

## Research Paper

## Simulation of Different Leaching Managements for Saline Soil Remediation Using HYDRUS

Aramdokht Asadi<sup>1</sup>, Gholamreza Zehtabian<sup>2\*</sup>, Khaled Ahmadaali<sup>3</sup>, Iman Hajirad<sup>4</sup>,

1 Faculty of Natural Resources, University of Tehran Karaj, Iran (Email: aramdokht.asadi@ut.ac.ir)

2 Professor. Faculty of Natural Resources, University of Tehran Karaj, Iran (Email: ghzehtab@ut.ac.ir)

3 Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran (Email: khahmadauli@ut.ac.ir)

4 Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran (Email: i.hajirad@ut.ac.ir)



10.22125/iwe.2025.496003.1846

Received:  
December 26, 2024

Accepted:  
July 23, 2025

Available online:  
August 4, 2025

**Keywords:**  
Electrical conductivity,  
Physical model, Soil  
management, Water  
quality, Water  
resources.

### Abstract

The reclamation of saline soils is of great importance from the standpoint of conserving water and soil resources, as these soils pose a serious barrier to agricultural productivity in arid and semi-arid regions. Soil salinity significantly reduces crop yields, damages agricultural equipment, threatens food security, and ultimately renders land unsuitable for cultivation. Many farmers in dry regions lack the financial resources to rehabilitate saline soils. The use of wastewater as an alternative water source in agriculture not only meets part of the sector's water demand but also contributes to water conservation and resource sustainability. This study aimed to evaluate the effectiveness of leaching using different water sources (drainage water and well water) and the role of drainage systems in the reclamation of saline soils in the Buin Zahra region of Qazvin Province, Iran. Soil samples were collected with minimal disturbance from a depth of 0 to 30 cm and packed into six PVC columns. The columns were alternately designed with and without gravel drainage layers. To simulate water and solute movement during the leaching process, the HYDRUS-1D model was employed. Leaching experiments were done on six soil columns filled with salty soil that had an initial electrical conductivity (EC) of 64 dS/m and a pH of 8. Three types of irrigation water were used: drainage water (pH = 7.9, EC = 57 dS/m), well water (pH = 7.1, EC = 2.54 dS/m), and a 1:1 mixture of the two (pH = 7.6, EC = 32 dS/m). Simulation results indicated that the treatment using well water combined with a gravel drainage system led to a significant reduction in soil salinity, with EC values decreasing to 2.8 dS/m at the surface and 28.5 dS/m at a depth of 30 cm. In contrast, treatments without drainage or those using saline drainage water for leaching showed comparatively lower reductions in soil salinity. Moreover, statistical indicators of the HYDRUS model, such as the coefficient of determination ( $R^2 > 0.9$  in most treatments) and root mean square error (RMSE close to zero), confirmed the model's high accuracy in predicting soil salinity. These findings can serve as effective strategies for optimizing leaching practices in saline lands and offer practical insights for farmers and natural resource managers.

\* **Corresponding Author:** Gholamreza Zehtabian

**Address:** Faculty of Natural Resources, University  
of Tehran Karaj, Iran

**Email:** ghzehtab@ut.ac.ir

**Tel:** 0912128859

## 1. Introduction

The reclamation of saline soils is of great importance from the perspective of water and soil resource conservation, as saline soils represent a significant barrier to agricultural production in arid and semi-arid regions. Soil salinity severely reduces crop yields, damages farm equipment, threatens food security, and renders soil unsuitable for agriculture. However, many farmers in arid and semi-arid regions cannot afford the high costs associated with saline soil reclamation. Thus, the present study aims to conduct applied research to assist the farming community of the Qazvin saline plain. The study seeks to reduce costs, facilitate the leaching process, and conserve freshwater and groundwater resources using available regional resources, including drainage effluents from farmland drainage systems. Comprehensive investigations were carried out under regional conditions, including varying drainage scenarios and the necessity of their establishment, as well as the use of water with different qualities for soil desalination. To evaluate the leaching process and simulate water and solute movement, the HYDRUS-1D software was employed as a key modeling tool in this study. The final results were documented as an applied model using HYDRUS software.

## 2. Materials and Methods

Buin Zahra County, located in the southern part of Qazvin Province, faces challenges such as high soil salinity due to its arid and semi-arid climate, resulting in reduced land productivity and accelerated desertification. In this study, soil sampling was conducted in saline agricultural lands using custom-designed sampling cylinders to obtain undisturbed samples for laboratory analyses. The physical and chemical tests of the soil, including measurements of EC, pH, and major ion concentrations, revealed severe soil salinity and its dependency on drainage conditions. To examine the effects of drainage and water quality on the leaching process, laboratory PVC columns were designed, and three types of water drainage water, fresh water, and their mixture were utilized. The drainage water had an EC of 57 dS/m and pH of 7.9, well water had an EC of 2.54 dS/m and pH of 7.1, and the mixed water had an EC of 32 dS/m and pH of 7.6. Numerical modeling was performed using the HYDRUS software to simulate the long-term movement of water and solutes under saturated and unsaturated conditions. The model accurately simulated changes in soil salinity under varying water quality and drainage scenarios. The results indicate that optimal drainage conditions and higher-quality water can effectively facilitate the leaching process and significantly reduce soil salinity. The findings of this applied research can provide valuable insights for farmers in the region to optimize the use of water and soil resources and mitigate the adverse effects of salinity.

## 3. Results

The results of this study demonstrated that the HYDRUS model exhibits high accuracy and efficiency in simulating and predicting soil salinity changes under various leaching conditions and drainage management scenarios. Simulations revealed that using high-quality water and proper drainage significantly reduces soil salinity. In the treatment involving well water leaching with sandy drainage, soil salinity was reduced to desirable levels, indicating the effectiveness of this method for moderately saline lands. For example, in the treatment using well water with sandy drainage, surface soil EC was reduced to 2.8 dS/m, while EC at 30 cm depth reached 28.5 dS/m, demonstrating significant salt removal efficiency. Conversely, treatments without sandy drainage or using drainage water for leaching showed limited salinity reduction due to salt accumulation in lower soil layers and slower drainage rates. These findings highlight the critical role of adequate drainage and appropriate leaching water quality in the success of leaching operations in heavy-textured and highly saline soils. Furthermore, the statistical evaluation of the HYDRUS model revealed a high correlation between simulated and observed salinity data during calibration and validation phases.  $R^2$  values exceeding 0.9 and RMSE values close to zero in most treatments confirmed the model's high precision in predicting salinity changes. The notable differences in treatments without sandy drainage underline the impact of drainage limitations on salinity variation. This study provides practical insights and actionable solutions for water and soil resource management in saline and semi-saline lands. It can guide farmers and natural resource managers in selecting optimal leaching strategies and salinity management practices.

#### 4. Discussion and Conclusion

The analysis of the data and graphs indicates that the HYDRUS model performed with higher accuracy in simulating post-leaching soil salinity compared to simulating drainage water depth and infiltrated water depth. The simulated salinity values closely matched the measured values, reflecting the model's superior precision and efficiency in this aspect of the study. This demonstrates that the model exhibits greater sensitivity and accuracy in simulating salt movement than water movement. Notably, the heavy and fine-textured soil caused a delay in water infiltration, as infiltration and drainage did not commence during the initial 24 hours after water application. Instead, infiltration occurred predominantly in the second 24 hours, emphasizing the prolonged leaching process required in heavy clay soils. This observation underscores the importance of accounting for delayed water penetration during leaching operations in such soils. The leaching process further revealed that water infiltration was slower during the first round of leaching compared to the second round, despite the same volume of applied water. This difference led to a shorter duration for the second round of leaching. The salinity graphs across treatments show a consistent pattern: lower soil salinity at the surface and higher electrical conductivity at greater depths. This indicates that dissolved salts migrate downward, accumulating in deeper layers. Over time and on a larger scale, this phenomenon could result in secondary salinization due to capillary rise in the absence of adequate drainage, stressing the critical need for proper drainage management to prevent long-term soil degradation. These findings validate the use of HYDRUS-1D as a reliable decision-support tool for planning and optimizing leaching strategies in saline soils under arid conditions.

#### 5. Six important references

- 1) Abbasi, F., Simunek, J., Feyen, J., Van Genuchten, M. T and Shouse, P. J. 2003. Simultaneous inverse estimation of soil hydraulic and solute transport parameters from transient field experiments: Homogeneous soil. *Transactions of the ASAE*. 46(4): 1085.
- 2) Pazira, E and Kawachi, T. 1981. Studies on appropriate depth of leaching water, Iran: A case study.
- 3) Saltelli, A., Tarantola, S., Campolongo, F and Ratto, M. 2004. *Sensitivity analysis in practice: a guide to assessing scientific models* (Vol. 1). New York: Wiley.
- 4) Simunek, J., Jacques, D., Langergraber, G., Bradford, S. A., Sejna, M and Van Genuchten, M. T. 2013. Numerical modeling of contaminant transport using HYDRUS and its specialized modules. *Journal of the Indian institute of science*. 93(2): 265-284.
- 5) Simunek, J., Van Genuchten, M. T and Sejna, M. 2005. The HYDRUS-1D software package for simulating the one-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media. *University of California-Riverside Research Reports*. 3: 1-240.
- 6) Basak, N., Barman, A., Sundha, P and Rai, A. K. 2020. Recent trends in soil salinity appraisal and management. *Soil analysis: recent trends and applications*. 143-161

#### Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.

#### Acknowledgments

We are grateful to Simorgh Agro-Industrial Complex

## شبیه‌سازی مدیریت‌های مختلف آبخوبی جهت اصلاح اراضی شور با استفاده از HYDRUS

آرامدخت اسدی<sup>۱</sup>، غلامرضا زهتابیان<sup>۲\*</sup>، خالد احمدآلی<sup>۳</sup>، ایمان حاجی‌راد<sup>۴</sup>

تاریخ ارسال: ۱۴۰۳/۱۰/۰۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۰۱

مقاله پژوهشی

### چکیده

بهسازی خاک‌های شور از دیدگاه حفاظت منابع آب و خاک اهمیت زیادی دارد، زیرا این خاک‌ها به‌عنوان مانعی جدی برای تولید محصولات کشاورزی در مناطق خشک و نیمه‌خشک محسوب می‌شوند. شوری خاک موجب کاهش شدید عملکرد محصولات، آسیب به تجهیزات، تهدید امنیت غذایی و در نتیجه غیرقابل استفاده شدن خاک برای کشاورزی می‌شود. بسیاری از کشاورزان مناطق خشک توان مالی برای اصلاح خاک‌های شور ندارند. استفاده از پساب به‌عنوان منبع آبی در کشاورزی، ضمن تأمین بخشی از نیاز آبی این بخش، به صرفه‌جویی و پایداری منابع آبی کمک می‌کند. از طرفی، این پژوهش با هدف ارزیابی تأثیر آبخوبی با استفاده از منابع آب مختلف (زهاب و آب چاه) و نقش زهکشی در اصلاح خاک‌های شور منطقه بوئین‌زهرآقزویین انجام شد. نمونه‌های خاک از عمق ۰ تا ۳۰ سانتی‌متری با حداقل دست‌خوردگی در ۶ ستون PVC جمع‌آوری شد. ستون‌ها به‌صورت یک در میان دارای زهکش شنی و فاقد زهکش شنی طراحی شدند. همچنین، برای شبیه‌سازی حرکت آب و املاح در فرآیند آبخوبی از مدل HYDRUS-1D استفاده شد. آبخوبی در ۶ سیلندر حاوی خاک شور با شرایط  $EC=64$  dS/m و  $pH=8$  انجام شد. برای این منظور، سه نوع آب با کیفیت‌های مختلف شامل آب زهکش ( $pH=7.9$ ,  $EC=57$  dS/m)، آب چاه ( $pH=7.1$ ,  $EC=2.54$  dS/m) و مخلوط این دو آب ( $pH=7.6$ ,  $EC=32$  dS/m) استفاده شد. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که در تیمار استفاده از آب چاه همراه با زهکش شنی، میزان شوری خاک به طور قابل توجهی کاهش یافته و به مقدار  $2/8$  دسی‌زیمنس بر متر در سطح و  $28/5$  دسی‌زیمنس بر متر در عمق ۳۰ سانتی‌متری رسید. در مقابل، تیمارهایی که فاقد زهکش بودند یا از آب شور (زهاب) برای آبخوبی استفاده کرده بودند، کاهش شوری کمتری را نشان دادند. شاخص‌های آماری مدل نظیر ضریب تعیین ( $R^2$  بیش از  $0/9$  در اغلب تیمارها) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE نزدیک به صفر)، دقت بالای مدل HYDRUS در پیش‌بینی شوری خاک را تأیید می‌کنند. این نتایج می‌توانند به عنوان راهکارهایی مؤثر برای مدیریت بهینه آبخوبی در اراضی شور به کار گرفته شده و دیدگاهی کاربردی برای کشاورزان و مدیران منابع طبیعی ارائه دهند.

