

Evaluation of performance of simulation models in predicting water movement in two-Layer soils with emphasis on infiltration and redistribution phases

Iraj Sohrabi¹, Peyman Tahmasebi², Bakhtiar Karimi^{3✉}, and Arman Moghadamnia⁴

1. Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran. Email: e.sohrabi994@gmail.com
2. Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran. Email: p.tahmasebi@agr.basu.ac.ir
3. Corresponding author, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Kurdistan University, Kurdistan, Iran. Email: bakhtiar.karimi@uok.ac.ir
4. Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Kurdistan, Kurdistan, Iran. Email: arman.moghadamnia@gmail.com

Article Info.

Article type:
Research Article

Article history:

Received 18 April 2025
Received in revised form 05
July 2025
Accepted 01 October 2025
Available online 22 June 2026

Keywords:

distribution Phase,
drip irrigation,
simulation.
soil profile,
wetted width.

ABSTRACT

Objective: This study develops and evaluates models to simulate moisture distribution in two-layer soils under surface drip irrigation to improve optimal irrigation system design.

Method: A transparent physical model made of plexiglass was used to conduct the experiments. Six two-layer soil profiles were tested: L1 (medium-heavy), L2 (medium-light), L3 (heavy-medium), L4 (heavy-light), L5 (light-medium), and L6 (light-heavy). Nonlinear regression models were developed considering the hydraulic properties of the soil and the operational characteristics of the emitters to simulate moisture movement in both horizontal and vertical directions.

Results: A comparison of statistical parameters between measured and simulated data showed that the proposed models performed with high accuracy in simulating the initial moisture distribution phase, with correlation coefficients of 0.85 and 0.88 for the horizontal and vertical directions, respectively. However, during the redistribution phase, particularly in the horizontal direction, model accuracy declined slightly (correlation coefficients of 0.52 and 0.79). The root-mean-square error (RMSE) for predicting moisture distribution was 5.93 cm (horizontal) and 4.66 cm (vertical), and for redistribution was estimated at 8.87 cm and 8.03 cm, respectively. Additionally, the models showed a tendency to overestimate values in the horizontal direction and underestimate them in the vertical direction.

Conclusions: The proposed models demonstrated acceptable accuracy in simulating moisture distribution patterns in two-layer soils under drip irrigation. However, reduced accuracy during the redistribution phase—particularly in the horizontal direction—and the observed tendencies toward overestimation and underestimation indicate the presence of systematic errors in the modeling approach. Identifying and correcting these errors can significantly enhance the predictive capability of the models.

Cite this article: Sohrabi, I., Tahmasebi, P., Karimi, B., & Moghadamnia, A. (2026). Evaluation of Performance of Simulation Models in Predicting Water Movement in Two-Layer Soils with Emphasis on Infiltration and Redistribution Phases. *Advanced Technologies in Water Efficiency*, 6(2), 24-43. <https://doi.org/10.22126/atwe.2025.12042.1163>



© The Author(s)

Publisher: Razi University.

<https://doi.org/10.22126/atwe.2025.12042.1163>

Introduction

Numerical modeling of water flow in dual-layered soils is a strategic tool for optimizing water resource management, especially in arid and semi-arid regions. This is crucial for enhancing irrigation efficiency and reducing water losses. The inherent heterogeneity of dual-layered soils, resulting from differences in texture, structure, and hydraulic properties, poses significant challenges in accurately simulating soil moisture behavior. This research aimed to evaluate the ability of various empirical models to precisely predict moisture distribution and redistribution phases in dual-layered soils under surface drip irrigation with continuous flow. The study also sought to determine the interactive effects of soil parameters and irrigation conditions on model prediction accuracy to improve irrigation system design and sustainable water management in areas with layered soils.

Method

Laboratory experiments were conducted in the summer of 2019 at the Water Sciences Research Group, Kurdistan University, to assess moisture distribution and redistribution phases under soil layering conditions. Experiments were performed on a transparent Plexiglas physical model (1m x 0.5m x 1m) to investigate the impact of soil layering and hydraulic parameters on water infiltration in drip-irrigated soils. Soil samples with different textures (medium, heavy, and light) were collected from specific locations and placed in the transparent models. Six dual-layered soil profiles were used: L1 (medium-heavy), L2 (medium-light), L3 (heavy-medium), L4 (heavy-light), L5 (light-medium), and L6 (light-heavy). A drip irrigation system was designed using standard emitters and a pump. Nonlinear regression models were developed to accurately simulate moisture distribution and redistribution in dual-layered soils under surface drip irrigation with continuous flow. The ability of these models to predict water movement in both horizontal and vertical directions in layered soils was evaluated using statistical indices (CRM, RMSE, MAE, and R^2).

Results

Calibration and validation results of the nonlinear regression models indicated their acceptable performance in simulating moisture distribution and redistribution in dual-layered soils under drip irrigation. Overall, the models demonstrated high accuracy in simulating the distribution phase (during irrigation) in both horizontal and vertical directions. The high correlation coefficients (R^2) of 0.85 and 0.88 for the horizontal and vertical directions, respectively, in the distribution phase support this claim. Additionally, the RMSE values of 5.93 cm and 6.64 cm for these directions indicated a relatively low model error in predicting the wetting front. However, in the redistribution phase (after irrigation cessation), especially in the horizontal direction, the accuracy of the models decreased slightly. The R^2 values of 0.52 and 0.79 for the horizontal and vertical directions, respectively, in the redistribution phase indicate a decrease in model accuracy. RMSE values in this phase were 8.87 cm and 0.3 cm for the horizontal and vertical directions, respectively. Furthermore, MAE values in the horizontal and vertical distribution phases were 4.8 and 3.5, and in the redistribution phase, they were 7.3 and 7 cm for horizontal and vertical directions, respectively. Therefore, the analysis of RMSE and MAE values also shows that the models had higher errors in the horizontal direction compared to the vertical direction. This indicates that

the models were less accurate in predicting the lateral spread of the wetting front. Analysis of the results shows that the models tend to overestimate values in the horizontal direction and underestimate values in the vertical direction in both the distribution and redistribution phases. This could be due to the complexity of lateral water movement processes in the soil, soil heterogeneity, limitations of the model in considering all relevant processes, and a lack of accurate data at soil depth.

Conclusions

This study aimed to enhance the efficiency of drip irrigation systems and optimize water resource management by conducting numerical modeling of moisture distribution in dual-layered soils. The results demonstrated that the developed nonlinear regression models exhibited satisfactory capability in predicting moisture distribution, particularly during the distribution phase. However, the models encountered limitations when simulating the redistribution phase, especially in the horizontal direction. Soil texture and layering had a significant impact on moisture distribution and model performance. The findings of this research can be applied to the optimal design of drip irrigation systems and the precise determination of crop water requirements. Nevertheless, further investigations are required to improve model accuracy by considering soil heterogeneity, the influence of environmental factors, and developing more complex models.

Author Contributions

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

Data Availability Statement

Data available on request from the authors.

Acknowledgements

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

Ethical Considerations

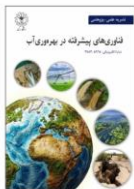
The authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.

Funding

The authors are grateful for the financial support of the Research Council of Shahid Chamran University of Ahvaz (GN: SCU.WH1403.43525).

Conflict of Interest

The authors declare no conflict of interest



بررسی عملکرد مدل‌های شبیه‌سازی در پیش‌بینی حرکت آب در خاک‌های دولایه با تأکید بر فازهای توزیع و توزیع مجدد

ایرج سهرابی^۱، پیمان طهماسبی^۲، بختیار کریمی^۳، و آرمان مقدم نیا^۴

۱. گروه آبیاری و زهکشی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران. رایانامه: e.sohrabi994@gmail.com

۲. گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران. رایانامه: p.tahmasebi@agr.basu.ac.ir

۳. نویسنده مسئول، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران. رایانامه: bakhtiar.karimi@uok.ac.ir

۴. گروه آبیاری و زهکشی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران. رایانامه: arman.moghadamnia@gmail.com

در باره مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	هدف: هدف از این پژوهش، توسعه مدل‌هایی برای شبیه‌سازی دقیق توزیع و توزیع مجدد رطوبت در خاک‌های دولایه تحت آبیاری قطره‌ای سطحی بود.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۲۹ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۴/۱۴ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۰۹ تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۴/۰۱	روش پژوهش: برای دستیابی به این هدف، آزمایش‌هایی بر روی یک مدل فیزیکی شفاف پلکسی‌گلاس و با استفاده از شش پروفیل مختلف از خاک‌های دولایه (با ترکیبات سبک تا سنگین) انجام شد و مدل‌های رگرسیون غیرخطی بر پایه ویژگی‌های هیدرولیکی خاک و قطره‌چکان توسعه یافتند.
کلیدواژه‌ها: آبیاری قطره‌ای، پروفیل خاک، شبیه‌سازی، عرض خیس‌شدگی، فاز توزیع.	یافته‌ها: یافته‌ها نشان داد که مدل‌های پیشنهادی در فاز توزیع رطوبت دقت بسیار بالایی دارند (با ضرایب همبستگی ۸۵٪ و ۸۸٪)، اما در فاز توزیع مجدد، به‌ویژه در جهت افقی، دقت آن‌ها کاهش می‌یابد. همچنین مشخص شد که مدل‌ها در جهت افقی تمایل به بیش‌برآورد و در جهت عمودی تمایل به کم‌برآورد دارند.
	نتیجه‌گیری: با اعمال اصلاحات بر روی این خطاهای سیستماتیک، می‌توان دقت پیش‌بینی مدل‌ها را برای طراحی بهینه سامانه‌های آبیاری بهبود بخشید.

استناد: سهرابی، ایرج؛ طهماسبی، پیمان؛ کریمی، بختیار؛ و مقدم نیا، آرمان. (۱۴۰۵). بررسی عملکرد مدل‌های شبیه‌سازی در پیش‌بینی حرکت آب در خاک‌های دولایه با تأکید بر فازهای توزیع و توزیع مجدد. *فناوری‌های پیشرفته در بهره‌وری آب*، ۶ (۲)، ۲۴-۳۴.

atwe.2025.12042.1163/10.22126



مقدمه

باتوجه به مصرف بیش از ۶۰ درصد آب شیرین جهان در بخش کشاورزی (شو و همکاران^۱، ۲۰۲۴) و باتوجه به نیاز به پایداری منابع آب و خاک، لازم است تا روش‌های تولید در حوضه کشاورزی بهینه‌سازی شده و با مصرف کم‌تر آب، تولید مواد غذایی پایدار حاصل شود (اسکاگز و همکاران^۲، ۲۰۰۴؛ جامعی و همکاران^۳، ۲۰۲۲). در مناطق خشک، در راستای توسعه اقتصادی و اجتماعی، استفاده از سامانه‌های نوین آبیاری، با امکان افزایش راندمان مصرف آب، ضروری است (کریمی و همکاران^۴، ۲۰۱۳). در سامانه آبیاری قطره‌ای به دلیل مرطوب شدن محدوده توسعه ریشه گیاه، راندمان این سامانه بالا است بنابراین این سامانه مناسب بسیاری از مناطق کم‌آب جهان است. برای اطمینان از مرطوب شدن محدوده توسعه ریشه گیاه توسط قطره‌چکان‌ها، واجب است الگوی خیس‌شدگی (پياز رطوبتی) محدوده مورد نظر خاک تعیین گردد (کریمی و همکاران، ۱۳۹۴). برآورد الگوی توزیع رطوبت، از شاخص‌های حائز اهمیت در طراحی سامانه آبیاری قطره‌ای است که متناسب با آن فاصله بین قطره‌چکان‌ها و لوله‌های فرعی (لاترال‌ها) تعیین می‌شود تا از هدررفت آب به صورت رواناب سطحی و نفوذ عمقی جلوگیری کند (کیلچ^۵، ۲۰۲۰؛ صولت و همکاران^۶، ۲۰۲۱). از عوامل مهم و تاثیرگذار در تعیین ابعاد خیس شده پياز رطوبتی عبارتند از: آبدی قطره‌چکان‌ها، حالت آبیاری (پیوسته و پالسی)، خصوصیات فیزیکی خاک (هدایت هیدرولیکی، چگالی ظاهری، رطوبت اولیه خاک)، شیب زمین، عمق نصب قطره‌چکان‌ها (سطحی یا زیر سطحی) و وضعیت لایه بندی خاک.

