


Development of Simulation- Optimization Model for Design of Furrow Irrigation: Combining the SCS Method and Meta-Heuristic Algorithms

Mohammad Amiri¹, Mahmood Akbari^{1*} 

¹Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture and Environment, Arak University, Arak, Iran.

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:

Received: 24 June 2025

Revised: 27 October 2024

Accepted: 11 November 2025

Published online: 29 March 2025

Keywords:

Surface irrigation
PSO algorithm
Flow reduction
Calibration

ABSTRACT

Objective: It is possible to determine optimal system performance using simulation-optimization models. Low-pressure surface irrigation is one of the modern irrigation methods and is supported by the government, which provides free loans.

Material and Methods: In this research, a new calibration- simulation-optimization model was developed for furrow irrigation. In this model, the SCS method was used to calibrate parameters of the SCS infiltration equation from infiltration test data. The SCS method was used for hydraulic simulation of surface irrigation (furrow design). The PSO meta-heuristic algorithm solver (particleswarm) was used for optimization. Finally, in this model, the simulation is done after the simulation-optimization of furrow irrigation. To optimize the hydraulic objective function, which minimizes a linear combination of three performance indicators, the decision variables were flow rate, length, and slope.

Results and Discussion: Comparing the SCS infiltration equation results with the calibrated parameters and observed infiltration values ($R^2=0.99$, $CRM=-0.002$, $NRMSE=0.7\%$) indicated proper calibration performance. The simulation results from three experimental fields showed over-irrigation and runoff losses, leading to an inappropriate objective function. However, the design reduced the losses by reducing the flow rate and closing the end. After that, optimization with options such as flow rate reduction, length increase, and slope reduction resulted in reductions (improvements) in the objective function from 1.22 to 0.24 for field 1, from 0.8 to 0.27 for field 2, and from 0.22 to 0.11 for field 3.

Conclusion: In total, the inlet flow rate, as a decision variable, had the greatest effect on the performance indicators and the objective function. Finally, the proposed model can provide management solutions to optimize furrow irrigation.

*Corresponding author, Email: m-akbarii@araku.ac.ir

Cite this article: Amiri, Mohammad., & Akbari, Mahmood. (2026). Development of simulation- optimization model for design of furrow irrigation: Combining the scs method and meta-heuristic algorithms. *Journal of New Approaches in Water Engineering and Environment*. <http://doi.org/10.22034/nawee.2025.531231.1166>



© The Author(s).

Publisher: Gonbad Kavous University.

DOI: <http://doi.org/10.22034/nawee.2025.531231.1166>



توسعه مدل شبیه‌سازی - بهینه‌سازی طراحی آبیاری جویچه‌ای: تلفیق روش SCS و الگوریتم‌های فراابتکاری

محمد امیری^۱، محمود اکبری^{۱*}

^۱ گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و محیط زیست، دانشگاه اراک، اراک، ایران.

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	هدف: تعیین عملکرد بهینه سامانه‌ها با استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی - بهینه‌سازی امکان‌پذیر است. آبیاری سطحی که در قالب آبیاری کم‌فشار در زمره روش‌های نوین آبیاری هستند، با دریافت اعتبارات بلاعوض، مورد حمایت دولت قرار می‌گیرند.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۰۳ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۸/۰۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۲۰ تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۱/۰۹	مواد و روش‌ها: در این تحقیق یک مدل واسنجی - شبیه‌سازی - بهینه‌سازی جدید برای آبیاری جویچه‌ای توسعه داده شد. در این مدل برای واسنجی پارامترهای معادله نفوذ SCS از داده‌های آزمایش نفوذ، برای شبیه‌سازی هیدرولیک آبیاری سطحی (طراحی جویچه) از روش SCS و برای بهینه‌سازی، از حل‌گر الگوریتم فراابتکاری PSO (particleswarm) استفاده شد. در نهایت در این مدل، شبیه‌سازی پس از شبیه‌سازی - بهینه‌سازی آبیاری جویچه‌ای انجام می‌شود. برای بهینه‌سازی تابع هدف هیدرولیکی شامل کمینه‌سازی ترکیب خطی سه شاخص عملکرد، از متغیرهای تصمیم دبی، طول و شیب استفاده شد.
کلیدواژه‌ها: آبیاری سطحی الگوریتم PSO کاهش دبی واسنجی	نتایج و بحث: مقایسه نتایج معادله نفوذ SCS با پارامترهای واسنجی شده با مقادیر نفوذ مشاهده‌ای، با $R^2=0.99$ ، $CRM=-0.002$ و $NRMSE=0.7\%$ ، نشانگر عملکرد مناسب واسنجی بود. نتایج شبیه‌سازی در سه مزرعه آزمایشی بیانگر بیش‌آبیاری با تلفات رواناب بود که منجر به تابع وضع موجود نامناسب شد. گرچه طراحی با کاهش دبی و بستن انتها تلفات را کاهش داد. پس از آن بهینه‌سازی با گزینه‌هایی نظیر کاهش دبی، افزایش طول و افزایش شیب تابع هدف را از $1/22$ به $0/24$ برای مزرعه ۱، از $0/8$ به $0/27$ برای مزرعه ۲ و از $0/22$ به $0/11$ برای مزرعه ۳ کاهش (بهبود) داد.
	نتیجه‌گیری: در مجموع متغیر تصمیم دبی بیشترین تأثیر را بر شاخص‌های عملکرد و تابع هدف نشان داد. در نهایت مدل پیشنهادی قادر به ارائه راهکارهای مدیریتی به‌منظور بهینه‌سازی آبیاری جویچه‌ای می‌باشد.

*نویسنده مسئول، Email: m-akbarii@araku.ac.ir

استناد: امیری، محمد؛ و اکبری، محمود (۱۴۰۵). توسعه مدل شبیه‌سازی - بهینه‌سازی طراحی آبیاری جویچه‌ای: تلفیق روش SCS و الگوریتم‌های

فراابتکاری. *رویکردهای نوین در مهندسی آب و محیط زیست*.

<http://doi.org/10.22034/nawee.2025.531231.1166>



مقدمه

تاکنون بیش از ۲/۵ میلیون هکتار از اراضی آبی ایران به سامانه‌های آبیاری نوین مجهز شده‌اند (نوری و برومندنسب، ۱۴۰۲). هزینه‌های گزاف برای توسعه روش‌های آبیاری تحت فشار، فقط افزایش ۱۳ درصد راندمان کاربرد را در پی داشته است (ماندگاری کهن و همکاران، ۱۴۰۲). رسیدن به این افزایش با سرمایه‌گذاری کمتر و توجه بیشتر به آبیاری سطحی امکان‌پذیر بوده است (Adamu et al., 2022). با توجه به افزایش زیاد هزینه‌های انرژی، شناخت و ارائه راهکارهایی برای بهبود آبیاری سطحی می‌تواند در خروج از بحران آب کمک شایان توجهی کند (Kargas et al., 2024). روش‌های طراحی آبیاری سطحی شامل طراحی با روش FAO (تجربی)، طراحی با روش بیلان حجمی واکر و اسکوگرو (هیدرولیکی) و طراحی به روش SCS (هیدرولیکی-تجربی) می‌باشند (علیزاده، ۱۳۸۵).

مدیریت آبیاری سطحی به دلیل تعدد پارامترهای مؤثر و تغییرات مکانی و زمانی آنها برای نیل به بازده و یکنواختی زیاد دشوار می‌باشد (Salahou et al., 2023). به دلیل تلفات زیاد در آبیاری سطحی، استفاده از ابزارهایی که بتوان ضمن طراحی مناسب به حداکثر بهره‌وری آب دست یافت، اجتناب‌ناپذیر است (Mazarei et al., 2021). یکی از این ابزارها، مدل‌های آبیاری سطحی می‌باشند که با شبیه‌سازی آبیاری سطحی، جریان روزمینی و زیرزمینی آب و بازده‌های آبیاری، کفایت و یکنواختی توزیع را با توجه به شرایط مزرعه‌ای پیش‌بینی می‌کنند (Ghobadi et al., 2020). نرم‌افزارهای مدل‌سازی آبیاری سطحی نظیر SURDEV (Jurriens et al., 2001)، SIRM (Walker, 2003) و WinSRFR (Bautista et al., 2009) با حل عددی معادلات سنت‌ونانت، قادر به بررسی اثر متغیرهای مؤثر بر آبیاری سطحی نظیر طول، عرض، شیب، دبی و زمان قطع می‌باشند (Shayannejad et al., 2022).

