



Investigation of the average advance distance location in deriving the infiltration equation in surface irrigation

Amin Seyedzadeh¹ , Amir Panahi² , and Eisa Maroufpoor³ 

1. Corresponding author, Department of Water Science and Engineering and research institute of Water Resources Management in arid region, Faculty of agriculture, Fasa university, Fasa, Iran. E-mail: A-Seyedzadeh@fasau.ac.ir
2. Department of Engineering, IS-FOOD Institute (Institute for Innovation & Sustainable Development in Food Chain), Public university of Navarre, Campus de Arrosadía, 31006 Pamplona, Navarra, Spain. E-mail: Amir.Panahi@unavarra.es
3. Department of Water Engineering, Faculty of agriculture, Kurdistan university, Sanandaj, Iran. E-mail: E.maroufpoor@uok.ac.ir

Article Info

ABSTRACT

Article type:

Research Article

Article history:

Received 02 August 2024

Received in revised form 04 November 2024

Accepted 23 November 2024

Available online 25 March 2025

Keywords:

infiltration,
two-point method,
midpoint,
advance equation,
Kostiakov-Lewis equation.

Objective: This study introduces a novel approach to determine the optimal midpoint location in the two-point method for estimating infiltration parameters of the Kostiakov-Lewis equation. Unlike the traditional fixed midpoint, which sometimes leads to errors, the proposed method dynamically adjusts the midpoint based on the average advance distance during the advance phase.

Method: To evaluate the performance of the proposed method, data from two border-irrigated fields in the Zarineh Rud irrigation and drainage network were used.

Results: The results of this study showed that the value of the root sum square error index for the advance equation of the proposed method was 17.3 minutes, while for the fixed midpoint method, it was 19.7 minutes. Also, the absolute relative error of the infiltration equations obtained from the two methods in calculating the average depth of infiltrated water in the field was 1.3% and 3.4%, respectively.

Conclusions: Selecting the midpoint in the two-point method based on the average location of the advance distance, in addition to overcoming the challenges of the fixed midpoint, has higher accuracy in estimating the advance time and also in estimating the infiltration parameters, providing a more reliable basis for irrigation management decisions.

Cite this article: Seyedzadeh, A., Panahi, A., & Maroufpoor, E. (2025). Investigation of the average advance distance location in deriving the infiltration equation in surface irrigation. *Advanced Technologies in Water Efficiency*, 5 (1), 51-63. <https://doi.org/10.22126/atwe.2024.11183.1142>



© The Author(s)

Publisher: Razi University.

<https://doi.org/10.22126/atwe.2024.11183.1142>

Introduction

Surface irrigation remains the predominant irrigation method in global agriculture. However, its efficiency is often lower than expected due to suboptimal design and management practices. One of the critical factors for accurate design and management of surface irrigation systems is a precise description of soil infiltration characteristics. The Kostiakov-Lewis infiltration equation is widely used due to its simplicity and robust performance under various field conditions. Accurate determination of its coefficients is essential for optimizing the performance of surface irrigation systems. This study introduces a novel approach to determine the optimal midpoint location in the two-point method for estimating infiltration parameters of the aforementioned equation. Unlike the traditional fixed midpoint, which sometimes leads to errors, the proposed method dynamically adjusts the midpoint based on the average advance distance during the advance phase.

Method

This study utilized field data from two irrigation sites within the Zarinerood irrigation and drainage network in Northwest Iran. The data were collected from border irrigation farms at these sites. The proposed method was compared with the traditional two-point method to assess its effectiveness. The methodology involved dynamically adjusting the midpoint during the water advance phase and using this information to calculate infiltration parameters. The accuracy of the proposed method was then evaluated by comparing its results with those of the traditional fixed midpoint approach.

Results

The results of this study showed that the value of the root sum square error index for the advance equation of the proposed method was 17.3 minutes, while for the fixed midpoint method, it was 19.7 minutes. Also, the absolute relative error of the infiltration equations obtained from the two methods in calculating the average depth of infiltrated water in the field was 1.3% and 3.4%, respectively. Therefore, selecting the midpoint in the two-point method based on the average location of the advance distance, in addition to overcoming the challenges of the fixed midpoint, has higher accuracy in estimating the advance time and also in estimating the infiltration parameters, providing a more reliable basis for irrigation management decisions.

Conclusions

This study introduces a novel approach to determining the optimal midpoint in the two-point method for estimating Kostiakov-Lewis infiltration equation parameters. The conventional fixed midpoint method, commonly employed in surface irrigation studies and design, can lead to inaccuracies and even failure in fields with significant spatial variability in infiltration. By introducing a dynamic midpoint based on the average advance distance, the proposed method provides a more accurate representation of field infiltration processes. Analysis of irrigation data from two furrow-irrigated fields demonstrated that, based on the root sum square error (RSSE) index, the advance curves computed using the proposed method consistently exhibited better agreement with field data. Consequently, the proposed dynamic midpoint method offers a significant improvement in the accuracy and reliability of infiltration parameter estimation for surface irrigation, facilitating enhanced irrigation management and water use efficiency.

Author Contributions

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

Data Availability Statement

Data Availability Statement.

Ethical Considerations

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

Funding

Not applicable.

Conflict of Interest

The authors declare no conflict of interest.



بررسی موقعیت مکانی متوسط فاصله پیشروی در استخراج معادله نفوذ در آبیاری سطحی

امین سیدزاده^۱، امیر پناهی^۲، و عیسی معروف پور^۳

۱. نویسنده مسئول، گروه علوم و مهندسی آب و پژوهشکده مدیریت منابع آب در مناطق خشک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فسا، فسا، ایران. رایانامه: Seyedzadeh@fasau.ac.ir
۲. گروه مهندسی، موسسه IS-FOOD (موسسه نوآوری و توسعه پایدار در زنجیره غذایی)، دانشگاه عمومی ناوار، پردیس آروسادیا، پامپلونا، ناوارا، اسپانیا. رایانامه: Amir.Panahi@unavarra.es
۳. گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران. رایانامه: e.maroufpoor@uok.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقا

هدف: این مطالعه یک رویکرد جدید برای تعیین مکان بهینه نقطه میانی در روش دو نقطه‌ای برای تخمین پارامترهای نفوذ معادله مذکور معرفی می‌کند. بر خلاف نقطه میانی ثابت سنتی که گاهی منجر به خطا می‌شود، روش پیشنهادی به صورت دینامیکی نقطه میانی را بر اساس میانگین فاصله پیشروی در طول مرحله پیشروی تنظیم می‌کند.

نوع مقاله:
مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۵/۱۲

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۸/۱۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۹/۰۳

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۱/۰۵

روش پژوهش: برای ارزیابی عملکرد روش پیشنهادی از داده‌های دو مزرعه آبیاری نواری در شبکه آبیاری و زهکشی زرینه‌رود استفاده شد.

یافته‌ها: نتایج این بررسی نشان داد که شاخص ریشه مجموع مربعات خطا برای معادلات پیشروی حاصل از روش پیشنهادی، ۱۷/۳ دقیقه و معادلات پیشروی حاصل از روش نقطه میانی ثابت، ۱۹/۷ دقیقه می‌باشد. همچنین قدرمطلق خطای نسبی معادلات نفوذ حاصل از دو روش مذکور در محاسبه متوسط عمق آب نفوذی مزرعه، به ترتیب ۳/۱ و ۴/۳ درصد بود.

