



Modeling of Drained Lands of Sugarcane Crop in Hakim Farabi Khuzestan Agro-Industry Using the Perspective of Water-Environment-Food Nexus

Mohammad Hooshmand¹, Hamed Ebrahimian², Teymour Sohrabi³, Hamed Nozari⁴,
Abdali Naseri⁵

1. Corresponding Author, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. Email: Hooshmand.m@ut.ac.ir
2. Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. Email: Ebrahimian@ut.ac.ir
3. Corresponding Author, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. Email: myousef@ut.ac.ir
4. Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran. Email: hanozari@yahoo.com
5. Department of Irrigation and Drainage, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. Email: abdalinaseri@scu.ac.ir

Article Info

Article type: Research Article

Article history:

Received: July. 1, 2024

Revised: Sep. 29, 2024

Accepted: Oct. 2, 2024

Published online: Jan. 2025

Keywords:

System Dynamics,
Simulation,
Nexus.

ABSTRACT

Sugarcane is a plant that has the most water requirement in the summer when the least rainfall occurs, and there is a need to irrigate this plant. In this research, the simulation and modeling of sugarcane cultivation with a focus on the water-environment-food nexus, utilizing the system dynamics approach, have been conducted at the Hakim Farabi Khuzestan Agro-Industry Company. This research was modeled using Vensim software. The model is an integrated and interconnected simulation of water consumption, product production, drainage water volume, salinity, and soil salinity. The information of three years 2015 to 2017 was used for calibration and the information of two years 2018 to 2019 was used to validate the model. MAE, MBE, and MAPE statistical parameters were used to evaluate the model results. The modeling results showed that the model has high accuracy in the calibration period with an MAE index of 6.31 ton/ha for crop yield, 53.56 mm for water drainage volume, 1.21 dS/m for water drainage salinity, and 0.09 dS/m for soil salinity. Also, the results of the same index in the validation period, which were 3.04 ton/ha for crop yield, 48.76 mm for water drainage volume, 1.11 dS/m for water drainage salinity, and 0.04 dS/m for soil salinity, indicate that the model is highly accurate in simulating the existing conditions. The highest water productivity was achieved at a rate of 3.75 kg/m³ in 2019.

Cite this article: Hooshmand, M., Ebrahimian, H., Sohrabi, T., Nozari, H., & Naseri, A., (2025) Modeling of Drained Lands of Sugarcane Crop in Hakim Farabi Khuzestan Agro-Industry Using the Perspective of Water-Environment-Food Nexus, *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 55 (11), 2035-2055. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.378717.669745>

© The Author(s).

Publisher: The University of Tehran Press.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.378717.669745>



EXTENDED ABSTRACT

Introduction

The water-energy-food nexus is a term used to describe the interdependent relationship between water, energy, and agricultural production. It also refers to the competition between energy and food production for water resources. The interdependence among water, energy, and food resources means that an increase in demand for one resource can lead to a rise in demand for another. Likewise, the cost of one resource can influence the productivity of another. Water is essential in the water-energy-food nexus because it is irreplaceable. Integrating all the system's drivers under a framework is necessary to achieve a sustainable, safe, and flexible water-energy-food system. This framework emphasizes the importance of social and economic dimensions in developing the water-energy-food system (Hoff, 2011).

The concept of system dynamics involves the changes in input and output components, including the interactions and feedback among elements in the system over time. This method can account for non-linear and cause-and-effect relationships.

Materials and Methods

Sugarcane is a high-water-demand crop, especially in Khuzestan province, where temperatures can exceed 50 degrees Celsius in the summer, increasing water requirements. Hakim Farabi Agro-Industry Company is one of the eight subsidiary companies of Khuzestan Sugarcane Development and Ancillary Industries Holding, the largest sugar producer in Iran. Farabi Company was selected for this research due to the environmental issues created by the region's sugarcane agro-industries.

This research developed causal diagrams concerning water consumption, crop production and drainage water volume and quality using Vensim software within the system dynamics framework. These diagrams were then transformed into stock and flow models. Flows represent system variables, while stocks represent accumulations within the system. Flows serve as the input and output of stocks, determining their rate of change.

After creating the model, we first conducted a sensitivity analysis. We used data from three years (2015 to 2017) to calibrate the model and data from two years (2018 to 2019) to validate the model. The model validation was based on the parameters to which the model was sensitive. We used MAE, MBE and MAPE statistical indices to evaluate the model.

Results

The sensitivity analysis results provide valuable insights into the model's performance. They indicate that the model is most sensitive to soil moisture parameters at the point of permanent wilting, soil moisture at field capacity, and porosity, with sensitivity indices of 6.014, 1.428, and 1, respectively. This means that small changes in these parameters can significantly affect the model's output. On the other hand, the model is not sensitive to the parameters of root development depth and hydraulic conductivity above the drain pipe. This information is crucial because it helps us to understand the strengths and limitations of the model.

The crop yield simulation results for the calibration period indicate a Mean Absolute Error (MAE) of 6.31, a Mean Bias Error (MBE) of -0.89, and a Mean Absolute Percentage Error (MAPE) of 7.99, demonstrating the model's high accuracy. During the validation period, the MAE is 3.04, the MBE is -3.04, and the MAPE is 3.66, further confirming the model's reliability. The model achieved its highest accuracy in simulating crop yield in 2018, while its lowest accuracy occurred in 2015.

The simulation of drainage volume indicates that the model exhibits relatively high accuracy in estimating this parameter. The results reveal an MAE of 53.56, MBE of 53.56, and MAPE of 3.74 during the calibration period, underscoring its precision. During the validation period, the model demonstrates an MAE of 48.76, an MBE of -22.97, and a MAPE of 3.60, further confirming its high accuracy. The model achieved its highest accuracy in simulating drainage volume in 2017 and its lowest in 2019.

The model's performance in simulating drainage water salinity was assessed using various metrics. During the calibration period, the MAE was 1.21, the MBE was 1.21, and the MAPE was 12.56. For the validation period, the MAE was 1.11, the MBE was 1.11, and the MAPE was 12.40. These results indicate that the model's accuracy is satisfactory. Additionally, the model demonstrated the highest accuracy in 2018 and the lowest in 2016.

The results of the soil salinity simulation indicate that the model demonstrated high accuracy. During the calibration period, the model achieved an MAE of 0.09, MBE of -0.04, and MAPE of 3.65. In the validation period, the model's performance improved further, with an MAE of 0.04, an MBE of -0.04, and a MAPE of 1.94. The model's highest accuracy was recorded as an annual average in 2018, while the lowest accuracy occurred in 2016.

Conclusion

The results obtained from different parts of the model showed high accuracy in simulating existing conditions. This suggests that the model can predict the crop yield, volume, and salinity of drainage water in Hakim Farabi Agro-industry Company.

Author Contributions

All authors contributed equally to the conceptualization of the article and writing of the original and subsequent drafts.

Data Availability Statement**Not applicable****Acknowledgements**

The authors would like to thank all participants of the present study.

Ethical considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.

مدل سازی اراضی زهکشی شده محصول نیشکر در کشت و صنعت حکیم فارابی خوزستان با استفاده از دیدگاه پیوند آب-محیط زیست-غذا

محمد هوشمند^۱، حامد ابراهیمیان^۲، تیمور سهرابی^۳، حامد نوذری^۴، عبدعلی ناصری^۵

۱. نویسنده مسئول، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده گان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. Hooshmand.m@ut.ac.ir

۲. گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده گان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. Ebrahimiyan@ut.ac.ir

۳. نویسنده مسئول، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده گان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. myousef@ut.ac.ir

۴. گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران. hanozari@yahoo.com

۵. گروه آبیاری و زهکشی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران. abdalinaseri@scu.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	نیشکر گیاهی است که بیشترین نیاز آبی خود را در فصل تابستان دارد که کمترین ریزش های جوی اتفاق می افتد و نیاز به آبیاری این گیاه وجود دارد. در این پژوهش شبیه سازی و مدل سازی کشت گیاه نیشکر با دیدگاه پیوند آب - محیط زیست - غذا و با رویکرد پویایی سیستم در شرکت کشت و صنعت حکیم فارابی خوزستان انجام شد. مدل سازی این پژوهش در محیط نرم افزار Vensim انجام گردید. مدل ایجاد شده یک مدل یکپارچه و به هم پیوسته بوده که شامل بخش های شبیه سازی آب مصرفی، تولید محصول، حجم و شوری زهاب و شوری خاک است. از اطلاعات سه سال ۱۳۹۵ تا ۱۳۹۷ برای واسنجی و از اطلاعات دو سال ۱۳۹۸ تا ۱۳۹۹ برای صحت سنجی مدل استفاده گردید. برای ارزیابی نتایج مدل از پارامترهای آماری MAE، MBE، MAPE استفاده شد. نتایج مدل سازی نشان داد که مدل در دوره واسنجی با شاخص MAE برابر با ۶/۳۱ تن بر هکتار برای عملکرد محصول، ۵۳/۵۶ میلی متر برای حجم زهاب، ۱/۲۱ دسی زیمنس بر متر برای شوری زهاب و ۰/۰۹ دسی زیمنس بر متر برای شوری خاک از دقت بالایی برخوردار است. همچنین نتایج همین شاخص در دوره صحت سنجی که برابر با ۳/۰۴ تن بر هکتار برای عملکرد محصول، ۴۸/۷۶ میلی متر برای حجم زهاب، ۱/۱۱ دسی زیمنس بر متر برای شوری زهاب و ۰/۰۴ دسی زیمنس بر متر برای شوری خاک بود نشان داد که مدل از دقت نسبتا بالایی در شبیه سازی شرایط موجود برخوردار است. همچنین بیشترین بهره وری آب به میزان ۳/۷۵ کیلوگرم بر مترمکعب، در سال ۱۳۹۸ به دست آمد.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۴/۱۱	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۷/۵	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۷/۱۱	
تاریخ انتشار: بهمن ۱۴۰۳	
واژه های کلیدی: پویایی سیستم، شبیه سازی، همبست.	

استناد: هوشمند؛ محمد، ابراهیمیان؛ حامد، سهرابی؛ تیمور، نوذری؛ حامد، ناصری؛ عبدعلی، (۱۴۰۳) مدل سازی اراضی زهکشی شده محصول نیشکر در کشت و صنعت حکیم فارابی خوزستان با استفاده از دیدگاه پیوند آب-محیط زیست-غذا، مجله تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۵ (۱۱)، ۲۰۲۵-۲۰۵۵.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران. © نویسندگان.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.378717.669745>



مقدمه

پیوند آب - انرژی - غذا اصطلاحی است که امروزه برای توصیف ارتباط متقابل بین سه بخش آب، انرژی و تولید محصولات کشاورزی و گاه برای بیان رقابت در تأمین تقاضا برای مصرف آب در تولید انرژی و یا تولید غذا مورد استفاده قرار می‌گیرد. پیوند بین این سه بخش حیاتی، امروزه سبب ایجاد چالش‌های متعدد اقتصادی و اجتماعی در میان جوامع و دولت‌ها شده است (Biggs et al., 2015). در کنفرانس بن در سال ۲۰۱۱ پیش‌بینی شد که رشد جمعیت جهان و توسعه اقتصادی بر امنیت آب - انرژی - غذا فشار ایجاد خواهد کرد که منجر به تخریب منابع، تخریب زیست‌بوم و تغییرات اجتماعی و محیط‌زیستی غیرقابل بازگشت شده و در نتیجه توسعه پایدار را با خطر مواجه می‌سازد (Endo et al., 2017; Chang et al., 2016).

