

Optimum Design of Furrow Irrigation: Integrating Hydrodynamic Model and Meta-Heuristic Optimization

Amir Mahdi Bayat¹, Mohammad Shayannejad¹ and Mahmood Akbari^{2*} 

(Received: August 2-2025 ; Revised: November 3-2025 ; Accepted: December 9-2025)

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-akbari@araku.ac.ir

Abstract

Mathematical models are a suitable tool for surface irrigation design. The EDOSIM model, as a surface irrigation simulation-optimization model, utilizes simulation with the volume balance model and meta-heuristic optimization. In this study, with the aim of improving the simulation of the advanced phase in the EDOSIM model, the Full Hydrodynamic model was replaced by the Volume Balance model for furrow irrigation design, leading to the development of the EDOSIM-HD model. The Saint-Venant equations were discretized using the implicit Preissmann's finite difference scheme and transformed into a set of nonlinear equations in the form of a system of equations. The resulting system of equations was linearized using the Newton-Raphson method and solved using the Sparse matrix method. The results were compared with the SIRMOD software to validate the simulation. Using the *particleswarm* solver of the MATLAB software optimization toolbox, the inflow rate as a decision variable was used to optimize the hydraulic objective function consisting of efficiency, adequacy, and uniformity. The results in the experimental field showed that in the initial simulation with an inflow rate of 1.4 lps, important irrigation times, infiltration volume, performance indicators, profiles, and hydrographs showed a deep percolation loss of about 50 percent of water. Also, the results of the EDOSIM-HD model were closer to the Hydrodynamic model of the SIRMOD software than the EDOSIM model. By optimizing and increasing the optimal flow rate (1.8 lps) compared to the initial inflow rate, the advance, cut-off, depletion, and recession times were reduced, and the required infiltration time remained unchanged. The reduction in infiltration volume was also achieved by applying higher inflow rates in less time. All performance indicators also moved closer to their optimal state. Except for Tail Water Ratio (TWR), which showed a slight increase of 11 percent (due to higher inflow rate), was negligible compared to the sharp 22% reduction in Depth Percolation Ratio (DPR), and 10% increase in Application Efficiency (Ea). Totally, according to the performance indicators obtained in the validation with the SIRMOD, the simulation of the EDOSIM-HD model was better than in the EDOSIM model in the advanced phase of furrow irrigation design

Keywords: Surface irrigation, Simulation-optimization model, Application efficiency, Distribution uniformity, Advance time

How to cite this article: Bayat, A.M., Shayannejad, M. and Akbari, M. 2026. Optimum Design of Furrow Irrigation: Integrating Hydrodynamic Model and Meta-Heuristic Optimization. *J. Water and Soil Sci.* 30(1): 103-118. DOI: [10.47176/jwss.30.1.27456](https://doi.org/10.47176/jwss.30.1.27456)

Copyright © 2026 Bayat 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.

طراحی بهینه آبیاری جویچه‌ای: تلفیق مدل هیدرودینامیک و بهینه‌سازی فراابتکاری

امیرمهدی بیات^۱، محمد شایان نژاد^۱ و محمود اکبری^{۲*} 

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۵/۱۱؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۸/۱۲؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۹/۱۸)

