

## Research Article

# Simulation of Water and Salinity Fluxes in Tape Irrigation in Maize Cultivation Using HYDRUS-2D Software

ST Hoseini<sup>1</sup>, H Ramezani Etedali<sup>2\*</sup>, A Kaviani<sup>3</sup>, M Soltani<sup>4</sup>, B Nazari<sup>5</sup>

Received: July 23, 2021

Accepted: January 29, 2023

Revised: November 30, 2021

Published online: December 22, 2023

1- M.Sc. student of Irrigation and Drainage Eng., Faculty of Agriculture and Natural Resources, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran

2, 3, 5- Assoc. Prof., Dept. of Water Sci. and Eng., Faculty of Agriculture and Natural Resources, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran

4- Assist. Prof., Dept. of Water Sci. and Eng., Faculty of Agriculture and Natural Resources, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran

\* Corresponding author, E-Mail: [ramezani@eng.ikiu.ac.ir](mailto:ramezani@eng.ikiu.ac.ir)

## Abstract

### Background and Objectives

Due to water resources shortage, better agricultural water using is one of the most important challenges facing the agricultural water sector. Today, the use of pressurized irrigation systems such as tape irrigation system is one of the best ways to improve agricultural water use. Due to increasing use of tape irrigation systems in row crops and the importance of understanding how to distribute moisture and salts in these irrigation methods, the purpose of this study is to use HYDRUS-2D software for simulation. The geometry of the flow and movement of water and solutes in the soil was tape irrigation method. For this purpose, while modeling the flow geometry by two-dimensional HYDRUS-2D software using observational data obtained from field experiments, hydraulic parameters and soil solute transfer were optimized by reverse solution method.

### Methodology

The experiments were performed on corn plants in the Research Farm of the Department of Water Science and Engineering, Imam Khomeini International University, located in Qazvin. The experiment started in August 2020 and ended in mid-November after 105 days of corn growth period. Corn was cultivated in plots with an area of 9 square meters with dimensions of 3.3 meter. The distance between planting rows was 75 cm and the distance between corn seeds on the ridges was 30 cm. The irrigation tape used in the experiment was of the plate type tape and the discharge of each plate at the operating pressure of the experiment was measured as 1.3 liters per hour. The distance between the plates on the irrigation strip was 25 cm. Profile probe PR2 was used to measure soil moisture to determine the time and duration of irrigation. To do this, in the middle of each plot and to a depth of one meter, the tubes of the device were placed by using the auger. Due to the high price of the device and for economical use, high pressure polyvinyl pipes with an internal diameter of 26 mm, were used which had already been calibrated. To save and reduce the volume of operations, assuming the soil is homogeneous, harvests were made on one side of the ridge. The HYDRUS-2D software package uses the numerical solution of the Richards equation to analyze the motion of water in a porous medium in the saturated and unsaturated states. The HYDRUS-2D uses various models to estimate soil hydraulic parameters. In the mentioned model, the initial guess values of soil hydraulic parameters are estimated using a neural network paired in a model called Rosetta and soil information such as texture and percentage of its components and some moisture points in the soil characteristic curve.



## **Findings**

The results showed that although HYDRUS-2D model has a high ability to simulate the movement of water in porous media, however, this issue is directly related to the accuracy of the flow geometry and the limitations of the HYDRUS-2D model regarding the definition of irrigation systems should be considered. In addition, to evaluate the accuracy of data estimates by the model, it is not enough to just check the appropriateness of statistical indicators. The estimation of the model from the soil moisture characteristic curve as well as the water balance given to the model should be controlled. In the conditions of this research, the best result was obtained when the length of nodes with variable flow boundary condition was equal to 3.14 cm. For optimizing soil hydraulic parameters, NRMSE statistical indices of 9.3%, RMSE of 0.025 ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ) and MSE of 0.00066 ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ) show excellent model simulation. In addition, the water balance given to the model by the software was calculated to be equal to 285 liters, which was close to the actual amount of water given to the ground, i.e. 253 liters. The values of the above indices for optimizing the parameters of solute transfer in soil were 22.2%, 0.17 ( $\text{mg cm}^{-3}$ ) and 0.028 ( $\text{mg cm}^{-3}$ ), respectively.

## **Conclusion**

For evaluating the accuracy of the results presented by the model, it is not enough to just place the statistical indicators in the appropriate range and judge the results based on it, but also to control the initial conditions, soil moisture limits and also compare the volume of water. The data given by the model with the actual volume of water given are among the items that should be checked. Based on the results of this study, the accuracy of the water balance presented by the model is directly related to the length of nodes with variable flow conditions. Therefore, it seems necessary to study and determine the optimal length of nodes with variable flow boundary conditions before performing any simulation operation.

**Keywords:** Flow flux, Modeling, Movement of water and salts, Richard's equation.

## مقاله پژوهشی

### شبیه سازی حرکت آب و شوری در آبیاری قطره ای نواری در کشت ذرت با استفاده از نرم افزار

#### HYDRUS-2D

سید تقی حسینی<sup>۱</sup>، هادی رضائی اعتدالی<sup>۲\*</sup>، عباس کاویانی<sup>۳</sup>، مسعود سلطانی<sup>۴</sup>، بیژن نظری<sup>۵</sup>

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۵/۰۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۰۹

تاریخ ویرایش: ۱۴۰۰/۰۹/۰۹

تاریخ انتشار آنلاین: ۱۴۰۲/۱۰/۰۱

- ۱- دانشجوی کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران  
۲ و ۳- دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران  
۴- استادیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران  
\* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: ramezani@eng.ikiu.ac.ir

#### چکیده

استفاده از آبیاری تیپ در آبیاری مزارع به سرعت رو به گسترش است. نگرانی از تبعات آن به خصوص افزایش شوری خاک زراعی، ذهن متخصصان آبیاری را مشغول کرده است. هدف از این مطالعه شبیه‌سازی حرکت آب و املاح در آبیاری نواری تیپ بود. برای دستیابی به این هدف هندسه جریان طی یک دوره کشت ذرت با روش آبیاری تیپ مدل‌سازی شد و با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده هدایت الکتریکی و شوری، پارامترهای هیدرولیکی و انتقال املاح خاک به روش حل معکوس بهینه‌سازی شد. در بهینه‌سازی پارامترهای هیدرولیکی خاک شاخص‌های آماری NRMSE برابر ۹/۳ درصد، RMSE برابر ۰/۰۲۵ (cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>) و MSE برابر ۰/۰۰۰۶ (cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>)<sup>2</sup> نشان از شبیه‌سازی عالی مدل بوده و علاوه بر آن بیلان آب داده شده به مدل توسط نرم‌افزار، معادل ۲۸۵ لیتر محاسبه شد که به مقدار واقعی آب داده شده به زمین یعنی ۲۵۳ لیتر نزدیک بود. مقادیر شاخص‌های فوق برای بهینه‌سازی پارامترهای انتقال املاح در خاک به ترتیب برابر ۲۲/۲ درصد، ۰/۱۷ (mg cm<sup>-3</sup>) و ۰/۰۲۸ (mg cm<sup>-3</sup>)<sup>2</sup> به دست آمد. در شرایط این تحقیق بهترین نتایج زمانی حاصل شد که در آن طول گره‌های با شرط مرزی جریان متغیر معادل ۳/۱۴ سانتی‌متر لحاظ شد، نتایج نشان داد اگرچه مدل هایدروس توانایی بالایی در شبیه‌سازی حرکت آب در محیط‌های متخلخل دارد، ولی این موضوع ارتباط مستقیمی با صحت هندسه جریان داشته و می‌بایست محدودیت‌های مدل در خصوص تعریف سیستم‌های آبیاری مورد توجه قرار گیرد، همچنین برای ارزیابی دقت تخمین داده‌ها توسط مدل، تنها بررسی شاخص‌های آماری کافی نبوده و می‌بایست برآورد مدل از منحنی مشخصه رطوبتی خاک و نیز بیلان آب داده شده به مدل نیز کنترل گردد. همچنین مشاهده شد مدل در شبیه‌سازی توزیع رطوبت در خاک بهتر عمل کرده است.

