Shahid Chamran University of Ahvaz

**Irrigation Sciences and Engineering (JISE)**
**Vol. 45, No. 1, Spring 2022, p. 99-115**

Journal homepage: https://jise.scu.ac.ir

**Research Paper**

**EXTENDED ABSTARCT**

# Estimation of Soil Hydraulic and Solute Transport Parameters Using HYDRUS-2D (Case Study: Qazvin Interception Drain)

M. Latifi[1], M. Soltani[2*] and H. Ramezani Etedali[3]

*1- M.Sc. Student, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Imam Khomeini International University - Qazvin-Iran.*

*2*- Corresponding Author, Assistant Professor, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Imam Khomeini International University - Qazvin-Iran. (msoltani@eng.ikiu.ac.ir).*

*3- Associate Professor, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Imam Khomeini International University - Qazvin-Iran.*

**ARTICLE INFO**

*Artlcle history:*
Received: 19 February 2021
Revised: 26 May 2021
Accepted: 29 May 2021

*Keywords:*
Sensitivity analysis, Calibration, Validation, Aquifer thickness, Solute expansion, Evaporation.

**TO CITE THIS ARTICLE:**

Latifi, M., Soltani, M., Ramezani Etedali, H. (2022). 'Estimation of Soil Hydraulic and Solute Transport Parameters Using HYDRUS-2D (Case Study: Qazvin Interception Drain)', Irrigation Sciences and Engineering, 45(1), pp. 99-115. doi: 10.22055/jise.2021.36752.1962.

## Introduction

The recent growth in population has led to an increase in food supply requirements which, in turn, has resulted in an increase in groundwater exploitation. In areas where fresh and saline aquifers are adjacent, the overexploitation of fresh groundwater leads to a decrease in fresh ground water level and, as a result hydraulic gradient of saline groundwater towards fresh groundwater increases. Also, a decrease in fresh groundwater level leads to a decrease in the plain discharge. This way, the saline water cannot exit the plain and pressure head rises leading to extra waterlogging and salinization. Interception drain is an effective solution to intercept saline flow and discharge it out of the plain. In effect, the drainage system reduces saline water table level and prevents waterlogging and salinization. Salt marshes of Qazvin plain, located in the south-east of Qazvin, is facing the same problem and saline soil areas in the region have accordingly increased 10000 ha in recent years (Saman Abrah and Kamab Pars engineers, 2010). An interception drain system was thus implemented in the study area in order to reduce the saline water table level and prevent waterlogging and salinization. Following the construction of the drain in the region, 99 observation wells were also drilled around the drain in 9 sections (A-I) such that each row has 11 observation wells so as to monitor the groundwater fluctuation and salinity. At each section, 7 wells were located on the upslope and the remaining 4 wells were on the downslope (Sotoodehnia et al, 2014). However, it takes a lot of money and time to measure water table level and salinity from observation wells continuously. Modelling is indeed a cost-effective way to predict the water table level and salinity in future. HYDRUS is a powerful tool that can be used to simulate and monitor the drain situation reliably, but it should be calibrated for the study area. Calibration of HYDRUS means estimating soil hydraulic and solute transport parameters that can be done with HYDRUS inverse solution ability. Using HYDRUS-2D, Abbasi and Tajik (2007) estimated both soil hydraulic and solute transport parameters in the field scale. They also compared the measured and simulated values of soil moisture and salinity. Though soil moisture was almost overestimated, and

salinity was almost underestimated, the results showed that the errors were small and the model was accurately calibrated (Abbasi and Tajik, 2007). The main objective of this study was thus to assess HYDRUS-2D ability for simulating solute transport in a very saline aquifer in the study area, and also to consider saturated and unsaturated regions simultaneously. Moreover, this study employed HYDRUS-2D to simulate salinity transport in the areas where the amounts of salinity was extremely high. According to Latifi et al. (2020), evaporation is an effective factor in groundwater fluctuations.

This study also examines the effect of evaporation and aquifer thickness in an inverse solution. Aquifer thickness and evaporation have an important effect on the inverse solution due to the statistical indexes involved. Thus, some statistical indexes were carried out to assess the accuracy of calibration, and the results showed that the model was calibrated accurately.

**Methodology**

To assess the ability of HYDRUS for simulating water table level and salinity it should be calibrated by estimating soil hydrualic and solute transport parameters. To this end, a model geometry was defined as a rectangle with 500 m length and 107 m depth. Drain channel was trapezoidal with a depth of 3m and 2m wide at the bottom and was located in the middle. Also, this geometry was defined with different thicknesses (8, 32 and 107) in order to assess the effect of aquifer thickness in an inverse solution. Then, other input data including precipitation, evaporation, soil properties and input fluxes from the upward and downward of the drain were entered. Moreover, the measured water table level and salinity data from August to December 2010 were used as the inverse solution data. Evaporation was calculated by separating it from evapotranspiration using the Aqua crop model. Besides, in one case evaporation was assumed to be zero in order to assess the effect of evaporation in the inverse solution. Defined geometry and boundary conditions used in this study are illustrated in Fig.(1).

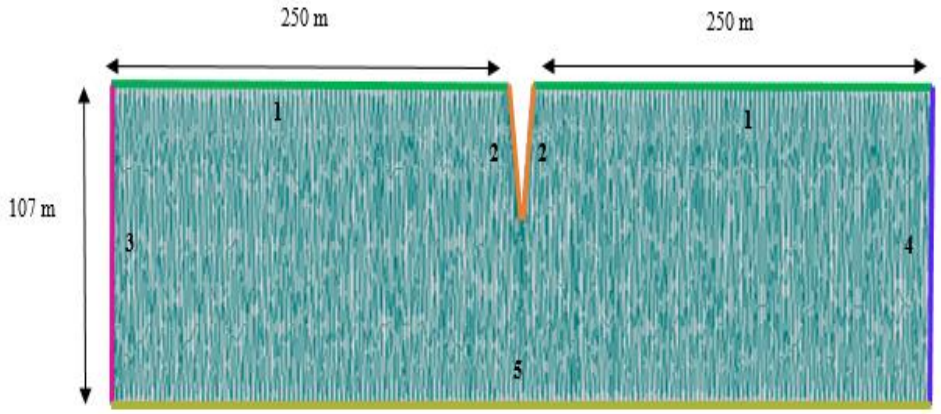



**Fig. 1- Interception drain geometry**
*** 1: atmospheric BC., 2- seepage face BC., 3-upstream Var.flux BC., 4- Downstream Var.flux BC., 5- No-flux BC.**

Then, sensitive soil hydraulic and solute transport parameters were recognized through sensitivity analysis by using the equations (1). 10, 20. This way, 30% of the parameters were added to and subtracted from the initial amount and entered as input. The sensitivity index was obtained from running the model and was evaluated in order to determine the rate of sensitivity.

$$SI = \frac{[(o_2 - o_1)/\bar{o}]}{[(i_2 - i_1)/\bar{i}]} \quad (1)$$

$o_1, o_2$ and $\bar{o}$ are primary, secondary, and average outputs, while $i_1$, $i_2$ and $\bar{\imath}$ are primary, secondary and average inputs, respectively (Hamidpour et al., 2012). Accordingly, if SI<0, the parameter is not sensitive, if 0<SI<0.5, the parameter has low sensitivity, if 0.5<SI<1, the

parameter is semi-sensitive, and if SI>1 the parameter is sensitive. Using 70% of data from August to December 2010 HYDRUS, the software was calibrated. Afterwards, the calibrated model was run for 30% of the remaining data so as to carry out validation and draw a comparison between the simulated and measured values over the 5 months. Some statistical indices were then calculated in order to assess the effectiveness of the calibrated model. These indices include: NRMSE, ME, $R^2$and CRM that can be calculated by equations (2) to (5).

$$NRMSE = \frac{\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(p_i - o_i)^2}}{\overline{o_i}} \quad (2)$$

$$R^2 = \left(\frac{n(\sum xy) - (\sum x)(\sum y)}{\sqrt{[n\sum x^2 - (\sum x)^2][n\sum y^2 - (\sum y)^2]}}\right)^2 \quad (3)$$

$$ME = Max|o_i - p_i| \quad (4)$$

$$CRM = \frac{\sum_{i=1}^{n} O_i - \sum_{i=1}^{n} P_i}{\sum_{i=1}^{n} O_i} \quad (5)$$

In these equations, $p_i$ is the simulated value, $o_i$ is the observed value, and n is the number of data. Likewise, in equation 3, x is the first set of input data and y is the second set of input data. If all the simulated values were equal to the observed values, these indices were equal to 0, 1, 0 and 0, respectively. In turn, if the indexes have standard values, the model is accurately calibrated and can be used for monitoring the drain operation. Also, if the results showed that the interception drain can control salinity expansion it can be used as a solution for other areas facing the same problem.

**Results and Discussion**

By means of equation 1, sensitive and semi-sensitive parameters were found to be residual soil water content ($\theta_r$), saturated soil water content ($\theta_s$), empirical shape factors α ($m^{-1}$), n and saturated hydraulic conductivity ( $K_s(\, m\, day^{-1})$), longitudinal dispersion (Disp.L ($m$)) and transversal dispersion (Disp.T ($m$)). The results of statistical index are shown in Figure (2).

Furthermore, the results of assessing the effect of water table thickness and evaporation in the inverse solution are shown in Table (1) and (2), respectively.

**Conclusions**

Evaporation in clay soils has an important effect on simulating groundwater fluctuation and salinity. As the results showed, the model was accurately calibrated for the study area and both water table fluctuation and salinity could be simulated and monitored reliably. Furthermore, the results of statistical indexes showed that the aquifer thickness had an important role in the inverse solution and the whole aquifer thickness should be thus considered. In addition, the saturated and unsaturated areas should be simulated simultaneously as the model accuracy increased in the unsaturated areas.

