRM	
0/046	0/05	0/07	0/076	0/047	nRMSE	
0/791	0/816	0/75	0/71	0/811	EF	دوم
0/84	0/84	0/75	0/81	0/85	R <sup>2</sup>	
-0/025	-0/019	-0/003	-0/024	0/024	CRM	
0/056	0/059	0/065	0/069	0/05	nRMSE	
0/8	0/778	0/71	0/7	0/769	EF	سوم
0/81	0/83	0/72	0/72	0/77	R <sup>2</sup>	
-0/012	-0/027	-0/009	-0/02	0/01	CRM	
0/068	0/063	0/077	0/078	0/056	nRMSE	

مقایسه با داده‌های اندازه‌گیری، بیش‌ترین دقت مدل در سناریو دوم که در آن مدل به صورت جداگانه برای هر روش واسنجی شد مشاهده می‌شود (حروف A، B و C بیان‌کننده نوبت‌های آبیاری هستند). در نهایت می‌توان اظهار داشت که واسنجی مدل به صورت جداگانه برای هر روش آبیاری باعث افزایش دقت مدل و نتایج می‌شود.

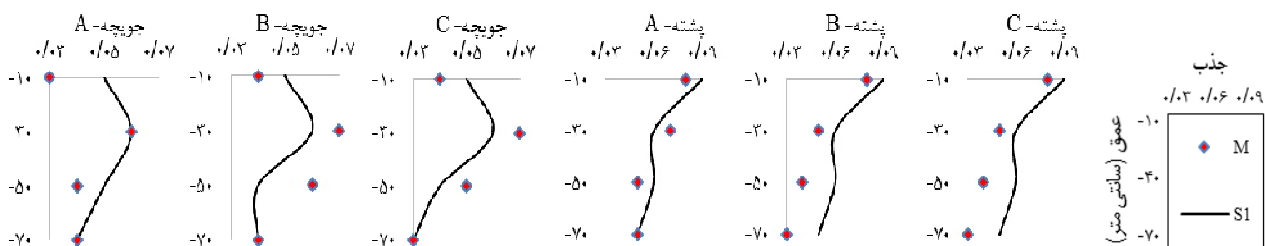
در شکل‌های 7، 8 و 9 مقدار جذب در دو سناریو شبیه‌سازی با مقدار اندازه‌گیری مورد مقایسه قرار گرفتند. در روش آبیاری معمولی (شکل 7) شبیه‌سازی زیر پشته از دقت بالاتری نسبت به زیر جویچه مشاهده شد در حالی که در روش‌های آبیاری یک در میان (شکل 8 و 9) بیش‌ترین دقت شبیه‌سازی در سناریو دوم و در جویچه تر مشاهده گردید. به طور کلی بر اساس نتایج شبیه‌سازی در سناریو 1 و 2 و



شکل 5- رطوبت اندازه‌گیری و شبیه‌سازی سناریو اول (S1) در سه نوبت آبیاری، استفاده در واسنجی (c)، اعتبارسنجی (v)



شکل 6- رطوبت اندازه‌گیری و شبیه‌سازی سناریو دوم (S2) در سه نوبت آبیاری، استفاده در واسنجی (c)، اعتبارسنجی (v)



شکل 7- مقادیر جذب تجمعی در دور آبیاری در جویچه تر و پشته روش معمولی ( $T^{-1}$ )

