Journal of Water and Soil Science
Vol. 30, No. 2, 2026, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran. DOI: 10.47176/jwss.30.2.27457

Improving the EDOSIM Surface Irrigation Simulation-Optimization Model: Calibration of Infiltration Parameters and Roughness Coefficient

Seyed Mohammad Mirhashemi[1], Mohammad Shayannejad[1] and Mahmood Akbari[2*]

(Received: September 1-2025; Revised: January 10-2025; Accepted: January 19-2025)

1- Department of Water Engineering, College of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.
2- Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture and Environment, Arak University, Arak, Iran.
*Corresponding author E-mail: m-akbarii@araku.ac.ir

Abstract

Proper estimation of soil water infiltration parameters and Manning roughness coefficient is one of the influential factors in the correct design and evaluation of surface irrigation systems. The EDOSIM model, as a surface irrigation simulation-optimization model, uses a combination of simulation with the Volume Balance model and meta-heuristic optimization. In the evaluation part of this model, the Elliott-Walker two-point method is used to estimate the parameters of the Kostiakov-Lewis infiltration equation. In this study, the Manning coefficient and parameters of the Kostiakov-Lewis infiltration equation were calibrated in furrow and border irrigation using observational advance data. This was done through three methods: Volume Balance model with constant shape coefficients (VB-CC), a combination of Volume Balance and Zero Inertia models (VB-ZI), and Volume Balance model with variable shape coefficients (VB-VC), using a total of 10 data series of border and furrow irrigation evaluation. Then, the ability to calibrate the infiltration parameters and roughness coefficient using a superior method was added to the EDOSIM model. The results showed that the VB-CC model had the best calibration accuracy and precision in 10 farms, according to the average statistical indices R^2=0.998, NRMSE=2.4%, and MBE=-0.06. The VB-ZI and VB-VC methods underestimated the advance length even with calibrated values. The use of the VB-CC model instead of the Elliott-Walker two-point method in the EDOSIM model increased the accuracy of simulation and optimization by reducing (improving) the objective function from an average of 0.34 to 0.13 in border irrigation and from an average of 0.86 to 0.36 in furrow irrigation. Therefore, it is recommended to use the VB-CC calibration method in the EDOSIM model as a powerful tool for optimal operation of surface irrigation systems.

Keywords: Furrow irrigation, Border irrigation, Elliott-Walker two-point method, Advance time, Volume balance model

How to cite this article: Mirhashemi, S.M., Shayannejad, M. and Akbari, M. 2026. Improving the EDOSIM Surface Irrigation Simulation-Optimization Model: Calibration of Infiltration Parameters and Roughness Coefficient. *J. Water and Soil Sci.* 30(2): 39-56. DOI: 10.47176/jwss.30.2.27457

Copyright © 2026 Mirhashemi et al. Published by Isfahan University of Technology.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/). Non-commercial uses of the work are permitted, provided the original work is properly cited.

نشریه علوم آب و خاک
سال سی‌ام/ شماره دوم / تابستان ۱۴۰۵/مقاله علمی-پژوهشی: صفحات ۳۹ تا ۵۶ 10.47176/jwss.30.2.27457

بهبود مدل شبیه‌سازی - بهینه‌سازی آبیاری سطحی EDOSIM: واسنجی پارامترهای نفوذ و ضریب زبری

سیدمحمد میرهاشمی[۱]، محمد شایان نژاد[۱]، محمود اکبری[۲*]

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۶/۱۰ ؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۰/۲۰ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۰/۲۹)

۱. گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران.
۲. گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و محیط زیست، دانشگاه اراک، اراک، ایران.
*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: m-akbarii@araku.ac.ir

چکیده

تخمین مناسب پارامترهای نفوذ آب در خاک و ضریب زبری مانینگ یکی از عوامل تأثیرگذار در طراحی و ارزیابی صحیح سامانه‌های آبیاری سطحی است. مدل EDOSIM یک مدل شبیه‌سازی - بهینه‌سازی آبیاری سطحی است که از تلفیق شبیه‌سازی با مدل بیلان حجمی و بهینه‌سازی فراابتکاری استفاده می‌کند. در بخش ارزیابی این مدل، از روش دونقطه‌ای الیوت - واکر برای تخمین پارامترهای معادله نفوذ کوستیاکف - لوئیس استفاده شده است. در این پژوهش ابتدا واسنجی ضریب مانینگ و پارامترهای معادله نفوذ کوستیاکف - لوئیس در ارزیابی آبیاری جویچه‌ای و نواری با استفاده از داده‌های پیشروی مشاهداتی صورت گرفت. این مهم از طریق سه مدل بیلان حجمی با ضرایب شکل ثابت (VB-CC)، ترکیب مدل بیلان حجمی و مدل اینرسی صفر (VB-ZI) و مدل بیلان حجمی با ضرایب شکل متغیر (VB-VC) با بهره‌گیری از مجموعاً ۱۰ سری داده ارزیابی آبیاری نواری و جویچه‌ای انجام شد. سپس قابلیت واسنجی پارامترهای نفوذ و ضریب زبری به روش برتر به مدل EDOSIM افزوده شد. نتایج نشان داد روش VB-CC با توجه به متوسط شاخص‌های آماری R^2=۰/۹۹۸، NRMSE=۲/۴٪ و MBE=-۰/۰۶ در ۱۰ مزرعه، بهترین صحت و دقت واسنجی را دارا بود. روش‌های VB-ZI و VB-VC حتی با مقادیر واسنجی‌شده نیز طول پیشروی را کم‌برآورد کردند. قرار گرفتن واسنجی به روش VB-CC به جای روش دونقطه‌ای الیوت واکر در مدل EDOSIM، با کمتر (بهتر) کردن تابع هدف از میانگین ۰/۳۴ به ۰/۱۳ در آبیاری نواری و از میانگین ۰/۸۶ به ۰/۳۶ در آبیاری جویچه‌ای، دقت شبیه‌سازی و بهینه‌سازی را افزایش داد؛ ازاین‌رو استفاده از واسنجی به روش VB-CC در مدل EDOSIM می‌تواند به‌عنوان ابزاری کارآمد برای بهره‌برداری بهینه سامانه‌های آبیاری سطحی استفاده شود.

واژه‌های کلیدی: آبیاری جویچه‌ای، آبیاری نواری، روش دونقطه‌ای الیوت - واکر، زمان پیشروی، مدل بیلان حجمی

حق انتشار این مستند، متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است. ۱۴۰۴ ©.

این مقاله تحت گواهی زیر منتشر شده و هر نوع استفاده غیرتجاری از آن مشروط به استناد صحیح به مقاله و با رعایت شرایط مندرج در آدرس زیر مجاز است: (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

مقدمه

نفوذ آب به خاک یکی از فرآیندهای مهم در فیزیک خاک و چرخه آبشناسی است و در کنترل عملکرد گیاهان زراعی و انتقال آب و املاح نقش دارد (۱۵). نفوذ آب در خاک به‌عنوان یک عامل مهم در سامانه‌های آبیاری سطحی، در انتخاب نوع سامانه، طراحی، ارزیابی، مدیریت و برنامه‌ریزی آبیاری نقش ایفا می‌کند. این پدیده عموماً تحت تأثیر شرایط خاک از جمله بافت، ساختمان و وجود لایه‌های غیرقابل نفوذ در نیمرخ خاک است (۱۱). تخمین مناسب میزان نفوذ آب در خاک یکی از عوامل تأثیرگذار در طراحی سامانه‌های آبیاری و توزیع آب است. هرچه معادله نفوذ دقیق‌تر ارزیابی شود، سیستم آبیاری مد نظر را بهتر می‌توان ارزیابی، طراحی و شبیه‌سازی کرد (۹). در غیر این صورت اگر پارامترهای معادله نفوذ با دقت مناسب و نزدیک به شرایط مزرعه‌ای تعیین نشوند، ممکن است آبیاری بی‌رویه و درنتیجه فرونشت عمقی و رواناب انتهایی به وجود آید و یا آبیاری، کمتر از مقدار مورد نیاز صورت پذیرد که در هر دو مورد بهره‌وری آبیاری کم خواهد بود (۲۹).

عمق و سرعت نفوذ آب در خاک را می‌توان با روش‌های مختلفی بسته به نوع سیستم آبیاری اندازه‌گیری کرد. رایج‌ترین آنها روش استوانه مضاعف است که گاهی به دلیل اندازه‌گیری نقطه‌ای (به‌خصوص در آبیاری جویچه‌ای) تخمین غیرواقعی از نفوذ را ارائه می‌کند. برای بهبود در اندازه‌گیری نفوذ، روش‌های مستقیم اندازه‌گیری شامل موازنه حجم ارائه شد که با درنظرگرفتن شرایط طبیعی زبری، شکل هندسی و محیط خیس شده مقطع جریان، از دقت نسبتاً خوبی برخوردار هستند. اما استفاده از این روش بسیار وقت‌گیر و هزینه‌بر است و در حین انجام مطالعات، استفاده از آن امکان‌پذیر نیست (۵)؛ ازاین‌رو پژوهشگران رو به روش‌های غیرمستقیم تخمین نفوذ آوردند که برخلاف روش‌های مستقیم، چندان وقت‌گیر و پرهزینه نیستند.

معادلات مختلفی برای نفوذ ارائه شده‌اند که انتخاب روش مناسب بستگی به داده‌های اندازه‌گیری‌شده در مزرعه دارد (۱۲). به طور کلی معادلات نفوذ شامل معادلات فیزیکی و تجربی هستند (۱۹). معادله‌های فیزیکی (مانند معادلات فیلیپ (۱۸) و گرین امپت (۱۰)) دارای پایه و اساس نظری هستند و معادله‌های تجربی (مانند معادلات کوستیاکف (۱۳)، کوستیاکف – لوئیس، هورتون و SCS) بر داده‌های نفوذ تجمعی و زمان، برازش داده شده‌اند و از اصول نظری برخوردار نیستند (۲۱). معادلات فیزیکی جزئیات نفوذ را نسبت به معادلات تجربی بهتر نشان می‌دهند (۱۴)، اما تخمین پارامترهای مدل‌های فیزیکی دشوار بوده و حل معادلات تحلیلی پیچیده و به روش‌های عددی امکان‌پذیر است؛ ازاین‌رو معمولاً در طراحی و ارزیابی سامانه‌های آبیاری سطحی، از معادلات تجربی نفوذ استفاده می‌شود.

روش‌های مختلفی نیز برای تعیین پارامترهای معادلات نفوذ وجود دارد که از آن جمله می‌توان به روش‌های دو نقطه‌ای الیوت – واکر (۷)، تک‌نقطه‌ای شپارد و همکاران (۲۳)، تک نقطه‌ای والیانتزاس و همکاران (۲۷) و بهینه‌سازی چندسطحی (۲۹) اشاره کرد. همواره استفاده از روش‌های ساده‌تر با دقت زیاد، ارجحیت دارد (۶). همچنین نرم‌افزارهایی مانند SIPAR-ID (۲۰)، IPARM (۸) و Infilt (۱۶) به‌منظور واسنجی پارامترهای معادله نفوذ و ضریب زبری مانینگ، به فراخور از داده‌های پیشروی، رواناب و پسروی استفاده می‌کنند.