ادبیات موضوع و پیشینه پژوهش

مطالعات زیادی در زمینه مدل‌سازی الگوی خیس‌شدگی پياز رطوبتی به انجام رسیده است که به صورت مختصر در سه طبقه-بندی ارائه می‌گردد. مدل‌های رایج در زمینه مدل‌سازی الگوی پياز رطوبتی شامل مدل‌های تجربی، تحلیلی و عددی است.

۱. مطالعات داخل کشور

کریمی و کریمی (۱۳۹۹) الگوی جبهه پیشروی رطوبت خاک در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی با جریان پالسی و پیوسته را برای دبی‌ها و خاک‌های مختلف مورد بررسی قرار دادند. نتایج آنان نشان داد که در سامانه آبیاری قطره‌ای زیر سطحی با جریان پالسی متناسب با زیاد شدن زمان استراحت در چرخه، جبهه رطوبتی پهن‌تر و حرکت افقی آن بیش‌تر بود، بنابراین باتوجه به آن می‌توان قطره‌چکان‌ها را در فاصله‌ی دورتر از هم قرار داد. نوروزیان و همکاران (۱۳۹۵) در پژوهشی با انجام آزمایشات مزرعه‌ای تاثیر لایه‌ای بودن خاک و شیب‌دار بودن اراضی را بر الگوی توزیع رطوبت خاک در سامانه آبیاری قطره‌ای با کاربرد زیرسطحی بررسی کردند. آنان برای شبیه‌سازی از نرم‌افزار هایدروس دو بعدی (HYDRUS-2D)، استفاده نمودند. نتایج نشان داد که نیمرخ رطوبتی به وجود آمده در اراضی شیب‌دار با نیمرخ به وجود آمده در خاک‌های مسطح با زیاد شدن مدت زمان آبیاری، مطابقت بیش‌تری داشت. همچنین نتایج حاصل از شبیه‌سازی با نرم‌افزار هایدروس قابلیت خوب این برنامه را نشان داد.

۲. مطالعات خارج از کشور

کریمی و همکاران^۷ (۲۰۲۲) به مدل‌سازی الگوی خیس‌شدگی در زمان توزیع مجدد تحت سامانه آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی با کاربرد پالسی پرداختند و نتایج تحقیق نشان داد که مدل‌های تجربی (با در نظر گرفتن فاکتورهای مهم طراحی) عملکرد

¹ Shu et al² Skaggs et al³ Jamei et al⁴ Karimi et al⁵ Kilic⁶ Solat et al

مناسبی در زمینه مدل سازی دارند. کریستول مونز و همکاران^۱ (۲۰۲۲) یک مدل تجربی برای تخمین عرض و عمق جبهه مرطوب در آبیاری قطره ای سطحی، بر اساس آزمایش های تجربی در ظرف مکعبی شکل با دیواره های شفاف در خاک هایی با بافت لومی رسی شنی، ارائه دادند. نتایج نشان دهنده این بود که مدل تولید شده کارآمد و ساده بوده و می تواند ابزار بسیار مفیدی برای طراحی و بهره برداری از سامانه های آبیاری قطره ای سطحی در خاک هایی با شرایط مشابه با این مطالعه باشد. آشر و همکاران^۲ (۲۰۲۲) طی پژوهشی به آزمایش یک مدل بسیار ساده بر اساس فرمول هندسی یک کره و مقایسه آن با حل های عددی دقیق و آزمایش های میدانی، جهت الگوی خیس شدن خاک در این سامانه، پرداختند. داده های تولید شده توسط این شبیه سازی با موفقیت با مدل های تحلیلی و نتایج عددی لوم رسی پانوش مقایسه شد. نتایج نشان دادن که نفوذ از یک منبع قطره ای چکه ای می تواند با تقارن شعاعی کروی ساده علاوه بر شبیه سازی های تحلیلی یا عددی توصیف شود. صولت و همکاران^۳ (۲۰۲۱) به ارزیابی الگوی جبهه پیشروی رطوبت در آبیاری قطره ای زیر سطحی با جریان پیوسته و پالسی پرداختند. نتایج بیان داشت که در سامانه آبیاری قطره ای زیر سطحی با جریان پالسی با افزایش زمان استراحت در هر چرخه، پیاز رطوبتی گسترده تر شده و جبهه پیشروی رطوبت به طور افقی بیش تر حرکت می کند. همچنین، مشخص شد که در سامانه آبیاری قطره ای با کاربردهای پیوسته و پالسی، با حجم آب مساوی، توزیع افقی جبهه پیشروی رطوبت در دبی های کم نسبت به دبی های زیاد بیش تر است. بیش ترین عمق خیس شدگی در خاک با بافت سبک مربوط به دبی های بالا و در خاک با بافت سنگین مربوط به دبی های پایین مشاهده شد. صولت و همکاران^۳ (۲۰۲۱) به بررسی و مدل سازی الگوی خیس شدگی در اراضی شیب دار پرداختند. در این تحقیق مدل های تجربی و مدل های عددی مورد ارزیابی قرار گرفتند و نتایج تحقیق نشان داد که هر دو مدل عملکرد قابل قبولی در تخمین الگوی خیس شدگی دارند. همچنین عملکرد مدل تجربی در مقایسه با مدل عددی هایدروس به نسبت بهتر بود. بن-کیسی و همکاران^۴ (۲۰۲۱) برای ارزیابی فرآیند توزیع مجدد رطوبت در سامانه های آبیاری قطره ای پیوسته و پالسی، در دو حالت جریان سطحی و زیر سطحی، آزمایش هایی با بهره گیری از یک روش نوین یادگیری ماشین انجام گرفت. در این مطالعه، مدل سازی توزیع مجدد جبهه رطوبتی بر اساس پارامترهای مربوط به خاک و سامانه آبیاری، به عنوان ورودی های مدل، مورد بررسی قرار گرفت. هدف اصلی، تحلیل رفتار جبهه رطوبتی تحت شرایط مختلف آبیاری (پیوسته و پالسی) در سامانه های سطحی و زیر سطحی به منظور بهبود دقت پیش بینی و مدیریت بهینه منابع آب بود. نتایج روش ارزیابی شده و با نتایج شبکه های عصبی رگرسیون تعمیم یافته و خطوط رگرسیون تطبیقی چند متغیره، مقایسه شد. یافته ها نشان داد که روش نوین به کار رفته، (یادگیری ماشین) دقت بالاتری در تخمین ابعاد جبهه مرطوب دارد و به عنوان یک ابزار کارآمد در مدل سازی سامانه های آبیاری قطره ای قابل توصیه است. با توجه به مطالب گفته شده در بالا مشخص می گردد. شیر و همکاران^۴ (۲۰۲۰) در تحقیقی به مدل سازی پیاز رطوبتی تحت سامانه آبیاری پیوسته و پالسی پرداختند و نتایج این تحقیق نشان داد که مدل های شبکه عصبی مصنوعی با در نظر گرفتن سناریوهای مختلف تخمین دقیقی از ابعاد خیس شده پیاز رطوبتی دارند. مطالعات متعددی که در زمینه مدل سازی پیاز رطوبتی به انجام رسیده است، جمع بندی کلی تحقیقات صورت گرفته نشان می دهد مدل های تجربی عملکرد مناسبی در زمینه مدل سازی پیاز رطوبتی دارند و همچنین کاربرد این مدل ها برای اهداف طراحی (در مقایسه با سایر مدل های موجود) بسیار آسان تر می باشند. همچنین از مطالعات صورت گرفته مشخص می گردد که تحقیقات بسیار اندکی در زمینه خاک های لایه ای به انجام رسیده است. از آنجائی که خاک های زراعی در اثر فعالیت های کشاورزی نظیر

^۱ Cristóbal-Muñoz et al^۲ Asher et al^۳ Ben-Kisi et al^۴ Shiri et al

خاک‌ورزی، افزودن خاک، فعالیت ریزجانداران و فعالیت ریشه گیاهان به دولایه با چگالی‌های مختلف تبدیل می‌گردند، به‌نحوی که لایه بالایی دارای بافت با خصوصیات فیزیکی متفاوت، در مقایسه با لایه پائینی است. بدین جهت مطالعه الگوی خیس شدن خاک توسط قطره‌چکان‌ها در خاک‌های دولایه می‌تواند موجب افزایش دقت تعیین ابعاد پیاز رطوبتی و بهبود عملکرد سامانه‌های آبیاری قطره‌ای گردد (جامعی و همکاران، ۲۰۲۲a).

باتوجه به اهمیت مدیریت بهینه آب در کشاورزی و وجود خاک‌های دولایه در بسیاری از مناطق، این پژوهش باهدف شبیه‌سازی حرکت رطوبت در این نوع خاک‌ها تحت آبیاری قطره‌ای سطحی با جریان پیوسته انجام شد. برای این منظور، از مدل‌های رگرسیونی غیرخطی و داده‌های حاصل از آزمایش‌های آزمایشگاهی استفاده شد.

