



Shahid Chamran  
University of Ahvaz

**EXTENDED ABSTARCT**

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

M. Latifi<sup>1</sup>, M. Soltani<sup>2\*</sup> and H. Ramezani Etedali<sup>3</sup>

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](mailto: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**

*Article 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**

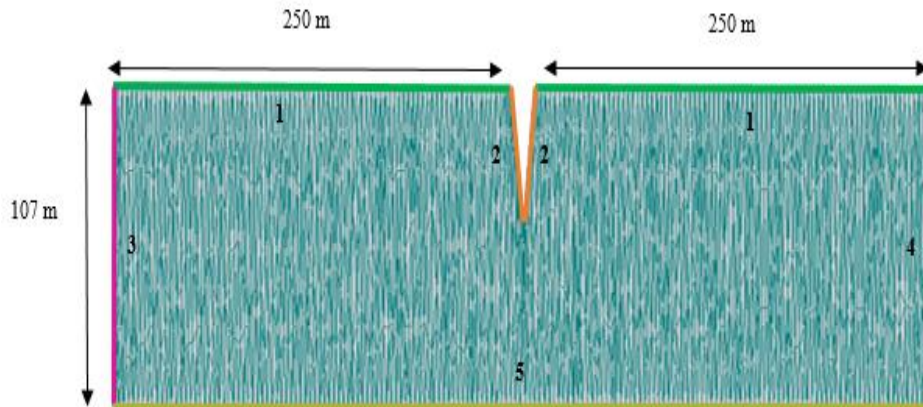
The recent growth in population has led to an increase in food supply requirements which, in turn, has resulted in an increase in groundwater exploitation. In areas where fresh and saline aquifers are adjacent, the overexploitation of fresh groundwater leads to a decrease in fresh ground water level 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 hydraulic 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.

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

$o_1, o_2$  and  $\bar{o}$  are primary, secondary, and average outputs, while  $i_1, i_2$  and  $\bar{i}$  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).

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

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

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

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

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  $\alpha$  ( $m^{-1}$ ),  $n$  and saturated hydraulic conductivity ( $K_s$  ( $m \text{ day}^{-1}$ )), 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.

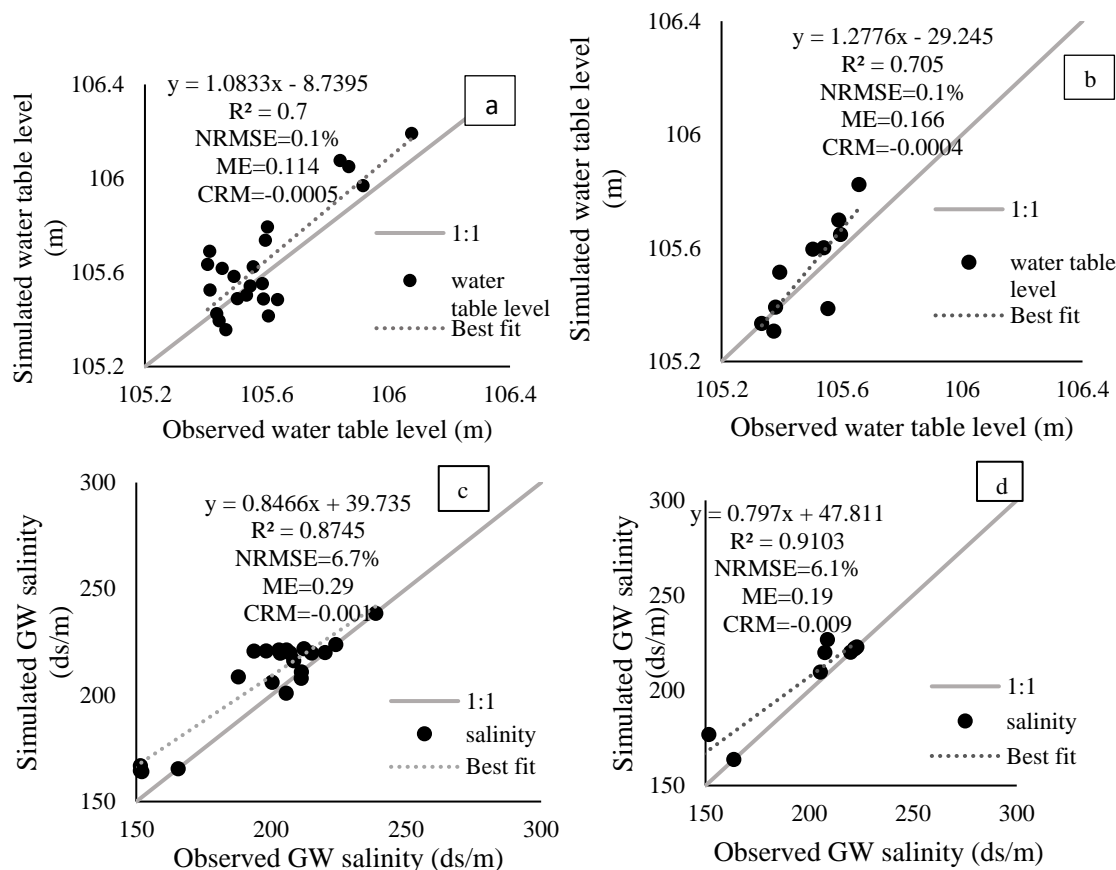


Fig. 2- Correlation and statistical indexes between the observed and simulated water table level and GW salinity (a: Water table level calibration, b: Water table level validation, c: GW salinity calibration, d: GW salinity validation)

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

CRM	R <sup>2</sup>	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 <sup>2</sup>	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 hydraulic 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 University 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/>).