واژه‌های کلیدی: حرکت آب و املاح، نرخ جریان، مدل‌سازی، معادله ریچاردز.

## مقدمه

آب به عنوان مهمترین عامل تولید، به خصوص در بخش کشاورزی، در سال‌های اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته است، به طوری که عمده مناقشات دهه‌های گذشته بر سر مسائل و منابع آب بوده است. به دلیل کمبود منابع آب شیرین خصوصاً در مناطق خشک و نیمه خشک و همچنین کاهش روزافزون کیفیت منابع آب شیرین در دسترس، تمام توصیه‌ها در بخش کشاورزی به استفاده از سیستم‌های آبیاری دقیق ختم می‌گردد، لذا شناخت نحوه عملکرد اینگونه سیستم‌ها و تعیین پارامترهای موثر بر عملکرد آنها منجر به بهره‌برداری بهتر از منابع آب و خاک خواهد شد. مدل‌های کامپیوتری در واقع کوششی هستند به منظور پیش‌بینی شرایطی که در آینده احتمالاً به وقوع می‌پیوندند و امید است بر مبنای نتایج حاصل از آنها تصمیمات مناسب‌تری برای استفاده بهینه و پایدار از منابع آب و خاک اتخاذ گردد. با توجه به اینکه انجام آزمایشات صحرایی به منظور مطالعه و تعیین همه پارامترهای هیدرولیکی خاک دشوار و بعضاً غیرممکن به نظر می‌رسد، لذا استفاده از مدل‌های رایانه‌ای به عنوان جایگزین مناسبی برای برآورد آنها در سال‌های اخیر، گسترش زیادی یافته است.

یکی از مدل‌های رایانه‌ای که مورد توجه و استفاده زیاد پژوهشگران قرار گرفته مدل هایدروس دو بعدی است که به دلیل کارایی خوب، حتی به منظور بررسی صحت عملکرد مدل‌های جدیدتر نیز مورد استفاده قرار گرفته است، به طور مثال شکفته و همکاران (۲۰۱۴) در پژوهشی به منظور آموزش و اعتبار سنجی مدل ANFIS که یک سیستم استنتاج عصبی-فازی سازگار است، از

هایدروس دو بعدی استفاده کرده و اعلام داشته‌اند، مدل ANFIS در شرایط مطالعه انجام شده با دقت بالای آب-شویی نیترات را شبیه‌سازی کرده است و بنابراین می‌توان از آن در پیش‌بینی حرکت املاح با دقت بالایی استفاده نمود.

در پژوهشی خلیلی و همکاران (۲۰۱۶) مدل هایدروس دو بعدی را به منظور تعیین پروفیل رطوبتی در آبیاری قطره ای زیرسطحی در شرایط لایسی‌متری در خاک لومی با دو عمق نصب ۴۰ و ۵۰ سانتی‌متری و دبی قطره‌چکان برابر ۳/۵ لیتر در ساعت بر روی لوله‌های لترال با فاصله ۵۰ و ۷۵ سانتی‌متری از یکدیگر مورد بررسی قرار داده و اعلام داشتند که نتایج نشان از برازش خوب بین داده‌های برآورد شده توسط مدل و مقادیر اندازه‌گیری شده دارد.

نقوی و همکاران (۲۰۱۲) مدل هایدروس دو بعدی را به منظور شبیه‌سازی رطوبت خاک در سیستم‌های آبیاری تحت فشار قطره‌ای زیر سطحی مورد ارزیابی قرار داده و ضمن تأیید توانایی مدل در شبیه‌سازی توزیع رطوبت در خاک اعلام داشته‌اند که با گذشت زمان و یکنواخت‌تر شدن رطوبت خاک در اثر توزیع مجدد رطوبت، مدل برآوردهای بهتری را ارائه می‌کند به طوری که با گذشت ۷۲ ساعت از زمان آبیاری، مقادیر ارائه شده توسط مدل به مقادیر واقعی نزدیک‌تر بود.

خان‌محمدی و همکاران (۲۰۱۳) در پژوهشی مدل هایدروس دو بعدی را به منظور شبیه‌سازی جبهه رطوبتی در سیستم آبیاری قطره‌ای مورد استفاده قرارداده و با استفاده از قضیه  $\pi$  باکینگهام بر اساس مقدار هدایت هیدرولیکی اشباع خاک روابط ساده و نیمه

شده است، همچنین پروفیل رطوبتی شبیه سازی شده توسط مدل هایدروس تطابق قابل قبولی با داده های مشاهداتی داشته و پژوهشگران پیشنهاد دادند که از مدل هایدروس دوبعدی در طراحی آبیاری قطره ای استفاده شود.

خرمی و همکاران (۲۰۱۳) از مدل هایدروس دوبعدی برای شبیه سازی حرکت آب و توزیع مجدد رطوبت در خاک با روش آبیاری قطره ای استفاده کردند. در این تحقیق از یک سیستم کوچک آبیاری قطره ای با منبع آب با ارتفاع ثابت و قطره چکان هایی با آبدهی ۴،۲ و ۸ لیتر در ساعت استفاده شده است. نتایج شبیه سازی میزان رطوبت خاک در یک بازه زمانی ۴۸ ساعته با داده های اندازه گیری شده مقایسه شد، که حاکی از توانایی بالای مدل در شبیه سازی رطوبت در خاک بود.

همچنین سلطانی و همکاران (۲۰۱۸) نیز برای شبیه سازی سامانه زهکشی خشک از مدل هایدروس دوبعدی استفاده کرده و طی انجام آزمایشات مزرعه ای، این مدل را برای شبیه سازی پارامترهای هیدرولیکی و شوری خاک مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج این پژوهش نشان داد مدل رطوبت خاک را با دقت بیشتری شبیه سازی می کند.