وابستگی متقابل منابع آب - انرژی - غذا به‌گونه‌ای است که افزایش تقاضای یک منبع می‌تواند تقاضای منبع دیگر را افزایش داده و به‌طور مشابه، میزان هزینه یک منبع می‌تواند بهره‌وری منبع دیگر را مشخص کند. به‌علاوه، مشخص شده است که تلاش برای حل مشکلات فقط یک بخش از سیستم با نادیده گرفتن ارتباط با بخش‌های دیگر منجر به خروجی مطلوب در جهت توسعه پایدار نخواهد شد (Hamdy et al., 2014). ادامه روند تصمیم‌گیری تک بخشی ممکن است به‌طور موقت منجر به بهبود عملکرد بخش‌ها شود ولی بعید است این وضعیت با گذشت زمان ثابت باقی بماند (Bazilian et al., 2011).

مفهوم پویایی سیستم^۲ به تغییر پارامترهای ورودی، خروجی و اثرات آن‌ها بر روی یکدیگر در طول زمان اشاره دارد. این روش می‌تواند روابط غیرخطی و همچنین روابط علت و معلولی را نیز در نظر گرفته و علاوه بر سیاست‌گذاری‌های کوتاه‌مدت، اثرات بلندمدت را نیز نشان دهد.

در چارچوب پیوند آب - انرژی - غذا، آب نقشی اساسی ایفا می‌کند زیرا یک کالای غیرقابل جایگزین است. ادغام تمام عوامل تاثیر گذار سیستم، تحت یک چارچوب، وسیله‌ای است که از طریق آن، می‌توان یک سیستم آب - انرژی - غذای پایدار، ایمن و انعطاف پذیر بدست آورد. این چارچوب خاص، اهمیت توجه اجتماعی و اقتصادی و ابعاد توسعه را در رابطه با سیستم آب - انرژی - غذا، برجسته می‌کند (Hoff, 2011). خروجی پیوند آب - انرژی - غذا به‌طور کلی منجر به تخصیص بهینه منابع، افزایش بهره‌وری، کاهش اثرات محیط‌زیستی و شرایط بهتر توسعه اقتصادی می‌شود (Bazilian et al., 2011).

این پژوهش با هدف ایجاد یک مدل یکپارچه برای تعیین میزان محصول، حجم و شوری زه‌آب و شوری خاک در کشت گیاه نیشکر در کشت و صنعت حکیم فارابی خوزستان اجرا شد. ایجاد این مدل که برهم‌کنش تاثیر مصرف آب، تولید محصول و اثرات محیط‌زیستی تولید محصول را نمایان می‌کند یک چرخه به‌هم پیوسته را نشان می‌دهد که تغییر در هر پارامتر بر روی پارامترهای دیگر و در نهایت بر روی همان پارامتر تاثیر می‌گذارد. ایجاد این مدل به مدیران شرکت حکیم فارابی این توانایی را می‌دهد که پیش از تغییر در حجم آب آبیاری، تاثیرات این تغییر را بر عملکرد محصول، حجم و شوری زه‌آب و همچنین شوری خاک بدانند. بر اساس مطالعات صورت گرفته، تاکنون چنین مدل یکپارچه‌ای برای کشت گیاه نیشکر تهیه نشده است.

پیشینه پژوهش

Smidt et al. (2016) از مدلی عددی برای تدوین استراتژی‌هایی با رویکرد یکپارچه مدیریت منابع آب زیرزمینی و سطحی به‌منظور حفاظت از آب‌های زیرزمینی با استفاده از تحلیل پیوند آب - انرژی - غذا به عنوان چارچوبی برای مصرف آینده آب در کشاورزی پرداختند. Psomas et al. (2016) چهار روش آبیاری و مدیریت مواد مغذی گیاهان مرتبط با بهره‌وری منابع (کم آبیاری، کاهش کوددهی، ترکیب کم آبیاری و کوددهی، کشاورزی دقیق) را در حوضه رودخانه پینیوس^۳ یونان بر روی چهار محصول پنبه، ذرت، یونجه و گندم زمستانه مدل‌سازی و شبیه‌سازی کردند. پایداری شیوه‌های مدیریت با استفاده از شاخص‌ها برای اندازه‌گیری تاثیرات آن‌ها در پیوند آب - انرژی - زمین - غذا در حوضه رودخانه مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که کم آبیاری و ترکیب آن با کاهش کوددهی عملکرد مشابهی را برای همه شاخص‌های مربوط به پیوند ایجاد می‌کند. نتایج نشان داد کشاورزی دقیق بهترین عملکرد را برای شاخص‌های مربوط به

1 Water-Energy-Food Nexus

2 System Dynamics

3 Pineios



تولید آب و غذا داشت.

یک روش یکپارچه مبتنی بر پیوند آب - انرژی - غذا برای ارزیابی پیامدهای چند بعدی طرح‌های آبیاری در حوضه آبریز واقع در پوگلیا^۱ (ایتالیا) توسط De Vito et al. (2017) ارائه شد. نتایج به طور عمده نشان می‌دهد که بهره‌وری اقتصادی زمین عامل اصلی کشاورزی آبی است و آب زیرزمینی در مقایسه با آب‌های سطحی بسیار مقرون به صرفه است، بنابراین نباید آزادانه در دسترس و مورد استفاده قرار گیرد. Silalertruksa and Gheewalae (2018) در تحقیقی پیوند آب - انرژی - زمین سامانه‌های تولیدی نیشکر آبی (آبیاری جوپچه‌ای و قطره‌ای زیرسطحی) و غیر آبی را در حوضه‌های Chi و Chao Phraya در تایلند با استفاده از رد پای کربن، رد پای زیست‌محیطی و کمبود آب ارزیابی کردند. نتایج نشان می‌دهد آبیاری به افزایش عملکرد نیشکر در حدود ۲۳-۵۴ درصد نسبت به سامانه غیر آبیاری (دیم) کمک می‌کند. اثر کربن و اکولوژیک محصولات نیشکر نیز به ترتیب در حدود ۱۱-۳۶ درصد و ۱۵-۳۵ درصد کاهش یافت. با این وجود، استفاده از منابع آب افزایش می‌یابد. به همین دلیل، استفاده از آبیاری‌های تحت فشار مانند آبیاری قطره‌ای که راندمان استفاده از آب را افزایش می‌دهند عامل مهمی برای تولید پایدار نیشکر در آینده است.

بررسی پایداری پیوند آب - انرژی - غذا در حوضه رودخانه نیل آبی (UBN) که حدود ۶۰ درصد کل جریان سالانه آب رودخانه نیل را تشکیل می‌دهد، پیش بینی می‌کند که توسعه کشاورزی موجب کاهش جریان UBN در حدود ۷/۶ میلیارد مترمکعب در سال شود که بر کشورهای پایین دست یعنی مصر و سودان اثرگذار است (Allam & Eltahir, 2019). Hailemariam et al. (2019) وضعیت پیوند آب - انرژی - غذا (WEFN) را در تولید نیشکر در کشور اتیوپی مورد بررسی قرار دادند. مجموعه‌ای از شاخص‌ها با توجه به مقدار مصرف، بهره‌وری جرمی^۲ و بهره‌وری اقتصادی آب و انرژی در سه کارخانه تولید نیشکر در اتیوپی (Metehara, Wonji-Shoa و Fincha) مورد استفاده قرار گرفت. همچنین یک شاخص یکپارچه، به نام "شاخص پیوند آب و انرژی و غذا (WEFNI)" برای شناسایی و مقایسه عملکرد WEFN در مناطق مورد مطالعه محاسبه شد. بالاترین میزان شاخص پیوند به میزان ۰/۶۳ برای Wonji Shoa به دست آمد. ارزیابی پیوند نشان داد که مصرف بالاتر انرژی در Wonji Shoa به دلیل فناوری نوین آبیاری به کار رفته می‌تواند با کاهش تلفات آب و بهبود بهره‌وری جبران شود، که در نهایت منجر به افزایش میزان WEFNI می‌شود.

بررسی اثر تغییرات آب و هوایی بر نیاز آب آبیاری (IWR) ذرت در طی مراحل مختلف رشد و در شرایط مختلف تغییرات آب و هوایی در زمین‌های کشاورزی شمال شرقی چین (NFR) در ارتباط با چالش پیوند آب - غذا، نشان داد کمبود آب آبیاری تحت تغییرات آب و هوایی آینده افزایش قابل توجهی را تجربه خواهد کرد. همچنین این یافته‌ها نشان داد که برنامه ریزی، بیشتر از زیرساخت‌ها و طرح‌های توسعه آبیاری، کارآمد خواهد بود (Xu et al., 2019). Wicaksono & Kang (2019) از یک مدل شبیه سازی پیوند آب - انرژی - غذا (WEFN) بر اساس روش پویایی سامانه برای مطالعه موردی در کره جنوبی و اندونزی استفاده کردند. شبیه‌سازی شرایط پایه نشان داد که کره جنوبی به علت خشکسالی‌های احتمالی در آینده و اندونزی به دلیل کمبود ظرفیت تصفیه آب و رشد جمعیت زیاد، کمبود آب و غذا خواهند داشت. پیاده سازی سناریو استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر در کره جنوبی نشان داد که برنامه انرژی تجدید پذیر با صرفه جویی غیرمستقیم در مصرف آب در بخش انرژی و تامین آب باقی مانده به تولید مواد غذایی برای بخش‌های آب و غذا مفید خواهد بود. نتایج شبیه سازی سناریو ساخت تصفیه خانه‌های شهری بیشتر در اندونزی نشان داد که تصفیه خانه‌های اضافی، مصرف آب شهری و صنعتی را افزایش می‌دهد، اما به دلیل افزایش مصرف انرژی برای تصفیه آب، بر بخش انرژی تأثیر منفی می‌گذارد و به همین دلیل کمبود انرژی را بیشتر می‌کند.

استفاده از روش بهینه‌سازی خطی برای بررسی پیوند آب - انرژی - غذا در حوضه آبریز شازند برای ۱۴ محصول باغی و زراعی در بین سال‌های ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۴ نشان داد که بیشترین مقدار شاخص پیوند آب - انرژی - غذا (WEFNI)^۳ را گیاه بادام دارد و گیاهان سیب زمینی، نیشکر و خیار کمترین مقدار این شاخص را در بین گیاهان تحت مطالعه داشتند. همچنین نتایج بهینه‌سازی نشان داد که وضعیت فعلی کاربری اراضی در حوزه آبریز شازند برای به حداقل رساندن مصرف آب و انرژی و به حداکثر رساندن سود مناسب نیست (صادقی و همکاران، ۲۰۲۰). مطالعه تنش آبی تحت تاثیر رقابت بین بخش‌های غذا و انرژی در کشور چین نشان داد که بخش غذا نقش اصلی را در تنش آبی ایفا می‌کند و بخش انرژی شاخص تنش آبی پیش بینی شده را تشدید می‌کند. همچنین شهرنشینی به میزان قابل توجهی در

1 Rweglia

2 Upper Blue Nile

3 Mss Productivity

4 Wefr-Energy-Food Nexus index

میزان دسترسی به آب، به ویژه در استان‌های شرقی تأثیر خواهد گذاشت. به همین دلیل رفع عدم تعادل تقاضا برای آب، کلید اصلی پایداری پیوند آب - انرژی - غذا در چین است (Niva et al., 2020).

پرچمی عراقی و همکاران (۱۳۹۹) شبیه‌سازی زهکشی زیرزمینی کنترل شده را با استفاده از نسخه تصحیح شده‌ای از مدل SWAP و گونه بهبود یافته‌ای از الگوریتم بهینه‌سازی رفتار جمعی اجزای یکپارچه (UPSO) را برای مزارع نیشکر در استان خوزستان اجرایی کردند. نتایج مدل نشان داد که شبیه‌سازی جریان زه‌آب خروجی با NRMSE برابر با ۰/۲۱۸ و ۰/۲۸۵ به ترتیب برای واسنجی و صحت‌سنجی مدل و شبیه‌سازی شوری زه‌آب با NRMSE برابر با ۰/۰۷۹ و ۰/۰۷۲ به ترتیب برای واسنجی و صحت‌سنجی مدل از دقت بالایی برخوردار است. همچنین نتایج واسنجی عملکرد نیشکر نشان داد که مدل با NRMSE برابر با ۰/۰۴۷ دارای دقت خوبی می‌باشد.