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

مهدیه لطیفی<sup>۱</sup>، مسعود سلطانی<sup>۲\*</sup> و هادی رضوانی اعتدالی<sup>۳</sup>

- ۱- دانشجوی 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.

پذیرش: ۱۴۰۰/۳/۸

بازنگری: ۱۴۰۰/۳/۵

دریافت: ۱۳۹۹/۱۲/۱۳

### 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 آب زیرزمینی 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  $ME$ ،  $R^2$ ،  $NRMSE$  و  $CRM$  برای بررسی دقت واسنجی مدل محاسبه شد. نتایج این شاخص‌ها برای پارامترهای هیدرولیکی و انتقال املاح در مرحله واسنجی به ترتیب عبارتند از  $0.114$ ،  $0.001$ ،  $0.007$  و  $-0.0005$  و  $0.029$ ،  $0.067$ ،  $0.087$ ،  $0.001$  - می‌باشد. 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

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 مانداب 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

ایران از جمله کشورهایی است که سطح بزرگی از اراضی آن متأثر از املاح است. حدود  $23/5$  میلیون هکتار ( $14/2$  درصد مساحت کل و  $30$  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 گرفته‌اند 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



هدف به صورت گام به گام یعنی برآورد پارامترهای هیدرولیکی خاک در یک گام و سپس برآورد پارامترهای انتقال املاح در گام دیگر و با استفاده از نرم افزار هایدروس دوبعدی (HYDRUS-2D) صورت گرفته است. تفاوت این کار با سایر تحقیقات انجام شده در این منطقه، شبیه سازی همزمان محیط اشباع و غیراشباع است در صورتی که در سایر تحقیقات تنها بخش اشباع در نظر گرفته شده است، علت انتخاب نرم افزار هایدروس دوبعدی (HYDRUS-2D) نیز توانایی شبیه سازی همزمان این دو ناحیه است. به علاوه شبیه سازی مقادیر بسیار بالای شوری با استفاده از نرم افزار هایدروس دوبعدی (HYDRUS-2D) نیز از تفاوت های این مطالعه با سایر مطالعه های انجام شده به وسیله نرم افزار هایدروس (HYDRUS) می باشد. طبق مطالعه های Latifi et al (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 خاک های مختلف، این تأثیر در خاک های رسی بیشتر بوده و مقادیر ناچیز تبخیر نیز باید در شبیه سازی خاک های 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 شبیه سازی (مرداد تا آذر ۱۳۸۹) با استفاده از نرم افزار آکواکراپ (Aqua crop) برآورد شده و در فرآیند حل معکوس نیز در نظر گرفته شده است. در حالی که مطالعه های قبلی انجام شده در شوره زار 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 روش ها

### منطقه مورد مطالعه

شوره زار مرکزی قزوین با طول شرقی ۳۸۰ تا ۴۲۰ کیلومتر و عرض شمالی ۳۹۲۰ تا ۳۹۸۰ کیلومتر (بر حسب UTM) در جنوب شرقی دشت قزوین به مساحت ۶۴۴۰۰ هکتار با ارتفاع متوسط ۱۱۳۵ تا ۱۱۴۵ متر از سطح دریا قرار داشته و بر اساس اقلیم نامی دومارتن دارای اقلیم نیمه خشک سرد می باشد. وسعت هسته ی مرکزی این شوره زار، 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 می باشد (Saman Abrah and Kamab Pars engineers, 2010). به منظور مهار پیش روی شوری زهکش حائلی به طول ۳۰ کیلومتر در قسمت شمال شرقی 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 پایین دست آن قرار دارند. این چاهک ها به فواصل

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

Abbasi و Tajik (2007) در پژوهشی با استفاده از هایدروس دوبعدی (HYDRUS-2D) به برآورد پارامترهای هیدرولیکی خاک و انتقال املاح در سطح مزرعه ای پرداختند و پس از کالیبره کردن مدل برای شرایط مزرعه میزان رطوبت و املاح را مورد شبیه سازی قرار داده و نتایج را با مقادیر اندازه گیری شده مورد مقایسه قرار دادند، نتایج نشان داده اند 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 مزرعه ای کالیبره شده است (Abbasi and Tajik, 2007). در تحقیقی دیگر برای ارزیابی توزیع رطوبت و جذب ریشه ذرت در آبیاری چوپچه ای از قابلیت حل معکوس هایدروس دوبعدی (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 نرم افزار هایدروس یک بعدی (HYDRUS-1D) برای شبیه سازی آبشویی یون نیترات در خاک لوم شنی نیز استفاده شده است. در این مطالعه ایزوترم های جذب و ضرایب پخشیدگی و انتشار و رطوبت روان-ساکن تخمین زده شده اند و نتایج نهایی نشان دهنده ی دقت مدل در شبیه سازی حرکت یون نیترات بوده است (Sayad et al., 2013). در مطالعه ای دیگر به منظور بررسی تغییرات هدایت هیدرولیکی خاک از حل معکوس نرم افزار هایدروس یک بعدی (HYDRUS-1D) استفاده شده و تغییرات زمانی این پارامتر در خاک لومرسی تحت آبیاری مورد شبیه سازی قرار گرفته است. نتایج نشان داد، روش حل معکوس در صورت وجود داده های کافی می تواند روشی مناسب برای تخمین ویژگی های هیدرولیکی و تغییرات زمانی آن ها باشد (Zakerinia et al., 2007). در برخی از پژوهش ها نیز انتقال آب و املاح در منطقه شوره زار قزوین توسط نرم افزارهای دیگری مورد شبیه سازی قرار گرفته است. در پژوهشی مدل سیپ-دبلیو (Seep/w) برای شبیه سازی تراز سطح ایستابی و کنترل زهکش حائل دشت قزوین و مدل سیترن-دبلیو (Ctran/w) برای شبیه سازی انتقال املاح مورد کالیبراسیون قرار گرفته است و نتایج نشان داده اند این مدل با دقت بالایی توانسته شرایط منطقه را شبیه سازی کند (Jafari, 2011). در مطالعه ای دیگر نیز منطقه تحت شبیه سازی با نرم افزار مادفلو (ModFlow) قرار گرفته است و شاخص های آماری محاسبه شده نشان دادند که این مدل نیز به خوبی برای منطقه کالیبره شده و با دقت تراز سطح ایستابی را شبیه سازی کرده است (Ghorbani et al., 2016).