کلیدواژه‌ها:
نفوذ،

نتیجه‌گیری: انتخاب نقطه میانی در روش دونقطه‌ای، بر اساس مکان متوسط فاصله پیشروی، علاوه بر اینکه چالش‌های نقطه میانی ثابت را ندارد، از دقت بالاتری در تخمین مدت‌زمان پیشروی و همچنین برآورد پارامترهای نفوذ برخوردار است و مبنای قابل‌اعتمادتری برای تصمیم‌گیری‌های مدیریت آبیاری فراهم می‌کند.

روش دو نقطه‌ای،
نقطه میانی،
رابطه پیشروی،
رابطه کاستیاکف - لوئیس.

استناد: سیدزاده، امین؛ پناهی؛ امیر؛ و معروف پور، عیسی. (۱۴۰۴). بررسی موقعیت مکانی متوسط فاصله پیشروی در استخراج معادله نفوذ در آبیاری سطحی. *فناوری های پیشرفته در بهره وری آب*، ۵ (۱)، ۶۳-۵۱.

<https://doi.org/10.22126/atwe.2024.11300.1143>



مقدمه

علی‌رغم توسعه سیستم‌های نوین آبیاری، آبیاری سطحی هنوز هم به‌عنوان روش اصلی آبیاری در بسیاری از مناطق جهان استفاده می‌شود. این محبوبیت پایدار ناشی از سادگی، مقرون‌به‌صرفه بودن و سازگاری با زمین‌ها و سامانه‌های کشت متنوع است. با این حال، راندمان آبیاری سطحی به دلیل طراحی و شیوه‌های مدیریتی غیربهبوده، اغلب از پتانسیل خود کمتر است (کی^۱، ۱۹۹۰؛ و سیدزاده و همکاران^۲، ۲۰۲۲). یکی از عوامل مهم تاثیرگذار بر طراحی و مدیریت سامانه‌های آبیاری سطحی، توصیف دقیق ویژگی‌های نفوذ آب در خاک است (الیوت و واکر^۳، ۱۹۸۲؛ کارملی و همکاران^۴، ۱۹۷۸؛ اویونارته و همکاران^۵، ۲۰۰۲؛ واکر و اسکوگربو^۶، ۱۹۸۷؛ و زیرهون و همکاران^۷، ۱۹۹۶).

ادبیات موضوع و پیشینه پژوهش

تاکنون، محققان تلاش‌های زیادی را برای توسعه مدل‌های ریاضی پدیده نفوذ آب در خاک، انجام داده‌اند که نتایج این مطالعات منجر به ارائه مدل‌های فیزیکی مانند مدل گرین و آمپت^۸ (۱۹۱۱) تا فرمول‌های تجربی و نیمه‌تجربی مانند کاستیاکوف^۹ (۱۹۳۲)، لوئیس^{۱۰} (۱۹۳۷)، هورتون^{۱۱} (۱۹۳۹)، فیلیپ^{۱۲} (۱۹۵۷)، و سازمان حفاظت خاک امریکا^{۱۳} (۱۹۷۴) شده است. مدل نفوذ کاستیاکوف - لوئیس (معادله (۱)) که اغلب به‌عنوان معادله کاستیاکوف اصلاح شده نیز ذکر می‌گردد (اسمیت^{۱۴}، ۱۹۷۲)، به دلیل سادگی نسبی و عملکرد قوی آن در پیش‌بینی نرخ نفوذ تحت شرایط مختلف مزرعه‌ای، مقبولیت و کاربرد گسترده‌ای دارد.

$$i = kt^a + f_0 t \quad (1)$$

که در آن i نفوذ تجمعی (mm)؛ k ضریب ثابت (mm/h^a)؛ a نمای ثابت (بدون بعد)، t فرصت زمان نفوذ (h) و f_0 سرعت نفوذ نهایی (mm/h) است.

تعیین دقیق ضرایب معادله کاستیاکوف - لوئیس برای بهینه‌سازی طراحی و عملکرد سامانه‌های آبیاری سطحی بسیار مهم است. این دقت منجر به تطابق بیشتر نتایج مطالعات طراحی و پیش‌بینی سناریوهای متفاوت مدیریتی با عملکرد واقعی سامانه آبیاری در مزرعه می‌گردد. روش‌های متعددی برای تخمین این ضرایب پیشنهاد شده است که هر کدام نقاط قوت و محدودیت‌های خاص خود را دارند. این روش‌ها شامل رویکرد موازنه حجم همراه با داده‌های پیشروی آب در طول مزرعه (کریستیانسن و همکاران^{۱۵}، ۱۹۶۶)، روش تطبیق منحنی‌های پیشروی بدون بعد (الیوت و همکاران^{۱۶}، ۱۹۸۳)، روش یک نقطه‌ای بنامی و افن^{۱۷} (۱۹۸۴)، روش یک نقطه‌ای شپارد و همکاران^{۱۸} (۱۹۹۳)، روش یک نقطه‌ای والیانتراس و همکاران^{۱۹} (۲۰۰۱)، و روش کالیبراسیون چندمرحله‌ای واکر^{۲۰} (۲۰۰۵) است.

1. Key
2. Seyedzadeh et al
3. Elliot and Walker
4. Karmeli et al
5. Oyonarte et al
6. Walker and Skogerboe
7. Zerihun et al
8. Green and Ampt
9. Kostiakov
10. Lewis
11. Horton
12. Philip
13. USDA Soil Conservation Service
14. Smith
15. Christiansen et al
16. Elliot et al
17. Benami and Ofen
18. Shepard et al
19. Valiantzas et al
20. Walker

در میان روش‌های مختلف توسعه یافته برای تخمین پارامترهای نفوذ، روش دو نقطه‌ای پیشنهاد شده توسط الیوت و واکر (۱۹۸۲) به دلیل سادگی نسبی و دقت قابل قبول، کاربرد قابل توجهی پیدا کرده است. این روش که بر اساس اصل موازنه حجم استوار است (کریستیانسن و همکاران، ۱۹۶۶) از رابطه پیشروی آب در طول مزرعه با فرم معادله توانی (معادله (۲)) استفاده می‌کند:

$$x = pt_x^r \quad (2)$$

که در آن x فاصله پیشروی آب در مزرعه نسبت به ابتدای آن (m)، t_x زمان پیشروی آب در مزرعه از لحظه شروع آبیاری (\min)، P و r ضرایب ثابت تجربی است.

روش دو نقطه‌ای بر داده‌های دو نقطه متمایز در طول مزرعه (نقطه میانی و نقطه انتهایی مزرعه)، برای تعیین پارامترهای r و P در رابطه پیشروی استوار است. همچنین از اطلاعات دو نقطه مذکور برای محاسبه حجم آب ذخیره شده در مزرعه استفاده می‌شود. با مقایسه حجم کل آب ورودی به مزرعه با حجم ذخیره سطحی آن، می‌توان حجم آب نفوذی را تعیین کرد و در نهایت ضرایب معادله نفوذ کاستیاکوف-لوئیس را محاسبه نمود.