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

مدل‌های ریاضی ابزار مناسبی برای طراحی آبیاری سطحی هستند. مدل EDOSIM به عنوان یک مدل شبیه‌سازی - بهینه‌سازی آبیاری سطحی، از شبیه‌سازی با مدل بیلان حجمی و بهینه‌سازی فراابتکاری بهره می‌برد. در این مطالعه با هدف بهبود شبیه‌سازی فاز پیشروی در مدل EDOSIM، مدل هیدرودینامیک کامل جایگزین مدل بیلان حجمی برای طراحی آبیاری جویچه‌ای شد و منجر به توسعه مدل EDOSIM-HD شد. بدین منظور معادلات سنت - ونانت با استفاده از شمای ضمنی تفاضل محدود پرایزمن، گسسته و به مجموعه‌ای از معادلات غیرخطی در قالب دستگاه معادلات تبدیل شدند. دستگاه معادلات حاصل با استفاده از روش نیوتن - رافسون، خطی و با استفاده از روش ماتریس اسپارس حل شد. نتایج حاصل با نرم‌افزار SIRMOD به منظور اعتبارسنجی شبیه‌سازی مقایسه شد. با استفاده از حل گر particleswarm جعبه‌ابزار بهینه‌سازی نرم‌افزار MATLAB، متغیر تصمیم دبی ورودی به منظور بهینه‌سازی تابع هدف هیدرولیکی متشکل از راندمان، کفایت و یکنواختی مورد استفاده قرار گرفت. نتایج در مزرعه مطالعاتی نشان داد در شبیه‌سازی اولیه با دبی ورودی ۱/۴ لیتر در ثانیه، زمان‌های مهم آبیاری، حجم نفوذ، شاخص‌های عملکرد، نیمرخ‌ها و آنمودها، هدررفت عمقی حدود ۵۰ درصدی آب را نشان دادند. همچنین نتایج مدل EDOSIM-HD نسبت به مدل EDOSIM به مدل هیدرودینامیک نرم‌افزار SIRMOD نزدیک‌تر بود. با بهینه‌سازی و افزایش دبی بهینه (۱/۸ لیتر در ثانیه) نسبت به دبی اولیه، کاهش زمان‌های پیشروی، قطع جریان، تخلیه و پسروی و عدم تغییر زمان مورد نیاز نفوذ رخ داد. کاهش حجم نفوذ نیز به واسطه اعمال دبی بیشتر در زمان کمتر صورت گرفت. تمامی شاخص‌های عملکرد نیز به وضع بهینه خود نزدیک‌تر شدند؛ به جز نسبت رواناب پایاب (TWR) که افزایش اندک ۱۱ درصدی آن (به خاطر دبی بیشتر)، نسبت به کاهش شدید ۲۲ درصدی نسبت نفوذ عمقی (DPR) و افزایش ۱۰ درصدی راندمان کاربرد (Ea) قابل اغماض بود. در مجموع با توجه به شاخص‌های عملکرد حاصله در اعتبارسنجی با SIRMOD، شبیه‌سازی مدل EDOSIM-HD در فاز پیشروی طراحی آبیاری جویچه‌ای، بهتر از مدل EDOSIM بود.

واژه‌های کلیدی: آبیاری سطحی، مدل شبیه‌سازی - بهینه‌سازی، راندمان کاربرد، یکنواختی توزیع، زمان پیشروی

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

آبیاری سطحی معمولاً به دلیل طراحی و مدیریت نادرست (و نه ذات این نوع آبیاری)، کارایی نامطلوبی را به دلیل نفوذ عمقی و رواناب زیاد نشان می‌دهد (۵). در کشورهای پیشرفته، با توجه به هزینه زیاد سامانه‌های آبیاری تحت فشار و قابل اجرا نبودن آنها در همه شرایط، آبیاری سطحی بسیار مهم بوده و پژوهشگران زیادی برای بهبود و توسعه آن تلاش می‌کنند (۱). یکی از راه‌های افزایش بهره‌وری آبیاری سطحی، طراحی و ارزیابی مناسب آن است (۲). طراحی دقیق و مدیریت مناسب و آگاهی از روابط بین پارامترها بر عملکرد سیستم آبیاری سطحی اثر می‌گذارد که نقش مؤثری بر افزایش کارایی این سیستم‌ها ایفا می‌کنند (۸). از جمله روش‌های مناسب موجود برای محقق کردن این مهم، استفاده از مدل‌های عددی است که در دهه‌های اخیر به دلیل افزایش توانایی رایانه‌ها توجه ویژه به آنها شده است. این مدل‌های عددی به درک حرکت آب در آبیاری کمک می‌کنند و اجازه ارائه توصیه‌های بهتر برای استفاده کارآمد آب را می‌دهند (۷).

معادلاتی که برای شبیه‌سازی هیدرولیک روزمینی آبیاری سطحی استفاده می‌شوند، به معادلات سنت - ونانت معروف هستند که شامل معادلات مومنوم و پیوستگی هستند. بهبود طراحی آبیاری سطحی با استفاده از مدل‌ها به منظور حل معادلات سنت - ونانت در مطالعات گوناگونی صورت گرفته است. یکی از این زمینه‌ها توسعه نرم‌افزارهایی است که قادر به ارائه شبیه‌سازی دقیق‌تر از فرایندهای آبیاری هستند. نرم‌افزارهایی مانند SIRM (۱۶) و WinSRFR (۶) با ادغام اصول دینامیک سیالات، مانند مدل‌های موج جنبشی (۹)، اینرسی صفر (۱۵) و هیدرودینامیکی کامل (۱۷) توازن میان سرعت، دقت و کارایی محاسباتی ارائه می‌دهند. اما این نرم‌افزارها دارای قابلیت بهینه‌سازی نیستند و فقط برای شبیه‌سازی آبیاری سطحی هستند.