در این مقاله هدف تخمین پارامترهای هیدرولیکی و انتقال املاح در منطقه احداث زهکش حایل در شوره زار دشت قزوین است. این

است)، خصوصیات خاک و شار جریان‌های ورودی از بالادست و پایین‌دست زهکش به نرم افزار داده شده‌اند و در شکل (۲) بخش‌هایی که با اعداد یک، دو، سه، چهار و پنج مشخص شده‌اند به ترتیب به عنوان مرز اتمسفری که تبخیر از آن صورت می‌گیرد، سطح نشت که اجازه می‌دهد 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 صحت‌سنجی

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  $I(-)$  است که به ترتیب 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.

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

که در آن SI شاخص حساسیت،  $O_1$ ،  $O_2$  و  $\bar{O}$  به ترتیب مقدار اولیه، ثانویه و متوسط پارامتر خروجی و  $I_1$ ،  $I_2$  و  $\bar{I}$  نیز به ترتیب 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 هر بار شاخص SI برای آن‌ها محاسبه می‌شود. در صورتی که 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 به صورت 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 ( $m$ )، Diffus.W ( $m^2\ day^{-1}$ )، Thlomb (-)، Frac ( $m$ )، Diffus.G ( $m^2\ day^{-1}$ ) است که به ترتیب 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

۱۰، ۲۵، ۵۰، ۱۰۰، ۲۵۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ متر در بالادست و ۱۰، ۲۵، ۵۰، 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 et al (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 لوبنرگ-مارکوآرت (Levenberg-Marquardt) استفاده می‌کند. حل معکوس این مدل در بسیاری از مطالعه‌های مزرعه‌ای و آزمایشگاهی برای بهینه‌سازی و تخمین پارامترها به کار رفته و نتایج آن نسبتاً 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 شورزار 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 از جمله داده‌های اقلیمی (بارش، تبخیر) لازم به ذکر است به دلیل شوری بسیار بالا آب و خاک در منطقه شورزار، کشاورزی در این منطقه وجود نداشته و میزان تعرق صفر



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 به ترتیب نشان‌دهنده خطا ماکزیمم، میانگین خطای مربع نرمال شده، همبستگی و ضریب جرم باقی‌مانده.