اگرچه روش دو نقطه‌ای یک رویکرد عملی برای تخمین پارامترهای معادله نفوذ است؛ اما دقت و شکست آن وابسته به انتخاب مکان نقطه میانی است. بیشتر طراحی‌ها و مطالعات در استفاده از روش دو نقطه‌ای به استفاده از یک نقطه میانی ثابت، در وسط طول مزرعه، متکی هستند (واکر و اسکوگربو، ۱۹۸۷؛ الیوت و واکر، ۱۹۸۲). اما تغییرات در بافت و ساختمان خاک در امتداد طول مزرعه بر فرایند نفوذ تأثیر می‌گذارد و در نظر گرفتن نقطه ثابت وسط مزرعه برای تمامی شرایط جوابگو نخواهد بود.

مطالعات سیدزاده و همکاران (۲۰۲۰ و a و b) و پناهی و همکاران (۲۰۲۱ و ۲۰۲۳) نشان از عدم دقت کافی و یا عدم موفقیت روش دو نقطه‌ای در صورت استفاده از نقطه میانی ثابت (وسط مزرعه) در برخی شرایط برای تعیین ضرایب نفوذ دارد. زیرا در نظر گرفتن یک نقطه میانی ثابت نمی‌تواند ماهیت دینامیکی پیشروی آب در طول مزرعه و همچنین نفوذ آب در خاک را به خوبی نشان دهد و این منجر به خطاهای بالقوه در تخمین پارامتر r و در نتیجه تعیین ضرایب نفوذ می‌شود. به عنوان نمونه، در شرایطی که میزان نفوذ در نیمه اول مزرعه بیشتر از نیمه دوم آن باشد، استفاده از نقطه میانی ثابت، منجر به بیشتر شدن توان رابطه پیشروی (r) از مقدار واحد و در نهایت منفی شدن ضرایب نفوذ می‌شود (الیوت و واکر، ۱۹۸۲؛ و سیدزاده و همکاران، ۲۰۱۹).

بنابراین، در این پژوهش، یک رویکرد جدید برای تعیین مکان نقطه میانی بهینه بر اساس متوسط فاصله پیشروی آب در مرحله پیشروی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

هدف این رویکرد نوآورانه، رفع محدودیت‌های روش دو نقطه‌ای الیوت و واکر (۱۹۸۲)، با لحاظ تغییرات دینامیکی بین پیشروی جبهه آب و نفوذ است. نقطه مذکور که متاثر از میزان نفوذ تمامی نقاط مزرعه است، نماینده مناسبی برای وضعیت نفوذپذیری مزرعه در جهت طول است. نقطه مکانی که در آن میانگین فاصله پیشروی روی می‌دهد، ثابت نبوده و با تغییر شرایط نفوذپذیری خاک مزرعه، تغییر می‌نماید، بنابراین وضعیت‌هایی را که منجر به شکست روش دو نقطه‌ای در شرایط استفاده از نقطه وسط مزرعه ایجاد می‌شود رفع می‌نماید (سیدزاده و همکاران، ۲۰۲۰). در پژوهش حاضر میزان دقت روش پیشنهادی با روش دو نقطه‌ای الیوت و واکر (۱۹۸۲) در برآورد ضرایب معادله نفوذ کاستیاکوف لوئیس مورد بررسی قرار می‌گیرد.

اگر خاک مزرعه همگن باشد، پیشروی آب در طول مزرعه به صورت یک رابطه توانی (رابطه (۲)) است. با میانگین‌گیری انتگرالی از رابطه ۲، متوسط فاصله پیشروی آب در طول مزرعه به صورت زیر حاصل خواهد شد (رابطه (۳)):

$$\bar{x} = \frac{\int_0^{t_L} x dt_x}{t_L} \xrightarrow{x=pt_x^r} \bar{x} = \frac{\int_0^{t_L} pt_x^r dt_x}{t_L} = \frac{p}{t_L(r+1)} t_x^{r+1} \Big|_0^{t_L} \rightarrow \bar{x} = \frac{p}{r+1} t_L^r \quad (3)$$

که در آن L طول مزرعه و t_L زمان رسیدن آب به انتهای مزرعه است.

باتوجه به اینکه متوسط فاصله پیشروی در متوسط زمان پیشروی روی می دهد، بنابراین:

$$\bar{x} = p t_x^{-r} \rightarrow \bar{t}_x = \left(\frac{\bar{x}}{p}\right)^{\frac{1}{r}} \xrightarrow{\bar{x} = \frac{p}{r+1} t_L^r} \bar{t}_x = \left(\frac{t_L^r}{r+1}\right)^{\frac{1}{r}} = \frac{t_L}{(r+1)^{\frac{1}{r}}} \quad (۴)$$

مقدار \bar{x} در رابطه (۴) با استفاده از رابطه (۵) محاسبه می شود:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{j=1}^{n-1} \left[\left(\frac{x_{j+1} + x_j}{2} \right) (t_{j+1} - t_j) \right]}{t_L} \quad (۵)$$

که در آن j شمارنده و n تعداد ایستگاههای اندازه گیری پیشروی آب در طول مزرعه است. با تلفیق روابط (۳) و (۴)، پارامتر r مطابق رابطه (۶) محاسبه می شود.

$$\bar{t}_x = t_L \left(\frac{\bar{x}}{L}\right)^{\frac{1}{r}} \rightarrow r = \frac{\ln\left(\frac{L}{\bar{x}}\right)}{\ln\left(\frac{t_L}{\bar{t}_x}\right)} = \left[\left(\frac{L}{\bar{x}}\right) - 1 \right] \quad (۶)$$

سپس باتوجه به مقادیر \bar{x} و r و با استفاده از رابطه (۳)، می توان مقدار p را تعیین کرد:

$$p = \frac{\bar{x}(r+1)}{t_L^r} \quad (۷)$$

بنابراین در ابتدا با استفاده از داده های مزرعه ای و با استفاده از رابطه (۵)، مقدار \bar{x} تعیین می شود. سپس با استفاده از مقدار \bar{x} و رابطه (۶) به ترتیب مقادیر r و \bar{t}_x محاسبه می شود و سپس مقدار p با استفاده از رابطه (۷) محاسبه می گردد. سپس با قرار دادن اطلاعات این نقطه $\left[(x, t_x) = (\bar{x}, \bar{t}_x) \right]$ و نقطه انتهایی مزرعه (L, t_L) ، در معادله موازنه حجم، ضرایب رابطه نفوذ کاستیاکف - لوئیس محاسبه می شود.