مدیریت آبیاری سطحی به دلیل زیاد بودن پارامترهای مؤثر و نیز تغییرات زمانی و مکانی آنها برای به‌دست‌آوردن بازده و یکنواختی مناسب، پیچیده است (۲). به خاطر زیاد بودن تلفات در آبیاری سنتی، لزوم استفاده از ابزارهایی که بتوان علاوه بر طراحی مناسب به بیشترین بازده آب دست یافت، اجتناب‌ناپذیر است (۱۷). یکی از این ابزارها، مدل‌های آبیاری سطحی هستند که با شبیه‌سازی آبیاری سطحی، جریان آب، بازده‌های آبیاری و یکنواختی توزیع را با توجه به شرایط مزرعه‌ای پیش‌بینی می‌کنند (۲۲).

پیشرفت‌های اخیر در مدل‌سازی هیدرولیک و توسعه ابزارهای تصمیم‌یار، فرصت‌هایی برای تحلیل دقیق سامانه‌های آبیاری سطحی

فراهم کرده است. مدل‌های شبیه‌سازی – بهینه‌سازی از جمله این ابزارها هستند که هم قابلیت پیش‌بینی رفتار هیدرولیکی سیستم و هم امکان بهبود پارامترهای مدیریتی و طراحی را فراهم می‌کنند. مدل EDOSIM (Evaluation, Design and Optimization of Surface Irrigation Model) یکی از مدل‌های توسعه‌یافته در این حوزه است که تلاش دارد بر محدودیت‌های مدل‌های قبلی مانند SIRMOD و WinSRFR غلبه کند و علاوه بر شبیه‌سازی دقیق، امکان بهینه‌سازی مستقیم پارامترهای کلیدی را نیز فراهم کند (۳). در مدل EDOSIM، برای شبیه‌سازی هیدرولیک آبیاری سطحی شامل طراحی یا ارزیابی کرت، نوار و جویچه، از مدل بیلان حجم و برای بهینه‌سازی از ۲۰ الگوریتم فراابتکاری استفاده شده است.

در بخش ارزیابی مدل EDOSIM، از روش دونقطه‌ای الیوت – واکر برای تخمین پارامترهای معادله نفوذ کوستیاکف – لوئیس استفاده می‌شود. روش دونقطه‌ای الیوت – واکر فقط مبتنی بر دو نقطه میانی و پایانی مزرعه است و گویای وضعیت کل مزرعه نیست و دقت مناسبی ندارد. پارامترهای معادله نفوذ و ضریب مانینگ، تأثیر بسزایی را بر توزیع آب در مزرعه و کارایی سامانه دارند و خطا در برآورد آنها، منجر به اختلاف قابل توجه بین نتایج پیش‌بینی و مشاهدات میدانی می‌شود؛ ازاین‌رو افزودن قابلیت واسنجی پارامترهای نفوذ معادله نفوذ کوستیاکف – لوئیس و ضریب زبری به مدل EDOSIM، هدف اصلی این پژوهش است.

مواد و روش‌ها

۱. معرفی مدل EDOSIM

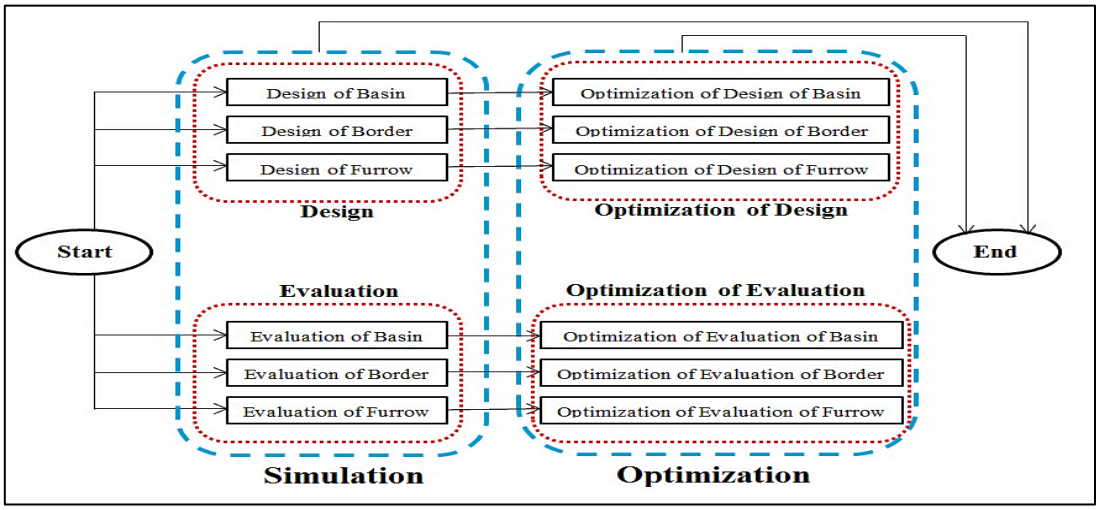
در این مدل برای شبیه‌سازی هیدرولیک آبیاری سطحی شامل طراحی یا ارزیابی کرت، نوار و جویچه، معادله بیلان حجم و برای بهینه‌سازی، از ۲۰ الگوریتم فراابتکاری استفاده شده است (۳). شکل ۱ روندنمای مدل EDOSIM را نشان می‌دهد. واسنجی پارامترهای نفوذ و ضریب زبری مانینگ، گام مهمی در بهبود عملکرد مدل EDOSIM محسوب می‌شود.

۲. واسنجی پارامترهای معادله نفوذ و ضریب مانینگ

به‌منظور توسعه مدل شبیه‌سازی – بهینه‌سازی، سه مرحله شامل واسنجی، شبیه‌سازی و شبیه‌سازی – بهینه‌سازی نیاز است. مدل شبیه‌سازی با دریافت ورودی‌ها، محاسباتی را انجام داده و خروجی‌ها را ارائه می‌کند. معمولاً در انتهای خروجی‌ها، شاخص‌های عملکردی (مانند راندمان) که نشان‌دهنده وضعیت موجود (در ارزیابی) یا مورد انتظار (در طراحی) سامانه هستند، وجود دارد. پس از شبیه‌سازی، شبیه‌سازی – بهینه‌سازی صورت می‌گیرد. برای بررسی دقت شبیه‌سازی و شبیه‌سازی – بهینه‌سازی، صحت‌سنجی و اعتبارسنجی انجام می‌شوند.

پیش از شبیه‌سازی، واسنجی پارامترهای قابل واسنجی انجام می‌شود. ورودی‌ها (در شبیه‌سازی) شامل دو دسته متغیرهای تصمیم و پارامترها (در شبیه‌سازی – بهینه‌سازی) هستند. پارامترها خود شامل پارامترهای قابل واسنجی و غیرقابل واسنجی هستند. پارامترهای غیرقابل واسنجی مانند طول و عرض مزرعه دارای مقادیر مشخص و قطعی هستند. اما پارامترهای قابل واسنجی مانند ضریب مانینگ و پارامترهای معادلات نفوذ و پیشروی که دارای مقادیر مشخص و قطعی نیستند، می‌توانند با حل معکوس قبل از شبیه‌سازی تعیین شوند و نتیجه آنها به‌عنوان ورودی به مدل شبیه‌سازی وارد شود.

فرایند واسنجی پارامترهای قابل واسنجی به روش حل معکوس، به دنبال این است که نتایج مدل تخمین‌گر (Outputs) را به داده‌های واقعی هدف (Targets) تا حد امکان نزدیک کند. با این توضیح که داده‌های واقعی هدف به عنوان مثال می‌تواند داده‌های آزمایش نفوذ به روش استوانه‌های مضاعف یا داده‌های پیشروی، پسروی و هیدروگراف جریان ورودی یا خروجی باشد. مدل تخمین‌گر نیز باید همان داده‌ها را شبیه‌سازی کند؛ ازاین‌رو برای به عنوان مثال نفوذ، مدل‌هایی مانند کوستیاکف، کوستیاکف – لوئیس و SCS مناسب هستند. همچنین برای پیشروی، مدل پیشروی توانی و برای هیدروگراف جریان خروجی، مدل ماسکینگهام می‌توانند به کار روند.



شکل ۱. نمودار گردشی مدل EDOSIM (۳)

مدل تخمین‌گر باید دارای تعدادی پارامتر یا پیچ تنظیم باشد که به‌عنوان متغیرهای تصمیم در فرایند بهینه‌سازی تعیین می‌شود؛ ازاین‌رو واسنجی، خود یک مسئله بهینه‌سازی است. تابع هدف واسنجی می‌تواند یک شاخص عملکرد آماری مانند NRMSE، R^2، CRM یا ترکیبی از آنها باشد. متغیر(های) تصمیم نیز همان پارامتر(های) مدل تخمین‌گر هستند. ممکن است مقادیر پارامترهای مدل دارای قید هندسی و/یا ساختار مسئله دارای قید رفتاری باشند. درمجموع فرایند واسنجی نیاز به داده‌های Targets و Outputs دارد.

در ادامه ابتدا سه روش کاندید برای ارائه تخمینی از طول پیشروی بر مبنای زمان‌های پیشروی به‌منظور واسنجی پارامترهای معادله نفوذ کوستیاکف - لوئیس و ضریب مانینگ ارائه شده است. سپس روش برتر به مدل EDOSIM افزوده و جایگزین روش دونقطه‌ای الیوت واکر شده است.

۲.۱. مدل بیلان حجمی با ضرایب شکل ثابت (VB-CC)

در مدل بیلان حجمی با ضرایب شکل ثابت (Volume Balance– Constant Coefficients: VB-CC)، معادله بیلان حجمی به‌صورت ساده‌سازی‌شده برای فاز پیشروی جریان به‌کار می‌رود. فرض می‌شود که ضرایب شکل در طول مسیر ثابت بوده و تغییرات هندسی جریان روی مقطع عمقی آن تأثیر چشمگیری ندارد. بر این اساس، عمق متوسط جریان در طول پیشروی ثابت و برابر با یک نسبت مشخص از عمق مؤثر جریان در محل ورودی در نظر گرفته می‌شود. برای به‌دست‌آوردن طول پیشروی x (m) وابسته به زمان پیشروی t (min) برای جویچه و نوار/کرت به‌ترتیب با معادلات ۱ و ۲ بیان می‌شود:

$$x = \frac{Q_0 \times t}{\sigma_y A_0 + \sigma_z K t^a + \sigma'_z F_0 t} \qquad (۱)$$

$$x = \frac{q_0 \times t}{\sigma_y y_0 + \sigma_z K t^a + \sigma'_z F_0 t} \qquad (۲)$$

که Q_0 و q_0 به‌ترتیب دبی ورودی به جویچه (m^3/min) و دبی ورودی به واحد عرض نوار/کرت (m^3/min/m)، σ_y و σ_z فاکتور شکل سطحی و زیرسطحی، A_0 و y_0 به‌ترتیب سطح مقطع جریان ورودی به جویچه (m^2) و عمق جریان ورودی به واحد عرض نوار (m)، K، a و F_0 به‌ترتیب پارامترهای معادله نفوذ کوستیاکف - لوئیس برای جویچه و k، a و f_0 مقادیر متناظر برای نوار هستند. عبارت $\sigma'_z = \frac{1}{r+1}$ است که r نمای معادله پیشروی توانی است. معمولاً σ_y برابر با ۰/۷۷ و σ_z طبق معادله ۳ لحاظ می‌شوند (۳).

$$\sigma_z = \frac{a + r(1-a)}{(1+a)(1+r)} \qquad (۳)$$

مزیت اصلی این روش، سادگی و پایداری در همگرایی محاسباتی است. محدودیت آن درنظرگرفتن شکل جریان

به‌صورت ثابت است که ممکن است در مزارع با تغییرات ناگهانی شیب یا شرایط بافت خاک، دقت را کاهش دهد.