روش پژوهش

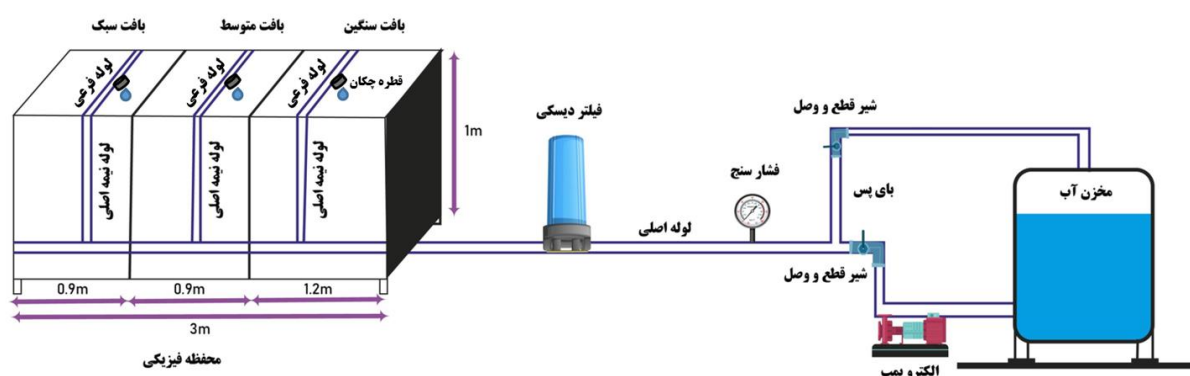
۱. مشاهدات آزمایشگاهی

به‌منظور ارزیابی توزیع و توزیع مجدد رطوبت و بررسی اثر لایه‌ای بودن خاک‌ها بر جبهه پیشروی رطوبتی آب در خاک در سامانه آبیاری قطره‌ای، پژوهشی، در تابستان سال ۱۳۹۸ در آزمایشگاه علوم تحقیقاتی گروه علوم و مهندسی آب دانشگاه کردستان اجرا گردید. بدین منظور یک مدل فیزیکی متشکل از شیشه شفاف به شکل مکعب مستطیل با طول ۳ متر، عرض ۰/۵ متر و ارتفاع ۱ متر باهدف شبیه‌سازی پیاز رطوبتی آبیاری قطره‌ای سطحی در مزرعه ساخته شد (شکل ۱). طراحی و ساخت مدل آزمایشگاهی به‌گونه‌ای بود که هر قسمت آن مربوط به یک نوع بافت خاک بود. بنا به این دلیل که توزیع افقی جبهه پیشروی آب در خاک‌های سنگین بافت بیش‌تر است، در نتیجه محفظه با بیش‌ترین طول (۱/۲ متر) به خاک سنگین بافت اختصاص داده شد و برای خاک‌های با بافت متوسط و سبک هر کدام محفظه با طول ۰/۹ متر در نظر گرفته شد (کریمی و صولت، ۱۳۹۹). محفظه مدل شفاف است که به سه قسمت مجزای تفکیک‌شده بود تا امکان انجام هم‌زمان سه آزمایش برای هر سه بافت خاک فراهم باشد. همچنین با آغشته کردن دیوار داخلی مدل به چسب شفاف و پراکندن شن استاندارد زبر بر روی آن یک دیواره زبر ایجاد گردید تا بدین سبب از پیداشدن و ایجاد جریان‌های ترجیحی^۱ در زمان انجام آزمایش‌ها جلوگیری گردد. هدف از شفاف‌بودن محفظه جلویی برای دیدن فازهای پیشروی رطوبتی آب در خاک بود. این مطالعه و آزمایش‌ها به‌گونه‌ای برنامه‌ریزی و طراحی شد که تا حدود بسیار زیادی بتواند شرایط واقعی یک سامانه آبیاری قطره‌ای در مزارع را شبیه‌سازی کند. از این‌رو آب به‌وسیله یک پمپ افقی خشک (SQB-60, Stream, China) و از طریق لوله‌های پلی‌اتیلن (لوله اصلی با قطر ۳۲ میلی‌متر و همچنین لوله نیمه‌اصلی و فرعی به ترتیب با قطرهای ۲۰ و ۱۶ میلی‌متر) از یک مخزن پلاستیکی به حجم ۲۰۰ لیتری به قطره‌چکان‌ها منتقل گردید. همچنین به‌منظور ثابت نگه‌داشتن آب در مخزن یک شناور داخل آن تعبیه شد. به‌منظور جلوگیری از گرفتگی قطره‌چکان‌ها و عدم یکنواختی پخش، یک فیلتر دیسکی بعد از پمپ قرار داده شد. به‌منظور هدایت درست جریان آب در مسیر انتقال از یک شیرفلکه و یک شیر قطع و وصل جریان آب برای کنترل جریان آب به داخل هر محفظه استفاده گردید. به‌منظور ثابت نگه‌داشتن فشار به جهت ایجاد یکنواختی پخش آب یک فشارسنج قبل از فیلتر دیسکی روی سامانه تعبیه شد. همه آزمایش‌ها در فشار ثابت ۲۰ متر صورت گرفت و چون میزان دبی خروجی بسیار کمبود، جهت کاهش فشار وارد شده به سامانه از یک لوله کنارگذر استفاده شد. در این پژوهش، سه دبی اولیه قطره‌چکان شامل ۲، ۴ و ۶ لیتر در ساعت انتخاب گردید. دبی‌های ۲ و ۴ لیتر در ساعت به‌عنوان مقادیر رایج در سامانه آبیاری قطره‌ای در نظر گرفته شدند و دبی ۶ لیتر در ساعت از طریق قرار دادن دو قطره‌چکان (با دبی‌های ۲ و ۴ لیتر در ساعت) به‌صورت هم‌زمان و در کنار یکدیگر تأمین شد. با این‌حال، نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌های میدانی نشان داد که دبی واقعی قطره‌چکان با برچسب ۲ لیتر در ساعت، برابر با ۲/۴ لیتر در ساعت است. بر این اساس، دبی‌های نهایی مورد استفاده در آزمایش شامل ۲/۴، ۴ و

^۱ Preferential Flows

۶/۴ لیتر در ساعت بودند. این دبی ها به عنوان تیمارهای اصلی در سامانه آبیاری قطره ای تحت جریان پیوسته سطحی در سه نوع بافت خاک (سبک، متوسط و سنگین) به کار گرفته شدند.

خصوصیات فیزیکی خاک مورد استفاده در آزمایش ها در جدول (۱) ارائه شده است. توضیح این که در مورد انتخاب بافت خاک و نوع قطره چکان سعی شد که با انتخاب سه بافت خاک (سبک، متوسط و سنگین) بتوان تا حد زیادی نتایج مطالعه را به همه بافت ها تا حد امکان ربط داد، در خصوص انتخاب نوع قطره چکان باتوجه به این که قطره چکان هایی که کشاورزان در منطقه مورد استفاده قرار می دهند، قطره چکان های تنظیم شونده (نتافیم) است، در این مطالعه از این نوع قطره چکان مورد استفاده قرار گرفت. به منظور ارزیابی ضریب یکنواختی توزیع (CU) و ضریب تغییرات ساخت (CV) قطره چکان های موجود در سامانه آبیاری قطره ای مذکور، ابتدا تعدادی از این قطره چکان ها را به طور تصادفی انتخاب کرده و در شرایط آزمایشگاهی با فشار ثابت نصب شد. سپس، حجم آب خروجی هر قطره چکان را در بازه زمانی مشخص اندازه گیری کرده و با محاسبه دبی متوسط ($\bar{Q}$) و انحراف معیار (σ) دبی ها، ضریب تغییرات ساخت از رابطه $CV = (\sigma / \bar{Q}) \times 100$ محاسبه گردید. در نهایت، ضریب یکنواختی توزیع با استفاده از رابطه $CU = (1 - CV) \times 100$ محاسبه شد. جدول (۲) مشخصات فنی و هیدرولیکی قطره چکان مورد مطالعه را نشان می دهد.



شکل ۱. مدل آزمایشگاهی و تجهیزات به کاررفته

جدول ۱. مشخصات فیزیکی خاک مورد استفاده

نمونه خاک	درصد رس	درصد سیلت	درصد شن	بافت خاک	هدایت هیدرولیکی اشباع ($cm\ h^{-1}$)	چگالی ظاهری ($g\ cm^{-3}$)
سنگین	۵۰	۳۴/۴	۱۵/۶	شن - رس	۰/۵۴۶	۱/۳۵
متوسط	۱۴/۳	۲۵/۷	۶۰	شن - رس - لوم	۱/۳۹۰	۱/۴۵
سبک	۱۱/۲	۹/۶	۷۹/۲	شن - لوم	۳/۰۳۲	۱/۵۵

جدول ۲. مشخصات فنی و هیدرولیکی قطره چکان مورد استفاده

پارامتر	دبی ۲ (لیتر در ساعت)	دبی ۴ (لیتر در ساعت)
ضریب یکنواختی توزیع (درصد)	۹۸	۹۹
درصد ضریب تغییرات ساخت قطره چکان	۰/۰۳۲	۰/۰۱۷

۲. نحوه انجام آزمایش ها

نحوه انجام آزمایش ها بدین صورت بود که ابتدا برای تهیه خاک های مورد نظر به منظور انجام آزمایش ها دو نوع خاک با بافت های متفاوت تهیه گردید و به منظور خشک کردن، در هوای آزاد و در معرض نور خورشید قرار داده شد سپس برای فراهم آوردن

سه نوع بافت خاک متفاوت خاک‌های تهیه شده برای ایجاد بافت‌های مختلف خاک، درصد‌های معینی از ماسه‌بادی با سایر اجزا ترکیب گردید. این ترکیب‌ها بر اساس نسبت‌های رایج برای خاک‌های شنی، لومی و رسی تنظیم گردید. به طور دقیق، خاک سبک (شن-رسی) با نسبت ماسه‌بادی تقریباً سه برابر رس، خاک متوسط (شن-لومی) با نسبت ماسه‌بادی حدود دو برابر رس، و خاک سنگین (رسی) با نسبت ماسه‌بادی کم‌تر از یک سوم رس تهیه شدند. جهت دستیابی به یک توزیع تراکمی یکنواخت و برابر با تراکم طبیعی خاک (۱/۳ گرم در سانتی‌متر مکعب)، خاک آماده شده در مدل موردنظر، به‌صورت لایه‌های متوالی، لایه زیرین با ضخامت ۸۰ و لایه بالایی با ضخامت ۲۰ سانتی‌متری در مدل قرار گرفت. این روش، باتوجه‌به تأثیر مستقیم تراکم بر حرکت آب در خاک و شکل‌گیری پیاز رطوبتی، برای شبیه‌سازی دقیق‌تر شرایط میدانی در آزمایش انتخاب شد. پس از اتمام هر آزمایش خاک داخل هر محفظه بیرون آورده شد و آن را جهت خشک کردن مثل حالت اول در معرض نور خورشید و هوای آزاد قرار داده تا برای آزمایش بعدی مهیا گردد. در نهایت پس از حصول اطمینان از خشک‌شدن کامل نمونه‌های خاک، مجدداً به‌صورت لایه‌های مجزا با رعایت تراکم مشابه شرایط پیشین، به محفظه‌های مربوطه منتقل گردید. در این آزمایش قطره‌چکان‌ها در روی سطح سه نوع بافت خاک در ۶ نیم‌رخ خاک دولایه قرار داده شدند در جدول (۳) نیم‌رخ‌های لایه‌بندی خاک ارائه شده است. مدت‌زمان آبیاری در همه تیمارها شش ساعت بود. همچنین مطابق شکل (۲) با مدرج نمودن مدل فیزیکی آزمایشگاهی و ترسیم جبهه پیشروی رطوبتی بر روی صفحه شفاف پلکسی‌گلاس^۱ (در این آزمایش، پلکسی‌گلاس که از یک ماده ترموپلاستیک شفاف و سخت است به‌عنوان واسطه بصری در مدل فیزیکی استفاده گردید تا امکان رصد و ثبت تغییرات جبهه پیشروی رطوبت در محیط خاک فراهم آید)، توزیع و توزیع مجدد جبهه پیشروی رطوبتی در دو راستای عمودی و افقی در زمان‌های مختلف آبیاری مورد بررسی قرار گرفت. در پایان هر آزمایش از جبهه پیشروی رطوبتی آب عکس‌هایی تنظیم می‌گردید که با استفاده از نرم‌افزار گرافر^۲ مختصات همه نقاط جبهه پیشروی رطوبتی برآورد می‌گردید و سپس با داشتن مختصات همه نقاط و استفاده از نرم‌افزار اکسل جبهه پیشروی پیاز رطوبتی در فاز توزیع و توزیع مجدد در زمان‌های مختلف برای آبیاری قطره‌ای با جریان پیوسته سطحی انجام شده محاسبه گردید.