بهبود روش‌های حل عددی در شبیه‌سازی و ادغام تکنیک‌های بهینه‌سازی با مدل‌های شبیه‌سازی نیز از پیشرفت‌های

اساسی در طراحی سیستم‌های آبیاری سطحی هستند (۳). این بهبودها امکان تعیین خودکار پارامترهای بهینه طراحی و مدیریت را فراهم کرده و روش‌های دستی آزمون و خطا را بهبود داده است (۱۰). این خود می‌تواند باعث انعطاف‌پذیری بیشتری در مدیریت شرایط مرزی متنوع در شبیه‌سازی طراحی آبیاری (۱۴)، افزایش پایداری، همگرایی، دقت و افزایش سرعت محاسبات مدل‌ها (۱۸) و بهبود عملکرد طراحی شود (۱۱).

اکبری و همکاران (۴) یک مدل شبیه‌سازی - بهینه‌سازی آبیاری سطحی با عنوان EDOSIM (Evaluation, Design and Optimization of Surface Irrigation Model) را ارائه دادند. در مدل EDOSIM، شبیه‌سازی با مدل بیلان حجمی با بهینه‌سازی فراابتکاری تلفیق شده است. از مزایای مدل هیدرودینامیکی کامل می‌توان به داشتن نیمرخ‌ها و آنمودها اشاره کرد. در واقع اطلاعات در داخل رخداد آبیاری سطحی قابل حصول است. با توجه به این موضوع، در این پژوهش به منظور افزایش دقت شبیه‌سازی و جلوگیری از خطاهای موجود به علت حذف پارامترهایی در روش بیلان حجمی، از شبیه‌ساز فاز پیشروی هیدرودینامیک کامل به جای بیلان حجمی در مدل EDOSIM استفاده شده است. این مهم در کنار قابلیت بهینه‌سازی، نوآوری پژوهش حاضر است. شبیه‌سازی مدل ارائه‌شده نیز با نرم‌افزار SIRM صحت‌سنجی شده است.

مواد و روش‌ها

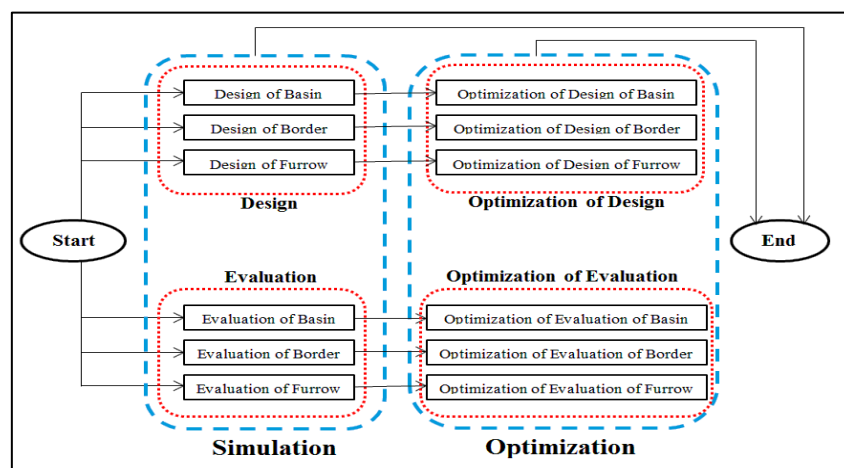
۱- معرفی مدل EDOSIM

در این مدل برای شبیه‌سازی هیدرولیک آبیاری سطحی شامل طراحی یا ارزیابی کرت، نوار و جویچه، معادله بیلان حجم و برای بهینه‌سازی، از الگوریتم فراابتکاری استفاده شده است (۴). شکل ۱ روندنمای مدل EDOSIM را نشان می‌دهد.

۲- ارائه مدل EDOSIM-HD به منظور بهبود فاز پیشروی

طراحی آبیاری جویچه‌ای مدل EDOSIM

با توجه به استفاده از مدل بیلان حجمی در شبیه‌سازی مدل



شکل ۱. نمودار گردش مدل EDOSIM (۴)

دیفرانسیلی آنها منفصل شود تا جملات دیفرانسیل آنها تبدیل به جملات جبری شود. برای این کار روش‌هایی مانند تفاضل‌های محدود، حجم محدود، عناصر محدود و عناصر مرزی وجود دارد (۱۳). در ادامه پس از مرور روش تفاضل‌های محدود با شمای پرایزمن، بر مبنای آن، انفصال معادلات پیوستگی و اندازه حرکت بیان شده است.