واژه‌های کلیدی: هدایت الکتریکی، کیفیت آب، مدیریت خاک، مدل فیزیکی، منبع آب.

۱- گروه احیاء مناطق خشک و کوهستانی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران [aramdokht.asadi@ut.ac.ir](mailto:aramdokht.asadi@ut.ac.ir)

۲- استاد، گروه احیاء مناطق خشک و کوهستانی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، ایران [ghzehtab@ut.ac.ir](mailto:ghzehtab@ut.ac.ir) (نویسنده مسئول)

۳- دانشیار، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران [khahmadauli@ut.ac.ir](mailto:khahmadauli@ut.ac.ir)

۴- دانشجوی دکتری گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران [i.hajirad@ut.ac.ir](mailto:i.hajirad@ut.ac.ir)



## مقدمه

شوری خاک، یکی از چالش‌های جدی و پایدار در کشاورزی مناطق خشک و نیمه‌خشک به‌شمار می‌رود که نه تنها باعث کاهش چشمگیر عملکرد محصولات می‌شود، بلکه بهره‌برداری مجدد از زمین‌های آلوده به نمک را نیز با دشواری همراه می‌سازد (Basak et al., 2020; Navarro-Torre et al., 2023). در چنین شرایطی، استفاده از روش‌های مؤثر مانند آبشویی با منابع آبی مناسب و طراحی اصولی سامانه‌های زهکشی، به‌عنوان راهبردهایی کلیدی در مدیریت و بهبود این اراضی مطرح می‌شود (Pazira & Kawachi, 1981; Mukhopadhyay et al., 2021). با توجه به محدودیت منابع آب شیرین در ایران و به‌ویژه در مناطق مرکزی نظیر دشت قزوین، استفاده از منابع آبی جایگزین نظیر آب زهکشی یا اختلاط آن با آب چاه، یکی از گزینه‌های مطرح برای انجام عملیات آبشویی است (Mishra, 2023). دشت بویین‌زهر با مشکل شوری شدید خاک مواجه است که عمدتاً ناشی از برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی از چاه‌های غیرمجاز، توسعه بی‌رویه شهری و کاهش بارندگی‌هاست. این شرایط موجب افت سطح آب زیرزمینی، باقی‌ماندن نمک در خاک و در نتیجه، محدودیت شدید برای فعالیت‌های کشاورزی در منطقه شده است. این وضعیت، اهمیت بررسی وضعیت شوری و خاک منطقه را بیش از پیش نشان می‌دهد.

از سوی دیگر، مقدار آب مصرفی در فرآیند آبشویی، نقش مهمی در موفقیت عملیات اصلاح خاک ایفا می‌کند، زیرا مازاد آب نه تنها کارایی فرآیند را کاهش می‌دهد بلکه ممکن است موجب ماندابی شدن خاک گردد (Skaggs et al., 2012). رژیم‌های آبیاری مختلف و فواصل زمانی آن نیز تأثیر مستقیم بر میزان شستشوی نمک دارند (Nachabe et al., 1999). در سال‌های اخیر، توسعه روش‌های آبیاری با فرکانس بالا و حجم کم، در کنار استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی عددی، به ابزاری قدرتمند برای تحلیل دینامیک شوری و مدیریت منابع آب تبدیل شده است (Ramos et al., 2011; Tafteh & Sepaskhah, 2012).

در میان مدل‌های شبیه‌سازی حرکت آب و املاح، مدل HYDRUS-1D که توسط آزمایشگاه شوری USDA توسعه یافته است، به دلیل توانایی بالا در شبیه‌سازی شرایط اشباع و غیراشباع، مورد توجه محققان قرار گرفته است. این مدل نسبت به نسخه‌های دو بعدی، ساده‌تر، سریع‌تر و در عین حال از دقت مناسبی برخوردار است (Crevoisier et al., 2008; Ahmadi et al., 2010). همین مزیت‌ها موجب شده تا HYDRUS-1D در مطالعات متعددی پیرامون مدیریت شوری، استفاده از منابع آب غیرمتعارف، و تأثیر مواد اصلاح‌کننده‌ای مانند گچ و کود دامی به کار گرفته شود (Xie et al., 2011; PHogat et al., 2014; Selim et al., 2018; Filho & Dias, 2020). در ادامه، به برخی از پژوهش‌های انجام‌شده در این حوزه پرداخته می‌شود.

Pazira & Kawachi (1981) و Verma & Gupta (1981)، در ارتباط با تعیین مقدار آب لازم برای آبشویی نمک‌های محلول از نیمرخ خاک انواع مدل‌های تجربی با روابط ریاضی و توابع هذلولی، نمایی و توانی را ارائه کردند که هر یک از این روابط بر اساس بافت خاک، مقدار شوری اولیه و شرایط محل آزمون آبشویی تعیین شدند. در پژوهشی دیگر Xie et al. (2011)، به منظور مدیریت بهتر آب و کاهش شوری خاک در مزرعه از مدل HYDRUS برای ارزیابی اثر مقدار آب آبیاری بر رطوبت و دینامیک شوری خاک در مناطقی با سطح آب زیرزمینی کم عمق استفاده کردند. سپس داده‌های حاصل از شبیه‌سازی مدل و داده‌های مشاهده شده در مزرعه مورد مقایسه قرار دادند. نتایج این پژوهش نشان داد ارتباط قابل قبولی بین شبیه‌سازی مدل و داده‌های مشاهده‌ای وجود دارد. PHogat et al. (2014) با استفاده از مدل HYDRUS اقدام به شبیه‌سازی فصلی حرکت آب و املاح در خاک تحت آبیاری قطره‌ای سطحی در باغ مرکبات نمودند. مقادیر آب و املاح و نیترات خاک به صورت هفتگی اندازه‌گیری و با مدل شبیه‌سازی مورد مقایسه قرار گرفت. هدف اصلی آن تحقیق بررسی اثر شیوه‌های مدیریتی کود آبیاری در میزان نیترات از خاک بود. نتایج آن‌ها نشان داد که با کاهش میزان آب آبیاری و نیترژن کاربردی علاوه بر کاهش مصرف آب

این مطالعه با هدف ارائه راهکارهای عملی برای کشاورزان دشت شور قزوین انجام شده و تلاش دارد تا ضمن کاهش هزینه‌های اصلاح خاک، وابستگی به منابع آب شیرین و زیرزمینی را کاهش دهد. برای دستیابی به این هدف، سناریوهای مختلفی از جمله استفاده از پساب زهکشی و ترکیب آن با دیگر منابع آبی، با بهره‌گیری از شبیه‌سازی عددی در مدل HYDRUS بررسی شده‌اند. نتایج این پژوهش در قالب یک مدل کاربردی، می‌تواند به مدیریت مؤثرتر شوری خاک کمک کند.

### مواد و روش‌ها

#### معرفی منطقه مورد مطالعه و محل انجام نمونه‌برداری

شهرستان بوئین‌زهرا در جنوب استان قزوین و در ۵۵ کیلومتری این شهر قرار دارد. این شهرستان با مساحت ۵۵۲۶ کیلومتر مربع و ارتفاع متوسط ۱۵۰۰ متر از سطح دریا، حدود ۲۱ هزار نفر جمعیت دارد. از شمال به قزوین، از جنوب به استان‌های مرکزی و همدان، از شرق به تهران و از غرب به تاکستان محدود می‌شود. این منطقه بین عرض جغرافیایی  $35^{\circ} 30'$  تا  $36^{\circ} 10'$  شمالی و طول  $37^{\circ} 49'$  تا  $19^{\circ} 50'$  شرقی واقع شده و آب و هوایی گرم و خشک دارد (شکل ۱).

مکان نمونه‌برداری در اراضی مجموعه کشت و صنعت سیمرغ (شامل باغات پسته و اراضی با شوری بالا) انجام شد. در این عملیات، مناطق با بیشترین شوری (حدود ۶۴ دسی‌زیمنس بر متر) انتخاب شدند تا نتایج قابل تعمیم باشند. شوری بالا باعث دشواری در استفاده از تجهیزات نمونه‌برداری شده بود.

میانگین بارش سالانه در این منطقه ۲۱۰ میلی‌متر است و بوئین‌زهرا از خشک‌ترین نقاط استان قزوین به شمار می‌رود. مطالعات خاک‌شناسی نشان می‌دهد که خاک‌های منطقه عمدتاً از رده‌ی Aridisols بودند و ویژگی‌هایی نظیر کم‌تحرکی مواد آلی، بافت سبک تا متوسط، و ظرفیت نگهداشت آب پایین داشتند. این خاک‌ها معمولاً در اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک شکل می‌گیرند و در منطقه مورد مطالعه، حضور افق‌های گچی<sup>۱</sup> و نمکی<sup>۲</sup> در پروفیل خاک مشاهده شد. چنین شرایطی باعث کاهش حاصلخیزی

و آبشویی به ترتیب تا حدود ۳۷ و ۵۰ درصد، میزان محصول نیز کاهش می‌یابد.

Selim et al. (2018) در پژوهش خود انتقال مواد آلی و کودها را در آزمایشی با خاک درشت‌دانه مورد بررسی قرار دادند. املاح منتخب برومید و ماده رنگی بوده و با استفاده از آبیاری قطره‌ای در مدت سه ساعت تزریق صورت گرفته است. پس از انجام آزمایش‌ها از مدل HYDRUS برای شبیه‌سازی عددی حرکت آب و املاح در محیط خاک استفاده شده است. پس از مقایسه مدل‌های آزمایشگاهی و شبیه‌سازی، نتایج آن‌ها نشان داد، استفاده از مدل HYDRUS ابزاری سریع و کم‌هزینه برای شبیه‌سازی حرکت ردیاب‌ها در محیط خاک می‌باشد.