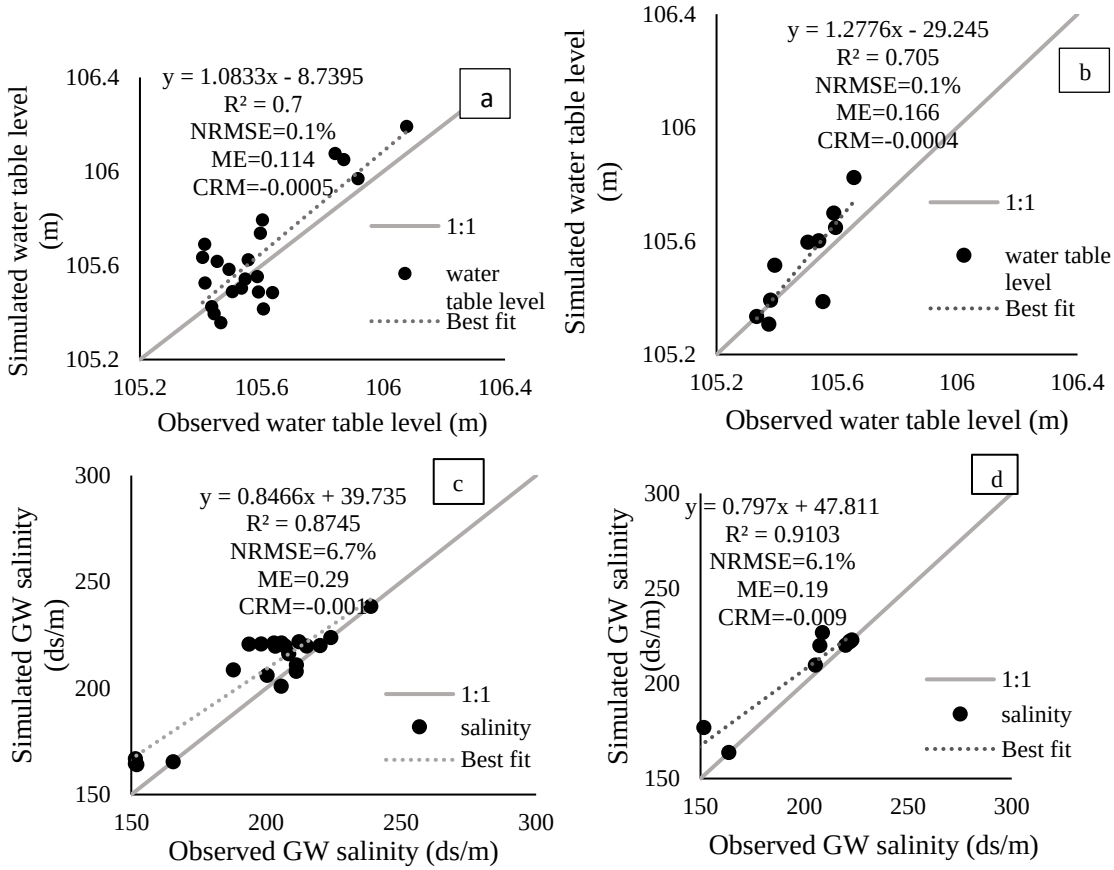



**Fig. 2- Correlation and statistical indexes between the observed and simulated water table level and GW salinity (a: Water table level calibration, b: Water table level validation, c: GW salinity calibration, d: GW salinity validation)**

**Table 1- Results of the statistical indexes for the inverse solution in the control volume with different thicknesses**

| $CRM$ | $R^2$ | $NRMSE$ | $ME$ | Aquifer thickness(m) | No |
|---|---|---|---|---|---|
| -0.02 | 0.3 | 0.15 | 0.366 | 8 | 1 |
| -0.0046 | 0.45 | 0.056 | 0.355 | 32 | 2 |
| -0.0005 | 0.7 | 0.001 | 0.114 | 107 | 3 |

**Table 2- Results of the statistical indexes for the inverse solution in 2 conditions with evaporation and without it**

| $CRM$ | $R^2$ | $NRMSE$ | $ME$ | Condition | No |
|---|---|---|---|---|---|
| -0.0005 | 0.7 | 0.001 | 0.114 | With Evp | 1 |
| -0.001 | 0.64 | 0.0013 | 0.248 | Without EVP | 2 |

**Acknowledgment**

The authors would like to thank Imam Khomeini International university, water department for giving us access to second version of HYDRUS-2D and dedicated license and Dr. Ramezani and Dr. Soltani for their financial support.

**References**

1- Abbasi, F. and Tajik, F., 2007. estimating hydrualic and solute transport parameters by inverse solution in field scale. *journal of water and soil science-quarterly agriculture and natural resources sciences and skills, 11(1),* pp 111-122 (in Persian).

3- Hamidpour, M., Afyoni, M. and Ghorbani, B., 2012. Sensitivity analysis,calibrataion and validation of Eurosem model inorder to predicting runoff in south Karoon basin. *Journal of water and soil science, 16(62)*, pp 49-60 (in Persian).

4- Latifi, M., Soltani, M. and Ramezani Etedali H., 2020. assess the effect of evaporation on water table level and drainage coefficient by means of HYDRUS-2D(case study: Qazvin interception drain). *Hydrogeology* (in Persian).

5- Saman Abrah and Kamab Pars engineers., 2010. Qazvin's marshland drainage studies ,approved report (in Persian).

6- Sotoodehnia, A., Jafari, M. and Daneshkar araste, P., 2014. effects of Qazvin interception drain in controlling salinity.*Iranian journal of soil and water research, 45(4)*, pp 447-452 (in persian)

© 2022 Shahid Chamran Universiry of Ahvaz, Ahvaz, Iran. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0 license) (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

علوم و مهندسی آبیاری جلد ٤٥، شماره‌ی۱، بهار ۱٤۰۱، مقاله پژوهشی، ص. ۱۱۵-۹۹

# برآورد پارامترهای هیدرولیکی و انتقال املاح خاک به روش حل معکوس با استفاده از HYDRUS-2D (مطالعه موردی: زهکش حائل دشت قزوین)

مهدیه لطیفی[۱]، مسعود سلطانی[۲*] و هادی رمضانی اعتدالی[۳]

۱- دانشجو کارشناسی ارشد گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره) - قزوین-ایران.

۲*- نویسنده مسئول، استادیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره) - قزوین-ایران.
msoltani@eng.ikiu.ac.ir

۳- دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره) - قزوین-ایران.

دریافت: ۱۳۹۹/۱۲/۱۳ بازنگری: ۱۴۰۰/۳/۵ پذیرش: ۱۴۰۰/۳/۸

## چکیده

**سطح بزرگی از اراضی کشور تحت تأثیر شوری و ماندابی بوده و این میزان رو به افزایش است. در مناطقی که سفره آب شور و شیرین در مجاورت هم قرار گرفته‌اند برداشت بی‌رویه منابع آب‌زیرزمینی موجب افزایش گرادیان آب شور به سمت آب شیرین و گسترش شوری می‌شود. شرایط مذکور در شوره‌زار قزوین واقع در جنوب شرقی این دشت وجود داشته و اخیراً باعث گسترش سطح اراضی شور تا ۱۰۰۰۰ هکتار شده است. برای پیشگیری از گسترش شوری زهکش حایلی به عمق سه متر در منطقه احداث شده که وظیفه آن پایین انداختن سطح آب زیرزمینی شور و خارج ساختن آن از منطقه می‌باشد. در این مطالعه به منظور شبیه‌سازی خاک منطقه با نرم‌افزار هایدروس دو بعدی (HYDRUS-2D)، پارامترهای هیدرولیکی خاک (رطوبت اشباع خاک، پارامتر مرتبط با عکس مکش در نقطه ورود هوا، پارامتر شکل منحنی مشخصه رطوبتی، هدایت هیدرولیکی اشباع) و انتقال املاح (پخشیدگی طولی و عرضی املاح) با استفاده از روش حل معکوس تخمین زده شد و مدل مورد واسنجی و صحت‌سنجی قرار گرفت. سپس شاخص‌های آماری از جمله ME، NRMSE، $R^2$ و CRM برای بررسی دقت واسنجی مدل محاسبه شد. نتایج این شاخص‌ها برای پارامترهای هیدرولیکی و انتقال املاح در مرحله واسنجی به‌ترتیب عبارتند از ۰/۱۱٤، ۰/۰۰۱، ۰/۷، ۰/۰۰۰۵- و ۰/۲۹، ۰/۰٦۷، ۰/۸۷، ۰/۰۰۱-. میزان این شاخص‌ها بیانگر دقت مدل در شبیه‌سازی است. هم‌چنین تأثیر ضخامت آبخوان و میزان تبخیر در حل معکوس برای تیمارهای جداگانه مورد بررسی قرار گرفت و شاخص‌های آماری محاسبه شده نشان دادند که ضخامت آبخوان و تبخیر در حل معکوس مدل مؤثرند.**

**کلیدواژه‌ها:** آنالیز حساسیت، واسنجی، صحت‌سنجی، تداخل آب شور و شیرین، گسترش شوری.

## مقدمه

ایران از جمله کشورهایی است که سطح بزرگی از اراضی آن متأثر از املاح است. حدود ۲۳/۵ میلیون هکتار (۱۴/۲درصد مساحت کل و ۳۰ درصد مساحت دشت‌ها) از اراضی کشور به نوعی متأثر از فرآیند شوری است (Jafari and Sotoodehnia, 2017). از سوی دیگر، رشد جمعیت و نیاز به تأمین منابع غذایی برای آن‌ها نیز غیرقابل انکار است در نتیجه، استفاده از منابع آب زیرزمینی در کشور روزبه‌روز در حال افزایش است. برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی شیرین در شوره‌زارها و مکان‌هایی که سفره‌های آب شیرین و شور در مجاورت هم قرار گرفته اند باعث افت شدید سطح آب شیرین در آبخوان و افزایش گرادیان هیدرولیکی آب شور به سمت آب شیرین می‌شود. هم‌چنین افت سطح آب موجب کاهش میزان خروجی دشت‌ها شده و آب شور موجود در آبخوان که توانایی خروج از دشت را ندارد، بالا آمده و اراضی را شور و ماندابی می‌کند. در این مواقع احداث یک زهکش حائل، خروج جریان شور از دشت را تسهیل کرده و موجب افت سطح آب زیرزمینی شور می‌شود در نتیجه از ماندابی شدن اراضی و گسترش اراضی شور و ماندابی در دشت‌های شیبدار کشور جلوگیری می‌کند (Saman Abrah and Kamab Pars engineers, 2010). اما پایش مداوم این زهکش‌ها و ارتقا عملکرد آن‌ها امری ضروری بوده و اندازه‌گیری مکرر سطح آب و شوری مستلزم صرف زمان و هزینه زیادی است. مدل‌سازی یکی از راه‌حل‌های ساده برای حل این مشکلات بوده و از دقت بالایی نیز برخوردار می‌باشد. نرم‌افزار هایدروس (HYDRUS) از قوی‌ترین ابزار در علم آب و خاک می‌باشد که می‌تواند انتقال آب، املاح و حرارت را با دقت بالایی شبیه‌سازی

کند، اما قبل از استفاده برای یک منطقه خاص باید کالیبره شود. کالیبراسیون این نرم‌افزار از طریق برآورد پارامترهای هیدرولیکی و انتقال املاح برای یک منطقه خاص صورت می‌گیرد.