از طرفی تخمین صحیح مقدار نفوذ آب در خاک یک عامل مهم در طراحی سامانه‌های آبیاری سطحی است (ذاکری نیا و عبدالهی، ۱۴۰۲). هرچه معادله نفوذ دقیق‌تر تخمین زده شود، سامانه آبیاری را بهتر می‌توان طراحی و ارزیابی نمود (عبدی و سعادت، ۱۴۰۱). در این راستا نرم‌افزارهایی مانند SIPAR-ID (Rodriguez and Martos, 2008)، IPARM (Gillies & Smith, 2005) و Infiltr (McClymont & Smith, 1996) به منظور واسنجی پارامترهای معادله نفوذ و ضریب زبری مانینگ، به فراخور از داده‌های پیش‌روی، رواناب و پسروری استفاده می‌کنند (Akbari and Farahani, 2025).

با عنایت به پیچیدگی سامانه‌های آبیاری سطحی، مدل‌های شبیه‌سازی مذکور، توانایی تعیین جواب‌های بهینه را ندارند (Saber et al., 2020). اما مدل‌های شبیه‌سازی-بهینه‌سازی با بهره‌گیری از روابط ریاضی و استفاده از تابع هدف و لحاظ نمودن قیود حاکم، نقطه‌ضعف مدل‌های شبیه‌سازی را جبران می‌کنند (Pazouki, 2021). در راستای ارائه مدل‌های شبیه‌سازی-بهینه‌سازی آبیاری سطحی بر مبنای روش بیلان حجمی، مدل EDOSIM ارائه شده است (Akbari et al., 2018). در مدل EDOSIM، برای شبیه‌سازی هیدرولیک آبیاری سطحی شامل طراحی یا ارزیابی کرت، نوار و جویچه، از مدل بیلان حجم و برای بهینه‌سازی از الگوریتم فراابتکاری استفاده شده است.

مطالعاتی در مورد کاربرد روش SCS انجام شده است. اثرات ترکیبی سطوح مختلف تسطیح (شیب‌های صفر، ۰/۰۵ و ۰/۱ درصد) و دبی جریان ورودی (۲، ۲/۷ و ۳/۳ لیتر بر ثانیه) در جویچه‌های با طول ۴۰ و فاصله ۰/۷۵ متر با استفاده از روش SCS بررسی شد (Aiad et al., 2019). مواردی نظیر زمان آبیاری، زمان پیش‌روی و پسروری، زمان نفوذ، عمق نفوذ، نسبت نفوذ عمقی و نسبت رواناب پایاب توسط روش SCS محاسبه و با مقادیر اندازه‌گیری مقایسه شدند و نتایج مناسبی حاصل شد.

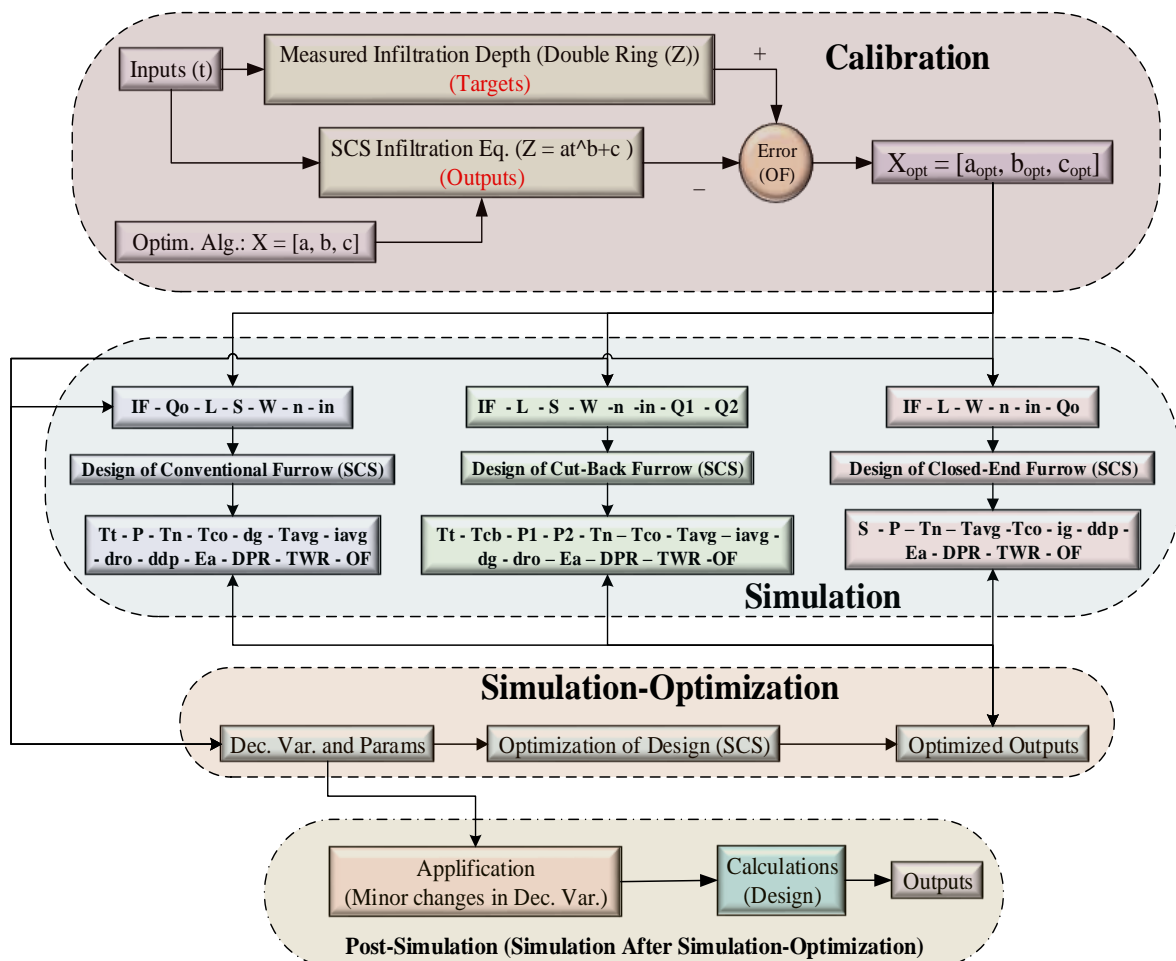
اما مدل شبیه‌سازی-بهینه‌سازی بر مبنای روش SCS تاکنون ارائه نشده است. اهمیت ارائه مدلی در این زمینه از جهت کاربردی بودن روش SCS در طراحی سامانه‌های آبیاری کم‌فشار می‌باشد. سامانه‌های آبیاری کم‌فشار به‌عنوان گزینه‌ای جایگزین کانال‌های روباز با نیاز به سرمایه‌گذاری کمتر و هزینه کمتر انرژی در مقایسه با گزینه تبدیل کانال‌های آبیاری روباز به آبیاری تحت فشار (بارانی و موضعی) مورد توجه می‌باشد. سامانه‌های آبیاری با لوله‌های کم‌فشار یک فن‌آوری میانه بین شبکه کانال‌های روباز و آبیاری تحت فشار، برای بهسازی آبیاری برای ارتقای بهره‌وری آب می‌باشد (حقایقی مقدم و همکاران، ۱۳۹۸).

آبیاری کم فشار که در کنار روش های کلاسیک، ماشین های آبیاری، موضعی و زیرسطحی اجزای روش های نوین آبیاری هستند، با دریافت اعتبارات بلاعوض، مورد حمایت دولت قرار می گیرند. بنابراین ارائه روشی به منظور طراحی بهینه سامانه های آبیاری سطحی ضروری است. لذا هدف تحقیق حاضر توسعه مدل شبیه سازی- بهینه سازی طراحی آبیاری جویچه ای با تلفیق روش شبیه سازی SCS و الگوریتم های فراابتکاری است. هدف دیگر این تحقیق نیز بهبود روش شبیه سازی SCS است که منجر به محاسبه شاخص های عملکرد هیدرولیکی دیگر شود.

مواد و روش ها

معرفی مدل پیشنهادی تحقیق

در این تحقیق یک مدل واسنجی- شبیه سازی- بهینه سازی جدید برای آبیاری جویچه ای تهیه شد. در این مدل برای واسنجی پارامترهای معادله نفوذ SCS از داده های آزمایش نفوذ، برای شبیه سازی هیدرولیک آبیاری سطحی (طراحی جویچه) از روش SCS و برای بهینه سازی، از حل گر الگوریتم فراابتکاری PSO (particleswarm) استفاده شد. در نهایت در این مدل، شبیه سازی پس از شبیه سازی- بهینه سازی آبیاری جویچه ای انجام می شود (شکل ۱).