جدول ۳. نیم‌رخ لایه‌بندی خاک

تیمار	L_1	L_2	L_3	L_4	L_5	L_6
لایه بالایی (بافت)	متوسط	متوسط	سنگین	سنگین	سبک	سبک
لایه زیرین (بافت)	سنگین	سبک	متوسط	سبک	متوسط	سنگین



شکل ۲. نمایی از ترسیم جبهه پیشروی رطوبتی آب در خاک

^۱ Plexiglass

^۲ Grapher

۳. الگوی رگرسیون غیر خطی

به منظور شبیه سازی و استفاده از داده های حاصل از نرم افزار گرافر جهت پیش بینی جبهه پیشروی رطوبت آب در زمان آبیاری، در سامانه آبیاری قطره ای سطحی با کاربرد آبیاری پیوسته در گام توزیع، مدل های تجربی جهت تخمین ابعاد پیاز رطوبتی ارائه گردید. همچنین عوامل تاثیرگذار در این مدل ها وابسته به خصوصیات فیزیکی خاک و خصوصیات فنی و هیدرولیکی قطره چکان است. فرم معادلات ارائه شده به صورت روابط (۱) و (۲) ارائه می گردد (ویسمن^۱، ۲۰۰۳).

$$D_h = c_1 \cdot t^{c_2} \cdot Q^{c_3} \cdot \left(\frac{K_{s1}}{K_{s2}}\right)^{c_4} \cdot \left(\frac{\rho_{b1}}{\rho_{b2}}\right)^{c_5} \cdot \left(\frac{\theta_{01}}{\theta_{02}}\right)^{c_6} \cdot \left(\frac{S_{i1}}{S_{i2}}\right)^{c_7} \cdot \left(\frac{C_1}{C_2}\right)^{c_8} \cdot \left(\frac{S_1}{S_2}\right)^{c_9} \cdot \left(\frac{T_{on}}{T_{tot}}\right)^{c_{10}} \quad (1)$$

$$D_v = c_1 \cdot t^{a_2} \cdot Q^{c_3} \cdot \left(\frac{K_{s1}}{K_{s2}}\right)^{c_4} \cdot \left(\frac{\rho_{b1}}{\rho_{b2}}\right)^{c_5} \cdot \left(\frac{\theta_{01}}{\theta_{02}}\right)^{c_6} \cdot \left(\frac{S_{i1}}{S_{i2}}\right)^{c_7} \cdot \left(\frac{C_1}{C_2}\right)^{c_8} \cdot \left(\frac{S_1}{S_2}\right)^{c_9} \cdot \left(\frac{T_{on}}{T_{tot}}\right)^{c_{10}} \quad (2)$$

D_h و D_v به ترتیب توزیع جبهه رطوبتی افقی و عمودی پائین قطره چکان ها (بر حسب سانتی متر)، $C_1, C_2, \dots, C_{11}$ ضرایب تجربی معادلات، دبی قطره چکان Q (بر حسب لیتر در ساعت)، K_{s1} و K_{s2} به ترتیب هدایت هیدرولیکی اشباع لایه بالایی و لایه زیرین (بر حسب سانتی متر در ساعت)، t زمان کاربرد آبیاری و زمان توزیع مجدد رطوبت (بر حسب دقیقه)، S_i درصد سیلت، C در صد رس و S درصد شن، ρ_b چگالی ظاهری (گرم در سانتی مترمکعب) و θ_0 رطوبت اولیه خاک (بر حسب درصد جرمی) و $\left(\frac{T_{on}}{T_{tot}}\right)$ نسبت زمان آبیاری در یک چرخه به زمان کل چرخه در سامانه آبیاری است و از آن جا که در آبیاری پیوسته فرایند آبیاری بدون وقفه انجام می شود، این نسبت برابر با ۱ است.

۴. الگوی پیشنهادی در گام توزیع مجدد جبهه پیشروی رطوبتی آب در خاک های دولایه

وضع پیاز رطوبتی در گام توزیع مجدد رطوبتی که بعد از قطع جریان آب است دارای تفاوت کم با توزیع رطوبتی هنگام آبیاری است. تنها تفاوت این دو گام (فاز) رطوبتی به حجم آب کاربردی است که در زمان آبیاری به خاک انتقال داده می شود. در این قسمت نیز عوامل مؤثر از قبیل خصوصیات فیزیکی خاک و قطره چکان است (ویسمن، ۲۰۰۳).

$$D_h = c_1 \cdot t^{c_2} \cdot Q^{c_3} \cdot \left(\frac{K_{s1}}{K_{s2}}\right)^{c_4} \cdot \left(\frac{\rho_{b1}}{\rho_{b2}}\right)^{c_5} \cdot \left(\frac{\theta_{01}}{\theta_{02}}\right)^{c_6} \cdot \left(\frac{S_{i1}}{S_{i2}}\right)^{c_7} \cdot \left(\frac{C_1}{C_2}\right)^{c_8} \cdot \left(\frac{S_1}{S_2}\right)^{c_9} \cdot \left(\frac{T_{on}}{T_{tot}}\right)^{c_{10}} \cdot V^{c_{11}} \quad (3)$$

$$D_v = c_1 \cdot t^{c_2} \cdot Q^{c_3} \cdot \left(\frac{K_{s1}}{K_{s2}}\right)^{c_4} \cdot \left(\frac{\rho_{b1}}{\rho_{b2}}\right)^{c_5} \cdot \left(\frac{\theta_{01}}{\theta_{02}}\right)^{c_6} \cdot \left(\frac{S_{i1}}{S_{i2}}\right)^{c_7} \cdot \left(\frac{C_1}{C_2}\right)^{c_8} \cdot \left(\frac{S_1}{S_2}\right)^{c_9} \cdot \left(\frac{T_{on}}{T_{tot}}\right)^{c_{10}} \cdot V^{c_{11}} \quad (4)$$

در این معادلات V حجم آب آبیاری (حجم آب کاربردی) بر حسب لیتر است.

۵. معیارهای ارزیابی

برای ارزیابی و اعتبارسنجی مدل ها، شاخص های آماری ریشه میانگین مربعات خطا ($RMSE$)، ضریب تبیین (R^2)، میانگین خطای مطلق (MAE) و ضریب جرم باقی مانده (CRM) به ترتیب از روابط (۵) تا (۸) مورد استفاده قرار گرفتند (جامعی و همکاران، ۲۰۲۲a).

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2 \sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P})^2}} \quad (5)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (O_i - P_i)^2}{N}} \quad (6)$$

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |O_i - P_i| \quad (7)$$

¹ Viessman

$$CRM = 1 - \left(\sum_{i=1}^N P_i / \sum_{i=1}^N O_i \right) \quad (۸)$$

که در آن‌ها O_i و $\bar{O}$ به ترتیب مقادیر مشاهداتی و میانگین مقادیر مشاهداتی، P_i مقادیر پیش‌بینی شده، $\bar{P}$ میانگین مقادیر پیش‌بینی شده و N تعداد داده‌ها هستند.

آماره CRM کم برآوردی یا بیش‌آوردی مدل در مقایسه با داده‌های اندازه‌گیری شده را نشان می‌دهد که در این معادله مقادیر منفی نشان‌دهنده بیش‌برآوردی و مقادیر مثبت نشان‌دهنده کم برآوردی مدل بودند (وانگ و همکاران^۱، ۲۰۱۲).

یافته‌های پژوهشی

در طراحی سامانه‌های آبیاری قطره‌ای، آگاهی از نحوه انتشار رطوبت در خاک، نقش اساسی در تعیین فاصله و عمق بهینه لاترال‌ها ایفا می‌کند. این دانش نه تنها برای برآورد دقیق محل نصب لاترال‌ها ضروری است، بلکه در برنامه‌ریزی و مدیریت مؤثر آبیاری نیز اهمیت بالایی دارد. این مطالعه الگوی گسترش رطوبت (پیز رطوبتی) در خاک‌های دارای لایه‌های مختلف، در دوفاز توزیع و توزیع مجدد رطوبتی، در دو جهت افقی و عمودی مورد مطالعه قرار گرفت. پارامترهای تجربی مدل‌های رگرسیون غیرخطی (۱) تا (۴) مطابق با فرمت آن‌ها ارزیابی شدند. به منظور شبیه‌سازی شکل کامل جبهه رطوبتی، در هر دوفاز توزیع و توزیع مجدد، در دو جهت افقی و عمودی با استفاده از داده‌های به دست آمده از مطالعات آزمایشگاهی و با استفاده از آنالیز رگرسیون غیرخطی (به کمک نرم‌افزار اکسل (*Toolbar Solver, 2010*) ضرایب تجربی معادلات بهینه شدند. نتایج حاصل از واسنجی مدل پیشروی جبهه رطوبتی و ضرایب تجربی برای مراحل توزیع و توزیع مجدد در هر دو جهت افقی و عمودی در جدول (۴) جهت آموزش مدل‌ها ارائه شده است. باتوجه به جدول (۴) نتایج مدل‌ها نشان داد که در زمان آبیاری (فاز توزیع) برای توزیع افقی (رابطه ۱)، ریشه میانگین مربعات خطا ($RMSE$) ۵/۹۳۴ سانتی‌متر و خطای مطلق میانگین (MAE) آن ۴/۸۳۶ سانتی‌متر بود. ضریب تعیین (R^2) نیز برابر با ۰/۸۵۶ است. همچنین، خطای نسبت بندی شده (CRM) با مقدار ۰/۰۰۲۱- نشان داد به طور کلی مدل در پیش‌بینی توزیع افقی، مقداری بیش از مقدار واقعی را برآورد کرد. در مقابل، برای توزیع عمودی (رابطه ۲)، $RMSE$ برابر با ۴/۶۶۹ سانتی‌متر و MAE برابر با ۳/۵۲۲ سانتی‌متر است. R^2 نیز برابر با ۰/۸۸۴ است. مقدار مثبت CRM که برابر با ۰/۰۰۳۴ است نشان می‌دهد که مدل در پیش‌بینی توزیع عمودی، مقداری کم‌تر از مقدار واقعی را برآورد کرده است. بررسی‌های آماری نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی در پیش‌بینی توزیع مجدد رطوبت خاک (قطع آبیاری)، باتوجه به جهت (افقی یا عمودی) (روابط ۳ و ۴)، و بافت خاک، عملکرد متفاوتی دارد. بر اساس نتایج تحلیل، ریشه میانگین مربعات خطا ($RMSE$) برای پیش‌بینی توزیع رطوبت در جهت افقی و عمودی به ترتیب ۸/۸۷۹ و ۸/۰۳۱ سانتی‌متر محاسبه شد. همچنین، خطای مطلق میانگین (MAE) نیز به ترتیب ۷/۳۰۹ و ۷/۰۰۱ سانتی‌متر تعیین گردید. ضریب تعیین (R^2) به دست آمده برای توزیع افقی و عمودی به ترتیب ۰/۵۲۴ و ۰/۷۹۸ بوده که نشان‌دهنده تطابق نسبی مدل با داده‌های مشاهده‌ای، به‌ویژه در جهت عمودی است. علاوه بر این، خطای نسبت بندی شده (CRM) نشان می‌دهد که مدل در پیش‌بینی توزیع مجدد افقی تمایل به بیش‌برآوردی و در پیش‌بینی توزیع مجدد عمودی تمایل به کم برآوردی دارد. بر اساس نتایج حاصله، مدل رگرسیون غیرخطی به کار رفته، در شبیه‌سازی توزیع رطوبت خاک در زمان آبیاری عملکرد مطلوب‌تری نسبت به مرحله توزیع مجدد (پس از قطع آبیاری) نشان داد. این اختلاف، به‌ویژه در خاک‌های دولایه به دلیل تفاوت در ویژگی‌های فیزیکی (مانند نفوذپذیری، چگالی ظاهری و رطوبت اولیه خاک) مشهودتر است، زیرا جایی که رطوبت به لایه دوم نفوذ کرده باشد، تغییراتی در سرعت حرکت جبهه رطوبتی و عمق نفوذ آب در محل اتصال دولایه ایجاد می‌کند. کاهش سرعت حرکت آب در لایه‌های با نفوذپذیری کم‌تر یا چگالی بیش‌تر، نشان‌دهنده تأثیر مستقیم ویژگی‌های خاک بر رفتار آب است. در نتیجه، برای شبیه‌سازی دقیق‌تر توزیع رطوبت در مرحله توزیع مجدد، به‌ویژه در خاک‌های دولایه، عوامل پیچیده‌تری در زمان توزیع مجدد رطوبت دخیل هستند که مدل فعلی قادر به پوشش کامل آن‌ها نیست. در این مطالعه، باتوجه به وجود روابط تجربی

^۱ Wang et al

برای نحوه پیش‌بینی جبهه رطوبتی در خاک‌های ناهمگن، ابزار مناسبی در اختیار طراحان قرار گرفته تا بتوانند درک دقیق‌تری از رفتار رطوبت در خاک به دست آورده و سامانه آبیاری را متناسب با نیازهای آبی گیاه در مراحل مختلف رشد تنظیم کنند. این رویکرد موجب بهینه‌سازی مصرف آب و ارتقای عملکرد سامانه آبیاری می‌شود.

