

## Sensitivity analysis of Hydrus software to input data in simulating water movement and root uptake of grass as a reference plant

Majid Raof<sup>1\*</sup> , Zeynab Akbari Baseri<sup>2</sup>, Ali Rasoulzadeh<sup>3</sup> , Javanshir Azizi Mobaser<sup>1</sup> 

<sup>1</sup> Associate Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Water Management Research Center, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

<sup>2</sup> M.Sc. Graduated Student, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

<sup>3</sup> Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Water Management Research Center, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

### Abstract

#### Introduction

Understanding the movement of water in the soil and the process of root water uptake is critical. Numerical simulation is an effective solution for optimizing water management in the field. Accurate prediction of water movement in the soil and root water uptake, to create optimal moisture conditions in the root zone, is important for better plant performance. Investigating the phenomenon of water absorption by roots in hydrological and plant models requires a quantitative description of water absorption by plant roots. Accuracy of model simulation in predicting soil water transfer and root absorption, as temporal and spatial variables, is the most important criterion in agricultural issues.

#### Materials and Methods

The water movement in the soil and root water uptake were simultaneously simulated using HYDRUS-3D software. For this purpose, the grass plant was cultivated in three lysimeters with the same soil texture. The grass plant was irrigated every three days at 10 am. The soil water content of the depths of 5, 15, 25, 40, 60, and 80 cm was measured every day at 10 am and 6 pm. The volume of water drained from the lysimeters was measured every day. The measurements were done over a period of 81-day. Soil's physical properties were measured in the laboratory.

#### Results and Discussion

The results showed that in all simulations, the minimum and maximum relative errors were obtained at 0.79 and 35.1%, respectively. The cumulative measured volume of drainage water in the whole period is 162.75 liters and the cumulative volume of simulated drainage water in the whole period is 133.79 liters. The relative error between these two values is equal to 5.28%. Rainfall amounts have a significant effect on estimating the volume of simulated drainage water and its difference from the measured volume of drainage water. With the increase of initial moisture and soil hydraulic conductivity, the relative error between the measured and estimated drainage water data increases, and with the increase of saturated moisture and residual moisture in the soil, the relative error decreases. The values of root water uptake (Minimum 0.5 and maximum 3.5 liters in one irrigation interval), showed that in the third stage of growth, root absorption has the maximum value and by comparing the actual and potential root absorption, which have a low difference, no stress has been applied to the plant.

#### Conclusion

The change in the input parameters causes a change in the estimated volume of drained water at the beginning of the period. When the initial moisture and residual soil moisture are considered as 0.3 and 0.15325, respectively, the relative error between the measured and estimated drainage water data is the lowest. The root water uptake values were also estimated using the model. According to the values of actual and potential root water uptake, in the whole period, which has very small differences, no stress has been applied to the grass plant and sufficient water has been provided to the plant.

**Keywords:** Characteristic curve, HYDRUS-3D, Root uptake, Soil, Water

**Article Type:** Research Article

\*Corresponding Author, E-mail: majidraof2000@gmail.com

**Citation:** Raof, M., Akbari Baseri, Z., Rasoulzadeh, A., & Azizi Mobaser, J. (2022). Sensitivity analysis of Hydrus software to input data in simulating water movement and root uptake of grass as reference plant. *Water and Soil Management and Modeling*, 2(3), 94-107.

DOI: 10.22098/MMWS.2022.10847.1090

DOR: 20.1001.1.27832546.1401.2.3.8.7



Received: 28 May 2022, Received in revised form: 16 July 2022, Accepted: 17 July 2022, Published online: 17 July 2022

*Water and Soil Management and Modeling*, Year 2022, Vol. 2, No. 3, pp. 94-107

Publisher: University of Mohaghegh Ardabili

© Author(s)



## تحلیل حساسیت نرم‌افزار Hydrus نسبت به داده‌های ورودی در شبیه‌سازی حرکت آب و جذب ریشه گیاه مرجع چمن

مجید رئوف<sup>۱\*</sup>، زینب اکبری باصری<sup>۲</sup>، علی رسول‌زاده<sup>۳</sup>، جوانشیر عزیزی مبصر<sup>۱</sup>

<sup>۱</sup> دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، پژوهشکده مدیریت آب، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران  
<sup>۲</sup> فارغ التحصیل کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران  
<sup>۳</sup> استاد، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، پژوهشکده مدیریت آب، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

### چکیده

پیش‌بینی دقیق حرکت آب در خاک و جذب ریشه در راستای ایجاد شرایط رطوبتی بهینه منطقه ریشه برای عملکرد بهتر گیاه اهمیت بسیار زیادی دارد. در این پژوهش، حرکت آب در خاک و جذب ریشه به‌صورت هم‌زمان با استفاده از نرم‌افزار HYDRUS-3D شبیه‌سازی شد. برای این منظور، گیاه چمن در سه لایسی‌متر با بافت خاک یکسان کشت شد. آبیاری هر سه روز یک بار در ساعت ۱۰ صبح انجام شد. رطوبت اعماق ۵، ۱۵، ۲۵، ۴۰، ۶۰ و ۸۰ سانتی‌متر، هر روز ساعت ۱۰ صبح و عصر اندازه‌گیری شد. حجم آب زهکشی خارج شده از لایسی‌مترها در روزهایی که آب از لایسی‌متر زهکش می‌شد، اندازه‌گیری شد. اندازه‌گیری‌ها در یک دوره ۸۱ روزه انجام شد. ویژگی‌های فیزیکی خاک در آزمایشگاه نیز اندازه‌گیری شدند. در این پژوهش، از نرم‌افزار HYDRUS-3D جهت شبیه‌سازی آب زهکش شده از لایسی‌متر، مقادیر جذب ریشه روزانه، رطوبت اعماق مختلف خاک، برآورد منحنی مشخصه آب خاک و منحنی هدایت هیدرولیکی استفاده شد. نتایج نشان داد که مقادیر بارندگی در برآورد حجم آب زهکشی شبیه‌سازی شده و اختلاف آن با حجم آب زهکشی اندازه‌گیری شده تأثیر به‌سزایی دارد. در تمامی شبیه‌سازی‌ها، حداقل و حداکثر خطای نسبی به‌ترتیب ۰/۷۹ تا ۳۵/۱ درصد به‌دست آمد. با افزایش رطوبت اولیه و هدایت هیدرولیکی خاک خطای نسبی بین داده زهکشی اندازه‌گیری شده و برآورد شده افزایش و با افزایش رطوبت اشباع و رطوبت باقیمانده در خاک کاهش می‌یابد. حجم تجمعی آب زهکشی اندازه‌گیری و برآورد شده در کل دوره به اندازه ۵/۲۸ درصد باهم اختلاف دارند. مقادیر جذب ریشه (حداقل ۰/۵ و حداکثر ۳/۵ لیتر در یک دور آبیاری) نشان داد که در مرحله سوم رشد جذب ریشه حداکثر مقدار را دارد و با مقایسه جذب ریشه واقعی و پتانسیل که اختلاف ناچیزی دارند هیچ تنشی به گیاه وارد نشده است. از مقایسه منحنی مشخصه اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده می‌توان نتیجه گرفت که مدل دقت بالایی در تخمین منحنی مشخصه آب خاک دارد.

واژه‌های کلیدی: آب، خاک، جذب ریشه، منحنی مشخصه، HYDRUS-3D

### نوع مقاله: پژوهشی

\*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: majidraoof2000@gmail.com

**استناد:** رئوف، م.، اکبری باصری، ز.، رسول‌زاده، ع.، و عزیزی مبصر، ج. (۱۴۰۱). تحلیل حساسیت نرم‌افزار Hydrus نسبت به داده‌های ورودی در شبیه‌سازی حرکت آب و جذب ریشه گیاه مرجع چمن. *مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک*، ۳(۳)، ۹۴-۱۰۷.

DOI: 10.22098/MMWS.2022.10847.1090

DOR: 20.1001.1.27832546.1401.2.3.8.7

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۳/۰۷، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۰۴/۲۵، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۴/۲۶، تاریخ انتشار: ۱۴۰۱/۰۴/۲۶

مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک، سال ۱۴۰۱، دوره ۲، شماره ۳، صفحه ۹۴ تا ۱۰۷

© نویسندگان

ناشر: دانشگاه محقق اردبیلی



## ۱- مقدمه

به‌علت رشد جمعیت جهان و محدودیت منابع آب، آبیاری در کشاورزی باید در جهت تولید محصول بیش‌تر با میزان آب کم‌تر حرکت کند. درک حرکت آب در خاک و سازوکار جذب آب توسط ریشه می‌تواند کمک بسیاری در راستای این چالش نماید. شبیه‌سازی عددی راه‌حل مؤثر در بهینه‌سازی مدیریت آب در مزرعه است ( Schmitz et al., 2002; Cote et al., 2003; Meshkat et al., 1999). گیاه آب مورد نیاز خود را از طریق ریشه‌ها از خاک جذب می‌کند. بنابراین، موجودیت آب در خاک از عوامل اصلی رشد گیاه است. علاوه بر این بسیاری از ویژگی‌های خاک، مانند پایداری، خمیری، مقاومت، قابلیت فشرده شدن، نفوذپذیری و قابلیت عبور و مرور در خاک بستگی به مقدار آب آن دارد. رطوبت خاک بر مقدار هوای موجود در خاک و تبادل گازها در آن نیز مؤثر است. فعالیت موجودات ریز خاک و واکنش‌های شیمیایی خاک نیز تابعی از مقدار رطوبت آن است (Shamsayi, 2000). رطوبت خاک، به سه قسمت طبقه‌بندی می‌شود که عبارت است از: ۱) رطوبت غیرقابل دسترس (غیرقابل استفاده)، ۲) رطوبت قابل دسترس (قابل استفاده) و ۳) رطوبت ثقیلی. این گونه طبقه‌بندی مربوط به قابلیت دسترسی رطوبت خاک برای گیاه است. در وضعیت عادی می‌توان رطوبت ثقیلی را به‌سرعت از منطقه ریشه زهکشی نمود. رطوبت غیرقابل دسترس به‌وسیله نیروی موینه‌ای به‌شدت در خاک حفظ می‌شود و معمولاً به ریشه گیاه نمی‌رسد. وضعیت رطوبت قابل دسترس حالت بین رطوبت ثقیلی و رطوبت غیرقابل دسترس است. نیروی جاذبه ثقیلی، پیوسته رطوبت خاک را زهکشی می‌کند. چگونگی جذب آب توسط ریشه گیاه تاکنون مورد توجه دانشمندان بسیاری در زمینه‌های زیست‌شناسی، زراعت، فیزیک خاک و محیط زیست قرار داشته و افراد بسیاری به مدل کردن این پدیده پرداخته و به کمک داده‌های واقعی مزرعه‌ای و آزمایشگاهی به صحت‌یابی و واسنجی مدل‌های حاصله پرداخته‌اند. جذب آب توسط ریشه، با مدل‌های خرد و کلان کمی می‌شود. بررسی پدیده جذب آب توسط ریشه در مدل‌های هیدرولوژیکی و گیاهی نیازمند یک توصیف کمی از جذب آب توسط ریشه گیاه است (Barzegar, 2010). زمان و مقدار آبیاری به خروج آب توسط ریشه بستگی دارد. گیاهان با ریشه کوتاه نسبت به گیاهان با ریشه عمیق به آبیاری مکرر احتیاج دارند. با ثابت بودن همه شرایط در یک خاک مرطوب، ریشه گیاه در مقایسه با خاک خشک، آب بیش‌تری جذب می‌نماید. بر این اساس، بیش‌ترین آب مصرفی گیاه از سطح خاک جذب می‌شود. این بدان دلیل است که غالباً به‌صورت