میرزایی و ناظمی (۲۰۱۱) به بررسی حرکت شوری در خاک با استفاده از مدل هایدروس دوبعدی پرداخته و تأثیر رطوبت اولیه خاک را در توزیع املاح مورد مطالعه قرار داده اند. نتایج نشان دهنده توانایی بالای مدل در شبیه سازی حرکت آب و شوری در خاک بود. همچنین بررسی ها نشان داد خشک بودن خاک قبل از انجام آب-شویی باعث حرکت سریعتر املاح در پروفیل خاک خواهد

تجربی را ارائه نمودند که مقدار عمق و حداکثر قطر خیس شدگی پیاز رطوبتی را با دقت زیادی برآورد می کند.

پروونزانو (۲۰۰۷) از مدل هایدروس دوبعدی برای ارزیابی حجم خاک مرطوب در آبیاری قطره ای زیرسطحی استفاده نموده و گزارش داده است حجم خاک مرطوب در اطراف قطره چکان در طول آبیاری به عنوان تابعی از زمان و مقدار اولیه رطوبت برای یک قطره چکان به طور مناسبی توسط هایدروس شبیه سازی شده است.

حیدری و همکاران (۲۰۱۸) به منظور بررسی اثر دبی قطره چکان بر روی الگوی خیس شده در روش آبیاری قطره ای با مدل هایدروس دوبعدی از یک مدل فیزیکی از جنس پلاکسی گلاس، پر شده با خاک لوم رسی سیلتی و قطره چکان های تنظیم شونده دستی با آبدهی ۶،۴، ۸ و ۱۰ لیتر در ساعت استفاده کردند. ایشان از بررسی نتایج ارائه شده توسط مدل و الگوهای مشاهداتی ثبت شده به این نتیجه رسیدند که هرچه داده های ورودی به روزتا (مدل داخلی هایدروس) بیشتر باشد، نتایج ارائه شده توسط مدل به الگوهای مشاهداتی شبیه تر خواهد بود و همچنین اعلام داشتند که مدل هایدروس دوبعدی در دبی های پایین تر با دقت بیشتری عمل کرده است.

بشارت و همکاران (۲۰۱۶) با هدف شبیه سازی پروفیل رطوبتی خاک در سیستم آبیاری قطره ای سطحی و زیرسطحی، در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه ارومیه مدل هایدروس دوبعدی را بکار بردند. شبیه سازی ها نشان داد با افزایش شعاع و عمق مقدار رطوبت کاهش یافته و توزیع رطوبت در پروفیل خاک به صورت کامل انجام

شد.

بالاتری برخوردار بوده است. البته این نتایج بدون حضور گیاه حاصل شده است و بنابراین پژوهشگران این تحقیق نیز پیشنهاد داده‌اند که مدل در شرایط وجود گیاه نیز مورد ارزیابی قرار گیرد.

بیشتر تحقیقات صورت گرفته با استفاده از مدل هایدروس به صورت آزمایشگاهی بوده و در شرایط کنترل شده غیر واقعی و کوتاه مدت انجام شده است. نظر به گسترش روز افزون استفاده از سیستم‌های آبیاری نواری تیپ در زراعت‌های ردیفی در میان کشاورزان، و اهمیت درک چگونگی توزیع رطوبت و املاح در این روش آبیاری، تصمیم گرفته شد تا توانایی مدل هایدروس دو بعدی در شبیه‌سازی توزیع رطوبت و شوری در یک مزرعه ذرت طی یک دوره رشد کامل، بررسی گردد، بنابراین هدف از این تحقیق استفاده از نرم‌افزار هایدرس دو بعدی برای شبیه‌سازی هندسه جریان و چگونگی حرکت آب و املاح در خاک مزرعه ذرت با روش آبیاری نواری تیپ تعیین شد، و ضمن مدل‌سازی هندسه جریان با بکارگیری نرم‌افزار هایدرس دو بعدی با استفاده از داده‌های مشاهداتی حاصل از انجام آزمایش‌های میدانی پارامترهای هیدرولیکی و انتقال املاح خاک به روش حل معکوس بهینه‌سازی شد.

جوادزاده شاخالی و همکاران (۲۰۱۵) در مزرعه پژوهشی مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی گیلان به منظور شبیه‌سازی شوری در خاک سنگین تحت منبع خطی (آبیاری تیپ) از مدل هایدروس استفاده کردند. نتایج نشان داده است اگرچه مدل شوری خاک را اندکی کمتر از مقادیر مشاهده‌ای برآورد کرد، اما بر اساس مقایسه مقادیر شوری شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده با استفاده از آماره nRMSE شبیه‌سازی مدل مورد تأیید قرار گرفته است.

محمدی و همکاران (۲۰۱۴) به منظور شبیه‌سازی حرکت آب و نمک در خاک با استفاده از مدل هایدروس در زمینی به مساحت ۲۰۰ مترمربع در مزرعه پردیس دانشگاه زابل، از طرح بلوک‌های کامل تصادفی با ۴ تیمار و ۵ تکرار استفاده کردند. در تیمارها مقادیر آبتیوی ۱۰۰، ۱۵۰، ۲۰۰ و ۲۵۰ میلی‌متر بود که به ترتیب در ۱۰ نوبت با دور ۳ روز، ۷ نوبت با دور ۴ روز، ۵ نوبت با دور ۶ روز و ۴ نوبت با دور ۷ روز اعمال شد. نتایج نشان داد مقادیر رطوبت خاک و غلظت نمک شبیه‌سازی شده در شرایط مزرعه تطابق خوبی داشته است که نشان‌دهنده کارایی خوب مدل می‌باشد. همچنین نتایج نشان داد که مدل در شبیه‌سازی حرکت نمک از دقت

## مواد و روشها

### آزمایشات مزرعه‌ای

دوره رشد ذرت، در نیمه آبان پایان یافت. کشت ذرت در کرت‌هایی با مساحت ۹ مترمربع با ابعاد ۳×۳ متر صورت گرفت. فاصله بین ردیف‌های کشت ۷۵ سانتی‌متر و فاصله بین بذرهای ذرت بر روی پشته‌ها ۳۰ سانتی‌متر

آزمایشات انجام شده بر روی گیاه ذرت در مزرعه تحقیقاتی گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره) واقع در شهر قزوین انجام گردید. آزمایش در مرداد ۹۹ شروع و پس از گذشت ۱۰۵ روز

لوله‌های دستگاه توسط آگر قرار داده شد. با توجه به قیمت بالای دستگاه و به منظور صرفه اقتصادی از لوله‌های فشار قوی پلی‌وینا با قطر داخلی ۲۶ میلی‌متر که قبلاً کالیبره گردیده، استفاده گردید. برای صرفه‌جویی و کاهش حجم عملیات با فرض همگن بودن خاک، برداشت‌ها در یک سمت پشته انجام شد. مشخصات خاک مزرعه به شرح جدول ۱ می‌باشد.

جدول ۱- مشخصات خاک مزرعه.