نوذری و آزادی (۲۰۲۱) اثر ترکیبی شوری و تنش آبی بر عملکرد محصول را با توسعه یک مدل کامپیوتری بر اساس رویکرد پویایی سیستم شبیه‌سازی نمودند. واسنجی و صحت‌سنجی مدل با استفاده از داده‌های جمع‌آوری شده از شبکه آبیاری آبشار واقع در حوضه رودخانه زاینده رود انجام شد. برای هر اجرای مدل، دو شاخص آماری خطای میانگین مربعات ریشه و خطای استاندارد محاسبه شد. میانگین این شاخص‌ها برای عملکرد چغندر قند ۲۷۷۷ کیلوگرم در هکتار و ۰/۰۷، برای رطوبت خاک ۰/۰۲۶ و ۰/۰۹ و در نهایت برای شوری ناحیه ریشه ۰/۵۴ دسی‌زیمنس بر متر و ۰/۰۸ برآورد شد. نتایج تطابق خوبی بین مدل شبیه‌سازی و داده‌های واقعی نشان داد.

Campana et al. (2020) یک مدل پیوند آب - غذا - انرژی موجود را برای ارزیابی اثرات خشکسالی بر آبیاری و کشاورزی سوئد به‌روزرسانی کردند. آنها می‌خواستند مزایای برنامه‌ریزی آبیاری مبتنی بر داده را با دستورالعمل‌های آبیاری موجود مقایسه کنند. نتایج نشان داد که در سال ۲۰۱۸ که خشکسالی بوده، مدل توسعه‌یافته در مقایسه با سناریوهای آبیاری مرسوم، صرفه‌جویی در آب آبیاری را نشان نداد. با این وجود، افزایش عملکرد محصول با سیستم آبیاری مبتنی بر داده، ۱۰ تا ۶۰ درصد بیشتر از سیستم آبیاری مرسوم بود. مدل‌سازی سیستم پشتیبانی تصمیم پویا مدیریت منابع آب زیرزمینی پایدار بر اساس پیوند امنیتی آب - غذا - انرژی بیانگر این است که سیاست‌های ترکیبی بهترین راه‌حل را نشان می‌دهند (رحمانی و همکاران، ۲۰۲۳).

Lu et al. (2023) کاربرد مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی رشد گندم در مزارع دارای زهکشی زیرزمینی با استفاده از نوسانات سطح آب پیش‌بینی‌شده با مدل HYDRUS را بررسی کردند. واسنجی و صحت‌سنجی بر اساس مشاهدات میدانی نشان داد که HYDRUS به طور دقیق توزیع دینامیک آب و شوری خاک را برآورد می‌کند. سناریوهای شبیه‌سازی با در نظر گرفتن اثر بلندمدت شوری آب زیرزمینی، فاصله زهکش‌ها و طبقه بندی بارش مورد بررسی قرار گرفت. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که کم کردن فاصله زهکش‌ها می‌تواند باعث کم کردن شوری خاک شود. استفاده از سیستم زهکشی زیرزمینی می‌تواند عملکرد دانه را به میزان ۰/۸۱ - ۱/۶۵ تن در هکتار، بهره‌وری آب را ۰/۱۳ - ۰/۳۵ کیلوگرم بر مترمکعب و کاهش سطح آب زیرزمینی را به میزان ۶/۰۶ - ۳۱/۰۳ میلی‌متر در مقایسه با سناریوهای بدون زهکش زیرزمینی بهبود بخشد. تحقیقات ذکر شده نشان داد که:

۱- برداشت بیش از نیاز آب، موجب تأثیرات منفی محیط‌زیستی بر مناطق پایین دست می‌شود و تبعات اجتماعی و اقتصادی برای جوامع پایین دست به دنبال دارد.

۲- استفاده از فناوری و سیستم‌های به‌روز باعث کاهش مصرف آب می‌گردد، اما مصرف انرژی را افزایش می‌دهند و در ارزیابی نهایی هر پروژه باید این تضاد مورد بررسی قرار گیرد.

۳- استفاده از سیاست‌های ترکیبی به جای سیاست‌های واحد بهترین راه‌حل برای تولید پایدار محصولات کشاورزی است.

۴- استفاده از رویکرد پیوند آب - انرژی - غذا - محیط‌زیست به بهترین شکل منجر به تولید پایدار محصولات کشاورزی می‌شود.

روش‌شناسی پژوهش

نیشکر از جمله محصولات است که بیشترین نیاز آبی را در فصل تابستان دارد که به دلیل دماهای بالای ۵۰ درجه سانتی‌گراد در این فصل در استان خوزستان، نیاز آبی نیشکر بیش از پیش افزایش می‌یابد. از سویی، به دلیل خشکسالی‌های اخیر، افزایش جمعیت و برداشت‌های آب از رودخانه کارون به وسیله کشت و صنعت‌ها و سایر کارخانه‌ها، دبی رودخانه کارون که تنها منبع تامین آب کشت و صنعت‌های نیشکر هست، در پایین دست شهر اهواز کاهش چشمگیری داشته که باعث مشکلاتی از جمله خسارات محیط زیستی به این مناطق شده است.

منطقه مورد مطالعه

شرکت کشت و صنعت نیشکر حکیم فارابی یکی از ۸ شرکت زیرمجموعه هلدینگ توسعه نیشکر و صنایع جانبی خوزستان به عنوان

بزرگترین تولید کننده شکر ایران است. شرکت فارابی از نظر موقعیت جغرافیایی، در ۴۸ درجه و ۳۴ دقیقه و ۲۳ ثانیه طول شرقی و ۳۰ درجه و ۵۷ دقیقه و ۱۵ ثانیه عرض شمالی در ۳۵ کیلومتری جنوب شهرستان اهواز و در ارتفاع ۱۲ متری از سطح دریا واقع شده است (شکل ۱). مساحت اراضی قابل کشت آن، ۹۸۰۰ هکتار است. به دلیل مسائل محیط‌زیستی که کشت و صنعت‌های توسعه نیشکر در منطقه ایجاد کرده‌اند، شرکت فارابی برای این پژوهش انتخاب شده است. در این شرکت، از سامانه آبیاری جویچه‌ای انتها بسته با استفاده از لوله‌های دریچه‌دار (هیدروفلوم) استفاده می‌شود. محصول اصلی، گیاه نیشکر است. کیفیت آب آبیاری این واحد، براساس نمودار ویلکاکس در محدوده C_3S_1 (شوری زیاد، قلیابیت کم) قرار دارد. بافت غالب مزارع لومی رسی سیلتی، لومی رسی، سیلتی رسی و لومی می‌باشد.



شکل ۱. موقعیت کشت و صنعت حکیم فارابی

مدل پویایی سیستم

تفکر و شیوه پویایی سیستم‌ها نوعی روش‌شناسی، شبیه‌سازی و مدل‌سازی رایانه‌ای برای تعیین چهارچوب، فهم، درک و بحث درباره بعضی موضوعات و مسائل پیچیده مدیریتی، صنعتی، اجتماعی است. با این شیوه تفکر می‌توان به موضوعات و مشکلات مدیریتی مانند ناپایداری در تولید، فقدان یا بی‌ثباتی در رشد و توسعه شرکت‌ها، از دست دادن سهم بازار و نظایر آن پرداخت. سیستم‌های پویا یک جنبه از نظریه سیستم‌ها^۱ است و به عنوان روشی برای فهم رفتار پویا و مستمر در سامانه‌های پیچیده بکار می‌رود. پویایی سیستم‌ها می‌تواند با مدل‌سازی یک سامانه بهترین و مناسب‌ترین راه حل را پیدا کند.

مدل پویایی سیستم با حلقه‌های مثبت و منفی خود، می‌تواند تاثیر تغییر یک پارامتر را بر روی پارامترهای دیگر و بر روی کل سیستم نشان دهد. حلقه‌های مثبت نشان‌دهنده این هستند که با افزایش یا کاهش معلول، علت نیز در همان جهت تغییر می‌کند. در مقابل در حلقه‌های منفی یا تعادلی، با افزایش یا کاهش معلول، علت در جهت عکس آن حرکت می‌کند و تعادل در سیستم ایجاد می‌کند.

مدل حالت و جریان

پس از ترسیم حلقه‌های علت و معلولی، این حلقه‌ها به نمودار حالت و جریان تبدیل می‌شود. حلقه‌های علت و معلولی و نمودارهای حالت و جریان در محیط نرم افزار شبیه سازی Vensim ترسیم می‌شود. جریان‌ها متغیرهای سیستم و حالت‌ها انباشت درون سیستم هستند. جریان‌ها ورودی و خروجی حالت‌ها هستند و نرخ تغییرات آنها را تعیین می‌کنند.

عمق آب آبیاری

در این پژوهش عمق آب آبیاری به عنوان ورودی به مدل در نظر گرفته شده است. در جدول ۱ عمق آب آبیاری که از شرکت فارابی و ارتفاع بارندگی که از ایستگاه هواشناسی این شرکت تهیه شده، ارائه شده است.

1 Methodology

2 Systems Theory

جدول ۱. عمق آب آبیاری برای یک هکتار و ارتفاع بارندگی

سال	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند
۱۳۹۵	۲۰۱	۳۰۷	۴۸۷	۴۳۵	۴۴۰	۳۲۰	۲۷۴	۱۰۲	۴۴	۵۱	۱۱۱	۱۶۲
۱۳۹۶	۱۹۱	۳۳۰	۴۲۰	۴۳۸	۴۶۳	۳۵۹	۲۲۰	۹۹	۸۷	۹۰	۱۲۶	۱۲۲
۱۳۹۷	۱۹۵	۲۸۱	۲۶۳	۱۸۷	۲۱۹	۲۴۶	۱۹۸	۱۱۲	۱۷	۲۰	۲۲	۸۶
۱۳۹۸	۱۶۸	۱۵۶	۲۹۲	۴۰۷	۳۳۶	۳۵۰	۱۹۹	۶۷	۵۱	۸۸	۱۱۴	۱۵۰
۱۳۹۹	۲۷۲	۳۵۹	۴۲۴	۵۰۶	۴۰۰	۴۰۳	۲۷۴	۶۶	۱۲	۱۲۰	۱۲۶	۲۲۲
۱۳۹۵	۴۱	۲	.	.	.	.	.	.	۴۳	۳	۵	۲۶
۱۳۹۶	۲۳	.	.	.	.	.	.	۱۳	۱	۱	۵	۴۷
۱۳۹۷	۲۶	۲۵	.	.	.	.	۱۵	۳۰	۷۷	۴۰	۳۶	۷
۱۳۹۸	۱۹	۴	.	.	.	.	.	۶۰	۱۱۴	۲	۲۲	۲۹
۱۳۹۹	۲۶	۲	.	.	.	.	.	۶۱	۹۵	۷	۹	۴

عمق آب آبیاری (میلی‌متر)

بارندگی (میلی‌متر)

معادلات حاکم

حجم زهاب

برای محاسبه حجم زهاب، ابتدا خاک به دو بخش منافذ درشت و منافذ ریز تقسیم شد. حجم آب ورودی به منافذ درشت برابر با حجم تخلخل موثر و حجم آب ورودی به منافذ ریز از اختلاف حجم آب کل و حجم تخلخل موثر محاسبه شد. از حجم آب ورودی به منافذ درشت برای محاسبه حجم زهاب روزانه استفاده شد که برای این کار از رابطه هوخهات (Ritzema, 2006) استفاده گردید:

$$q = \frac{8K_1 d_e h}{L^2} + \frac{4k_2 h^2}{L^2} \quad \text{رابطه (۱)}$$

که در آن:

q: ضریب زهکشی (متر بر روز)، d: عمق معادل (متر)، K₁: هدایت هیدرولیکی خاک پایین لوله زهکش (متر بر روز)، K₂: هدایت هیدرولیکی خاک بالای لوله زهکش (متر بر روز)، h: حداکثر ارتفاع آب بین دو لوله زهکش (متر)، L: فاصله لوله‌های زهکش (متر).