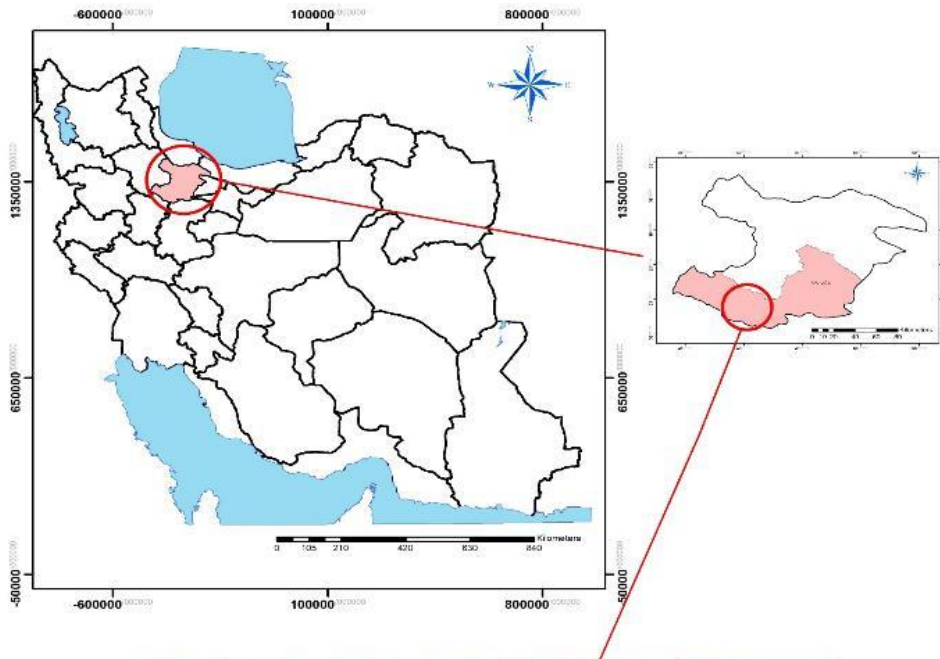
Filho & Dias (2020) طی آزمایشات خود از کود گچ و گاو استفاده کردند تا ارزیابی کنند که چگونه بر خصوصیات فیزیکی و شیمیایی یک خاک شور و شور که با آب‌های زیرزمینی محلی در شمال شرقی برزیل آبیاری می‌شود، تأثیر می‌گذارد. آن‌ها دریافتند که گچ همراه با کود بیشترین بهبود را ایجاد می‌کند، که منجر به بیشترین کاهش در درصد سدیم، میزان جذب سدیم و pH و بیشترین افزایش در میزان نفوذ می‌شود. دوز کمتر کود دامی (۴۰ تن در هکتار) در کاهش نسبت جذب سدیم (SAR) به اندازه دوز بالاتر (۸۰ تن در هکتار) به همان اندازه مؤثر بود. استفاده از گچ به اندازه کافی برای جایگزینی ۲۰٪ درصد سدیم قابل تعویض برای احیای خاک مورد بررسی کافی بود. علی‌رغم فواید واضح ترکیب گچ و کود، pH خاک هنوز بیش از حد مطلوب (۶/۶) بود تا عناصر کلان و ریز مغذی‌ها به طور کامل در دسترس اکثر گیاهان قرار گیرد. باید بر آزمایش عوامل اسیدی اضافی و کم‌هزینه برای افزایش اصلاح خاک خاک‌های شور و نمک در مناطق نیمه‌خشک باشد.

با وجود تحقیقات فراوان در زمینه آبشویی، استفاده از آب‌های غیرمتعارف و مواد اصلاح‌کننده خاک، و همچنین مدل‌سازی حرکت املاح با نرم‌افزار HYDRUS، هنوز هم انجام پژوهش‌های کاربردی در مقیاس مزرعه و متناسب با شرایط اقلیمی و منابع آبی کشور، به‌ویژه در مناطق خشک، ضروری به نظر می‌رسد.

<sup>2</sup> Salic Horizon

<sup>1</sup> Gypsic Horizon

طبیعی خاک، محدودیت در رشد ریشه، و افزایش حساسیت به شوری می‌شود که در نهایت بهره‌وری کشاورزی را به‌طور قابل توجهی تحت تأثیر قرار خواهد داد.



شکل (۱): موقعیت منطقه مطالعاتی

### نمونه‌برداری خاک

جهت نمونه‌برداری از خاک منطقه، تلاش بر این بود تا نمونه‌ها با حداقل دستخوردگی از عرصه برداشت شوند تا نتایج به شرایط طبیعی حداکثر شباهت را دارا باشند. به این منظور نوعی سیلندر نمونه‌بردار، طراحی شد (شکل ۲). لبه‌های این سیلندر به جهت شکستن سطوح سله بسته در سطح خاک‌های شور، همانطور که در شکل (۲) نمایش داده می‌شود بصورت کنگره‌های تیز طراحی شده تا سیلندر

راحت‌تر بتواند به عمق خاک نفوذ نماید. از سوی دیگر برای جمع‌آوری نمونه خاک لوله‌های پلیکا با قطر ۱۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۵۰ سانتی‌متر داخل نمونه‌بردار تعبیه گردید و پس از انجام نمونه‌برداری درپوش انتهایی لوله پلیکا قرارداده شد تا نمونه خاک خارج نشود و سپس با باز نمودن سرپوش بالایی نمونه‌بردار می‌توان لوله پلیکا را خارج نموده و به آزمایشگاه جهت انجام آزمایشات لازم منتقل کرد (شکل ۲).

نتیجه آنالیز فیزیکی و شیمیایی نمونه‌های خاک برداشت شده از منطقه مورد مطالعه در جدول (۱) و (۲) ارائه شده است



شکل (۲): سیلندر طراحی شده به جهت نمونه‌برداری از خاک عرصه با حداقل دستخوردگی

جدول (۱): پارامترهای فیزیکی خاک منطقه مورد مطالعه (نتایج تحقیق)

چگالی حقیقی ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ )	چگالی ظاهری ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ )	درصد ذرات خاک سیلت (%)	ماسه (%)	رس (%)	بافت خاک	عمق خاک (cm)
۲/۶۷	۱/۴	۳۴	۳۲	۳۴	Clay-loam	۵۰-۰

جدول (۲): پارامترهای شیمیایی خاک منطقه مورد مطالعه (نتایج تحقیق)

K (meq/lit)	Na (meq/lit)	Cl (meq/lit)	HCO <sub>3</sub> (meq/lit)	CO <sub>3</sub> (meq/lit)	Mg (meq/lit)	Ca (meq/lit)	pH	EC (dS/m)
۳۰۰	۴۲۰	۲۲۰	۲۰	۴۰	۱۰	۱۴	۸	۶۴

شد و به همین دلیل مساحت زیادی از اراضی منطقه بلااستفاده و رها شده است که این امر خود موجب تسریع روند بیابان‌زایی در دشت قزوین می‌باشد. لازم به ذکر است خاک موردنظر از نظر pH در محدوده متوسط قرار دارد و مشکل پراکندگی در خاک مورد مطالعه مشاهده نمی‌شود.

تحلیل داده‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد مطالعه، با توجه به جدول طبقه‌بندی خاک جدول (۳) نشان‌دهنده این است که خاک منطقه مورد مطالعه، در دسته خاک‌های شور قرار می‌گیرد که در این نوع از خاک‌ها علاوه بر اختلال در کاربرد ادوات کشاورزی، رویش بسیاری از گونه‌های گیاهی حتی گونه‌های مزوفیت نیز با مشکل مواجه خواهند

جدول (۳): طبقه‌بندی خاک‌های شور - شورسدی و سدیمی (Richards, 1954)

معیار	خاک غیر شور	خاک شور	خاک شور-سدیمی	خاک سدیمی
EC (dS/m)	<۴	>۴	>۴	<۴
SAR	<۱۳	<۱۳	>۱۳	>۱۳
ESP	<۱۵	<۱۵	>۱۵	>۱۵
pH	<۸/۵	<۸/۵	<۸/۵	۱۰-۹ (>۸/۵)
شرایط فیزیکی	طبیعی	طبیعی	متغیر	ضعیف
رنگ	طبیعی	روشن-سفید	سفید-خاکستری	تیره-سیار



### داده برداری های آزمایشگاهی

#### اندازه گیری عناصر خاک

طی اندازه گیری های آزمایشگاهی مقادیر K, Na, Cl, HCO<sub>3</sub>, CO<sub>3</sub>, Mg, Ca, PH و EC نمونه خاک اندازه-گیری شد. داده برداری ها از عصاره اشباع خاک انجام شد. عصاره گیری از خاک اشباع ۲۴ ساعت پس از تهیه گل اشباع و قرار دادن نمونه ها داخل سانتریفیوژ انجام شد.

#### اندازه گیری عناصر موجود در نمونه های آب مورد

##### استفاده

برای انجام آزمایشات آبشویی از سه نمونه آب موجود در منطقه استفاده شد. نمونه اول آب زهکش شده از باغات پسته منطقه که در محل زهکش اراضی جمع آوری شده بود، نمونه دوم آب چاه منطقه یا آب شیرین که بعنوان نمونه شاهد نیز در نظر گرفته شد و نمونه سوم اختلاط آب زهکش و آب چاه تهیه شد. برای نمونه های آب نیز مقادیر Ca, Mg, PH و EC اندازه گیری شد. مقادیر به شرح زیر می باشند:

جدول (۴): مقادیر اندازه گیری شده در نمونه های آب مورد استفاده (نتایج تحقیق)

تیمار آب	EC (dS/m)	PH (-)	Ca (meq/L)	Mg (meq/L)
آب چاه	۱/۸	۷/۱	۳/۲	۱۰/۸
آب مختلط	۳۳	۷/۷	۹	۳۳
آب زهکش	۵۷	۸	۱۲	۴۴

که در آن  $V_0$  حجم خلل و فرجی است که از آب پر شده اند ( $L^3$ )،  $\theta$  رطوبت حجمی (%) و  $V$  حجم توده خاک ( $L^3$ )، تعداد حجم منفذی خاک ( $P_v$ ) از رابطه (۲) محاسبه شد:

$$P_v = \frac{Q \cdot t}{V_0} = \frac{Q \cdot t}{\theta \cdot V} = \frac{\frac{Q \cdot t}{A}}{\theta \cdot V} = \frac{q \cdot t}{\theta \cdot L} = \frac{\bar{v} t}{L} \quad (2)$$

که در آن:  $P_v$  تعداد حجم منفذی خاک،  $Q$  شدت جریان ورودی به ستون خاک،  $A$  سطح مقطع نمونه خاک،  $L$  طول