عمق خاک	رس	سیلت	شن	$\theta_{fc}$ درصد وزنی	$\theta_{pwp}$ درصد وزنی	$\rho$ $cm^3 cm^{-3}$	بافت خاک
۰-۳۰	۱۰	۳۳	۵۷	۲۳	۱۴	۱/۳۳	SL
۳۰-۶۰	۸	۲۴/۵	۶۷/۵	۲۲	۱۳/۵	۱/۳۳	SL

### مدل هایدرس

در مدل هایدرس، مقادیر حدس اولیه پارامترهای هیدرولیکی خاک، با استفاده از شبکه عصبی جفت شده در مدل به نام روزتا و اطلاعات خاک مانند بافت و درصد اجزای آن و برخی از نقاط رطوبتی در منحنی مشخصه خاک تخمین زده می‌شود (جدول ۲).

بسته نرم‌افزاری هایدرس دو بعدی برای تحلیل حرکت آب در محیط متخلخل در حالت اشباع و غیراشباع از حل عددی معادله ریچاردز استفاده می‌کند. هایدرس برای تخمین پارامترهای هیدرولیکی خاک از مدل‌های مختلفی از جمله مدل ونگنوختن-معلم استفاده می‌کند.

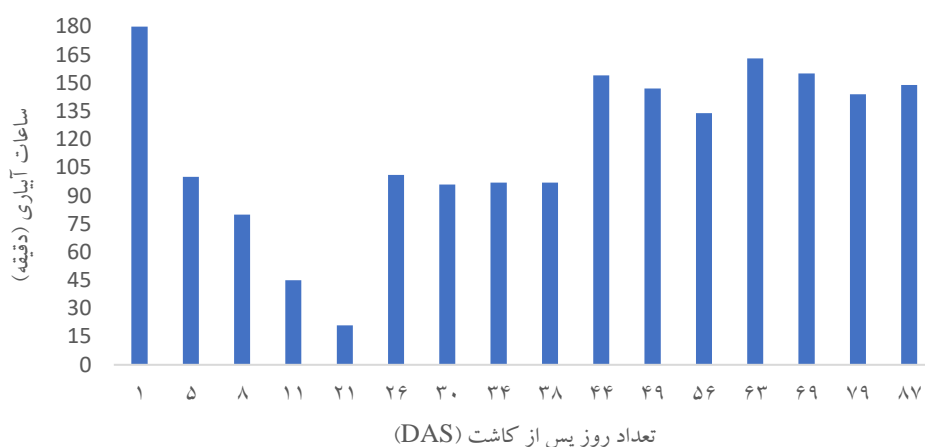
جدول ۲- مقادیر پارامترهای هیدرولیکی خاک، برآورد شده توسط روزتا.

عمق خاک [cm]	$\theta_r$ درصد حجمی رطوبت	$\theta_s$ درصد حجمی	$\alpha$ عکس مکش نقطه ورود هوا به خاک	n ضریب تجربی	$K_s$ هدایت هیدرولیکی اشباع	I ضریب اعوجاج
	$[cm^3 cm^{-3}]$	$[cm^3 cm^{-3}]$	$[cm^{-1}]$	[-]	$cm day^{-1}$	[-]
۰-۶۰	۰/۰۵۹۲	۰/۴۴	۰/۰۲۲۹	۱/۲۹	۵۳/۴۵	۰/۵

روزهایی که در آن آبیاری انجام شده به همراه تعداد ساعت آبیاری در شکل ۱ نشان داده شده است. با توجه به اینکه جمع کل ساعات آبیاری در طول دوره کشت ۳۱ ساعت بود، حجم آب داده شده توسط یک نوار تیپ سه

با مقایسه مقدار رطوبت اشباع اندازه‌گیری شده در مزرعه (بین ۴۵ تا ۴۸ درصد حجمی) و عدد تخمینی برای حدس اولیه، ملاحظه شد تطابق خوبی وجود داشت. در طول دوره کشت شانزده آبیاری انجام شده بود،

متری در طول دوره برابر ۵۰۷ لیتر بوده که برای یک نیم پشته شبیه سازی شده حدود ۲۵۳ لیتر است.

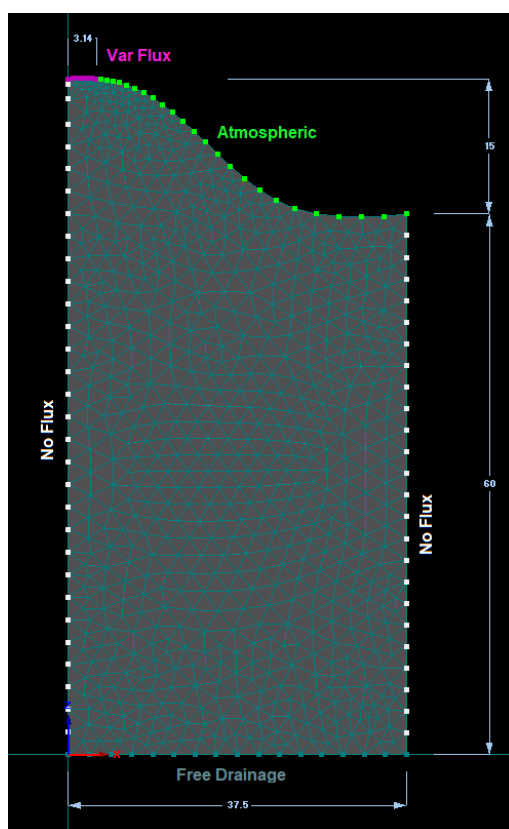


شکل ۱- مشخصات آبیاری‌های انجام شده در طول دوره کشت.

شرایط اولیه و بیلان آب ارائه شده توسط مدل، بهترین نتایج از شرایط تشریح شده در زیر به دست آمد. محاسبه شار جریان با فرض شعاع ۱ سانتی‌متر برای درپیر انجام شد. مقدار شار جریان معادل ۲۰۸ سانتی‌متر بر روز از تمام طول ۶/۲۸ سانتی‌متر محیط دایره خیس شده در سطح زمین محاسبه و در مدل تعریف شد. با توجه به فرض همگنی خاک، جریان در حل عددی به صورت متقارن خواهد بود، بنابراین برای کاهش حجم محاسبات و افزایش دقت شبیه‌سازی، هندسه حل به صورت نیم پشته در نظر گرفته شد (شکل ۲).

برای تعریف هندسه جریان در مدل هایدروس با توجه به شرایط کشت، شرط مرزی سطح خاک از نوع شرط مرزی اتمسفریک و مرز انتهایی با شرط مرزی زهکشی آزاد تعیین گردید بقیه گره‌های طرفین حجم کنترل به صورت شرط مرزی بدون جریان تعیین شد. محل قرارگیری پلاک نوار تیپ هم در سمت چپ و بر روی پشته به صورت شرط مرزی جریان متغیر تعریف گردید. با توجه به اینکه هندسه جریان و طول گره‌های با شرط مرزی جریان متغیر به شدت در صحت شرایط اولیه و خصوصاً بیلان آب ارائه شده توسط مدل موثر می‌باشد، لذا با تغییرات متعدد در این موارد و کنترل





شکل ۲- نوع شرایط مرزی اعمال شده بر روی حجم کنترل.