نرمال ریشه‌های بیش‌تری در نزدیک سطح خاک تجمع می‌یابند (Molz and Remson, 1970).

Herkelrath et al. (1977) برای اندازه‌گیری توزیع عمودی جذب آب به‌وسیله ریشه هر ستون خاک را به پنج قسمت تقسیم و به‌وسیله واکس از یک‌دیگر جدا نمودند. آن‌ها نشان دادند که بیش‌ترین جذب ابتدا در نزدیکی سطح خاک و پس از آن در اعماق صورت می‌گیرد. (Kang et al. (2001) معادله‌ای شدت جذب آب توسط ریشه را با فرض این‌که ظرفیت رطوبتی خاک قادر به برطرف کردن تمام نیاز آبی ریشه بوده و نیز توزیع آن در تمام ناحیه ریشه یکنواخت است، ارائه نمودند. تعیین ضریب وارد شده در مدل (Li et al. (2001) جهت لحاظ مرحله رشد ریشه مشکل بوده و از قابلیت کاربردی مدل می‌کاهد. این امر (Brijesh et al. (2008) را در سال 2008 برآن داشت تا با اختیار تابع نرمالیزه شده توزیع غیرخطی ریشه مستقل از مرحله رشد آن تأثیر کمبود رطوبت خاک را به همراه رشد دینامیکی رشد در مدل‌سازی لحاظ کنند. مزیت مدل ارائه شده توسط (Brijesh et al. (2008) لحاظ جنبه دینامیکی ریشه عمقی ریشه است. نتایج به‌دست آمده از آن حاکی از این است که حداکثر شدت جذب آب از لایه‌های بالایی در صورت برقرار بودن میزان رطوبت بهینه در تمام پروفیل خاک صورت می‌گیرد و در غیر این صورت اوج جذب به ناحیه‌ای با شرایط رطوبتی مناسب‌تر، انتقال خواهد یافت. در پژوهش (Vrugt et al. (2001a) یک مدل دو بعدی جذب آب ریشه بسط داده شد. سپس با استفاده از نرم‌افزار HYDRUS این مدل ارزیابی شد. هم‌چنین، مدل جذب آب با استفاده از اندازه‌گیری‌های رطوبت خاک توسط نوترون‌متر برای درخت بادام در مدت ۱۶ روز واسنجی شد. در این آزمایش از آبیاری بارانی استفاده شد. نتایج به‌دست آمده از مدل با نتایج اندازه‌گیری صحرائی مقایسه شد. آن‌ها نتیجه گرفتند که پیش‌بینی درصد رطوبت خاک با استفاده از HYDRUS همبستگی خوبی با داده‌های مشاهداتی دارد ( $R^2=0/94$ ). (Mansell et al. (2002) در مطالعه‌ای مدل‌های عددی و نحوه شبکه‌بندی آن‌ها را برای انتقال آب در خاک مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش خطاهای موجود در حل عددی بررسی شده و روش‌هایی جهت افزایش دقت با استفاده از شبکه‌بندی جدید پیشنهاد شده است. (Salazar et al. (2008) شبیه‌سازی به‌دست آمده از نرم‌افزار HYDRUS را با داده‌های مشاهداتی آبیاری قطره‌ای مقایسه نمودند که نتایج از هم‌بستگی خوبی برخوردار بوده است. (Siyal and Skaggs (2009) شبیه‌سازی با نرم‌افزار HYDRUS (2D/3D) برای تغییرات رطوبت خاک را در آبیاری زیرسطحی مطالعه نمودند و

خطای نسبی، متوسط مجذور مربعات خطا، میانگین خطای مطلق، نسبت خطای متوسط هندسی و ضریب تبیین به ترتیب ۱۷/۵۸ درصد، ۰/۷۵۹ لیتر، ۰/۸۶۶، ۰/۷۷۷ و ۰/۸۸۵ بود. همچنین بررسی مقادیر GMER نشان داد که در بیش تر شبیه سازی ها مدل کم برآورد است. علاوه بر موارد ذکر شده، پژوهش های متعددی نیز در سال های اخیر در این مورد صورت گرفته است که از آن جمله می توان به تحلیل دقت و حساسیت نرم افزار HYdrus 1D در تخمین جذب آب توسط ریشه در شرایط خاک شور (Zeng et al., 2018)، کاربرد Hydrus 1D برای استخراج پارامترهای معادله بیلان در مزرعه گندم زمستانه در یک منطقه نیمه خشک در کشور مراکش (Er-Raki et al., 2021)، تخمین ویژگی های هیدرولیکی و ضریب جذب خاک در شرایط غیرماندگار در اراضی شیب دار (Raof et al., 2009)، تاثیر سطوح مختلف ورودی نرم افزار Rosetta در تخمین ویژگی های هیدرولیکی خاک با استفاده از نرم افزار HYDRUS-2D و اثر تغییر کاربری اراضی بر آن ها (Ebrahimi and Raof, 2016)، تاثیر سطوح مختلف ورودی نرم افزار Rosetta در تخمین ویژگی های هیدرولیکی خاک با استفاده از نرم افزار HYDRUS-2D و اثر تغییر کاربری اراضی بر آن ها (Ebrahimi and Raof, 2015) و تعیین ضریب گیاهی چغندر قند با استفاده از لایسی متر در دشت اردبیل و مقایسه آن با داده های جهانی فائو (Raof, 2019) اشاره نمود.

حرکت آب در خاک همواره به عنوان یکی از پیچیده ترین مسائل مهندسی آب و خاک مطرح بوده و هنوز موارد ناشناخته و سوالات زیادی پیش روی پژوهش گران قرار دارد. انتقال آب و جذب ریشه در فرآیند غیر قابل تفکیک می باشد که پیش بینی دقیق آن ها در راستای عملکرد بهتر گیاه حائز اهمیت است. دقت شبیه سازی مدل در پیش بینی انتقال آب در خاک و جذب آن توسط ریشه، به عنوان متغیرهای زمانی و مکانی مهم ترین معیار در مسائل کشاورزی است و لذا مقایسه نتایج حاصل از مدل با نتایج آزمایش های میدانی و نیز نتایج حاصله توسط سایر پژوهش گران بیان گر میزان دقت مدل ها خواهد بود. مدل های عددی ابزار بسیار مفیدی برای این سیستم پیچیده هستند که مدل های بسیاری در این زمینه ارائه شده است. این مدل ها بیش تر به صورت کمی نیازهای جوی، توزیع ریشه مؤثر و جذب ریشه را در پتانسیل خاک که توسط آب قابل دسترس کنترل می شود در نظر می گیرند. هدف از این پژوهش شبیه سازی حرکت آب در خاک همراه با جذب ریشه برای گیاه چمن با استفاده از نرم افزار HYDRUS است.

ارتباط پارامترهای هیدرولیکی و فیزیکی و الگوی رطوبت خاک متأثر از شیوه های مدیریتی و طراحی آبیاری را مورد پژوهش قرار دادند. آن ها نتیجه گرفتند که پیش بینی های درصد رطوبت خاک با استفاده از HYDRUS همبستگی های خوبی با داده های مشاهداتی دارد ( $R^2=0/98$ ). Simunek and Hopmans (2009)، با معرفی پارامتری به نام شاخص استرس بحرانی و با بررسی جذب جبرانی آب توسط ریشه در شرایط تنش رطوبتی نشان دادند که اگر تمام ناحیه ریشه تحت تنش رطوبتی قرار گیرد، جذب جبرانی معنایی نخواهد داشت. Abtahi and Besharati (2011)، یک مدل جذب آب ریشه برای گیاه چغندر قند بسط دادند. مدل ارائه شده قابلیت محاسبه جذب آب توسط ریشه را به صورت زمانی و مکانی و بر اساس الگوی پخش یکنواخت و غیر یکنواخت آب در خاک دارد. نتایج بیان گر این مطلب بوده که حدود ۱۲۳-۱۴۸ لیتر آب از قسمت بالایی محیط ریشه در اثر جذب برداشت شده است. بنابراین، به طور متوسط میزان جذب آب توسط ریشه گیاه چغندر قند در عمق ۰-۵۰ سانتی متر از محیط ریشه ۲۷-۱۴ لیتر در روز محاسبه شده است. این نتایج نشان می دهد که در نقاطی که در اثر تغییرات ناگهانی رطوبت در زمان های طولانی دقت نرم افزار HYDRUS کاهش یافته است. می توان جهت افزایش دقت نرم افزار، مراحل شبیه سازی را به بازه های زمانی کوچک تر تقسیم نمود. Besharat et al. (2014)، مدل نفوذ و جذب ریشه به صورت دویعدی را توسط نرم افزار HYDRUS-2D در یک لایسی متر ارزیابی کرده اند. بر اساس نتایج به دست آمده، حداکثر جذب تجمعی در یک دوره ۱۵ روزه به طور متوسط  $1 \text{ m}^{-3} \text{ d}^{-1}$  و  $10 \times 12$  محاسبه شده است. در شروع دوره مورد مطالعه و بلافاصله پس از آبیاری با شدت جذب ریشه  $1 \text{ m}^{-3} \text{ d}^{-1}$  بوده است و نتایج بهینه سازی شده در این پژوهش حدود جذب حداکثر ریشه را در عمق ۲۰ سانتی متر نشان می دهد.