#### برآورد مقدار آب مورد نیاز جهت آبشویی

مقدار آب آبشویی به کار برده شده بر اساس حجم منفذی<sup>۲</sup> در نظر گرفته شد که به صورت پیوسته در دو دوره به داخل ستون اعمال گردید. بدین ترتیب که پس از اندازه-گیری و جمع آوری زهاب مربوط به هر حجم منفذی، حجم منفذی بعدی جهت آبشویی ستون به کار برده شد. حجم منفذی عبارت است از حجم آن قسمت از خلل و فرج خاک که از آب پر شده اند و از رابطه (۱) به دست می آید (عباسی، ۱۳۹۲):

$$V_0 = \theta \cdot V \quad (1)$$

<sup>2</sup> Pore volume

<sup>1</sup> U.S SALINITY LABORATORY

ضخامت ۵ سانتی‌متر استفاده شد. در قسمت پایین ستون زهکش‌هایی تعبیه شده که قابلیت تنظیم دارند و شدت زهکشی دلخواه را می‌توان در آن‌ها تنظیم نمود. در زیر هر خروجی یک ظرف مدرج جهت جمع‌آوری زهاب خروجی در نظر گرفته می‌شود. در خصوص طراحی سیستم آب آبیاری سه نمونه آب شور (آب زهکش)، آب مختلط (آب زهکش+آب چاه) و آب شیرین (آب چاه) در ظروفی در بسته دارای دو شیر خروجی همزمان در قسمت بالایی سیلندرها قرار داده شد که توسط لوله‌هایی شیشه‌ای، در هر روز از عملیات آبیاری حجم یکسان و برابری از آب را وارد دو نمونه خاک دارای زهکش شنی و فاقد زهکش شنی می‌کرد. به جهت بررسی تأثیر شرایط مختلف زهکشی بر عملیات آبیاری، در قسمت پایین دست نیمی از ستون‌ها (معادل ۳ ستون)، زهکشی شنی به ارتفاع ۵ سانتی‌متر، متشکل از شنی‌هایی ۳-۵ سانتی‌متری تعبیه شد و در سه نمونه دیگر زهکش شنی قرار داده نشد تا مقایسه بین شرایط زهکش مطلوب و نامطلوب در انجام عملیات آبیاری خاک شور، همزمان با بررسی تأثیر کیفیت‌های مختلف آب در آبیاری، انجام بگیرد. در قسمت انتهایی همه نمونه‌ها توری بسیار ریزدانه جهت جلوگیری از خروج خاک از زهکش قرار داده شد (شکل ۳).

نمونه خاک،  $t$  زمان و  $\bar{v}$  سرعت متوسط ظاهری است (عباسی، ۱۳۹۲).

### چیدمان و نحوه قرارگیری مدل فیزیکی

طی پژوهش حاضر سعی بر این بود که پس از انجام نمونه‌برداری بوسیله استوانه‌های PVC، به منظور سهولت در جمع‌آوری زه‌آب خارج شده از نمونه‌ها و نیز سهولت دسترسی به آزمایشگاه جهت انجام مطالعات خاکشناسی منطقه، نمونه خاک را به صورت دست نخورده به آزمایشگاه منتقل کرده و آزمایشات داخل ستون بررسی و انجام شود. ستون‌های مورد نظر به صورت ستون‌های آزمایشگاهی طراحی شد که استوانه‌هایی از جنس PVC با قطر ۱۰ و ارتفاع ۸۰ سانتی‌متری که تا ارتفاع ۵۰ سانتی‌متری از خاک شور منطقه پر شدند و قسمت بالایی ستون بعنوان حجم خالی جهت انجام عملیات آبیاری در نظر گرفته شد. ستون‌های ذکر شده از بالا باز و از پایین بسته هستند و به صورت عمودی روی یک پایه فلزی قرار داده شدند. در مرز بالا دست ستون جهت جلوگیری از به هم خوردن ذرات خاک هنگام اضافه نمودن آب، در بالای ستون از یک قطعه اسفنجی نازک استفاده گردید و در مرز پایین دست ستون جهت تأمین گرادیان هیدرولیکی و سهولت زهکشی و همچنین ممانعت از خروج ذرات خاک، از فیلتر شنی به



شکل (۳): چیدمان سیلندرها برای انجام عملیات آبیاری



## مدل سازی عددی

پس از انجام نمونه برداری و شروع آزمایشات آبشویی در دور اول، داده برداری های عددی از میزان حجم آب نفوذی و حجم زهاب خروجی در تمام تیمارها آغاز شد، سپس به منظور شبیه سازی طولانی مدت آزمایش که انجام آن نیازمند صرف زمان زیادی می باشد، از مدل سازی عددی با استفاده از مدل HYDRUS بهره گرفته شد.

کاربرد مدل HYDRUS و بسته نرم افزاری همراه با آن، ارائه مدل های عددی به جهت شبیه سازی حرکت آب، املاح و گرما در محیط متخلخل برای شرایط اشباع و غیر اشباع می باشد. این بسته نرم افزاری قابلیت شبیه سازی جریان و انتقال املاح به صورت یک بعدی، دوبعدی و سه بعدی را دارا می باشد. اگرچه شبیه سازی حرکت آب در تمام این مدل ها تقریباً یکسان است، ولی مدل های انتقال املاح مختلفی وجود دارند که در کدهای متفاوت ارائه شده اند. بعضی از مدل ها تنها می توانند انتقال املاح را بصورت مستقل از یکدیگر شبیه سازی کنند، در حالی که برخی دیگر شامل بخش بیوژئوشیمیایی هستند که توانایی شبیه سازی واکنش های پیچیده بین املاح مختلف را نیز دارا هستند. در این تحقیق سنجش میزان شوری خاک از مباحث اصلی مورد بررسی می باشد لذا از معادلات انتقال املاح مستقل برای شبیه سازی شوری بهره گرفته شده است (Simunek et al., 2005).

### حل معکوس یا واسنجی<sup>۱</sup>

حل معکوس عبارت است از تعیین نمودن پارامترهای ثابت در معادلات حرکت آب و املاح، به طوری که مقدار تابع هدف که در واقع به نوعی اختلاف بین مقادیر اندازه گیری شده و محاسبه شده می باشد، به حداقل برسد. موفقیت روش مدل سازی معکوس در برآورد ویژگی های خاک، بستگی به عوامل مختلفی از جمله کیفیت و کمیت داده های مشاهده ای، انتخاب شرایط مرزی صحیح، مناسب بودن توابع هیدرولیکی خاک و همچنین مدل ریاضی مورد استفاده برای شبیه سازی و توانایی الگوریتم بهینه سازی دارد (Bitterlich et al., 2004). ضعف در هر یک از عوامل مذکور می تواند موجب واگرایی روش حل و عدم امکان

دستیابی به پارامترهای بهینه معتبر شود. در صورتی که پارامترهای مجهول به خوبی بهینه شوند اصطلاحاً گفته می شود که مدل Well-posed شده است، در غیر این صورت Ill-posed شده است. پدیده Ill-posed زمانی اطلاق می شود که نتوان تابع پیوسته ای را به داده های اندازه گیری شده برازش داد. یکتا نبودن پارامترها در روش حل معکوس به این معنی است که در ازای چند سری از پارامترهای مجهول، تابع هدف حداقل می شود؛ به عبارت ساده تر، برای تابع هدف چندین جواب مختلف وجود دارد. در این حالت به طور معمول تابع هدف دارای حداقل های محلی (Local minimum) متفاوتی خواهد بود. برای پیدا کردن حداقل واقعی (Global minimum)، الگوریتم حل باید با چند حدس اولیه (Initial guess) متفاوت و منطقی از پارامترهای مجهول اجرا شود و سپس مقادیر بهینه پارامترهای مورد نظر با مقایسه مقادیر تابع هدف تعیین شود. برای رسیدن به یک پاسخ یکتا باید حل معکوس بارها و بارها با پارامترهای اولیه مختلف آزمون شود (Minasny & Mc Bratney, 2002).

در این پژوهش، ما با وارد کردن داده های مربوط به بافت خاک (شامل درصد های سیلت، رس، و شن) از مدل Rosetta برای تخمین اولیه پارامترهای هیدرولیکی خاک استفاده کردیم. سپس، با استفاده از داده های آزمایش صفحات فشاری و برازش آن ها به معادله ون گنوختن در مدل RETC، مقادیر نهایی این پارامترها را به دست آوردیم. این فرآیند امکان شبیه سازی دقیق تغییرات شوری خاک را با استفاده از مدل HYDRUS-1D فراهم کرد و در نهایت، نتایج شبیه سازی را با داده های اندازه گیری شده مقایسه کردیم تا دقت مدل را تأیید کنیم.

### آنالیز حساسیت

برای استفاده از مدل های شبیه سازی، تحلیل حساسیت باید انجام گیرد. در واقع آشنایی با رفتار و حساسیت یک مدل پیش از کار با آن نسبت به داده های ورودی به مدل، امری ضروری است. آنالیز حساسیت به این مساله می پردازد که چگونه تغییرات در ورودی یک مدل (عددی و یا سایر مدل ها) چه تغییراتی بر روی خروجی

<sup>1</sup> Calibration

پارامترهای حرکت آب انجام شده است، تا زمان شبیه‌سازی طولانی‌تر و بهینه‌سازی پیچیده‌تر نگردد. حساسیت مدل با استفاده از شاخص حساسیت Ghorbani (1997) انجام گردید. این شاخص عبارت است از:

$$SI = \frac{[(O_2 - O_1)/\bar{O}]}{[(I_2 - I_1)/\bar{I}]} \quad (3)$$

که در آن: SI شاخص حساسیت،  $O_1$  مقدار اولیه پارامتر خروجی،  $O_2$  مقدار ثانویه پارامتر خروجی،  $I_1$  مقدار اولیه پارامتر ورودی،  $I_2$  مقدار ثانویه پارامتر ورودی،  $\bar{O}$  متوسط مقادیر پارامتر خروجی و  $\bar{I}$  متوسط مقادیر پارامتر ورودی می‌باشد. برطبق این روش، حساسیت خروجی‌های مدل نسبت به پارامترهای ورودی به چهار گروه حساس، نیمه حساس، با حساسیت کم و غیرحساس تقسیم‌بندی می‌شود (Ghorbani, 1997).

اگر میزان این شاخص  $0/5-0/1$  باشد، مدل به آن پارامتر ورودی نیمه حساس است. در صورتی که میزان این شاخص  $0/1-0$  مدل به آن پارامتر ورودی حساسیت کمی دارد و در صورتی که تغییرات پارامتر ورودی هیچ تأثیری بر خروجی (مقدار شاخص نزدیک صفر) مدل نداشته باشد، مدل به آن پارامتر غیرحساس است. در صورتی که مقدار شاخص حساسیت (SI) بزرگ‌تر از  $0/5$  باشد، مدل به پارامتر ورودی حساس در نظر گرفته می‌شود. این تقسیم‌بندی بر مبنای دامنه‌های ارائه شده توسط Ghorbani (1997) و همچنین مطالعات جدید مانند Saltelli et al. (2008) و Pianosi et al. (2016) پیشنهاد می‌گردد. در جدول (۵)، دسته‌بندی چهارگانه‌ی حساسیت پارامترها به همراه دامنه عددی مربوط به شاخص SI نشان داده شده است.