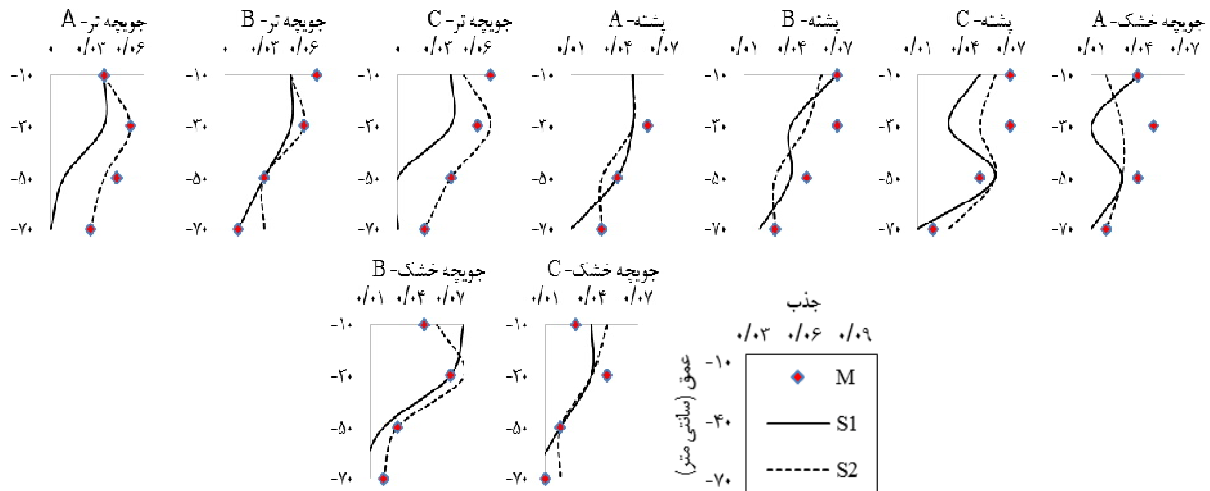
همه موارد دارای کم‌ترین بازده بود. با اعمال این روش از ابتدای کشت باعث از بین رفتن کامل قسمت خشک ریشه شده و در نتیجه باعث کاهش جذب آب و مواد غذایی خواهد شد پس توصیه می‌شود که به صورت دوره‌ای مورد استفاده قرار گیرد. در مرحله شبیه‌سازی ما به این نتیجه رسیدیم که نیازی به داده‌برداری در کل دوره رشد نیست و مدل مورد نظر با کم‌ترین پارامترهای ورودی مراحل شبیه‌سازی را با

## نتیجه‌گیری

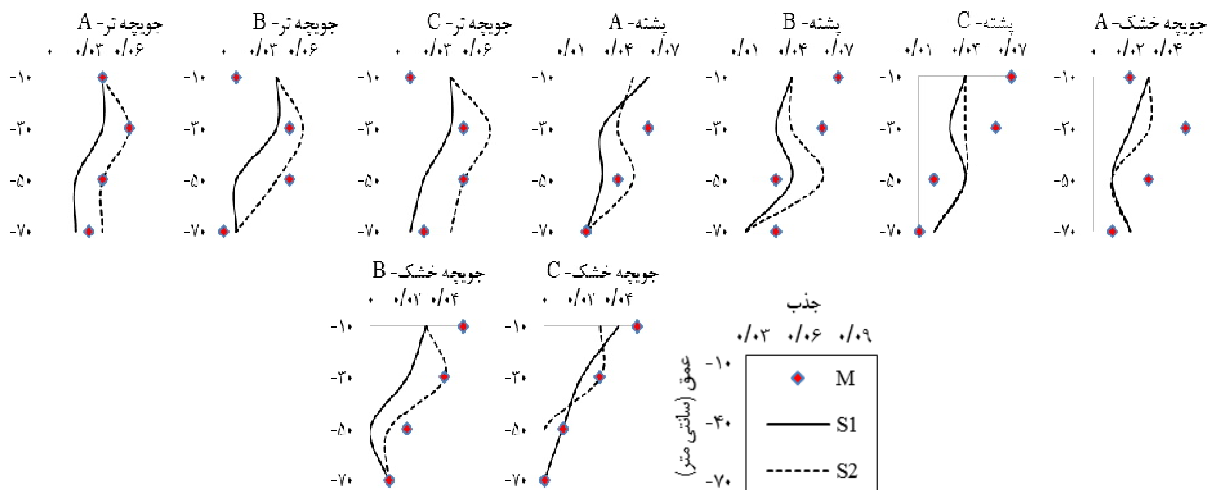
براساس نتایج، در روش AFI با توجه به نصف شدن مقدار آب آبیاری جذب ریشه تفاوت معنی‌داری با روش EFI نداشت که از دلایل آن می‌توان به تهویه خوب خاک، از بین رفتن ریشه و ذخیره آب در لایه‌های بالا که بیش‌ترین تراکم ریشه وجود دارد به دلیل حرکت جانبی زیاد در اثر بافت ریز خاک اشاره کرد. روش FFI در