۲.۲. ترکیب مدل‌های بیلان حجمی و اینرسی صفر (VB-ZI)

یکی از معایب مدل VB-CC این است که آن را نمی‌توان برای کرت‌های مسطح به‌کار برد؛ زیرا A_0 وابسته به شیب S_0 است که در مخرج آن قرار دارد و در این حالت A_0 را نمی‌توان محاسبه کرد. برای رفع این مشکل، ترکیب مدل بیلان حجمی با مدل اینرسی صفر (Volume Balance– Zero Inertia: VB-ZI) برای نوار و جویچه ارائه شده است (۲۴). این مدل قابلیت استفاده در شرایط مسطح و غیرمسطح را دارد و دقت مدل بیلان حجمی را افزایش می‌دهد. فرضیات این مدل به صورت زیر است:

۱- برای نوار دبی ورودی در واحد عرض (q_0) و برای جویچه دبی ورودی (Q_0) ثابت است.

۲- نیمرخ سطح آب با استفاده از رابطه نمایی زیر (معادله ۴) مشخص می‌شود (شکل ۲):

$$y(x,t) = Y(t)(1-\frac{x}{S(t)})^b \qquad (۴)$$

$$b = \frac{0.45}{(1+p)^{0.2}}\ ,\ p = \frac{q_0 \cdot S_0\ (\frac{y_0}{K})^{\frac{1}{\alpha}}}{y_0^2} \qquad (۵)$$

که $Y(t)$ عمق جریان در ابتدای مزرعه در زمان t، $S(t)$ طول پیشروی در زمان t و b فاکتوری است که بین صفر تا یک متغیر است. اگر $S_0=0$ باشد، لازم به محاسبه y_0 نیست و می‌توان p=۰ و b=۰/۴۵ در نظر گرفت. در این روش بایستی اجزای رابطه به‌گونه‌ای نوشته شود که p بدون بعد به دست آید. جمله $(\frac{y_0}{K})^{\frac{1}{\alpha}}$ از معادله نفوذ کوستیاکف گرفته شده و معادله فرصت نفوذ به اندازه y_0 است که واحد آن همان واحد زمان در معادله نفوذ کوستیاکف است. در صورت استفاده از معادله نفوذ کوستیاکف - لوئیس باید با روش نیوتن رافسون به‌صورت عددی، زمان را به دست آورد.

معادله بیلان حجمی برای نوار/کرت و جویچه به‌ترتیب با معادلات ۶ و ۷ بیان می‌شود:

$$q_0 .t = \int_0^{S(t)} y(x.t)dx + Z(t).S(t).\sigma_Z \qquad (۶)$$

$$Q_0 \ .\ t = \int_0^{S(t)} A(x.t)dx + Z(t).S(t).\sigma_Z \qquad (۷)$$

عبارت اول سمت راست معادلات ۶ و ۷ را می‌توان با توجه به معادله ۴ بازنویسی نمود:

$$\int_0^{S(t)} y(x.t)dx = \int_0^{S(t)} Y(t)(1-\frac{x}{S(t)})^b dx = \frac{Y(t)S(t)}{b+1} \qquad (۸)$$

$$\int_0^{S(t)} A(x.t)dx = \int_0^{S(t)} \sigma_1 y(x.t)^{\sigma_2} dx = \int_0^{S(t)} \sigma_1[Y(t)(1-\frac{x}{S(t)})^b]^{\sigma_2} dx$$
$$= \sigma_1 Y(t)^{\sigma_2} \int_0^{S(t)} (1-\frac{x}{S(t)})^{b\sigma_2} dx = \frac{A_0(t).S(t)}{b\sigma_2+1} \qquad (۹)$$

با تلفیق معادلات ۶ با ۸ برای نوار/کرت و ۷ با ۹ برای جویچه، مدل بیلان حجمی به دو صورت زیر نوشته می‌شود:

$$q_0 \ .\ t = \frac{Y(t).S(t)}{b+1} + Z(t).S(t).\sigma_z \qquad (۱۰)$$

$$Q_0 \ .\ t = \frac{A_0(t).S(t)}{b\sigma_2+1} + Z(t).S(t).\sigma_z \qquad (۱۱)$$

معادله ۱۰ برای نوار/کرت با دو مجهول $Y(t)$ و $S(t)$ و معادله ۱۱ برای جویچه با دو مجهول $A(t)$ و $S(t)$ است. از آنجا که این معادلات دارای دو مجهول هستند، معادله اینرسی صفر به‌عنوان معادله دوم استفاده می‌شود:

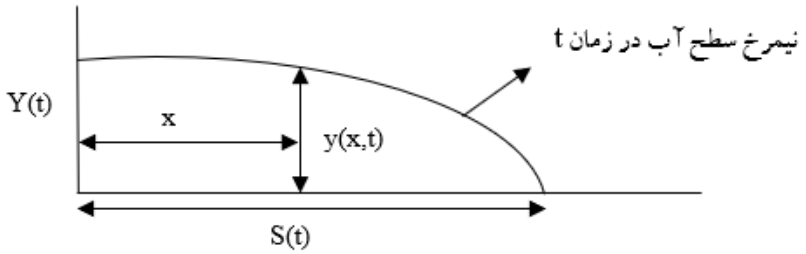
$$\frac{\partial y}{\partial x} = S_0 - S_f \qquad (۱۲)$$

الف) برای نوار/کرت

$$\left.\frac{\partial y}{\partial x}\right|_{x=0} = \left.\frac{\partial\left[Y(t)\left(1-\frac{x}{S(t)}\right)^b\right]}{\partial x}\right|_{x=0} =$$
$$Y(t)\left(1-\frac{x}{S(t)}\right)^{b-1} \times b \times \left.\frac{-1}{S(t)}\right|_{x=0} = \frac{-Y(t).b}{S(t)} \qquad (۱۳)$$

$$\left.S_f\right|_{x=0} = \frac{q_0^2 \ .\ n^2}{Y(t)^{\frac{10}{3}}} \qquad (۱۴)$$

با ترکیب معادلات ۱۲، ۱۳ و ۱۴ خواهیم داشت:



شکل ۲. نیمرخ سطح آب (۲۴)

$$\frac{-Y(t).b}{S(t)} = S_0 - \frac{q_0^2 . n^2}{Y(t)^{\frac{10}{3}}} \qquad (۱۵)$$

معادلات ۱۰ و ۱۵ دارای دو مجهول S(t) و Y(t) هستند. از معادله ۱۰ مقدار S(t) به دست آمده و در معادله ۱۵ قرار می‌گیرد:

$$S(t) = \frac{q_0 . t}{\frac{Y(t)}{b+1} + \sigma_z . Z(t)} \qquad (۱۶)$$

$$-Y(t).b \times \frac{\frac{Y(t)}{b+1} + \sigma_z . Z(t)}{q_0 . t} = S_0 - \frac{q_0^2 . n^2}{Y(t)^{\frac{10}{3}}} \qquad (۱۷)$$

معادله ۱۷ را می‌توان با سعی و خطا حل نمود و Y(t) را بدست آورد و سپس با قرار دادن آن در معادله ۱۶، S(t) را محاسبه کرد. این کار را برای تمام زمان‌ها انجام داده تا منحنی پیشروی بدست آید. اگر S_0=۰ باشد، هیچ مشکلی پیش نمی‌آید.

ب) برای جویچه

در این حالت مقدار S_f به‌صورت معادله ۱۸ محاسبه می‌شود:

$$\frac{Q_0^2 . n^2}{S_f} = A^2 R^{\frac{4}{3}} = \rho_1 A_{0(t)}^{\rho_2} \rightarrow S_f = \frac{Q_0^2 . n^2}{\rho_1 A_{0(t)}^{\rho_2}} \qquad (۱۸)$$

ازاین‌رو مدل اینرسی صفر به‌صورت معادله ۱۹ نوشته می‌شود:

$$\frac{-Y(t).b}{S(t)} = S_0 - \frac{Q_0^2 . n^2}{\rho_1 A_{0(t)}^{\rho_2}} \qquad (۱۹)$$

معادلات ۱۱ و ۱۹ دارای دو مجهول $A_0(t)$ و S(t) هستند. از معادله ۱۱ مقدار S(t) محاسبه می‌شود و در معادله ۱۹ قرار می‌گیرد:

$$S(t) = \frac{Q_0 . t}{\frac{A_0(t)}{b\sigma_2 + 1} + \sigma_z . Z(t)} \qquad (۲۰)$$

$$-Y(t).b \frac{\frac{A_0(t)}{b\sigma_2 + 1} + \sigma_z . Z(t)}{Q_0 . t} = S_0 - \frac{Q_0^2 . n^2}{\rho_1 A_{0(t)}^{\rho_2}} \qquad (۲۱)$$

معادله ۲۱ با سعی و خطا قابل حل است و $A_0(t)$ به‌دست می‌آید و با قرار دادن آن در معادله ۲۰، S(t) به دست می‌آید. این کار را برای تمام زمان‌ها انجام داده تا منحنی پیشروی به دست آید. اگر S_0=۰ باشد، هیچ مشکلی پیش نمی‌آید.

۲.۳. روش بیلان حجمی با ضرایب شکل متغیر (VB-VC)

در روش VB-CC ضرایب σ_z و σ_y ثابت در نظر گرفته می‌شوند، اما در حقیقت این ضرایب نسبت به زمان از شروع آبیاری متغیر هستند. روش بیلان حجمی با ضرایب شکل متغیر (Volume Balance– Variable Coefficients: VB-VC) با درنظرگرفتن تغییرات زمانی این ضرایب، با هدف افزایش دقت شبیه‌سازی پیشروی ارائه شده است (۲۵ و ۲۶). در ادامه به بررسی تغیرات زمانی ضرایب σ_z و σ_y پرداخته شده است:

الف) بررسی تغییرات زمانی $\boldsymbol{\sigma_y}$

مقدار کمینه σ_y با استفاده از معادله ۲۲ محاسبه می‌شود (۲۶):

$$\sigma_{y_{min}} = 0.8 + \%55\rho_2^{1.3} - 0.47\alpha^{0.6} \qquad (۲۲)$$

که در آن ρ_2 از ضرایب هندسی در آبیاری سطحی ($A^2 R^{\frac{4}{3}} = \rho_1 A^{\rho_2}$) و α نیز برابر با توان نفوذ معادله کوستیاکف است ($Z = K t^{\alpha}$). تغییرات σ_y نسبت به زمان از معادله ۲۳ به دست می‌آید:

$$\left(\frac{\sigma_y . S^*}{t^*}\right)^{1+\alpha} = \frac{\sigma_y - \sigma_{y_{min}}}{1-\sigma_{y_{min}}} \quad (۲۳)$$

که در آن:

$$t^* = \frac{t_s}{t_r} S^* = \frac{S}{S_r} \ , \ S_r = \frac{Q_0 t_r}{A_0} \ , \ t_r = \left(\frac{A_0}{K}\right)^{\frac{1}{\alpha}} \quad (۲۴)$$

S طول پیشروی در زمان t_s است. با معلوم بودن مقدار S و t_s می‌توان با استفاده از سعی و خطا، مقدار σ_y را در زمان t_s بدست آورد. روش محاسبات بعد از تغییرات σ_z ارائه شده است (۲۶).