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

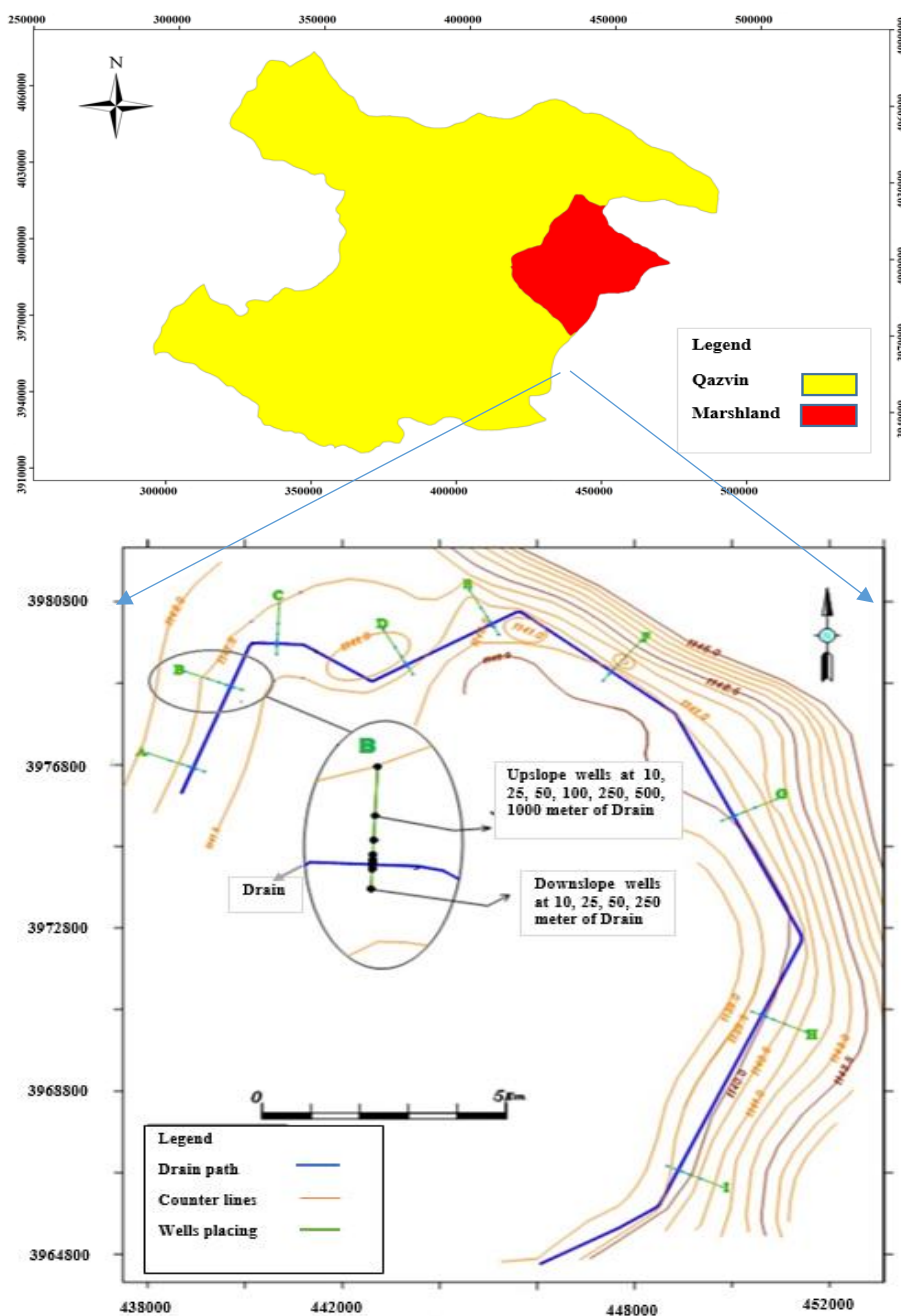


Fig. 1- Drain location, sections and observation wells

شکل ۱- محل قرارگیری زهکش، مقاطع و چاهک‌های مشاهداتی

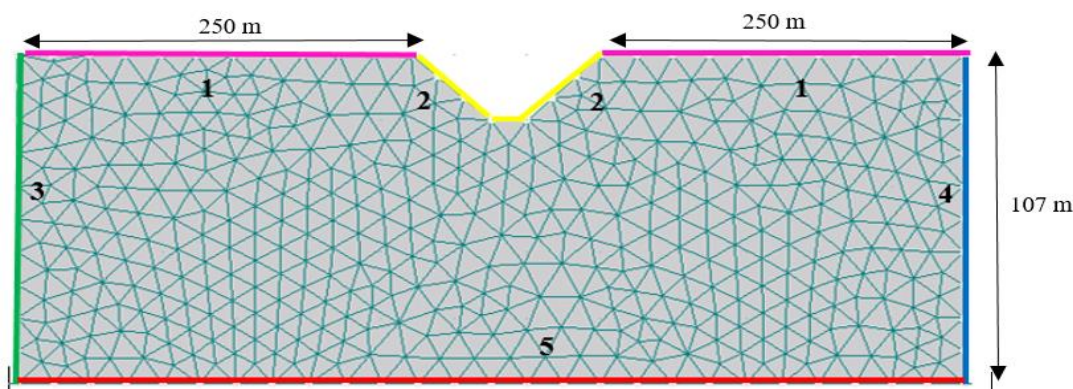


Fig. 2- Interception drain geometry

\* 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، ۴: جریان ورودی پایین دست، ۵: بدون جریان)

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 به معنای تخمین هدایت هیدرولیکی در مکان‌ها 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 داده‌های 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

$$ME = \max |P_i - O_i|_{i=1}^n \quad (2)$$

$$NRMSE = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (p_i - o_i)^2}}{\bar{o}_i} \quad (3)$$

$$R^2 = \left( \frac{n(\sum xy) - (\sum x)(\sum y)}{\sqrt{[n \sum x^2 - (\sum x)^2][n \sum y^2 - (\sum y)^2]}} \right)^2 \quad (4)$$

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

در این روابط  $P_i$  مقادیر برآورد شده،  $O_i$  مقادیر اندازه‌گیری شده و  $n$  تعداد نمونه است. همچنین در رابطه ۴،  $X$  سری اول داده‌های ورودی و  $Y$  سری دوم داده‌های ورودی است که در اینجا به ترتیب داده‌های مشاهداتی و اندازه‌گیری شده می‌باشد. اگر تمامی داده‌های شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده برابر باشند، نتایج شاخص‌های آماری ME، NRMSE،  $R^2$  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