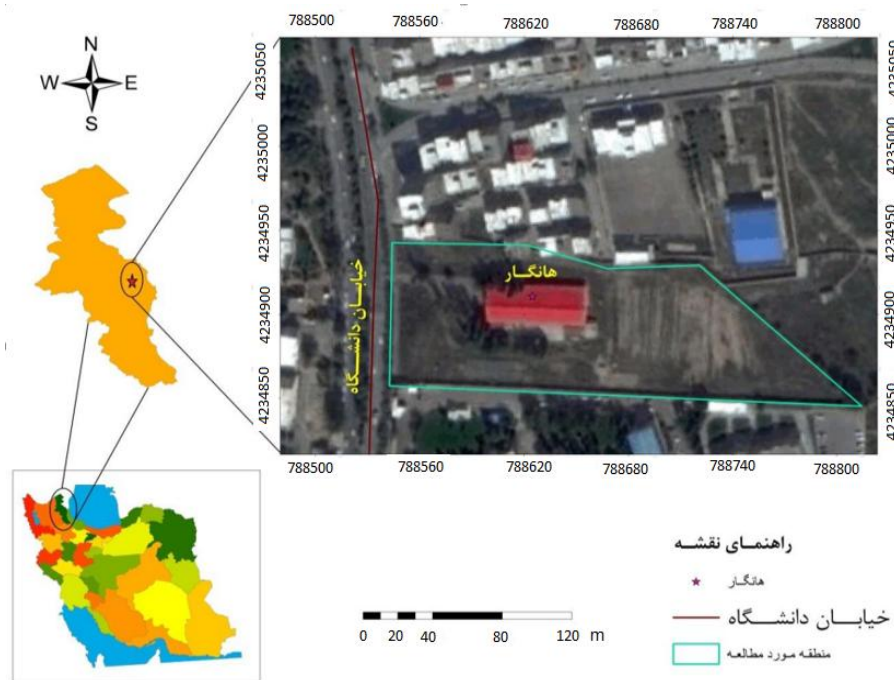
Raof (2022) به بررسی اثر پارامترهای ورودی نرم افزار Hydrus 3D روی شبیه سازی هم زمان حرکت آب و جذب ریشه چغندر قند پرداختند. گیاه چغندر قند در سه لایسی متر با بافت خاک یکسان کشت شد. آبیاری ها به صورت دو بار در هفته (ساعت ۸ یکشنبه و ساعت ۱۶ چهارشنبه) انجام شد. رطوبت حجمی خاک قبل از هر آبیاری و آب زهکشی شده از لایسی مترها پس از هر آبیاری، اندازه گیری شد. نتایج نشان داد در حالتی که از رطوبت باقیمانده اندازه گیری شده (با روش دستگاه صفحات فشاری)، رطوبت اشباع مستخرج از نرم افزار RETC، رطوبت اولیه اندازه گیری شده (با روش توزین) و هدایت هیدرولیکی اشباع مستخرج از نرم افزار Rosetta در شبیه سازی استفاده شود، دقت شبیه سازی بیش ترین مقدار خواهد بود. در حالت ذکر شده مقادیر

## ۲- مواد و روش‌ها

## ۲-۱- منطقه مورد مطالعه

این پژوهش در محوطه ساختمان هانگار دانشگاه محقق اردبیلی واقع در خیابان دانشگاه شهر اردبیل انجام شد (شکل ۱). موقعیت جغرافیایی شهر اردبیل ۳۸ درجه و ۱۵ دقیقه شمالی و ۴۸ درجه و ۱۷ درجه شرقی است. شهر اردبیل، مرکز استان اردبیل با ارتفاع ۱۳۳۲ متر از سطح دریا، در میان کوه‌های تالش

و سبلان واقع شده است. شهرستان اردبیل دارای چهار اقلیم مدیترانه‌ای گرم، مدیترانه‌ای معتدل، کوهستانی سرد و معتدل است. این شهرستان به‌عنوان یکی از مناطق سردسیر ایران و استان بین پنج تا هشت ماه از سال، سرد است. بارندگی نیز در تمام فصول وجود دارد، ولی شدت آن در بهار و پاییز بیش‌تر است.



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه در استان اردبیل و ایران  
Figure 1- Location of study area in Ardabil Province and Iran

ساده و کاملاً کاربردی برای اندازه‌گیری غیرمستقیم رطوبت خاک استفاده از قالب یا بلوک‌های گچی است که به بلوک‌های مقاومت نیز معروف هستند (Akbari Baseri et al., 2015).

## ۲-۲- محاسبه تبخیر

تعرق چمن با دانستن مقادیر رطوبت خاک، آب آبیاری و بارندگی در طول دوره رشد و دوره چینش در هر لایسی‌متر و تعیین نفوذ عمقی از طریق جمع‌آوری آب خارج شده از انتهای لایسی‌مترها قابل محاسبه است. از رابطه ۱، تبخیر-تعرق چمن محاسبه شد (Rasoulzadeh and Raouf, 2014):

$$ET_0 = I + R - D - \Delta S \quad (1)$$

که در آن،  $ET_0$  تبخیر و تعرق گیاه مرجع در فاصله اندازه‌گیری رطوبت خاک در لایسی‌متر،  $I$  مقدار آب آبیاری،  $R$  ارتفاع بارندگی،  $D$  مقدار آب زهکشی و  $\Delta S$  تغییرات رطوبت

برای انجام این پژوهش از سه لایسی‌متر حجمی به قطر ۵۸ سانتی‌متر و عمق ۹۰ سانتی‌متر استفاده شد. در انتهای لایسی‌مترها شیری برای خروج آب زهکشی تعبیه شد که آب زهکشی شده پس از جمع‌آوری با استوانه مدرج اندازه‌گیری شد. به‌منظور سهولت در زهکشی آب اضافی، لایه شنی به ضخامت ۱۰ سانتی‌متر در کف لایسی‌مترها ریخته شد. گیاه چمن در لایسی‌مترها و مساحتی در اطراف لایسی‌مترها کاشته و جهت جوانه‌زنی آبیاری کامل شد. قبل از کشت چمن در هر لایسی‌متر در عمق‌های ۵، ۱۵، ۲۵، ۴۰، ۶۰ و ۸۰ سانتی‌متر در هنگام خاکریزی در لایسی‌مترها، بلوک گچی که قبلاً واسنجی شده بودند، نصب شد.

رطوبت خاک به دو صورت مستقیم و غیرمستقیم اندازه‌گیری می‌شود. برخی از روش‌ها در مزرعه انجام می‌شوند، اما در بعضی دیگر باید از خاک نمونه‌برداری کرده و مقدار رطوبت را در آزمایشگاه اندازه‌گیری نمود. یکی از روش‌های

خاک که توسط Mualem (1976) به دست آمده و در بسیاری از خاک ها برابر ۰/۵ است.

## ۲-۵- تحلیل حساسیت

تحلیل حساسیت حد یا درجه حساسیت یک مدل ریاضی را به پارامترهای ورودی آن نشان می دهد. تحلیل حساسیت روشی برای ارزیابی و واسنجی مدل های ریاضی است. این روش تأثیرپذیری مدل و شرایط واقعی را از داده های ورودی مورد بررسی قرار می دهد. اگر تغییرات یکی از پارامترهای ورودی تأثیر اندکی بر داده های خروجی مدل داشته باشد، می توان چنین استنباط کرد که آن پارامتر تأثیر ناچیزی بر نتایج مدل دارد و در نتیجه می توان از خطای اندازه گیری آن پارامتر چشم پوشی کرد. بر عکس، در صورت تأثیرپذیری زیاد مقادیر خروجی مدل باید آن پارامتر را با دقت بیشتری اندازه گیری کرد. پس در تحلیل حساسیت تغییرات پارامترهای ورودی مدل روی نتایج خروجی آن بررسی می شود. گاهی از روش تحلیل حساسیت برای تخمین پارامترهای ورودی مدل های ریاضی نیز استفاده می شود. به طور کلی، تحلیل حساسیت را به دو روش کیفی و کمی می توان اجرا کرد. در این پژوهش، به دلیل وجود پارامترهای اندازه گیری شده مورد نیاز، تحلیل حساسیت به روش کمی اجرا شد.

## ۲-۶- شاخص های ارزیابی

جهت مقایسه نتایج شبیه سازی با مقادیر اندازه گیری شده پارامترهای مختلف از شاخص های ارزیابی آماری زیر استفاده شد:

۱- خطای نسبی (RE): این شاخص بر حسب درصد بیان می شود و هر چه مقدار آن کمتر باشد، نشان دهنده دقت بالای مدل است (Akbari Baseri, 2017).

$$RE = \frac{\sum_{i=1}^n |O_i - S_i|}{\sum_{i=1}^n O_i} \quad (7)$$

۲- ضریب جرم باقی مانده (CRM): تمایل مدل در برآورد بالاتر یا پایین تر از مقادیر اندازه گیری شده را نشان می دهد. هرگاه CRM منفی شود، نشان می دهد که مدل تمایل به برآورد بالاتر از مقادیر اندازه گیری شده دارد و برعکس (Akbari Baseri, 2017).

$$CRM = \frac{\sum_{i=1}^n O_i - \sum_{i=1}^n S_i}{\sum_{i=1}^n O_i} \quad (8)$$

۳- نسبت خطای متوسط هندسی (GMER): این پارامتر بیان گر بیش برآوردی یا کم برآوردی مقادیر برآورد شده نسبت به مقادیر اندازه گیری شده است. GMER برابر با یک تطابق کامل بین مقادیر اندازه گیری و برآورد شده را نشان می دهد. GMER کم تر از یک نشان می دهد که مقادیر برآورد شده به طور کلی کم برآورد و GMER بزرگ تر از یک نشان می دهد

خاک در عمق ریشه گیاه در فاصله اندازه گیری رطوبت خاک است (رابطه ۲):

$$\Delta S = S_2 - S_1 \quad (2)$$

که در آن  $S_1$  رطوبت ذخیره شده در خاک در ابتدای دوره زمانی و  $S_2$  رطوبت ذخیره شده در خاک در انتهای دوره زمانی است.