جدول ۲. اطلاعات ثابت در محاسبه رابطه هوخهات

هدایت هیدرولیکی خاک بالایی لوله زهکش (متر بر روز)	هدایت هیدرولیکی خاک پایینی لوله زهکش (متر بر روز)	فاصله لوله‌های زهکش (متر)	عمق لایه نفوذناپذیر (متر)	قطر لوله زهکش (میلی‌متر)
۱/۵	۱	۴۰	۵	۱۲۵

به دلیل اینکه در کشت و صنعت فارابی یک چهارم فاصله زهکش‌ها، از عمق لایه نفوذناپذیر بیشتر است ($\frac{1}{4}L > D$)، از رابطه (۲) برای محاسبه عمق معادل (d_e) استفاده می‌شود (Ritzema, 2006):

$$d_e = \frac{D}{\left(\frac{8D}{\pi L} LN \frac{D}{u}\right) + 1} \quad \text{رابطه (۲)}$$

که در آن:

D: عمق لایه نفوذناپذیر (متر)، L: فاصله لوله‌های زهکش (متر)، u: محیط خیس شده زهکش (متر)

تبخیر و تعرق گیاه

برای محاسبه تبخیر و تعرق استاندارد روزانه گیاه از روش تشت تبخیر استفاده شد (رابطه ۳). میزان تبخیر با استفاده از تشت تبخیری که در ایستگاه هواشناسی شرکت فارابی قرار دارد اندازه‌گیری گردید. همچنین با توجه به اقلیم منطقه، ضریب تشت برابر ۰/۷۵ در نظر گرفته شد. برای مقادیر ضریب گیاهی در ماه‌های مختلف از پژوهشی که در موسسه تحقیقات و آموزش توسعه نیشکر خوزستان انجام شده، استفاده گردید (جدول ۳):



$$ET_C = E_{pan} \times K_{pan} \times K_C \quad \text{رابطه ۳}$$

ET_C : تبخیر و تعرق (میلی‌متر بر روز)، E_{pan} : تبخیر از تشت تبخیر (میلی‌متر بر روز)، K_{pan} : ضریب تشت، K_C : ضریب گیاهی.

جدول ۳. ضریب گیاهی نیشکر در منطقه مطالعه در ماه‌های مختلف

ماه	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند
ضریب گیاهی (K_C)	۰/۸	۰/۸۸	۱/۱۴	۱/۲۳	۱/۱۴	۱/۰۴	۰/۷۸	۰/۵۸	۰/۴۷	۰/۴۷	۰/۵	۰/۷۳

به دلیل تنش‌های مختلفی که به گیاه در طی دوره رشد وارد می‌شود، معمولاً تبخیر و تعرق تحت شرایط غیر استاندارد انجام می‌شود. برای محاسبه تبخیر و تعرق اصلاح شده از ضریب K_s استفاده شده است (رابطه ۴).

$$ET_{C adj} = ET_C \times K_s \quad \text{رابطه ۴}$$

$ET_{C adj}$: تبخیر و تعرق اصلاح شده (میلی‌متر بر روز)، K_s : ضریب کاهش تبخیر و تعرق در اثر تنش شوری یا خشکی.

به دلیل اینکه شوری آب رودخانه کارون در محدوده شرکت فارابی (جدول ۴) همواره از آستانه شوری قابل تحمل گیاه نیشکر (۱/۷ دسی زیمنس بر متر) بیشتر هست، همیشه تنش شوری به گیاه وارد می‌شود. اما با توجه به مدیریت آبیاری که انجام می‌گیرد، ممکن است تنش خشکی هم در زمان‌هایی به گیاه وارد شود. بر این اساس، برای محاسبه ضریب K_s در شرایطی که فقط تنش شوری وجود داشته باشد ($D_r < RAW$) از رابطه ۵ و در شرایطی که تنش توامان شوری و خشکی وجود داشته باشد ($D_r > RAW$) از رابطه ۶ استفاده شد (فائو ۱۹۹۸، ۵۶).

$$K_s = 1 - \frac{b}{K_y 100} (EC_e - EC_e \text{ threshold}) \quad \text{رابطه ۵}$$

$$K_s = \left[1 - \frac{b}{K_y 100} (EC_e - EC_e \text{ threshold}) \right] \left[\frac{TAW - D_r}{TAW - RAW} \right] \quad \text{رابطه ۶}$$

EC_e : هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک (dS/m)، $EC_e \text{ threshold}$: هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک در آستانه کاهش عملکرد گیاه (dS/m)، K_y : ضریب حساسیت به شوری (بی بعد)، b : شیب کاهش عملکرد محصول به ازای افزایش یک دسی زیمنس بر متر هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک (درصد)، TAW : کل حجم آب قابل ذخیره در خاک در واحد سطح در عمق توسعه ریشه گیاه (میلی‌متر)، D_r : مقدار آب خاک در عمق توسعه ریشه گیاه (میلی‌متر)، RAW : رطوبت سهل الوصول (میلی‌متر).

جدول ۴. میانگین شوری سالانه آب رودخانه کارون در محدوده شرکت فارابی

سال	۱۳۹۵	۱۳۹۶	۱۳۹۷	۱۳۹۸	۱۳۹۹
شوری آب کارون (dS/m)	۲/۱۴	۲/۳۹	۲/۸۶	۱/۸۸	۲/۳۴

مقدار آب خاک در عمق توسعه ریشه گیاه (D_r) به صورت کمبود رطوبت نسبت به ظرفیت زراعی بیان می‌شود (فائو ۱۹۹۸، ۵۶، ۱۹۹۸) (رابطه ۷):

$$D_r = FC - \theta_i \quad \text{رابطه ۷}$$

FC : رطوبت حجمی خاک در ظرفیت زراعی (درصد)، θ_i : رطوبت حجمی خاک در لحظه (درصد).

رطوبت خاک در لحظه (θ_i) نیز به شکل رابطه ۸ بیان می‌شود:

$$\theta_i = \frac{WD}{SD} \quad \text{رابطه ۸}$$

به دلیل اینکه گیاه آب مورد نیاز خود را از منافذ ریز برداشت می‌کند، عمق آب (WD) در هر لحظه برابر حجم آب موجود در منافذ ریز (میلی‌متر) در نظر گرفته شده است. عمق خاک (SD) نیز برابر فاصله سطح زمین تا لوله‌های زهکش است (میلی‌متر).

تولید محصول

در این پژوهش برای محاسبه میزان محصول تولیدی از معادله دورنباس - کاسام (۱۹۷۹) استفاده شده است:

$$\left[1 - \frac{Y_a}{Y_m}\right] = K_y \left[1 - \frac{ET_c \text{ adj}}{ET_c}\right] \quad \text{رابطه ۹}$$

که در آن:

Y_a : عملکرد واقعی محصول و Y_m : حداکثر عملکرد محصول تحت شرایط بدون تنش است.

تبخیر و تعرق استاندارد و تبخیر و تعرق اصلاح شده به صورت تجمعی در طول فصل محاسبه و در پایان فصل میزان محصول تولیدی از آن‌ها محاسبه شد.

شوری خاک

برای محاسبه شوری خاک نیز خاک به دو بخش منافذ ریز و منافذ درشت تقسیم شد. شوری منافذ درشت در هر روز بر اساس شوری منافذ درشت در روز قبل و شوری آب آبیاری در همان روز محاسبه گردید:

$$LPS_t = \frac{(LPD \times LPS_{t-1}) + (PLP_t \times EC_{iw})}{LPD + PLP_t} \quad \text{رابطه ۱۰}$$

که در آن:

LPD : ارتفاع منافذ درشت (میلی‌متر)، LPS_t و LPS_{t-1} : شوری آب در منافذ درشت به ترتیب در همان روز و روز قبل (dS/m)، PLP_t : مقدار نفوذ به منافذ درشت (میلی‌متر)، EC_{iw} : شوری آب آبیاری (dS/m).

برای محاسبه شوری منافذ ریز از رابطه انتگرالی زیر استفاده شد:

$$SPS_t = SPS_{t_0} + \int_{t_0}^{t_n} \left(\frac{(PSP \times SSS) + (CR \times GWS) - (ET_c \text{ adj} \times SET)}{PSP + CR + ET_c \text{ adj}} \right) dt \quad \text{رابطه ۱۱}$$

که در آن:

SPS_{t_0} و SPS_t : شوری منافذ ریز به ترتیب در همان روز و روز قبل (dS/m)، PSP : میزان نفوذ به منافذ ریز (میلی‌متر)، SSS : شوری آب ذخیره سطحی (dS/m)، CR : میزان صعود موئینه‌ای (میلی‌متر)، GWS : شوری آب زیرزمینی (dS/m)، $ET_c \text{ adj}$: تبخیر و تعرق اصلاح شده (میلی‌متر بر روز)، SET : شوری تبخیر و تعرق (dS/m).

به دلیل اینکه شوری از طریق تبخیر و تعرق کاهش نمی‌یابد، میزان شوری تبخیر و تعرق (SET) برابر صفر در نظر گرفته می‌شود. همچنین برای محاسبه میزان صعود موئینه‌ای (CR) از رابطه لی و دانگ (۱۹۹۸) استفاده شد:

$$CR = ET_c \text{ adj} \times e^{-\sigma d} \quad \text{رابطه ۱۲}$$

$ET_c \text{ adj}$: تبخیر و تعرق اصلاح شده (میلی‌متر بر روز)، σ : پارامتر خاک با توجه به بافت خاک ثابت، d : عمق آب زیرزمینی (متر).

در نهایت برای محاسبه شوری خاک روزانه از جمع شوری منافذ درشت و ریز و میزان تخلخل و تخلخل موثر استفاده شد:

$$SS = \left(LPS \times \frac{EP}{P} \right) + \left(SPS \times \left(1 - \frac{EP}{P} \right) \right) \quad \text{رابطه ۱۳}$$

که در آن:

SS : شوری خاک (dS/m)، LPS : شوری منافذ درشت (dS/m)، SPS : شوری منافذ ریز (dS/m)، P : تخلخل (درصد)، EP : تخلخل موثر (درصد).

شوری زهاب

برای محاسبه شوری زهاب از پارامتر شوری منافذ درشت که در بخش قبل محاسبه و همچنین شوری آب زیرزمینی استفاده شد:

$$DWS = \left(\frac{q_{above}}{DWD} \times LPS \right) + \left(\frac{q_{under}}{DWD} \times GWS \right) \quad \text{رابطه ۱۴}$$

q_{above} : عمق زهاب از بالای زهکش (میلی‌متر)، q_{under} : عمق زهاب از پایین زهکش (میلی‌متر)، DWS : شوری آب زیرزمینی

(dS/m)، LPS : شوری منافذ درشت (dS/m)، GWS : شوری آب زیرزمینی (dS/m).

همچنین برای محاسبه شوری آب زیرزمینی در هر روز از رابطه زیر استفاده شد:



$$GWS_t = \frac{(P * LPS) + ((ID - DD) \times GWS_{t-1})}{P + (ID - DD)} \quad \text{رابطه ۱۵}$$

که در آن:

GWS_t و GWS_{t-1} : شوری آب زیرزمینی به ترتیب در همان روز و روز قبل (ds/m)، P : میزان نفوذ به منافذ درشت (میلی‌متر)، LPS : شوری منافذ درشت (ds/m)، ID : عمق لایه نفوذناپذیر (میلی‌متر)، DD : عمق زهکش‌ها (میلی‌متر).