مدل دارد و به صورت کیفی و کمی به محدوده‌های مختلفی از تغییرات تقسیم می‌شود (Saltelli et al., 2004). در واقع تحلیل حساسیت نشان‌دهنده تأثیرپذیری خروجی‌های مدل از داده‌های ورودی است (Simunek et al., 2005; Simunek et al., 2013). طی سال‌های اخیر تجزیه و تحلیل حساسیت به صورت چشمگیری به عنوان یک مرحله ضروری در فرآیند مدل‌سازی در نظر گرفته شده است؛ به خصوص زمانی که مدل‌ها پیچیده‌تر باشد و یا از مدل ترکیبی برای توصیف شرایط استفاده شود (Dawson et al., 2005). این روش، تأثیرپذیری مدل و شرایط واقعی را از داده‌های ورودی مورد بررسی قرار می‌دهد. بدین ترتیب که اگر تغییرات یکی از پارامترهای ورودی تأثیر اندکی بر داده‌های خروجی مدل داشته باشد، می‌توان چنین استنباط کرد که آن پارامتر تأثیر ناچیزی بر نتایج مدل دارد و در نتیجه می‌توان از خطای اندازه‌گیری یا تخمین آن پارامتر چشم‌پوشی کرد. بر عکس، در صورت تأثیرپذیری زیاد مقادیر خروجی مدل باید آن پارامتر را با دقت بیشتری برآورد نماید. برای بهینه‌سازی هر چه بهتر پارامترهای ثابت توصیه می‌شود که ابتدا تحلیل حساسیت انجام گیرد. با توجه به کمیت و کیفیت داده‌های اندازه‌گیری شده و شرایط مسئله، تغییر زیاد یک یا چند پارامتر تأثیر چندانی بر خروجی‌ها و نتایج نداشته باشد و این امر سبب می‌شود که پارامترهای دیگر بردار مجهولات به درستی برآورد نشود و یا بی دلیل زمان بهینه‌سازی طولانی‌تر شود. تعداد پارامترهای ثابت در شبیه‌سازی حرکت آب، پنج عدد (رطوبت اشباع، رطوبت باقی‌مانده، هدایت هیدرولیکی،  $n$  و  $\alpha$ ) و برای شبیه‌سازی املاح سه عدد (ضرایب انتشارپذیری و پخشیدگی)، که هر کدام قبل‌تر توضیح داده شده‌اند، می‌باشد. در این پژوهش تحلیل حساسیت تنها بر روی

جدول (۵): دسته‌بندی حساسیت پارامترها بر اساس شاخص SI (Pianosi et al., 2016)

گروه حساسیت مدل به پارامتر ورودی	دامنه شاخص SI
----------------------------------	---------------



$SI > 0.5$	حساس
$0.5 \geq SI > 0.1$	نیمه حساس
$0.1 \geq SI > 0$	کم حساس
$SI \approx 0$	غیر حساس

پس از شروع عملیات آبیاری طی دو دوره در مدت یک ماه، داده‌های ورودی مورد نیاز به مدل HYDRUS-1D اعم از زمان شروع آبیاری، زمان خروج اولین زه‌آب از ستون، حجم کل آب نفوذ یافته، حجم کل زه‌آب خارج شده، سری زمانی آب خروجی و سایر داده‌های مورد نیاز ثبت گردید. علت انتخاب بازه زمانی یک ماهه برای شروع و پایان عملیات، نزدیک بودن به شرایط زمان‌بندی آبیاری کشاورزان در منطقه و رعایت زمان‌بندی مورد نیاز برای استراحت خاک و رسیدن رطوبت خاک به نقطه ظرفیت مزرعه (FC)، می‌باشد. با توجه به سنگین بودن بافت خاک، پس از آبیاری دور اول به مدت ۷ روز، مدت زمان رسیدن خاک به ظرفیت زراعی حدود ۱۰ روز به طول انجامید و بدین صورت فاصله بین دو دور آبیاری تعیین گردید. پس از انجام داده‌برداری و شبیه‌سازی با مدل فیزیکی، از مدل HYDRUS برای بررسی سناریوهای مختلف مدیریت آبیاری طی بازه زمانی تعیین شده، بهره گرفته شد. بعلاوه تفاوت در شرایط هیدرولیکی حاکم بر هر تیمار که بر تراکم و ساختمان خاک در مدل فیزیکی تأثیرگذار می‌باشد، هر تیمار به صورت جداگانه شبیه‌سازی شد و هر کدام از تیمارها با داده‌های خود واسنجی و نهایتاً صحت‌سنجی<sup>۱</sup> شد.

#### شبیه‌سازی پارامترهای هیدرولیکی خاک

پارامترهای هیدرولیکی خاک، از اصلی‌ترین پارامترهای ورودی به مدل هستند. سنجش این پارامترها توسط مدل Rosetta که مدلی واقع در HYDRUS است و کارکرد آن بر اساس شبکه‌های عصبی مصنوعی است، صورت می‌گیرد. این مدل با وارد نمودن داده‌های مربوط به بافت خاک چون درصد‌های سیلت، رس و شن، تخمین اولیه‌ای از پارامترهای هیدرولیکی را در اختیار کاربر قرار می‌دهد. بر همین اساس

#### ارزیابی مدل

ارزیابی مدل با مقایسه بین نتایج بدست‌آمده از مدل و داده‌های مشاهداتی از آزمایشات انجام گرفت. برای مقایسه بین داده‌ها، از ضریب تبیین ( $R^2$ )، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده (NRMSE) استفاده شده است.

$$R^2 = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}} \right]^2 \quad (1)$$

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

$$NRMSE (\%) = \frac{RMSE \times 100}{\bar{O}} \quad (3)$$

که در آن‌ها:  $\bar{O}$ ،  $\bar{P}$ ،  $O_i$  و  $P_i$  به ترتیب مقادیر برآورد شده، متوسط مقادیر برآورد شده، مقادیر اندازه‌گیری شده، متوسط مقادیر اندازه‌گیری شده، تعداد داده‌ها و شماره هر یک از داده‌ها می‌باشد. طبق گزارش Jamieson et al. (1991) اگر مقدار  $NRMSE < 10\%$  باشد نشان‌گر عملکرد عالی مدل،  $10\% < NRMSE < 20\%$  خوب،  $20\% < NRMSE < 30\%$  متوسط و  $NRMSE > 30\%$  ضعیف می‌باشد. اگر مقادیر اندازه‌گیری شده و مقادیر برآورد شده مساوی باشند حالت بهینه خواهد بود. مثبت شدن علامت نشانگر آن است که مدل مقادیر را بیشتر برآورد میکند و همچنین منفی شدن مقادیر بیانگر آن است که مدل مقادیر را کمتر تخمین می‌زند (Sandhu & Irmak, 2020).

#### نتایج و بحث

نتایج شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار HYDRUS-1D

<sup>1</sup> Validation

زودیافت خاک، از جمله بافت و جرم مخصوص ظاهری، با روش حل و با استفاده از مدل HYDRUS برآورد شد سپس با توجه به داده‌های حاصل از آزمایش صفحات فشاری که به معادله ون‌گونختن در مدل RETC برازش داده شده، مقادیر نهایی این پارامترها بدست آمد. در جدول (۴) پارامترهای هیدرولیکی اولیه اندازه‌گیری شده و بدست آمده از نرم‌افزار RETC قابل مشاهده است.

مقادیر اولیه پارامترهای هیدرولیکی خاک مورد مطالعه تخمین زده شد و مدل اجرا گردید (جدول ۶). مقدار عددی این پارامترها برای مدل‌سازی HYDRUS ضروری است. شبیه‌سازی هیدرولیکی شامل یافتن ضرایب ثابت منحنی مشخصه خاک و سپس مقایسه بین مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده می‌باشد. ضرایب اولیه معادله Van Genuchten (1980) با توجه به مشخصات

جدول (۶): مقادیر ثابت پارامترهای هیدرولیکی اندازه‌گیری شده توسط مدل HYDRUS (نتایج تحقیق)

$l$	$m$	هدایت هیدرولیکی اشباع $K_s$ ( $cm \cdot hr^{-1}$ )	رطوبت حجمی باقی مانده $\theta_r$ ( $cm^3 \cdot cm^{-3}$ )	$\alpha$ ( $cm^{-1}$ )	$n$ (-)	رطوبت حجمی اشباع $\theta_s$ ( $cm^3 \cdot cm^{-3}$ )	پارامتر
(-)	(-)	۰/۴۵	۰/۰۶۷	۰/۰۲	۱/۴۱	۰/۴۵	مقدار

مرحله واسنجی ۰/۵۶ و در مرحله صحت‌سنجی ۰/۶۰۹ به دست آمد. همچنین، ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده (NRMSE) برای مرحله واسنجی ۴/۴۷٪ و برای مرحله صحت‌سنجی ۲۰/۷۸٪ محاسبه شد. این نتایج نشان داد که مدل HYDRUS به خوبی توانایی پیش‌بینی تغییرات شوری خاک را دارد.

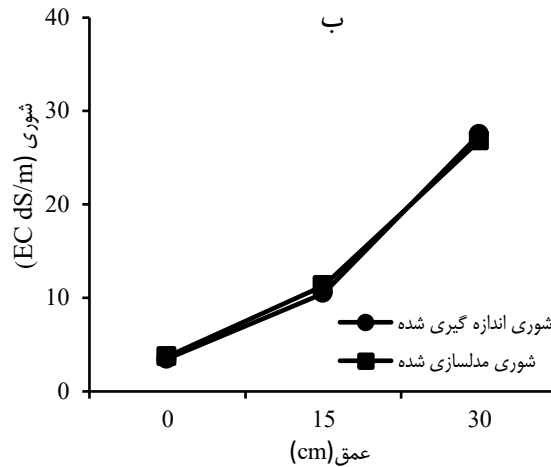
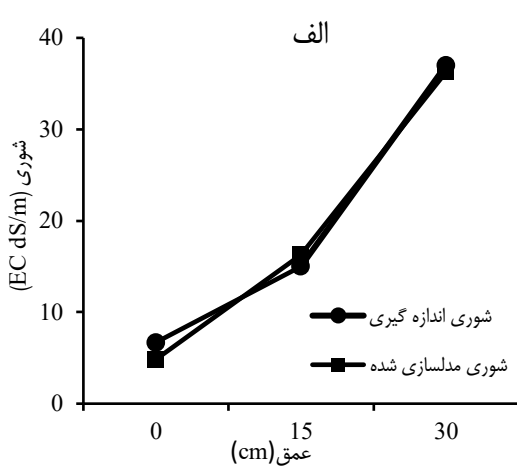
این نتایج با تأکید بر اینکه آبشویی تنها زمانی برای حذف نمک مؤثر است که خاک دارای زهکشی کافی باشد، همخوانی دارد. برای مثال، Shaygan & Baumgartl (2022) در بررسی خود اشاره کردند که کارایی آبشویی می‌تواند تحت تأثیر شرایط فیزیکی نامناسب خاک قرار گیرد، به‌ویژه زمانی که حرکت عمودی آب و محلول‌ها محدود شده و امکان خروج مؤثر نمک‌های آبشویی شده از پروفیل خاک وجود نداشته باشد. در چنین شرایطی، نمک‌ها ممکن است به جای خارج شدن، در لایه‌های عمیق‌تر خاک تجمع یابند.

### نتایج شبیه‌سازی شوری

شبیه‌سازی تغییرات شوری خاک توسط مدل HYDRUS انجام شد و نتایج حاصل از واسنجی و صحت‌سنجی در شکل‌های (۴) و (۵) ارائه شده است.