## ۲-۳- منحنی مشخصه آب خاک

منحنی مشخصه آب خاک (SWCC)، از جمله مشخصه های مهم هیدرولیکی خاک و بیان گر رابطه بین پتانسیل ماتریک و رطوبت خاک است. منحنی مشخصه آب خاک توزیع اندازه منافذ خاک را نشان می دهد و درجه تراکم و تخلخل خاک (چگالی ظاهری و میزان آب خاک اشباع) نیز بر شکل این منحنی مؤثر است (Ebrahimi and Raouf, 2016). روش های تعیین منحنی مشخصه آب خاک به طور کلی به دو دسته مستقیم و غیرمستقیم تقسیم می شوند. روش های غیرمستقیم اندازه گیری منحنی مشخصه آب خاک شامل روش حل معکوس، توابع انتقالی و مدل های نیمه فیزیکی است. در این پژوهش به منظور شبیه سازی منحنی مشخصه آب خاک از روش حل مستقیم با استفاده از نرم افزار HYDRUS-3D استفاده شد.

## ۲-۴- منحنی هدایت هیدرولیکی خاک

به منظور شبیه سازی منحنی هدایت هیدرولیکی خاک مورد نظر از روش حل مستقیم با استفاده از نرم افزار HYDRUS-3D استفاده شد. مشخصه های هیدرولیکی  $\theta(h)$  و  $K(h)$ ، وابسته به بار فشاری خاک است. در نرم افزار HYDRUS می توان از پنج مدل تجربی مختلف برای مشخصه های هیدرولیکی استفاده کرد (Brooks and Corey, 1969; Van Genuchten, 1980; Vogel and Cislerova, 1988; Kosugi, 1996). در اجرای برنامه HYDRUS از مدل Van Genuchten (1980) استفاده شده که از مدل Mualem (1976) بهره گرفته شده است (رابطه های ۳ تا ۶):

$$\theta(h) = \begin{cases} \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + |\alpha h|)^m} & h < 0 \\ \theta_s & h \geq 0 \end{cases} \quad (3)$$

$$K(h) = K_s S_e^l \left[ 1 - \left( 1 - S_e^{\frac{1}{m}} \right)^2 \right] \quad (4)$$

$$m = 1 - \frac{1}{n}, \quad n > 1 \quad (5)$$

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (6)$$

که در آن  $\theta_s$  درصد آب خاک اشباع  $[L^3 L^{-3}]$ ،  $\theta_r$  درصد آب خاک باقی مانده  $[L^3 L^{-3}]$ ،  $K_s$  هدایت هیدرولیکی اشباع  $[T^{-1}]$ ،  $n$  شاخص توزیع خلل و فرج و 1 پارامتر مربوط به پیوستگی منافذ

## ۳- نتایج و بحث

بر اساس نمونه‌برداری‌های انجام شده از مزرعه (دست خورده و دست نخورده)، نمونه‌ها به آزمایشگاه منتقل شدند و مشخصات فیزیکی خاک در آزمایشگاه به دست آمد. نتایج به دست آمده در جدول ۱ ارائه شده است. هر مشخصه فیزیکی خاک با سه تکرار به دست آمد که میانگین محاسبات آن‌ها ارائه شده است.

مقادیر برآورد شده پیش‌برآورد شده است (Wagner et al., 2001).

$$GMER = EXP \left( \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n \ln \left( \frac{O_i}{S_i} \right) \right) \quad (9)$$

که در آن‌ها،  $O_i$  و  $S_i$  به ترتیب مقادیر اندازه‌گیری شده و برآورد شده (شبیه‌سازی شده)،  $\bar{O}$  میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده و  $N$  تعداد کل داده‌های مشاهده شده است.

جدول ۱- برخی از ویژگی‌های اندازه‌گیری شده خاک مورد مطالعه

Table 1- Some of the measured properties of the studied soil

پارامتر	شن (درصد)	سیلت (درصد)	رس (درصد)	تخلخل (درصد)	جرم مخصوص ظاهری (گرم بر سانتی‌متر مکعب)	جرم مخصوص حقیقی (گرم بر سانتی‌متر مکعب)	بافت خاک	هدایت هیدرولیکی اشباع (سانتی‌متر در روز)
میانگین	61.87	31.47	6.67	49.45	1.22	2.42	لوم شنی	281.6
انحراف معیار	2.49	2.49	0.94	3.20	0.09	0.04	-	78.9
ضریب تغییرات	0.04	0.08	0.14	0.06	0.07	0.02	-	0.28

زهدکشی را بیش‌تر از مقادیر اندازه‌گیری شده برآورد کرده و بعد از آن روز تا انتهای دوره به‌جز روز ۵۸ ام کم‌تر از مقادیر اندازه‌گیری شده برآورد کرده است. با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان گفت تا زمانی که بارندگی اتفاق نیفتاده و در ورودی نرم‌افزار فقط حجم آبیاری‌ها وارد شده است، نرم‌افزار مقادیر آب زهدکشی را در آن بازه زمانی بیش‌تر از مقادیر اندازه‌گیری شده برآورد کرده و پس از روز ۳۲ ام که بارندگی‌ها شروع شده است، نرم‌افزار مقادیر زهدکشی را کم‌تر از مقادیر اندازه‌گیری شده برآورد کرده است. در ابتدای دوره زهدکشی شدید بوده و در مدت چند روز اول زهدکشی شدیداً کاهش می‌یابد. علت آن رطوبت اولیه بالای خاک و زهدکشی آب ثقیلی باقی مانده در خاک است؛ زیرا در شروع دوره اندازه‌گیری، رطوبت خاک بالا بوده و زهدکشی صورت گرفته است. همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود حجم آب زهدکشی تجمعی شبیه‌سازی شده در کل دوره بیش‌تر از حجم آب اندازه‌گیری شده، برآورد شده است. حجم آب زهدکشی اندازه‌گیری شده تجمعی در کل دوره ۷۵/۱۶۲ لیتر و حجم آب زهدکشی شبیه‌سازی شده تجمعی در کل دوره ۷۹/۱۳۳ لیتر است. خطای نسبی بین این دو مقدار برابر ۵/۲۸ درصد است که خطای قابل قبولی است و می‌توان برای تأیید دقت بالای مدل HYDRUS در نظر گرفت. ضریب جرم باقی‌مانده و نسبت خطای متوسط هندسی بین مقادیر زهدکشی اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده به ترتیب برابر ۰/۰۵۲۸- و ۰/۷۹۲+ محاسبه شد. بنابراین، مدل با توجه به مقادیر زهدکشی تجمعی، مقادیر زهدکشی را بیش‌تر از مقادیر اندازه‌گیری شده برآورد کرده است. حساسیت مدل به مقدار رطوبت اولیه خاک، رطوبت اشباع خاک، رطوبت باقی‌مانده در خاک و هدایت هیدرولیکی اشباع خاک در برآورد حجم آب زهدکشی خارج شده از لایسی‌متر در

همان‌طور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود ضریب تغییرات اکثر پارامترها به‌جز هدایت هیدرولیکی اشباع پایین است. این نشان می‌دهد که اندازه‌گیری پارامترها با دقت بالایی صورت گرفته است. بالا بودن ضریب تغییرات هدایت هیدرولیکی اشباع می‌تواند به علت خشک بودن خاک در زمان اندازه‌گیری این پارامتر، ترک خوردن خاک و خشک شدن گیاه چمن در هنگام انجام آزمایش باشد. پارامترهای ورودی معادله ون گنوختن-معلم (مشخصات هیدرولیکی خاک) در جدول ۲ آورده شده است. با توجه به جدول ۲، مقادیر  $\theta_r$ ،  $\theta_s$  و  $K_s$  در آزمایشگاه اندازه‌گیری شده و مقادیر  $\alpha$  و  $n$  از نرم‌افزار RETC و با توجه به منحنی مشخصه آب خاک (شامل رطوبت باقی‌مانده در مکش‌های صفر، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۵، ۵۰، ۷۵ سانتی‌متر و ۳، ۵ و ۱۵ بار) به دست آمده‌اند. پارامتر I هم در بسیاری از خاک‌ها ۰/۵ در نظر گرفته می‌شود (Mualem, 1976).

بر اساس اندازه‌گیری‌های انجام شده از لایسی‌مترها در کل دوره ۸۱ روز، میانگین مقادیر زهدکشی اندازه‌گیری شده از سه لایسی‌متر در روزهایی که زهدکشی وجود داشت محاسبه شد و با مقادیر زهدکشی شبیه‌سازی شده مقایسه شد. مقادیر زهدکشی اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده روزانه در شکل ۲ و مقادیر زهدکشی اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده تجمعی در شکل ۳ آورده شده است.