بهره‌وری آب

بهره‌وری آب در این پژوهش که بر اساس رابطه زیر محاسبه شد که از تقسیم میزان محصول بر میزان آب مصرفی به دست می‌آید:

$$WP = \frac{CY}{SIV} \quad \text{رابطه ۱۶}$$

که در آن‌ها:

CY : میزان محصول (کیلوگرم)، SIV : حجم آب مصرفی در یک فصل کشت (مترمکعب)، WP : بهره‌وری آب فیزیکی (کیلوگرم بر مترمکعب).

آنالیز حساسیت و واسنجی مدل

برای واسنجی و صحت‌سنجی مدل لازم است که در ابتدا آنالیز حساسیت صورت گیرد تا پارامترهایی که تغییر آن‌ها می‌تواند در نتایج مدل اثر معنی‌دار بگذارد، مشخص شوند. بدین منظور هر پارامتر ورودی به میزان $\pm 25\%$ و $\pm 50\%$ درصد تغییر کرد و مدل اجرا گردید و تاثیر تغییر پارامتر ورودی بر پارامتر خروجی با استفاده از رابطه ۱۷ (جوادی و همکاران، ۱۳۹۳) مشخص شد. در این پژوهش، پارامترهایی که عدم قطعیت درباره آن‌ها وجود دارد مانند پارامترهای گیاهی و خاکی، در انجام آنالیز حساسیت استفاده شد.

$$SI_a = \sum_{i=1}^n \left| \frac{\frac{X_i - X_{i-1}}{(X_i + X_{i-1})/2}}{\frac{P_i - P_{i-1}}{(P_i + P_{i-1})/2}} \right| \quad \text{رابطه ۱۷}$$

SI_a : شاخص حساسیت (بی‌بعد)، X_i : مقدار جدید پارامتر خروجی با تغییر مقدار پارامتر ورودی از P_{i-1} به P_i ، X_{i-1} : مقدار قبلی پارامتر خروجی بدون تغییر در پارامتر ورودی (P_{i-1})، n : تعداد پارامترهای خروجی.

در ابتدا مدل به صورت روزانه اجرا گردید. سپس از داده‌های سه سال اول (۱۳۹۵ تا ۱۳۹۷) برای واسنجی مدل و از داده‌های دو سال آخر (۱۳۹۸ تا ۱۳۹۹) برای صحت‌سنجی مدل استفاده شد.

ارزیابی مدل

برای ارزیابی خروجی‌های مدل در این پژوهش از پارامترهای آماری میانگین مطلق خطا (MAE)، میانگین انحراف خطا (MBE) و میانگین درصد خطا (MAPE) استفاده شده است.

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |O_i - F_i| \quad \text{رابطه ۱۸}$$

$$MBE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n O_i - F_i \quad \text{رابطه ۱۹}$$

$$MAPE = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{O_i - F_i}{O_i} \right| \quad \text{رابطه ۲۰}$$

که در روابط فوق F_i مقدار برآورد شده، O_i مقدار مشاهده شده و n تعداد داده‌ها است.

یافته‌های پژوهش و بحث

نتایج آنالیز حساسیت و واسنجی و صحت‌سنجی مدل

نتایج آنالیز حساسیت مدل در جدول ۵ ارائه شده است. در این تحقیق به دلیل اینکه چند خروجی وجود دارد و همه ورودی‌ها بر خروجی‌ها تاثیر ندارند، نتایج آنالیز حساسیت به تفکیک خروجی‌ها ارائه شده است. اگر میزان شاخص حساسیت بیش از ۱/۵ باشد آن پارامتر ورودی دارای حساسیت زیاد، اگر بین ۰/۳ تا ۱/۵ باشد دارای حساسیت متوسط و اگر کمتر ۰/۳ باشد دارای حساسیت کم است (تقی‌زاده و همکاران، ۱۳۹۱). همان‌طور که در جدول مشخص شده است، پارامترها بر اساس میزان حساسیت آن‌ها رتبه‌بندی شده و بیشترین حساسیت بر میزان محصول با رتبه ۱ تا ۳ به ترتیب پارامترهای رطوبت حجمی خاک در نقطه پژمردگی دائم، رطوبت حجمی خاک در نقطه زراعی و میزان حداکثر محصول به ترتیب با میزان شاخص حساسیت ۶/۰۱۴، ۱/۴۲۸ و ۱ دارند. همچنین کمترین میزان حساسیت را پارامترهای عمق توسعه ریشه، شیب کاهش محصول و حد شوری قابل تحمل گیاه به ترتیب با میزان ۰/۰۰۷، ۰/۰۱۹ و ۰/۰۷۳ دارند. همچنین بیشترین میزان حساسیت با رتبه ۱ و ۲ را بر حجم زهاب، پارامترهای تخلخل و تخلخل موثر به ترتیب با ۱/۵۰۷، ۰/۹۹۵ و کمترین حساسیت را پارامترهای هدایت هیدرولیکی بالای لوله زهکش و عمق لایه نفوذناپذیر با شاخص حساسیت به ترتیب ۰ و ۰/۰۰۱ دارند. در ادامه تمامی پارامترها فارغ از تاثیر آن‌ها بر روی پارامتر خروجی رتبه‌بندی شد که بیشترین میزان حساسیت را با رتبه ۱ تا ۳ پارامترهای رطوبت حجمی خاک در نقطه پژمردگی دائم، تخلخل و رطوبت خاک در نقطه زراعی با شاخص حساسیت ۶/۰۱۴، ۱/۵۰۷ و ۱/۴۲۸ دارد و همچنین به پارامتر هدایت هیدرولیکی بالای لوله زهکش حساسیتی ندارد.

جدول ۵. نتایج آنالیز حساسیت مدل

رتبه نهایی	رتبه	شاخص حساسیت	پارامتر ورودی مدل	پارامتر خروجی مدل	
۳	۲	۱/۴۲۸	رطوبت حجمی خاک در نقطه زراعی	میزان محصول	
۱	۱	۶/۰۱۴	رطوبت حجمی خاک در نقطه پژمردگی دائم		
۷	۴	۰/۸۱۷	تخلیه مجاز مدیریتی		
۸	۵	۰/۴۴۱	ضریب تشت تبخیر		
۱۲	۹	۰/۰۰۷	عمق توسعه ریشه		
۱۰	۷	۰/۰۷۳	حد شوری قابل تحمل گیاه		
۱۱	۸	۰/۰۱۹	شیب کاهش محصول		
۴	۳	۱	میزان حداکثر محصول		
۹	۶	۰/۲۵۴	ضریب حساسیت به شوری		
۶	۳	۰/۹۴۸	رطوبت حجمی خاک در نقطه پژمردگی دائم		حجم زهاب
۱۵	۶	۰	هدایت هیدرولیکی بالای لوله زهکش		
۱۳	۴	۰/۰۰۵	هدایت هیدرولیکی پایین لوله زهکش		
۱۴	۵	۰/۰۰۱	عمق لایه نفوذناپذیر		
۲	۱	۱/۵۰۷	تخلخل		
۵	۲	۰/۹۹۵	تخلخل موثر		

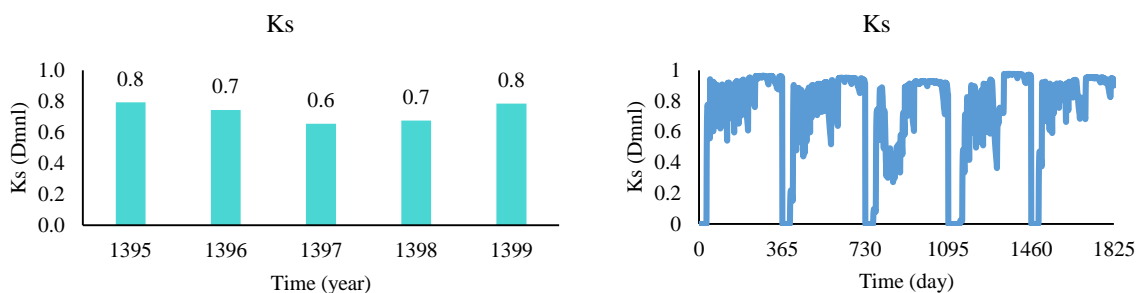
پس از انجام آنالیز حساسیت، واسنجی و صحت‌سنجی مدل انجام شد. برای این منظور پارامترهای زیر اصلاح شد تا نتایج مدل به نتایج واقعی نزدیک شوند (جدول ۶). برای این منظور سعی شد تغییرات پارامترها از حد ۳۰٪ بیشتر نشود.

جدول ۶. تغییرات پارامترها برای واسنجی مدل

پارامتر	مقدار اولیه	مقدار نهایی	درصد تغییرات
عمق لایه نفوذناپذیر (میلی‌متر)	۵۰۰۰	۶۵۰۰	+۳۰
میزان حداکثر محصول (تن)	۱۳۰	۱۱۵	-۱۲
تخلیه مجاز مدیریتی (بی بعد)	۰/۶۵	۰/۶۱	-۶
رطوبت حجمی خاک در نقطه زراعی (درصد)	۳۷	۳۴	-۸
رطوبت حجمی خاک در نقطه پژمردگی دائم (درصد)	۱۸/۶	۲۱	+۱۳
تخلخل (درصد)	۴۳	۳۷	-۱۴
ضریب تشت تبخیر (بی بعد)	۰/۷۵	۰/۸	+۷

تبخیر و تعرق استاندارد و اصلاح شده

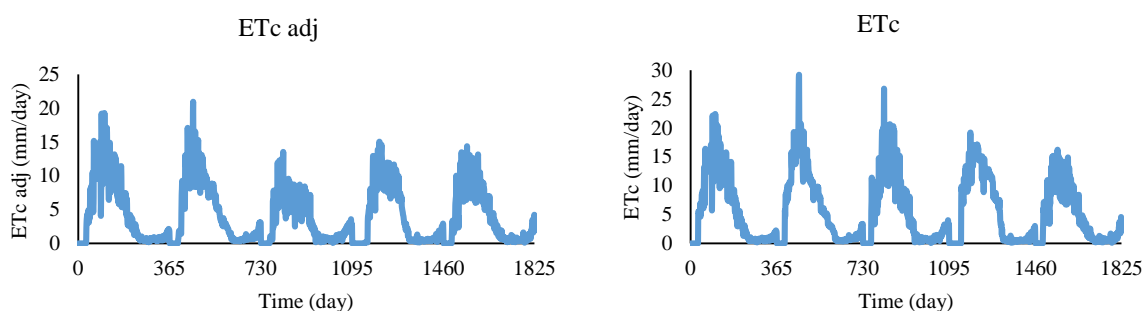
پیش از محاسبه تبخیر و تعرق گیاه، باید ضریب حساسیت به شوری و کم آبیاری (K_s) محاسبه شود. بر این اساس، نتایج محاسبه ضریب K_s به تفکیک روزانه در شکل ۲ و به تفکیک سالانه در شکل ۳ ارائه شده است. بر طبق شکل ۳، بیشترین مقدار ضریب K_s در سال‌های ۱۳۹۵ به میزان ۰/۸ که به نظر می‌رسد این میزان به دلیل عمق آب آبیاری مناسب در این سال و شوری کمتر آب آبیاری به نسبت سال‌های دیگر باشد. همچنین کمترین مقدار K_s در سال ۱۳۹۷ به میزان ۰/۶ به دست آمد. در سال ۱۳۹۷ به دلیل خشکسالی که اتفاق افتاد، حجم آب آبیاری کاهش چشمگیری نسبت به سال‌های دیگر داشت و شوری آب نیز افزایش پیدا کرد که این دو عامل باعث کاهش K_s در این سال شد.