## آنالیز حساسیت

صفر و یک، مدل به آن پارامتر به ترتیب غیرحساس و بسیار حساس می‌باشد (کوینتون ۱۹۹۴ و قربانی ۱۹۹۷).

معیارهای ارزیابی صحت تخمین داده‌ها (واسنجی مدل)

به منظور ارزیابی صحت داده‌های تخمین زده شده توسط نرم‌افزار، از سه شاخص MSE, RMSE, NRMSE که به صورت معادلات ۲ تا ۴ تعریف می‌شود، استفاده شده است.

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

برای تعیین حساسیت پارامترهای هیدرولیکی خاک از شاخص حساسیت<sup>۱</sup> طبق معادله ۱ زیر استفاده شد.

$$SI = \frac{[(O_2 - O_1) / \bar{O}]}{[(I_2 - I_1) / \bar{I}]} \quad [1]$$

در معادله فوق،  $O_1$  مقدار اولیه داده خروجی،  $O_2$  مقدار ثانویه داده خروجی،  $\bar{O}$  میانگین داده‌های خروجی،  $I_1$  مقدار اولیه داده ورودی،  $I_2$  مقدار ثانویه داده ورودی و  $\bar{I}$  میانگین داده‌های ورودی است.

چنانچه مقدار شاخص SI بین ۰-۰/۵ باشد مدل به آن پارامتر حساسیت کمی داشته و اگر مقدار آن بین ۰/۵-۱ باشد مدل به آن پارامتر نیمه حساس است. در مقادیر

داده‌های مورد نظر موفق‌تر بوده است و این دو شاخص نشان‌دهنده دقت مدل در پیش‌بینی داده‌ها هستند.

چنانچه مقدار شاخص NRMSE کمتر از ۱۰ درصد باشد نشان‌دهنده پیش‌بینی عالی مدل است و چنانچه این شاخص بین ۱۰ تا ۲۰ درصد باشد نشان‌دهنده پیش‌بینی خوب مدل و در صورتی که مقدار آن بین ۲۰ تا ۳۰ درصد باشد نشان از عملکرد متوسط مدل دارد. مقادیر بیشتر از ۳۰ درصد نشان‌دهنده شبیه‌سازی ضعیف مدل می‌باشد (بنایان و هوگنبوم ۲۰۰۹).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}} \quad [3]$$

$$NRMSE = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}}}{\bar{O}} \times 100 \quad [4]$$

در معادلات فوق  $O_i$  مقادیر اندازه‌گیری شده،  $P_i$  مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل،  $\bar{O}$  میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده و  $n$  تعداد داده‌های اندازه‌گیری شده است. هرچه میزان دو شاخص MSE و RMSE به صفر نزدیک‌تر باشد، مبین این مطلب است که مدل در پیش‌بینی

## نتایج و بحث

عرضی برابر ۰/۶ سانتی‌متر (۱۰ درصد پخشیدگی طولی) لحاظ شد. به منظور انجام فرآیند بهینه‌سازی در پارامترهای هیدرولیکی خاک، مقادیر برآورد شده پارامترهای هیدرولیکی خاک توسط روزتا که در جدول ۲ ارائه شده است، به عنوان مقادیر اولیه به مدل داده شد و داده‌های رطوبت حجمی اندازه‌گیری شده (مشاهداتی) با توجه به زمان و مکان برداشت در جدول حل معکوس به مدل داده شد، درخصوص پارامترهای انتقال املاح در خاک نیز به همین شکل داده‌های مشاهداتی شوری در زمان و اعماق اندازه‌گیری شده به مدل داده شد و با انتخاب پارامترهای ذکر شده در بالا عملیات بهینه‌سازی آن‌ها در طول دوره رشد توسط مدل انجام گرفت. شایان ذکر است ۲۵ درصد داده‌های مشاهداتی، در زمان حل معکوس به مدل داده نشد و برای صحت‌سنجی مدل مورد استفاده قرار گرفت.

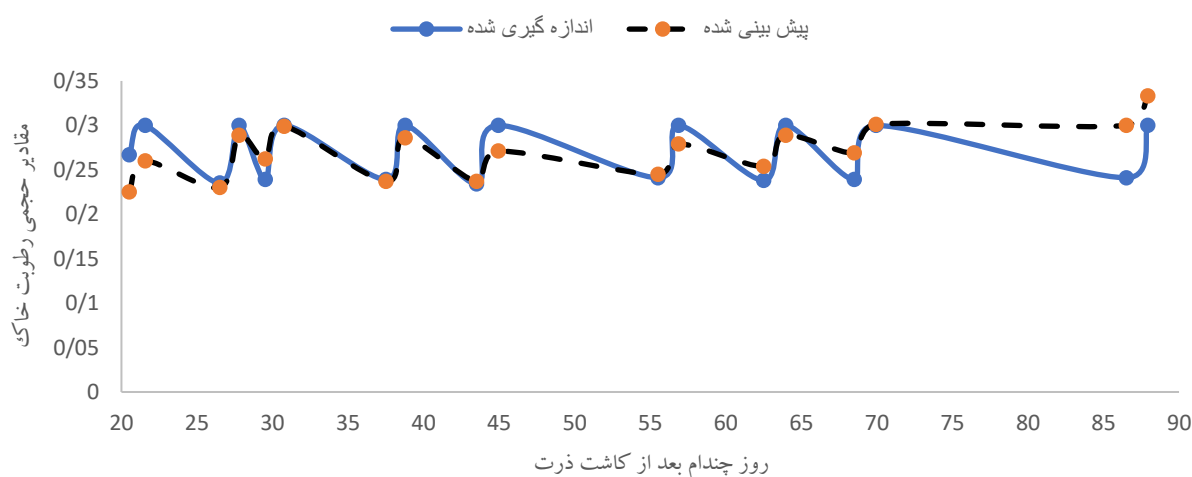
در ارزیابی صحت نتایج ارائه شده توسط مدل نمی‌توان تنها به قرارگیری شاخص‌های آماری در محدوده مناسب اکتفا نمود و بر اساس آن در خصوص نتایج ارائه

از بررسی نتایج آنالیز حساسیت مشاهده شد که مدل به پارامتر رطوبت اشباع خاک نیمه حساس بوده و نسبت به سایر پارامترهای هیدرولیکی خاک دارای حساسیت کمی است. اگرچه ممکن است در جریان انجام آنالیز حساسیت پارامترهای یک مدل، پارامتری، غیرحساس و یا با حساسیت کم باشد، اما تغییرات همین پارامتر و تاثیرات اندک آن بر حل عددی معادلات مدل، می‌تواند در به نتیجه رسیدن حل عددی معادلات و تکمیل فرآیند بهینه‌سازی و حصول نتایج قابل قبول‌تر موثر باشد. لذا در زمانی که حل معادلات توسط مدل به نتیجه نمی‌رسد پیشنهاد می‌شود از پارامترهای با حساسیت کم نیز جهت بهینه‌سازی استفاده شود.