دقت بالایی انجام می‌دهد. در نتیجه با اندازه‌گیری در مراحل ابتدایی می‌توان از آن در مدیریت آب در مزرعه استفاده کرد.



شکل 8- مقادیر جذب تجمعی در دور آبیاری در جویچه تر، خشک و پشته روشن یک در میان متغیر ( $T^1$ )



شکل 9- مقادیر جذب تجمعی در دور آبیاری در جویچه تر، خشک و پشته روشن یک در میان ثابت ( $T^1$ )

255

بشارت، س، بهمنش، ج، رضایی، ح و حسن‌نیا، ر. 1393. ارزیابی مدل Hydrus-2D در نفوذ آب به خاک با استفاده از اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی در لایسیمتر وزنی. پژوهش‌های حفاظت آب و خاک. 5:21-297-306.

بشارت، س، ناظمی، ا، صدرالدینی، ع و شهمراد، ص. 1390. استفاده از نرم افزار HYDRUS در شبیه‌سازی حرکت و جذب آب در خاک و ارایه نرم افزار SWMRUM. نشریه دانش آب و خاک. 4:21-121-137.

پوریزدان‌خواه، ه، خالدیان، م، بیگلویی، م، شاهین‌رخسار، ش. 1393.

بنابراین نیاز به کار و هزینه پایش مستقیم را می‌توان به حداقل رساند و بنابر نتایج توصیه می‌شود که مدل برای هر روش آبیاری به صورت جداگانه واسنجی گردد و همچنین جهت جلوگیری از کاهش دقت مدل در طول فصل رشد در بازه‌های زمانی مناسب دوباره واسنجی و مورد استفاده قرار گیرد.

### منابع

اکبری نودهی، د. 1393. تاثیر روش‌های آبیاری جویچه‌ای و کم‌آبیاری بر عملکرد و کارایی مصرف آب ذرت علوفه‌ای در مازندران. علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب و خاک. 18:70-245.