جدول ۴. ضرایب تجربی الگوی پیشروی رطوبتی و شاخص‌های آماری در فاز توزیع (روابط ۱ و ۲) و توزیع مجدد (روابط ۳ و ۴)

رطوبتی

روابط تجربی مدل‌ها	رابطه (۱)	رابطه (۲)	رابطه (۳)	رابطه (۴)
$C1$	۷/۸۵۲	۱/۵۰۷	۲۰/۸۳۱	۴/۹۷۷
$C2$	۰/۲۷۶	۰/۳۹۶	۰/۰۲۶	۰/۰۳۲
$C3$	۰/۲۱۸	۰/۵۷۲	۰/۰۰۱	۰/۰۰۵
$C4$	۰/۰۰۰	۲۶/۰۱۶	۰/۰۰۰	۲۵/۰۶۱
$C5$	۰/۰۰۰	۷/۷۴-۸	۰/۱۵۷	۰/۰۷۵
$C6$	۱/۳۷۴	۱۵/۰۷۸	۰/۰۰۰	۱۴/۷۴۷
$C7$	۲/۸۵۲	۱۶/۸۷۲	۰/۲۰۹	۱۶/۰۵۳
$C8$	۴۲/۷۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۱	۰/۰۰۰
$C9$	۰/۰۰۰	۰/۵۵۳	۰/۰۰۰	۰/۳۷۳
$C10$	۰/۴۴	۱۷/۲۲	۰/۲۵۹	۰/۶۱۵
$C11$	-	-	۰/۰۵۴۱	۱/۴۲۲
R^2	۰/۸۵۶	۰/۸۸۴	۰/۵۲۴	۰/۷۹۸
$RMSE (cm)$	۵/۹۳۴	۴/۶۶۹	۰/۸۷۹	۸/۰۳۱
$MAE (cm)$	۴/۸۳۶	۳/۵۲۲	۷/۳۰۹	۷/۰۰۱
CRM	-۰/۰۰۲۱	۰/۰۰۳۴	-۰/۰۰۰۷	۰/۰۰۳۸

در گام بعدی به منظور ارزیابی عملکرد مدل‌ها در شرایط مختلف (توزیع و توزیع مجدد) رطوبتی، با استفاده از داده‌های ورودی تمامی تیمارها، ضرایب معادلات مدل‌ها تعیین شد و سپس برای هر تیمار، شبیه‌سازی مستقل انجام گرفت.

۱. شبیه‌سازی توزیع افقی و عمودی تیمارهای مختلف در زمان آبیاری

جدول (۵)، شاخص‌های آماری محاسبه شده توزیع افقی و عمودی جبهه پیشروی رطوبتی با مدل رگرسیون غیرخطی خاک دولایه به ازای دبی‌های مختلف در زمان آبیاری را نشان می‌دهد. در مدل پیشنهادی مقادیر خطای MAE برای پیش‌بینی توزیع پیشروی افقی از ۲/۸۲ تا ۶/۸۰ سانتی‌متر متغیر است درحالی‌که این مقادیر جهت پیش‌بینی توزیع پیشروی عمودی بین بازه ۲/۰۱ تا ۵/۷۹ سانتی‌متر متغیر است. همچنین نتایج ارزیابی مدل پیشنهادی حاکی از آن است که خطای $RMSE$ در محورهای افقی و عمودی به ترتیب در محدوده‌ی ۳/۴۱ تا ۸/۴۸ و ۲/۵۶ تا ۷/۴۰ سانتی‌متر است. علاوه بر این مقادیر R^2 برای مدل پیشنهادی در راستای افقی بین ۰/۸۵۳ تا ۰/۹۹۱ و در راستای عمودی ۰/۸۵۱ تا ۰/۹۸۰ متغیر بود (ملک و پتر^۱، ۲۰۱۱). از طرفی دیگر در شکل (۳) مقایسه بین مقادیر اندازه‌گیری شده در مقایسه با مقادیر شبیه‌سازی شده (با خط نیم‌ساز ۱:۱) نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی عملکرد مناسبی در تخمین جبهه پیشروی توزیع در دو راستای افقی و عمودی را برای سامانه آبیاری قطره‌ای سطحی با جریان پیوسته را دارد. از طرفی نتایج پژوهش نشان داد که تیمار $HL6$ (توزیع افقی رطوبت در خاک با لایه‌های بالایی سبک و پایینی سنگین) با مقدار $RMSE$ ، ۸/۴۸ و MAE ، ۶/۸۰ سانتی‌متر و تیمار $HL4$ (توزیع افقی رطوبت در خاک با لایه‌های بالایی سنگین و پایینی سبک) با مقدار $RMSE$ ، ۳/۴۱ و MAE ، ۲/۸۲ به ترتیب از بیش‌ترین و کم‌ترین دقت برخوردار بودند و تیمارهای $VL5$ (توزیع عمودی رطوبت در خاک با لایه‌های بالایی سبک و پایینی متوسط) با مقدار $RMSE$ ، ۷/۴۰ و MAE ، ۵/۷۹ سانتی‌متر و تیمار $VL2$ (توزیع عمودی رطوبت در خاک با لایه‌های بالایی متوسط و پایینی سبک) با مقدار $RMSE$ ، ۲/۵۶ و MAE ، ۲/۰۱ سانتی‌متر به ترتیب بیش‌ترین و کم‌ترین دقت را در راستای عمودی داشتند. همچنین نتایج مدل نشان داد که تیمارهای ($HL1$ ، $HL3$ ، $HL5$ ، $VL1$ ، $VL3$ و $VL6$) و ($HL2$ ، $HL4$ ، $HL6$ ، $VL2$ ، $VL4$ و $VL5$) به ترتیب در شرایط کم برآوردی و بیش‌برآوردی

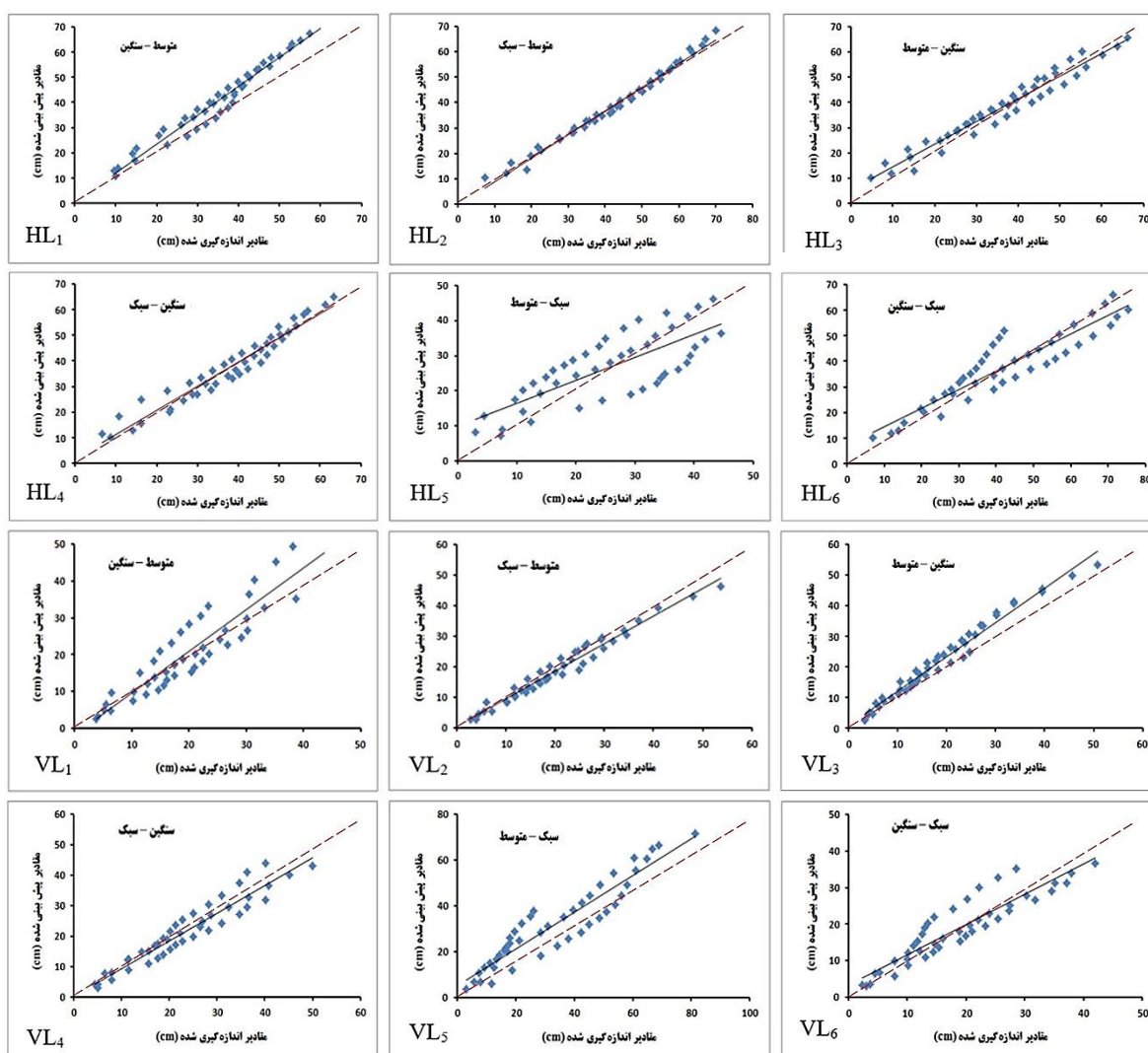
¹ Malek & Peters

قرار داشت. باتوجه‌به گزارش صمدیان‌فرد و همکاران (۲۰۱۲) نتایج حاصل از شاخص‌های آماری نشان‌دهنده عملکرد رضایت‌بخش مدل‌ها در پیش‌بینی رطوبت خاک در هر دو جهت افقی و عمودی، در مرحله توزیع آب، است (ملک و پتر، ۲۰۱۱). مقادیر شاخص‌های آماری به‌دست آمده در محدوده قابل قبولی قرار دارند با بهره‌گیری از این روابط، می‌توان شعاع مرطوب‌شدگی خاک دولایه را در هر لحظه زمانی پیش‌بینی کرده و از این طریق، بهینه‌سازی آبیاری گیاهانی با سامانه ریشه‌ای گسترده را امکان‌پذیر ساخت.