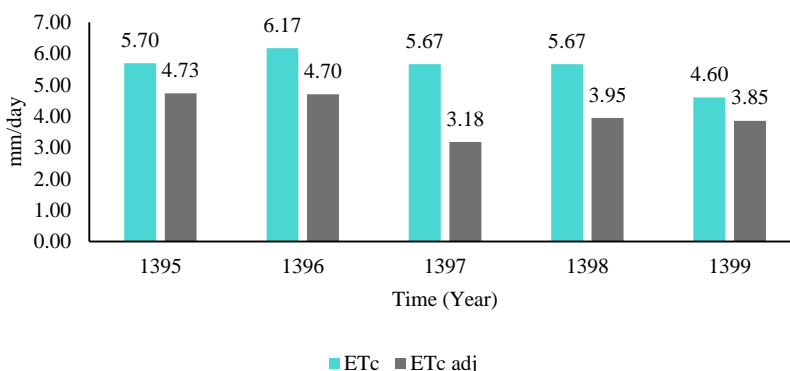
شکل ۲. میزان ضریب K_s به تفکیک روزانه

شکل ۳. میزان ضریب K_s به صورت میانگین سالانه

در ادامه نتایج محاسبه تبخیر و تعرق استاندارد و اصلاح شده به تفکیک روزانه در شکل ۴ و به صورت میانگین سالانه در شکل ۵ ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود تاثیر ضریب K_s بر تبخیر و تعرق استاندارد نمایان است. بر این اساس، بیشترین کاهش در میانگین سالانه تبخیر و تعرق در سال ۱۳۹۷ به میزان ۲/۰۳ میلی‌متر در روز بود که ناشی از همان خشکسالی رخ داده در آن سال بود و کمترین کاهش در سال ۱۳۹۹ به میزان ۰/۴۷ میلی‌متر در روز به دست آمد. به نظر می‌رسد در این سال به دلیل حجم آب آبیاری و بارندگی مناسب، کمترین کاهش در میانگین سالانه تبخیر و تعرق نسبت به شرایط استاندارد رخ داده است.



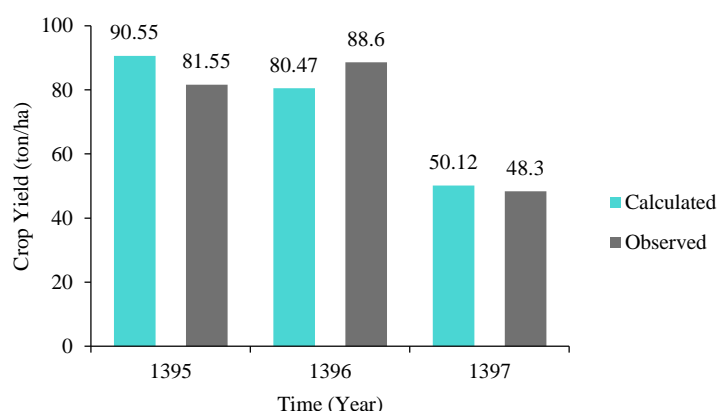
شکل ۴. نتایج محاسبه تبخیر تعرق استاندارد (شکل راست) و تبخیر و تعرق اصلاح شده (شکل چپ) به تفکیک روزانه



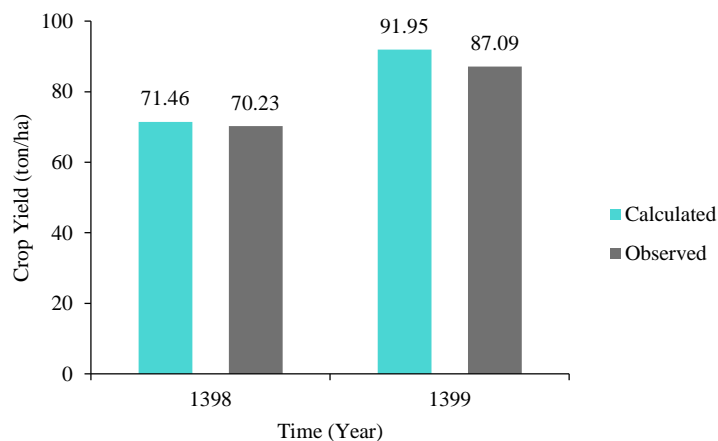
شکل ۵. نتایج محاسبه تبخیر تعرق استاندارد و اصلاح شده به صورت میانگین سالانه

عملکرد محصول

نتایج شبیه‌سازی عملکرد محصول برای دوره واسنجی نشان می‌دهد که مدل از دقت بالایی برخوردار است (شکل ۶ و جدول ۷). همچنین شبیه‌سازی، بیشترین عملکرد محصول در سال ۱۳۹۹ به دست آمد ولی تفاوت چشمگیری با عملکرد محصول در سال ۱۳۹۵ ندارد. به نظر می‌رسد در سال ۱۳۹۵ علارغم کاهش ارتفاع آب آبیاری ۲۵۰ میلی‌متری و کاهش بارندگی ۸۴ میلی‌متری نسبت به سال ۱۳۹۹، کمتر بودن شوری آب آبیاری و شوری خاک در این سال، منجر به جبران اختلاف آب آبیاری و بارندگی نسبت به سال ۱۳۹۹ شده و عملکرد محصول مناسب گیاه را باعث شده است. همچنین بیشتر بودن ارتفاع بارندگی در دوره رشد گیاه در سال ۱۳۹۵ نسبت به سال ۱۳۹۹ که منجر به کاهش شوری خاک می‌شود، می‌تواند از دیگر دلایل افزایش محصول در سال ۱۳۹۵ باشد. علت کاهش عملکرد محصول در سال ۱۳۹۷، کاهش ۴۰ درصدی در ارتفاع آب آبیاری نسبت به سال‌های قبل می‌باشد که به دلیل خشکسالی رخ داده در این سال می‌باشد. همچنین در سیل سال ۱۳۹۸ که منجر به زیر آب رفتن تعداد زیادی از مزارع کشت و صنعت گردید، خسارت فراوانی به گیاهان وارد گردید و منجر به کاهش عملکرد محصول در این سال شد. بیشترین دقت مدل در شبیه‌سازی میزان محصول در سال ۱۳۹۸ با ۹۸ درصد (۲٪ افزایش محصول نسبت به شرایط مشاهده‌ای) و کمترین میزان دقت مدل در سال ۱۳۹۵ با ۸۹ درصد (۱۱٪ افزایش محصول نسبت به شرایط مشاهده‌ای) بوده است. همچنین نتایج نشان داد که شبیه‌سازی عملکرد محصول در تمامی سال‌ها روند یکسانی ندارد و در بعضی سال‌ها مدل بیش برآورد و در بعضی سال‌ها کم برآورد بوده است. نتایج نشان می‌دهد مدل به طور متوسط در شبیه‌سازی میزان محصول دارای خطای ۵/۰۱ تن در هکتار بوده است. نتایج نودری و همکاران (۱۳۹۲) در شبیه‌سازی عملکرد محصول با مدل پویایی سیستم نشان داد که مدل آنها از دقت بالایی برخوردار است که با نتایج این پژوهش همخوانی دارد.



شکل ۶. مقایسه نتایج مشاهده‌ای و شبیه‌سازی عملکرد محصول در دوره واسنجی



شکل ۷. مقایسه نتایج مشاهده‌ای و شبیه‌سازی عملکرد محصول در دوره صحت‌سنجی

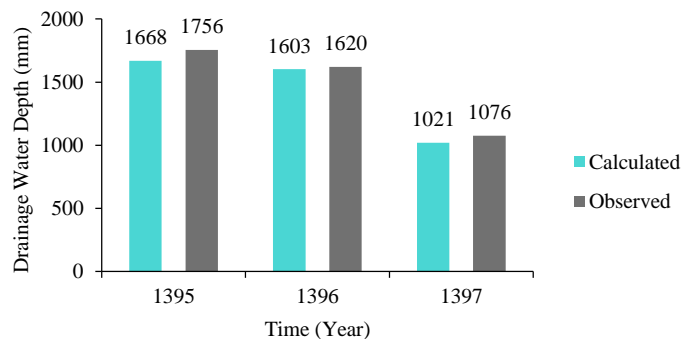


جدول ۷. مقادیر شاخص‌های ارزیابی مدل در دوره واسنجی و صحت‌سنجی برای شبیه‌سازی عملکرد محصول

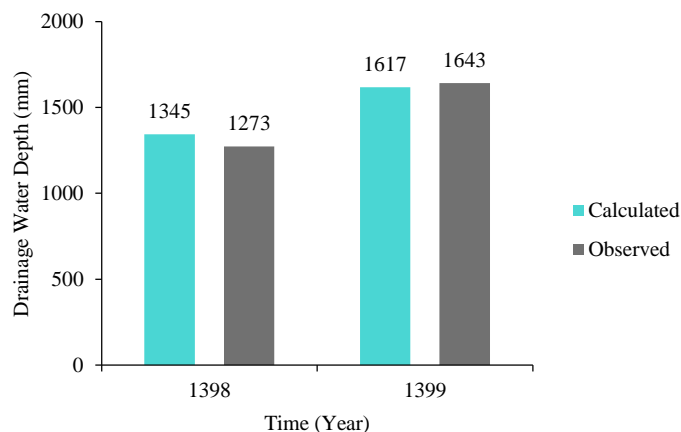
صحت‌سنجی			واسنجی			شاخص مقدار
MAPE	MBE (میلی‌متر)	MAE (میلی‌متر)	MAPE	MBE (میلی‌متر)	MAE (میلی‌متر)	
۳/۶۶	-۳/۰۴	۳/۰۴	۷/۹۹	-۰/۸۹	۶/۳۱	

عمق زهاب

شبیه‌سازی عمق زهاب نشان داد که مدل در برآورد این پارامتر دقت نسبتاً بالایی دارد. جدول ۸ تعیین می‌کند که مدل برای دوره واسنجی از دقت بسیار بالایی برخوردار است. برای دوره صحت‌سنجی نیز $MAE=48/76$ ، $MBE=-22/97$ و $MAPE=3/60$ دقت بالای مدل را تایید می‌کنند (شکل ۹ و جدول ۸). در سال‌های نرمال (۱۳۹۵، ۱۳۹۶ و ۱۳۹۹) تغییرات اندک در عمق زهاب ناشی از مشخصات مزارع متفاوت می‌باشد زیرا سالانه در حدود ۲۰۰۰ هکتار از مزارع کشت و صنعت فارابی آیش می‌شوند و به دلیل تفاوت در مشخصات پارامترهای خاک مانند هدایت هیدرولیکی یا عمق لایه غیرقابل نفوذ، عمق زهاب سالانه متفاوت می‌شود. بیشترین دقت مدل در شبیه‌سازی عمق زهاب در سال ۱۳۹۶ با ۹۹ درصد (۱٪ کاهش عمق زهاب نسبت به شرایط مشاهده‌ای) و کمترین میزان آن در سال ۱۳۹۸ با ۹۴ درصد (۶٪ افزایش نسبت به شرایط مشاهده‌ای) بوده است. نتایج نمایان می‌کند که مدل به طور متوسط دارای خطای ۵۲ میلی‌متر در شبیه‌سازی عمق زهاب بوده است. همچنین بر طبق نتایج شبیه‌سازی مدل، متوسط ضریب زهکشی در طی ۵ سال در بالای لوله زهکش برابر ۰/۰۵ میلی‌متر بر روز و در پایین لوله زهکش برابر ۳/۹۲ میلی‌متر بر روز به دست آمد. جعفری و همکاران (۱۳۹۹) مدل‌سازی زهاب خروجی یک مدل فیزیکی را با استفاده از روش پویایی سیستم انجام دادند. نتایج آنها نشان داد که مدل در شبیه‌سازی حجم زهاب با $RMSE=0/1875$ از دقت بالایی برخوردار است که با نتایج این پژوهش همخوانی دارد. همچنین نتایج این پژوهش با نتایج پژوهش نوذری و همکاران (۱۳۸۸) که شبیه‌سازی حرکت آب و املاح را با روش پویایی سیستم شبیه‌سازی کردند، همخوانی دارد.