ب) بررسی تغییرات زمانی σ_z

برای بررسی تغییرات σ_Z به‌صورت زیر عمل می‌شود (۲۵):

$$\sigma_Z = M(R_0 - R_1) + R_1 \ , \ R_0 = \frac{1}{1+\alpha} , \ R_1 = \frac{\alpha\pi(1-\alpha)}{\sin(\alpha\pi)}$$

$$W = \left(\frac{S^*}{t^*}\right)^{\frac{1}{1+\alpha}} , \ M = 2.6W^2 - 1.6W^3 \quad (۲۵)$$

سپس با معلوم بودن S و t_s با استفاده از رابطه تجربی، σ_Z در زمان t_s محاسبه می‌شود. حال می‌توان مدل بیلان حجمی را با ضرایب σ_Z و σ_y متغیر استفاده کرد و منحنی پیشروی را ترسیم نمود. روش کار به صورت گام‌های زیر است:

۱- به ازای دبی مشخص Q_0 و ضرایب شکل ρ_1 و ρ_2 ، شیب کف و ضریب زبری مانینگ مقدار A_0 به صورت معادله ۲۶ محاسبه می‌شود.

$$A_0 = \left(\frac{Q_0^{\ 2} n^2}{\rho_1 S_0}\right)^{\frac{1}{\rho_2}} \quad (۲۶)$$

۲- مقادیر σ_{ymin} ، R_1 و R_0 با داشتن α و ρ_2 از معادلات ۲۲ و ۲۵ محاسبه می‌شود.

۳- ضرایب σ_Z و σ_y در زمان t_s فرض می‌شود. t_s زمان معلوم است که می‌خواهیم بدانیم در این زمان طول پیشروی (S) چقدر است؛ یعنی کلیه محاسبات زیر برای زمان t_s است. بعد از آن می‌توان تمام محاسبات زیر را تکرار کرد و در t_s های دیگر S های مربوط را به‌دست آورد. بهترین فرض اولیه برای σ_y برابر با ۰/۷۷ و برای σ_Z نیز $(R_1+R_0)/2$ می‌باشد.

۴- مقدار S از مدل بیلان حجمی به‌دست می‌آید. در این مدل از معادله نفوذ کوستیاکف ($Z_0 = K t_s^{\alpha}$) استفاده شده است:

$$Q_0 . t_s = \sigma_y . A_0 . S + \sigma_Z . Z_0 . S \quad (۲۷)$$

۵- محاسبه t_r ، S_r ، $S^*=S/S_r$ و $t^*=t_s/t_r$

۶- محاسبه W ، M و نهایتا σ_Z از معادله ۲۵

۷- محاسبه σ_y از معادله ۲۳ به‌صورت سعی و خطا

۸- با مقادیر جدید σ_y و σ_Z مقدار S از مدل بیلان حجمی مجدداً محاسبه می‌شود.

۹- اگر S محاسبه‌شده از مراحل ۸ و ۴ باهم متفاوت بودند، محاسبات با σ_y و σ_Z جدید از مرحله ۴ تکرار می‌شود و محاسبات تا جایی پیش می‌رود که مقادیر S مراحل ۸ و ۴ تقریباً یکسان شوند.

بنابراین در زمان t_s مقدار S به دست می‌آید. کلیه محاسبات یادشده برای مقادیر مختلف t_s تکرار می‌شود و برای هر t_s، مقدار S مربوطه به‌دست می‌آید و درنهایت مقادیر S در مقابل t_s ترسیم می‌شود که همان منحنی پیشروی است.

اگر از معادله نفوذ دیگری بجای معادله کوستیاکف برای محاسبه نفوذ استفاده شود، بایستی اصلاحات زیر در روش یادشده اعمال شود:

الف) محاسبه Z_0 با استفاده از معادله نفوذ جدید

ب) به جای α در روش یادشده از مقدار زیر استفاده می‌شود.

$$\alpha = \frac{\log(\frac{Z_1}{Z_2})}{\log 2} \quad (۲۸)$$

که در آن Z_1 مقدار نفوذ در زمان t_s با استفاده از معادله نفوذ دیگر و Z_2 مقدار نفوذ در زمان $t_s/2$ با استفاده از معادله نفوذ دیگر.

۳. افزودن قابلیت واسنجی به مدل EDOSIM

سه روش واسنجی یادشده برای تخمین پارامترهای معادلات نفوذ و ضریب مانینگ بر مبنای داده‌های پیشروی مورد ارزیابی قرار گرفتند تا دقیق‌ترین روش برای اضافه شدن به مدل EDSOIM انتخاب شود و با روش دونقطه‌ای الیوت واکر

جایگزین شود. از آنجا که واسنجی بر مبنای داده‌های ارزیابی است، باید تابع واسنجی وارد بخش ارزیابی مدل EDOSIM می‌شد. در مدل EDOSIM ضرایب a و k (یا K) با روش دو نقطه‌ای الیوت واکر مطابق معادلات ۲۹ و ۳۰ محاسبه می‌شود و ضرایب f_0 (یا F_0) و n جزء داده‌های ورودی هستند.

$$a = \frac{Ln\left(\frac{\forall_L}{\forall_{0.5L}}\right)}{Ln\left(\frac{t_L}{t_{0.5L}}\right)} \quad (۲۹)$$

$$k = \frac{\forall_L}{\sigma_z . t_L^a} \quad (۳۰)$$

در این راستا ابتدا برنامه‌ای نوشته شد که با استفاده از حل‌گرهای جعبه‌ابزار بهینه‌سازی نرم‌افزار MATLAB و داده‌های واقعی پیشروی، توانایی واسنجی پارامترهای معادله نفوذ کوستیاکف لوییس و ضریب زبری مانینگ را دارد. این برنامه که به‌صورت پیمانه‌ای (ماژولار) نوشته شده است، قابلیت استفاده از هر حل‌گر به‌منظور واسنجی هر تعداد پارامتر واسنجی بر مبنای هر نوع داده‌های واقعی هدف و هر مدل تخمین‌گر و تعریف هر نوع تابع هدف با لحاظ کردن قیود را دارد. در سبک برنامه‌نویسی پیمانه‌ای که هر بخش برنامه مستقل از بخش دیگر نوشته می‌شود و بخش‌ها فقط توسط اهرم (هندل) به هم متصل می‌شوند. درنهایت برنامه نوشته‌شده توانایی ترسیم نمودارهایی به‌منظور بررسی صحت و دقت واسنجی را دارد.

پس از افزودن واسنجی به مدل EDOSIM، مراحل شبیه‌سازی و شبیه‌سازی - بهینه‌سازی انجام شد. برای مقایسه روش برتر و روش دونقطه‌ای الیوت واکر، تابع هدف بهینه‌سازی مدل EDOSIM مطابق معادله ۳۱ معیار قرار گرفت.

$$z1 = \begin{bmatrix} w_1\left(1-\frac{Ea}{100}\right)+w_2\left(1-\frac{Ei}{100}\right)+w_3\left(1-\frac{Er}{100}\right)+w_4\left(1-\frac{DU}{100}\right) \\ +w_5\left(1-\frac{DE}{100}\right)+w_6\left(\frac{TWR}{100}\right)+w_7\left(\frac{DPR}{100}\right) \end{bmatrix}(1+\beta.Violation) \quad (۳۱)$$

که در آن w_i ضرایب وزنی، Ea راندمان کاربرد، Ei راندمان آبیاری، Er راندمان نیاز آبی، DU یکنواختی توزیع، DE راندمان توزیع، TWR رواناب پایاب و DPR نفوذ عمقی هستند. عبارت (1+ β.Violation)، عبارت جریمه است و زمانی که تخطی از قیود رخ می‌دهد عمل می‌کند. متغیرهای تصمیم بهینه‌سازی نیز شامل دبی و زمان قطع با حدود کمینه و بیشینه یکسان برای دو روش تخمین پارامتر در نظر گرفته شدند.

۴. داده‌های مورد استفاده

در این پژوهش، مجموعاً از ۱۰ سری داده صحرایی استفاده شد (۱). این مجموعه داده‌ها که به‌طور گسترده‌ای در مطالعات آبیاری سطحی مورد استناد قرار گرفته‌اند، شرایط مختلف هیدرولیکی، خاکی و مدیریتی را پوشش می‌دهند؛ چراکه از مزارعی با بافت‌های خاک متفاوت (درشت‌بافت، متوسط و ریزبافت) و در مناطق جغرافیایی مختلف ایران (مشهد، میاندوآب، دزفول، اهواز و ارومیه) جمع‌آوری شده‌اند که نمایندگی قابل قبولی از شرایط متغیر مزارع واقعی را ارائه می‌کنند. در جدول ۱، پنج سری داده‌های آبیاری نواری ارائه شده است. مزارع ۱ و ۲ مربوط به گلمکان مشهد (درشت بافت)، مزرعه ۳ مربوط به حسن کندی میاندوآب (بافت متوسط)، مزرعه ۴ مربوط به صفی‌آباد دزفول (ریز بافت) و مزرعه ۵ مربوط به اهواز (ریز بافت) است. در جدول ۲، پنج سری داده‌های آبیاری جویچه‌ای ارائه شده است. مزرعه ۶ مربوط به گلمکان مشهد (درشت بافت)، مزارع ۷ و ۸ مربوط به مرکز تحقیقات توتون ارومیه (بافت متوسط) و مزارع ۹ و ۱۰ مربوط به صفی‌آباد دزفول (ریز بافت) است.