جدول ۵. شاخص‌های آماری محاسبه شده توزیع افقی و عمودی جبهه پیشروی رطوبتی برای تیمارهای مورد بررسی

تیمارها	R^2	$RMSE$ (cm)	MAE (cm)	CRM
توزیع افقی رطوبت در نیم‌رخ‌های خاک (HL)				
HL_1	۰/۹۶۵	۶/۵۳	۵/۷۵	-۰/۰۴۵۸
HL_2	۰/۹۸۶	۳/۹۵	۳/۶۴	-۰/۰۶۹۱
HL_3	۰/۹۹۱	۳/۷۵	۳/۴۲	-۰/۱۶۸۸
HL_4	۰/۹۴۱	۳/۴۱	۲/۸۲	۰/۰۷۴۸
HL_5	۰/۹۳۱	۷/۴۴	۶/۵۹	۰/۰۴۶۰
HL_6	۰/۸۵۳	۸/۴۸	۶/۸۰	-۰/۳۴۰۷
توزیع عمودی رطوبت در نیم‌رخ‌های خاک (VL)				
VL_1	۰/۸۵۱	۴/۸۴	۳/۷۰	-۰/۰۴۵۸
VL_2	۰/۹۶۹	۲/۵۶	۲/۰۱	۰/۰۶۹۱
VL_3	۰/۹۷۷	۴/۰۰	۳/۲۹	۰/۱۶۸۸
VL_4	۰/۹۱۲	۳/۷۷	۳/۰۶	۰/۰۷۴۸
VL_5	۰/۸۷۷	۷/۴۰	۵/۷۹	۰/۰۴۶۰
VL_6	۰/۹۸۰	۵/۴۱	۵/۸۹	-۰/۳۴۰۷

HL_1 تا HL_6 به ترتیب نمایانگر توزیع افقی و VL_1 تا VL_6 توزیع عمودی رطوبت در نیم‌رخ‌های خاک لایه‌های بالایی و پایینی (شامل ترکیب‌های متوسط و سنگین، متوسط و سبک، سنگین و متوسط، سنگین و سبک، سبک و متوسط، سبک و سنگین) هستند.



شکل ۴. مقایسه مقادیر اندازه گیری و شبیه سازی توزیع پیشروی رطوبت در راستای افقی و عمودی و مقایسه با خط یک به یک (خط چین قرمز رنگ) برای تیمارهای مورد بررسی

۲. شبیه سازی توزیع افقی و عمودی تیمارهای مختلف پس از قطع جریان

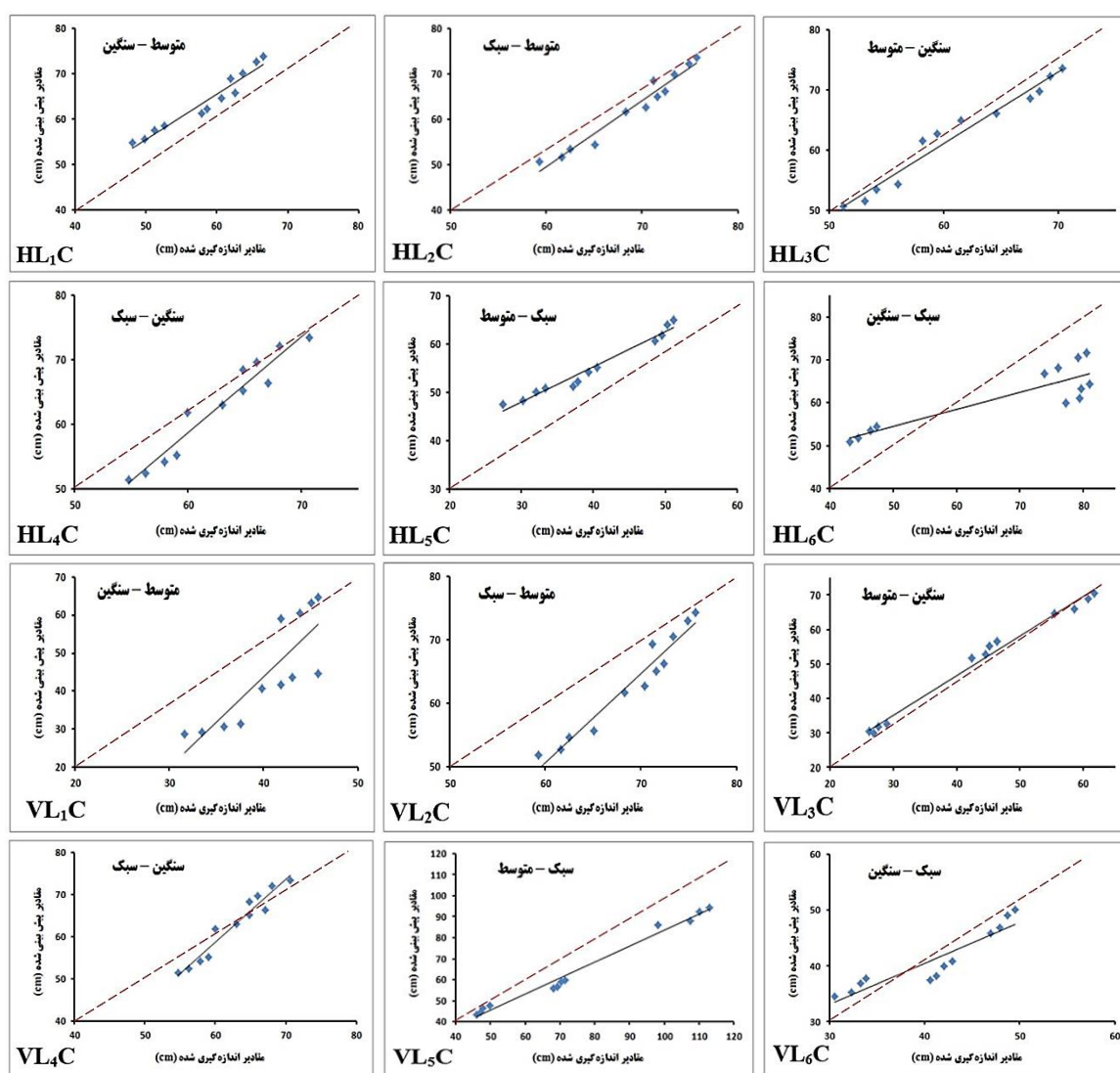
پس از انجام آبیاری و سپس قطع جریان، توزیع مجدد رطوبت اتفاق می افتد. در جدول (۶)، نتایج آنالیز آماری داده های مربوط به توزیع مجدد رطوبت در تیمارها در دو راستای افقی و عمودی ارائه گردیده است. عملکرد مدل ها در شبیه سازی توزیع مجدد افقی در تیمارهای مختلف، با شاخص های آماری متفاوتی همراه بوده است. مقدار R^2 به دست آمده برای این مدل ها بین ۷۷/۴ تا ۹۶/۶ درصد بوده که نشان دهنده تطابق مناسب مدل ها با داده های مشاهده ای است. با این حال، مقادیر $RMSE$ و MAE که به ترتیب بین ۲/۳۱ تا ۱۱/۷۲ سانتی متر و ۲/۰۴ تا ۱۵/۳۰ سانتی متر متغیر بوده اند، نشان می دهد که مدل ها در برخی تیمارها با خطای بیشتری همراه بوده اند. همچنین، برخی مدل ها در برخی تیمارها (HL_1C ، HL_3C و HL_4C) مقدار واقعی را بیش از حد برآورد کرده و در برخی دیگر کمتر از مقدار واقعی برآورد نموده اند (HL_2C ، HL_6C و HL_5C). در میان تیمارها تیمار HL_5C (توزیع مجدد افقی رطوبت در خاک با لایه های بالایی سبک و پائینی متوسط) بیشترین و تیمار HL_3C (توزیع مجدد افقی رطوبت در خاک با لایه های بالایی سنگین و پائینی متوسط) کمترین شاخص خطاها را داشتند. ارزیابی مدل ها در فاز توزیع مجدد عمودی نشان داد که اگرچه مدل ها به طور کلی عملکرد خوبی داشته اند، اما میزان دقت آن ها در تیمارهای مختلف متفاوت بوده است. محدوده تغییرات خطای این مدل ها، از نظر $RMSE$ بین ۳/۶۷ تا ۱۲/۱۸ سانتی متر و از نظر MAE بین ۳/۶۴ تا ۱۰/۳۶ سانتی متر بوده

است. همچنین مقدار R^2 برابر بازه ۰/۶۰ تا ۰/۹۸۷ بود، برخی مدل‌ها (VL_1C , VL_3C , VL_4C و VL_6C) در حالت بیش‌برآوردی و برخی دیگر (VL_2C و VL_5C) در حالت کم‌برآوردی قرار داشته‌اند. در تیمارهای توزیع مجدد عمودی تیمار VL_6C (توزیع مجدد عمودی رطوبت در خاک با لایه‌های بالایی سبک و پائینی سنگین) و VL_5C (توزیع مجدد افقی رطوبت در خاک با لایه‌های بالایی سبک و پائینی متوسط) به ترتیب کم‌ترین و بیش‌ترین پارامترهای آماری خطا را داشتند. همچنین نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی قادر است جبهه پیشروی آب در سامانه آبیاری قطره‌ای سطحی با جریان پیوسته را به خوبی تخمین بزند. همان‌طور که در شکل (۵) مشاهده می‌شود، مقادیر شبیه‌سازی شده توسط مدل با داده‌های اندازه‌گیری شده همخوانی بسیار خوبی بجز تیمار HL_6C و VL_4C دارد. مقایسه نتایج این پژوهش با مطالعات مشابه در جدول ۷ ارائه شده است.

جدول ۶. پارامترهای آماری محاسبه شده توزیع مجدد در دو راستای افقی و عمودی عمودی رطوبت در نیم‌رخ‌های مختلف خاک

تیمارها	R^2	$RMSE$ (cm)	MAE (cm)	CRM
توزیع مجدد افقی رطوبت (HLC)				
HL_1C	۰/۹۴۴	۵/۷۴	۵/۵۴	-۰/۰۹۵۲
HL_2C	۰/۹۴۵	۶/۳۶	۵/۷۲	۰/۰۸۳۰
HL_3C	۰/۹۶۴	۲/۳۱	۲/۰۴	-۰/۰۲۱۸
HL_4C	۰/۹۴۱	۲/۹۷	۲/۶۲	-۰/۰۰۱۱
HL_5C	۰/۹۶۶	۱۵/۵۱	۱۵/۳۰	۰/۳۸۴۶
HL_6C	۰/۷۷۴	۱۱/۷۲	۱۰/۸۴	۰/۰۸۸۷
توزیع مجدد عمودی رطوبت (VLC)				
VL_1C	۰/۶۹۶	۱۰/۶۲	۷/۶۸	-۰/۱۰۷۸
VL_2C	۰/۹۴۵	۶/۳۶	۵/۷۲	۰/۰۸۳۰
VL_3C	۰/۹۸۷	۷/۶۱	۷/۱۶	-۰/۱۶۳۹
VL_4C	۰/۶۰۰	۵/۸۶	۵/۴۷	۰/۰۴۸۳
VL_5C	۰/۹۸۵	۱۲/۱۸	۱۰/۳۶	۰/۱۳۸۴
VL_6C	۰/۹۰۲	۳/۶۷	۳/۶۴	-۰/۱۱۲۳

HL_1C تا HL_6C به ترتیب نمایانگر توزیع مجدد افقی و VL_1C تا VL_6C توزیع مجدد عمودی رطوبت در نیم‌رخ‌های خاک لایه‌های بالایی و پائینی (شامل ترکیب‌های متوسط و سنگین، متوسط و سبک، سنگین و متوسط، سنگین و سبک، سبک و متوسط، سبک و سنگین) هستند.