۲-۲- انفصال معادله پیوستگی

با استفاده از شمای پرایزمن (شکل ۲)، مشتقات مکانی، زمانی و توابع به صورت زیر منفصل می‌شوند:

$$\frac{\partial f}{\partial x} \Big|_i^{n+1} = \theta \left[\frac{f_{i+1}^{n+1} - f_i^{n+1}}{\Delta x} \right] + (1-\theta) \left[\frac{f_{i+1}^n - f_i^n}{\Delta x} \right] \quad (3)$$

$$\frac{\partial f}{\partial t} \Big|_i^{n+1} = \psi \left[\frac{f_{i+1}^{n+1} - f_{i+1}^n}{\Delta t} \right] + (1-\psi) \left[\frac{f_i^{n+1} - f_i^n}{\Delta t} \right] \quad (4)$$

$$f = \theta \left[\frac{f_{i+1}^{n+1} + f_i^{n+1}}{2} \right] + (1-\theta) \left[\frac{f_{i+1}^n + f_i^n}{2} \right] \quad (5)$$

نمادهای i و $i+1$ مربوط به گره‌های بالادست و پایین‌دست بازه، Δx طول بازه، n و $n+1$ مربوط به دو گام زمانی با فاصله زمانی Δt ، θ و ψ ضرایب زمانی و مکانی هستند. θ یک ضریب وزنی است که اگر صفر باشد، الگوی صریح حاصل می‌شود. در صورتی که $0 < \theta < 1$ باشد، الگو پایدار است؛ از این رو معادله پیوستگی با استفاده از شمای پرایزمن به صورت معادله ۶ منفصل می‌شود:

EDOSIM، در این پژوهش به منظور بهبود نتایج طراحی در فاز پیشروی آبیاری جویچه‌ای از مدل هیدرودینامیک بهره گرفته شده است که منجر به ارائه مدل EDOSIM-HD (EDOSIM HydroDynamic) شده است. برتری مدل هیدرودینامیک بر مدل بیلان حجمی در حل کردن واقعه آبیاری و حصول اطلاع از دبی، سطح مقطع، عمق و سرعت جریان در هر مکان و هر زمان است که منجر به ترسیم نیمرخ‌های مد نظر در هر زمان و آب‌نمودهای مد نظر در هر مکان می‌شود.

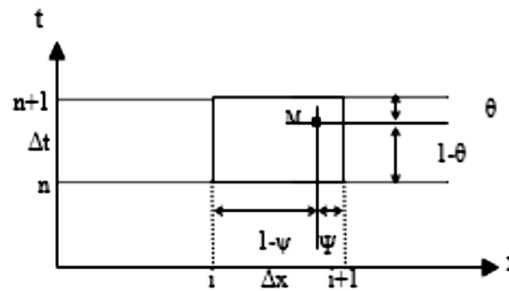
۲-۱- حل عددی معادلات سنت - ونانت

با بهره‌گیری از معادلات سنت - ونانت (مدل موج دینامیکی یا هیدرودینامیک) مراحل آبیاری سطحی، بسته به انتها باز یا بسته بودن، مدل‌سازی می‌شود. این معادلات بر حسب دبی Q و سطح مقطع A (مناسب برای آبیاری سطحی) شامل معادلات پیوستگی و اندازه حرکت به صورت معادلات ۱ و ۲ هستند:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Z}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial (Q^2 / A)}{\partial x} + gA \frac{\partial y}{\partial x} + gA(S_f - S_0) = 0 \quad (2)$$

که Z عمق آب نفوذ یافته است که تابعی از زمان t و مکان x است. S_0 شیب بستر، S_f شیب خط انرژی و g شتاب ثقل است. معادلات سنت - ونانت حل تحلیلی ندارند و بایستی با روش‌های عددی حل شوند. بدین منظور بایستی جملات



شکل ۲. شمای پرایزمن

۳-۲- انفصال معادله اندازه حرکت

معادله ۲ بایستی برحسب دبی و سطح مقطع جریان نوشته شود؛ بنابراین y و S_f بایستی بر حسب سطح مقطع جریان به صورت معادله ۱۶ و ۱۷ نوشته شوند:

$$A = \sigma_1 y^{\sigma_2} \rightarrow \frac{\partial y}{\partial x} = k_1 A^{k_2} \frac{\partial A}{\partial x} \quad (16)$$

$$S_f = \frac{n^2 Q^2}{A^2 R^{4/3}} = \frac{n^2 Q^2}{\rho_1 A^{\rho_2}} = k_3 Q^2 A^{-\rho_2} \quad (17)$$

که $\sigma_1, \sigma_2, \rho_1, \rho_2$ و ضرایب مربوط به شکل هندسی جویچه یا نوار است. R شعاع هیدرولیکی و n ضریب مانینگ است.