**واسنجی و صحت سنجی**

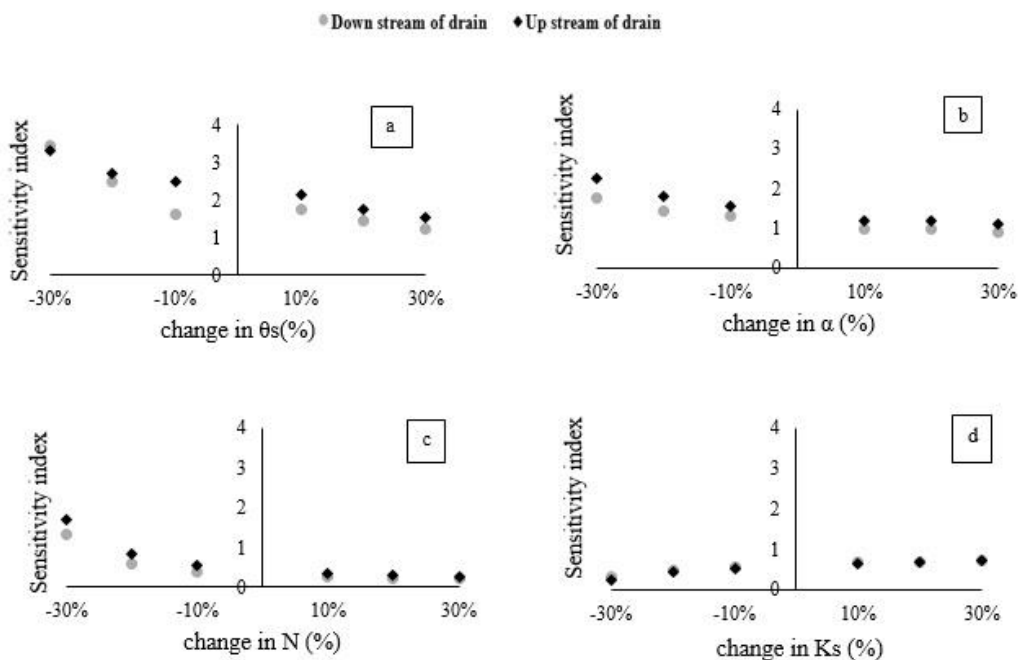
پس از تعیین پارامترهای حساس و تخمین آن‌ها از طریق قابلیت حل معکوس نرم افزار، از ۷۰ درصد داده‌ها برای واسنجی مدل و از ۳۰ درصد باقی‌مانده برای صحت‌سنجی استفاده شد. نتایج شاخص‌های آماری پس از واسنجی و صحت‌سنجی پارامترهای هیدرولیکی حساس خاک، به ترتیب در شکل (۴ a و b) آورده شده است. نتایج شاخص‌های آماری محاسبه 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.

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 به ترتیب  $\alpha$ ،  $N$  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  $\theta_s$ ،  $\alpha$ ،  $N$  و  $K_s$ ، برای ۱/۶، ۱/۳، ۱/۵ و ۰/۴ و ۰/۵۲، ۰/۵۴ می‌باشد که درستی تحلیل بالا را اثبات می‌کنند.



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

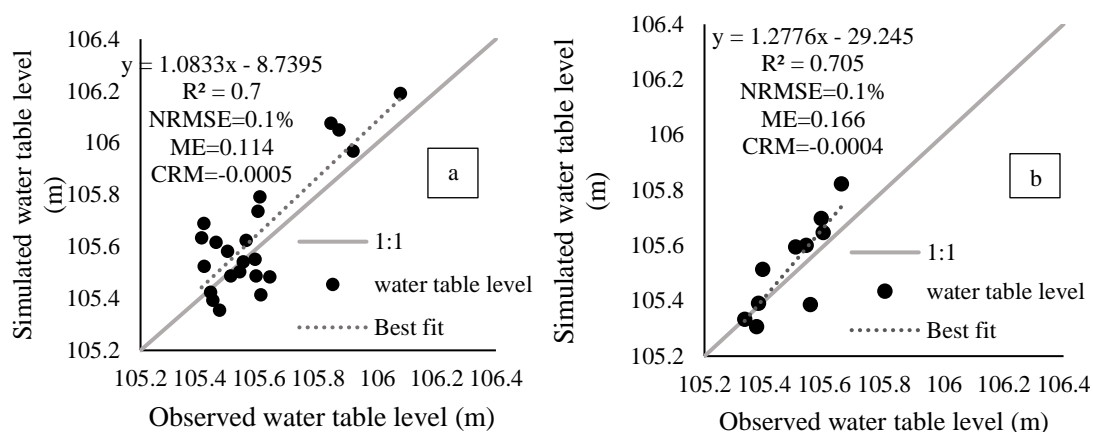


Fig. 4- Correlation and statistical indexes between observed and predicted water table level (a: calibration, b: validation)

شکل ۴- شاخص های آماری محاسبه شده بین داده های مشاهده ای و شبیه سازی شده تراز سطح ایستابی (a: واسنجی، b: صحت سنجی)