Abbasi و Tajik (2007) در پژوهشی با استفاده از هایدروس دو بعدی (HYDRUS-2D) به برآورد پارامترهای هیدرولیکی خاک و انتقال املاح در سطح مزرعه‌ای پرداختند و پس از کالیبره کردن مدل برای شرایط مزرعه میزان رطوبت و املاح را مورد شبیه‌سازی قرار داده و نتایج را با مقادیر اندازه‌گیری شده مورد مقایسه قرار دادند، نتایج نشان داده‌اند که میزان رطوبت کمی بیشتر از مقدار واقعی و غلظت املاح کمتر از مقدار واقعی برآورد شده است. ولی این اختلاف اندک بوده و مدل برای استفاده در شرایط مزرعه‌ای کالیبره شده است( Abbasi and Tajik, 2007). در تحقیقی دیگر برای ارزیابی توزیع رطوبت و جذب ریشه ذرت در آبیاری جویچه‌ای از قابلیت حل معکوس هایدروس دو بعدی (HYDRUS-2D) استفاده شده است. بررسی تیمارهای مختلف نشان داده است مدل دقت خوبی در برآورد توزیع رطوبت دارد ولی جذب آب توسط ریشه کم برآورد شده است ( Baride and Besharat, 2016). هم‌چنین از حل معکوس نرم‌افزار هایدروس یک‌بعدی (HYDRUS-1D) برای شبیه‌سازی آبشویی یون نیترات در خاک لوم‌شنی نیز استفاده شده است. در این مطالعه ایزوترم‌های جذب و ضرایب پخشیدگی و انتشار و رطوبت روان–ساکن تخمین زده شده‌اند و نتایج نهایی نشان دهنده‌ی دقت مدل در شبیه‌سازی حرکت یون نیترات بوده است (Sayad et al., 2013). در مطالعه‌ای دیگر به‌منظور بررسی تغییرات هدایت هیدرولیکی خاک از حل معکوس نرم‌افزار هایدروس یک‌بعدی (HYDRUS-1D) استفاده شده و تغییرات زمانی این پارامتر در خاک لوم‌رسی تحت آبیاری مورد شبیه‌سازی قرار گرفته است. نتایج نشان داد، روش حل معکوس در صورت وجود داده‌های کافی می‌تواند روشی مناسب برای تخمین ویژگی‌های هیدرولیکی و تغییرات زمانی آن‌ها باشد ( Zakerinia et al., 2007). در برخی از پژوهش‌ها نیز انتقال آب و املاح در منطقه شوره‌زار قزوین توسط نرم‌افزارهای دیگری مورد شبیه‌سازی قرار گفته است. در پژوهشی مدل سیپ–دبلیو (Seep/w) برای شبیه‌سازی تراز سطح ایستابی و کنترل زهکش حائل دشت قزوین و مدل سیترن–دبلیو (Ctran/w) برای شبیه‌سازی انتقال املاح مورد کالیبراسیون قرار گرفته است و نتایج نشان داده‌اند این مدل با دقت بالایی توانسته شرایط منطقه را شبیه‌سازی کند (Jafari, 2011). در مطالعه‌ای دیگر نیز منطقه تحت شبیه‌سازی با نرم‌افزار مادفلو (ModFlow) قرار گرفته است و شاخص‌های آماری محاسبه شده نشان دادند که این مدل نیز به خوبی برای منطقه کالیبره شده و با دقت تراز سطح ایستابی را شبیه‌سازی کرده است (Ghorbani et al., 2016).

در این مقاله هدف تخمین پارامترهای هیدرولیکی و انتقال املاح در منطقه احداث زهکش حایل در شوره‌زار دشت قزوین است. این هدف به‌صورت گام به گام یعنی برآورد پارامترهای هیدرولیکی خاک در یک گام و سپس برآورد پارامترهای انتقال املاح در گام دیگر و با استفاده از نرم‌افزار هایدروس دوبعدی (HYDRUS-2D) صورت گرفته است. تفاوت این کار با سایر تحقیقات انجام شده در این منطقه، شبیه‌سازی هم‌زمان محیط اشباع و غیراشباع است درصورتی‌که در سایر تحقیقات تنها بخش اشباع در نظر گرفته شده است، علت انتخاب نرم‌افزار هایدروس دوبعدی (HYDRUS-2D) نیز توانایی شبیه‌سازی هم‌زمان این دو ناحیه است. به‌علاوه شبیه‌سازی مقادیر بسیار بالای شوری با استفاده از نرم‌افزار هایدروس دوبعدی (HYDRUS-2D) نیز از تفاوت‌های این مطالعه با سایر مطالعه‌های انجام شده به وسیله نرم‌افزار هایدروس (HYDRUS) می‌باشد. طبق مطالعه‌های Latifi etal (2020)، تبخیر از عوامل مؤثر در نوسانات سطح ایستابی بوده و در شرایط یکسان از لحاظ تراز سطح آب زیرزمینی، میزان رطوبت خاک و اقلیم در بافت خاک‌های مختلف، این تأثیر در خاک‌های رسی بیشتر بوده و مقادیر ناچیز تبخیر نیز باید در شبیه‌سازی خاک‌های رسی در نظر گرفته شوند (Latifi et al., 2020). بنابراین با توجه به رسی بودن بافت خاک منطقه در این مطالعه، مقادیر تبخیر در بازه زمانی شبیه‌سازی (مرداد تا آذر ۱۳۸۹) با استفاده از نرم افزار آکواکراپ (Aqua crop) برآورد شده و در فرآیند حل معکوس نیز در نظرگرفته شده است. درحالی‌که مطالعه‌های قبلی انجام شده در شوره‌زار دشت قزوین عامل تبخیر در نظر گرفته نشده است. هم‌چنین در این مطالعه به بررسی تأثیر ضخامت آبخوان در تخمین پارامترهای هیدرولیکی نیز پرداخته شده است.

## مواد و روش‌ها

### منطقه مورد مطالعه

شوره‌زار مرکزی قزوین با طول شرقی ۳۸۰ تا ۴۲۰ کیلومتر و عرض شمالی ۳۹۲۰ تا ۳۹۸۰ کیلومتر (بر حسب UTM) در جنوب‌شرقی دشت قزوین به مساحت ۶۴۴۰۰ هکتار با ارتفاع متوسط ۱۱۳۵ تا ۱۱۴۵ متر از سطح دریا قرار داشته و بر اساس اقلیم‌نمای دومارتن دارای اقلیم نیمه خشک سرد می‌باشد. وسعت هسته‌ی مرکزی این شوره‌زار، در گذشته حدود ۱۰۰۰۰ هکتار بوده ولی امروزه به ۲۰۰۰۰ هکتار افزایش یافته و علت این پدیده افت کلی سطح آب زیرزمینی شیرین، افزایش شوری و کاهش جریان خروجی از دشت می‌باشد (Saman Abrah and Kamab Pars engineers, 2010). به‌منظور مهار پیش‌روی شوری زهکش حائلی به طول ۳۰ کیلومتر در قسمت شمال‌شرقی منطقه احداث شده و به منظور بررسی رفتار آب زیرزمینی و کنترل عملکرد زهکش، در این منطقه تعداد ۹۹ چاهک مشاهداتی در نه مقطع عمود بر مسیر زهکش (A تا I) حفر شده اند. در هر مقطع ۱۱ چاهک قرار دارند که هفت چاهک در بالادست زهکش و چهار چاهک در پایین‌دست آن قرار دارند. این چاهک‌ها به فواصل

*DOI:* 10.22055/JISE.2021.36752.1962

۱۰، ۲۵، ۵۰، ۱۰۰، ۲۵۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰متر در بالادست و ۱۰، ۲۵، ۵۰ و ۲۵۰ متری در پایین‌دست قرار گرفته و ماهانه از نظر عمق آب زیرزمینی و شوری مورد نمونه‌برداری و پایش قرار گرفته‌اند (Sotoodehnia et al, 2014). در این مطالعه از داده‌های چاهک‌های موجود در مقطع B استفاده شده است زیرا به دلیل قرارگیری در ابتدای مسیر زهکش، جریان بالادستی تاثیرگذاری اندکی بر آن دارد. چاهک‌های موجود در بالادست مقطع B با BU و چاهک‌های موجود در پایین‌دست مقطع B با علامت BD نشان داده شده و با توجه به فاصله از زهکش به صورت BU1، BU2 و غیره نام‌گذاری شده‌اند. در شکل (۱) منطقه مورد مطالعه، محل دقیق زهکش، مقاطع و چاهک‌های مشاهداتی مشخص شده است.

## نرم‌افزار هایدروس دوبعدی (HYDRUS-2D)

هایدروس (HYDRUS) مدلی تحت ویندوز، برای شبیه‌سازی حرکت آب، گرما و املاح، جذب آب توسط ریشه و هم‌چنین رشد ریشه در محیط‌های متخلخل دوبعدی و سه‌بعدی است که توسط Simunek etal (2006)، در آزمایشگاه شوری خاک امریکا بسط داده شد. نرم‌افزار هایدروس (HYDRUS) برای شبیه‌سازی جریان در محیط‌های اشباع از معادله‌های ریچاردز و برای شبیه‌سازی انتقال املاح و گرما از معادله‌های انتقال–انتشار استفاده می‌کند (Šimůnek et al., 2011).

یکی از ویژگی‌های این مدل تخمین پارامترهای هیدرولیکی خاک و پارامترهای انتقال املاح به روش حل معکوس می‌باشد. این مدل برای حل عددی معادله‌های حاکم از روش اجزای محدود خطی نوع گالرکین (Galerkin) و برای بهینه‌سازی پارامترها از روش لونبرگ–مارکوارت (Levenberg-Marquardt) استفاده می‌کند. حل معکوس این مدل در بسیاری از مطالعه‌های مزرعه‌ای و آزمایشگاهی برای بهینه‌سازی و تخمین پارامترها به‌کار رفته و نتایج آن نسبتا رضایت بخش بوده است (Ghobadian et al., 2014).