شکل ۵. مقایسه مقادیر اندازه گیری و شبیه سازی توزیع مجدد رطوبت در راستای افقی و عمودی و مقایسه با خط یک به یک (خطچین قرمز رنگ) برای تیمارهای مورد بررسی

بحث

طراحی سامانه های آبیاری قطره ای بر اساس مدل های شبیه سازی انتقال رطوبت در خاک (فاز پیشروی و پسروی)، یکی از راهکارهای نوین برای افزایش راندمان سامانه های آبیاری است. در این پژوهش، با بهره گیری از مدل های رگرسیونی غیرخطی و شاخص های آماری و با در نظر گرفتن ویژگی های فیزیکی خاک و مشخصات هیدرولیکی قطره چکان، به مدل سازی و ارزیابی فرایند توزیع و توزیع مجدد آب در خاک های لایه ای در دو جهت افقی و عمودی پرداخته شد. جدول (۷) مقایسه مقادیر اندازه گیری و شبیه سازی توزیع مجدد رطوبت در راستای افقی و عمودی برای تیمارهای مورد بررسی را نشان می دهد.

جدول ۷. مقایسه مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی توزیع مجدد رطوبت در راستای افقی و عمودی برای تیمارهای مورد بررسی

پژوهشگران	موضوع	روش	نتایج	مقایسه
خان محمدی و بشارت (۱۳۹۵)	شبیه‌سازی ابعاد پیاز رطوبتی بافت‌های مختلف خاک	استفاده از نرم‌افزار HYDRUS-2D	الف) بیش‌ترین عمق و قطر پیاز رطوبتی در بافت شنی و کم‌ترین آن در بافت سیلتی مشاهده شده است. ب) دقت مدل‌ها برای بافت‌های مختلف و دبی‌های متفاوت، متفاوت است. پ) مدل‌های توسعه‌یافته توانایی خوبی در پیش‌بینی ابعاد پیاز رطوبتی دارند.	الف) شبیه‌سازی با نرم‌افزار HYDRUS-2D درحالی‌که حالی که در مطالعه مذکور از مدل تجربی استفاده شد. ب) برخلاف شبیه‌سازی در خاک همگن در مطالعه خان‌محمدی و بشارت، در این پژوهش پیچیدگی بیش‌تری با در نظر گرفتن خاک دولایه ایجاد شده است.
محمدیگی و همکاران (۱۳۹۵)	بررسی و مقایسه توزیع مجدد رطوبت در آبیاری قطره‌ای با جریان پالسی و جریان پیوسته	مقایسه روش پالسی و پیوسته در سه نوع بافت خاک سبک، متوسط و سنگین با تأکید بر توزیع مجدد رطوبتی در راستای (افقی و عمودی).	الف) بیش‌ترین توزیع مجدد رطوبت در جهت عمودی و در خاک رسی مشاهده شده است. ب) توزیع مجدد رطوبت در جهت افقی در خاک‌های سبک‌تر بیش‌تر است. پ) توزیع مجدد رطوبت در جهت عمودی در خاک‌های سنگین بیش‌تر از خاک‌های سبک است.	الف) شبیه‌سازی با نرم‌افزار HYDRUS-2D انجام شد درحالی‌که در مطالعه مذکور از مدل تجربی استفاده شد. ب) برخلاف شبیه‌سازی در خاک همگن در مطالعه قبلی، در این پژوهش پیچیدگی بیش‌تری با در نظر گرفتن خاک دولایه ایجاد شده است. پ) مدل توسعه‌یافته در مطالعه مذکور در شبیه‌سازی حرکت رطوبت در فاز توزیع مجدد در جهت افقی دقت بالایی نداشت؛ اما در مطالعه خان‌محمدی و بشارت مدل توسعه‌یافته توانایی خوبی در شبیه‌سازی داشتند از دلایل اصلی پیچیدگی حرکت آب در فاز توزیع مجدد در خاک دولایه است.
کریمی و کریمی (۱۳۹۹)	شبیه‌سازی مساحت خیس - شده پیاز رطوبتی در سامانه آبیاری قطره‌ای پالسی	مقایسه و توسعه مدل‌های رگرسیونی غیرخطی برای پیش‌بینی سطح خیس شده.	الف) مدل‌های توسعه‌یافته می‌توانند در طراحی بهینه سیستم‌های آبیاری قطره‌ای مورد استفاده قرار گیرند. ب) عوامل مختلفی مانند دبی، بافت خاک، عمق نصب قطره‌چکان و نوع آبیاری بر سطح خیس شده تأثیرگذار هستند. پ) مدل‌های توسعه‌یافته توانایی خوبی در پیش‌بینی سطح خیس شده دارند.	الف) در پژوهش حاضر، از سیستم آبیاری قطره‌ای سطحی با جریان پیوسته استفاده شده است، درحالی‌که کریمی و کریمی از سیستم آبیاری قطره‌ای پالسی بهره برده‌اند. ب) در این مطالعه، شبیه‌سازی ابعاد پیاز رطوبتی در خاک‌های ناهمگن انجام شده است، درحالی‌که مطالعه کریمی و کریمی به بررسی خاک‌های همگن پرداخته است. پ) مدل‌های مورد استفاده در مطالعه کریمی و کریمی توانایی خوبی در شبیه‌سازی پیاز رطوبتی داشته‌اند، اما در این پژوهش به دلیل پیچیدگی حرکت آب در خاک‌های لایه‌ای، دقت شبیه‌سازی در فاز توزیع مجدد کاهش یافته است.

ادامه جدول ۷. مقایسه مقادیر اندازه گیری و شبیه سازی توزیع مجدد رطوبت در راستای افقی و عمودی برای تیمارهای مورد بررسی

پژوهشگران	موضوع	روش	نتایج	مقایسه
کریمی و صولت (۱۳۹۹)	شبیه سازی کامل پیاز رطوبتی در آبیاری قطره ای سطحی	توسعه و ارزیابی مدل های تجربی در پیش بینی توزیع و توزیع مجدد رطوبت	الف) مدل های توسعه یافته توانایی خوبی در پیش بینی توزیع و توزیع مجدد رطوبت در خاک دارند. ب) مدل ها قادر به پیش بینی شکل پیاز رطوبتی در فازهای توزیع و توزیع مجدد هستند	الف) مدل های توسعه یافته در شبیه سازی اولیه توزیع رطوبت عملکرد خوبی داشتند، اما پیچیدگی های ناشی از لایه لایه بودن خاک، به ویژه در پیش بینی حرکت افقی رطوبت پس از آبیاری، باعث کاهش دقت مدل ها شد. ب) در حالی که مطالعه کریمی و صولت به بررسی رفتار رطوبت در خاک های همگن محدود شده بود، هدف پژوهش حاضر توسعه مدل هایی برای پیش بینی دقیق تر توزیع رطوبت در خاک های پیچیده تر بود.
کریمی و کریمی (۱۴۰۰)	ارزیابی الگوی جبهه پیشروی رطوبت در آبیاری قطره ای زیر سطحی با جریان پیوسته و پالسی	ارزیابی الگوی حرکت رطوبت در سامانه آبیاری قطره ای زیر سطحی با جریان پیوسته و پالسی	الف) در آبیاری پالسی، با افزایش زمان استراحت بین پالس ها، رطوبت بیش تر در جهت افقی گسترش می یابد. ب) در دبی های کم، رطوبت بیش تر در جهت افقی گسترش می یابد و در دبی های زیاد، عمق نفوذ رطوبت بیش تر است. پ) بافت خاک تأثیر قابل توجهی بر عمق نفوذ رطوبت دارد.	
عرب و همکاران (۱۴۰۱)	بررسی آزمایشگاهی توزیع رطوبت در سامانه های آبیاری قطره ای سطحی و زیر سطحی	اندازه گیری توزیع رطوبت در دو سامانه آبیاری قطره ای سطحی و زیر سطحی	الف) افزایش دبی در هر دو سامانه باعث افزایش مساحت خیس شده می شود، اما این افزایش در سامانه زیر سطحی بیش تر است. ب) تغییرات توزیع مجدد رطوبت در سامانه زیر سطحی بیش تر از سامانه سطحی است. پ) در سامانه سطحی، آب آزادانه تر در خاک حرکت می کند و تغییرات اصلی در جبهه رطوبت قبل از توزیع مجدد رخ می دهد	الف) در این پژوهش، تنوع بافت خاک ها با بررسی شش پروفیل مختلف مورد توجه قرار گرفته است، در حالی که مطالعه عرب و همکاران تنها به بررسی بافت شنی محدود شده است. ب) در مطالعه مذکور شبیه سازی حرکت آب در خاک های ناهمگن انجام گرفت؛ اما در مطالعه عرب و همکاران خاک تک لایه با بافت شنی بود. پ) برخلاف مطالعه عرب و همکاران که بر روی تأثیر پارامترهای دبی بر روی پیاز رطوبتی در خاک شنی در سامانه های آبیاری قطره ای زیر سطحی و سطحی صورت گرفته بود، این پژوهش به شبیه سازی کلی حرکت آب در خاک پرداخته است.

برخلاف مدل‌های پیشین که صرفاً به شبیه‌سازی حرکت آب در خاک‌های تک‌لایه محدود می‌شدند، مدل‌های پیشنهادی در این پژوهش قادر به شبیه‌سازی دقیق‌تر فرایند توزیع و توزیع مجدد رطوبت در خاک‌های دولایه، در دو جهت افقی و عمودی هستند.

نتیجه‌گیری

نتایج بررسی عملکرد مدل‌های پیشنهادی نشان داد مدل‌ها در شبیه‌سازی فاز توزیع رطوبت در هر دو جهت افقی و عمودی در تیمارها عملکرد بسیار خوبی از خود نشان دادند (ضریب همبستگی به ترتیب ۰/۸۵ و ۰/۸۸). اما در فاز توزیع مجدد، به‌ویژه در جهت افقی، عملکرد مدل‌ها اندکی ضعیف‌تر بود (ضریب همبستگی به ترتیب ۰/۵۲ و ۰/۷۹). نتایج ارزیابی مدل‌ها نشان می‌دهد که ریشه میانگین مربعات خطا ($RMSE$) برای پیش‌بینی توزیع رطوبت در جهت افقی و عمودی به ترتیب ۵/۹۳ و ۴/۶۶ سانتی‌متر برآورد شده است. همچنین مقادیر آن در فاز توزیع مجدد در دو راستای افقی و عمودی به ترتیب ۸/۸۷ و ۸/۰۳ سانتی‌متر به‌دست آمد. مقادیر MAE در فاز توزیع افقی و عمودی به ترتیب ۴/۸ و ۳/۵۲ سانتی‌متر و همچنین در فاز توزیع مجدد در راستای افقی ۷/۳۰ و در فاز عمودی ۷ سانتی‌متر بود. مدل در هر دوفاز توزیع و توزیع مجدد، تمایل به بیش‌برآورد مقادیر در جهت افقی و کم‌برآورد مقادیر در جهت عمودی دارد. کاهش دقت مدل‌ها در شبیه‌سازی توزیع مجدد رطوبت به‌خصوص در جهت افقی، ناشی از عوامل متعددی از جمله پیچیدگی فرایند، ناهمگنی خاک، محدودیت‌های مدل در نظر گرفتن تمام فرآیندهای مرتبط و کمبود داده‌های دقیق در عمق خاک است. بنابراین برای بهبود دقت مدل در پیش‌بینی توزیع رطوبت، لازم است تا خطای سیستماتیک موجود در برآوردهای مدل در جهت‌های مختلف اصلاح شود. نتایج این مطالعه حاکی از آن است که مدل پیشنهادی می‌تواند به‌عنوان ابزاری برای پیش‌بینی توزیع و توزیع مجدد رطوبت در خاک با لایه‌های متفاوت گردد و در نتیجه، در بهبود مدیریت آبیاری در سامانه آبیاری قطره‌ای سطحی با جریان پیوسته به‌کار گرفته شوند.