به‌منظور بررسی صحت و دقت واسنجی سه روش مورد استفاده، از شاخص‌های آماری ضریب تبیین (R^2)، جذر میانگین مربعات خطا بی‌بعدشده (NRMSE) و ضریب باقیمانده جرم (MBE) استفاده شد. مقدار R^2 نزدیک به یک، نشان‌دهنده همبستگی زیاد مدل با داده‌های مشاهداتی پیشروی است. مقدار شاخص MBE نزدیک به صفر، نشان‌دهنده سوگیری کم داده‌های پیشروی شبیه‌سازی‌شده نسبت به داده‌های مشاهداتی است. مقادیر مثبت و منفی شاخص MBE به‌ترتیب بیانگر بیش‌برآورد و کم‌برآورد مدل نسبت به مشاهدات است. مقادیر

جدول ۱. داده‌های مزرعه‌ای مورد استفاده در آبیاری نواری (۱)

مزرعه	t_L(min)	$t_{0.5L}$ (min)	q_0 (m^3/min/m)	S_0 (m/m)	L (m)	0.5 L (m)	w_0 (m)	z_{req} (m)	LF	t_{co} (min)
۱	۵۵	۱۹/۱	۰/۰۸۸۹۸	۰/۰۰۹۵	۱۱۰	۶۰	۶	۰/۱۰۷	۰/۰۵	۱۱۵
۲	۳۱/۳	۱۰/۲	۰/۱۰۹۲۲	۰/۰۰۹۵	۱۱۰	۵۰	۶	۰/۱۰۷	۰/۰۵	۸۶
۳	۱۷۱	۶۳	۰/۱۵۷۸	۰/۰۰۰۶	۲۰۰	۱۰۰	۷	۰/۲۱۴	۰/۰۵	۱۹۰
۴	۱۱۸/۷	۴۳/۹	۰/۰۸۱	۰/۰۰۸۲	۱۸۰	۹۰	۸	۰/۲۲۴	۰/۰۵	۳۹۰
۵	۶۱	۲۷/۵	۰/۰۹	۰/۰۰۰۸۶	۱۱۰	۵۸/۷	۵/۲	۰/۲	۰/۰۵	۱۷۸

زمان پیشروی به انتهای نوار (t_L)، زمان پیشروی به نیمه نوار ($t_{0.5L}$)، دبی واحد عرض (q_0)، شیب نوار (S_0)، طول نوار (L)، طولی که به عنوان نصف طول نوار در نظر گرفته می‌شود (0.5L)، عرض نوار (w_0)، کمبود رطوبت ناحیه توسعه ریشه (z_{req})، نیاز آبشویی (LF) و زمان قطع جریان (t_{co})

جدول ۲. داده‌های مزرعه‌ای مورد استفاده در آبیاری جویچه‌ای (۱)

مزرعه	T_{max} (m)	T_{mid} (m)	Base (m)	Y_{max} (m)	t_L (min)	$t_{0.5L}$ (min)	Q_0 (m^3/m)
۶	۰/۳۵	۰/۲	۰	۰/۱	۴۲	۱۶	۰/۰۳۵۴
۷	۰/۳۵	۰/۲	۰	۰/۱	۱۳۲/۵	۳۲	۰/۰۳۲۷۲۴
۸	۰/۳۵	۰/۲	۰	۰/۱	۷۶/۵	۲۶	۰/۰۳۲۷
۹	۰/۳۵	۰/۲	۰	۰/۱	۸۷	۲۴	۰/۰۵۱
۱۰	۰/۳۵	۰/۲	۰	۰/۱	۶۷/۵	۲۹/۵	۰/۰۴۶۲

مزرعه	S_0 (m/m)	L (m)	0.5 L (m)	W (m)	z_{req} (m)	LF	t_{co} (min)
۶	۰/۰۱۱۷	۱۳۰	۷۰	۰/۷	۰/۱۰۷	۰/۰۵	۱۰۲
۷	۰/۰۱۶۳	۱۹۰	۱۰۰	۰/۷	۰/۱۰۱	۰/۰۵	۲۴۰
۸	۰/۰۱۶۳	۱۸۰	۹۰	۰/۷	۰/۱۰۱	۰/۰۵	۱۸۰
۹	۰/۰۰۶۴	۲۰۰	۱۰۰	۰/۷۵	۰/۲۲۴	۰/۰۵	۲۷۰
۱۰	۰/۰۰۶۴	۲۵۰	۱۳۰	۰/۷۵	۰/۲۲۴	۰/۰۵	۲۵۰

عرض بالا (T_{max})، عرض میانی (T_{mid})، عرض کف (Base)، بیشینه عمق جویچه (Y_{max})، زمان پیشروی به انتهای جویچه (t_L)، زمان پیشروی به نیمه جویچه ($t_{0.5L}$)، دبی جویچه (Q_0)، شیب جویچه (S_0)، طول جویچه (L)، طولی که به عنوان نصف طول جویچه در نظر گرفته می‌شود (0.5L)، عرض جویچه (w)، کمبود رطوبت ناحیه توسعه ریشه (z_{req})، نیاز آبشویی (LF) و زمان قطع جریان (t_{co})

NRMSE کمتر از ۱۰ درصد نشانگر شبیه‌سازی بسیار خوب، بین ۱۰ تا ۲۰ درصد نشانگر شبیه‌سازی خوب و بیش از ۲۰ درصد شبیه‌سازی بد را در مدل نشان می‌دهد.

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n}(O_i - \bar{O})^2}{\sum_{i=1}^{n}(p_i - \bar{O})^2} \quad (۳۲)$$

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^{n} p_i - O_i}{n} \quad (۳۳)$$

$$NRMSE = \frac{RMSE}{\bar{O}} \quad (۳۴)$$

نتایج و بحث

ابتدا عملکرد سه روش واسنجی (VB-CC، VB-ZI و VB-VC) در برآورد پارامترهای معادله نفوذ کوستیاکف - لوییس و ضریب زبری مانینگ با استفاده از داده‌های فاز پیشروی آبیاری نواری و جویچه‌ای مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفته است. در ادامه، تأثیر ادغام روش برتر واسنجی در چارچوب مدل

EDOSIM و مقایسه آن با روش مرجع الیوت - واکر بر دقت شبیه‌سازی و بهینه‌سازی تحلیل می‌شود.

۱. نتایج واسنجی پارامترهای معادلات نفوذ و ضریب مانینگ

پیش از ورود به فرایند واسنجی، حدود مجاز تغییر پارامترهای نفوذ (K یا k، a، F_0 یا f_0) و ضریب زبری مانینگ (n) بر اساس مقادیر معرفی‌شده در نرم‌افزار SIRMOD (۲۸) تعیین شد (جدول ۳). این حدود که بازه‌ای وسیع و عمومی را پوشش می‌دهند، برای اطمینان از یافتن پاسخ بهینه در تمامی بافت‌های خاک و شرایط مختلف آبیاری در نظر گرفته شدند؛ به صورتی‌که حد بالای آنها از بیشینه مقادیر اولین آبیاری و حد پایین نیز از کمینه مقادیر آبیاری‌های بعدی استفاده شده است.

۱.۱. نتایج روش واسنجی VB-CC

نتایج واسنجی با روش VB-CC به‌ترتیب برای آبیاری نواری و جویچه‌ای در جدول‌های ۴ و ۵ ارائه شده است.

میانگین شاخص‌های آماری در تمام مزارع به‌صورت R^2=۰/۹۹۸، NRMSE=۲/۴٪ و MBE=-۰/۰۶ محاسبه شد که نشان‌دهنده دقت و صحت بسیار زیاد و عدم سوگیری سیستماتیک این روش است. مقادیر NRMSE در همه ۱۰ مزرعه کمتر از ۵٪ بود که مطابق با معیارهای موجود، نشانگر شبیه‌سازی عالی است. معیارهای MBE و R^2 نیز به‌ترتیب نزدیک به صفر و نزیک به یک است که هر دو در شرایط مطلوب هستند.

به دلیل جامع بودن بازهٔ حدود بالا و پایین (جدول ۳) برای تمامی بافت‌های خاک، در روش VB-CC نتایج واسنجی در بافت‌های مختلف دارای خطای کم بوده است. برای مثال، در مزرعه ۵ (آبیاری نواری، ریزبافت) منحنی پیشروی شبیه‌سازی‌شده و مشاهداتی تقریباً بر هم منطبق بودند (شکل ۳). تطابق داده‌های هدف و خروجی (شکل ۳-الف)، نزدیکی مقادیر هدف و خروجی به نمودار y=x (شکل ۳-ب)، تخطی کم مقادیر خطا از مقدار صفر (شکل ۳-ج) و نزدیکی توزیع (هیستوگرام) خطا به توزیع نرمال (شکل ۳-د)، در این شکل قابل مشاهده است.

همچنین، نیمرخ نفوذ عمقی و روند تغییرات حجم ذخیره سطحی و زیرسطحی (شکل‌های ۴ و ۵) رفتار فیزیکی واقعی سیستم را به درستی بازتولید کردند. به‌عنوان نمونه در شکل ۴ منحنی پیشروی مشاهداتی و محاسباتی (شکل ۴-الف)، عمق و سرعت نفوذ (شکل ۴-ب) و نیمرخ نفوذ عمقی (شکل ۴-ج) در مزرعه ۵ ارائه شده است. در منحنی پیشروی محاسباتی علاوه بر روش VB-CC، روش پیشروی توانی نیز تطابق بسیار خوبی با داده‌های مشاهدات دارد. از نمودار عمق و سرعت نفوذ نتیجه می‌شود عمق نفوذ تجمعی مطابق انتظار با شروع از مقدار صفر در ابتدای آبیاری، با سرعت نسبتاً زیادی افزایش پیدا می‌کند و در ادامه از شدت آن کاسته می‌شود و درنهایت به مجانب مایل نزدیک می‌شود. اما سرعت نفوذ متوسط و لحظه‌ای مطابق انتظار در ابتدای آبیاری زیاد است و به مرور زمان کاهش پیدا می‌کند تا درنهایت به مجانب افقی می‌رسند. در نیمرخ نفوذ عمقی در فاز پیشروی، ابتدای مزرعه به اندازه زمان پیشروی فرصت نفوذ داشته است و فرصت نفوذ انتهای مزرعه نیز برابر صفر است.

به‌عنوان نمونه در شکل ۵ منحنی حجم ذخیره سطحی (شکل ۵-الف) و زیرسطحی (شکل ۵-ب) در فاز پیشروی در مزرعه ۵ ارائه شده است. حجم ذخیره سطحی و زیرسطحی در فاز پیشروی در ابتدا برابر با صفر است و با گذشت زمان افزایش پیدا می‌کنند. در صورت ادامه آبیاری، بیشترین میزان حجم ذخیره سطحی در زمان قطع جریان خواهد بود و پس از آن در فاز تخلیه و پسروی، به مرور کاهش پیدا می‌کند و در زمان پسروی به صفر می‌رسد، اما حجم ذخیره زیرسطحی تا انتهای آبیاری همواره افزایش پیدا می‌کند.

۱.۲. نتایج مدل واسنجی VB-ZI

نتایج واسنجی با روش VB-ZI به‌ترتیب برای آبیاری نواری و جویچه‌ای در جداول ۶ و ۷ ارائه شده است.