## تعیین هندسه جریان

برای حل معکوس پارامترهای هیدرولیکی و انتقال املاح در نرم‌افزار ابتدا ژئومتری منطقه تعریف می‌شود. عمق آبخوان شوره‌زار دشت قزوین ۱۰۷ متر بوده و شعاع تاثیر زهکش ۲۵۰ متر بالادست و ۲۵۰ متر پایین‌دست آن را در بر می‌گیرد و در شکل (۲) نشان داده شده است. بررسی داده‌های چاهک‌های موجود در فواصل دورتر از ۲۵۰ متر در بالادست زهکش نشان داده است، در فاصله ۵۰۰ و ۱۰۰۰ متری، زهکش تاثیر چندانی در پایین انداختن سطح ایستابی و کاهش شوری ندارد (Ghorbani et al., 2016).

سپس سایر ورودی‌ها ازجمله داده‌های اقلیمی (بارش، تبخیر) (لازم به ذکر است به دلیل شوری بسیار بالا آب و خاک در منطقه شوره‌زار، کشاورزی در این منطقه وجود نداشته و میزان تعرق صفر است)، خصوصیات خاک و شار جریان‌های ورودی از بالادست و پایین‌دست زهکش به نرم افزار داده شده‌اند و در شکل (۲) بخش هایی که با اعداد یک، دو، سه، چهار و پنج مشخص شده‌اند به‌ترتیب به‌عنوان مرز اتمسفری که تبخیر از آن صورت می‌گیرد، سطح نشت که اجازه ی ورود آب را می‌دهد، شار جریان ورودی از بالادست، شار جریان ورودی از پایین‌دست و لایه نفوذ ناپذیر که اجازه عبور هیچ جریانی را نمی‌دهد، برای نرم‌افزار تعریف شده‌اند.

## آنالیز حساسیت، واسنجی و صحت سنجی

از ۷۰ درصد داده‌های اندازه‌گیری شده رقوم سطح آب در چاهک‌های مشاهداتی از مرداد تا آذر ۱۳۸۹ برای حل معکوس نرم‌افزار استفاده شده و پارامترهای هیدرولیکی حساس خاک که قبلاً با آنالیز حساسیت مشخص شده‌اند، برآورد می‌شوند. پارامترهای هیدرولیکی خاک شامل $\theta_r$ $(-)$، $\theta_s$ $(-)$، $\alpha$ $(m^{-1})$، n (-)، $K_s$ $(m\ day^{-1})$ و l (-) است که به‌ترتیب نشان دهنده رطوبت باقی‌مانده خاک، رطوبت اشباع خاک، پارامتر مرتبط با عکس مکش در نقطه ورود هوا، پارامتر شکل منحنی مشخصه رطوبتی، هدایت هیدرولیکی اشباع و پارامتر پیوستگی منافذ خاک می‌باشد. در فرآیند آنالیز حساسیت پارامترهای حساس شناخته شده و مورد حل معکوس قرار گرفته‌اند. سپس فرآیند صحت‌سنجی نیز با ۳۰ درصد بقیه داده‌ها انجام شده است. حساسیت این شاخص‌ها با توجه به رابطه (۱) تعیین می‌شود.

$$SI = \frac{[(O_2 - O_1)/\bar{O}]}{[(I_2 - I_1)/\bar{I}]} \qquad (۱)$$

که در آن SI شاخص حساسیت، $O_1$، $O_2$ و $\bar{O}$ به‌ترتیب مقدار اولیه، ثانویه و متوسط پارامتر خروجی و $I_1$، $I_2$ و $\bar{I}$ نیز به‌ترتیب مقدار اولیه، ثانویه و متوسط پارامتر ورودی است (Hamidpour et al., 2012). به تمامی پارامترها ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد کم و اضافه می‌شود و هربار شاخص SI برای آن‌ها محاسبه می‌شود. درصورتی‌که میزان این شاخص برای پارامتری صفر تا ۰/۵ باشد، مدل نسبت به آن پارامتر حساسیت کمی دارد. مقدار ۰/۵ تا یک بیانگر نیمه‌حساس بودن پارامتر مذکور و مقادیر بزرگتر از یک نشان دهنده حساس بودن پارامتر است (Hamidpour et al., 2012). پس از حل معکوس پارامترهای هیدرولیکی خاک، نتایج حل معکوس به‌صورت اعداد ثابت در نرم‌افزار قرار داده شده و بار دیگر نرم‌افزار برای پارامترهای حساس انتقال املاح مطابق روش ذکر شده در مرحله قبل واسنجی و صحت‌سنجی می‌شود. پارامترهای انتقال املاح شامل Bulk.D $(M\ m^{-3})$، Disp.L $(m)$، Disp.T $(m)$، Frac (-)، Thlomb (-)، Diffus.W $(m^2 day^{-1})$، Diffus.G $(m^2 day^{-1})$ است که به‌ترتیب عبارتند از چگالی حجمی خاک، پخشیدگی طولی، پخشیدگی عرضی، ضریب جذب، میزان آب غیرمتحرک، ضریب پخش مولکولی در آب آزاد و ضریب پخش مولکولی در هوای خاک. از بین موارد فوق پخشیدگی طولی و عرضی

حساس شناخته شده و مورد حل معکوس واقع شدند و از داده‌های شوری اندازه‌گیری شده از چاهک‌های مشاهداتی نیز به‌عنوان ورودی حل معکوس استفاده شده است. بعد از اتمام حل معکوس مدل، مقادیر به‌دست آمده برای پارامترهای هیدرولیکی و انتقال املاح وارد نرم‌افزار شده و این بار نرم‌افزار به‌صورت مستقیم اجرا می‌شود و خروجی‌های نرم‌افزار با مقادیر اندازه‌گیری شده در چاهک‌های مشاهداتی مقایسه شده و با محاسبه شاخص‌های آماری کارایی مدل برای شبیه‌سازی انتقال آب و املاح مورد سنجش قرار می‌گیرد. اگر شاخص‌ها در بازه مورد قبول واقع شده باشند مدل برای منطقه کالیبره شده است. شاخص‌های آماری مورد استفاده در این مطالعه طبق معادله‌های (۲) تا (۵) محاسبه می‌شوند و به‌ترتیب نشان‌دهنده خطا ماکزیمم، میانگین خطای مربع نرمال شده، همبستگی و ضریب جرم باقی‌مانده.

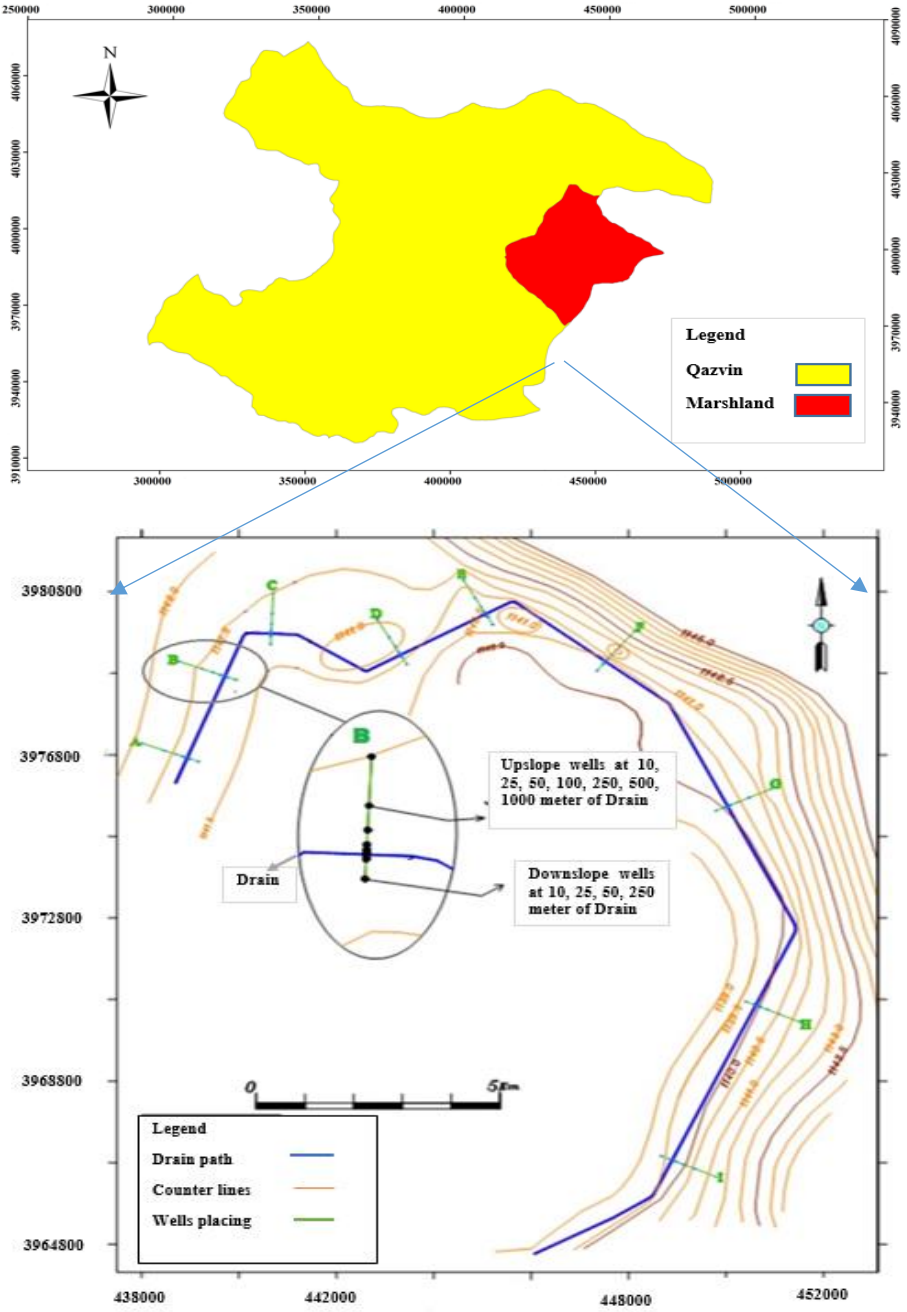



**Fig. 1- Drain location, sections and observation wells**

**شکل ۱- محل قرارگیری زهکش، مقاطع و چاهک های مشاهداتی**

*DOI:* 10.22055/JISE.2021.36752.1962

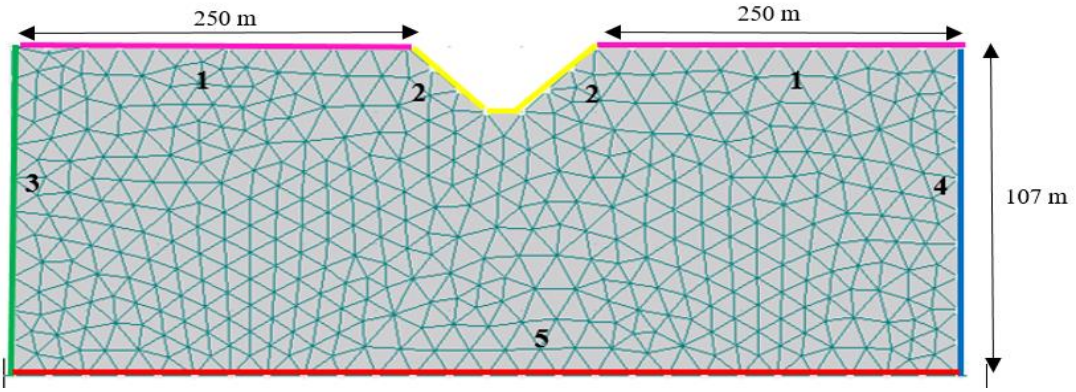



**Fig. 2- Interception drain geometry**
*** 1: atmospheric BC., 2- seepage face BC., 3-upstream Var.flux BC., 4- Downstream Var.flux BC., 5- No-flux BC.**