شکل ۸. مقایسه نتایج مشاهده‌ای و شبیه‌سازی حجم زهاب در دوره واسنجی



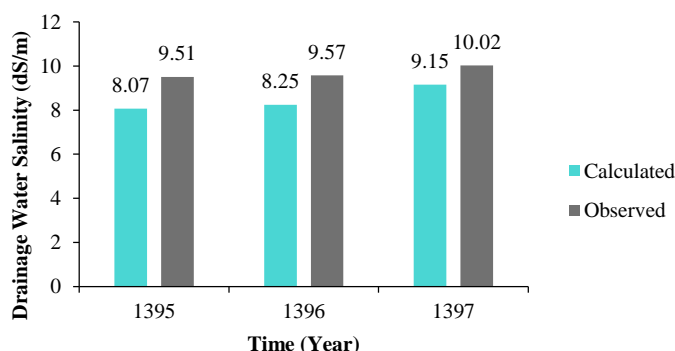
شکل ۹. مقایسه نتایج مشاهده‌ای و شبیه‌سازی حجم زهاب در دوره صحت‌سنجی

جدول ۸. مقادیر شاخص‌های ارزیابی مدل در دوره واسنجی و صحت‌سنجی برای شبیه‌سازی حجم زهاب

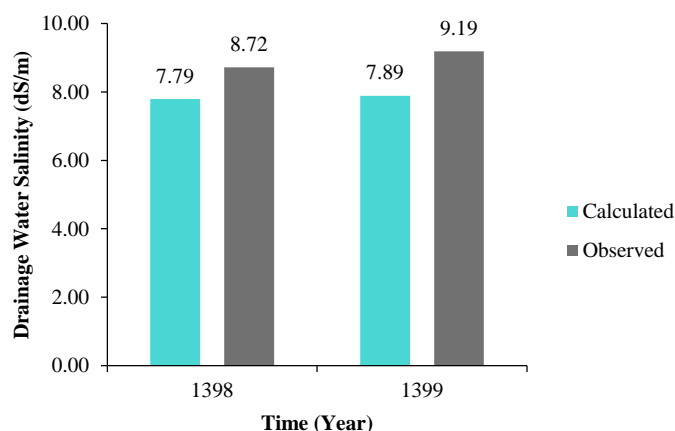
شاخص	واسنجی			صحت‌سنجی		
	MAE (میلی‌متر)	MBE (میلی‌متر)	MAPE	MAE (میلی‌متر)	MBE (میلی‌متر)	MAPE
مقدار	۵۳/۵۶	۵۳/۵۶	۳/۷۴	۴۸/۷۶	-۲۲/۹۷	۳/۶۰

شوری زهاب

شکل ۱۰ نشان می‌دهد که مدل در شبیه‌سازی شوری زهاب در دوره واسنجی از دقت قابل قبولی برخوردار است. همچنین $MAE=1/21$ ، $MBE=1/21$ و $MAPE=12/56$ که در جدول ۹ آمده است صحت این ادعا را نشان می‌دهد. همچنین نتایج صحت‌سنجی مدل نشان می‌دهد مدل در دوره صحت‌سنجی نیز از دقت قابل قبولی برخوردار است (شکل ۱۱ و جدول ۹). نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که مدل در سال ۱۳۹۷ با دقت ۹۱ درصد بیشترین دقت (۹٪ کاهش شوری نسبت به شرایط واقعی) و در سال ۱۳۹۵ با ۸۵ درصد کمترین دقت (۱۵٪ کاهش شوری نسبت به شرایط واقعی) را داشته است. از نتایج مدل چنین برداشت می‌شود نوسانات شوری زهاب متناسب با تاثیر توامان حجم و کیفیت آب آبیاری در سال‌های مختلف می‌باشد. به نظر می‌رسد کاهش شوری زهاب مشاهده‌ای در سال ۱۳۹۸ ناشی از سیلی است که در ابتدای این سال در منطقه رخ داده و شوری آب آبیاری و خاک را کاهش داده و در نتیجه باعث کاهش شوری زهاب شده است. برعکس این سال، در سال ۱۳۹۷ به دلیل خشکسالی که منجر به کاهش حجم آب آبیاری و عدم آبشویی خاک شده، شوری خاک افزایش یافته که باعث افزایش شوری زهاب شده است. همچنین نتایج مشخص می‌کند که مدل با خطای متوسط ۱/۱۷ دسی‌زیمنس بر متر در شبیه‌سازی شوری زهاب کم برآورد بوده است که به نظر می‌رسد دلیل این خطا ناشی از اختلاف شوری خاک و حجم زهاب نسبت به شرایط مشاهده‌ای در سال‌های مختلف می‌باشد. نتایج جعفری و همکاران (۱۳۹۹) نشان داد که مدل در شبیه‌سازی شوری زهاب با $RMSE=0/16$ از دقت بالایی برخوردار است که با نتایج این پژوهش همخوانی دارد.



شکل ۱۰. مقایسه نتایج مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شوری زهاب در دوره واسنجی



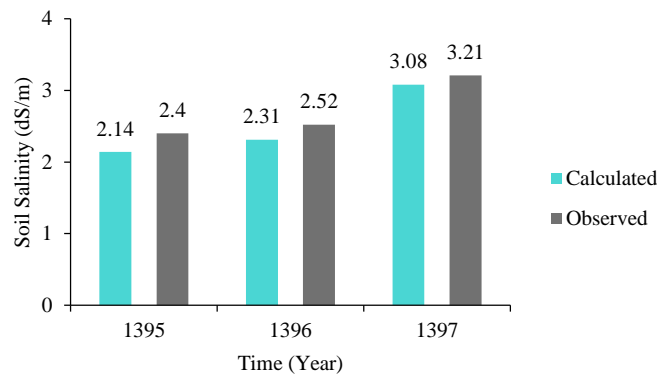
شکل ۱۱. مقایسه نتایج مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شوری زهاب در دوره صحت‌سنجی

جدول ۹. مقادیر شاخص‌های ارزیابی مدل در دوره واسنجی و صحت‌سنجی برای شبیه‌سازی شوری زه‌آب

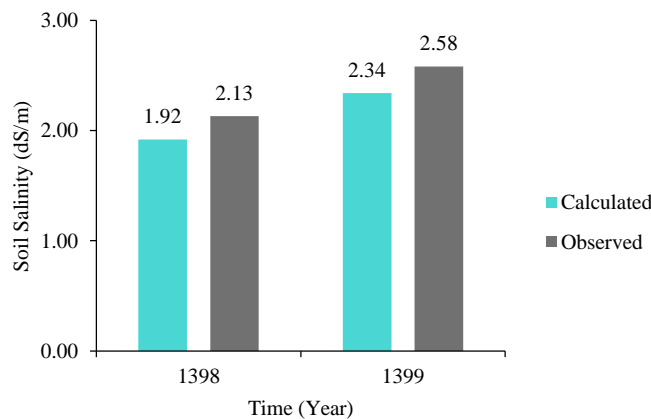
صحت‌سنجی			واسنجی			شاخص مقدار
MAPE	MBE (میلی‌متر)	MAE (میلی‌متر)	MAPE	MBE (میلی‌متر)	MAE (میلی‌متر)	
۱۲/۴۰	۱/۱۱	۱/۱۱	۱۲/۵۶	۱/۲۱	۱/۲۱	

شوری خاک

نتایج شبیه‌سازی شوری خاک برای دوره واسنجی که در جدول ۱۰ آمده نشان می‌دهد که مدل دارای دقت بسیار بالایی است. $MAE=0/22$ ، $MAPE=9/56$ و $MBE=0/22$ برای دوره صحت‌سنجی این نتایج را تصدیق می‌کنند (شکل ۱۳ و جدول ۱۰). بیشترین دقت مدل در شبیه‌سازی شوری خاک به صورت متوسط سالانه در سال ۱۳۹۷ به میزان ۹۶ درصد (۴٪ کاهش نسبت به نتایج مشاهده شده) و کمترین میزان این شاخص در سال ۱۳۹۵ به میزان ۹۰ درصد (۱۰٪ کاهش نسبت به نتایج مشاهده شده) به دست آمد. همان‌طور که در بخش قبل گفته شد، به دلیل خشکسالی و کمبود آب در سال ۱۳۹۷، عملیات آبشویی خاک انجام نگرفت و همچنین افزایش شوری آب آبیاری، ناشی از خشکسالی در این سال می‌باشد. بر همین اساس شوری خاک در سال ۱۳۹۷ افزایش قابل توجهی داشت. علی‌رغم افزایش ارتفاع آب آبیاری و بارندگی در سال ۱۳۹۹ نسبت به سال‌های ۱۳۹۵ و ۱۳۹۶، باز هم شوری خاک در این سال بالاتر از دو سال ذکر شده می‌باشد که به نظر می‌رسد دلیل آن شوری خاک در ابتدای دوره کشت در هر سال می‌باشد. همچنین عدم یکنواختی توزیع بارش در طول سال‌های مختلف نیز می‌تواند از دیگر دلایل شوری خاک در سال‌های مختلف باشد. آبشویی خاک با سیلاب سال ۱۳۹۸ منجر به کاهش شوری خاک در این سال شده است. همچنین نتایج نشان می‌دهد که مدل با میانگین خطای سالانه $0/21$ دسی‌زیمنس بر متر دارای روند یکسانی است و در تمامی سال‌ها کم برآورد بوده است. نتایج نوذری و آزادی (۲۰۲۱) نشان دادند که مدل آنها با $RMSE = 0/54$ از دقت بالایی برخوردار است که با نتایج این پژوهش همخوانی دارد.



شکل ۱۲. مقایسه نتایج مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شوری خاک در دوره واسنجی



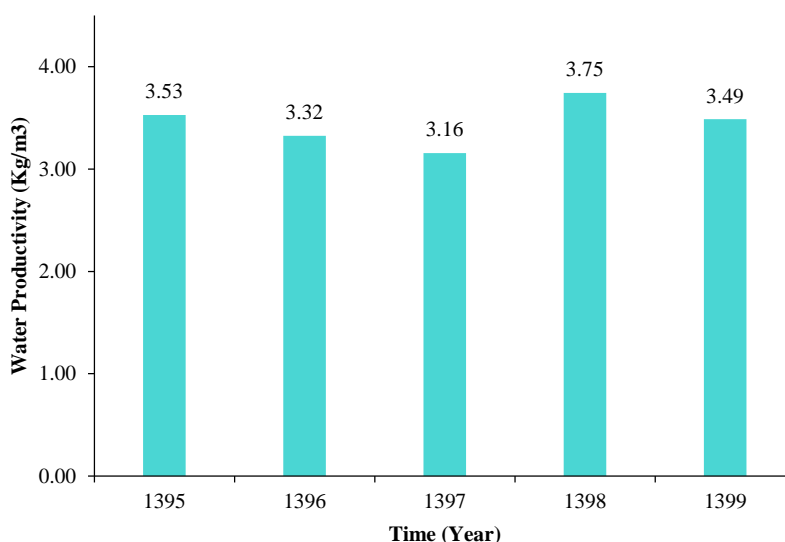
شکل ۱۳. مقایسه نتایج مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شوری خاک در دوره صحت‌سنجی

جدول ۱۰. مقادیر شاخص‌های ارزیابی مدل در دوره واسنجی و صحت‌سنجی برای شبیه‌سازی شوری خاک

صحت‌سنجی			واسنجی			شاخص مقدار
MAPE	MBE (میلی‌متر)	MAE (میلی‌متر)	MAPE	MBE (میلی‌متر)	MAE (میلی‌متر)	
۱/۹۴	-۰/۰۴	۰/۰۴	۳/۶۵	-۰/۰۴	۰/۰۹	

بهره‌وری آب

نتایج بهره‌وری آب که در شکل ۱۴ آورده شده، نشان می‌دهد که بیشترین بهره‌وری در سال ۱۳۹۸ به میزان ۳/۷۳۴ کیلوگرم بر مترمکعب و کمترین میزان آن در سال ۱۳۹۷ به میزان ۲/۸۲۲ کیلوگرم بر مترمکعب می‌باشد. به نظر می‌رسد به دلیل سیل سال ۱۳۹۸ که باعث بهبود شوری آب رودخانه کارون که منبع آب آبیاری مزارع می‌باشد و همچنین آب‌شویی مزارع و کاهش شوری خاک در پی این سیل، بهره‌وری در این سال بیشترین میزان بوده است. همچنین به دلیل خشکسالی سال ۱۳۹۷، بهره‌وری در این سال کمترین میزان بوده است.