- of field water use and crop yield. Wiley, New York.
- Grimes, D.W., Walhood, V.T., Dickens, W.L. 1968. Alternate-furrow irrigation for San Joaquin valley cotton. *California Agriculture*. 22: 4-6.
- Kaman, H., Kirda, C., Cetin, M., Topcu, S. 2006. Salt accumulation in the root zones of tomato and cotton irrigated with partial root-drying technique. *Irrigation and Drainage*. 55: 533-544.
- Kandelous, M.M., Simunek, J. 2010. Numerical simulations of water movement in a subsurface drip irrigation system under field and laboratory conditions using HYDRUS-2D. *Agricultural Water Management*. 97: 1070-1076.
- Kang, S.Z., Liang, Z.S., Pan, Y.H., Shi, P.Z., Zhang, J.H. 2000. Alternate furrow irrigation for maize production in an arid area. *Agricultural Water Management*. 45: 267-274.
- Kirda, C., Topcu, S., Kaman, H., Ulger, A.C., Yazici, A., Cetin, M., Derici, M.R. 2005. Grain yield response and N-fertiliser recovery of maize under deficit irrigation. *Field Crops Research*. 93: 132-
- Koumanov, K.S., Hopmans, J.W., Schwankl, L.J., Andreu, L., Tuli, A. 1997. Application efficiency of micro-sprinkler irrigation of almond trees. *Agricultural Water Management*. 34: 247-263.
- Kriedmann, P.E., Goodwin, I. 2003. Regulated deficit irrigation and partial rootzone drying. *Irrigation insights no.4, Land and Water Australia, Canberra*, 102p.
- Loveys, B.R., Stoll, M., Dry, P.R., McCarthy, M.G. 2000. Using plant physiology to improve the water use efficiency of horticultural crops. *Acta Horticulturae*. 537: 187-197.
- Sepaskhah, A.R., Ahmadi, S.H. 2010. A Review on Partial Root-Zone Drying Irrigation. *International Journal of Plant Production*. 4.4: 241-258.
- Sepaskhah, A.R., Hosseini, S.N. 2008. Effects of alternate furrow irrigation and nitrogen application rates on winter wheat (*Triticum aestivum* L.) yield, water- and nitrogen-use efficiencies. *Plant Production Science*. 11: 250-259.
- Sepaskhah, A.R., Khajehabdollahi, M.H. 2005. Alternate furrow irrigation with different irrigation intervals for maize (*Zea mays* L.). *Plant Production Science*. 8: 592-600.
- Sepaskhah, A.R., Parand, A.R. 2006. Effects of alternate furrow irrigation with supplemental every-furrow irrigation at different growth stages on the yield of maize (*Zea mays* L.). *Plant production Science*. 9: 415-421.
- Sepaskhah, A.R., Sichani, S.A. 1976. Evaluation of subsurface irrigation spacings for bean production. شبیه‌سازی رطوبت خاک تحت یک منبع خطی در خاک سنگین با استفاده از مدل HYDRUS-2D. *نشریه پژوهش‌های آب در کشاورزی* 3.28: 599-611.
- جوادزاده شاخالی، ف.، خالدیان، م.، نوایان، م.، شاهین‌رخسار، پ. 1395. شبیه‌سازی رطوبت حجمی خاک با مدل HYDRUS-2D از منبع تغذیه خطی با شوری‌های متفاوت آب آبیاری و مقایسه با مشاهدات میدانی. *نشریه علوم آب و خاک* 75.20: 129-140.
- رضایی استخرنویه، ع.، هوشمند، ر.، برومند نسب، س.، خانجانی، م. 1393. کارایی مصرف آب و شاخص برداشت ذرت دانه‌ای تحت تاثیر خشکی موضعی ریشه در منطقه کرمان. *مجله پژوهش آب ایران*. 15.8: 103-113.
- سلامتی، ن.، دلبری، م.، عباسی، ف.، شینی‌دشتگل، ع. 1394. شبیه‌سازی انتقال آب و نیترات در خاک با استفاده از مدل HYDRUS-1D در آبیاری جویچه‌ای نیشکر. *نشریه علوم آب و خاک*. 74.19: 179-192.
- عباسی، ف. 1387. ارزیابی برخی روش‌های غیرمستقیم تخمین ویژگی‌های هیدرولیکی خاک برای شبیه‌سازی رطوبت در یک خاک لوم‌شنی. *مجله تحقیقات مهندسی کشاورزی*. 4.9: 31-44.
- عباسی، ف.، تاجیک، ف. 1386. برآورد هم‌زمان پارامترهای هیدرولیکی و انتقال املاح در خاک به روش حل معکوس در مقیاس مزرعه. *علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی*. 1.11: 111-123.
- Arya, M.L., Leij, F.J., van Genuchten, M.Th. Shouse, P.J. 1999. Scaling parameter to predict the soil water characteristic from particle-size distribution data. *Soil Science Society of America*. 63.3: 510519.
- Bannayan, M and Hoogenboom, G. 2009. Using pattern recognition for estimating cultivar coefficients of a crop simulation model. *Field Crop Research*. 111: 290-302.
- Chen, L., feng, Q., Li, F., Li, C. 2015. Simulation of soil water and salt transfer under mulched furrow irrigation with saline water. *Geoderma*, 241–242: 87–96.
- Devkota, m., Gupta, R., Martius, C., Lamers, J., Devkota, K., Savre, K., vlek, P. 2015. Soil salinity management on raised beds with different furrow irrigation modes in salt-affected lands. *Agricultural Water Management*. 152: 243-250.
- Deb, S.K., Sharma, P.M.K., Shukla, J., Ashigh, J., imunek, J. 2015. Numerical evaluation of nitrate distributions in the onion root zone under conventional furrow fertigation, *Journal of Hydrologic Engineering*. 21.2.
- Feddes, A., Kowalik, P.J., Zaradny, H. 1978. Simulation