**شکل ۲-هندسه جریان تعریف شده در نرم افزار (*۱: مرز اتمسفری، ۲: سطح نشت، ۳: جریان ورودی بالادست، ٤: جریان ورودی پایین دست، ٥: بدون جریان)**

$$ME = max|P_i - O_i|_{i=1}^{n} \quad (۲)$$

$$NRMSE = \frac{\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(p_i - o_i)^2}}{\bar{o}_i} \quad (۳)$$

$$R^2 = \left(\frac{n(\sum xy) - (\sum x)(\sum y)}{\sqrt{[n\sum x^2 - (\sum x)^2][n\sum y^2 - (\sum y)^2]}}\right)^2 \quad (۴)$$

$$CRM = \frac{\sum_{i=1}^{n} O_i - \sum_{i=1}^{n} P_i}{\sum_{i=1}^{n} O_i} \quad (۵)$$

در این روابط $P_i$ مقادیر برآورد شده، $O_i$ مقادیر اندازه گیری شده و $n$ تعداد نمونه است. همچنین در رابطه ۴، X سری اول داده های ورودی و Y سری دوم داده های ورودی است که در اینجا به ترتیب داده های مشاهداتی و اندازه گیری شده می باشد. اگر تمامی داده‌های شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده برابر باشند، نتایج شاخص های آماری ME، NRMSE و $R^2$ و CRM به ترتیب صفر، صفر، یک و صفر خواهد شد. همچنین مقادیر مثبت شاخص CRM نشان از کم‌برآورد مدل و مقادیر منفی آن نشان از بیش‌برآورد مدل دارد. ورودی‌های مدل در این مرحله عوامل اقلیمی مانند بارش و تبخیر، شارجریان‌های ورودی از بالادست و پایین‌دست زهکش و داده‌های اندازه‌گیری شده تراز سطح ایستابی (به‌منظور استفاده در حل معکوس) است. داده‌های ورودی در تمامی تیمارهای دارای عمق‌های مختلف یکسان بوده است. پس از حل معکوس مدل و تخمین پارامترهای هیدرولیکی حساس، مدل به‌صورت مستقیم اجرا می‌شود و خروجی آن داده‌های شبیه‌سازی شده تراز سطح ایستابی است که با محاسبه شاخص‌های آماری با داده‌های اندازه‌گیری شده مقایسه می‌شود.

### تعیین ضخامت مناسب هندسه جریان

در حل عددی استفاده از یک عدد ثابت برای پارامترهای هیدرولیکی از جمله Ks به معنای تخمین هدایت هیدرولیکی در مکان ها و جهت‌های مختلف است. بنابراین ابعاد و ضخامت آبخوان از پارامترهای مهم در تعیین Ks می‌باشند. در این مطالعه حل معکوس پارامترهای هیدرولیکی برای سه تیمار آبخوان با عمق هشت متر (دو و نیم برابر عمق زهکش)، آبخوان با عمق ۳۲ متر (عمق موثر آبخوان طبق داده های گرافیکی نرم‌افزار) و آبخوان با عمق ۱۰۷ متر (تا لایه غیرقابل نفوذ) مورد بررسی قرار گرفت و بر طبق نتایج شاخص‌های آماری و مقایسه مقادیر تخمین زده شده با مقادیر گزارش شده هدایت هیدرولیکی، عمق بهینه شبیه‌سازی برای هندسه جریان مشخص گردید.

### تأثیر تبخیر در حل معکوس پارامترهای هیدرولیکی

همان‌طور که پیش‌تر ذکر شد تبخیر از عوامل مهم در نوسانات سطح ایستابی به‌خصوص در خاک‌های رسی است. با دانستن این موضوع و با توجه به رسی بودن بافت خاک منطقه، اثر تبخیر بر حل معکوس پارامترهای حساس مورد ارزیابی قرار گرفته است. به این منظور دو هندسه جریان مطابق با شکل (۲) در نرم‌افزار تعریف شده است، در تیمار اول مقادیر تبخیر در فرآیند حل معکوس در نظر گرفته شده و در تیمار دوم این مقادیر برابر با صفر در نظر گرفته شده‌اند. سپس با توجه به شاخص‌های آماری محاسبه شده برای هر یک از

تیمارها اثر تبخیر و اهمیت حضور آن در فرآیند حل معکوس مورد بررسی قرار گرفت.

## نتایج و بحث

### سطح ایستابی

### آنالیز حساسیت

طبق توضیحات ذکر شده در مرحله قبل پارامترهای حساس مشخص شده‌اند و شکل (۳) میزان حساسیت پارامترهای هیدرولیکی حساس را در بالادست و پایین‌دست زهکش نشان می‌دهد. بر اساس این نمودارها پارامتر $\theta_S$ حساس‌ترین پارامتر و بعد از آن به‌ترتیب $\alpha$، N و $K_s$ دارای حساسیت کمتری می‌باشند. هم‌چنین پارامترهای N و $K_s$ نیمه‌حساس هستند. برای بررسی دقیق‌تر در حالت کاهش ۱۰ درصدی پارامترها به ترتیب در بالادست و پایین‌دست زهکش، شاخص حساسیت برای $\theta_S$، ۲/۵ و ۱/۶، برای $\alpha$، ۱/۶ و ۱/۳، برای $N$، ۰/۵ و ۰/۴ و برای $K_S$، ۰/۵۲ و ۰/۵۴ می‌باشد که درستی تحلیل بالا را اثبات می‌کنند.

### واسنجی و صحت سنجی

پس از تعیین پارامترهای حساس و تخمین آن‌ها از طریق قابلیت حل معکوس نرم افزار، از ۷۰ درصد داده‌ها برای واسنجی مدل و از ۳۰ درصد باقی‌مانده برای صحت‌سنجی استفاده شد. نتایج شاخص‌های آماری پس از واسنجی و صحت‌سنجی پارامترهای هیدرولیکی حساس خاک، به ترتیب در شکل (۴ a و b) آورده شده است. نتایج شاخص‌های آماری محاسبه شده در مرحله واسنجی و صحت‌سنجی پارامترهای هیدرودینامیکی نشان می‌دهد مدل از این نظر به خوبی کالیبره شده است. تمامی شاخص‌ها در بازه‌های مورد قبول قرار دارند و علامت منفی شاخص CRM نشان دهنده بیش‌برآورد مدل در شبیه‌سازی تراز سطح ایستابی است که این بیش‌برآورد بسیار کم بوده و قابل قبول می‌باشد. در شکل (۵) مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده تراز سطح ایستابی از مرداد تا آذر ۱۳۸۹ مورد مقایسه قرار گرفته است.

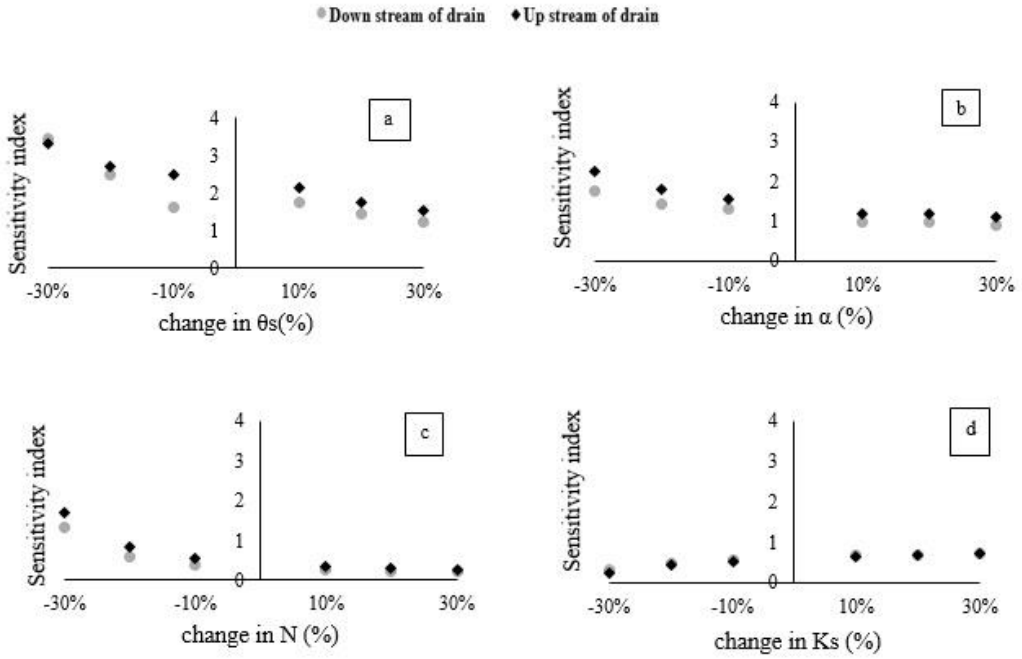



**Fig. 3-Sensitivity analysis of sensitive Hydrualic parameters (a:$\theta_s$, b:α, c:N, d:ks)**
**شکل ۳-نمودارهای آنالیز حساسیت پارامترهای هیدرولیکی حساس(a:$\theta_s$, b:α, c:N, d:ks)**