پناهی و همکاران (۲۰۲۱) در مطالعات خود، با استفاده از داده های پیشروی آب در طول مزرعه، متوسط زمان پیشروی را برای همه ایستگاه های اندازه گیری محاسبه کردند. سپس ایستگاهی که مدت زمان پیشروی آن، برابر با نصف متوسط زمان پیشروی ایستگاه انتهایی مزرعه بود را به عنوان نقطه میانی در نظر گرفتند. اما در این مطالعه، در ابتدا با استفاده از داده های پیشروی، متوسط فاصله پیشروی آب در طول مزرعه محاسبه می شود، سپس با استفاده از رابطه پیشروی منتج از نقطه جدید و نقطه انتهایی مزرعه، متوسط زمان پیشروی مزرعه محاسبه می گردد. اطلاعات این نقطه جدید، به عنوان نقطه میانی استفاده می شود. روش دو نقطه ای الیوت و واکر (۱۹۸۲) در استفاده از معادله موازنه حجم برای تعیین ضرایب رابطه نفوذ کاستیاکف - لوئیس به صورت رابطه (۸) است. در این معادله حجم آب ورودی به مزرعه در مرحله پیشروی، برابر است با مجموع حجم آب ذخیره شده سطحی و زیرسطحی (نفوذ یافته).

$$V_x = \sigma_z k t_x^a = \frac{Q t_x}{x} - \sigma_y A_o - \frac{f_o t_x}{r+1} \quad (۸)$$

که در آن Q دبی جریان ورودی (m^3/s)؛ A_o سطح مقطع جریان در ابتدای ورودی مزرعه (m^2)؛ x فاصله از ابتدای مزرعه (m)؛ σ_y و σ_z ضرایب میانگین (عوامل شکل) و t_x زمان پیشروی (min) است.

سپس با استفاده از رابطه (۸) و اطلاعات دو نقطه وسط و انتهایی مزرعه $\left[(L, t_L) \right]$ و $\left[(L/2, t_{L/2}) \right]$ ، دو پارامتر رابطه

نفوذ کوستیاکوف - لوئیس به صورت زیر بدست می آید:

$$a = \frac{\log\left(\frac{V_L}{\frac{V_L}{2}}\right)}{\log\left(\frac{t_L}{\frac{t_L}{2}}\right)} \quad \& \quad k = \frac{V_L}{\sigma_z t_L^a} \quad (9)$$

که در آن مقدار σ_y برابر ۰/۷۷ و مقدار σ_z با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$\sigma_z = \int_0^L k t_x^a dx = r\beta(r, a+1) \cong \frac{a+r(1-a)+1}{(1+a)(1+r)} \quad (10)$$

در روش پیشنهادی در این مطالعه، باتوجه به مکان غیرثابت برای نقطه میانی، از اطلاعات نقطه انتهایی مزرعه و نقطه میانی تعیین شده $\left[(\bar{x}, \bar{t}_x) \& (L, t_L) \right]$ برای تعیین ضرایب رابطه پیشروی و همچنین ضرایب رابطه نفوذ کاستیاکف - لوئیس استفاده می‌شود؛ بنابراین رابطه (۹) به صورت معادله (۱۱) تبدیل می‌شود:

$$a = \frac{\log\left(\frac{V_L}{\bar{V}_x}\right)}{\log\left(\frac{t_L}{\bar{t}_x}\right)} \quad \& \quad k = \frac{V_L}{\sigma_z t_L^a} \quad (11)$$

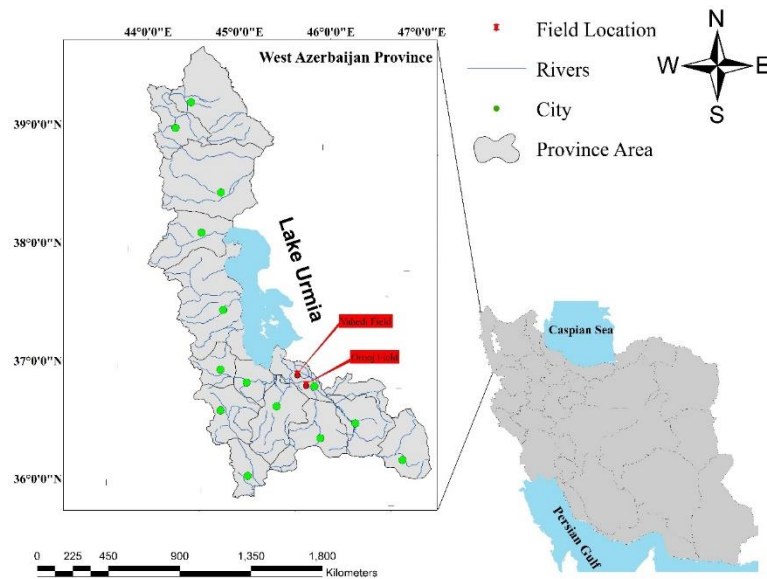
روش پژوهش

۱. داده‌های مزرعه‌ای پژوهش

دو مزرعه آبیاری نواری انتها بسته، با نام‌های واحدی و اروج از شبکه آبیاری و زهکشی زرینه‌رود واقع در غرب ایران (شکل (۱)) ارزیابی شد. بافت خاک مزارع لوم شنی و محصول آنها گیاه یونجه بود. در مزرعه واحدی، دو نوار و در هر نوار ۲ رخداد آبیاری و در مزرعه اروج یک نوار در ۳ آبیاری در شهر یورماه ارزیابی شد. طول نوارها به فواصل ۱۰ متری ایستگاه‌گذاری شد و با استفاده از فلوم WSC^۱ نوع ۳، دبی ورودی به نوارها اندازه‌گیری گردید. مشخصات هندسی نوارهای آزمایشی مزارع مورد مطالعه در جدول (۱) ذکر شده است.

جدول ۱. مشخصات هندسی نوارهای آزمایشی مزارع مورد مطالعه در شبکه آبیاری و زهکشی زرینه‌رود

نام مزرعه	شماره نوار	طول نوار (متر)	عرض نوار (متر)	شیب طولی (درصد)	تعداد رویداد آبیاری ارزیابی شده	شرایط پایین دست نوار
واحدی	۱	۱۰۹	۳	۰/۲۷	۲	انتها بسته
	۲	۱۰۷/۵	۳	۰/۲۶	۲	
اروج	۱	۱۲۶	۷/۲۵	۰/۴۷	۳	



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی مزارع مورد مطالعه در شبکه آبیاری و زهکشی زرینه رود

۲. شاخص های ارزیابی

میانگین قدر مطلق خطای نسبی^۱ زمان پیشروی (MARE)

برای بررسی دقت روش پیشنهادی در تخمین زمان پیشروی ایستگاهها در هر رخداد آبیاری و مقایسه آن با نتایج روابط پیشروی حاصل از روش دو نقطه ای الیوت و واکر (۱۹۸۲)، از شاخص میانگین قدر مطلق خطای نسبی استفاده شد. که با استفاده از رابطه (۱۲) محاسبه می شود.

$$\text{MARE}(\%) = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{t_{i,O} - t_{i,P}}{t_{i,O}} \right| \quad (12)$$

که در آن $t_{i,O}$ زمان پیشروی مزرعه ای واقعی و $t_{i,P}$ زمان پیشروی حاصل از روش پیشنهادی یا روش الیوت و واکر (۱۹۸۲) است.