شکل ۱- روندنمای کلی مدل پیشنهادی تحقیق

پس از شبیه سازی (طراحی جویچه)، بهینه سازی صورت می گیرد. مدل شبیه سازی با دریافت ورودی ها، محاسباتی را انجام داده و خروجی ها را اعلام می نماید. در انتهای خروجی ها، شاخص های عملکردی (نظیر راندمان) که نشان دهنده وضعیت مورد

انتظار (در طراحی) سامانه هستند وجود دارد. البته می توان بدون شبیه سازی اولیه مستقیماً بهینه سازی را انجام داد. اما بهینه سازی پس از شبیه سازی دارای مزایایی می باشد. از بین این مزایا می توان گفت با مقایسه شرایط بعد از بهینه سازی نسبت به قبل آن، نقش بهینه سازی در بهبود شرایط مشخص می گردد. همچنین می توان نقش متغیرهای تصمیم در بهبود عملکرد آبیاری سطحی را تشخیص داد. به علاوه می توان پس پردازش (شبیه سازی پس از بهینه سازی) را صورت داد. به منظور پیاده سازی مدل پیشنهادی تحقیق از نرم افزار برنامه نویسی MATLAB استفاده گردید.

واسنجی پارامترهای معادله نفوذ SCS در مدل پیشنهادی

در مدل پیشنهادی قبل از شبیه سازی، واسنجی پارامترهای قابل واسنجی صورت می گیرد. ورودی ها در شبیه سازی، شامل متغیرهای تصمیم و پارامترها در شبیه سازی- بهینه سازی هستند. پارامترها خود به دو دسته پارامترهای قابل واسنجی و غیر قابل واسنجی تقسیم می شوند. پارامترهای غیر قابل واسنجی، همچون دبی کل مزرعه دارای مقادیر قطعی و مشخص هستند. اما پارامترهای قابل واسنجی همچون پارامترهای پیشروی، نفوذ و ضریب زبری مانینگ دارای مقادیر قطعی و مشخص نیستند، که می توانند با حل معکوس قبل از شبیه سازی تعیین شوند و نتیجه آنها به عنوان ورودی به مدل شبیه سازی وارد شود.

در روش حل معکوس به منظور انجام فرایند واسنجی، نتایج مدل تخمین گر (Outputs) به داده های واقعی هدف (Targets) تا حد امکان نزدیک می گردد. در طراحی، Targets داده های آزمایش نفوذ به روش استوانه های مضاعف و Outputs معادله نفوذ SCS می باشد. مدل تخمین گر (معادله نفوذ SCS) دارای تعدادی پارامتر یا پیچ تنظیم می باشد که به عنوان متغیرهای تصمیم در فرایند بهینه سازی تعیین می شود. لذا واسنجی، خود یک مساله بهینه سازی است. در روش طراحی SCS، پارامترهای خانواده نفوذ (IF) شامل پارامترهای معادله نفوذ SCS (a, b و c) و پارامترهای پیشروی (f و g)، بر اساس بانک اطلاعاتی خاک های آمریکا است. برای این که قابلیت استفاده در خاک های مناطق دیگر وجود داشته باشد، باید با استفاده از حل معکوس، امکان واسنجی و تخمین مناسب را فراهم آورد تا برای خاک های مناطق دیگر نیز مناسب باشد.

تابع هدف می تواند یک شاخص عملکرد آماری نظیر NRMSE، R^2 ، CRM یا ترکیبی از آنها باشد. ممکن است مقادیر پارامترهای مدل دارای قید هندسی و/یا ساختار مساله دارای قید رفتاری باشند. در مجموع مساله بهینه سازی واسنجی علاوه بر تعیین موارد ضروری هر مساله بهینه سازی، نیاز به داده های Targets و Outputs دارد. مدل تخمین گر حتماً باید دارای پارامتر (ها) باشد. لذا در بخش واسنجی مدل پیشنهادی این پژوهش، برنامه ای نوشته شد که با استفاده از حل گر particleswarm جعبه ابزار بهینه سازی نرم افزار MATLAB و داده های آزمایش نفوذ به روش استوانه های مضاعف، توانایی واسنجی پارامترهای a, b و c معادله نفوذ SCS را دارد (بخش Calibration شکل ۱).

شبیه سازی در مدل پیشنهادی

طراحی آبیاری جویچه ای معمولی، با کاهش دبی و انتها بسته به روش SCS، اجزای شبیه سازی آبیاری سطحی در مدل پیشنهادی هستند (بخش Simulation شکل ۱).

طراحی آبیاری جویچه ای

ورودی های طراحی آبیاری جویچه ای در مدل پیشنهادی بر مبنای اصلاح روش SCS شامل ضرایب نفوذ واسنجی شده (a, b, c)، ضرایب پیشروی (f و g) بر مبنای شماره منحنی نفوذ (IF)، طول جویچه (L) (متر)، شیب جویچه (S) (متر بر متر)، فاصله جویچه ها از یکدیگر (W) (متر)، ضریب زبری مانینگ (n)، عمق خالص آبیاری (i_n) (میلی متر) و دبی ورودی به جویچه (Q) (لیتر بر ثانیه) هستند.

متغیرهای ورودی به دو دسته کلی شامل متغیر تصمیم و پارامتر تقسیم می‌شوند. متغیرهای تصمیم مستقیماً توسط انسان قابل تغییر هستند. طول جویچه (L)، شیب جویچه (S)، فاصله جویچه‌ها از یکدیگر (W)، عمق خالص آبیاری (i_n) و دبی ورودی به جویچه (Q) متغیر تصمیم هستند. متغیرهایی که مستقیماً توسط انسان قابل تغییر نیستند را پارامتر می‌گویند. شماره منحنی نفوذ (IF)، ضرایب نفوذ و پیشروی (a, b, c, f و g) و ضریب زبری مانینگ (n) پارامتر هستند. در طراحی آبیاری جویچه‌ای، با کاهش دبی و با انتهای بسته بر مبنای روش SCS (علیزاده، ۱۳۸۵؛ سهرابی و پایدار، ۱۳۸۴)، ضرایب پنج‌گانه (a, b, c, f و g) وابسته به شماره منحنی نفوذ (IF) هستند. در حالی که در مدل پیشنهادی، طبق مطالب پیش‌گفت، ضرایب نفوذ (a, b, c) از مرحله واسنجی استخراج می‌شوند.

خروجی‌های طراحی آبیاری جویچه‌ای در مدل پیشنهادی بر مبنای اصلاح روش SCS نیز به ترتیب شامل زمان پیشروی (T_f) (دقیقه)، محیط خیس شده (P) (متر)، زمان لازم برای نفوذ مقدار خالص آبیاری به داخل خاک (T_n) (دقیقه)، زمان قطع جریان (T_{co}) (دقیقه)، عمق ناخالص آبیاری (i_g) (میلی‌متر)، متوسط فرصت نفوذ در جویچه (T_{avg}) (دقیقه)، متوسط آب نفوذ شده در خاک در طول جویچه (i_{avg}) (میلی‌متر)، عمق رواناب سطحی (d_{ro}) (میلی‌متر)، مقدار نفوذ عمقی (d_{dp}) (میلی‌متر)، راندمان کاربرد مصرف آب در آبیاری (E_a) (در صد)، نسبت رواناب پایاب (TWR) (در صد)، نسبت نفوذ عمقی (DPR) (در صد) و تابع هدف یا وضع موجود (Z) (بی‌بعد) هستند.

معادلات حاکم توسط (علیزاده، ۱۳۸۵؛ سهرابی و پایدار، ۱۳۸۴) تشریح شده‌اند و به جهت جلوگیری از اطاله کلام، صرفاً بهبودها و اصلاحات در این نوشتار بیان شده است. در طراحی آبیاری جویچه‌ای بر مبنای روش SCS، بیان عملکرد سامانه صرفاً با شاخص عملکرد راندمان کاربرد (Ea) توصیف شده است. در حالی که در نظر گرفتن راندمان کاربرد به عنوان تنها شاخص عملکرد، نمی‌تواند توجیه‌کننده عملکرد آبیاری جویچه‌ای باشد و نیاز به لحاظ نمودن سایر شاخص‌های عملکرد مطابق روابط ۱ و ۲ می‌باشد.

$$TWR = \frac{d_{ro}}{i_g} \times 100 \quad (1)$$

$$DPR = \frac{d_{dp}}{i_g} \times 100 \quad (2)$$

طراحی آبیاری جویچه‌ای با کاهش دبی

در این روش، پس از رسیدن دبی اولیه به انتهای جویچه، شدت جریان به نصف کاهش داده می‌شود و آبیاری تا زمانی که انتهای جویچه به اندازه لازم آب دریافت کند، ادامه می‌یابد.