*DOI:* 10.22055/JISE.2021.36752.1962

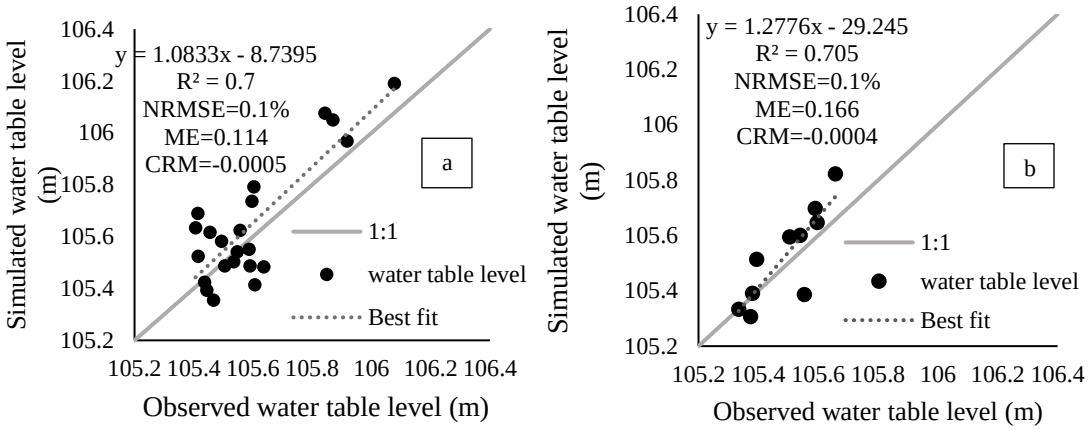



**Fig. 4- Correlation and statistical indexes between observed and predicted water table level (a: calibration, b: validation)**

**شکل ٤-شاخص های آماری محاسبه شده بین داده های مشاهداتی و شبیه سازی شده تراز سطح ایستابی (a: واسنجی، b: صحت سنجی)**

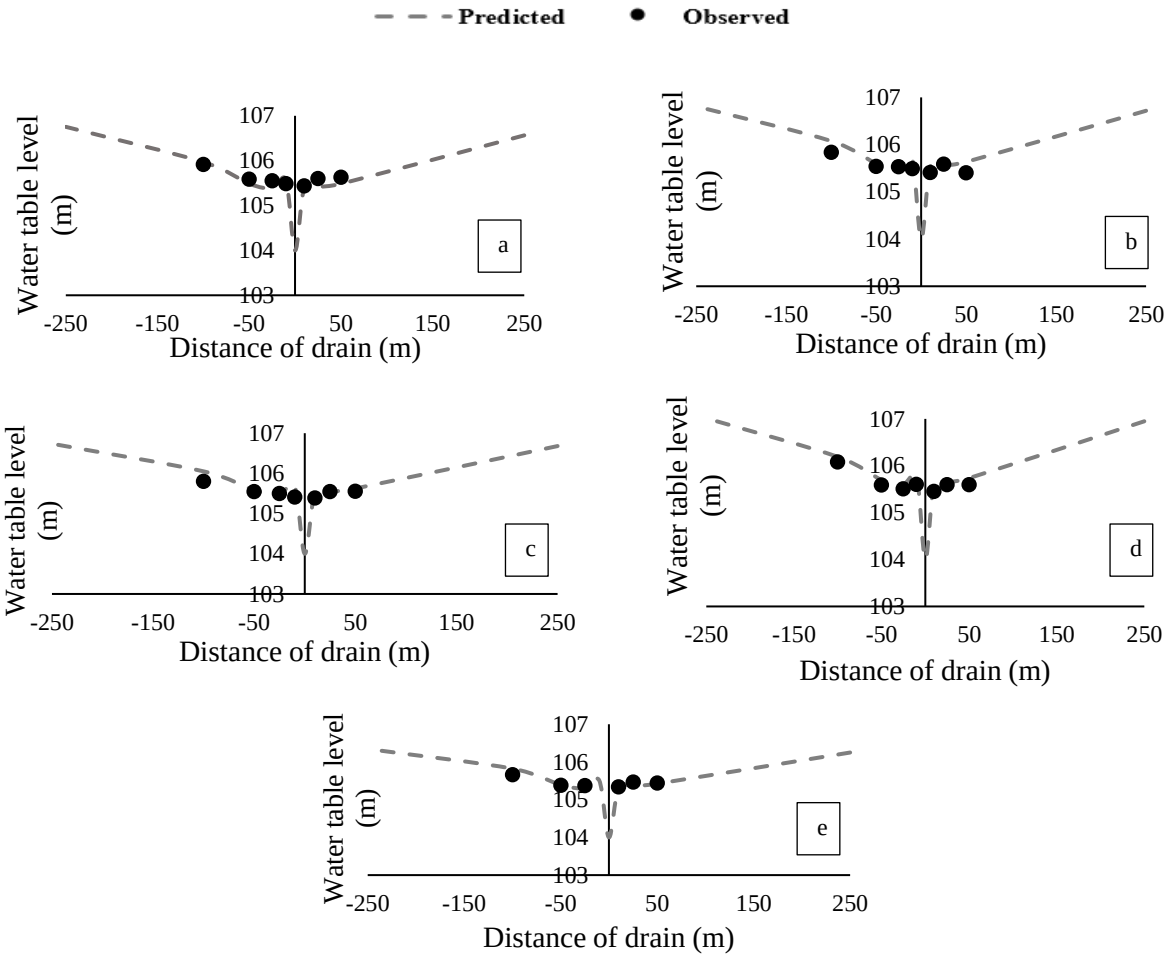



**Fig. 5- Predicted and observed water table level August to December 2010 (a: August, b: September, c:October, d:November, e:December)**

**شکل ۵۳-تراز سطح ایستابی مشاهداتی و مدلسازی شده (a: مرداد، b: شهریور، c: مهر، d: آبان، e: آذر)**

همان‌طور که در شکل (۵) دیده می‌شود، تراز سطح ایستابی در چاهک‌های مشاهداتی با فاصله گرفتن از زهکش به سطح زمین نزدیک می‌شود، این موضوع در نمودارهای مربوط به شبیه‌سازی تراز سطح ایستابی توسط نرم‌افزار نیز به‌وضوح مشخص است، که نشان‌دهنده دقت مدل در شبیه‌سازی تراز سطح ایستابی می‌باشد. هم‌چنین براساس نمودارهای مربوط به شبیه‌سازی تراز سطح ایستابی شعاع تاثیر زهکش تا ۲۵۰ متری هر طرف آن است و سطح آب در فاصله ۲۵۰ متری از زهکش در بالادست و پایین‌دست به سطح زمین می‌رسد.

به‌علاوه بر طبق مدل‌سازی ضریب زهکشی متوسط برای منطقه ۱۱ میلی‌متر بر روز می‌باشد. پنج ماه بعد از احداث زهکش حایل در چاهک های BD1 و BU1، چاهک‌های موجود در ۱۰ متری پایین دست و ۱۰ متری بالادست زهکش، سطح ایستابی به ترتیب ۴۳۴ و ۴۶۶ میلی متر افت داشته است، اگرچه در آبان ماه سطح ایستابی به دلیل وجود بارندگی کمی افزایش یافته است ولی مجددا با کاهش مقدار بارندگی در آذر ماه سطح ایستابی پایین افتاده است. مقادیر بارندگی و تبخیر پتانسیل در منطقه در شکل (۶) نشان داده شده است.

## انتقال املاح

### آنالیز حساسیت

پس از تخمین پارامترهای هیدرولیکی، پارامترهای انتقال املاح نیز به روش مشابه تخمین زده شده‌اند. هم‌چنین نتایج آنالیز حساسیت برای این پارامترها نشان داده است مدل نسبت به پخشیدگی طولی و عرضی املاح نسبتا حساس است شکل (۷) میزان حساسیت این پارامتر در بالادست و پایین‌دست زهکش را نشان می‌دهد. با توجه به شکل (۷) و در حالت کاهش ۱۰ درصدی پخشیدگی طولی میزان شاخص حساسیت در بالادست و پایین‌دست زهکش به ترتیب ۰/۵۵ و ۰/۶ می‌باشد. میزان این شاخص در حالت کاهش ۱۰ درصدی پخشیدگی طولی در بالادست و پایین دست زهکش نیز به ترتیب ۰/۵۱ و ۰/۵۸ می‌باشد که نشان دهنده نیمه‌حساس بودن نرم‌افزار به این پارامترها می‌باشد.

### واسنجی و صحت سنجی

پارامترهای حساس مورد حل معکوس قرار گرفته و پس از واسنجی و صحت‌سنجی مدل نسبت به پارامترهای انتقال املاح، شاخص‌های آماری مجددا به منظور ارزیابی دقت مدل محاسبه شدند. نتایج این شاخص‌ها برای واسنجی و صحت‌سنجی مدل نسبت به پارامترهای انتقال املاح به‌ترتیب در شکل (۸ a و b) نشان داده شده است. شاخص‌های آماری ME ، NRMSE، $R^2$ و CRM محاسبه شده پس از واسنجی و صحت‌سنجی پارامترهای انتقال املاح که نشان از کارا بودن مدل در شبیه‌سازی انتقال املاح و کالیبره شدن نرم‌افزار از این نظر دارد و همان‌گونه که از علامت CRM مشخص است، مدل در شبیه‌سازی مقادیر املاح و شوری کمی بیش‌برآورد می‌کند که با توجه به کوچک بودن این مقدار، قابل قبول می‌باشد. شکل (۹) مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده شوری را از مرداد تا آذر ۱۳۸۹ نشان می‌دهد.