ریشه مجموع مربعات خطا^۲ (RSSE)

الیوت و واکر (۱۹۸۲) برای ارزیابی رابطه پیشروی خود از شاخص ریشه مجموع مربعات خطا استفاده کردند. این شاخص مجموع اختلاف زمان پیشروی واقعی و تخمین زده شده را در تمام ایستگاه های اندازه گیری به صورت مطلق نشان میدهد. شاخص مذکور با استفاده از رابطه (۱۳) محاسبه می شود.

$$\text{RSSE} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (t_{i,P} - t_{i,O})^2} \quad (13)$$

ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده^۳ (nRMSE)

ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده (nRMSE) یک شاخص آماری است که برای اندازه گیری دقت پیش بینی های یک مدل با مقایسه مقادیر پیش بینی شده با مقادیر مشاهده شده یا واقعی، استفاده می شود. این شاخص، یک نسخه نرمال شده از

1. Mean Absolute Relative Error
2. Root Sum Square Error
3. Normalized Root Mean Squared Error

شاخص ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) است که امکان تفسیر آسان تر را فراهم می کند. این شاخص با استفاده از رابطه (۱۴) محاسبه می شود.

$$nRMSE = \frac{RMSE}{t_{o-max} - t_{o-min}} = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (t_{i,O} - t_{i,P})^2}} \quad (14)$$

که در آن t_{o-max} و t_{o-min} به ترتیب بیشینه و کمینه زمان پیشروی مزرعه ای هستند.

در شاخص nRMSE می توان برای نرمال سازی از میانگین یا انحراف استاندارد مقادیر مشاهده شده نیز استفاده کرد، اما نرمال سازی با استفاده از اختلاف بیشینه و کمینه داده های مشاهداتی رایج تر است و این رابطه برای مجموعه داده های مختلف سازگارتر است.

مقدار این شاخص از صفر تا بی نهایت متغیر است. مقدار صفر به این معنی است که مقادیر پیش بینی شده دقیقاً با مقادیر مشاهده شده مطابقت دارند و در نتیجه هیچ خطایی وجود ندارد. مقادیر بیشتر nRMSE بیانگر عملکرد نامناسب مدل و با خطای بالاتر بین مقادیر پیش بینی شده و مشاهده شده است. در حالت کلی مقادیر $nRMSE \leq 0.1$ ، $0.1 < nRMSE \leq 0.2$ ، $0.2 < nRMSE \leq 0.3$ و $nRMSE > 0.3$ به ترتیب بیانگر عالی، خوب، متوسط و ضعیف بودن انطباق داده های پیش بینی شده و مشاهده شده است (موریاسی و همکاران^۱، ۲۰۰۷).

قدرمطلق خطای نسبی^۲ عمق آب نفوذی (ARE)

یکی از پارامترهای مهم در طراحی و ارزیابی سامانه های آبیاری سطحی، معادله نفوذ تجمعی است که ضرایب آن، با استفاده از اطلاعات دبی ورودی و جبهه پیشروی جریان و مدل موازنه حجم، استخراج می شود. در پژوهش حاضر، با استفاده از روابط پیشروی محاسبه شده، ضرایب معادله نفوذ تجمعی کاستیاکف- لوئیس محاسبه شد و سپس میزان قدرمطلق خطای نسبی عمق آب نفوذی معادلات مذکور نسبت به عمق آب نفوذی واقعی، با استفاده از رابطه (۱۵) برآورد شد. متوسط عمق آب نفوذی واقعی از تقسیم کل حجم آب نفوذی بر مساحت نوار به دست می آید.

$$Error(\%) = 100 \left| \frac{i_{Exp} - i_{Calc}}{i_{Exp}} \right| \quad (15)$$

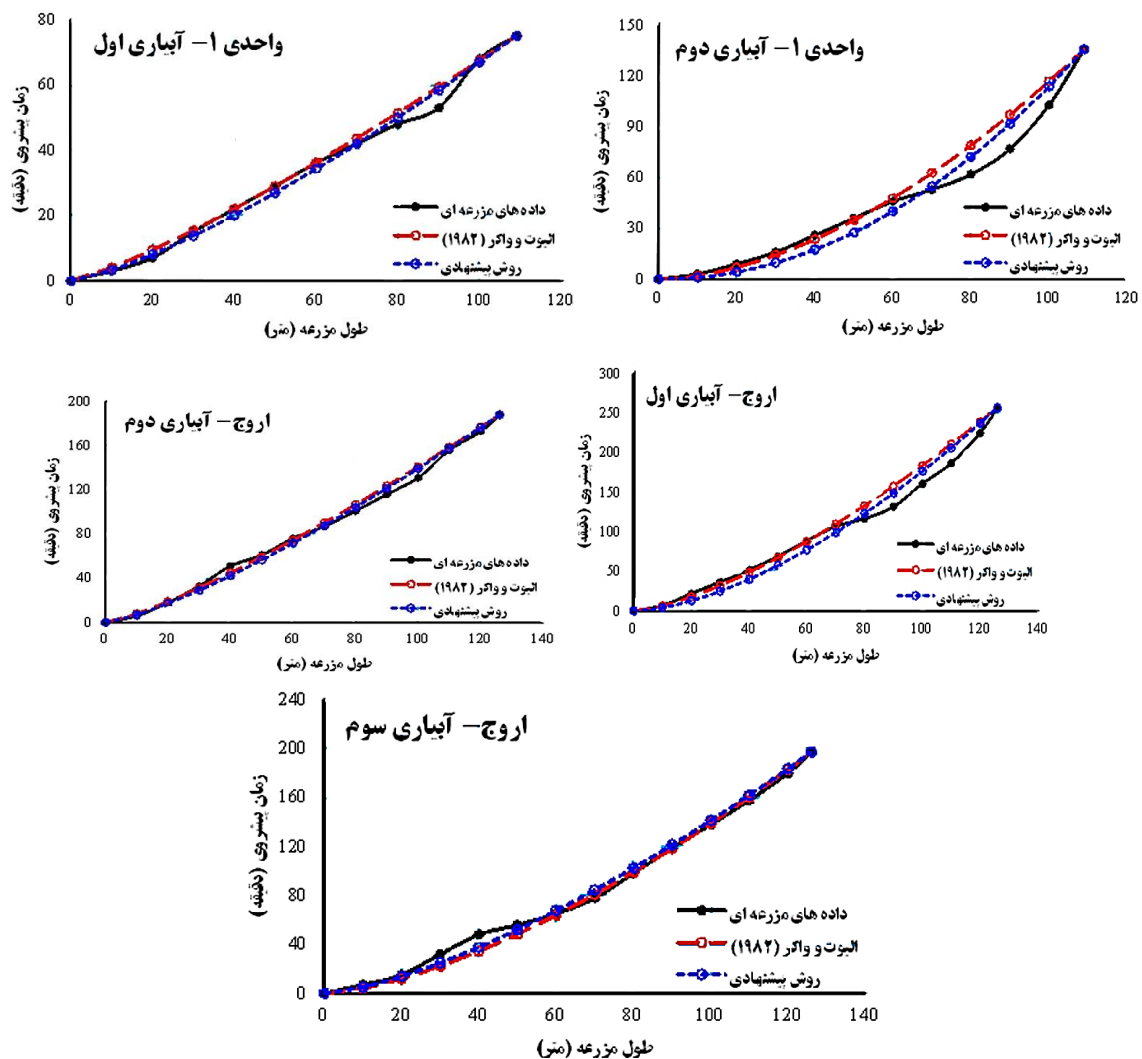
که در آن i_{Exp} و i_{Calc} به ترتیب عمق آب نفوذ تجمعی واقعی و محاسباتی است.