ورودی‌ها، متغیرهای تصمیم و خروجی‌های این حالت مشابه طراحی آبیاری جویچه‌ای است. با این تفاوت که به جای دبی ورودی به جویچه (Q)، دبی اولیه ورودی به جویچه (Q_1) (لیتر بر ثانیه) و دبی کاهش‌ی ورودی به جویچه (Q_2) (لیتر بر ثانیه) جزو ورودی‌ها (و متغیرهای تصمیم) هستند. همچنین علاوه بر افزودن زمان کاهش جریان (T_{cb}) (دقیقه)، به جای محیط خیس شده (P) (متر)، محیط خیس شده اولیه (P_1) (متر) و محیط خیس شده با جریان کاهش داده شده در جویچه (P_2) (متر)، جزو خروجی‌ها هستند.

طراحی آبیاری جویچه‌ای با انتهای بسته

در طراحی آبیاری جویچه‌ای با انتهای بسته، فرضیات زیر در نظر گرفته می‌شود (سهرابی و پایدار، ۱۳۸۴):

- ۱- حجم آبی که وارد جویچه می‌شود، معادل متوسط مقدار نفوذ آب در طول جویچه است.
- ۲- زمان نفوذ در انتهای جویچه معادل زمان لازم برای نفوذ عمق خالص آبیاری است.
- ۳- بیشترین زمان نفوذ در هر نقطه جویچه نباید آن قدر باشد که موجب تلفات زیاد عمقی شود.

۴- انتهای جویچه برای جلوگیری از رواناب سطحی بسته بوده و ارتفاع آب در جویچه در حدی مجاز است که جویچه قادر به نگهداری آن باشد.

ورودی‌ها، متغیرهای تصمیم و خروجی‌های این حالت مشابه طراحی آبیاری جویچه‌ای است. با این تفاوت که به جای شیب جویچه (S) (متر بر متر) که جزو ورودی‌ها (و متغیر تصمیم) بود، شیب هیدرولیکی متوسط ((m/m)) (S)، جزو خروجی‌ها است (رابطه ۳). همچنین d_{ro} و TWR برابر با صفر می‌باشند.

$$S = 0.0875 \times \frac{1}{L} Q^{0.342} \quad (3)$$

شبیه‌سازی- بهینه‌سازی در مدل پیشنهادی

شبیه‌سازی در مدل پیشنهادی این تحقیق در نهایت منجر به محاسبه شاخص‌های عملکرد و تابع هدف می‌شوند (بخش Simulation شکل ۱). حال شبیه‌سازی- بهینه‌سازی، با شناخت وضعیت موجود سامانه از طریق محاسبه شاخص‌های عملکرد هیدرولیکی و با انتخاب الگوریتم مناسب بهینه‌سازی صورت می‌پذیرد (بخش Simulation- Optimization شکل ۱). در مسائل بهینه‌سازی باید ۵ مورد شامل تابع (توابع) هدف، متغیر(های) تصمیم و پارامتر(ها)، شاخص(های) عملکرد (در صورت نیاز)، قیود (در صورت وجود) و الگوریتم مشخص شوند. در ادامه چگونگی تبدیل مسئله شبیه‌سازی طراحی آبیاری جویچه‌ای بر مبنای روش SCS به مسئله شبیه‌سازی- بهینه‌سازی با تعیین ۵ مورد فوق شرح داده شده است.

تابع هدف و شاخص‌های عملکرد

تابع هدف (z) به‌عنوان آخرین خروجی طراحی آبیاری جویچه‌ای بر مبنای اصلاح روش SCS، متشکل از ترکیب خطی سه شاخص عملکرد شامل راندمان کاربرد (Ea)، نسبت رواناب پایاب (TWR) و نسبت نفوذ عمقی (DPR) است. مقادیر ایده‌آل Ea برابر یک و مقادیر ایده‌آل TWR و DPR برابر صفر می‌باشد. بنابراین تابع هدف هیدرولیکی کمینه متشکل از شاخص‌های فوق به‌نحوی فرمول‌بندی شد که از نظر تئوری دارای بهینه سراسری صفر باشد:

$$z = \left[\left(1 - \frac{Ea}{100}\right) + \left(\frac{TWR}{100}\right) + \left(\frac{DPR}{100}\right) \right] \quad (4)$$

با روش تابع مطلوبیت، مسئله چندهدفه به مسئله تک‌هدفه فرمول‌بندی شد. در این روش از ترکیب خطی مجموع توابع هدف، تابع مطلوبیت (تابع هدف کل) به دست می‌آید. به خاطر هم‌بعد بودن اهداف، حل با روش تجزیه از نوع مجموع وزن‌دار (Weighted Sum) با الگوریتم‌های تک‌هدفه امکان‌پذیر شد. ضرایب وزنی همه جملات تابع هدف برابر یک در نظر گرفته شد.

متغیرهای تصمیم، قیود و الگوریتم بهینه‌سازی

متغیرهای تصمیم و پارامترها در هر یک از سه حالت شبیه‌سازی بیان شده‌اند. با بهینه‌سازی می‌توان فرضیات ساده‌کننده در آبیاری جویچه‌ای با کاهش جریان را حذف نمود. در این روش، پس از رسیدن دبی اولیه به انتهای جویچه، شدت جریان الزاما به نصف کاهش داده نمی‌شود. با توجه به ساختار مساله، صرفا نیاز به قیود محدودده (حد کمینه و بیشینه متغیرهای تصمیم) و ارتباط حد کمینه و بیشینه (کمینه بیشتر از بیشینه نباشد) است. این قیود به روش برخورد ساختاری برقرار می‌گردد و نیاز به ترم جریمه نیست. قید محدودده از کاربر درخواست می‌گردد. برای حل تابع هدف، از حل‌گر الگوریتم فراابتکاری PSO (particleswarm) جعبه‌ابزار بهینه‌سازی نرم‌افزار MATLAB بدون تغییر در پارامترها و گزینه‌های بهینه‌سازی استفاده شد.

شبیه‌سازی پس از شبیه‌سازی- بهینه‌سازی در مدل پیشنهادی

از آن جاکه مقادیر بهینه تئوری متغیرهای تصمیم ممکن است اجرایی نباشند، این قابلیت در مدل ایجاد شده که پس از شبیه‌سازی- بهینه‌سازی، امکان تغییر اندک در متغیرهای تصمیم و سپس شبیه‌سازی نهایی وجود داشته باشد.

داده‌های مورد استفاده

در این پژوهش به منظور شبیه‌سازی اولیه و سپس شبیه‌سازی- بهینه‌سازی، از ۳ سری داده صحرائی استفاده شده است (علیزاده، ۱۳۸۵؛ سهرابی و پایدار، ۱۳۸۴). مزرعه ۱ مربوط به طراحی آبیاری جویچه‌ای (جدول ۱)، مزرعه ۲ مربوط به طراحی آبیاری جویچه‌ای با کاهش دبی (جدول ۲) و مزرعه ۳ مربوط به طراحی آبیاری جویچه‌ای با انتهای بسته (جدول ۳) است.

جدول ۱- داده‌های طراحی آبیاری جویچه‌ای (مزرعه ۱) (علیزاده، ۱۳۸۵)

مزرعه	a	b	c	IF	f	g	L (m)	S (m/m)	W (m)	n	i_n (mm)	Q (lps)
۱	۰/۸۷۱۱	۰/۷۲۰	۷	۰/۳	۷/۶۱	۰/۰۰۰۱۹۰۴	۲۷۵	۰/۰۰۴	۰/۷۵	۰/۰۴	۷۵	۰/۶

جدول ۲- داده‌های طراحی آبیاری جویچه‌ای با کاهش دبی (مزرعه ۲) (علیزاده، ۱۳۸۵)

مزرعه	a	b	c	IF	f	g	L (m)	S (m/m)	W (m)	n	i_n (mm)	Q1 (lps)	Q2 (lps)
۲	۰/۸۷۱۱	۰/۷۲۰	۷	۰/۳	۷/۶۱	۰/۰۰۰۱۹۰۴	۲۷۵	۰/۰۰۴	۰/۷۵	۰/۰۴	۷۵	۰/۶	۰/۳

جدول ۳- داده‌های طراحی آبیاری با انتهای بسته (مزرعه ۳) (سهرابی و پایدار، ۱۳۸۴)

مزرعه	a	b	c	IF	f	g	L (m)	S (m/m)	W (m)	n	i_n (mm)	Q (lps)
۳	۰/۸۷۱۱	۰/۷۲۰	۷	۰/۳	۷/۶۱	۰/۰۰۰۱۹۰۴	۲۷۵	۰/۰۰۴	۰/۷۵	۰/۰۴	۷۵	۱/۲۵