### نتایج شبیه‌سازی شوری در تیمار آبشویی با آب چاه وستون فاقد زهکش

با توجه به شکل (۴) آبشویی با آب چاه در ستون فاقد زهکش توانسته شوری خاک را در سطح خاک به کمترین میزان خود ( $EC=4.8 \text{ dS/m}$ ) و در عمق ۳۰ سانتی‌متری به ( $EC=36.2 \text{ dS/m}$ ) برساند. علت بالاتر بودن شوری در عمق خاک تجمع املاح شسته شده در لایه‌های پایین‌تر و نیز پایین بودن سرعت زهکشی با توجه به سنگین بودن بافت خاک می‌باشد. تحلیل آماری این شبیه‌سازی، دقت بالای مدل را تأیید می‌کند؛ به طوری که ضریب تعیین ( $R^2$ ) در هر دو مرحله واسنجی و صحت‌سنجی برابر ۰/۹۹ بود. مقادیر ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) نیز در

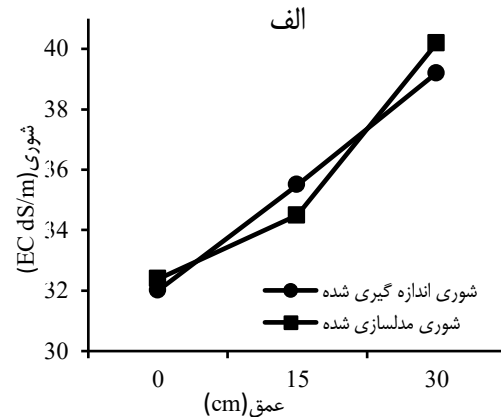
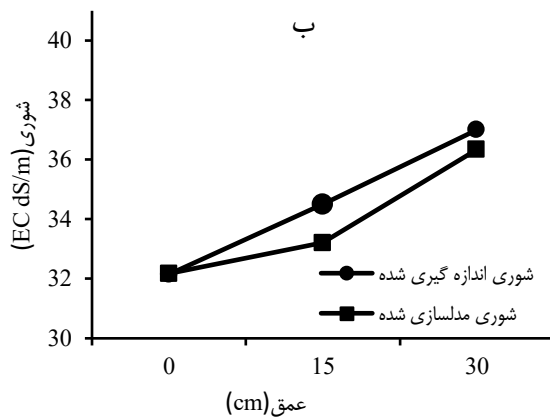


نمودار (۴): شوری اندازه گیری شده و مدل سازی شده، تیمار آب چاه در ستون بدون زهکش شنی، الف: مرحله واسنجی ب: مرحله صحت سنجی

آبیاری می تواند در کوتاه مدت به کاهش شوری سطحی کمک کند، اما در صورت عدم وجود زهکشی مناسب، خطر تجمع نمک در منطقه ریشه و لایه های زیرین افزایش می یابد و پایداری درازمدت سیستم آبیاری را به خطر می اندازد. این وضعیت بر اهمیت زهکشی در کنار مدیریت کیفیت آب برای کاهش پایدار شوری تأکید می کند. مطابق شکل (۵) پیش بینی شوری مدل سازی شده بسیار به مقادیر اندازه گیری شده در هر دو مرحله واسنجی و صحت سنجی نزدیک می باشد که نشان دهنده دقت و کارایی خوب مدل HYDRUS در برآورد تغییرات شوری خاک می باشد.

#### نتایج شبیه سازی شوری در تیمار آبشویی با آب مختلط و ستون فاقد زهکش

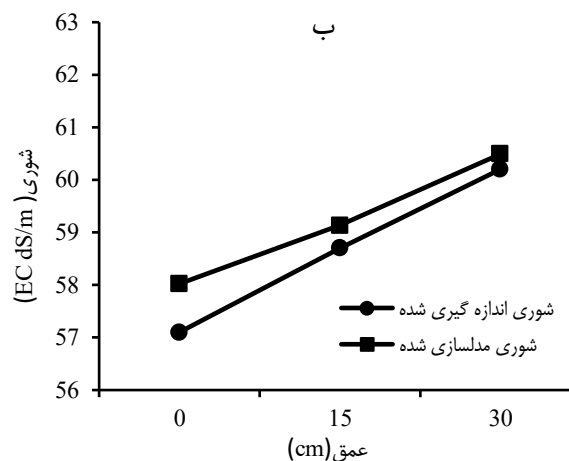
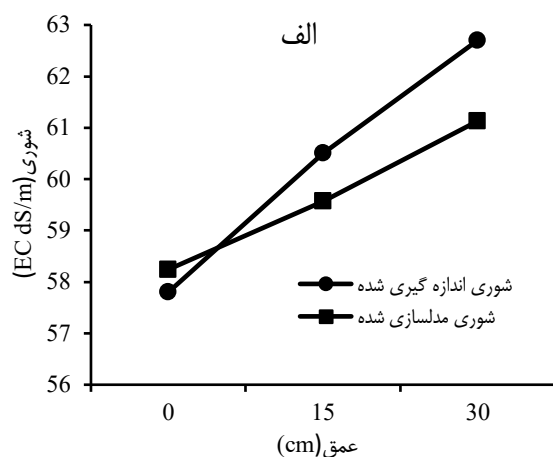
نتایج شکل (۵) نشان می دهد تیمار آبشویی شده با آب مختلط ( $EC=33 \text{ dS/m}$ ) در ستون فاقد زهکش توانسته شوری خاک را بطور میانگین در اعماق مختلف خاک از ( $EC=64 \text{ dS/m}$ ) تقریباً به نصف برساند ( $EC=32 \text{ dS/m}$ ) و همانطور که نمودار نشان می دهد شوری در عمق ۱۵ سانتی متری از سطح خاک در کمترین میزان خود و با افزایش عمق خاک، شوری افزایش یافته است. این الگو، یعنی تجمع نمک ها در لایه های عمیق تر در غیاب زهکشی مؤثر، با یافته های Qureshi et al. (2008) سازگار است که نشان می دهد استفاده از آب های با کیفیت متوسط برای



شکل (۵): شوری اندازه گیری شده و مدل سازی شده، تیمار آب مختلط در ستون بدون زهکش شنی، الف: مرحله واسنجی ب: مرحله صحت سنجی

که گزارش کردند استفاده مکرر از آب‌های شور (مانند زهاب) برای آبیاری بدون زهکشی کافی، منجر به انباشت تدریجی نمک در پروفیل خاک می‌شود و نه تنها شوری را کاهش نمی‌دهد بلکه می‌تواند آن را تشدید کند. آن‌ها تأکید کردند که اثربخشی آبیاری با آب‌های با کیفیت پایین، به شدت به وجود یک سیستم زهکشی کارآمد برای خروج نمک‌های محلول بستگی دارد.

در مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل HYDRUS با مقادیر اندازه‌گیری شده حقیقی تفاوت چندانی مشاهده نمی‌شود که همچنان نشان‌دهنده دقت و کارایی خوب مدل HYDRUS در پیش‌بینی شوری می‌باشد



شکل (۶): شوری اندازه‌گیری شده و مدل‌سازی شده، تیمار زهاب در ستون بدون زهکشی شنی، الف: مرحله واسنجی ب: مرحله صحت-سنجی

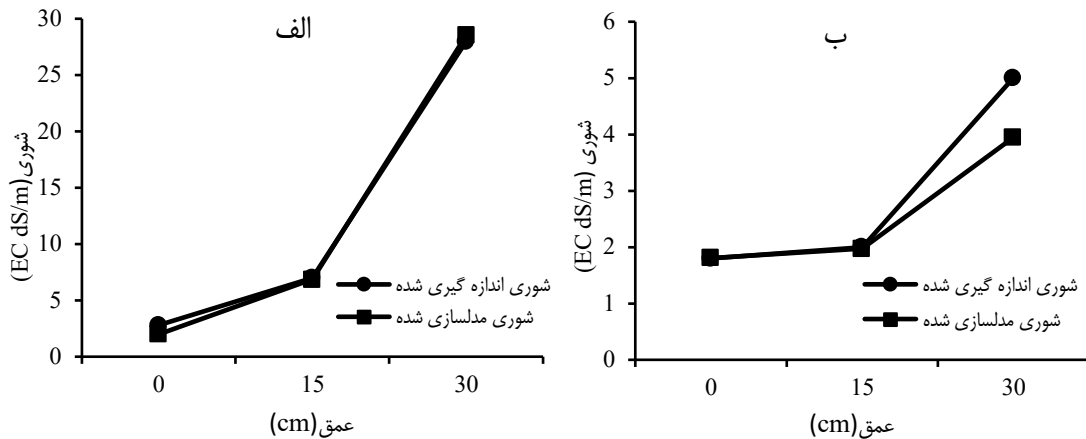
اراضی شور معرفی می‌کنند. برای مثال، مطالعه Feng et al. (2019) بر روی خاک‌های شور نشان داد که سیستم‌های زهکشی زیرسطحی، همراه با آبیاری با آب شیرین، منجر به کاهش قابل توجهی در هدایت الکتریکی (EC) خاک در تمام اعماق می‌شوند و از تجمع مجدد نمک جلوگیری می‌کنند. این مکانیزم، امکان شستشوی نمک‌ها به سمت لایه‌های زیرین و سپس خروج آن‌ها از طریق زهکش را فراهم می‌آورد. داده‌های مدل HYDRUS و داده‌های اندازه‌گیری شده حاکی از دقت بالای سنجش شوری در این مورد نیز می‌باشد.

## نتایج شبیه‌سازی شوری در تیمار آبیاری با زهاب و ستون فاقد زهکش

مطابق شکل (۶) آبیاری با زهاب در ستون بدون زهکش شنی (شورترین تیمار آزمایش)، شوری خاک (EC) را از ۶۴ dS/m به کمینه شوری ۵۷ dS/m بر متر که لایه ۱۵ cm از سطحی خاک می‌باشد و بیشینه شوری ۶۲ dS/m که لایه ۳۰ cm از سطح خاک می‌باشد، رسانده است که نشان می‌دهد آبیاری خاک بسیار شور با زهاب خالص کارایی کافی در کاهش مقادیر شوری ندارد. این یافته‌ها به خوبی با مشاهدات Ghafoor et al. (2012) همسو است

## نتایج شبیه‌سازی شوری در تیمار آبیاری با آب چاه و ستون دارای زهکش

باتوجه به شکل (۷) آبیاری با آب چاه در ستون دارای زهکش شنی (تیمار شاهد)، شوری خاک را از ۶۴ دسی-زیمنس بر متر به شوری ۲/۸ دسی-زیمنس بر متر در سطح خاک و ۲۸/۵ دسی-زیمنس بر متر در عمق ۳۰ سانتی‌متری از سطح خاک رسانده است و شوری خاک بطور کامل اصلاح شده است. این یافته‌ها به شدت با نتایج پژوهش‌های گسترده‌ای همخوانی دارد که ترکیب آب با کیفیت بالا و زهکشی مؤثر را به عنوان بهترین استراتژی برای احیای



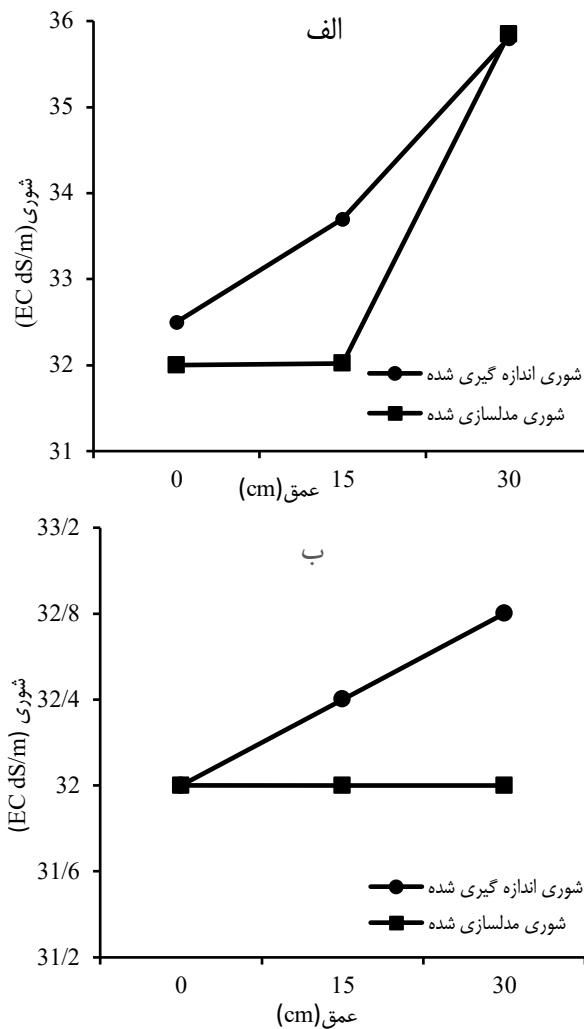
شکل (۷): شوری اندازه‌گیری شده و مدل‌سازی شده، تیمار آب چاه در ستون دارای زهکش شنی، الف: مرحله واسنجی  
ب: مرحله صحت‌سنجی

که از تیمار فوق  $5 \text{ (dS/m)}$  بالاتر می‌باشد و علت آن را می‌توان به تجمع بیشتر املاح در لایه‌های پایینی در ستون بدون زهکش شنی نسبت داد. اختلاف کم مقادیر مدل‌سازی شده با مقادیر اندازه‌گیری شده نشان‌دهنده دقت و کارایی بالای مدل HYDRUS در شبیه‌سازی و پیش‌بینی شوری در اعماق مختلف خاک می‌باشد.