بنابراین علاوه بر  $\theta_s$ ، ضرایب تجربی  $n$  و  $\alpha$  و هدایت هیدرولیکی اشباع نیز برای بهینه‌سازی مورد استفاده قرار گرفت. برای بهینه‌سازی پارامترهای انتقال املاح در خاک از دو پارامتر پخشیدگی طولی و عرضی استفاده شد، که مقدار حدس اولیه برای پخشیدگی طولی برابر ۶ سانتی‌متر (۱۰ درصد طول نمونه) و برای پخشیدگی

رطوبت خاک قبل از هر آبیاری و همچنین ۲۴ ساعت بعد از هر آبیاری و در پای گیاه و بر روی پشته اندازه گیری شد. برای واسنجی مدل از مجموع ۲۴ داده اندازه گیری شده، ۱۸ داده برای واسنجی مدل استفاده شد و از ۶ داده دیگر برای صحت سنجی مدل استفاده شد. شکل ۳ داده های رطوبت حجمی اندازه گیری شده با مقادیر پیش بینی شده توسط مدل را نشان می دهد، مقادیر رطوبت حجمی به خوبی زمان های قبل و بعد از آبیاری را نمایش می دهد. مدل نیز به درستی این شرایط را پیش بینی کرده است. همچنین بیلان آب داده شده به مدل توسط نرم افزار، معادل ۲۸۵ لیتر محاسبه شد که به مقدار واقعی آب داده شده به زمین یعنی ۲۵۳ لیتر نزدیک بود.

شده قضاوت کرد، بلکه کنترل شرایط اولیه، مقادیر حدود رطوبتی خاک و همچنین مقایسه حجم آب داده شده توسط مدل با حجم واقعی آب داده شده، از جمله مواردی است که می بایست کنترل گردد. بر اساس نتایج حاصل از این تحقیق با توجه به این که صحت بیلان آب داده شده توسط مدل ارتباط مستقیمی با طول گره های با شرط مرزی جریان متغیر دارد. و با توجه به اینکه طول این گره ها به طور صریح و با یک مقدار ثابت در روش های مختلف آبیاری مشخص نیست، ضروری به نظر می رسد تا پیش از انجام هر گونه عملیات شبیه سازی، با تعریف سناریوهای مناسب شرایط واقعی، نسبت به بررسی و تعیین طول بهینه گره های با شرط مرزی جریان متغیر برای هندسه حجم کنترل اقدام گردد.



شکل ۳- مقادیر اندازه گیری و پیش بینی شده رطوبت حجمی.

مقادیر شاخص های ارزیابی صحت پیش بینی داده های رطوبت توسط مدل در مرحله واسنجی و صحت سنجی به شرح جدول ۵ محاسبه شده است.

واسنجی و صحت سنجی مدل در بهینه سازی پارامترهای هیدرولیکی خاک

جدول ۵- واسنجی و صحت‌سنجی مدل در بهینه‌سازی پارامترهای هیدرولیکی خاک.

MSE [(cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> ) <sup>2</sup> ]	RMSE [cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> ]	NRMSE [%]	مرحله سنجش
۰/۰۰۰۶	۰/۰۲۵	۹/۳	واسنجی
۰/۰۰۰۶۶	۰/۰۲۶	۹/۵	صحت‌سنجی

مقادیر شاخص‌های فوق بخصوص شاخص NRMSE

که کمتر از ۱۰ محاسبه شده است، نشان از شبیه‌سازی عالی مدل و واسنجی مدل برای پیش‌بینی صحیح حرکت آب در خاک و توزیع مجدد رطوبت دارد. مقادیر پارامترهای هیدرولیکی بهینه شده توسط مدل به همراه

حدود اطمینان ۹۵ درصد در جدول ۶ ارائه شده است. از آنجاییکه که فرآیند شبیه‌سازی توسط مدل به خوبی صورت پذیرفته است، لذا پارامترهای هیدرولیکی خاک که توسط مدل بهینه‌سازی شده برای شروع بهینه‌سازی پارامترهای انتقال املاح در خاک استفاده شد.

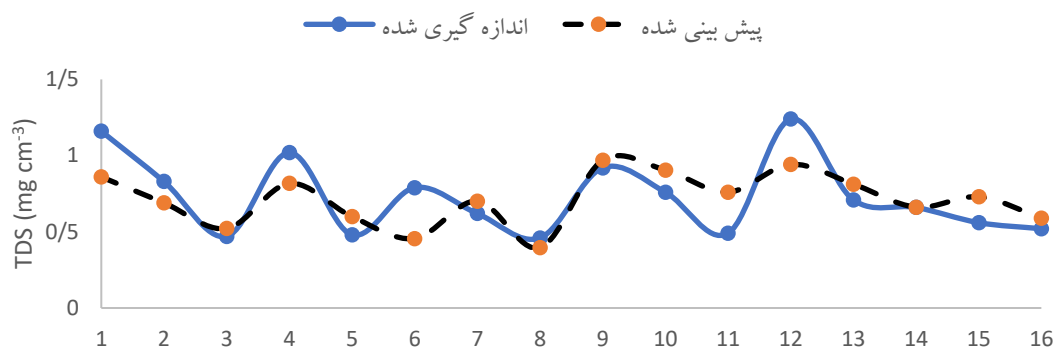
جدول ۶- مقادیر بهینه شده پارامترهای هیدرولیکی خاک.

$\theta_s$	$\alpha$	n	$K_s$	پارامتر
درصد حجمی رطوبت اشباع	ضریب تجربی	ضریب تجربی	هدایت هیدرولیکی اشباع	
[cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> ]	[cm <sup>-1</sup> ]	[-]	cm day <sup>-1</sup>	واحد
۰/۴۴۱۹ ± ۰/۰۰۷۸	۰/۰۰۸۰۵ ± ۰/۰۰۱	۱/۲ ± ۰/۰۱	۵۸/۱۱ ± ۳/۹۵	۶۰-۰

برای پایش شوری در خاک در زمان‌های قبل، ۴۰ روز و ۶۰ روز بعد از کاشت هدایت الکتریکی خاک در فواصل ۰، ۱۵ و ۳۰ سانتی‌متری از قطره‌چکان (پلاک نوار آبیاری) و در اعماق ۲۰-۰، ۴۰-۲۰ و ۶۰-۴۰ سانتی‌متری از سطح خاک با نمونه‌برداری اندازه‌گیری شده است. داده‌های هدایت الکتریکی برداشت شده قبل از کشت ذرت به عنوان مقادیر شوری اولیه وارد شد. با توجه به اینکه EC اندازه‌گیری شده مربوط به عصاره اشباع خاک است، برای تبدیل آن به EC محلول خاک از نسبت رطوبت اشباع و رطوبت روز صفر استفاده و داده‌های مدل برای مقایسه به شوری عصاره اشباع خاک تبدیل گردید. از ۱۶

عدد داده اندازه‌گیری شده تعداد ۴ عدد داده در واسنجی مورد استفاده قرار نگرفته و برای صحت‌سنجی مدل استفاده شده است.