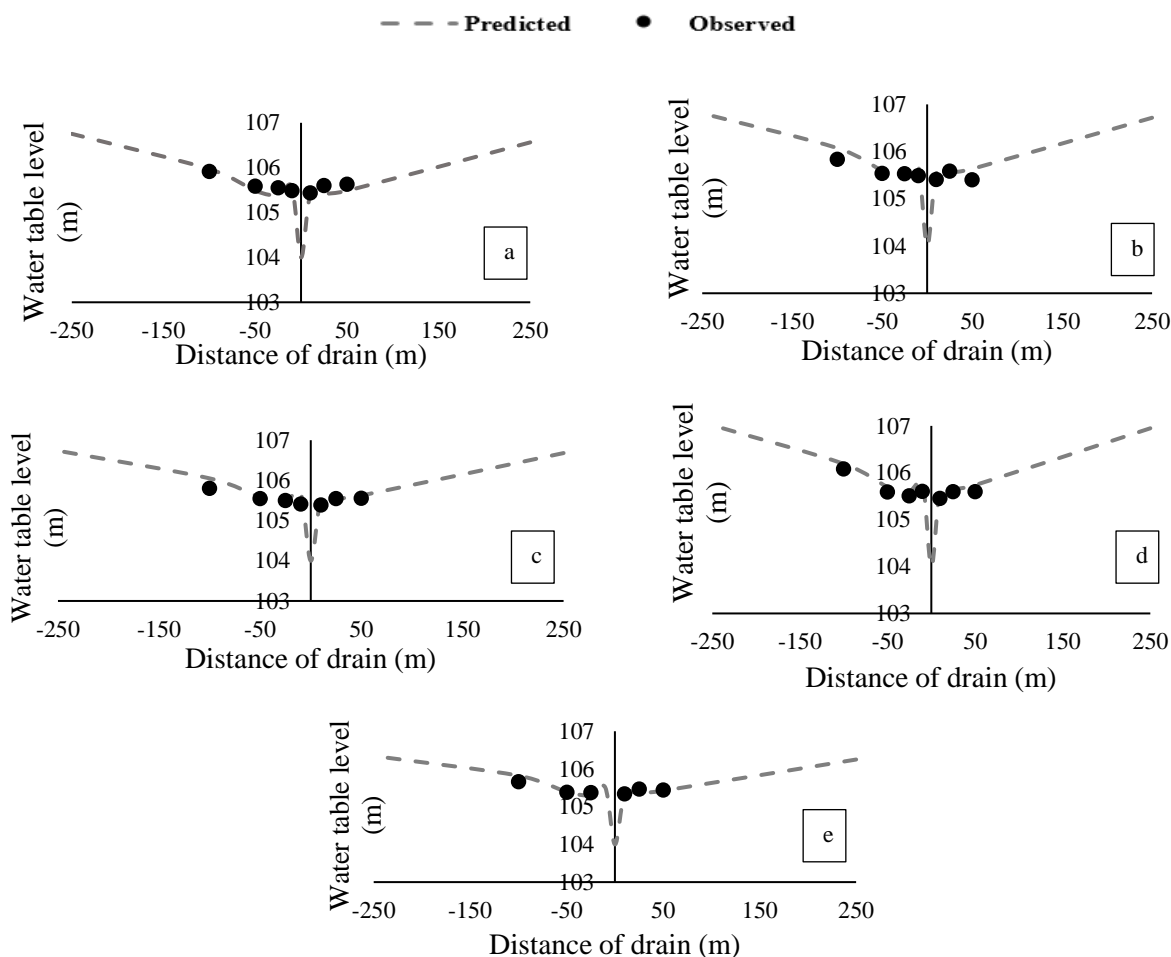


Fig. 5- Predicted and observed water table level August to December 2010 (a: August, b: September, c:October, d:November, e:December)

شکل ۵- تراز سطح ایستابی مشاهده ای و مدل سازی شده (a: مرداد، b: شهریور، c: مهر، d: آبان، e: آذر)

پخشیدگی طولی و عرضی املاح نسبتاً حساس است شکل (۷) میزان حساسیت این پارامتر در بالادست و پایین دست زهکش را نشان می‌دهد. با توجه به شکل (۷) و در حالت کاهش ۱۰ درصدی پخشیدگی طولی میزان شاخص حساسیت در بالادست و پایین دست 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 نیمه حساس 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 مجدداً به منظور ارزیابی دقت مدل محاسبه شدند. نتایج این شاخص‌ها برای واسنجی و صحت‌سنجی مدل نسبت به پارامترهای انتقال املاح به ترتیب در شکل (a و b) نشان داده شده است. شاخص‌های آماری  $R^2$ ،  $NRMSE$ ،  $ME$  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.

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 چاهک‌های BDI و BU1، چاهک‌های موجود در ۱۰ متری پایین دست و ۱۰ متری بالادست زهکش، سطح ایستابی به ترتیب ۴۳۴ و ۴۶۶ میلی‌متر افت داشته است، اگرچه در آبان ماه سطح ایستابی به دلیل وجود بارندگی کمی افزایش یافته است ولی مجدداً 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

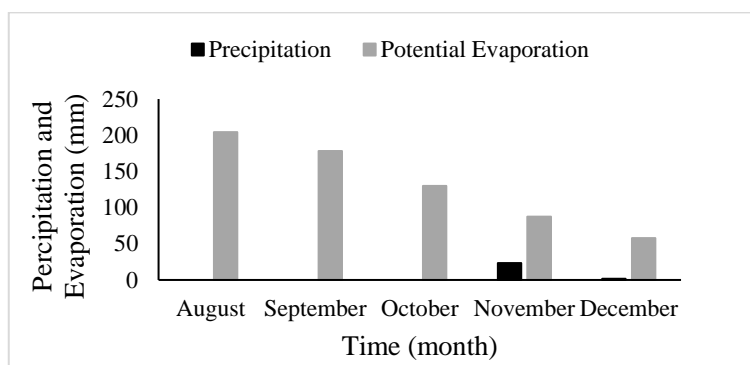


Fig. 6- Rainfall and evaporation in study area (August to December 2010)  
شکل ۶- میزان بارندگی و تبخیر از مرداد تا آذر ۱۳۸۹ در منطقه زهکش حایل شوره‌زار قزوین

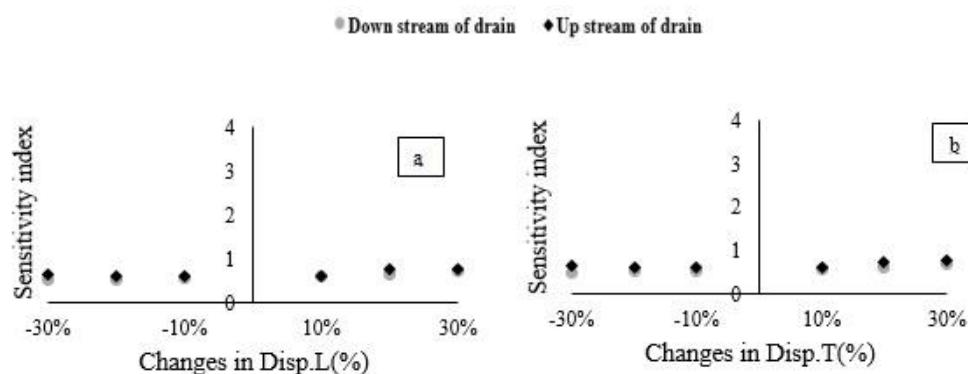


Fig. 7- sensitivity analysis of sensitive and semi-sensitive solute transport parameters (a: Disp.L, b: Disp.T)