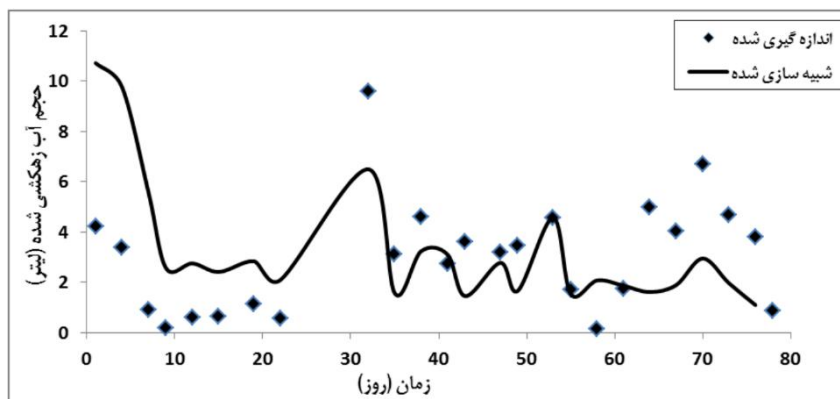
با توجه به شکل ۲، در کل دوره تغییرات حجم آب زهدکشی اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده روزانه تقریباً روند مشابهی دارند، یعنی با کاهش یا افزایش حجم آب زهدکشی اندازه‌گیری شده به همان صورت حجم آب زهدکشی شبیه‌سازی شده کاهش یا افزایش می‌یابد. تفاوت مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده در ابتدای دوره تا روز ۲۲ ام نرم‌افزار HYDRUS مقادیر



جدول ۲- پارامترهای ورودی معادله ون گنوکتن-معلم

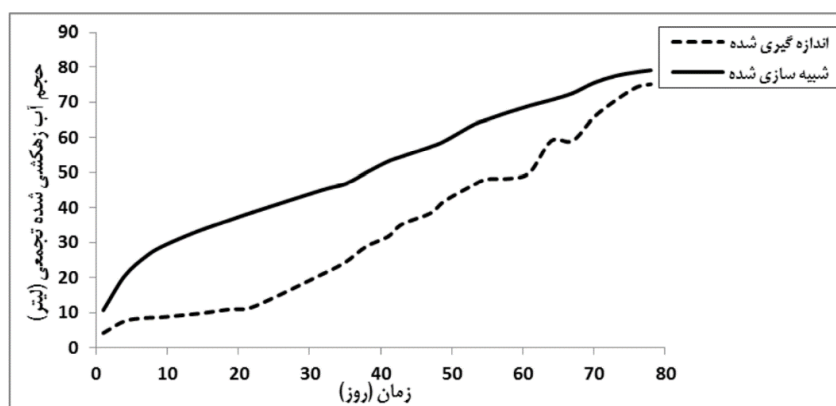
Table 2- Input parameters of the Van Gnoekhten- Mualem equation

$\theta_r$	$\theta_s$	$K_s$ (cm/day)	$\alpha$	N	l
0.1226	0.4945	281.6	0.01556	1.76466	0.5



شکل ۲- مقایسه مقادیر زهکشی اندازه گیری شده و شبیه سازی شده در کل دوره

Figure 2- Comparison of measured and simulated drainage values over the whole period



شکل ۳- مقایسه مقادیر زهکشی تجمعی اندازه گیری شده و شبیه سازی شده در کل دوره

Figure 3- Comparison of measured and simulated cumulative drainage values over the whole period

رطوبت اولیه (۰/۲، ۰/۲۵، ۰/۳، ۰/۳۵ و ۰/۳۲۹۵) در پنج شبیه سازی قرار داده شد و پارامترهای دیگر ثابت در نظر گرفته شد. رطوبت اولیه ۰/۳۲۹۵ همان رطوبت اولیه اندازه گیری شده در ابتدای دوره مورد نظر است. همان طور که در شکل ۳ مشاهده می شود تغییر در رطوبت اولیه باعث تغییر در حجم آب زهکشی شده در روز اول می شود؛ بدین صورت که با افزایش رطوبت اولیه خاک، حجم آب زهکشی شده نیز افزایش می یابد. وقتی مقدار رطوبت اولیه خاک ۰/۳۲۹۵ یا ۰/۳۵ باشد روند تغییرات حجم آب زهکشی برآورد شده در ابتدای دوره همانند تغییرات حجم آب زهکشی اندازه گیری شده است؛ بدین صورت که در روز اول زیاد بوده و سپس کاهش می یابد، ولی برای رطوبت های اولیه ۰/۲، ۰/۲۵ و ۰/۳ روند تغییرات حجم آب زهکشی برآورد شده در روزهای اول با تغییرات حجم آب

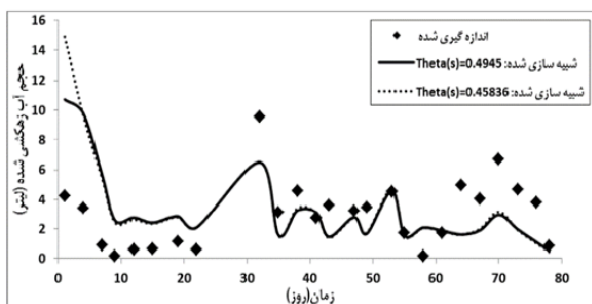
مقایسه با حجم آب زهکشی اندازه گیری شده در شکل ۴ آورده شده است. در این شکل نمودار نقاط پراکنده مربوط به مقادیر زهکشی اندازه گیری شده در روزهایی بوده که لایسی متر آب زهکشی داشته و نمودارهایی که به صورت منحنی است مربوط به مقادیر زهکشی برآورد شده است. به این ترتیب که مقادیر پارامترهای ورودی مدل شامل درصد رطوبت اولیه، درصد رطوبت اشباع، درصد رطوبت باقی مانده در خاک و هدایت هیدرولیکی اشباع در شبیه سازی های مختلف تغییر داده و نتایج بررسی شد. به این صورت که در تمامی شبیه سازی ها تمام داده های ورودی، داده های اندازه گیری شده قرار داده شدند و در هر شبیه سازی فقط داده ای که حساسیت مدل به آن بررسی می شد، تغییر داده شد.

برای بررسی حساسیت مدل به رطوبت اولیه، مقادیر مختلف

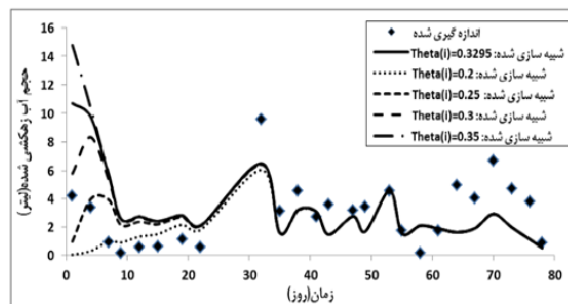


شده در روز اول زیاد بوده و در روزهای بعدی کاهش می‌یابد.

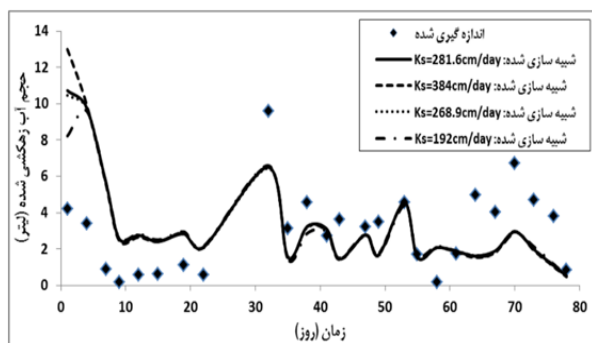
زهکشی اندازه‌گیری شده متفاوت است؛ چرا که ابتدا کم بوده و سپس افزایش می‌یابد. در حالی که حجم آب زهکشی اندازه‌گیری



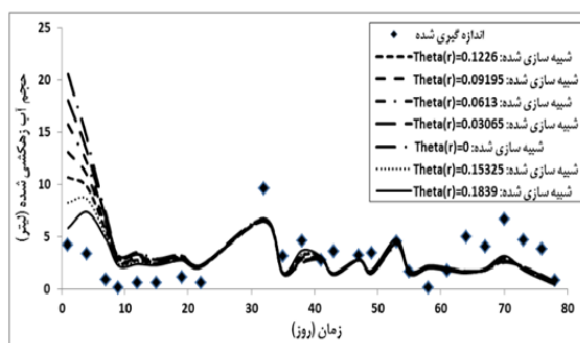
ب) مقدار رطوبت اشباع خاک ( $\Theta(i)$ )



الف) مقدار رطوبت اولیه خاک ( $\Theta(i)$ )



د) مقدار هدایت هیدرولیکی اشباع خاک ( $K_s$ )



ج) مقدار رطوبت باقیمانده ( $\Theta(r)$ )

شکل ۴- حساسیت مدل به پارامترهای مختلف در برآورد حجم آب زهکشی خارج شده از لایسی متر در مقایسه با حجم آب زهکشی اندازه‌گیری شده

Figure 4- Sensitivity of the model to different parameters in estimating the volume of drainage water discharged from the lysimeter compared to the measured volume of drainage water

شده در روز اول می‌شود؛ بدین‌صورت که با افزایش رطوبت اشباع خاک، حجم آب زهکشی شده در روز اول کاهش می‌یابد. برای بررسی حساسیت مدل به رطوبت باقی‌مانده در خاک، هفت مقدار مختلف رطوبت باقی‌مانده (۰، ۰/۰۳۰۶۵، ۰/۰۶۱۳، ۰/۰۹۱۹۵، ۰/۱۲۲۶، ۰/۱۵۳۲۵ و ۰/۱۸۳۹) در هفت شبیه‌سازی قرار داده و پارامترهای دیگر ثابت در نظر گرفته شد. این مقادیر ضرایبی (مثلاً ۰، ۰/۲۵، ۰/۵ و ...) از رطوبت باقی‌مانده اندازه‌گیری است. رطوبت باقی‌مانده ۰/۱۲۲۶ رطوبت باقیمانده اندازه‌گیری شده است. همان‌طور که در شکل ۴ (ج) مشاهده می‌شود تغییر در رطوبت باقی‌مانده باعث تغییر در حجم آب زهکشی شده در روز اول می‌شود، بدین‌صورت که با افزایش رطوبت باقی‌مانده خاک، حجم آب زهکشی شده کاهش می‌یابد. وقتی مقدار رطوبت باقی‌مانده ۰/۱۲۲۶ یا کم‌تر از آن باشد روند تغییرات حجم آب زهکشی برآورد شده در ابتدای دوره همانند تغییرات حجم آب زهکشی اندازه‌گیری شده است. بدین‌نحو که در روز اول زیاد بوده و سپس کاهش می‌یابد ولی برای

با توجه به شکل ۴ (الف)، نمودار مربوط به رطوبت اولیه ۰/۲ تقریباً تا روز ۳۳ ام با سایر نمودارهای مربوط به حجم آب زهکشی شبیه‌سازی شده اختلاف دارد. چون پس از هشتمین آبیاری، حجم آب زهکشی اندازه‌گیری شده به صفر رسیده بود، حجم آب آبیاری نسبت به آبیاری‌های قبلی بیش‌تر در نظر گرفته شد. حال اگر رطوبت اولیه خاک ۰/۲ باشد، به این معناست که اکثر تخلخل خاک عاری از آب است؛ بنابراین، آب آبیاری داده شده به خاک بیش‌تر مصرف پر کردن منافذ خالی خاک شده و انتظار می‌رود که حجم آب زهکشی شده نسبت به رطوبت‌های اولیه بالاتر کم‌تر محاسبه شود. برای بررسی حساسیت مدل به رطوبت اشباع، ۲ مقدار مختلف رطوبت اشباع (۰/۴۹۴۵ و ۰/۴۵۸۳۶) در دو شبیه‌سازی قرار داده شد و پارامترهای دیگر ثابت در نظر گرفته شد. مقدار ۰/۴۹۴۵ رطوبت اشباع اندازه‌گیری شده و مقدار ۰/۴۵۸۳۶ رطوبت اشباع به‌دست آمده از نرم‌افزار RETC است. همان‌طور که در شکل ۴ (ب) مشاهده می‌شود تغییر در رطوبت اشباع فقط باعث تغییر در حجم آب زهکشی

تمایل به برآورد بالاتر از مقادیر اندازه‌گیری شده دارد. با توجه به مقادیر GMER وقتی رطوبت اولیه  $0/25$ ،  $0/3$ ،  $0/3295$  و  $0/35$  باشد، مقادیر برآورد شده به‌طور کلی کم برآورد شده و وقتی رطوبت اولیه  $0/2$  باشد، مقادیر برآورد شده به‌طور کلی بیش برآورد شده است.