یافته های پژوهش

با استفاده از روش پیشنهادی در این مطالعه و همچنین روش دو نقطه ای الیوت و واکر (۱۹۸۲)، مقادیر ضرایب رابطه پیشروی آب در طول مزرعه محاسبه شد (جدول (۲)). همچنین شاخص میانگین قدرمطلق خطای نسبی روابط مذکور در برآورد مدت زمان پیشروی آب ایستگاه ها نیز در جدول (۲) ذکر گردیده است. در شکل (۲)، منحنی های واقعی پیشروی و محاسباتی حاصل از روابط مذکور نشان داده شده اند.

جدول ۲. مقادیر ضرایب معادله پیشروی (p, r) محاسبه شده با استفاده از روش الیوت و واکر (۱۹۸۲) و روش پیشنهادی و میانگین قدرمطلق خطای نسبی روابط پیشروی محاسبه شده در پیش‌بینی پیشروی آب در طول نوارها

نام مزرعه	شماره نوار	شماره آبیاری	فاصله نقطه میانی		پارامتر r		پارامتر p		میانگین قدرمطلق خطای نسبی روابط پیشروی (درصد)
			L/2	روش پیشنهادی	الیوت و واکر (۱۹۸۲)	روش پیشنهادی	الیوت و واکر (۱۹۸۲)		
واحدی	۱	۱	۵۴/۵	۶۱/۹	۰/۸۲	۰/۷۶	۳/۱۸	۴/۰۷	۸/۹
		۲	۵۴/۵	۷۳/۲	۰/۵۷	۰/۴۹	۶/۵۶	۹/۸۵	۱۵/۱
	۲	۱	۵۳/۸	۵۹/۵	۰/۸۸	۰/۸۱	۲/۴۰	۳/۲۴	۸/۶
		۲	۵۳/۸	۶۵/۰	۰/۶۴	۰/۶۵	۷/۱۴	۶/۸۲	۱۴/۰
اروج	۱	۱	۶۳/۰	۷۷/۹	۰/۶۹	۰/۶۲	۲/۷۱	۴/۰۸	۸/۹
		۲	۶۳/۰	۷۱/۲	۰/۸۰	۰/۷۷	۱/۸۸	۲/۲۳	۶/۷
		۳	۶۳/۰	۷۴/۴	۰/۶۶	۰/۶۹	۳/۸۶	۳/۲۲	۱۰/۸



شکل ۲. منحنی های پیشروی آب در داخل مزارع مورد مطالعه، حاصل از داده های مزرعه ای، روش دو نقطه ای و روش پیشنهادی

باتوجه به جدول (۲)، در هر کدام از نوارهای آزمایشی و یا آبیاری‌های متفاوت، موقعیت نقطه میانی در روش پیشنهادی متفاوت است. چنانکه با تغییر دبی جریان ورودی، رطوبت خاک، ضریب زبری، پوشش گیاهی و یا سایر پارامترهای هیدرولیکی و یا هندسی مزرعه، تغییراتی در جبهه پیشروی جریان ایجاد شود، موقعیت نقطه میانی تغییر می‌نماید. با تغییر موقعیت این نقطه، ضرایب معادله پیشروی نیز متفاوت خواهد بود. در روش الیوت و واکر (۱۹۸۲)، در هر نوار آبیاری، موقعیت نقطه میانی همان وسط مزرعه می‌باشد. بر اساس شاخص میانگین قدرمطلق خطای نسبی، روابط پیشروی حاصل از روش الیوت و واکر (۱۹۸۲) در برخی موارد بهتر از روابط پیشروی حاصل از روش پیشنهادی است و در سایر موارد روابط پیشروی حاصل از روش پیشنهادی دارای خطای کمتری هستند.

باتوجه به شکل (۲)، مشاهده می‌شود که در بیشتر رخدادهای آبیاری، منحنی‌های پیشروی هر دو روش محاسباتی، خیلی به یکدیگر نزدیک هستند و بر منحنی پیشروی واقعی هم منطبق می‌باشند. به عبارتی هر دو رابطه در تخمین مدت زمان‌های پیشروی آب در تمام طول نوار، از عملکرد قابل قبولی برخوردار هستند. در آبیاری دوم مزرعه واحدی ۱ و ۲ و همچنین آبیاری اول مزرعه اروج که روند پیشروی آب در نیمه ابتدایی مزرعه و نیمه انتهایی آن، یکسان نیست، منحنی‌های پیشروی محاسباتی بیشترین فاصله را با منحنی پیشروی واقعی دارند. رابطه پیشروی حاصل از روش پیشنهادی به صورت نمایی حد فاصل این دو قسمت از مزرعه را نمایش می‌دهد. سه رخداد آبیاری مذکور، بیشترین میانگین قدرمطلق خطای نسبی را در پیش‌بینی پیشروی آب در طول نوارها دارند.

شاخص قدرمطلق خطای نسبی برای ایستگاه‌های ابتدایی مزرعه که از مدت‌زمان پیشروی کوچکی برخوردار هستند، میزان خطا را به صورت درصد بالایی نشان می‌دهد، حتی اگر زمان پیشروی تخمین زده شده اختلاف ناچیزی با زمان پیشروی واقعی داشته باشد. به عنوان مثال چنانچه زمان پیشروی یک ایستگاه ۶ دقیقه و زمان پیشروی تخمین زده شده ۳/۵ دقیقه باشد، میزان قدرمطلق خطای نسبی تخمین، ۴۲ درصد خواهد شد. در حالی که میزان اختلاف زمان‌های پیشروی واقعی و محاسباتی، ۲/۵ دقیقه است؛ بنابراین این شاخص به دلیل نشان دادن میزان اختلافات به صورت نسبی، معیار مناسبی جهت مقایسه روابط پیشروی نمی‌باشد (پناهی و همکاران، ۲۰۲۱). نتایج ارزیابی روابط پیشروی الیوت و واکر (۱۹۸۲) و روش پیشنهادی بر اساس شاخص ریشه مجموع مربعات خطا در جدول (۳) ارائه شده است.

جدول ۳. نتایج ارزیابی میزان دقت روابط پیشروی الیوت و واکر (۱۹۸۲) و روش پیشنهادی بر اساس شاخص ریشه مجموع مربعات

خطا و ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده

نام مزرعه	شماره نوار	شماره آبیاری	RSSE (min)		nRMSE	
			روش الیوت و واکر (۱۹۸۲)	روش پیشنهادی	روش الیوت و واکر (۱۹۸۲)	روش پیشنهادی
واحدی	۱	۱	۷/۹	۶/۸	۰/۰۳۰	۰/۰۲۶
		۲	۳۱/۹	۲۶/۴	۰/۰۶۸	۰/۰۵۶
	۲	۱	۶/۶	۴/۹	۰/۰۲۵	۰/۰۱۸
		۲	۷/۶	۷/۶	۰/۰۳۲	۰/۰۳۲
اروج	۱	۱	۴۸/۳	۴۲/۴	۰/۰۵۰	۰/۰۴۴
		۲	۱۶/۵	۱۵/۸	۰/۰۲۳	۰/۰۲۳
		۳	۱۹/۲	۱۷/۰	۰/۰۲۶	۰/۰۲۳

باتوجه به جدول (۳)، ملاحظه می‌شود که براساس شاخص ریشه مجموع مربعات خطا، دقت معادله پیشروی روش پیشنهادی در تمامی آبیاری‌ها، بیشتر از معادله پیشروی الیوت و واکر (۱۹۸۲) می‌باشد. متوسط مقدار شاخص RSSE برای معادله پیشروی روش پیشنهادی ۱۷/۳ دقیقه و روش الیوت و واکر (۱۹۸۲)، ۱۹/۷ دقیقه می‌باشد. به عبارتی میزان خطای مذکور، بیانگر مجموع خطای مطلق روابط مذکور در تخمین مدت‌زمان پیشروی آب برای تمامی ایستگاه‌های اندازه‌گیری مزارع مورد مطالعه است. بر

اساس شاخص $nRMSE$ ، در همه آبیاری‌ها هر دو روش دارای بالاترین دقت هستند و هر دو روش به صورت کیفی داده‌های پیشروی را با درجه عالی تخمین می‌زنند.