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

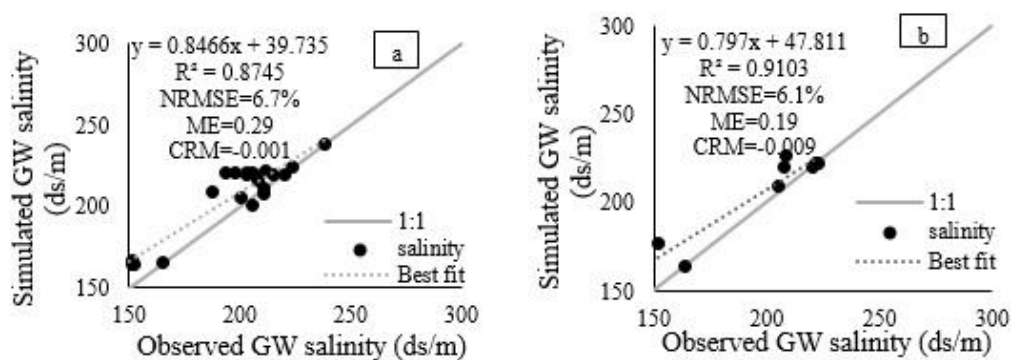
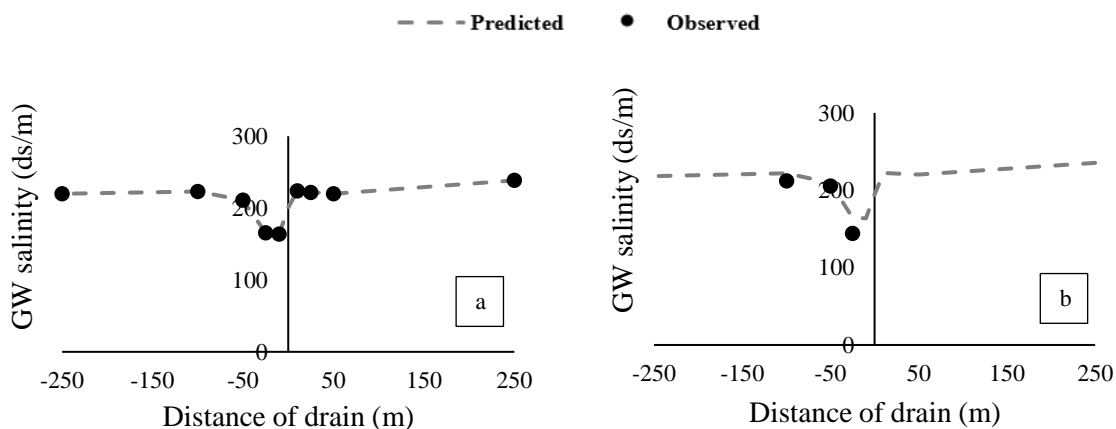


Fig. 8- Correlation and statistical indexes between observed and simulated GW salinity (a: calibration, b: validation)

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





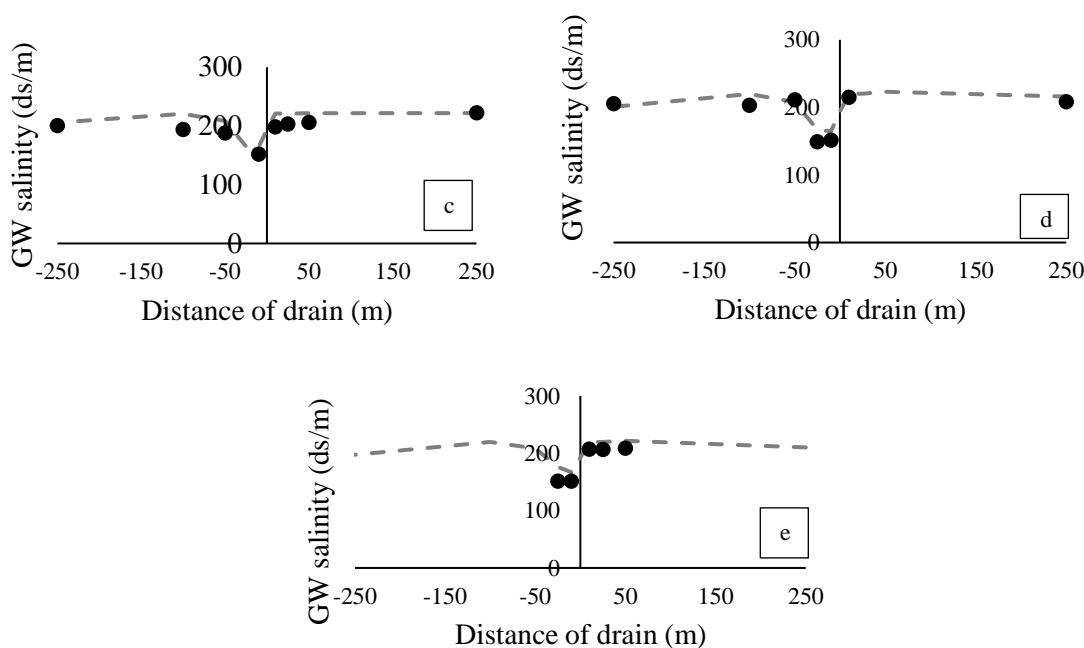


Fig. 9- Observed and predicted Ground Water salinity (a: August, b: September, c: October, d: November, e: December)