- Media, User Manual Version 1.0, PC-Progress, Prague, Czech Republic.
- Siyal,A.A., Mashori,A.S., Bristow,K.L., Genuchten, M.T. 2016. Alternate furrow irrigation can radically improve water productivity of okra.
- Vrugt,JA., Hopmans,J.W., Šimunek,J. 2001. Calibration of a two-dimensional root water uptake model. Soil Science Society of America. 65.4:1027-1037.
- Vrugt,JA., Van Wijk,M.T., Hopmans,J.W., Šimunek,J. 2002. One-, two and three dimensional root water uptake functions for transient modeling. Water Resour Res. 37.10:2457-2470.
- Canadian Agricultural Engineering. 18: 23-26.
- Sepaskhah,A.R., Sichani,S.A., Bahrani,B. 1976. Subsurface and furrow irrigation evaluation for bean production. Transactions of the ASAE. 19: 1089-1093.
- Šimunek,J., Bristow,K.L., Helalia,S., WSiyal,A.A. 2016. The effect of different fertigation strategies and furrow surface treatments on plant water and nitrogen use, Irrigation Science. 34.1: 53-69.
- Simunek,J., Sejna,M., Van Genuchten,M.T. 2006. The HYDRUS software package for Simulating the Two- and Three-Dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably-Saturated

## Measurement and Simulation of Soil Water Flow and Root Water Uptake in Alternate Furrow Irrigation

R. Barideh<sup>1</sup>, S. Besharat<sup>2\*</sup>

Received: Aug.21, 2016

Accepted: Dec.31, 2016

### Abstract

Since the direct surveillance and data collection on the farm costly and not applicable in all farms, therefore the use of mathematical models necessary. The aim of this study was to investigate soil water flow and root water uptake in every furrow irrigation (EFI), Alternate furrow irrigation (AFI) and fixed furrow irrigation (FFI) and also calibration and verification of HYDRUS-2D model In order to assess its applicability in the above methods. Field data was collected at growing season corn crop in these methods. To better understand the behavior of the model results were evaluated in two scenarios. In the first scenario model using data from EFI and in the second scenario for each irrigation methods independently calibrated (33% data) and validated (67% data). Estimating the parameters was performed based on soil properties from the database Rosetta and it used in HYDRUS-2D inverse solution for optimize. The Results were compared by indices R<sup>2</sup>, nRMSE, EF and CRM with each other. The measurement results shows that due to the halving of the amount of irrigation water in the AFI root water uptake was not significantly different with EFI, and The maximum uptake was observed at a depth of 30 cm. Range of R<sup>2</sup> value was observed from 0.72 to 0.89 and nRMSE between 0.046 and 0.078. According to calculated nRMSE values, performance of the simulation model, was ranked as excellent for simulation. The results showed that the model was calibrated by initial data separately for each irrigation method increases the accuracy of the model.

**Keyword:** Alternate and fixed furrow irrigation, Corn, HYDRUS-2D, Inverse solution

1- MSc Student, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Urmia University

2- Assistant Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Urmia University

(\*- Corresponding Author Email:s.besharat@urmia.ac.ir)