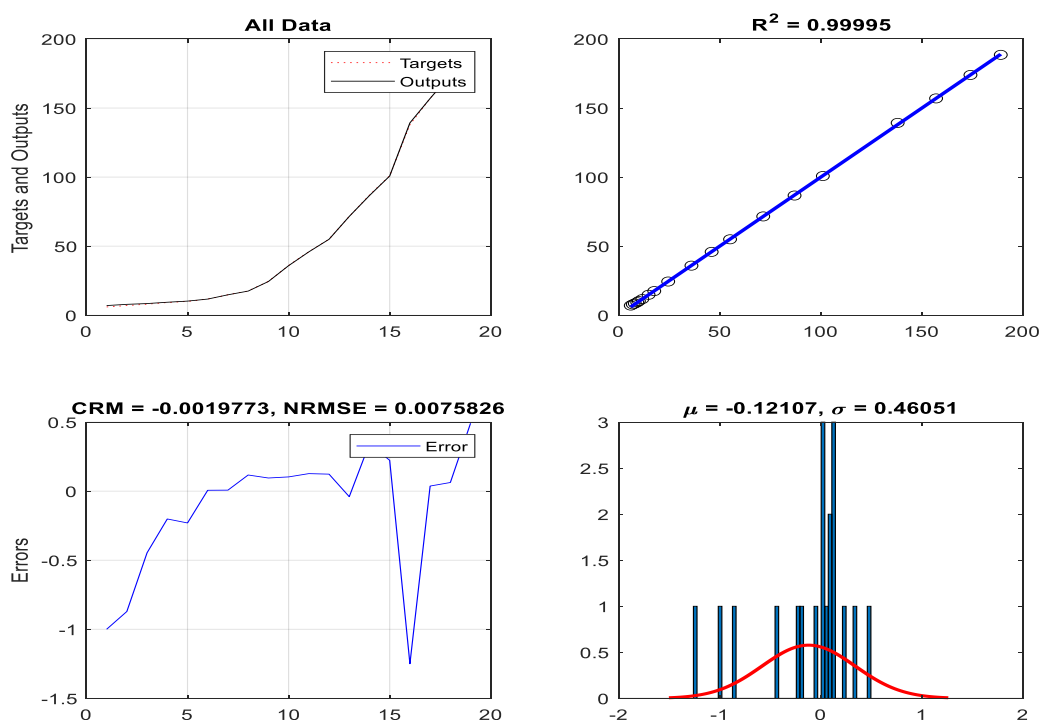
نتایج و بحث

نتایج واسنجی پارامترهای معادله نفوذ SCS

قبل از واسنجی مقادیر حد کمینه (برداری برابر با مقادیر a، b و c متعلق به شماره منحنی نفوذ ۰/۰۵)، حد بیشینه (متعلق به شماره منحنی نفوذ ۲) و جواب اولیه (بین حد کمینه و بیشینه) مطابق جدول ۴ لحاظ شدند. پس از واسنجی، مقادیر بهینه در جدول ۴ گزارش شده است. نمودارهای بررسی صحت و دقت واسنجی نیز در شکل ۲ ارائه شده است. تطابق داده‌های هدف و مدل، نزدیکی هدف و مدل به نمودار $y=x$ ، تخطی کم خطا از مقدار صفر و نزدیکی همیستوگرام خطا به توزیع نرمال وجود دارد (شکل ۲). شاخص‌های آماری، انطباق مناسبی بین مقادیر نفوذ شبیه‌سازی شده توسط معادله نفوذ SCS با پارامترهای واسنجی شده با داده‌های نفوذ مشاهداتی را نشان دادند (شکل ۲). مقدار R^2 نزدیک به مقدار یک بود، که نشان‌دهنده همبستگی زیاد می‌باشد. مقدار شاخص CRM برابر با ۰/۰۲- بود که نشان‌دهنده سوگیری (bias) بسیار کم مقادیر شبیه‌سازی شده با مشاهداتی می‌باشد. مقادیر NRMSE کمتر از یک درصد بود که نشانگر شبیه‌سازی بسیار خوب است.

جدول ۴- حد کمینه، حد بیشینه، جواب اولیه و مقدار بهینه پارامترهای معادله نفوذ SCS

مقادیر	a	b	c	مقادیر	a	b	c
حد کمینه (قبل از واسنجی)	۰/۵۳۳۴	۰/۶۱۸	۷	جواب اولیه (قبل از واسنجی)	۱	۰/۷	۷
حد بیشینه (قبل از واسنجی)	۲/۷۵۳	۰/۸۰۸	۷	مقادیر بهینه (بعد از واسنجی)	۰/۸۷۱۱	۰/۷۳۱۴	۷



شکل ۲- نمودارهای بررسی صحت و دقت واسنجی

نتایج شبیه‌سازی

نتایج طراحی آبیاری جویچه‌ای (مزرعه ۱)

در جدول ۵ نتایج طراحی مزرعه ۱ با استفاده از روش طراحی SCS ارائه شده است. مزرعه ۱ دارای فرصت زمان نفوذ (۹۶۵ دقیقه) و زمان قطع (۱۱۰۹ دقیقه) زیادی بود که منجر به راندمان کاربرد کم (۳۸/۸ درصد) و نسبت رواناب پایاب بسیار زیادی (۵۸/۶ درصد) شد. این در حالی است که زمان پیشروی به انتهای مزرعه ۱۴۴ دقیقه (حدود ۱۵ درصد فرصت زمان نفوذ) بوده است. به خاطر نفوذ عمقی در حد صفر (۲/۶ درصد)، تفاوت زیادی بین مقادیر عمق خالص آبیاری (۷۵ میلی‌متر) و متوسط مقدار نفوذ در طول جویچه (۸۰ میلی‌متر) وجود ندارد که باعث شده مقدار نفوذ عمقی صرفاً ۵ میلی‌متر باشد. اما به خاطر تلفات رواناب زیاد (۱۱۴ میلی‌متر)، تفاوت بین مقادیر عمق ناخالص آبیاری (۱۹۴ میلی‌متر) و متوسط مقدار نفوذ در طول جویچه (۸۰ میلی‌متر) بسیار زیاد است. به عبارت دیگر آب بیش از آنکه در زمین نفوذ کند، از روی این مزرعه عبور می‌کند. در این مزرعه با توجه به اینکه تابع هدف زیاد ۱/۲۲ نشانگر وضعیت نامناسب می‌باشد، اعمال بهینه‌سازی ضروری است. به خاطر تلفات رواناب، در بهینه‌سازی گزینه‌هایی نظیر کاهش دبی، افزایش طول و افزایش شیب برای این مزرعه می‌تواند مفید باشد.

جدول ۵- نتایج طراحی آبیاری جویچه‌ای (مزرعه ۱)

z	DPR (%)	TWR (%)	Ea (%)	d _{dp} (mm)	d _{ro} (mm)	i _{avg} (mm)	T _{avg} (min)	i _g (mm)	T _{co} (min)	T _n (min)	P (m)	T _t (min)	مزرعه
۱/۲۲	۲/۶	۵۸/۶	۳۸/۸	۵	۱۱۴	۸۰	۱۰۶۱	۱۹۴	۱۱۰۹	۹۶۵	۰/۴	۱۴۴	۱

نتایج طراحی آبیاری جویچه‌ای با کاهش دبی (مزرعه ۲)

در جدول ۶ نتایج طراحی مزرعه ۲ با استفاده از روش طراحی SCS ارائه شده است. در طراحی آبیاری جویچه‌ای با کاهش دبی، زمان کاهش جریان برابر با زمان پیشروی (۱۴۴ دقیقه) فرض می‌شود. به واسطه برابری دبی ورودی، زمان پیشروی نیز با حالت معمولی (جدول ۵) تفاوتی ندارد. کاهش دبی نیز منجر به کاهش محیط خیس شده از ۰/۴ به ۰/۳۶ متر شده است (جدول ۶). کاهش دبی باعث افزایش فرصت زمان نفوذ از ۹۶۵ (جدول ۵) به ۱۱۴۳ (جدول ۶) دقیقه و افزایش زمان قطع جریان از ۱۱۰۹ به ۱۲۸۷ دقیقه شده است. دبی کاهش یافته باعث شده مقدار عمق ناخالص آبیاری از ۱۹۴ به ۱۲۵ میلی‌متر کاهش یابد. تفاوت چندانی در مقدار نفوذ عمقی (۶ میلی‌متر در جدول ۵ و ۵ میلی‌متر در جدول ۶) و متوسط مقدار نفوذ در طول جویچه (۸۰ میلی‌متر در جدول ۵ و ۸۱ میلی‌متر در جدول ۶) نسبت به حالت معمولی رخ نداده است. اما کاهش زیادی در عمق رواناب (از ۱۱۴ میلی‌متر در جدول ۵ به ۴۴ میلی‌متر در جدول ۶) رخ داده است. در مجموع کاهش نسبت رواناب پایاب از ۵۸/۶ به ۳۵/۴ درصد و عدم تفاوت زیاد در نسبت نفوذ عمقی (۲/۶ درصد در جدول ۵ نسبت به ۴/۵ درصد در جدول ۶)، باعث افزایش چشمگیر راندمان کاربرد از ۳۸/۸ به ۶۰/۱ درصد و کاهش تابع وضع موجود از ۱/۲۲ (جدول ۵) به ۰/۸ (جدول ۶) شده است. این خود بیانگر نقش موثر دبی در عملکرد آبیاری جویچه‌ای است. در عین حال کماکان اعمال بهینه‌سازی می‌تواند نتایج حاصله را بهبود بخشد.