با بررسی جداول ۶ و ۷ دیده می‌شود با توجه به معیار R^2، همبستگی مطلوب است؛ اما به دلیل مناسب نبودن معیارهای

جدول ۳. حدود بالا و پایین پارامترهای معادلات نفوذ و ضریب مانینگ (۲۸)

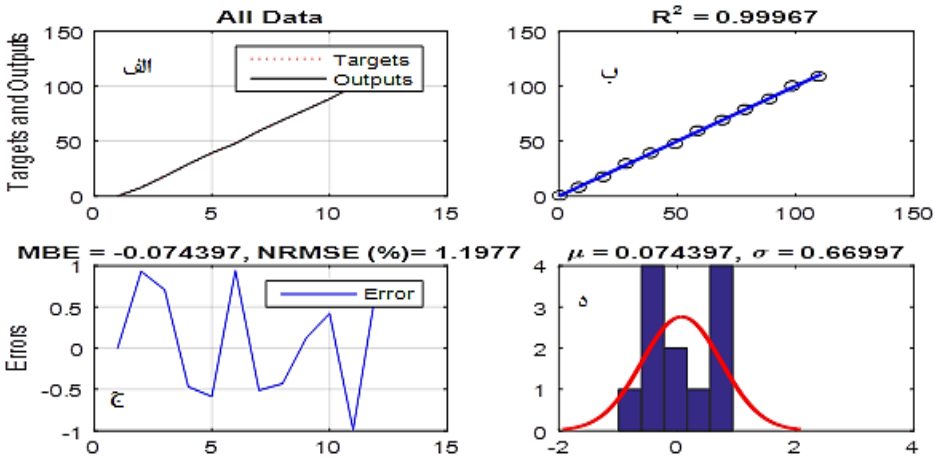
آبیاری	حدود	k یا K	a	F_0 یا f_0	n
نواری	حد بالا	۰/۰۰۶۱۴۱	۰/۷۵۱	۰/۰۰۰۴۶۰۲	۰/۲۵
	حد پایین	۰/۰۰۰۳۶	۰/۱۵۳	۰/۰۰۰۰۱۸۸	۰/۰۱
جویچه‌ای	حد بالا	۰/۰۰۵۵۱۱	۰/۷۵۱	۰/۰۰۰۴۱۳	۰/۲۵
	حد پایین	۰/۰۰۰۲۱	۰/۱۵۳	۰/۰۰۰۰۱۹	۰/۰۱

جدول ۴. نتایج واسنجی برمبنای مدل VB-CC در آبیاری نواری (نتایج پژوهش)

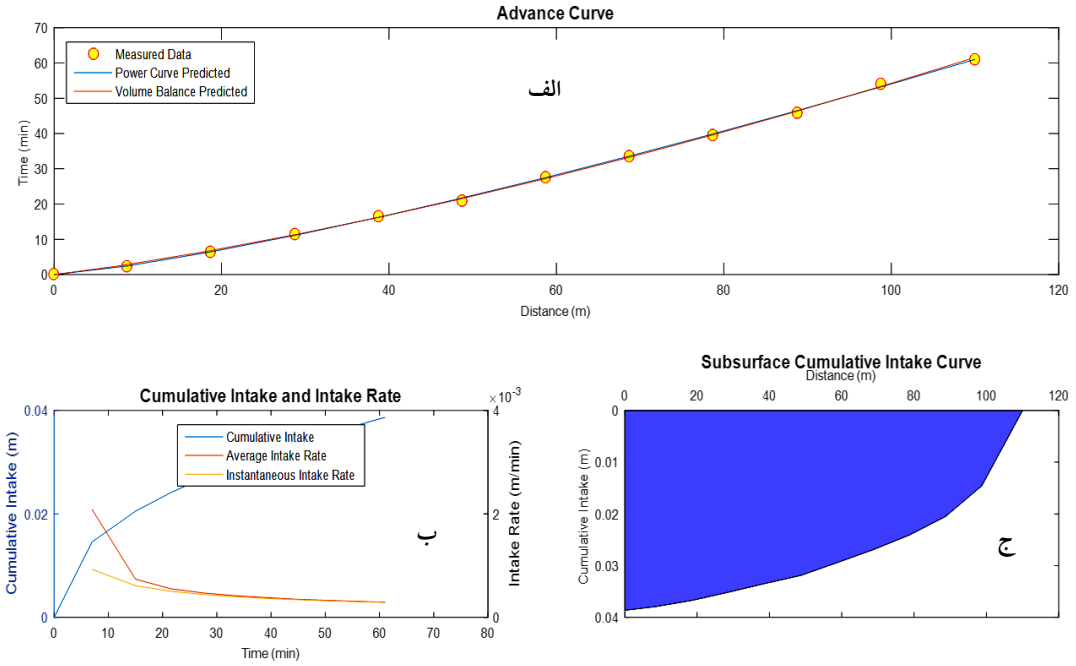
مزرعه	k (m/min^a)	a	f_0 (m/min)	n	NRMSE (%)	MBE	R^2
۱	۰/۰۰۲۶	۰/۵۷۸۵	۰/۰۰۰۲۸	۰/۰۹۱۹	۲/۴۰۷	۰/۰۰۶	۰/۹۹۸
۲	۰/۰۰۴۶	۱/۵۰۵	۰/۰۰۰۰۱۸۸	۰/۰۵۸	۳/۸۸۳	۰/۰۷۳	۰/۹۹۶
۳	۰/۰۰۶۱	۰/۶۰۱	۰/۰۰۰۰۱۸۸	۰/۰۷۲	۴/۴۷۷	−۰/۹۰۷	۰/۹۹۵
۴	۰/۰۰۲۱	۰/۵۲۵۴	۰/۰۰۰۱۵۵	۰/۲۱۷۱	۲/۷۰۹	۰/۳۰۶	۰/۹۹۸
۵	۰/۰۰۶۱	۰/۴۴	۰/۰۰۰۰۱۸۸	۰/۰۵۳۱	۱/۱۹۷	−۰/۰۷۴۳	۰/۹۹۹

جدول ۵. نتایج واسنجی برمبنای مدل VB-CC در آبیاری جویچه‌ای (نتایج پژوهش)

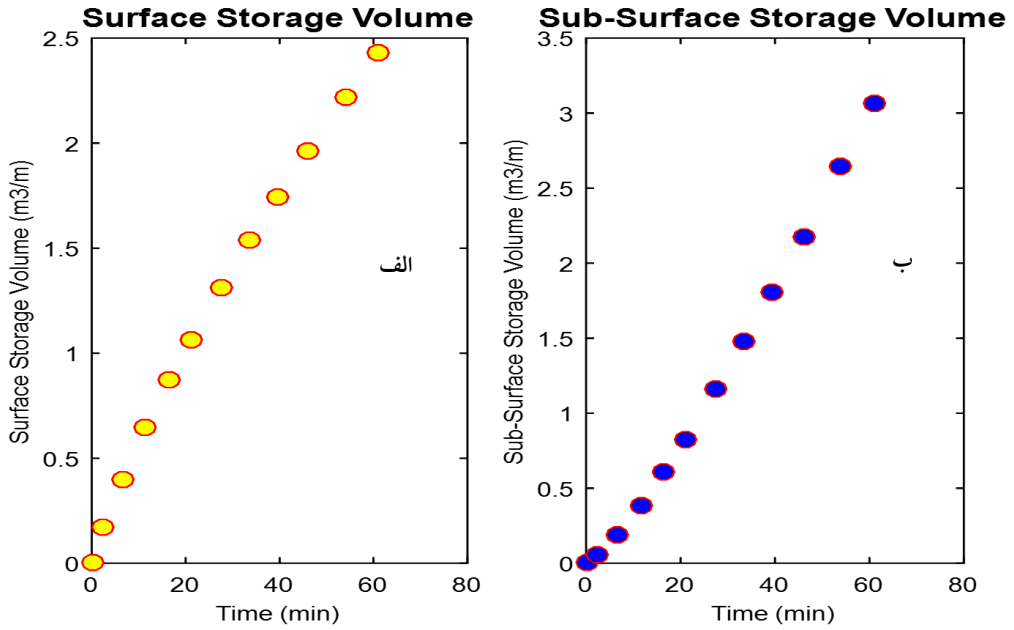
مزرعه	K (m^3/min^a/m)	a	F_0 (m^3/min/m)	n	NRMSE (%)	MBE	R^2
۶	۰/۰۰۰۲۱	۰/۱۵۳	۰/۰۰۰۱۹۵	۰/۱۳۵	۲/۳۸۶۳	۰/۱۹۳۳	۰/۹۹۸
۷	۰/۰۰۱۸	۰/۱۸۹۴	۰/۰۰۰۱۶۶	۰/۰۸۰۱	۲/۱۸۲	−۰/۲۵	۰/۹۹۸
۸	۰/۰۰۳۳	۰/۳۰۲۳	۰/۰۰۰۰۴۹	۰/۰۲۵۳	۱/۳۴۳	−۰/۵۴۵	۰/۹۹۹
۹	۰/۰۰۵۳	۰/۱۵۳	۰/۰۰۰۲۰۴	۰/۰۱	۱/۹۵۶	۰/۱۲۲	۰/۹۹۸
۱۰	۰/۰۰۰۵۹۴	۰/۴۷۹۱	۰/۰۰۰۰۵۳۱	۰/۰۹۹۳	۱/۷۰۸	۰/۱۰۳	۰/۹۹۹



شکل ۳. نمودارهای صحت و دقت واسنجی آبیاری نواری با روش VB-CC برای مزرعه ۵ (نتایج پژوهش)



شکل ۴. منحنی پیشروی مشاهداتی و محاسباتی، عمق و سرعت نفوذ و نیمرخ نفوذ عمقی با روش VB-CC در مزرعه ۵ (نتایج پژوهش)



شکل ۵. حجم ذخیره سطحی و زیرسطحی در فاز پیشروی با روش VB-CC در مزرعه ۵ (نتایج پژوهش)

NRMSE (میانگین ۴۱٪) و MBE (میانگین ۲۴-)، روش VB-ZI برای واسنجی ضرایب مناسب نیست. منفی بودن مقادیر MBE در بیشتر موارد حاکی از کم‌برآوردی روش یادشده است؛ ازاین‌رو مدل برای رسیدن به طول‌های پیشروی مشاهداتی بیشتر، نیازمند کم کردن ضرایب نفوذ و ضریب مانینگ است؛ بنابراین در بیشتر موارد حدود کمینه جدول ۳ به‌عنوان نتیجه

جدول ۶. نتایج واسنجی برمبنای مدل VB-ZI در آبیاری نواری (نتایج پژوهش)

مزرعه	k (m/min^a)	a	f_0 (m/min)	n	NRMSE(%)	MBE	R^2
۱	۰/۰۰۶۱	۰/۱۵۳	۰/۰۰۰۰۱۸۸	۰/۰۱	۴۲/۷۳۵	۲۱/۳۰۰۱	۰/۹۶۲
۲	۰/۰۰۰۳۶	۰/۱۵۳	۰/۰۰۰۰۸۷۳	۰/۰۱	۶۶/۰۷۴	−۳۱/۷۱۴	۰/۹۸۱
۳	۰/۰۰۰۳۶	۰/۱۵۳	۰/۰۰۰۱۱۴	۰/۰۱	۲۸/۰۲۴	−۲۶/۳۱۷	۰/۹۸۸
۴	۰/۰۰۰۳۶	۰/۱۵۳	۰/۰۰۰۰۱۹۳	۰/۰۱	۲۱/۲۸۱	−۱۷/۳۱۷	۰/۹۷۸
۵	۰/۰۰۶۱	۰/۲۴۶۵	۰/۰۰۰۰۱۸۸	۰/۰۱	۵۸/۸۲۶	−۲۷/۰۶۲	۰/۹۹۷