داده‌های شوری اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده توسط مدل در شکل ۴ نشان داده شده است. چنانچه در این شکل مشاهده می‌شود مدل در پیش‌بینی صحیح روند شوری در خاک کاملاً موفق بوده و مقادیر پیش‌بینی شده به مقادیر واقعی اندازه‌گیری نزدیک است. این موضوع در بررسی شاخص‌های سنجش صحت تخمین داده‌ها نیز که در جدول ۷ گزارش شده است، به خوبی قابل مشاهده است.



شکل ۴- مقادیر شوری اندازه گیری و برآورد شده.

مدل، از شاخص‌های آماری تعریف شده استفاده شد. مقادیر شاخص‌های آماری به شرح جدول ۷ به دست آمده است.

واسنجی و صحت‌سنجی مدل در بهینه‌سازی پارامترهای انتقال املاح در خاک جهت سنجش صحت تخمین داده‌های شوری توسط

جدول ۷- شاخص‌های آماری واسنجی و صحت‌سنجی مدل برای بهینه‌سازی پارامترهای انتقال املاح.

MSE [(mg cm <sup>-3</sup> ) <sup>2</sup> ]	RMSE [mg cm <sup>-3</sup> ]	NRMSE [%]	مرحله سنجش
۰/۰۲۸	۰/۱۷	۲۲	واسنجی
۰/۰۴	۰/۲۱	۳۲	صحت‌سنجی

مطلوب است، و همچنین با توجه به شکل ۴ که نشان‌دهنده پیش‌بینی صحیح مدل از روند توزیع املاح در خاک می‌باشد، شبیه‌سازی شوری توسط مدل به صورت قابل قبولی انجام گرفته است. مقادیر بهینه شده پارامترهای انتقال املاح در خاک توسط مدل به همراه حدود اطمینان ۹۵ درصد در جدول ۸ ارائه شده است.

هرچند شاخص آماری NRMSE در مرحله صحت‌سنجی چندان مطلوب نیست، اما تغییرات متعدد داده شده در مدل به نتایج بهتر منتج نگردید، بنابراین با توجه به اینکه سایر شاخص‌های مرحله صحت‌سنجی و نیز شاخص‌های به دست آمده از مرحله واسنجی در محدوده

جدول ۸- پارامترهای بهینه شده انتقال املاح.

Disp.L (cm)	Disp.T (cm)
۱۱۹ ± ۲/۷۴	۲/۵۳۲ ± ۰/۵۸۹

هایدروس در پیش‌بینی حرکت آب و املاح در خاک

نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد اگرچه مدل

توانمند است، اما در شرایط این تحقیق که شبیه‌سازی در طول دوره رشد و در مزرعه انجام گرفته، هایدروس در شبیه‌سازی حرکت آب در خاک و توزیع رطوبت بهتر عمل کرده است، و این موضوع با نتایج گزارش شده توسط سلطانی و همکاران (۲۰۱۸) مطابقت دارد. درحالت کلی با توجه به اینکه مدل هایدروس دو بعدی حرکت آب و توزیع شوری را در شرایط تعریف شده مزرعه به صورت مناسبی در طول دوره رشد ذرت شبیه‌سازی کرد، می‌توان آن را برای پایش شوری و نظارت بر کیفیت خاک‌های مزارع در منطقه و همچنین مدیریت بهتر آبیاری مورد استفاده قرار داد.

### نتیجه‌گیری کلی

در این تحقیق سعی شد تا جریان آب و املاح در خاک در یک مزرعه ذرت که با سیستم آبیاری نواری تیپ آبیاری گردیده، با استفاده از مدل هایدروس دو بعدی شبیه‌سازی شود. مدل هایدروس دوبعدی یک نرم‌افزار توانمند در زمینه شبیه‌سازی حرکت سیالات در محیط متخلخل بوده و با دقت بالایی توانایی شبیه‌سازی حرکت آب در خاک را دارد، البته این موضوع به شناسایی و تعریف دقیق هندسه حجم کنترل وابسته است. اما موضوعی که نباید مورد غفلت واقع شود این است که این مدل هیچ پیش‌فرض و شناختی از محیط خاک، روش‌های آبیاری و شرایط کشت ندارد و بر اساس تعاریف ریاضی نسبت به حل عددی معادلات مربوطه اقدام می‌نماید. به طور مثال عمومی‌ترین فرض موجود در تمام روش‌های آبیاری (به جز روش‌های زیرسطحی) این است که در مدت زمان مشخصی آبیاری از سطح خاک انجام شده و

سپس آبیاری قطع می‌گردد. در همین فرآیند به ظاهر ساده، بزرگترین محدودیت مدل نهفته است و آن اینکه گره‌های سطح خاک که در زمان آبیاری دارای شرط مرزی جریان متغیر هستند پس از اتمام آبیاری شرط مرزی اتمسفریک پیدا کرده و دارای تبخیر-تعرق خواهند بود، این درحالی است که چنین چیزی یعنی تخصیص دو شرط مرزی به یک گره که در نرم افزار هایدروس امکان‌پذیر نبوده و گره‌های با شرط مرزی جریان متغیر پس از پایان آبیاری به جریان صفر یا همان (No Flux) تبدیل خواهند شد. البته گزینه‌هایی جهت تعدیل موضوع و اعمال نسبی شرایط فوق در مدل وجود دارد، ولی این مسئله منوط به شناسایی و تبدیل شرایط واقعی به شرایط قابل فهم برای مدل است. این موضوع دقیقاً بیان‌کننده آن است که مدل هیچ پیش‌فرض و شناختی از شرایط موجود در خاک، روش‌های آبیاری و سایر موارد نداشته و صحت نتایج حاصله بستگی کاملی به تعریف درست شرایط برای مدل دارد.

درخصوص پیش‌بینی چگونگی حرکت املاح در خاک توسط مدل هایدروس آنچه در این تحقیق مشاهده شد این است که توانایی شبیه‌سازی مدل در این زمینه به اندازه حرکت آب در خاک نیست. مدل در پیش‌بینی حرکت املاح در خاک و نحوه توزیع آن‌ها چندان رضایت بخش عمل نکرده است. البته در حصول این نتایج علاوه بر توانایی مدل دو موضوع نیز نقش مهم دارد.