جدول ۶- نتایج طراحی آبیاری جویچه‌ای با کاهش دبی (مزرعه ۲)

z	DP R (%)	TW R (%)	Ea (%)	d _{dp} (mm)	d _{ro} (mm)	i _g (mm)	i _{avg} (mm)	T _{avg} (min)	T _{co} (min)	T _n (min)	P ₂ (m)	P ₁ (m)	T _{cb} (min)	T _t (min)	مزرعه ۵
۱۸۰	۴/۵	۳۵/۴	۶/۱	۶	۴۴	۱۲۵	۸۱	۴۷/۵	۱۲۸۷	۱۱۴۳	۱/۳۶	۰/۴	۱۴۴	۱۴۴	۲

نتایج طراحی آبیاری جویچه‌ای با انتهای بسته (مزرعه ۳)

در جدول ۷ نتایج طراحی مزرعه ۳ ارائه شده است. افزایش عمق آب جویچه‌ها، منجر به افزایش محیط خیس شده از ۰/۴ (جدول ۵) به ۰/۶۳ (جدول ۷) متر شده است. به واسطه بسته‌بودن انتهای مزرعه، حجم رواناب تبدیل به حجم نفوذ شده است. این امر سبب کاهش فرصت زمان نفوذ از ۹۶۵ (جدول ۵) به ۵۰۱ (جدول ۷) دقیقه و زمان قطع از ۱۱۰۹ (جدول ۵) به ۲۳۱ (جدول ۷) دقیقه شده است. همچنین به واسطه کاهش بسیار زیاد عمق رواناب از ۱۱۴ (جدول ۵) به صفر و افزایش ناچیز نفوذ عمقی از ۵ (جدول ۵) به ۹ (جدول ۷) میلی‌متر، عمق ناخالص آبیاری از ۱۹۴ (جدول ۵) به ۸۴ (جدول ۷) میلی‌متر کاهش یافت. در مجموع کاهش نسبت رواناب پایاب از ۵۸/۶ به صفر درصد و عدم تفاوت زیاد در نسبت نفوذ عمقی (۲/۶ درصد در جدول ۵ نسبت به ۱۰/۸ درصد در جدول ۷)، باعث افزایش چشمگیر راندمان کاربرد از ۳۸/۸ به ۸۹/۲ درصد و کاهش تابع وضع موجود از ۱/۲۲ (جدول ۵) به ۰/۲۲ (جدول ۷) شده است. در عین حال بهینه‌سازی می‌تواند اندکی نتایج را بهبود بخشد.

جدول ۷- نتایج طراحی آبیاری جویچه‌ای با انتهای بسته (مزرعه ۳)

z	DPR (%)	TWR (%)	Ea (%)	d _{dp} (mm)	i _g (mm)	T _{co} (min)	T _{avg} (min)	T _n (min)	P (m)	S (m/m)	مزرعه
۰/۲۲	۱۰/۸	۰	۸۹/۲	۹	۸۴	۲۳۱	۵۹۳	۵۰۱	۰/۶۳	۰/۰۰۰۳۴۳	۳

نتایج شبیه‌سازی- بهینه‌سازی

نتایج بهینه تئوری طراحی آبیاری جویچه‌ای (مزرعه ۱)

جدول ۸ در بهینه‌سازی طراحی مزرعه ۱، حدود در نظر گرفته شده برای کمینه و بیشینه متغیرهای تصمیم (قبل از بهینه‌سازی) و مقادیر بهینه حاصله (بعد از بهینه‌سازی) را نمایش می‌دهد. از آنجا که طراحی مبتنی بر آبیاری کامل است، در هر سه حالت بهینه‌سازی طراحی، متغیر تصمیم i_n لحاظ نشد و مقدار ابتدایی آنها باقی ماند. در هر سه حالت بهینه‌سازی طراحی، متغیر تصمیم فاصله بین جویچه‌ها نیز به‌خاطر ماهیت گسسته تغییرپذیری آن از لحاظ اجرا در نظر گرفته نشد. شیارکن‌ها معمولاً دارای ابعاد استاندارد گسسته هستند. در حالی که نوع بهینه‌سازی پیوسته است. لذا بهینه‌تئوری مزرعه ۱، متأثر از سه متغیر تصمیم طول، شیب و دبی است. در جدول ۹ نتایج بهینه‌تئوری مزرعه ۱ ارائه شده است.

جدول ۸- کمینه، بیشینه و بهینه متغیرهای تصمیم در بهینه‌سازی طراحی آبیاری جویچه‌ای (مزرعه ۱)

مقادیر	L (m)	S (m/m)	W (m)	i_n (mm)	Q (lps)
حد کمینه (قبل از بهینه‌سازی)	۲۷۵	۰/۰۰۴	۰/۷۵	۷۵	۰/۲۵
حد بیشینه (قبل از بهینه‌سازی)	۴۰۰	۰/۰۴	۰/۷۵	۷۵	۱
مقادیر بهینه (بعد از بهینه‌سازی)	۴۰۰	۰/۰۴	۰/۷۵	۷۵	۰/۲۵

جدول ۹- نتایج بهینه‌تئوری طراحی آبیاری جویچه‌ای (مزرعه ۱)

مزرعه	T_i (min)	P (m)	T_n (min)	T_{co} (min)	i_g (mm)	T_{avg} (min)	i_{avg} (mm)	d_{ro} (mm)	d_{dp} (mm)	Ea (%)	TWR (%)	DPR (%)	z
۱	۲۴۱	۰/۳۰	۱۴۶۱	۱۷۰۲	۸۵	۱۶۲۵	۸۱	۴	۶	۸۸/۱	۵	۶/۹	۰/۲۴

در شبیه‌سازی این مزرعه (جدول ۵) حدود ۶۰ درصد آب از طریق رواناب پایاب هدر رفته است. بنابراین بهینه‌سازی باعث کاهش دبی، افزایش طول و افزایش شیب شد (مقایسه جدول‌های ۱ و ۸) که با نتایج (Akbari et al., 2018) ناهمخوانی دارد. این امر (با مقایسه جدول‌های ۵ و ۹) سبب افزایش زمان پیشروی، کاهش محیط خیس شده، افزایش فرصت زمان نفوذ و زمان قطع، کاهش عمق ناخالص آبیاری، افزایش متوسط فرصت زمان نفوذ در طول جویچه، عدم تغییر چندان در متوسط مقدار نفوذ در طول جویچه، کاهش عمق رواناب سطحی، عدم تغییر چندان در نفوذ عمقی، افزایش راندمان کاربرد، کاهش نسبت رواناب پایاب و عدم تغییر چندان در نسبت نفوذ عمقی و کاهش تابع هدف گردید. همانند الگوریتم سیمپلکس (سادک) که در آن مرزها بسیار مهم هستند، بهینه‌تئوری مزرعه ۱، طول و شیب بهینه را در بیشینه بازه مجاز و دبی بهینه را در کمینه بازه مجاز حاصل نمود (جدول ۸). در مجموع بهینه‌سازی طراحی آبیاری جویچه‌ای، تابع هدف را از ۱/۲۲ (جدول ۵) به ۰/۲۴ (جدول ۹) برای مزرعه ۱ کاهش داد.

نتایج بهینه‌تئوری طراحی آبیاری جویچه‌ای با کاهش دبی (مزرعه ۲)

جدول ۱۰ در بهینه‌سازی طراحی مزرعه ۲، حدود در نظر گرفته شده برای کمینه و بیشینه متغیرهای تصمیم (قبل از بهینه‌سازی) و مقادیر بهینه به‌دست آمده برای آنها (بعد از بهینه‌سازی) را نمایش می‌دهد. در مزرعه ۲، نتایج بهینه‌تئوری طراحی آبیاری جویچه‌ای با کاهش دبی متأثر از سه متغیر تصمیم طول، دبی اولیه و دبی کاهشی است. در جدول ۱۱ نتایج بهینه‌تئوری مزرعه ۲ ارائه شده است.