با توجه به جدول ۳، با افزایش رطوبت باقی‌مانده خاک تا  $0/15325$ ، خطای نسبی بین داده‌های تجمعی زهکشی اندازه‌گیری شده و برآورد شده کاهش می‌یابد. اما وقتی رطوبت بیش‌تر از  $0/15325$  می‌شود خطای نسبی افزایش می‌یابد. وقتی رطوبت باقی‌مانده خاک صفر و  $0/15325$  باشد، به‌ترتیب خطای نسبی حداکثر و حداقل مقدار خود را دارد. با توجه به مقادیر CRM در رطوبت‌های صفر،  $0/03065$ ،  $0/0613$ ،  $0/09195$  و  $0/1226$  مدل تمایل به برآورد بالاتر از مقادیر اندازه‌گیری شده دارد و در رطوبت‌های  $0/15325$  و  $0/1839$  مدل تمایل به برآورد پایین‌تر از مقادیر اندازه‌گیری شده دارد. با توجه به مقادیر GMER در تمامی رطوبت‌های باقی‌مانده خاک، مقادیر برآورد شده، به‌طور کلی کم برآورد شد که نتایج این قسمت از پژوهش با یافته‌های (Ebrahimi and Raof (2016) مطابقت نشان می‌دهد.

با توجه به جدول ۳، با افزایش هدایت هیدرولیکی خاک خطای نسبی بین داده‌های تجمعی زهکشی اندازه‌گیری شده و برآورد شده افزایش می‌یابد. وقتی هدایت هیدرولیکی خاک  $192$  و  $384$  سانتی‌متر در روز باشد، به‌ترتیب خطای نسبی حداقل و حداکثر مقدار خود را دارد. با توجه به مقادیر CRM در همه مقادیر هدایت هیدرولیکی اشباع مدل تمایل به برآورد بالاتر از مقادیر اندازه‌گیری شده دارد. با توجه به مقادیر GMER در همه مقادیر هدایت هیدرولیکی اشباع خاک، مقادیر برآورد شده به‌طور کلی کم برآورد شده است. علت تفاوت در پیش برآوردی و یا کم برآوردی مدل با استفاده از شاخص‌های CRM و GMER این است که شاخص CRM فقط داده زهکشی تجمعی انتهایی دوره را مبنای مقایسه قرار می‌دهد و شاخص GMER تک تک داده‌های زهکشی را در نظر می‌گیرد.

در انتها، یک شبیه‌سازی بدین‌صورت انجام شد که پارامترهای ورودی مربوط به حداقل خطای نسبی بین داده‌های تجمعی زهکشی اندازه‌گیری شده و برآورد شده برای هر پارامتر وارد نرم‌افزار شد و خطای نسبی  $9/7$  درصد به‌دست آمد. حال با توجه به محدوده تغییرات پارامترهای ورودی و مقادیر خطای نسبی بین داده‌های تجمعی زهکشی اندازه‌گیری شده و برآورد شده می‌توان حساسیت مدل به پارامترهای ورودی را بررسی کرد. در جدول ۳، درصد تغییرات خطا به ازای  $10$  درصد تغییر در پارامترهای ورودی ( $\theta_i$ : رطوبت اولیه،  $\theta_s$ : رطوبت اشباع،  $\theta_r$ :

رطوبت‌های باقی‌مانده بیش‌تر از  $0/1226$ ، روند تغییرات حجم آب زهکشی برآورد شده در ابتدای دوره با تغییرات حجم آب زهکشی اندازه‌گیری شده متفاوت است. چرا که ابتدا کم بوده و سپس افزایش می‌یابد، در حالی که حجم آب زهکشی اندازه‌گیری شده در دور اول زیاد بوده و در روزهای بعدی کاهش می‌یابد. در این زمینه، (Abtahi and Besharati (2011 نیز به نتیجه مشابهی در مورد گیاه چغندر قند دست یافته بودند.

برای بررسی حساسیت مدل به هدایت هیدرولیکی اشباع، چهار مقدار مختلف هدایت هیدرولیکی اشباع ( $192$ ،  $268$ ،  $281/6$  و  $384$  سانتی‌متر در روز) در شبیه‌سازی قرار داده شد و پارامترهای دیگر ثابت در نظر گرفته شدند. مقادیر هدایت هیدرولیکی اشباع چهار شبیه‌سازی مربوط به مقادیر اندازه‌گیری شده هدایت هیدرولیکی اشباع است که در سه تکرار اندازه‌گیری شده، به‌جز  $281/6$  که میانگین این سه تکرار است. همان‌طور که در شکل (۴) مشاهده می‌شود تغییر در هدایت هیدرولیکی اشباع باعث تغییر در حجم آب زهکشی شده در روز اول می‌شود؛ بدین‌صورت که با افزایش هدایت هیدرولیکی اشباع خاک حجم آب زهکشی شده نیز افزایش می‌یابد. وقتی مقدار هدایت هیدرولیکی اشباع خاک  $268$ ،  $281/6$  و  $384$  سانتی‌متر در روز باشد روند تغییرات حجم آب زهکشی برآورد شده در ابتدای دوره همانند تغییرات حجم آب زهکشی اندازه‌گیری شده است؛ بدین‌نحو که در روز اول زیاد بوده و سپس کاهش می‌یابد، ولی برای هدایت هیدرولیکی اشباع  $192$  سانتی‌متر در روز روند تغییرات حجم آب زهکشی برآورد شده در روزهای اول با تغییرات حجم آب زهکشی اندازه‌گیری شده متفاوت است؛ چرا که ابتدا کم بوده و سپس افزایش می‌یابد، در حالی که حجم آب زهکشی اندازه‌گیری شده در روز اول زیاد بوده و در روزهای بعدی کاهش می‌یابد.

با توجه به نتایج بالا، به‌صورت کلی می‌توان گفت تغییر در پارامترهای ورودی فقط باعث تغییر در حجم آب زهکشی ابتدای دوره می‌شود. حال برای بررسی این که این پارامترها در کل دوره از لحاظ عددی چه تأثیری در برآورد حجم آب زهکشی شده دارد از شاخص‌های آماری استفاده می‌شود.

با توجه به جدول ۳، وقتی رطوبت اولیه خاک به‌ترتیب  $0/2$  و  $0/3$  باشد، خطای نسبی بین داده‌های تجمعی زهکشی اندازه‌گیری شده و برآورد شده حداکثر و حداقل مقدار خود را دارد. وقتی رطوبت اولیه کم‌تر یا بیش‌تر از  $0/3$  شود خطای نسبی افزایش می‌یابد، پس می‌توان گفت رطوبت اولیه بهینه  $0/3$  است. با توجه به مقادیر CRM وقتی رطوبت اولیه  $0/2$ ،  $0/25$  و  $0/3$  باشد، مدل تمایل به برآورد پایین‌تر از مقادیر اندازه‌گیری شده دارد و در رطوبت‌های  $0/2395$  و  $0/35$  مدل

رطوبت باقی‌مانده در خاک و  $K_s$ : هدایت هیدرولیکی اشباع) آورده شده است. هدایت هیدرولیکی اشباع) کرد. حساسیت مدل به ترتیب برای پارامترهای زیر کاهش می‌یابد:

۱- رطوبت اشباع، ۲- رطوبت اولیه، ۳- هدایت هیدرولیکی اشباع، ۴- رطوبت باقی‌مانده

چون رطوبت اشباع تأثیرگذارترین پارامتر در تخمین خروجی مدل است، پس این پارامتر را با دقت بیش‌تری باید اندازه‌گیری

جدول ۳- مقایسه حساسیت مدل به پارامترهای مختلف در برآورد حجم آب زهکشی شده نسبت به حجم آب زهکشی اندازه‌گیری شده  
Table 3- Comparing the sensitivity of the model to the amount of different parameters in estimating the volume of drained water relative to the measured volume of drained water

آماره	رطوبت اولیه			رطوبت باقی‌مانده					هدایت هیدرولیکی اشباع (سانتی‌متر در روز)				
	0.2	0.25	0.3	0.035	0.0613	0.0913	0.1226	0.1532	0.1839	192	268	281.1	384
RE (%)	35.1	19.3	3.9	32.1	17.3	11	5.3	0.79	6.1	1.8	4.8	5.3	7.6
CRM	0.35	0.19	0.03	-0.23	-0.17	-0.11	-0.05	-0.01	0.06	-0.02	-0.05	-0.05	-0.08
GMR	1.36	0.94	0.82	0.73	0.75	0.03	0.79	0.82	0.85	0.8	0.79	0.79	0.8

شکل ۵ تبخیر-تعرق در این مرحله حداکثر مقدار را به خود اختصاص داده؛ چرا که بیش‌ترین رشد گیاه که رسیدن محصول است، در این مرحله اتفاق می‌افتد. برای چمن ارتفاع چمن در این مرحله اندازه‌گیری شد که حداکثر ارتفاع آن به ۲۰ سانتی‌متر رسیده بود. مرحله پایانی رشد از ۵ شهریور تا ۱۴ شهریور ۱۳۹۴ است. تبخیر-تعرق در این مرحله روند کاهشی دارد و بعد از کامل شدن دوره رشد تقریباً ثابت می‌شود، چرا که ریشه چمن کامل رشد کرده و پس از کوتاه کردن فقط اندام‌های هوایی چمن رشد می‌کنند. پس از مرحله پایانی وارد مرحله چینی‌شدگی که تا شروع بارش برف و شروع یخبندان اندازه‌گیری‌ها ادامه داشت و شبیه‌سازی تا ۱۹ مهر ۱۳۹۴ انجام شده است.