در شاخص $RSSE$ ، اختلاف زمان‌های پیشروی واقعی و محاسباتی نقاط مختلف مزرعه از اهمیت یکسانی برخوردار است و به عبارتی برای نقاط مختلف مزرعه، وزن یکسانی لحاظ می‌شود (سیدزاده و همکاران، ۲۰۲۰). در حالیکه اختلاف زمان‌های پیشروی واقعی و محاسباتی در نقاط مختلف مزرعه از اهمیت یکسانی برخوردار نیست. به عنوان مثال، در ابتدای مزرعه به دلیل برقراری جریان از شروع آبیاری، سرعت نفوذ نزدیک به سرعت نفوذ نهایی خاک می‌باشد و اختلاف ۵ دقیقه در زمان پیشروی خطای زیادی را در تخمین عمق نفوذ ایجاد نخواهد کرد در حالیکه در انتهای مزرعه چون در زمانهای ابتدایی نفوذ قرار دارد، و سرعت نفوذ بالا است، این میزان اختلاف خطای بیشتری را در تخمین عمق نفوذ ایجاد خواهد کرد (پناهی و همکاران، ۲۰۲۱)؛ بنابراین با توجه به اهمیت استفاده از رابطه پیشروی در تعیین ضرایب رابطه نفوذ و اهمیت دقت معادله نفوذ در طراحی و ارزیابی سامانه‌های آبیاری سطحی، شاخص‌های $RSSE$ و $nRMSE$ ، شاخص‌های کافی برای ارزیابی روابط پیشروی نیست و لازم است برای ارزیابی روابط پیشروی حاصل از روش الیوت و واکر (۱۹۸۲) و روش پیشنهادی، از شاخص قدرمطلق خطای نسبی عمق آب نفوذی هم استفاده کرد؛ بنابراین با استفاده از اطلاعات نقطه میانی روش پیشنهادی و روش الیوت و واکر (۱۹۸۲)، ضرایب معادله نفوذ تجمعی کاستیاکف - لوئیس محاسبه شد که نتایج آن در جدول (۴) ذکر شده است.

جدول ۴. ضرایب معادله نفوذ تجمعی کاستیاکف - لوئیس حاصل از روش الیوت و واکر (۱۹۸۲) و روش پیشنهادی

$f_0 \left(\frac{\text{mm}}{\text{hr}} \right)$	روش پیشنهادی		روش الیوت و واکر (۱۹۸۲)		شماره آبیاری	شماره نوار	نام مزرعه
	$k \left(\frac{\text{mm}}{\text{hr}^a} \right)$	$a(-)$	$k \left(\frac{\text{mm}}{\text{hr}^a} \right)$	$a(-)$			
۱۳/۹۸	۲۲۲/۳۱	-۰/۳۰۸	۲۱۶/۵۸	-۰/۲۲۶	۱	۱	واحد ی
	۱۳۲/۶۵	-۰/۶۱۳	۱۴۴/۳۱	-۰/۵۱۴	۲		
۱۳/۹۸	۲۴۴/۵۷	-۰/۲۳۹	۲۳۵/۰۸	-۰/۱۴۲	۱	۲	ی
	۱۶۸/۳۴	-۰/۴۸۰	۱۶۹/۸۱	-۰/۵۱۷	۲		
۹/۲۴	۱۱۹/۴۵	-۰/۳۸۶	۱۳۲/۲۷	-۰/۳۰۰	۱	۱	اروج
	۸۱/۵۱	-۰/۱۸۶	۸۳/۳۲	-۰/۱۴۸	۲		
	۱۰۰/۷۳	-۰/۳۰۳	۹۶/۱۴	-۰/۳۶۱	۳		

با استفاده از روابط نفوذ به دست آمده متوسط عمق نفوذ محاسباتی برای هر کدام از آبیاری‌ها محاسبه شد و میزان قدرمطلق خطای نسبی آنها نسبت به عمق نفوذ واقعی محاسبه گردید. در جدول (۵) میزان قدرمطلق خطای نسبی معادلات نفوذ روش‌های مختلف در برآورد متوسط عمق آب نفوذی در مزرعه برای هر کدام از آبیاری‌ها ذکر شده است.

جدول ۵. میزان قدرمطلق خطای نسبی معادلات نفوذ تجمعی کاستیاکف - لوئیس حاصل از روش الیوت و واکر (۱۹۸۲) و روش پیشنهادی در تخمین متوسط عمق آب نفوذی در مزرعه

قدرمطلق خطای نسبی عمق نفوذ (درصد)		شماره آبیاری	شماره نوار	نام مزرعه	
روش پیشنهادی	روش الیوت و واکر (۱۹۸۲)				
۰/۵	۶/۲	۱	۱	واحدی	
۶/۵	۶/۷	۲			
۴/۱	۵/۷	۱	۲		
۲/۷	۱/۲	۲			
۲/۳	۲/۰	۱	۱		اروج
۵/۳	۶/۴	۲			
۰/۳	۱/۷	۳			

جدول (۵) نشان می‌دهد که در غالب آبیاری‌ها، میزان دقت معادلات نفوذ به‌دست‌آمده از روش پیشنهادی بالاتر از روش الیوت واکر (۱۹۸۲) است. هر دو روش دارای دامنه خطای کمتر از ۱۰ درصد می‌باشند، به عبارت دیگر هر دو روش دارای دقت قابل قبول هستند. متوسط قدرمطلق خطای نسبی معادلات نفوذ حاصل از روش الیوت و واکر (۱۹۸۲) و روش پیشنهادی به ترتیب ۴/۳ و ۳/۱ درصد است.

بحث

این مطالعه روش جدیدی را برای تعیین نقطه میانی بهینه در روش دو نقطه‌ای برای تخمین ضرایب معادله نفوذ کاستیاکوف - لوئیس ارائه می‌کند. روش سنتی نقطه میانی ثابت که اغلب در مطالعات و طراحی سامانه‌های آبیاری سطحی استفاده می‌شود، می‌تواند در برخی موارد منجر به عدم دقت و در مزارع با تغییرات نفوذپذیری زیاد، منجر به شکست می‌شود. با معرفی یک مکان میانی پویا بر اساس متوسط فاصله پیشروی، روش پیشنهادی بازتاب دقیق‌تری از پدیده نفوذ خاک مزرعه ارائه می‌کند.