جدول ۱۰- کمینه، بیشینه و بهینه متغیرهای تصمیم در بهینه‌سازی طراحی آبیاری جویچه‌ای با کاهش دبی (مزرعه ۲)

مقادیر	L (m)	S (m/m)	W (m)	i_n (mm)	Q ₁ (lps)	Q ₂ (lps)
--------	-------	---------	-------	------------	----------------------	----------------------

حد کمینه (قبل از بهینه‌سازی)	۲۵۰	۰/۰۰۴	۰/۷۵	۷۵	۰/۳	۰/۱۴
حد بیشینه (قبل از بهینه‌سازی)	۳۰۰	۰/۰۰۴	۰/۷۵	۷۵	۰/۵	۰/۳
مقادیر بهینه (بعد از بهینه‌سازی)	۲۵۹	۰/۰۰۴	۰/۷۵	۷۵	۰/۴	۰/۱۴

جدول ۱۱- نتایج بهینه تئوری طراحی آبیاری جویچه‌ای با کاهش دبی (مزرعه ۲)

مزرعه	T_t (min)	T_{cb} (min)	P_1 (m)	P_2 (m)	T_n (min)	T_{co} (min)	T_{avg} (min)	i_{avg} (mm)	i_g (mm)	d_{ro} (mm)	d_{dp} (mm)	E_a (%)	TWR (%)	DPR (%)	z
۲	۲۳۹	۲۳۹	۰/۳۷	۰/۳۲	۱۳۳۱	۱۵۷۰	۶۹	۸۴	۸۷	۳	۹	۸۶/۱	۴/۱	۹/۸	۰/۲۷

بهینه‌سازی باعث کاهش طول، دبی اولیه و دبی کاهشی شد (مقایسه جدول‌های ۲ و ۱۰). این امر (با مقایسه جدول‌های ۶ و ۱۱) سبب افزایش زمان پی‌شروی، افزایش زمان کاهش جریان، کاهش محیط خیس شده اولیه و ثانویه، افزایش فرصت زمان نفوذ و زمان قطع، افزایش متوسط فرصت زمان نفوذ در طول جویچه، افزایش در متوسط مقدار نفوذ در طول جویچه، کاهش عمق ناخالص آبیاری، کاهش عمق رواناب سطحی، افزایش عمق نفوذ عمقی، افزایش راندمان کاربرد، کاهش نسبت رواناب پایاب، افزایش نسبت نفوذ عمقی و کاهش تابع هدف گردید. در مجموع بهینه‌سازی طراحی آبیاری جویچه‌ای با کاهش دبی، تابع هدف را از ۰/۸۰ (جدول ۶) به ۰/۲۷ (جدول ۱۱) برای مزرعه ۲ کاهش داد.

نتایج بهینه تئوری طراحی آبیاری جویچه‌ای با انتهای بسته

جدول ۱۲ در بهینه‌سازی طراحی مزرعه ۳، حدود لحاظ شده برای کمینه و بیشینه متغیرهای تصمیم (قبل از بهینه‌سازی) و مقادیر بهینه به‌دست آمده برای آنها (بعد از بهینه‌سازی) را نمایش می‌دهد. در مزرعه ۳، نتایج بهینه تئوری طراحی آبیاری جویچه‌ای با انتهای بسته متاثر از متغیر تصمیم دبی است. در جدول ۱۳ نتایج بهینه تئوری مزرعه ۳ ارائه شده است.

جدول ۱۲- کمینه، بیشینه و بهینه متغیرهای تصمیم در بهینه‌سازی طراحی آبیاری جویچه‌ای با انتهای بسته (مزرعه ۳)

مقادیر	L (m)	W (m)	i_n (mm)	Q (lps)
حد کمینه (قبل از بهینه‌سازی)	۲۷۵	۰/۷۵	۷۵	۱/۲۵
حد بیشینه (قبل از بهینه‌سازی)	۲۷۵	۰/۷۵	۷۵	۲/۵
مقادیر بهینه (بعد از بهینه‌سازی)	۲۷۵	۰/۷۵	۷۵	۲/۵

جدول ۱۳- نتایج بهینه تئوری طراحی آبیاری جویچه‌ای با انتهای بسته (مزرعه ۳)

مزرعه	S (m/m)	P (m)	T_n (min)	T_{avg} (min)	T_{co} (min)	i_g (mm)	d_{dp} (mm)	E_a (%)	TWR (%)	DPR (%)	z
۳	۰/۰۰۰۴۴	۰/۷۴	۳۹۳	۴۲۹	۱۰۹	۸۰	۵	۹۴/۳	۰	۵/۷	۰/۱۱

بهینه سازی باعث افزایش دبی به عنوان تنها متغیر تصمیم لحاظ شده شد (مقایسه جدول های ۳ و ۱۲). این امر (با مقایسه جدول های ۷ و ۱۳) سبب افزایش شیب هیدرولیکی، افزایش محیط خیس شده، کاهش فرصت زمان نفوذ، کاهش متوسط فرصت زمان نفوذ در طول جویچه، کاهش زمان قطع، کاهش عمق ناخالص آبیاری، کاهش در نفوذ عمقی، افزایش راندمان کاربرد، کاهش نسبت نفوذ عمقی و کاهش تابع هدف گردید. بهینه تئوری مزرعه ۳، دبی بهینه را در بیشینه بازه مجاز حاصل نمود (جدول ۱۲). در مجموع بهینه سازی طراحی آبیاری جویچه ای با انتهای بسته، تابع هدف را از ۰/۲۲ (جدول ۷) به ۰/۱۱ (جدول ۱۳) برای مزرعه ۳ کاهش داد.

نتایج شبیه سازی پس از شبیه سازی- بهینه سازی در مدل پیشنهادی

همان طور که قبلاً بیان شد در مدل پیشنهادی، قابلیت کاربردی سازی نتایج بهینه تئوری با تغییر اندک در متغیرهای تصمیم و شبیه سازی پس از شبیه سازی- بهینه سازی ایجاد شده است. به عنوان نمونه در مزرعه ۲ مقدار طول بهینه برابر ۲۵۹ متر حاصل شد (جدول ۱۰). با فرض اجرایی بودن طول ۲۵۰ متری، نتایج به شرح جدول ۱۴ خواهند بود.

جدول ۱۴- نتایج شبیه سازی پس از شبیه سازی- بهینه سازی مزرعه ۲ با $L = 250$ m

z	DPR (%)	TWR (%)	Ea (%)	d _{ap} (mm)	d _{ro} (mm)	i _g (mm)	i _{avg} (mm)	T _{avg} (min)	T _{co} (min)	T _n (min)	P ₂ (m)	P ₁ (m)	T _{cb} (min)	T _t (min)	مزرعه
۰/۲۸	۸/۸	۵/۲	۸۶/۰	۸	۴	۸۷	۸۳	۶۳	۱۵۴۷	۱۳۳۱	۰/۳۲	۰/۳۷	۲۱۶	۲۱۶	۲

مقایسه نتایج بهینه تئوری (جدول ۱۱) و بهینه کاربردی (جدول ۱۴) نشان می دهد کاهش طول از ۲۵۹ به ۲۵۰ متر، سبب کاهش زمان پیشروی، کاهش زمان کاهش جریان، عدم تغییر محیط خیس شده اولیه و ثانویه، عدم تغییر فرصت زمان نفوذ، کاهش زمان قطع، کاهش متوسط فرصت زمان نفوذ در طول جویچه، کاهش در متوسط مقدار نفوذ در طول جویچه، عدم تغییر عمق ناخالص آبیاری، افزایش عمق رواناب سطحی، کاهش عمق نفوذ عمقی، کاهش راندمان کاربرد، افزایش نسبت رواناب پایاب، کاهش نسبت نفوذ عمقی و افزایش تابع هدف گردید.

نتیجه گیری

نتایج واسنجی پارامترهای معادله نفوذ SCS نشان داد مقادیر نفوذ مشاهداتی و محاسباتی دارای همبستگی زیاد، سوگیری کم و شبیه سازی بسیار خوب بودند. نتایج شبیه سازی آبیاری جویچه ای در سه حالت نشان داد تابع وضع موجود عموماً نامناسب بوده و بهینه سازی ضروری است. در وضع موجود تابع سه مزرعه نوعاً بیش آبیاری با تلفات رواناب صورت گرفته بود که ضرورت بهینه سازی با گزینه هایی نظیر کاهش دبی، افزایش طول و افزایش شیب نشان داد. طراحی با کاهش دبی تلفات رواناب را نسبت به طراحی معمولی از ۵۸/۶ به ۳۵/۴ درصد کاهش داد. همچنین طراحی با انتهای بسته نسبت رواناب پایاب را به صفر رساند و افزایش زیادی در نسبت نفوذ عمقی ایجاد نکرد.