با توجه به شکل ۵، چون در روز اول آبیاری صورت گرفته و سطح خاک خیس است، تبخیر از سطح خاک زیاد بوده، اما چون ریشه گیاه هنوز گسترش پیدا نکرده، جذب به مراتب کم‌تر است. به طوری که در اولین روز، جذب آب توسط ریشه صفر است. در روز دوم گسترش نسبی ریشه گیاه از یک طرف و مهم‌تر از آن خشک شدن خاک سطحی از طرف دیگر باعث شده که مقادیر تبخیر-تعرق و جذب آب توسط ریشه تقریباً با هم برابر شوند.

همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود تبخیر-تعرق جمعی در کل دوره از جذب جمعی واقعی آب توسط ریشه بیش‌تر است؛ چرا که تبخیر-تعرق از دو جزء تبخیر و تعرق تشکیل شده و جذب واقعی آب توسط ریشه گیاه صرف رشد

چون تغییر در رطوبت باقی‌مانده، کم‌ترین تأثیر را بر داده‌های خروجی مدل دارد، در نتیجه می‌توان از خطای اندازه‌گیری این پارامتر چشم‌پوشی کرد. مقادیر واقعی جذب آب توسط ریشه و تبخیر-تعرق در طول کل دوره و مقادیر جمعی این دو پارامتر در شکل ۵ آورده شده است.  $ARWU^1$ ، جذب واقعی آب توسط ریشه و  $ET^2$ ، تبخیر-تعرق است. مقادیر تبخیر-تعرق با استفاده از رابطه ۱، به دست آمد و مقادیر جذب واقعی آب توسط ریشه با استفاده از نرم‌افزار HYDRUS برآورد شد.

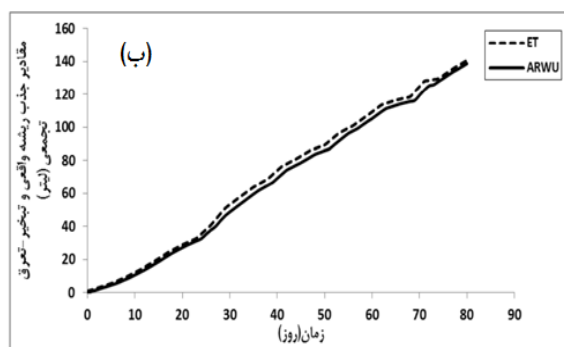
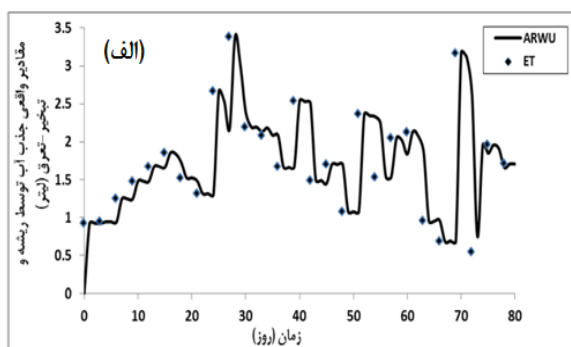
کل دوره رشد گیاه چمن ۴۵ روز و مراحل رشد چهار مرحله آن به ترتیب ۵، ۲۰، ۱۰ و ۱۰ روز است (Allen et al., 2006). در این پژوهش مرحله اولیه رشد از ۱ مرداد تا ۵ مرداد است. در این مرحله رشد چمن محدود بوده و فقط ۱۰ درصد به پوشش گیاهی اختصاص می‌یابد و تبخیر-تعرق، به طور عمده، به صورت تبخیر از خاک سطحی است که طبق شکل ۵ تبخیر-تعرق مقدار ثابتی دارد. مرحله توسعه گیاه از ۶ مرداد تا ۲۵ مرداد بوده و همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود تبخیر-تعرق در این مرحله افزایش داشته و به تبع آن جذب ریشه نیز افزایش می‌یابد و رشد چمن تا رسیدن به پوشش مؤثر کامل ادامه می‌یابد. مرحله میانی رشد از ۲۶ مرداد تا ۴ شهریور ادامه دارد که با توجه به

<sup>1</sup> Actual Root Water Uptake

<sup>2</sup> Evapotranspiration

گیاه است. اگرچه در مراحل بعدی رشد سطح لایسی متر به طور تقریباً کامل از سطح سبز گیاه پوشیده شده است، اما از آنجا که رشد گیاه چمن به آب کمتری جهت سوخت و ساز نیاز دارد، بر حجم اولیه تبخیر غلبه نکرده است. بنابراین، مقدار ET در کل دوره بر مقدار ARWU غلبه نموده است. در این زمینه، Er- (Raki et al. (2021 نیز نتایج مشابهی را برای شرایط مزرعه-ای و گیاه گندم زمستانه استخراج نمودند.

گیاه و تعرق می شود. تعرق که در هر دو مشترک است و چون تبخیر همیشه از رشد گیاه بیش تر بوده و گیاه اکثر آب را به صورت تعرق پس می دهد، پس تبخیر-تعرق باید از جذب واقعی آب توسط ریشه گیاه بیش تر باشد. تبخیر-تعرق و جذب واقعی تجمعی آب توسط ریشه گیاه به اندازه ۱/۴ درصد در طول کل دوره با هم اختلاف دارند. چون در اوایل کشت، سطح سبز گیاه به مراتب کم تر از سطح خاک است، پس تبخیر از سطح خاک به مراتب بیش تر از مقدار آب مصرفی برای سوخت و ساز



شکل ۵- مقادیر واقعی جذب آب توسط ریشه (الف) و تبخیر-تعرق تجمعی (ب) در کل دوره

Figure 5- Absorption of water by roots (a) and cumulative evapotranspiration (b) throughout the period

شده در کل دوره که فقط ۵/۲۸ درصد اختلاف دارند، می توان برای تأیید دقت بالای مدل استفاده کرد. از کل حجم آب وارد شده به لایسی متر ۳۷/۹ درصد آن از محیط ریشه گیاه خارج شده است. به طور کلی پس از بررسی تحلیل حساسیت می توان گفت تغییر در پارامترهای ورودی باعث تغییر در برآورد حجم آب زهکش شده در ابتدای دوره می شود. وقتی رطوبت اولیه و رطوبت باقی مانده خاک به ترتیب ۰/۳ و ۰/۱۵۳۲۵ خطای نسبی بین داده های زهکشی اندازه گیری شده و برآورد شده کم ترین مقدار را دارد. با افزایش رطوبت اشباع و هدایت هیدرولیکی اشباع خاک خطای نسبی بین داده های زهکشی اندازه گیری شده و برآورد شده به ترتیب افزایش و کاهش می یابد.

در پژوهش انجام یافته مقادیر جذب ریشه روزانه نیز با استفاده از مدل برآورد شد. مقادیر تبخیر-تعرق روزانه با استفاده از معادله بیلان آب محاسبه شد. با توجه به مقادیر جذب واقعی و پتانسیل آب توسط ریشه در کل دوره که اختلاف بسیار ناچیزی دارند، تنش به گیاه چمن وارد نشده و آب کافی در اختیار گیاه قرار داده شده است. با توجه به مقادیر جذب واقعی ریشه و تبخیر-تعرق در مرحله اول دوره رشد، رشد ریشه چمن محدود بوده و فقط ۱۰ درصد به پوشش گیاهی اختصاص می یابد و تبخیر-تعرق به طور عمده به صورت تبخیر از خاک سطحی است. با وارد شدن به مرحله دوم دوره رشد، رفته رفته جذب ریشه

#### ۴- نتیجه گیری

در پژوهش انجام شده، حجم آب زهکشی لایسی متر در روزهایی که از لایسی متر آب زهکشی می شد، اندازه گیری شد. حجم آب زهکشی برآورد شده با استفاده از مدل HYDRUS نیز استخراج شد. حجم آب زهکشی اندازه گیری شده و برآورد شده با استفاده از مدل HYDRUS نیز برآورد شد. تغییرات حجم آب زهکشی اندازه گیری شده و شبیه سازی شده در کل دوره تقریباً روند مشابهی دارند؛ یعنی با کاهش یا افزایش حجم آب زهکشی اندازه گیری شده به همان صورت حجم آب زهکشی شبیه سازی شده کاهش یا افزایش می یابد. در یک ماهه ابتدای دوره که فقط آبیاری جزء ورودی های مدل است، مدل مقادیر آب زهکشی شده را بیش تر از مقادیر زهکشی اندازه گیری شده برآورد می کند. پس از آن که بارندگی نیز به ورودی افزوده می شود، مدل مقادیر آب زهکشی شده را کم تر از مقادیر اندازه گیری شده برآورد می کند. با توجه به شاخص CRM در کل دوره، مدل تمایل به برآورد بالاتر از مقادیر اندازه گیری شده دارد. با توجه به RE محاسبه شده می توان علت خطای به وجود آمده را به داده های بارندگی وارد شده به مدل نسبت داد. زیرا که داده های بارندگی از اداره هواشناسی شهر اردبیل دریافت شد که ساعت دقیق بارندگی و مقدار آن با بارندگی محل مورد ممکن است دارای اختلاف باشند. از مقایسه حجم آب زهکشی تجمعی اندازه گیری شده و برآورد

کاهش می‌یابد چون گیاه رسیده و ریشه تقریباً کامل رشد کرده است. پس از مرحله آخر، مرحله چینش چمن است که در این مرحله فقط اندام‌های هوایی چمن رشد می‌کنند.

برزگر، ع. (۱۳۸۹). فیزیک خاک پیشرفته. ویرایش دوم، انتشارات دانشگاه شهید چمران اهواز، ۴۱۵ صفحه.