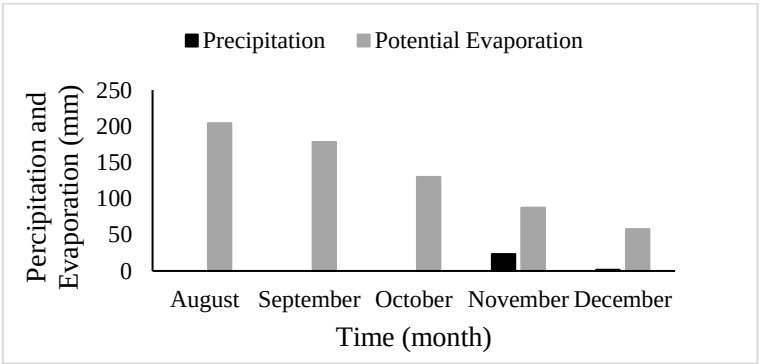



**Fig. 6- Rainfall and evaporation in study area (August to December 2010)**

**شکل ٦٤-میزان بارندگی و تبخیر از مرداد تا آذر ۱۳۸۹ در منطقه زهکش حایل شوره‌زار قزوین**

*DOI:* 10.22055/JISE.2021.36752.1962

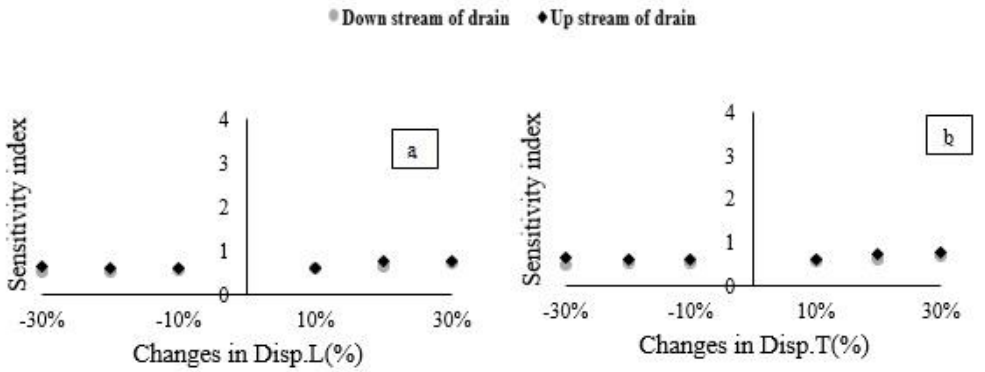



**Fig. 7- sensitivity analysis of sensitive and semi-sensitive solute transport parameters (a: Disp.L, b: Disp.T)**

**شکل ۷-نمودارهای آنالیز حساسیت پارامترهای انتقال املاح حساس (a: Disp.L, b: Disp.T)**

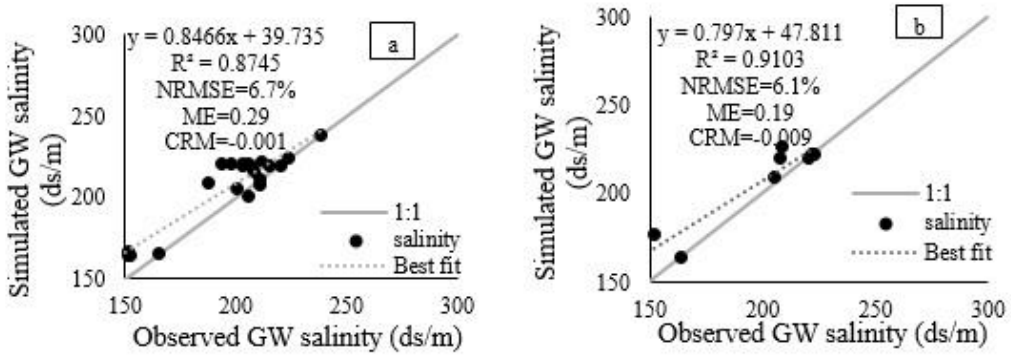
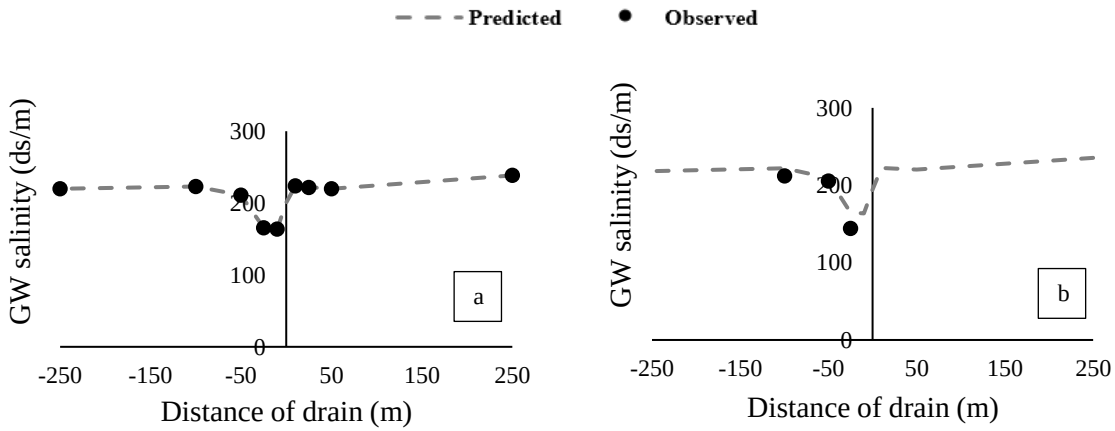



**Fig. 8- Correlation and statistical indexes between observed and simulated GW salinity (a: calibration, b: validation)**

**شکل ۸-شاخص های آماری محاسبه شده بین داده های مشاهداتی و شبیه سازی شده شوری آب زیرزمینی (الف: واسنجی، ب: صحت سنجی)**



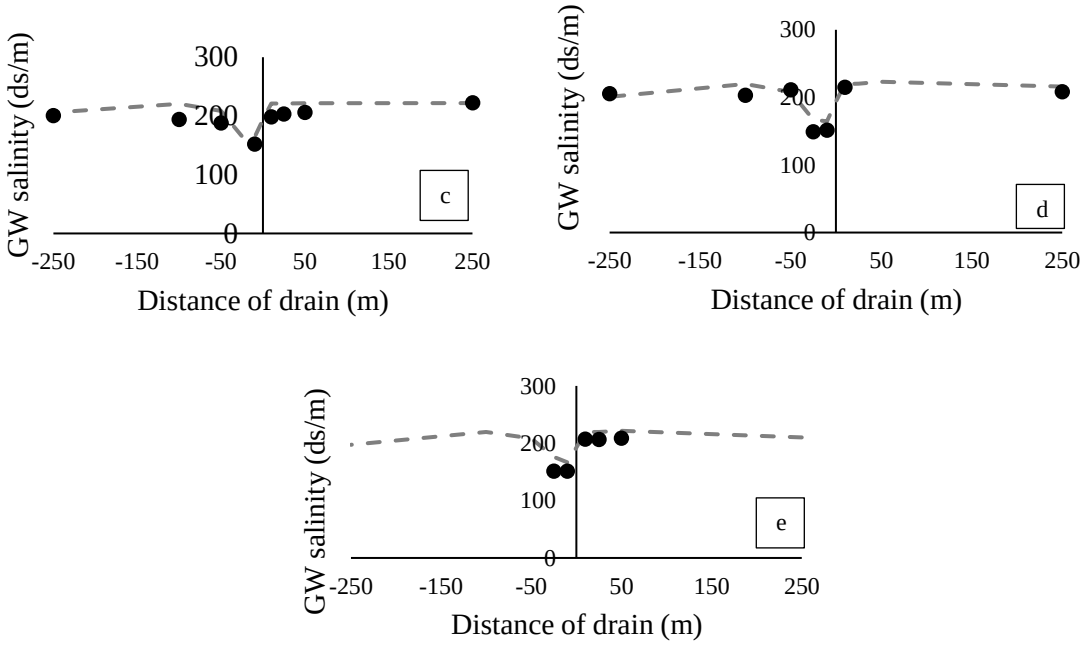



**Fig. 9- Observed and predicted Ground Water salinity (a: August, b: September, c:October, d:November, e:December)**

**شکل ۹-شوری آب زیرزمینی مشاهدات ی و شبیه سازی شده (a: مرداد، b: شهریور، c: مهر، d: آبان، e: آذر)**

با توجه به اینکه میزان هدایت الکتریکی در منطقه بسیار بالاست و از ۶۰ تا ۲۸۰ دسی زیمنس بر متر می‌باشد و دستگاه های به کار رفته برای اندازه‌گیری شوری نیز تا شوری ۱۰ دسی‌زیمنس بر متر دقت بالایی دارند، برخی از داده‌ها به دلیل مغایرت زیاد با سایر داده‌ها و عدم اطمینان از صحت آن‌ها حذف شده اند ولی تعداد داده‌ها باقی‌مانده برای کالیبراسیون و صحت‌سنجی کافی بوده و توانایی حل معکوس با دقت بالا را داشته است. پس از مدل‌سازی به‌منظور بررسی عملکرد زهکش حایل در جلوگیری از انتقال شوری از پایین‌دست به بالادست دو نقطه در عمق پنج متری و ۱۵ متری زیر زهکش حایل مورد مطالعه مورد ارزیابی قرار گرفتند، نتایج نشان داد شوری در نقطه پنج متری، ۳/۵ دسی‌زیمنس بر متر و در نقطه ۱۵ متری، ۱/۱ دسی زیمنس بر متر کاهش یافته است. این مقادیر تنها پنج ماه پس از احداث زهکش بوده و زهکش در زمان‌های طولانی‌تر قادر خواهد بود شوری را بیشتر کاهش دهد. به‌علاوه بر طبق نتایج مدل سازی زهکش قادر است روزانه ۷۵۰ کیلوگرم نمک را از منطقه خارج کند بنابراین در کاهش شوری موثر است.

نتایج به خوبی نشان می‌دهند که هایدروس دوبعدی (HYDRUS-2D) هم برای شبیه سازی تراز سطح ایستابی و هم برای شبیه‌سازی شوری آب زیرزمینی منطقه شوره‌زار دشت قزوین، دقت مناسبی داشت. نتایج این مطالعه با نتایج مطالعه‌های Jafari (2011) و Ghorbani et al (2016) که به‌ترتیب با استفاده از نرم‌افزارهای سیپ-دبلیو (Seep/w)، سیترن-دبلیو (Ctran/w) و مادفلو (ModFlow) به شبیه‌سازی شوری و تراز آب زیرزمینی پرداخته بودند، مطابقت داشت.

به‌علاوه بر اساس شکل (۴) و شکل (۸)، میزان شاخص NRMSE برای شبیه‌سازی تراز سطح ایستابی در مرحله واسنجی و صحت‌سنجی برابر با ۰/۱ درصد بوده است درحالی‌که مقدار همین شاخص برای شبیه‌سازی شوری در مرحله واسنجی و صحت‌سنجی به‌ترتیب برابر با ۶/۷ درصد و ۶/۱ درصد بوده است. اگرچه مقادیر NRMSE کوچکتر از ۱۰ درصد در مدل‌سازی‌ها نشان دهنده دقت قابل قبول مدل در شبیه سازی می‌با شد ولی با توجه به کوچکتر بودن این شاخص در شبیه‌سازی تراز سطح ایستابی، دقت مدل در شبیه‌سازی تراز سطح ایستابی بیشتر از دقت آن در شبیه سازی شوری می‌با شد. علت این مو ضوع تعداد بیشتر داده‌های اندازه‌گیری شده تراز سطح ایستابی نسبت به شوری و قابلیت بهتر نرم‌افزار در شبیه‌سازی سطح آب می‌باشد. نتایج مذکور مطابق با نتایج کار Abbasi و Tajik (2007) می‌باشد، آن‌ها نیز در پژوهش خود به برآورد پارامترهای هیدرولیکی خاک و انتقال املاح با استفاده نرم‌افزار HYDRUS در سطح مزرعه‌ای پرداختند و نتایج نشان داد نرم افزار رطوبت را بادقت بیشتری نسبت به شوری شبیه سازی کرده است (Abbasi and Tajik, 2007). هم‌چنین با تو جه به علا مت منفی شاخص CRM مدل در شبیه‌سازی سطح ایستابی کمی بیش‌برآورد می‌کند. مطابق با نتایج مطالعات Tajik و Abbasi (2007)، نیز هایدروس دوبعدی (HYDRUS-2D) در شبیه‌سازی رطوبت کمی بیش برآورد می‌کند که با توجه به بسیار کوچک بودن این مقدار قابل چشم‌پوشی است.