شبیه سازی- بهینه سازی در مزارع سه گانه نشان داد کاهش دبی، افزایش طول و افزایش شیب باعث افزایش زمان های مهم، افزایش راندمان کاربرد، کاهش نسبت رواناب پایاب و عدم تغییر چندان در نسبت نفوذ عمقی و کاهش تابع هدف شد. بهینه سازی تابع هدف را از ۱/۲۲ به ۰/۲۴ برای مزرعه ۱، از ۰/۸ به ۰/۲۷ برای مزرعه ۲ و از ۰/۲۲ به ۰/۱۱ برای مزرعه ۳ کاهش داد. در مجموع متغیر تصمیم دبی و پس از آن طول و شیب تأثیر بسیاری بر شاخص های عملکرد و تابع هدف نشان داد. در نهایت شبیه سازی پس از بهینه سازی در مزرعه ۲ سبب کاربردی شدن نتایج بهینه تئوری و عدم تغییر چندان در شاخص های عملکرد و تابع هدف شد.

این تحقیق منجر به توسعه ابزار شد که پیشنهادهایی برای آن ارائه می‌گردد: توسعه مدل برای طراحی آبیاری‌های کرتی و نواری با مدیریت‌های مختلف، توسعه مدل برای شرایط حضور گیاه، ارائه روشی برای واسنجی پارامترهای f و g پیدشروی و افزودن توابع هدف اقتصادی، گیاهی و زیست‌محیطی و افزودن الگوریتم‌های چندهدفه.

منابع

- حقایقی مقدم س.ا.، ناصری ا.، ذوالفقاران ا. ۱۳۹۸. توسعه سامانه‌های آبیاری کم‌فشار (سابقه کاربرد، مزایا و چالش‌ها. مدیریت آب در کشاورزی. ۶(۲): ۱۳۲-۱۲۳.
- ذاکری نیا م.، عبدلهی س. ۱۴۰۲. شبیه‌سازی تأثیر آبیاری با آب شور- سدیمی بر تغییرات نفوذپذیری خاک با مدل‌های نفوذ فیلپ و کاستیاکوف. رویکردهای نوین در مهندسی آب و محیط‌زیست ۲(۱): ۱۰-۱.
- سهرابی ت.، پایدار ز. ۱۳۸۴. اصول طراحی سیستم‌های آبیاری. انتشارات دانشگاه تهران.
- عبدی ص.، سعادت س. ۱۴۰۱. مطالعه نفوذ آب در خاک با استفاده از استوانه مضاعف در مناطق مختلف استان لرستان. رویکردهای نوین در مهندسی آب و محیط‌زیست ۱(۱): ۱۳۵-۱۲۵.
- علیزاده ا. ۱۳۸۵. اصول طراحی سیستم‌های آبیاری سطحی. انتشارات آستان قدس رضوی.
- ماندگاری کهن م.، ذاکری نیا م.، دهقان ح. ۱۴۰۲. مقایسه بهره‌وری و راندمان مصرف آب آبیاری در اراضی با شبکه آبیاری سنتی تحت مدیریت میراب و اراضی یکپارچه و نوسازی شده. رویکردهای نوین در مهندسی آب و محیط‌زیست ۲(۲): ۱۸۴-۲۰۲.
- نوری م.، برومندنسب س. ۱۴۰۲. ارزیابی اثر عمق جویچه در بازده آبیاری و عملکرد محصول شکر در اراضی نیشکر. رویکردهای نوین در مهندسی آب و محیط‌زیست ۲(۱): ۱۶-۱۱.

Abdi, S., Saadat, S. 2022. Study the water infiltration in soil using double ring in different regions of Lorestan province. *Journal of New Approaches in Water Engineering and Environment*, 1(1): 125-135. (in Persian)

Adamu T., Ayana M., Aregay G. 2022. Optimization of Furrow Irrigation Decision Variables: The case of Wonji Shoa Sugarcane Plantation, Ethiopia.

Aiad, M. A., Shabana, M. M. A., Abdel-Fattah, I. M., Meleha, A. M. I. 2019. Soil conservation service (scs) as a tool for proper design of cotton-furrow irrigation in clay soil. Menoufia. *Journal of Soil Science*, 4(4): 173-200.

Akbari, M., Gheysari, M., Mostafazadeh-Fard, B., Shayannejad, M. 2018. Surface irrigation simulation-optimization model based on meta-heuristic algorithms. *Agricultural Water Management*, 201, 46-57.

Akbari, M. Farahani S. 2025. Enhancement of Border Irrigation Systems: Leveraging Simulation–Optimization Techniques. *Agricultural Water Management*, 321, 109891.

Alizadeh, A. 2006. Principles of Designing Surface Irrigation Systems. Astan Quds Razavi Publications. (in Persian)

Bautista, E., Clemmens, A. J., Strelkoff, T. S., Schlegel, J. 2009. Modern analysis of surface irrigation systems with WinSRFR. *Agricultural Water Management*, 96(7), 1146-1154.

Ghobadi, M., Ebrahimian, H., Abbasi, F., Norouzi, S. 2020. Development and application of a seasonal furrow irrigation model (SFIM). *Irrigation and Drainage*, 69(3): 376-386.

Gillies M. H., Smith R. 2005. Infiltration parameters from surface irrigation advance and runoff data. *Irrigation Science*, 24, 25-35.

Haghighayeghi, A., naseri, A., Zolfagharian, A. 2020. Development of low- pressure irrigation systems (application history, benefits and challenges), *Water Management in Agriculture*, 6(2): 123-132. (in Persian)

Jurriëns, M., Zerihun, D., Boonstra, J., Feyen, J. 2001. SURDEV: surface irrigation software; design, operation, and evaluation of basin, border, and furrow irrigation (No. 59). International institute for land reclamation and improvement/ILRI.

Kargas, G., Koka, D., Londra, P. A., Mindrinos, L. 2024. Comparison of Methods Predicting Advance Time in Furrow Irrigation. *Water*, 16(8), 1105.

Mandegari Kohan, M., Zakerinia, M., Dehghan, H. 2024. Comparison of Productivity and Efficiency of Irrigation Water Consumption in Lands With Traditional Network under Mirab Management and Integrated and Renovated Lands, *Journal of New Approaches in Water Engineering and Environment*, 2(2):184-202. (in Persian)

Mazarei, R., Mohammadi, A. S., Ebrahimian, H., Naseri, A. A. 2021. Temporal variability of infiltration and roughness coefficients and furrow irrigation performance under different inflow rates. *Agricultural Water Management*, 245, 106465.

McClymont, D., Smith, R. 1996. Infiltration parameters from optimisation on furrow irrigation advance data. *Irrigation Science*, 17, 15-22.

Noori, M., Broomandnasab, S. 2023. The study of effect of furrow shape on irrigation efficiency on sugar cane fields in khouzesan province. *Journal of New Approaches in Water Engineering and Environment*, 2(1): 11-16. (in Persian)

Pazouki, E. 2021. A practical surface irrigation design based on fuzzy logic and meta-heuristic algorithms. *Agricultural Water Management*, 256, 107069.

Rodriguez, J. A., Martos, J. C. 2010. SIPAR_ID: freeware for surface irrigation parameter identification. *Environmental Modelling & Software*, 25(11): 1487-1488.

Saberi, E., Khashei Siuki, A., Pourreza-Bilondi, M., Shahidi, A. 2020. Development of a simulation–optimization model with a multi-objective framework for automatic design of a furrow irrigation system. *Irrigation and Drainage*, 69(4), 603-617.

Salahou, M. K., Zhi, W., Chen, X., Zhang, Y., Lü H., Jiao, X. 2023. Improvement of the estimation of the infiltration function in surface irrigation systems. *Plos one*, 18(11), e0291578.

Shayannejad, M., Ghobadi, M., Ostad-Ali-Askari, K. 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.

Sohrabi, T. Paydar, Z. 2005. Principles of Irrigation Systems Design. Tehran University Press. (in Persian)

Walker, W. R. 2003. SIRMOD III-Surface Irrigation Simulation, Evaluation and Design (Guide and Technical Documentation). Logan, Utah State University. 130p.

Zakerinia, M., Abdolahi, S. 2023. Simulation of the effect of irrigation with Saline-sodic water on Soil infiltration Rate changes with Kostiaikov and Philip's infiltration model, *Journal of New Approaches in Water Engineering and Environment*, 2(1): pp. 1-10. (in Persian)