ملاحظات اخلاقی

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این پژوهش علمی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تأیید همه آنهاست. سامانه آبیاری قطره‌ای سطحی با جریان پیوسته به‌کار گرفته شوند.

مشارکت نویسندگان

جمع‌آوری داده‌ها: ایزج سهرابی، آرمان مقدم‌نیار و بختیار کریمی؛ تهیه گزارش پژوهش: پیمان طهماسی؛ تحلیل داده‌ها: پیمان طهماسی و بختیار کریمی

مشارکت نویسندگان در مقاله مستخرج از پایان‌نامه تقریباً به شکل زیر باشد:

نویسنده اول: تهیه و آماده‌سازی نمونه‌ها، انجام آزمایش و گردآوری داده‌ها؛

نویسنده دوم: طراحی پژوهش، بررسی و کنترل نتایج، اصلاح، بازبینی و نهایی‌سازی مقاله؛

نویسنده سوم: استاد راهنمای پایان‌نامه، طراحی پژوهش، نظارت بر مراحل انجام پژوهش، بررسی و کنترل نتایج، جمع‌آوری داده‌ها و اصلاح، بازبینی و نهایی‌سازی مقاله؛

نویسنده چهارم: گردآوری داده‌ها و نظارت بر مراحل انجام پژوهش

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

حمایت مالی

حمایت مالی از این پژوهش از طرف دانشگاه کردستان، دانشکده کشاورزی در قالب پژوهانه پایان نامه دانشجویی نویسنده اول و همچنین پژوهانه برای سایر نویسندگان انجام شده است.

سپاسگزاری

در پایان، از حمایت های مالی شورای پژوهشی دانشگاه شهید چمران اهواز کمال تشکر را داریم (GN: SCU.WH1403.43525).

منابع

- خانمحمدی، ندا، و بشارت، سینا. (۱۳۹۵). شبیه سازی تجربی ابعاد پیاز رطوبتی بافت‌های مختلف خاک. *مجله علوم آب و خاک*، ۲۰(۷۷)، ۱۳-۲۳. <http://dx.doi.org/10.18869/acadpub.jstnar.20.77.13>
- عرب، سوگند، مظفری، جواد، و نحوی نیا، محمد جواد. (۱۴۰۱). بررسی آزمایشگاهی توزیع رطوبت در سیستم‌های آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی. *نشریه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب ایران*، ۱۳(۱)، ۱۲۴-۱۴۰. <https://doi.org/10.22125/iwe.2022.158511>
- کریمی، بختیار، میرزایی، فرهاد، و سهرابی، تیمور. (۱۳۹۴). بسط معادلاتی برای برآورد الگوی سطح خیس شده در سامانه های آبیاری قطره ای سطحی و زیر سطحی به روش تحلیل ابعادی. *مجله دانش آب و خاک (دانش کشاورزی)*، ۲۵(۳)، ۲۵۲-۲۴۱. https://water-soil.tabrizu.ac.ir/article_4034.html
- کریمی، بختیار، و صولت، شلیر. (۱۳۹۹). شبیه‌سازی شکل کامل پیاز رطوبتی در آبیاری قطره‌ای سطحی. *نشریه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب ایران*، ۱۰(۴)، ۳۱۶-۳۰۱. https://www.waterjournal.ir/article_110312.html
- کریمی، بختیار، و کریمی، نظیر. (۱۳۹۹). شبیه‌سازی مساحت خیس شده پیاز رطوبتی در سیستم آبیاری قطره‌ای پالسی. *مجله آب و خاک*، ۳۴(۲)، ۳۶۴-۳۴۹. <https://doi.org/10.22067/jsw.v34i2.82228>
- کریمی، بختیار، و کریمی، نظیر. (۱۴۰۰). ارزیابی الگوی جبهه پیشروی رطوبت در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی با جریان پیوسته و پالسی. *فصلنامه علمی مهندسی منابع آب*، ۱۴(۵۱)، ۳۸-۲۱. <https://doi.org/10.30495/wej.2022.20462.2120>
- محمدیگی، آرش، میرزایی، فرهاد، و اشرف، نگین. (۱۳۹۵). بررسی و مقایسه توزیع مجدد رطوبت در آبیاری قطره ای با جریان پالسی و جریان پیوسته. *مجله تحقیقات آب و خاک ایران (علوم کشاورزی ایران)*، ۴۷(۳)، ۴۶۷-۴۶۳. https://ijswr.ut.ac.ir/article_59317.html
- نوروزیان، زهرا، صدرالدینی، علی اشرف، ناظمی، امیرحسین، و دلیرحسن نیا، رضا. (۱۳۹۵). بررسی تجربی و عددی توزیع رطوبت خاک در آبیاری قطره ای زیر سطحی در خاک‌های لایه‌ای مسطح و شیب دار. *مجله دانش آب و خاک*، ۲۶(۴.۲)، ۲۷-۱۳. https://water-soil.tabrizu.ac.ir/article_5878.html

References

- Ben-Asher, J., Volynski, R., & Gulko, N. (2022). Spherical interpretation of infiltration from trickle irrigation. *Agronomy*, 12(10), 2469. <https://doi.org/10.3390/agronomy12102469>
- Cristóbal-Muñoz, I., Prado-Hernández, J. V., Martínez-Ruiz, A., Pascual-Ramírez, F., Cristóbal-Acevedo, D., & Cristóbal-Muñoz, D. (2022). An improved empirical model for estimating the geometry of the soil wetting front with surface drip irrigation. *Water*, 14(11), 1827. <https://doi.org/10.3390/w14111827>
- Jamei, M., Karimi, F., Ali, M., Karimi, B., Karbasi, M., & Aminpour, Y. (2022b). Experimental and computational assessment of wetting pattern for two-layered soil profiles in pulse drip irrigation: Designing a novel optimized bidirectional deep learning paradigm. *Journal of Hydrology*, 614, 128496. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128496>
- Jamei, M., Maroufpoor, S., Aminpour, Y., Karbasi, M., Malik, A., & Karimi, B. (2022a). Developing hybrid data-intelligent method using Boruta-random forest optimizer for simulation of nitrate distribution pattern. *Agricultural Water Management*, 270, 107715. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107715>
- Karimi, B., & Alinazari, F. (2019). Simulation of Full Shape of Wetting Bulb in Subsurface Drip Irrigation System with Nonlinear Regression Model. *Journal of Water Research in Agriculture*, 33(2), 327-338. https://wra.areeo.ac.ir/article_119746.html [In Persian]
- Karimi, B., & Karimi, N. (2020). Simulation of Wetted Area of Moisture Bulb in Pulsed Drip Irrigation. *Water and Soil*, 34(2), 349-364. <https://doi.org/10.22067/jsw.v34i2.82228> [In Persian]
- Karimi, B., & Mohammadi, P. (2018). Evaluation of artificial neural network for estimating the advance velocity of the wetting front in drip irrigation. *Journal of Water Research in Agriculture*, 32(1), 79-92. https://wra.areeo.ac.ir/article_116602.html
- Karimi, B., & Solat, S. (2020). Full shape of moisture bulb simulating in surface drip irrigation. *Irrigation and Water Engineering*, 10(4), 301-316. https://www.waterjournal.ir/article_110312.html [In Persian]
- Karimi, B., Karimi, N., Shiri, J., & Sanikhani, H. (2022) Modeling moisture redistribution of drip irrigation systems by soil and system parameters: regression-based approaches. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 36, 157–172. <https://doi.org/10.1007/s00477-021-02031-y021-02031-y>
- Karimi, B., Mirzaei, F., & Sohrabi, T. (2013). Evaluation of moisture front redistribution in surface and subsurface drip irrigation systems. *Water and Soil Science*, 23(3), 183-192. https://water-soil.tabrizu.ac.ir/article_4034.html [In Persian]
- Karimi, B., Mirzaei, F., & Sohrabi, T. (2015). Developing equations to estimate wetted area pattern for surface and subsurface drip irrigation systems by dimensional analysis. *Water and Soil Science*, 25(3), 241-252. https://wra.areeo.ac.ir/article_116602.html [In Persian]
- Khanmohamadi, N., & Besharat S. (2016). Empirical simulation of wetting pattern in different soil texture. *Jwss*, 20 (77) ,13-23. <http://dx.doi.org/10.18869/acadpub.jstnar.20.77.13> [In Persian]
- Kilic, M. (2020). A new analytical method for estimating the 3D volumetric wetting pattern under drip irrigation system. *Agricultural Water Management*, 228, 105898. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105898>
- Malek, K., & Peters, R. T. (2011). Wetting pattern models for drip irrigation: new empirical model. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 137(8), 530-536. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0000320](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000320)
- Mohammad Beigi, A., Mirzaei, F., & Ashraf, N. (2016). Evaluation and comparing of redistribution of moisture in drip irrigation by pulsed flow and continuous flow. *Iranian*

- Journal of Soil and Water Research*, 47(3), 467-473. https://water-soil.tabrizu.ac.ir/article_4034.html
- Norouzian, Z., Sadraddini, A., Nazemi, A., & Delirhasannia, R. (2017). Experimental and Numerical Investigations of Soil Water Distribution under Subsurface Drip Irrigation in Level and Sloping Layered Soils. *Water and Soil Science*, 26(4.2), 13-27. https://water-soil.tabrizu.ac.ir/article_5878.html [In Persian]
- Samadianfard, S., Sadraddini, A. A., Nazemi, A. H., Provenzano, G., & Kisi O. (2012). Estimating soil wetting patterns for drip irrigation using genetic programming. Spanish. *J. Agric. Res*, 10, 1155–1166. <http://dx.doi.org/10.5424/sjar/2012104-502-11>
- Shiri, J., Karimi, B., Karimi, N., Kazemi, M.H., & Karimi, S. (2020). Simulating wetting front dimensions of drip irrigation systems: Multi criteria assessment of soft computing models. *Journal of Hydrology*, 585, 124792. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124792>
- Shu, J., Bai, Y., Chen, Q., Weng, C., & Zhang, F. (2024). Dynamic simulation of the water-land-food nexus for the sustainable agricultural development in the North China Plain. *Science of The Total Environment*, 912, 168771. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168771>
- Skaggs, T. H., Trout, T. J., Šimůnek, J., & Shouse, P. J. (2004). Comparison of HYDRUS-2D simulations of drip irrigation with experimental observations. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 130(4), 304-310. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2004\)130:4\(304\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2004)130:4(304))
- Solat, S., Alinazari, F., Maroufpoor, E., Shiri, J., & Karimi, B. (2021). Modeling moisture bulb distribution on sloping lands: Numerical and regression-based approaches. *Journal of Hydrology*, 601, 126835. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126835>
- Viessman, W., & Lewis, G. L. (2003). Introduction to Hydrology. 5th Edition, Pearson Education Inc, New York. <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=907712>
- Wang, H., Guan, R., & Wu, J. (2012). Linear regression of interval-valued data based on complete information in hypercubes. *Journal of Systems Science and Systems Engineering*, 21(4), 422-442. <https://doi.org/10.1007/s11518-012-5203-4>