*DOI:* 10.22055/JISE.2021.36752.1962

**جدول۱- نتایج شاخص های آماری برای حل معکوس با اعماق مختلف هندسه جریان**

**Table 1- Results of statistical indexes for inverse solution in control volume with different thicknesses**

| No | Aquifer thickness(m) | ME | NRMSE | $R^2$ | CRM |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 8 | 0.366 | 0.15 | 0.3 | -0.02 |
| 2 | 32 | 0.355 | 0.056 | 0.45 | -0.0046 |
| 3 | 107 | 0.114 | 0.001 | 0.7 | -0.0005 |

**جدول ۱-نتایج شاخص‌های آماری برای حل معکوس تیمارها در دو حالت با در نظر گرفتن تبخیر و بدون در نظر گرفتن آن**

**Table 2- Results of statistical indexes for inverse solution in 2 condition with evaporation and without it**

| No | Condition | ME | NRMSE | $R^2$ | CRM |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | With Evp | 0.114 | 0.001 | 0.7 | -0.0005 |
| 2 | Without EVP | 0.248 | 0.0013 | 0.64 | -0.001 |

**تعیین ضخامت مناسب هندسه جریان**

نتایج شاخص‌های آماری محاسبه شده پس از حل معکوس و واسنجی سه تیمار ذکر شده در جدول (۱) آورده شده است. بر طبق نتایج شاخص‌های آماری در تیمار اول اکثر شاخص‌ها در بازه استاندارد خود قرار ندارند. میزان NRMSE بالا بوده و همبستگی بین داده ها کم است. با افزایش ضخامت آبخوان تا ۳۲ متر وضعیت کمی بهبود یافته ولی بهترین حالت شاخص‌های آماری در تیمار سوم و در نظر گرفتن عمق آبخوان تا لایه غیرقابل نفوذ است. هم‌چنین میزان هدایت هیدرولیکی تخمین زده شده در تیمار سوم بسیار نزدیک به مقدار گزارش شده در منطقه بوده و تنها ۱۴ درصد با آن اختلاف دارد در صورتی که میزان هدایت هیدرولیکی تخمین زده شده در تیمار اول و دوم به ترتیب ۹۶ درصد و ۶۷ درصد با میزان گزارش شده برای منطقه تفاوت دارد. هم‌چنین بر اساس مطالعه‌های Jiang et al (2009)، اگرچه متاسفانه مطالعه‌های کمی اثر عمق آب زیرزمینی بر هدایت هیدرولیکی آن را مورد ارزیابی قرار داده اند، ولی با کاهش عمق آب زیرزمینی (کاهش ضخامت آبخوان)، هدایت هیدرولیکی آن نیز کاهش می‌یابد (Jiang et al., 2009). بر طبق این مطالعه هدایت هیدرولیکی پارامتری وابسته به ضخامت آبخوان است که با تغییر آن تغییر می‌کند. در این پژوهش نیز یکی از پارامترهای حساس هیدرولیکی، هدایت هیدرویکی است که در تأثیر ضخامت آبخوان بر آن دیده شده و با توجه به شاخص های آماری محاسبه شده با تغییر ضخامت آبخوان این پارامتر نیز تغییر یافته است بنابراین نتایج این مطالعه مطابق با نتایج مطالعه Jiang et al (2009) می‌باشد.

**بررسی تاثیر تبخیر در حل معکوس پارامترهای هیدرولیکی**

نتایج شاخص‌های آماری پس از حل معکوس و واسنجی دو تیمار در نظر گرفتن تبخیر و عدم در نظر گرفتن آن در جدول (۲) آورده شده است. بر طبق این شاخص‌ها در نظر نگرفتن تبخیر موجب افزایش خطای ماکزیمم و NRMSE شده و همبستگی بین داده ها را نیز کاهش می‌دهد. هم‌چنین باعث افزایش CRM شده و خطای مدل در بیش برآورده داده‌های سطح ایستابی را نیز افزایش می‌دهد. هم‌چنین در تیمار با در نظر گرفتن تبخیر هدایت هیدرولیکی با میزان اندازه گیری شده آن ۱۴ درصد اختلاف دارد در صورتیکه در نظر نگرفتن تبخیر این اختلاف را تا ۲۲/۸ درصد افزایش می‌دهد.

## نتیجه‌گیری

پایش زهکش حایل شوره‌زار قزوین به منظور بررسی تأثیر آن در کنترل و جلوگیری از گسترش شوری امری اجتناب ناپذیر است ولی اندازه‌گیری مکرر سطح آب زیرزمینی و شوری آن از طریق چاهک‌های مشاهداتی نیازمند صرف زمان و هزینه زیادی می‌باشد بنابراین مدل‌سازی بهترین راه حل برای این مشکل است. تخمین پارامترهای هیدرولیکی و انتقال املاح خاک منطقه توسط حل معکوس نرم‌افزار هایدروس دوبعدی(HYDRUS-2D) و کالیبره کردن این مدل برای منطقه نشان داد این مدل از توانایی بالایی برای شبیه‌سازی تراز سطح ایستابی و شوری برخوردار است. به‌علاوه شاخص‌های آماری محاسبه شده پس از واسنجی و صحت‌سنجی مدل نشان دادند اگرچه مدل قادر است با دقت زیادی تراز سطح ایستابی و شوری منطقه را شبیه‌سازی کند ولی دقت آن در شبیه‌سازی تراز سطح ایستابی بالاتر یوده است. هم‌چنین بررسی تاثیر ضخامت آبخوان و تبخیر در حل معکوس پارامترهای هیدرولیکی نشان داد، هر دو عامل نقش مهمی در حل معکوس دارند. عمق بهینه آبخوان در این مطالعه از سطح تا لایه غیرقابل نفوذ (۱۰۷ متر) تعیین شده است و نرخ تبخیر نیز به دلیل اهمیت آن در فرآیند حل معکوس در تمامی تیمارها در نظر گرفته شده است.

**تشکر و قدردانی**

این تحقیق با استفاده از نسخه دوم بسته نرم افزاری هایدروس دو بعدی (HYDRUS-2D) و لایسنس اختصاصی گروه علوم و مهندسی آب دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره) و پشتیبانی مالی از محل اعتبار پژوهشی استادان راهنما (آقای دکتر رمضانی اعتدالی و آقای دکتر سلطانی) انجام شده است. بدین ترتیب از حمایت و همکاری انجام شده، سپاسگزاری می‌گردد.

## References

1- Abbasi, F. and Tajik, F., 2007. estimating hydrualic and solute transport parameters by inverse solution in field scale. *Journal of Water and Soil Science-quarterly Agriculture and Natural Resources Sciences and Skills, 11(1)*, pp 111-122 (in Persian).

2- Baride, R. and Besharat, S., 2016. Assessing HYDRUS-2D in moisture distribution and root absorption in furrow irrigation. *in 1st International Water, Environment and Sustainable Development Conference, Mohaqeq Ardabili University of Ardabil, Ardabil, Iran.* (in Persian).

3- Ghobadian, R., Farhadi, B., Maleki, R. and Farmani fard M., 2014. Numerical simulation of hydrualic parameters in saturated and unsaturated soil in 2 and 3 dimentional way and comparing with tension disk. *Journal of Irrigation Science and Engineering, 47(3)*, pp133-143 (in Persian).

4- Ghorbani, K., LEE, T., Wayayok, A. and Boroomand nasab, S., 2016. Interceptor Drainage Modeling to Manage High Groundwater Table on the Abyek Plain,Iran. *Irrigation and Dralnage, 65(1)*, pp 341–359.

5- Hamidpour, M., Afyoni, M. and Ghorbani, B., 2012. Sensitivity analysis,calibrataion and validation of Eurosem model inorder to predicting runoff in south Karoon basin. *Journal of Water and Soil Science, 16(62)*, pp 49-60 (in Persian).

6- Jafari, M., 2011. simulating Qazvin marshland interception drain in order to control salinity, Thesis, Imam khomeyni international University of Qazvin, Iran. 112 p. (in Persian).

7- Jafari, M. and Sotoodehnia, A., 2017. Assess the effect of Qazvin's interception drain on water table level by means of Seep/W.*Iranian Journal of Soil and Water Research, 47(2)*, pp.237-245 (in Persian).

8- Jiang, XW., Wan, L., Wang, XS., Ge, S. and Liu, J., 2009. Effect of exponential decay in hydraulic conductivity with depth on regional groundwater flow. *Geophys Research Letters, 36(24)*, pp 3–6.

9- Latifi, M., Soltani, M. and Ramezani Etedali H., 2020. assess the effect of evaporation on water table level and drainage coefficient by means of HYDRUS-2D(case study: Qazvin interception drain). *Hydrogeology* (in Persian).

10- Saman Abrah and Kamab Pars engineers., 2010. Qazvin's marshland drainage studies ,approved report (in Persian).

11- Sayad, Gh., Moradzadeh, M. and Moazed, H., Simulation of nitrate leaching in sandy loam by HYSRUS-1D., 2013. *Water and Soil Science, 23(1)*, pp 95-108 [in Persian].

12- Šimůnek, J, Sejna, M., and van Genuchten, M., 2011. User Manual. SpringerReference. 322 p.

13- Sotoodehnia, A., Jafari, M. and Daneshkar araste, P., 2014. effects of Qazvin interception drain in controlling salinity.*Iranian Journal of Soil and Water Research, 45(4)*, pp 447-452 (in persian).

14- Zakerinia, M., Abbasi, F. and Sohrabi mola yousef, T., 2007. Assessing soil's hydrualic conductivity changes by means of inverse solution., *Journal of Agricultural Engineering Researches, 8(3)*, pp 17-30 (in Persian).