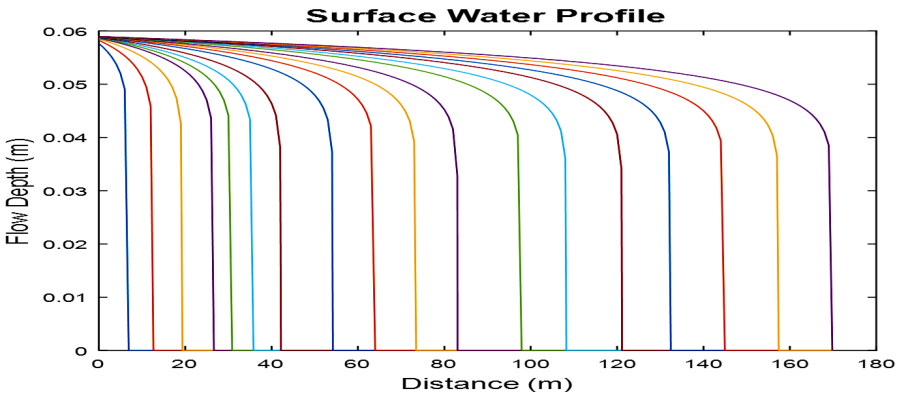
جدول ۷- نتایج واسنجی برمبنای مدل VB-ZI در آبیاری جویچه‌ای (نتایج پژوهش)

مزرعه	K (m^3/min^a/m)	a	F_0 (m^3/min/m)	n	NRMSE (%)	MBE	R^2
۶	۰/۰۰۰۲۸	۰/۱۵۵	۰/۰۰۰۰۳۱	۰/۰۱	۳۹/۳۶۹	−۱۹/۹۱	۰/۹۶۱
۷	۰/۰۰۰۲۱	۰/۱۵۳	۰/۰۰۰۰۱۹	۰/۰۱	۶۲/۲۶	−۲۹/۸۹	۰/۹۸۳
۸	۰/۰۰۰۲۱	۰/۱۵۳	۰/۰۰۰۰۱۹	۰/۰۱	۲۵/۷۴۴	−۲۴/۲۳۴	۰/۹۸۹
۹	۰/۰۰۰۳۱	۰/۱۵۶	۰/۰۰۰۰۳۲	۰/۰۱	۱۸/۹۷۲	−۱۵/۱۷۲	۰/۹۷۹
۱۰	۰/۰۰۰۲۱	۰/۱۵۳	۰/۰۰۰۰۱۹	۰/۰۱	۵۴/۰۰۶	−۲۴/۹۷۳	۰/۹۹۷

بهینه حاصل شده است. این شکست می‌تواند ناشی از فرض ساده‌کننده رابطه نمایی برای نیمرخ سطح آب (معادله ۴) باشد که در شرایط میدانی متنوع (به ویژه در خاک‌های با نفوذپذیری زیاد یا اشکال مقطع مختلف) ممکن است از دقت کافی برخوردار نباشد. باتوجه به نتایج نامناسب روش VB-ZI از ارائه شکل‌های مشابه شکل ۳، ۴ و ۵ خودداری شده است. فقط برای نمایش قابلیت روش VB-ZI، به‌عنوان نمونه در شکل ۶ نیمرخ سطح آب در زمان‌های مختلف فاز پیشروی در مزرعه ۴ ارائه شده است. با تاکید مجدد که در این پژوهش با فرض صادق بودن معادله ۴، نیمرخ سطح آب ترسیم شده است و از مدل هیدرودینامیک کامل استفاده نشد.

۱.۳. نتایج واسنجی مدل VB-VC

نتایج واسنجی با روش VB-VC به‌ترتیب برای آبیاری نواری و جویچه‌ای در جداول ۸ و ۹ ارائه شده است. مشابه روش VB-ZI، دیده می‌شود روش VB-VC با وجود همبستگی مطلوب (R^2 نزدیک مقدار یک)، به دلیل عدم مطلوبیت معیارهای NRMSE (میانگین ۳۵٪) و MBE (میانگین ۲۰-)، برای واسنجی رضایت‌بخش نبود. در این روش ضریب خطا NRMSE نزدیک به ۳۵ می‌باشد که ضعیف است و مقدار MBE نیز فاصله زیادی از صفر دارد و کم‌برآوردی شدید دارد؛ ازاین‌رو مدل حتی با ارائه حدود کمینه جدول ۳ به‌عنوان نتیجه بهینه نتوانسته است تخمین مناسبی از طول پیشروی داشته باشد. اگرچه این روش تغییرپذیری زمانی ضرایب شکل را مدل می‌کند، اما به نظر می‌رسد پیچیدگی محاسباتی افزوده و حساسیت به مقادیر اولیه در الگوریتم تکراری آن، سبب ناپایداری و کاهش قابلیت اطمینان نتایج شده است. در بسیاری از موارد، این روش نیز مشابه VB-ZI به حد پایین پارامترها همگرا شد. با توجه به نتایج نامناسب روش VB-CC از ارائه شکل‌های مشابه شکل ۳، ۴ و ۵ خودداری شده است.



شکل ۶. نیمرخ سطح آب در زمان‌های مختلف فاز پیشروی در مزرعه ۴ با روش VB-ZI (نتایج پژوهش)

جدول ۸. نتایج واسنجی برمبنای مدل VB-VC در آبیاری نواری (نتایج پژوهش)

مزرعه	k (m/min^a)	a	f_0 (m/min)	n	NRMSE(%)	MBE	R^2
۱	۰/۰۰۰۳۶	۰/۱۵۳	۰/۰۰۰۰۱۸۸	۰/۰۱	۳۶/۷۱۵	−۱۳/۴۵۶	۰/۹۵۲
۲	۰/۰۰۰۳۶	۰/۱۵۳	۰/۰۰۰۰۱۸۸	۰/۰۱	۷۰/۱۱۱	−۳۵/۴۲۸	۰/۹۷۱
۳	۰/۰۰۰۳۶	۰/۱۵۳	۰/۰۰۰۰۱۸۸	۰/۰۱	۳۲/۱۲۴	−۲۷/۵۶۲	۰/۹۸۷
۴	۰/۰۰۰۳۶	۰/۱۵۳	۰/۰۰۰۰۱۸۸	۰/۰۱	۲۵/۳۵۱	−۲۰/۴۱	۰/۹۷۹
۵	۰/۰۰۰۳۶	۰/۱۵۳	۰/۰۰۰۰۱۸۸	۰/۰۱	۶۲/۷۸۵	−۳۰/۶۴۱	۰/۹۹۲

جدول ۹. نتایج واسنجی برمبنای مدل VB-VC در آبیاری جویچه‌ای (نتایج پژوهش)

مزرعه	K (m^3/min^a/m)	a	F_0 (m^3/min/m)	n	NRMSE (%)	MBE	R^2
۶	۰/۰۰۰۲۱	۰/۱۵۳	۰/۰۰۰۰۱۹	۰/۰۱	۳۴/۸۷۸	−۲۰/۱۶۱	۰/۹۸
۷	۰/۰۰۰۲۱	۰/۱۵۳	۰/۰۰۰۰۱۹	۰/۰۱	۲۶/۷۴۶۵	−۱۴/۹۶۱	۰/۹۱۷
۸	۰/۰۰۰۲۱	۰/۱۵۳	۰/۰۰۰۰۱۹	۰/۰۱	۲۴/۵۹۴	−۲۰/۵۳۱	۰/۹۸
۹	۰/۰۰۰۲۱	۰/۱۵۳	۰/۰۰۰۰۱۹	۰/۰۱	۱۶/۹۲۷	−۹/۳۹۵۶	۰/۹۶۵
۱۰	۰/۰۰۰۲۱	۰/۱۵۳	۰/۰۰۰۰۱۹	۰/۰۱	۲۸/۱۸۶	−۳۱/۴۸۱	۰/۹۹۴

۱.۴. مقایسه نتایج واسنجی سه مدل

نتایج نشان داد دقت روش VB-CC در بافت‌های مختلف خاک نسبتاً پایدار است. با این حال، در خاک‌های درشت‌بافت (مانند مزارع ۱ و ۲ گلمکان) که نفوذپذیری اولیه زیاد و تغییرات پیشروی سریع است، این روش با بیشترین دقت عمل کرد. در خاک‌های ریزبافت (مانند مزارع دزفول) که نفوذ آهسته‌تر است، همه روش‌ها نتایج بهتری نشان دادند، اما برتری VB-CC محفوظ بود. از نظر شیب، روش VB-CC در شیب‌های متعارف (۰/۱ تا ۱٪) بهترین عملکرد را داشت. در شرایط کاملاً مسطح، این روش به دلیل وابستگی A_0 به S_0 با محدودیت مواجه است که در مطالعه حاضر با توجه به ویژگی‌های داده‌های مورد استفاده، مشکل‌ساز نبود. این یافته‌ها با نتایج مطالعاتی مانند

اکبری و فراهانی (۴) که بر تأثیر متقابل نفوذ، زبری و شیب بر هیدرولیک جریان سطحی تأکید دارند، همخوانی دارد.

برای درک بهتر جایگاه روش پیشنهادی، به مقایسه کیفی کارایی VB-CC با مدل‌های شناخته شده‌ای مانند SIRMOD III (Walker, 2003) و WinSRFR (که از حل‌های عددی پیچیده‌تر استفاده می‌کنند) پرداخته می‌شود. اگرچه مدل‌هایی مانند WinSRFR از نظر فیزیکی جامع‌تر و برای شبیه‌سازی تمام فازهای آبیاری قدرتمندند، اما نتایج این پژوهش نشان داد که برای هدف خاص واسنجی پارامترها بر مبنای داده‌های پیشروی، روش ساده‌تر VB-CC می‌تواند با دقتی قابل مقایسه و با سرعت بسیار بیشتر و نیاز به داده‌های کمینه (فقط زمان و طول پیشروی) به نتیجه برسد. این امر VB-CC را به ویژه برای کاربردهای عملی طراحی اولیه، تحلیل‌های حساسیت و ادغام در چارچوب‌های بهینه‌سازی (مانند EDOSIM) که نیاز به صدها یا هزاران بار اجرای مدل دارند، به گزینه‌ای بسیار کارآمد تبدیل می‌کند.

۲. نتایج افزودن قابلیت واسنجی به مدل EDOSIM

پس از شناسایی روش VB-CC به عنوان روش برتر واسنجی، این روش به مدل شبیه‌سازی - بهینه‌سازی EDOSIM افزوده شد. در جدول ۱۰، تابع هدف مدل EDOSIM با روش‌های تخمین پارامتر دو نقطه‌ای الیوت واکر (Z_1) و واسنجی VB-CC (Z_2) ارائه شده است. تابع هدف که ترکیبی وزنی از شاخص‌های کارایی (مانند Ea، DU) و تلفات (مانند DPR، TWR) است، هرچه کوچک‌تر باشد، نشان‌دهنده دست‌یابی به طرح آبیاری با عملکرد برتر است. با بررسی نتایج مشخص می‌شود با افزودن واسنجی به مدل EDOSIM، توابع هدف کاهش (بهبود) پیدا کرده است. به عنوان مثال، در مزرعه ۱ (آبیاری نواری) مقدار Z از ۰/۵۹ به ۰/۳۷۹ و در مزرعه ۶ (جویچه‌ای) از ۰/۹۹۶ به ۰/۳۸ کاهش یافته است. این بهبود به طور متوسط حدود ۴۰٪ در تابع هدف بهینه‌سازی دیده شد. این کاهش معنادار در تابع هدف به دو دلیل اصلی رخ داده است:

۱- برآورد دقیق‌تر پارامترها: روش VB-CC با برآورد واقعی‌تر پارامترهای نفوذ و زبری، موجب شد مدل EDOSIM شبیه‌سازی دقیق‌تری از توزیع رطوبت در خاک ارائه دهد. درنتیجه، مقادیر شاخص‌های کارایی محاسبه‌شده در فرایند بهینه‌سازی (مانند Ea و DU) به مقادیر بهینه همگرا شدند.