بشارت، س.، بهمنش، ج.، رضایی، ح.، و حسین‌نیا، د. (۱۳۹۳). ارزیابی نرم‌افزار Hydrus 2D در نفوذ آب به خاک با استفاده از اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی در لایسی متر وزنی. *پژوهش‌های حفاظت آب و خاک*، ۲۱(۵)، ۲۹۷-۳۰۶.

رسول‌زاده، ع.، و رئوف، م. (۱۳۹۲). مبانی و روش‌های آبیاری. چاپ دوم، انتشارات عمیدی، ۲۸۵ صفحه.

رئوف، م. (۱۳۹۸). تعیین ضریب گیاهی چغندرقد با استفاده از لایسی متر در دشت اردبیل و مقایسه آن با داده‌های جهانی فائو. *پژوهش آب در کشاورزی*، ۳۳(۲)، ۱۷۵-۱۸۸.

رئوف، م. (۱۴۰۰). تاثیر پارامترهای ورودی نرم‌افزار Hydrus 3D روی شبیه‌سازی هم‌زمان حرکت آب و جذب ریشه چغندرقد. *مهندسی آبیاری و آب ایران*، ۱۰(۴۶)، ۳۷۷-۳۹۰.

شمسایی، ا. (۱۳۷۸). هیدرولیک جریان در محیط‌های متخلخل (جلد ۱). چاپ دوم، انتشارات مرکز نشر دانشگاه صنعتی امیر کبیر (پلی‌تکنیک تهران)، ۳۵۱ صفحه.

به‌علت برقراری پوشش کامل افزایش می‌یابد. در مرحله سوم رشد، حداکثر جذب ریشه وجود دارد چرا که رسیدن گیاه در این مرحله اتفاق می‌افتد. پس از مرحله سوم جذب ریشه رفته رفته

## منابع

ابراهیمی، ف.، و رئوف، م. (۱۳۹۴). تاثیر سطوح مختلف ورودی نرم‌افزار Rosetta در تخمین ویژگی‌های هیدرولیکی خاک با استفاده از نرم‌افزار Hydrus-2D و اثر تغییر کاربری اراضی بر آن‌ها. *آبیاری و زهکشی ایران*، ۲(۹)، ۳۰۳-۳۱۳.

ابراهیمی، ف.، و رئوف، م. (۱۳۹۵). اثر تغییر کاربری اراضی بر هدایت هیدرولیکی غیراشباع خاک در شرایط غیرماندگار و ارزیابی برخی اطلاعات جهانی. *پژوهش‌های خاک*، ۳۰(۳)، ۳۱۹-۳۲۸.

ابطحی، س.، و بشارت، س. (۱۳۹۰). استفاده از نرم‌افزار Hydrus در شبیه‌سازی حرکت و جذب آب در خاک برای گیاه چغندرقد. نخستین کنفرانس ملی هواشناسی و مدیریت آب کشاورزی، دانشگاه تهران.

اکبری باصری، ز. (۱۳۹۵). مدل‌سازی هم‌زمان جریان آب خاک و جذب ریشه در لایسی متر. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه محقق اردبیلی.

اکبری باصری، ز.، رئوف، م.، رسول‌زاده، ع.، و عزیزی مبصر، ج. (۱۳۹۶). واسنجی دو مرحله‌ای بلوک گچی. دومین همایش ملی صیانت از منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه محقق اردبیلی.

## References

- Abtahi, S., & Besharat, S. (2011). The use of Hydrus software in simulating the movement and absorption of water in the soil for the sugar beet plant. First National Conference on Meteorology and Agricultural Water Management, Tehean, Iran (in Persian).
- Akbari Baseri, Z. (2017). Simultaneous Modeling of Soil Water Flow and Root Water Uptake in Lysimeter. M.Sc. Thesis, University of Mohaghegh Ardabil, Ardabil, Iran (in Persian).
- Akbari Baseri, Z., Raof, M., Rasoulzadeh, A., & Aziz Mobaser, J. (2018). Two-stage calibration of gypsum block. The second National Conference on Protection of Natural Resources and Environment, Ardabil, Iran (in Persian).
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., & Smith, M. (2006). Crop Evapotranspiration Guidelines For Computing Crop Water Requirements. Final report of FAO Irrigation and Drainage, Paper NO. 56.
- Barzegar, A. (2010). *Advanced soil physics*. 2nd edition: Shahid Chamran University Press, 415 pages (in Persian).
- Besharat, S., Behmanesh, J., Rezayi, H., & Dalir, R. (2014). Evaluation of Hydrus-2D for soil water infiltration by using laboratory measurements in the weighing lysimeter. *Journal of Water and Soil Conservation*, 21(5), 297-306 (in Persian).
- Brooks, R.H., & Corey, A.T. (1969). Properties of porous media affecting fluid flow. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 72(2), 61-88.
- Cote, C.M., Bristow, K.L., Charleworth, P.B., & Cook, F.J. (2003). Analysis of soil wetting and solute transport in sub-surface trickle irrigation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 22(3-4), 143-156.
- Ebrahimi, F., & Raof, M. (2015). Effect of different Rosetta predictive model on soil hydraulic properties estimation using HYDRUS-2D and effect of land use changing on them. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2 (9), 303-313 (in Persian).
- Ebrahimi, F., & Raof, M. (2016). Evaluation of global soil databases in extracting soil hydraulic conductivity curve and effect of land use change in unsteady state flow. *Soil Research*, 30(3), 319-328 (in Persian).
- Er-Raki, S., Ezzahr, J., Merlin, O., Amazirh, A., Ait Hssaine, B., Kharou, M.H., Hkabba, S., & Chehbouni, A. (2021). Performance of the HYDRUS-1D model for water balance

- components assessment of irrigated winter wheat under different water managements in semi-arid region of Morocco. *Agricultural Water Management*, 244, 151-164.
- Herkelrath, W.N., Miller, E.E., & Gardner, W.R. (1977). Water uptake by plants: I. Divided Root Experiments. *Soil Science Society of America Journal*, 41, 1033-1038.
- Kang, S., Zhang, F., & Zhang, J. (2001). A simulation model of water dynamics in winter wheat field and its application in a semiarid region. *Agricultural Water Management*, 49, 115-129.
- Kosugi, K. (1996). Lognormal distribution model for unsaturated soil hydraulic properties. *Water Resources Research*, 32(9), 2697-2703.
- Li, K.Y., De Jong, R., & Biosvert, J. B. (2001). An exponential root water- uptake model with water stress compensation. *Journal of Hydrology*, 252, 189-204.
- Mansell, R.S., Liwang, M., Ahuja, L.R., & Bloom, S.A. (2002). Adaptive grid refinement in numerical models for water flow and chemical transport in soil: A review. *Vadose Zone Journal*, 1, 222-238.
- Meshkat, M., Warner, R.C., & Workman, S.R. (1999). Modeling of evaporation reduction in drip irrigation system. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 125(6), 315-323.
- Molz, F.J., & Remson, I. (1970). Extraction term models of soil moisture use by transpiring plants. *Water Resources Research*, 6, 1346-1356.
- Mualem, Y. (1976). A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resources Research*, 12(3), 513-522.
- Raouf, M. (2019). Determination of sugar beet crop coefficient using lysimeter in Ardabil Plain and its comparison with FAO Global Data. *Water Research in Agriculture*, 33(2), 175-188 (in Persian).
- Raouf, M. (2022). Effect of Hydrus 3D input parameters on simultaneous simulation of water movement and sugar beet root water uptake. *Irrigation and Water Engineering*, 10(46), 377-390 (in Persian).
- Raouf, M., Sadraddini, A.A., Nazemi, A.H., & Marofi, S. (2009). Estimating saturated and unsaturated hydraulic conductivity and sorptivity coefficient in transient state in sloping lands. *Journal of Food, Agriculture & Environment*, 7 (3&4), 861-864.
- Rasoulzadeh, A., & Raouf, M. (2014). *Principals and Methods of Irrigation*. 2nd edition: Amidi Publication, 285 pages (in Persian).
- Salazar, O., Wesstrom, I., & Joel, A. (2008). Evaluation of Drainmod using saturated hydraulic conductivity estimated by a pedotransfer function model. *Agricultural Water Management*, 95, 1135-1143.
- Schmitz, G.H., Shutze, N., & Petersohn, U. (2002). New strategy for optimizing water application under trickle irrigation. *Journal of Irrigation and Drainage*, 128(5), 287-297.
- Shamsayi, A. (2000). *Flow hydraulics in porous media (volume one)*. 2nd edition: Publications of Amir Kabir University of Technology Publishing Center (Tehran Polytechnic), 351 pages (in Persian).
- Simunek, J., & Hopmans, J. W. (2009). Modeling compensated root water and nutrient uptake. *Ecological Modeling*, 220(4), 505-521.
- Siyal, A.A., & Skaggs, T.H. (2009). Measured and simulated soil wetting patterns under porous clay pipe sub-surface irrigation. *Agricultural Water Management*, 96, 893-904.
- Van Genuchten, M.Th. (1980). A close-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society American Journal Journals*, 44, 892-898.
- Vogel, T., & Cislerova, C.M. (1988). On the reliability of unsaturated hydraulic conductivity calculated from the moisture retention curve. *Transport in Porous Media*, 3, 1-15.
- Vrugt, J.A., Hopmans, J.W., & Simunek, J. (2001a). Calibration of a two-dimensional root water uptake model. *Soil Science Society American Journal Journals*, 65, 1027-1037.
- Vrugt, J.A., Van Wijk, M.T., Hopmans, J.W., & Simunek, J. (2001b). One, two, and three dimensional root water uptake functions for transient modeling. *Water Resources Research*, 37, 2457-2470.
- Wagner, B., Tarnawski, V.R., Hennings Müller, V., Wessolek, U., & Plagge, R. (2001). Evaluation of pedo-transfer functions for unsaturated soil hydraulic conductivity using an independent data set. *Geoderma*, 102, 275-297.
- Yadav, B.K., & Mathur, Sh. (2008). Modeling soil water uptake by plants using non linear Dynamic root density distribution function. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 134(4), 430-436.
- Zeng, W., Lei, G., & Zha, Y. (2018). Sensitivity and uncertainty analysis of the HYDRUS-1D model for root water uptake in saline soils. *Crop and Pasture Science*, 62(2), 83-94.