شکل ۱۴. نتایج محاسبه بهره‌وری آب

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این تحقیق مدل‌سازی کشت گیاه نیشکر با دیدگاه پیوند آب - محیط‌زیست - غذا در شرکت کشت و صنعت حکیم فارابی خوزستان انجام گرفت. برای این منظور از رویکرد پویایی سیستم استفاده شد و در محیط نرم‌افزار Vensim مدل‌سازی صورت گرفت. نتایج آنالیز حساسیت نشان داد که مدل به پارامترهای رطوبت خاک در نقطه ظرفیت زراعی، نقطه پژمردگی دائم و تخلخل بیشترین حساسیت و به پارامترهای هدایت هیدرولیکی بالای لوله زهکش و عمق توسعه ریشه کمترین حساسیت را دارد. برآورد میزان شاخص ضریب حساسیت به شوری و کم آبیاری (Ks) نشان داد بیشترین و کمترین مقدار این شاخص در سال‌هایی به دست آمد که بیش‌ترین و کم‌ترین میزان نیشکر برداشت شده بود که دقت مدل را در شبیه‌سازی نشان می‌دهد. همچنین نتایج مدل که با استفاده از شاخص‌های MAE، MBE و MAPE مورد ارزیابی قرار گرفتند، نشان داد که مدل در شبیه‌سازی بخش‌های مختلف پیوند آب-محیط‌زیست - غذا در کشت گیاه نیشکر که شامل بخش‌های عملکرد محصول، حجم و شوری زهاب و شوری خاک است از دقت بالایی برخوردار است. به‌طور کلی نتایج نشان داد که روش پویایی سیستم توانایی بالایی در مدل‌سازی رویکردهای مختلف پیوند از جمله پیوند آب-محیط‌زیست - غذا دارد.

از آن‌جا که گیاه نیشکر مصرف آب بالایی دارد و عمده این نیاز آبی در فصل تابستان می‌باشد، پیشنهاد می‌گردد بر روی جایگزینی محصولات دیگر با گیاه نیشکر با بعد اقتصادی و امنیت غذایی کشور تحقیقاتی صورت گیرد. همچنین پیشنهاد می‌گردد در آینده بخش‌های دیگری مانند مسائل اجتماعی، مصرف زمین و اقلیم به اجزای پیوند افزوده گردد و کشت نیشکر در منطقه با این دیدگاه‌ها نیز مورد ارزیابی قرار گیرد.



"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

منابع

- پرچی عراقی، فرزین؛ سمیع‌پور فاطمه و صادقی لاری، عدنان (۱۳۹۹). کاربرد مدل SWAP برای مدل‌سازی یک سامانه زراعی با زهکشی زیرزمینی کنترل شده در یک مزرعه نیشکر. *پژوهش آب در کشاورزی*. ۳۴(۱): ۵۲-۶۵.
- تقی‌زاده، زهرا؛ وردی‌نژاد، وحید رضا؛ ابراهیمیان، حامد. و خان‌محمدی، ندا (۱۳۹۱). ارزیابی مزرعه‌ای و تحلیل سیستم آبیاری سطحی با WinSRFR (مطالعه موردی آبیاری جویچه‌ای). *نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)*، ۲۶(۶): ۱۴۵۰-۱۴۵۹.
- جعفری، جواد؛ ناظمی، امیر حسین؛ صدرالدینی، سید علی اشرف. و نوذری، حامد (۱۳۹۹). شبیه‌سازی کیفیت و کمیت زه‌آب خروجی زهکش‌های زیرزمینی با استفاده از روش تحلیل پویایی سیستم. *مجله پژوهش آب ایران*. ۳۷: ۱-۹.
- جوادی، علی؛ مشعل، محمود. و ابراهیمیان، حامد (۱۳۹۳). ارزیابی عملکرد و حساسیت معادلات نفوذ نسبت به شرایط اولیه و مرزی مختلف در آبیاری جویچه‌ای. *پژوهش آب در کشاورزی*. ۲۸(۴): ۷۸۷-۷۹۹.
- نوذری، حامد؛ حیدری، مجید. و آزادی، سعید (۱۳۹۲). شبیه‌سازی عملکرد محصولات زراعی در مدیریت‌های مختلف آبیاری با روش تحلیل پویایی سیستم. *پژوهش آب در کشاورزی*. ۲۷(۴): ۵۶۵-۵۷۵.
- نوذری، حامد؛ لیاقت، عبدالمجید. و خیاط‌خلقی، مجید (۱۳۸۸). شبیه‌سازی حرکت آب و نم‌ها در سامانه زهکشی زیرزمینی با استفاده از روش تحلیل پویایی سیستم. *مجله آبیاری و زهکشی ایران*. ۲(۳): ۲۸-۳۹.

REFERENCES

- Allam, M., & Eltahir, E. (2019). Water-Energy-Food Nexus Sustainability in the Upper Blue Nile (UBN) Basin. *Frontiers in Environmental Science*. 7(5), 1-12.
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. 1998. FAO Irrigation and drainage paper No. 56. *Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations*, 56(97), e156.
- Bazilian, M., Rogner, H., Howells, M., Hermann, S., Arent, D., Gielen, D. & Yumkella, K. K. (2011). Considering the energy, water and food nexus: Towards an integrated modelling approach. *Energy policy*, 39(12), 7896-7906.
- Biggs, E. M., Bruce, E., Boruff, B., Duncan, J. M., Horsley, J., Pauli, N. & Haworth, B. (2015). Sustainable development and the water-energy-food nexus: A perspective on livelihoods. *Environmental Science & Policy*, 54, 389-397.
- Campana, P. E., Lastanao, P., Zainali, S., Zhang, J., Landelius, T., & Melton, F. (2022). Towards an operational irrigation management system for Sweden with a water-food-energy nexus perspective. *Agricultural Water Management*, 271, 107734.
- Chang, Y., Li, G., Yao, Y., Zhang, L., & Yu, C. (2016). Quantifying the water-energy-food nexus: current status and trends. *Energies*, 9(2), 65.
- De Vito, R., Portoghese, I., Pagano, A., Fratino, U., & Vurro, M. (2017). An index-based approach for the sustainability assessment of irrigation practice based on the water-energy-food nexus framework. *Advances in water resources*, 110, 423-436.
- Dorenbos, J., & Kassam, AH. (1979). Yield Response to Water, Irrigation & Drainage paper No. 33. FAO, Rome.
- Endo, A., Tsurita, I., Burnett, K., & Orenco, P. M. (2017). A review of the current state of research on the water, energy, and food nexus. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 11, 20-30.
- Hailemariam, W. G., Silalertruksa, T., Gheewala, S. H., & Jakrawatana, N. (2019). Water-energy-food nexus of sugarcane production in Ethiopia. *Environmental Engineering Science*, 36(7), 798-807.
- Hamdy, A., Driouech, N., & Hmid, A. 2014. The water-energy-food security nexus in the mediterranean: challenges and opportunities. Paper presented at the 5th International scientific agricultural symposium, Jahorina, Bosnia and Herzegovina.
- Hoff, H. (2011). Understanding the nexus. Background paper for the Bonn 2011 Conference: The water, energy and food security nexus. Stockholm Environment Institute, Stockholm, Sweden.
- Jafari, J., Nazemi, A. H., Sadraddini, A. A., & Nozari, H. (2020). Simulation of quality and quantity of outflow from subsurface drains, using system dynamics. *Iranian Water Research Journal*, 14(37): 1-9. (In Persian)
- Javadi, A., Mashal, M., & Ebrahimian, H. (2015). Performance and Sensitivity Analysis of Infiltration Equations under Different Initial and Boundary Conditions in Furrow Irrigation. *Water Research in*

- Agriculture*, 28(4): 787-799. (In Persian)
- Kitani, O. (1999). CIGR Handbook of Agricultural Engineering. Vol, V, Energy and Biomass Engineering. ASAE publication, ST Joseph, MI.
- Li, Y.H., & Dong, B. (1998). Real-Time irrigation scheduling model for cotton. *Water and the environment: Innovative Issues in irrigation and drainage*, 197-204.
- Lu, P., Yang, Y., Luo, W., Zhang, Y., & Jia, Z. (2023). Numerical Simulation of Soil Water-Salt Dynamics and Agricultural Production in Reclaiming Coastal Areas Using Subsurface Pipe Drainage. *Agronomy*, 13(2), 588.
- Niva, V., Cai, J., Taka, M., Kummur, M., & Varis, O. (2020). China's sustainable water-energy-food nexus by 2030: Impacts of urbanization on sectoral water demand. *Journal of Cleaner Production*, 251, 119755.
- Nozari, H., & Azadi, S. (2021). System dynamics simulation of crop yield under different irrigation water quality and quantity. *Water Practice & Technology*, 16(1), 196-209. (In Persian)
- Nozari, H., Heydari, M., & Azadi, S. (2014). Performance and Profitability Simulation of Crops under Different Managements of Irrigation Water Using System Dynamics Approach. *Water Research in Agriculture*, 27(4): 565-576. (In Persian)
- Nozary, H., Liaghat, M., & Khayat Kholghi, M. (2009). Simulation of water and salt inflow in subsurface Drainage Systems, using system dynamics. *Iranian Journal of Irrigation and drainage*, 2(3): 28-39. (In Persian)
- Parchami-Araghi, F., Samipour, F., & Sadeghi, A. (2020). Application of SWAP Model for Modelling a Sugarcane Farming System with Controlled Subsurface Drainage. *Water Research in Agriculture*, 34(1), 51-64. (In Persian)
- Psomas, A., Dagalaki, V., Panagopoulos, Y., Konsta, D., & Mimikou, M. (2016). Sustainable agricultural water management in Pinios River basin using remote sensing and hydrologic modeling. *Procedia engineering*, 162, 277-283.
- Rahmani, M., Jahromi, S. H. M., & Darvishi, H. H. (2023). SD-DSS model of sustainable groundwater resources management using the water-food-energy security Nexus in Alborz Province. *Ain Shams Engineering Journal*, 14(1), 101812.
- Ritzema, H. P. (2006). *Drainage principles and applications* (No. 16). ILRI, Wageningen, Netherlands.
- Sadeghi, S. H., Moghadam, E. S., Delavar, M., & Zarghami, M. (2020). Application of water-energy-food nexus approach for designating optimal agricultural management pattern at a watershed scale. *Agricultural Water Management*, 233, 106071.
- Silalertruksa, T., & Gheewala, S. H. (2018). Land-water-energy nexus of sugarcane production in Thailand. *Journal of cleaner production*, 182, 521-528.
- Smidt, S. J., Haacker, E. M., Kendall, A. D., Deines, J. M., Pei, L., Cotterman, K. A., & Hyndman, D. W. (2016). Complex water management in modern agriculture: Trends in the water-energy-food nexus over the High Plains Aquifer. *Science of the Total Environment*, 566, 988-1001.
- Taghizadeh, Z., Verdinejad, V., Ebrahimi, H., & Khanmohammadi, N. (2013). Field Evaluation and Analysis of Surface Irrigation System with WinSRFR (Case Study Furrow Irrigation). *Water and Soil*, 26(6), 1450-1459.
- Wicaksono, A., & Kang, D. (2019). Nationwide simulation of water, energy, and food nexus: Case study in South Korea and Indonesia. *Journal of Hydro-environment Research*, 22, 70-87.
- Xu, H., Tian, Z., He, X., Wang, J., Sun, L., Fischer, G., & Kent, C. (2019). Future increases in irrigation water requirement challenge the water-food nexus in the northeast farming region of China. *Agricultural water management*, 213, 594-604.