نتیجه‌گیری

تحلیل داده‌های آبیاری دو مزرعه آبیاری نواری نشان داد که بر اساس شاخص ریشه مجموع مربعات خطا، منحنی‌های پیشروی محاسباتی روش پیشنهادی به طور مداوم مطابقت بیشتری با داده‌های مزرعه‌ای دارد؛ بنابراین، روش نقطه میانی پویای پیشنهادی، بهبود قابل توجهی در دقت و قابلیت اطمینان تخمین ضرایب رابطه نفوذ در آبیاری سطحی ارائه می‌کند که به مدیریت بهتر آبیاری و کارایی مصرف آب کمک می‌کند.

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.

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

References

- Benami, A., & Ofen, A. (1984). Irrigation engineering: sprinkler, trickle, surface irrigation; principles, design and agricultural practices. *Agricultural Water Management*, 9(3), 263-264 <https://www.sidalc.net/search/Search2Record/unfao:614476>
- Christiansen, J. E., Bishop, A. A., Kiefer, F. W., & Fok, Y. (1966). Evaluation of intake rate constants as related to advance of water in surface irrigation. *Trans. ASAE*, 9(5), 671-674. <https://elibrary.asabe.org/abstract.asp?aid=40068>
- Elliott, R. L., & Walker, W. R. (1982). Field evaluation of furrow infiltration and advance functions. *Trans. ASCE*, 25(2), 396-400. <https://elibrary.asabe.org/abstract.asp?aid=33542>
- Elliott, R. L., Walker, W. R., & Skogerboe, G. V. (1983). Infiltration parameters from furrow irrigation advance data. *Trans. ASAE*, 26(6), 1726-1731. <https://elibrary.asabe.org/abstract.asp?aid=33833>
- Green, W. H., & Ampt, G. A. (1911). Studies on Soil Physics. *The Journal of Agricultural Science*, 4(1), 1-24. <https://doi.org/10.1017/S0021859600001441>
- Horton RE. (1939). Analysis of runoff-plat experiments with varying infiltration capacity. *Transactions, American Geophysical Union*, 20, 693-711. <https://doi.org/10.1029/TR020i004p00693>
- Karmeli, D., Salazar, L., & Walker, W.R. (1978). Assessing the spatial variability of irrigation water applications. *Environmental Protection Technology Series EPA (USA) Publication*, United states, North America. <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPURL.cgi?Dockey=2000I5UX.TXT>
- Key, M. (1990). Recent developments for improving water management in surface irrigation and overhead irrigation. *Agri. Water Manage.* 17, 7-23. [https://doi.org/10.1016/0378-3774\(90\)90052-Z](https://doi.org/10.1016/0378-3774(90)90052-Z)
- Kostiakov, A.N. (1932). On the dynamics of the coefficient of water percolation in soils and on the necessity for studying it from a dynamic point of view for purposes of amelioration. *Transactions of the sixth committee International Society of Soil Science*; Russian, Part A, 17-21. <https://cir.nii.ac.jp/crid/1570572699970385664?lang=en>
- Lewis, M. R. (1937). The rate of infiltration of water in irrigation-practice. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 18(2), 361-368. <https://doi.org/10.1029/TR018i002p00361>
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885-900. <https://doi.org/10.13031/2013.23153>
- Oyonarte, N., Mateos, L., & Palomo, M. (2002). Infiltration variability in furrow irrigation. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 128, 26-33. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2002\)128:1\(26\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2002)128:1(26))
- Panahi, A., Seyedzadeh, A., & Maroufpoor, E. (2021). Investigating the midpoint of a two-point method for predicting advance and infiltration in surface irrigation. *Irrigation and Drainage*, 70(5), 1095-1106. <https://doi.org/10.1002/ird.2618>
- Panahi, A., Seyedzadeh, A., Bahrami, M., & Maroufpoor, E. (2023). Determining Kostiakov-Lewis infiltration coefficients using the water advance relationship and optimization. *Irrigation and Drainage*, 72(4), 1026-1037. <https://doi.org/10.1002/ird.2848>
- Philip, J. R. (1957). The theory of infiltration: 4. Sorptivity and algebraic infiltration equations. *Soil science*, 84(3), 257-264. https://journals.lww.com/soilsci/citation/1957/09000/THE_THEORY_OF_INFILTRATION__4__SORPTIVITY_AND.10.aspx

- Seyedzadeh, A., Khazaee, P., Siosemardeh, A., & Maroufpoor, E. (2022). Irrigation management evaluation of multiple irrigation methods using performance indicators. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, 28(3), 303-312. <https://doi.org/10.1080/09715010.2021.1891470>
- Seyedzadeh, A., Panahi, A., & Maroufpoor, E. (2020a). A new analytical method for derivation of infiltration parameters. *Irrigation Science*, 38, 449-460. <https://doi.org/10.1007/s00271-020-00686-z>
- Seyedzadeh, A., Panahi, A., Maroufpoor, E., & Singh, V. P. (2019). Development of an analytical method for estimating Manning's coefficient of roughness for border irrigation. *Irrigation Science*, 37, 523-531. <https://doi.org/10.1007/s00271-019-00631-9>
- Seyedzadeh, A., Panahi, A., Maroufpoor, E., Singh, V. P., & Maheshwari, B. (2020b). Developing a novel method for estimating parameters of Kostiaikov-Lewis infiltration equation. *Irrigation Science*, 38, 189-198. <https://doi.org/10.1007/s00271-019-00660-4>
- Shepard, J., Wallender, W., & Hopmans, J. (1993). One-point method for estimating furrow infiltration. *Transactions of the ASAE*, 36, 395-404. <https://elibrary.asabe.org/abstract.asp?aid=28351>
- Smith, R.E. (1972). The infiltration envelope: results from a theoretical infiltrometer. *J. Hydrol*, 17, 1-21. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(72\)90063-7](https://doi.org/10.1016/0022-1694(72)90063-7)
- USDA, Soil Conservation Service (SCS). (1974). National engineering handbook, section 15 Irrigation, Chapter 4. Border Irrigation. *United States Department of Agriculture publications*, Washington, DC, USA. https://irrigationtoolbox.com/NEH/Part623_Irrigation/neh15-04.pdf
- Valiantzas, J., Aggelides, S., & Salsalou, A. (2001). Furrow infiltration estimation from time to a single advance point. *Agricultural Water Management*, 52, 17-32. [https://doi.org/10.1016/S0378-3774\(01\)00128-7](https://doi.org/10.1016/S0378-3774(01)00128-7)
- Walker, W.R. (2005). Multilevel calibration of furrow infiltration and roughness. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 131, 129-136. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2005\)131:2\(129\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2005)131:2(129))
- Walker, W.R., & Skogerboe, G.V. (1987). Surface irrigation. Theory and practice. Prentice-Hall publications, America. <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/full/10.5555/19872432240>
- Zerihun, D., Feyen, J., & Reddy, J.M. (1996). Sensitivity analysis of furrow-irrigation performance parameters. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 122, 49-57. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(1996\)122:1\(49\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(1996)122:1(49))