این نتایج با یافته‌های Minhas et al. (2007) همسو است که بررسی کردند استفاده از آب‌های آبیاری با شوری متوسط (مخلوط) در خاک‌های دارای زهکشی، می‌تواند شوری خاک را تا حدی کاهش دهد، اما ممکن است به همان میزان اثربخش آب شیرین نباشد. آن‌ها اشاره کردند که حتی با وجود زهکشی، مدیریت دقیق حجم آب آبیاری و نظارت بر شوری آب زیرزمینی برای جلوگیری از بازگشت نمک‌ها ضروری است.

### نتایج شبیه‌سازی شوری در تیمار آبشویی با آب مختلط وستون دارای زهکش

بر اساس شکل (۸) در تیمار آبشویی با آب مختلط، شوری خاک از  $64 \text{ (dS/m)}$  به  $32/5$  در سطح خاک و  $35/8$  در عمق  $30$  سانتی‌متری از سطح خاک رسیده که می‌توان نتیجه گرفت شوری تقریباً به نصف مقدار اولیه تقلیل یافته است. شوری خاک در تیمار فوق (دارای زهکش شنی)، در مقایسه با شوری نمونه آبشویی شده با آب مختلط در ستون فاقد زهکش شنی، تفاوت چندانی را نشان نمی‌دهد، شوری سطح خاک در هر دو تیمار معادل  $32 \text{ (dS/m)}$  و در عمق  $30$  سانتی‌متری در تیمار فاقد زهکش معادل  $40 \text{ (dS/m)}$



شکل (۸): شوری اندازه گیری شده و مدلسازی شده، تیمار آب مختلط در ستون دارای زهکش شنی، الف: مرحله واسنجی ب: مرحله صحت سنجی

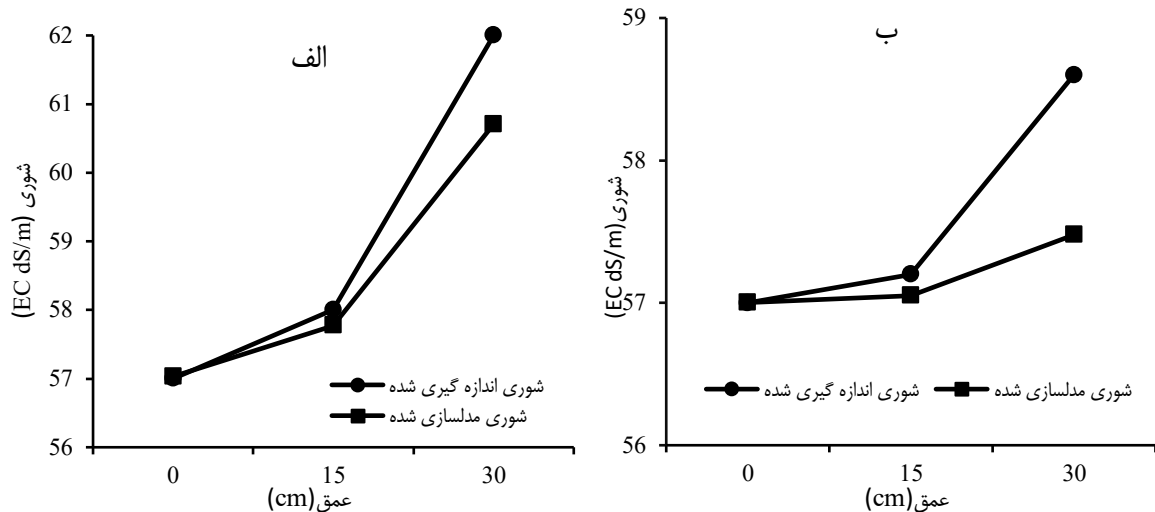
می شوند، مانند پژوهش Rhoades et al. (1992) که بیان می کنند برای آبشویی مؤثر، لازم است که شوری آب آبیاری به طور قابل توجهی کمتر از شوری خاک باشد. آن ها تأکید کردند که استفاده از آب های شور برای آبشویی، حتی با زهکشی، در خاک های با شوری اولیه بسیار بالا، ممکن است منجر به کاهش ناچیز شوری شود زیرا گرادیان غلظت کافی برای حرکت مؤثر نمک ها به سمت زهکش وجود ندارد. این نتیجه اهمیت کیفیت آب آبیاری را حتی در حضور زهکشی تأیید می کند، به ویژه برای خاک هایی با شوری اولیه بسیار بالا.

اختلاف در نتایج اندازه گیری شده و مدلسازی شده همچنین در دو نمودار واسنجی و صحت سنجی بسیار ناچیز

### نتایج شبیه سازی شوری در تیمار آبشویی با زهاب و ستون دارای زهکش

بر اساس شکل (۹) در تیمار آبشویی با زهاب در ستون دارای زهکش شنی، شوری خاک از  $64 \text{ dS/m}$  به شوری  $57 \text{ dS/m}$  در سطح خاک و شوری  $62 \text{ dS/m}$  در عمق  $30 \text{ cm}$  از سطح خاک، تقلیل یافته است. همچنین در مقایسه با تیمار مشابه خود در ستون فاقد زهکش شنی، که شوری در سطح خاک  $58 \text{ dS/m}$  و در عمق  $30 \text{ cm}$  از سطح خاک  $62/7 \text{ dS/m}$  می باشد، عملاً تغییر چشمگیری نداشته است که نشان دهنده تأثیر ناچیز زهکش برای کاهش شوری خاک، در آبشویی با آب شور در اراضی با شوری بسیار بالا می باشد. این یافته ها توسط مطالعات دیگری نیز پشتیبانی

است که نشان دهنده دقت وصحت بالای مدل HYDRUS در پیش‌بینی مقادیر شوری می‌باشد.



شکل (۹): شوری اندازه‌گیری شده و مدل‌سازی شده، تیمار زهاب در ستون دارای زهکش شنی، الف: مرحله واسنجی ب: مرحله صحت-سنجی

این روش این است که تعداد محدودی از پارامترهای هیدرولیکی و انتقال املاح باید انتخاب شوند (Abbasi et al., 2003).

در این پژوهش با توجه به تعداد پارامترهایی که باید بهینه شوند، ابتدا پارامترهای هیدرولیکی بهینه شده و سپس مدل به صورت معکوس شده و پارامترهای ثابت انتقال املاح بدست آمدند. جدول ۷ نتایج پارامترهای آماری واسنجی و صحت‌سنجی تغییرات شوری را نشان می‌دهد.

### شبیه‌سازی شوری

شبیه‌سازی شوری شامل یافتن ضرایب ثابت مؤثر در حرکت املاح شامل، ضرایب انتشارپذیری طولی و عرضی و ضریب پخشیدگی مولکولی در آب آزاد می‌باشد. واسنجی شبیه‌سازی حرکت آب و املاح هم به طور همزمان و هم به طور جداگانه انجام می‌شود. مزیت تخمین همزمان پارامترهای شوری و حرکت آب در این است که تأثیر متقابل آن‌ها روی هم نیز دیده می‌شود و در مقابل از عیوب

جدول (۷): نتایج ارزیابی آماری شوری

شاخص آماری						تیمار
صحت سنجی			واسنجی			
NRMSE	RMSE	R <sup>2</sup>	NRMSE	RMSE	R <sup>2</sup>	
۴/۵	۰/۶۳	۰/۹۹	۶/۹	۰/۷۵	۰/۹۹	آب چاه-دارای زهکش
۲/۴۳	۰/۸۴	۰/۹۳	۲/۳۵	۰/۸۳	۰/۹۴	آب مختلط-دارای زهکش
۱/۰۴	۰/۶۱	۰/۹۹	۱/۷۹	۱/۰۰۱	۰/۹۸	زهاب-دارای زهکش
۲۰/۷۸	۰/۶۰۹	۰/۹۹	۴/۴۷	۰/۵۶	۰/۹۹	آب چاه-فاقد زهکش
۲/۹۷	۰/۵۱	۰/۵۱	۱/۵۹	۱/۰۱	۰/۸۷	آب مختلط-فاقد زهکش
۱/۱۳	۰/۶۵	۰/۹۹	۱/۲۸	۱/۰۰۲	۰/۹۹	زهاب-فاقد زهکش

بازه زمانی صورت نگرفته است و در ۲۴ ساعت دوم فرآیند نفوذ صورت گرفته که لازم است این نکته در نظر گرفته شود که طی عملیات آبخویی در خاک‌های سنگین و رسی، بخش زیادی از زمان فرایند آبخویی متعلق به پروسه نفوذ آب تا عمق مورد نظر است. نکته دیگر مشاهده شده طی انجام فرآیند آبخویی، پایین بودن سرعت نفوذ آب در دور اول آبخویی نسبت به دور دوم آبخویی می‌باشد که همین عامل باعث کوتاه‌تر شدن مدت زمان دور دوم آبخویی نسبت به دور اول آبخویی، با حجم یکسانی آب، گردیده است. در بررسی نمودارهای شوری مشاهده می‌شود، در تمام تیمارها، شوری خاک در سطح خاک کمتر و با افزایش عمق، قابلیت هدایت الکتریکی خاک افزایش یافته‌است، که نشان می‌دهد با افزایش عمق املاح حل شده از سطوح بالاتر در لایه‌های عمیق‌تر تجمع می‌یابند که با گذر زمان و در اشل بزرگتر در صورت فقدان زهکش مناسب می‌تواند منجر به شورش‌دگی ثانویه در خاک آبخویی شده در اثر صعود کاپیلاری بشود. با این حال، نتایج این پژوهش بر اهمیت تداوم مطالعات در مقیاس‌های بزرگ‌تر و تحت شرایط متغیر اقلیمی تأکید دارد. برای کاربرد وسیع‌تر یافته‌ها و ارائه راهکارهای جامع‌تر به کشاورزان و مدیران منابع طبیعی، پیشنهاد می‌شود که در تحقیقات آتی، علاوه بر شبیه‌سازی‌های یک‌بعدی، از مدل‌های دو یا سه‌بعدی HYDRUS نیز استفاده شود. این امر به درک عمیق‌تر از حرکت آب و املاح در خاک‌های شور در محیط‌های پیچیده‌تر و ناهمگن‌تر کمک خواهد کرد. همچنین، بررسی بلندمدت اثرات متقابل استفاده از منابع آب جایگزین و سیستم‌های زهکشی در کنار عوامل بیولوژیکی خاک، می‌تواند به توسعه استراتژی‌های پایدارتر و اقتصادی‌تر برای اصلاح اراضی شور در مناطق خشک و نیمه‌خشک یاری رساند