اول اینکه دقت داده‌های اندازه‌گیری شده و مهم‌تر از آن چگونگی اندازه‌گیری داده‌ها نیز بسیار حائز اهمیت است. با توجه به اینکه هایدروس ابتدا حجم کنترل مربوط به هندسه جریان را مش‌بندی (شبکه‌بندی) کرده و سپس

معادلات مربوطه را در گره‌های هر شبکه به صورت قدم به قدم حل می‌کند، می‌بایست هنگام داده‌برداری حتماً داده‌ها به صورت نقطه‌ای برداشت شوند و از داده-برداری به صورت یک محدوده خودداری شود. زیرا در نهایت در زمان ورود داده‌ها به مدل خصوصاً جهت انجام حل معکوس می‌بایست هر داده را به یک گره اختصاص داد و تخصیص داده‌های یک محدوده به میانگین آن محدوده خالی از اشکال نخواهد بود. به طور مثال، اندازه‌گیری رطوبت برای عمق ۲۰-۰ سانتی‌متر در زمان  $t$  به این مفهوم خواهد بود که در لحظه زمانی  $t$  کل عمق ۲۰-۰ سانتی‌متر دارای آن رطوبت خاص می‌باشد و این کاملاً اشتباه است. زیرا در طول این عمق نه زمان و نه مقدار رطوبت ثابت نبوده و مدل به درستی از سطح خاک با حل معادلات به صورت گره به گره که هم مستلزم گذر زمان و هم تغییر در مقدار رطوبت است عمل می‌کند. به همین دلیل داده‌برداری با استفاده از سنسورها و یا هر وسیله‌ای که بتواند در یک زمان خاص و برای یک نقطه خاص داده‌ها را ثبت کند توصیه می‌شود.

دوم اینکه پارامترهای هیدرولیکی خاک اغلب جنبه فیزیکی داشته و یا قابل لمس هستند و همچنین اطلاعات و داده‌های قابل استنادی در منابع و مطالعات هر منطقه

#### منابع مورد استفاده

- Bannayan M and Hoogenboom G, 2009. Using pattern recognition for estimating cultivar coefficients of a crop simulation model. *Field Crops Research* 111:290-302.
- Besharat S and Mollae Tavana S, 2016. Simulation of soil water profile in surface and subsurface drip irrigation systems by HYDRUS-2D.pdf. *Journal of Water and Soil Conservation* 23 (2): 225-38. (In Persian with English abstract).
- Ghorbani B, 1997. A mathematical model to predict surface runoff under sprinkler irrigation conditions. Ph. D. Thesis, Silsoe College, Cranfield University, Bedford, UK.
- Heidari Z, Farasati M and Ghorbadian R, 2018. Effect of discharge on water pattern distribution in surface drip irrigation and simulation it with HYDRUS-2D model.Pdf. *Journal of Irrigation and Water Engineering* 32 (8): 132-44. (In Persian with English abstract).
- Javadzadeh SF, Khaledian M, Navabian M and Shahinrokhsar P, 2015. Simulation of heterogeneous soil

درخصوص آن‌ها می‌توان یافت. بنابراین می‌توان در هنگام بهینه‌سازی پارامترهای هیدرولیکی خاک اغلب مقادیر پیش‌فرض مدل را جهت بهینه شدن انتخاب کرد و حتی بر اساس تحقیقات و اندازه‌گیری‌های محلی انجام شده، مقادیر منطقی برای حداقل و حداکثر آنها لحاظ کرد. بنابراین مدل می‌تواند اغلب این پارامترها را با توجه به داده‌های واقعی بهینه کرده و در نتیجه در هنگام برآوردها به داده‌های اندازه‌گیری شده نزدیک‌تر شود. درحالیکه اغلب پارامترهای انتقال املاح به جز مواردی مانند پخشیدگی طولی و پخشیدگی عرضی عمدتاً بسیار پیچیده و غیرقابل لمس می‌باشد. به همین دلیل مطالعه پیرامون پارامترهای انتقال املاح در خاک با هدف اندازه-گیری مقادیر حدودی برای آن‌ها عموماً بسیار پیچیده و زمان‌بر خواهد بود. به همین علت مطالعات و تحقیقاتی که در هر منطقه بتوان مقادیر منطقی برای این پارامترها یافت بسیار اندک و اغلب ناموجود است. بنابراین عموماً فقط از دو پارامتر فوق جهت بهینه‌سازی حرکت املاح در خاک استفاده شده و برای سایر پارامترها از مقادیر پیش‌فرض مدل استفاده می‌گردد و همین موضوع نقش بسیاری در کاهش دقت مدل دارد.

- salinity under unsteady condition from a line source. *Journal of Water and Soil Conservation* 22 (4): 203–16. (In Persian with English abstract).
- Khanmohamadi N and Besharat S, 2013. Simulating wetting front in drip irrigation using HYDRUS-2D. *Journal of Water and Soil Resources Conservation* 2 (4): 15-27. (In Persian with English abstract).
- Khalili M, Akbari M, Hezarjaribi A, Zakerinia M, Abbasi F and Koulaian A, 2016. Evaluation of the soil moisture profile in subsurface drip irrigation using HYDRUS-2D model. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage* 2 (10): 136–44. (In Persian with English abstract).
- Khorami M, Alizadeh A and Ansari H, 2013. Simulation of water movement and moisture redistribution under drip irrigation systems using Hydrus 2D. *Journal of Water and Soil* 27 (4): 692–702. (In Persian with English abstract).
- Mirzaie A and Nazemi A, 2011. The simulation of salts movement in soil using HYDRUS-2D Model. *Journal of Irrigation and Water Engineering* 1 (3): 59-70. (In Persian with English abstract)
- Mohammadi E and Delbari M, 2014. Simulation of water and salt transport in soil using the HYDRUS-1D software. *Water and Soil Science* 25 (1): 67-78. (In Persian with English abstract)
- Naghavi H, Hosseininia M, karimi Googhari SH and Irandost M, 2012. Capability of HYDRUS-2D simulation model for simulating wetting pattern in soil under subsurface drip irrigation systems. *Journal of Water and Soil Science* 16 (61) :59-69. (In Persian with English abstract).
- Provenzano G, 2007. Using HYDRUS-2D simulation model to evaluate wetted soil volume in subsurface drip irrigation systems. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 133 (4): (342-349).
- Quinton J, 1994. The validation of physically based erosion models. Ph.D. Thesis, Silsoe College, Cranfield University.
- Ramezani EH, Pashazadeh M, Nazari B, Sotoudehnia A and Kaviani A, 2019. Study of salinity changes in soil profile of four agricultural crops in Qazvin Plain under drip-tape irrigation with AquaCrop model. *Journal of Water and Soil* 32 (3): 475–87. (In Persian with English abstract).
- Shekofteh H, Afyuni M, Hajabbasi A, Nezamabadi Pour H, Abassi F and Sheikholeslam F, 2014. Nitrate leaching modeling from soil under potato cultivation using Neural Fuzzy Adaptive Inference Network in combination with genetic algorithm. *Journal of Water and Soil Science* 70: 13–23. (In Persian with English abstract).
- Soltani M, Rahimikhoob A, Sotoodehnia A and Akram M, 2018. Evaluation of HYDRUS\_2D software in simulating dry drainage. *Journal of Water Research in Agriculture* 31 (4): 595-607. (In Persian with English abstract).
- Tabei M, Boroomandnasab S, Soltani MA and Nasrollahi A, 2015. Simulation of salinity distribution in soil under drip irrigation tape with saline water using SWAP model. *Journal of Water and Soil* 29 (3): 590–603. (In Persian with English abstract).