۲- کاهش خطای اریبی در شبیه‌سازی: روش VB-CC فاقد سوگیری سیستماتیک (MBE≈0) است. این امر باعث شد پیش‌بینی مدل از حجم نفوذ و رواناب (که به طور مستقیم در تلفات DPR و TWR تأثیر دارند) قابل اعتمادتر باشد. در مقابل، روش الیوت - واکر که تنها از دو نقطه پیشروی استفاده می‌کند، در بسیاری از شرایط (به ویژه در خاک‌های ناهمگن یا زمانی که منحنی پیشروی از رابطه توانی ساده پیروی نمی‌کند) دچار خطای اریبی می‌شود و منجر به برآورد نادرست تلفات می‌گردد.

درنتیجه، ادغام روش واسنجی VB-CC در چارچوب EDOSIM نه تنها دقت مرحله واسنجی، بلکه قابلیت اطمینان و کارایی کل فرایند شبیه‌سازی - بهینه‌سازی را به طور چشمگیری افزایش داد. این بهبود نشان می‌دهد که یک مدل بهینه‌سازی تنها زمانی می‌تواند طرح‌های مدیریتی بهینه و قابل اعتمادی ارائه دهد که پارامترهای ورودی آن با دقت زیاد و با استفاده از روش‌های مناسب برآورد شده باشند.

نتیجه‌گیری نهایی

در این پژوهش، به‌منظور ارائه روشی برای تخمین ضرایب معادله نفوذ کوستیاکف - لوییس و ضریب زبری مانینگ در مدل EDOSIM، سه روش واسنجی VB-CC، VB-ZI و VB-VC مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج حاصل از ارزیابی این سه روش نشان داد، روش واسنجی VB-CC در آبیاری نواری و جویچه‌ای پاسخ بهتری نسبت به دیگر روش‌ها ارائه کرد. روش‌های VB-ZI و VB-VC با وجود پیچیدگی نظری بیشتر،

جدول ۱۰. تابع هدف مدل EDOSIM با روش‌های تخمین پارامتر دو نقطه‌ای الیوت واکر (Z_1) و واسنجی VB-CC (Z_2)

مزرعه	آبیاری نواری		مزرعه	آبیاری جویچه‌ای	
	Elliott Walker (Z_1)	VB-CC (Z_2)		Elliott Walker (Z_1)	VB-CC (Z_2)
۱	۰/۵۹	۰/۳۷۹	۶	۰/۹۹۶	۰/۳۸
۲	۰/۳۴۶	۰/۰۶	۷	۰/۵۵۳	۰/۵۱۷
۳	۰/۳۱۱	۰/۰۴۸۹	۸	۰/۹۵۸	۰/۲۶۹
۴	۰/۳۷۱	۰/۰۸	۹	۰/۹۱۲	۰/۳۹۱
۵	۰/۱۰۱	۰/۰۸۰۱	۱۰	۰/۸۷	۰/۲۳۱
میانگین	۰/۳۴	۰/۱۳	میانگین	۰/۸۶	۰/۳۶

به دلیل کم‌برآوردی سیستماتیک طول پیشروی و حساسیت زیاد به مقادیر اولیه و فرضیات ساده‌کننده (مانند نیمرخ نمایی سطح آب)، در شرایط متنوع میدانی این پژوهش نتوانستند دقت لازم را ارائه دهند و نتایج آنها اغلب به حد پایین محدودیت پارامترها همگرا شد.

در مرحله بعد با افزودن روش واسنجی VB-CC به جای روش تخمین پارامترهای دونقطه‌ای الیوت واکر در مدل EDOSIM نتایج مورد بررسی قرار گرفتند. ادغام موفقیت‌آمیز روش VB-CC در مدل EDOSIM به جای روش دو نقطه‌ای الیوت - واکر، منجر به بهبود حدود ۴۰٪ در تابع هدف بهینه‌سازی شد. این امر ناشی از شبیه‌سازی واقعی‌تر توزیع رطوبت و برآورد دقیق‌تر تلفات آبیاری بود؛ بنابراین، استفاده از یک روش واسنجی قوی، پیش‌نیازی اساسی برای دستیابی به خروجی‌های بهینه‌سازی قابل اعتماد در مدل‌های مدیریت آبیاری است. مدل EDOSIM پس از واسنجی ضرایب نفوذ و ضریب زبری مانینگ شبیه‌سازی و بهینه‌سازی مطلوب‌تری نسبت به روش تخمین پارامترهای الیوت واکر انجام داد. روش پیشنهادی VB-CC در EDOSIM به دلیل سادگی مفهومی، سرعت اجرای زیاد و نیاز به داده‌های حداقلی (تنها زمان و مکان پیشروی)، گزینه‌ای عملی و قدرتمند برای کارشناسان و مهندسین به منظور طراحی و ارزیابی سامانه‌های آبیاری سطحی در شرایط واقعی مزرعه است.

با وجود دقت قابل قبول مدل، کاربرد آن در این پژوهش محدود به فاز پیشروی جریان است؛ ازاین‌رو توسعه آتی برای لحاظ کردن پسروی و ذخیره سطحی توصیه می‌شود. همچنین برای ادامه این پژوهش پیشنهادهایی از جمله واسنجی دیگر معادلات نفوذ از جمله SCS و فیلیپ، واسنجی با استفاده از تمام فازهای آبیاری و مقایسه با سایر مدل‌ها از قبیل IPARM و INFILT ارائه می‌شود.

منابع مورد استفاده

References

1. Abbasi, F., M.M. Shooshtari and J. Feyen. 2003. Evaluation of various surface irrigation numerical simulation models. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 129(3): 208-213.
2. Adamu, T., M. Ayana and G. Aregay. 2022. Optimization of furrow irrigation decision variables: the case of Wonji Shoa sugar estate, Ethiopia. *Discover Water* 2(1): 10.
3. Akbari, M., M. Gheysari, B. Mostafazadeh-Fard and M. Shayannejad. 2018. Surface irrigation simulation-optimization model based on meta-heuristic algorithms. *Agricultural Water Management* 201: 46-57.
4. Akbari, M. and Farahani, S. 2025. Enhancement of Border Irrigation Systems: Leveraging Simulation–Optimization Techniques. *Agricultural Water Management* 321: 109891.

5. Alavi, S.A., A.A. Naseri, H. Ritzema, J. van Dam and P. Hellegers. 2022. A combined model approach to optimize surface irrigation practice: SWAP and WinSRFR. *Agricultural Water Management* 271: 107741.
6. Corradini, C., F. Melone and R.E. Smith. 1997. A unified model for infiltration and redistribution during complex rainfall patterns. *Journal of Hydrology* 192(1-4): 104-124.
7. Elliott, R.L. and W.R. Walker. 1982. Field evaluation of furrow infiltration and advance functions. *Transactions of the ASAE* 25(2): 396-400.
8. Gillies, M.H. and R.J. Smith. 2005. Infiltration parameters from surface irrigation advance and run-off data. *Irrigation Science* 24(1): 25-35.
9. Githui, F., A. Hussain and M. Morris. 2020. Incorporating infiltration in the two-dimensional ANUGA model for surface irrigation simulation. *Irrigation Science* 38(4): 373-387.
10. Green, W. H., and G. A. Ampt. 1911. Studies on soil physics, Part I, the flow of air and water through soils. *Journal of Agriculture and Biological Sciences* 4(1): 1-24.
11. Hillel, D., 1998. Environmental Soil Physics, Academic Press, San Diego.
12. Kazeroonian, S.M., F. Abbasi and H. Sedghi. 2017. Statistical study of infiltration parameters variations of Kostiakov-Lewis equation in furrow irrigation during three farming seasons. *Journal of Water and Soil Conservation* 24(4): 83-10 (in Farsi).
13. Kostiakov, A.N. 1932. On the dynamics of the coefficient of water-percolation in soils and on the necessity of studying it from a dynamic point of view for purposes of amelioration. Trans. 6th Cong. International. Soil Science, Russia.
14. Loáiciga, H.A. and A. Huang. 2007. Ponding analysis with Green-and-Ampt infiltration. *Journal of Hydrologic Engineering* 12(1):109-112.
15. Mazarei, R., A.S. Mohammadi, H. Ebrahimian and A.A. Naseri. 2021. Temporal variability of infiltration and roughness coefficients and furrow irrigation performance under different inflow rates. *Agricultural Water Management* 245: 106465.
16. McClymont, D.J. and R.J. Smith. 1996. Infiltration parameters from optimisation on furrow irrigation advance data. *Irrigation Science* 17(1): 15-22.
17. Pazouki, E. 2021. A practical surface irrigation design based on fuzzy logic and meta-heuristic algorithms. *Agricultural Water Management* 256: 107069.
18. Philip, J.R. 2006. The theory of infiltration: 1. The infiltration equation and its solution. *Soil Science* 171(6): S34-S46.
19. Rawls, W.J., L.R. Ahuja, D.L. Brakensiek and A. Shirmohammadi. 1992. Infiltration and soil water movement, McGraw-Hill Inc., New York.
20. Rodriguez, J.A. and J.C. Martos. 2010. SIPAR_ID: freeware for surface irrigation parameter identification. *Environmental Modelling and Software* 25(11): 1487-1488.
21. Schmitz, G.H. and G.J. Seus. 1992. Mathematical zero-inertia modeling of surface irrigation: Advance in furrows. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 118(1): 1-18.
22. Shayannejad, M., M. Ghobadi and K. Ostad-Ali-Askari. 2022. Modeling of surface flow and infiltration during surface irrigation advance based on numerical solution of Saint–Venant equations using Preissmann's scheme. *Pure and Applied Geophysics* 179(3): 1103-1113.
23. Shepard, J.S., W.W. Wallender and J.W. Hopmans. 1993. One-point method for estimating furrow infiltration. *Transactions of the ASAE* 36(2): 395-404.
24. Valiantzas, J.D. 1993. Border advance using improved volume-balance model. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 119(6): 1006-1013.
25. Valiantzas, J.D. 1997a. Surface irrigation advance equation: variation of subsurface shape factor. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 123(4): 300-306.
26. Valiantzas, J.D. 1997b. Surface irrigation advance equation: variation of surface shape factor. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 123(4): 307-312.
27. Valiantzas, J.D., S. Aggelides and A. Sassalou. 2001. Furrow infiltration estimation from time to a single advance point. *Agricultural Water Management* 52(1): 17-32.
28. Walker, W.R. 2003. SIRMOD III: Surface irrigation simulation, evaluation and design. Guide and Technical Documentation. Department of Biological and Irrigation Engineering. Utah State University, Logan, UT, USA.
29. Walker, W.R. 2005. Multilevel calibration of furrow infiltration and roughness. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 131(2): 129-136.