تحلیل آماری داده‌های جدول (۷) نشان‌دهنده آن است که مدل پیش‌بینی خوبی از تغییرات EC ارائه می‌دهد. همانطور که پیش‌تر گفته شد هرچه مقادیر  $R^2$  به یک نزدیکتر و آماره RMSE به صفر نزدیک‌تر باشد به معنای بالاتر بودن دقت مدل مورد مطالعه می‌باشد. مطابق جدول ۷ کمترین میزان  $R^2$  (۰/۸۷) و بیش‌ترین مقدار RMSE (۱/۰۱) متعلق به تیمار آب مختلط در سیلندر فاقد زهکش و بعد از آن متعلق به تیمار زهاب در سیلندر فاقد زهکش می‌باشد که نشان‌دهنده تأثیر عدم زهکشی مناسب در تغییرات مقادیر شوری می‌باشد. همچنین مقادیر  $R^2$  در سایر تیمارها بالای ۰/۹ و نزدیک به یک می‌باشند و RMSE جز در دو تیمار مذکور در باقی تیمارها نزدیک به صفر و در بازه منطقی قرار دارد که نشان‌دهنده برآورد بسیار خوب مدل HYDRUS از مقادیر شوری می‌باشد.

### نتیجه‌گیری

در مجموع از بررسی نمودارهای این قسمت می‌توان نتیجه‌گرفت مدل HYDRUS در شبیه‌سازی مقادیر شوری پس از اتمام دوره آبخویی نسبت به شبیه‌سازی عمق آب زهکش شده و عمق آب نفوذ یافته، دقیق‌تر عمل کرده و مقادیر مدل‌سازی شده با مقادیر حقیقی اندازه‌گیری شده اختلاف ناچیزی دارند که نشان‌دهنده دقت صحت و کارایی بالای مدل HYDRUS برای شبیه‌سازی در این بخش از پژوهش، نسبت به بخش قبل می‌باشد. به عبارت دیگر می‌توان گفت مدل در شبیه‌سازی حرکت نمک نسبت به شبیه‌سازی حرکت آب دقت و حساسیت بالاتری نشان داده است. نکته مشترک در بررسی نمودارهای عمق آب نفوذ یافته و عمق آب زهکش شده این است که بعلت سنگین و ریزدانه بودن بافت خاک، نفوذ از لحظه وارد شدن آب آبخویی به سیستم آغاز نشده و تقریباً در تمام تیمارها، نفوذ طی ۲۴ ساعت اولیه صفر و متعاقباً خروج زهاب نیز در این

### منابع

عباسی، ف. ۱۳۹۲. فیزیک خاک پیشرفته. انتشارات دانشگاه تهران.

Abbasi, F., Simunek, J., Feyen, J., Van Genuchten, M. T and Shouse, P. J. 2003. Simultaneous inverse estimation of soil hydraulic and solute transport parameters from transient field experiments: Homogeneous soil. Transactions of the ASAE. 46(4): 1085.



Ahmadi, S. H., Andersen, M. N., Plauborg, F., Poulsen, R. T., Jensen, C. R., Sepaskhah, A. R and Hansen, S. 2010. Effects of irrigation strategies and soils on field grown potatoes: Yield and water productivity. *Agricultural Water Management*. 97(11): 1923-1930.

Allison, L. E and Richards, L. A. 1954. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils (No. 60). Soil and Water Conservative Research Branch, Agricultural Research Service, US Department of Agriculture.

Basak, N., Barman, A., Sundha, P and Rai, A. K. 2020. Recent trends in soil salinity appraisal and management. *Soil analysis: recent trends and applications*. 143-161.

Bitterlich, S., Durner, W., Iden, S. C and Knabner, P. 2004. Inverse estimation of the unsaturated soil hydraulic properties from column outflow experiments using free-form parameterizations. *Vadose Zone Journal*. 3(3): 971-981.

Crevoisier, D., Popova, Z., Mailhol, J. C and Ruelle, P. 2008. Assessment and simulation of water and nitrogen transfer under furrow irrigation. *Agricultural water management*. 95(4): 354-366.

Dawson, R., Hall, J., Sayers, P., Bates, P and Rosu, C. 2005. Sampling-based flood risk analysis for fluvial dike systems. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*. 19: 388-402.

Feng, G., Zhang, Z and Zhang, Z. 2019. Evaluating the sustainable use of saline water irrigation on soil water-salt content and grain yield under subsurface drainage condition. *Sustainability*, 11(22), 6431.

Ghafoor, A., Murtaza, G., Rehman, M. Z., Saifullah, and Sabir, M. 2012. Reclamation and salt leaching efficiency for tile drained saline-sodic soil using marginal quality water for irrigating rice and wheat crops. *Land Degradation & Development*, 23(1), 1-9.

Gonçalo Filho, F., da Silva Dias, N., Suddarth, S. R. P., Ferreira, J. F., Anderson, R. G., dos Santos Fernandes, C and Cosme, C. R. 2020. Reclaiming tropical saline-sodic soils with gypsum and cow manure. *Water*. 12(1): 57.

Jamieson, P. D., Porter, J. R and Wilson, D. R. 1991. A test of the computer simulation model ARCWHEAT1 on wheat crops grown in New Zealand. *Field crops research*. 27(4): 337-350.

Letey, J and Feng, G. L. 2007. Dynamic versus steady-state approaches to evaluate irrigation management of saline waters. *Agricultural water management*. 91(1-3): 1-10.

Minasny, B and Mc Bratney, A. B. 2002. Uncertainty analysis for pedotransfer functions. *European Journal of Soil Science*. 53(3): 417-429.

Minhas, P. S., Dubey, S. K and Sharma, D. R. 2007. Comparative effects of blending, intra/inter-seasonal cyclic uses of alkali and good quality waters on soil properties and yields of paddy and wheat. *Agricultural Water Management*, 87(1), 83-90.

Mishra, R. K. 2023. Fresh water availability and its global challenge. *British Journal of Multidisciplinary and Advanced Studies*. 4(3): 1-78.

Mukhopadhyay, R., Sarkar, B., Jat, H. S., Sharma, P. C and Bolan, N. S. 2021. Soil salinity under climate change: Challenges for sustainable agriculture and food security. *Journal of Environmental Management*, 280, 111736.

Nachabe, M. H., Ahuja, L. R and Butters, G. 1999. Bromide transport under sprinkler and flood irrigation for no-till soil condition. *Journal of Hydrology*. 214(1-4) :8-17.

Navarro-Torre, S., Garcia-Caparrós, P., Nogales, A., Abreu, M. M., Santos, E., Cortinhas, A. L and Caperta, A. D. 2023. Sustainable agricultural management of saline soils in arid and semi-arid Mediterranean regions through halophytes, microbial and soil-based technologies. *Environmental and Experimental Botany*, 212, 105397.

Pazira, E., and Kawachi, T. 1981. Studies on appropriate depth of leaching water, Iran: A case study.

Phogat, V., Mahadevan, M., Skewes, M and Cox, J. W. 2012. Modelling soil water and salt dynamics under pulsed and continuous surface drip irrigation of almond and implications of system design. *Irrigation Science*. 30: 315-333.



- Pianosi, F., Beven, K., Freer, J., Hall, J. W., Rougier, J., Stephenson, D. B and Wagener, T. 2016. Sensitivity analysis of environmental models: A systematic review with practical workflow. *Environmental Modelling & Software*, 79, 214-232.
- Qureshi, A. S., McCornick, P. G., Qadir, M and Aslam, Z. 2008. Managing salinity and waterlogging in the Indus Basin of Pakistan. *Agricultural water management*, 95(1), 1-10.
- Ramos, T. B., Šimůnek, J., Gonçalves, M. C., Martins, J. C., Prazeres, A., Castanheira, N. L and Pereira, L. S. (2011). Field evaluation of a multicomponent solute transport model in soils irrigated with saline waters. *Journal of Hydrology*. 407(1-4): 129-144.
- Rhoades, J. D., Kandish, A and Mashali, A. M. 1992. The use of saline waters for crop production. Richards, L. A. (Ed.). (1954). *Diagnosis and improvement of saline and alkali soils* (No. 60). US Government Printing Office.
- Saltelli, A., Ratto, M., Andres, T., Campolongo, F., Cariboni, J., Gatelli, D and Tarantola, S. 2008. *Global sensitivity analysis: the primer*. John Wiley & Sons.
- Saltelli, A., Tarantola, S., Campolongo, F and Ratto, M. 2004. *Sensitivity analysis in practice: a guide to assessing scientific models* (Vol. 1). New York: Wiley.
- Sandhu, R and Irmak, S. 2020. Performance assessment of Hybrid-Maize model for rainfed, limited and full irrigation conditions. *Agricultural Water Management*. 242: 106402.
- Selim, T., Bouksila, F., Hamed, Y., Berndtsson, R., Bahri, A and Persson, M. 2018. Field experiment and numerical simulation of point source irrigation with multiple tracers. *Plos one*. 13(1): e0190500.
- Shaygan, M and Baumgartl, T. 2022. Reclamation of salt-affected land: A review. *Soil systems*, 6(3), 61.
- Simunek, J., Jacques, D., Langergraber, G., Bradford, S. A., Sejna, M and Van Genuchten, M. T. 2013. Numerical modeling of contaminant transport using HYDRUS and its specialized modules. *Journal of the Indian institute of science*. 93(2): 265-284.
- Simunek, J., Van Genuchten, M. T and Sejna, M. 2005. The HYDRUS-1D software package for simulating the one-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media. *University of California-Riverside Research Reports*. 3: 1-240.
- Skaggs, R. W., Fausey, N. R and Evans, R. O. 2012. Drainage water management. *Journal of soil and water conservation*. 67(6): 167A-172A.
- Skaggs, T. H., van Genuchten, M. T., Shouse, P. J and Poss, J. A. 2006. Macroscopic approaches to root water uptake as a function of water and salinity stress. *Agricultural water management*. 86(1-2): 140-149.
- Tafteh, A and Sepaskhah, A. R. 2012. Application of HYDRUS-1D model for simulating water and nitrate leaching from continuous and alternate furrow irrigated rapeseed and maize fields. *Agricultural water management*. 113: 19-29.
- Van Genuchten, M. T. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil science society of America journal*. 44(5): 892-898.
- Verma, S. K., and Gupta, R. K. 1989. Leaching behaviour of saline clay soils under two modes of water application.
- Xie, T., Liu, X and Sun, T. 2011. The effects of groundwater table and flood irrigation strategies on soil water and salt dynamics and reed water use in the Yellow River Delta, China. *Ecological Modelling*. 222(2): 241-252.