شکل ۹- شوری آب زیرزمینی مشاهداتی و شبیه‌سازی شده (a: مرداد، b: شهریور، c: مهر، d: آبان، e: آذر)

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 در حالی که مقدار همین شاخص برای شبیه‌سازی شوری در مرحله واسنجی و صحت‌سنجی به ترتیب 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 شبیه‌سازی می‌باشد 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 شبیه‌سازی شوری می‌باشد. علت این موضوع 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 نرم‌افزار رطوبت را با دقت بیشتری نسبت به شوری شبیه‌سازی کرده است (Abbasi and Tajik, 2007). همچنین با توجه به علامت منفی شاخص CRM مدل در شبیه‌سازی سطح ایستابی کمی بیش‌برآورد می‌کند. مطابق با نتایج مطالعات Tajik و Abbasi (2007)، نیز ها پدروس دوبعدی (HYDRUS-2D) در شبیه‌سازی رطوبت کمی بیش‌برآورد می‌کند که با توجه به بسیار کوچک بودن این مقدار قابل چشم‌پوشی است.

با توجه به اینکه میزان هدایت الکتریکی در منطقه بسیار بالاست و از ۶۰ تا ۲۸۰ دسی‌زیمنس بر متر می‌باشد و دستگاه‌های 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 دسی‌زیمنس 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 مدل‌سازی زهکش قادر است روزانه ۷۵۰ کیلوگرم نمک را از منطقه خارج کند بنابراین در کاهش شوری موثر است.

نتایج به خوبی نشان می‌دهند که ها پدروس دوبعدی (HYDRUS-2D) هم برای شبیه‌سازی 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 به ترتیب با استفاده از نرم‌افزارهای سیپ-دبلیو (Seep/w)، سیتن-دبلیو (Ctran/w) و مادفلو (ModFlow) به شبیه‌سازی شوری و تراز آب زیرزمینی پرداخته بودند، مطابقت داشت.

جدول ۱- 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 <sup>2</sup>	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 شاخص های 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 <sup>2</sup>	CRM
1	With Evp	0.114	0.001	0.7	-0.0005
2	Without EVP	0.248	0.0013	0.64	-0.001

موجب افزایش خطای ماکزیمم و NRMSE شده و همبستگی بین داده ها را نیز کاهش می دهد. هم چنین باعث افزایش CRM شده و خطای مدل در بیش برآورده داده های سطح ایستابی را نیز افزایش می دهد. هم چنین 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 می دهد.

### نتیجه گیری

پایش زهکش حایل شوره زار قزوین به منظور بررسی تأثیر آن در کنترل و جلوگیری از گسترش شوری امری اجتناب ناپذیر است ولی اندازه گیری مکرر سطح آب زیرزمینی و شوری آن از طریق چاهک های مشاهداتی نیازمند صرف زمان و هزینه زیادی می باشد بنابراین مدل سازی بهترین راه حل برای این مشکل است. تخمین پارامترهای هیدرولیکی و انتقال املاح خاک منطقه توسط حل معکوس نرم افزار هایروس دوبعدی (HYDRUS-2D) و کالیبره کردن این مدل برای منطقه نشان داد این مدل از توانایی بالایی برای شبیه سازی تراز سطح ایستابی و شوری برخوردار است. به علاوه شاخص های آماری محاسبه شده پس از واسنجی و صحت سنجی مدل نشان دادند اگرچه مدل قادر است با دقت زیادی تراز سطح ایستابی و شوری منطقه را شبیه سازی کند ولی دقت آن در شبیه سازی تراز سطح ایستابی بالاتر بوده است. هم چنین بررسی تأثیر 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.

### تعیین ضخامت مناسب هندسه جریان

نتایج شاخص های آماری محاسبه شده پس از حل معکوس و واسنجی سه تیمار ذکر شده در جدول (۱) آورده شده است. بر طبق نتایج شاخص های آماری در تیمار اول اکثر شاخص ها 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 شاخص های آماری در تیمار سوم و در نظر گرفتن عمق آبخوان تا لایه غیرقابل نفوذ است. هم چنین 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. هم چنین بر اساس مطالعه های (Jiang et al., 2009)، اگرچه متاسفانه مطالعه های 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 می یابد (Jiang et al., 2009). بر طبق این مطالعه هدایت هیدرولیکی پارامتری وابسته به ضخامت آبخوان است که با تغییر آن تغییر می کند. در این پژوهش نیز یکی از پارامترهای حساس هیدرولیکی، هدایت هیدرولیکی 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) می باشد.

### بررسی تأثیر تبخیر در حل معکوس پارامترهای هیدرولیکی

نتایج شاخص های 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 شاخص ها در نظر نگرفتن تبخیر

از محل اعتبار پژوهشی استادان راهنما (آقای دکتر رضائی اعتدالی و آقای دکتر سلطانی) انجام شده است. بدین ترتیب از حمایت و همکاری انجام شده، سپاسگزاری می‌گردد.

### 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

### References

- 1- Abbasi, F. and Tajik, F., 2007. estimating hydraulic 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 hydraulic parameters in saturated and unsaturated soil in 2 and 3 dimensional 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 Drainage*, 65(1), pp 341-359.
- 5- Hamidpour, M., Afyoni, M. and Ghorbani, B., 2012. Sensitivity analysis, calibration and validation of Eurosem model in order 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 hydraulic conductivity changes by means of inverse solution., *Journal of Agricultural Engineering Researches*, 8(3), pp 17-30 (in Persian).