سایر متغیرها به صورت معادلات ۱۸ تا ۲۰ هستند:

$$k_1 = \frac{1}{\sigma_2} \left(\frac{1}{\sigma_1} \right)^{k_2-1} \quad (18)$$

$$k_2 = \frac{1}{\sigma_2} - 1 \quad (19)$$

$$k_3 = n^2 / \rho_1 \quad (20)$$

با جایگزینی معادلات ۱۶ و ۱۷ در معادله ۲، انفصال معادله اندازه حرکت به دست می‌آید (معادله ۲۱):

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(Q^2/A)}{\partial x} + k_4 A^{k_5} \frac{\partial A}{\partial x} + k_6 Q^2 A^{k_7} + k_8 A = 0 \quad (21)$$

که در آن:

$$k_4 = g k_1 \quad (22)$$

$$k_5 = k_2 + 1 \quad (23)$$

$$k_6 = g k_3 \quad (24)$$

$$k_7 = 1 - \rho_2 \quad (25)$$

$$k_8 = -g S_0 \quad (26)$$

معادله ۲ با استفاده از شمای پرایزمن به صورت معادله ۲۷ منفصل می‌شود:

$$\theta \frac{Q_{i+1}^{n+1} - Q_i^{n+1}}{\Delta x} + (1-\theta) \frac{Q_{i+1}^n - Q_i^n}{\Delta x} + \psi \frac{A_{i+1}^{n+1} - A_i^{n+1}}{\Delta t} + (1-\psi) \frac{A_{i+1}^n - A_i^n}{\Delta t} + \psi \frac{Z_{i+1}^{n+1} - Z_i^{n+1}}{\Delta t} + (1-\psi) \frac{Z_{i+1}^n - Z_i^n}{\Delta t} = 0 \rightarrow$$

$$F(Q_{i+1}^{n+1}, Q_i^{n+1}, A_{i+1}^{n+1}, A_i^{n+1}) =$$

$$C_1(Q_{i+1}^{n+1} - Q_i^{n+1}) + C_3 A_{i+1}^{n+1} + C_4 A_i^{n+1} + C_5 = 0 \quad (6)$$

که در آن:

$$C_1 = \theta / \Delta x \quad (7)$$

$$C_2 = (1-\theta) / \Delta x \quad (8)$$

$$C_3 = \psi / \Delta t \quad (9)$$

$$C_4 = (1-\psi) / \Delta t \quad (10)$$

$$C_5 = C_2(Q_{i+1}^n - Q_i^n) - C_3 A_{i+1}^n - C_4 A_i^n + C_3(Z_{i+1}^{n+1} - Z_{i+1}^n) + C_4(Z_i^{n+1} - Z_i^n) \quad (11)$$

معادله ۶ برای هر بازه (شامل دو گره) نوشته می‌شود. در این معادله دبی و سطح مقطع جریان در ابتدا و انتهای بازه (یعنی در نقاط i و $i+1$) در زمان $n+1$ مجهول است. چون در ادامه کار نیاز به مشتقات تابع F نسبت به چهار مجهول است، در معادلات ۱۲ تا ۱۵ این مشتقات ارائه شده است:

$$\frac{\partial F}{\partial Q_{i+1}^{n+1}} = C_1 \quad (12)$$

$$\frac{\partial F}{\partial A_i^{n+1}} = C_4 \quad (13)$$

$$\frac{\partial F}{\partial A_{i+1}^{n+1}} = C_3 \quad (14)$$

$$\frac{\partial F}{\partial Q_i^{n+1}} = -C_1 \quad (15)$$

سطح مقطع جریان در ابتدا و انتهای بازه (یعنی در نقاط i و $i+1$) در زمان $n+1$ مجهول است. چون در ادامه نیاز به مشتقات تابع G نسبت به چهار مجهول است، این مشتقات در معادلات ۴۵ تا ۴۸ به صورت زیر ارائه شده است:

$$\frac{\partial G}{\partial Q_i^{n+1}} = C_4 - 2C_1(Q/A)_i^{n+1} + 2C_{17}(QA^{k_7})_i^{n+1} \quad (۴۵)$$

$$\frac{\partial G}{\partial Q_{i+1}^{n+1}} = C_3 + 2C_1(Q/A)_{i+1}^{n+1} + 2C_{17}(QA^{k_7})_{i+1}^{n+1} \quad (۴۶)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial G}{\partial A_i^{n+1}} &= C_1(Q^2/A^2)_i^{n+1} - C_9(A^{k_5})_{i+1}^{n+1} + C_{12}k_5(A^{k_5-1})_i^{n+1} + k_5C_9 \\ &(A^{k_5-1})_i^{n+1}A_{i+1}^{n+1} - C_9C_{10}(A^{C_{10}-1})_{i+1}^{n+1} - C_{14} + C_{17}k_7(Q^2A^{k_7-1})_{i+1}^{n+1} + C_{19} \end{aligned} \quad (۴۷)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial G}{\partial A_{i+1}^{n+1}} &= -C_1(Q^2/A^2)_{i+1}^{n+1} + C_9C_{10}(A^{C_{10}-1})_{i+1}^{n+1} - C_9k_5A_i^{n+1}(A^{k_5-1})_{i+1}^{n+1} \\ &+ C_{12}k_5(A^{k_5-1})_{i+1}^{n+1} + C_9(A^{k_5})_{i+1}^{n+1} + C_{14} + C_{17}k_7(Q^2A^{k_7-1})_{i+1}^{n+1} + C_{19} \end{aligned} \quad (۴۸)$$

با کاربرد معادلات F و G (معادلات ۶ و ۲۷) می‌توان فازهای آبیاری سطحی را به صورت زیر شبیه‌سازی کرد.

۴-۲- مدل‌سازی فاز پیشروی در مدل EDOSIM-HD

با فرض Δx متغیر و مجهول و Δt ثابت و معلوم، طول نوار یا جویچه به بازه متغیر به طور Δx_i تقسیم می‌شود. مدت زمانی که طول می‌کشد آب هر بازه را طی کند، ثابت و برابر Δt است. مقدار N به گونه‌ای انتخاب می‌شود که پس از محاسبه Δx ها مجموع آنها برابر با L باشد. مدت زمانی که طول می‌کشد آب به انتهای بازه N ام برسد، $t_N = Nt$ است. تعداد گره‌ها برابر با $N+1$ و تعداد بازه‌ها N خواهد بود. بنابراین $2N$ معادله تشکیل خواهد شد. تعداد مجهولات نیز به شرح زیر برابر با $2N$ خواهد بود:

۱- از A_1^{n+1} تا A_N^{n+1} (N مجهول): یعنی سطح مقطع جریان از گره اول تا یک گره مانده به آخر.

۲- از Q_2^{n+1} تا Q_N^{n+1} ($N-1$ مجهول): یعنی دبی جریان از گره دوم تا یک گره مانده به آخر.

۳- Δx_N (یک مجهول)

مقادیر عمق آب نفوذ یافته در هر گره در زمان t_N تابعی از این زمان است؛ به طوری که به عنوان نمونه، با در نظر گرفتن معادله

$$\begin{aligned} &\psi \frac{Q_{i+1}^{n+1} - Q_{i+1}^n}{\Delta t} + (1-\psi) \frac{Q_i^{n+1} - Q_i^n}{\Delta t} + \\ &\theta \frac{(Q^2/A)_{i+1}^{n+1} - (Q^2/A)_i^{n+1}}{\Delta x} + \\ &(1-\theta) \frac{(Q^2/A)_{i+1}^n - (Q^2/A)_i^n}{\Delta x} \\ &+ [k_4\theta/2(A^{k_5})_{i+1}^{n+1} + k_4\theta/2(A^{k_5})_i^{n+1} + k_4(1-\theta)/2(A^{k_5})_{i+1}^n \\ &+ k_4(1-\theta)/2(A^{k_5})_i^n] \cdot \left[\theta \frac{A_{i+1}^{n+1} - A_i^{n+1}}{\Delta x} + (1-\theta) \frac{A_{i+1}^n - A_i^n}{\Delta x} \right] + \\ &k_6/2[\theta(Q^2A^{k_7})_{i+1}^{n+1} + \theta(Q^2A^{k_7})_i^{n+1} + (1-\theta)(Q^2A^{k_7})_{i+1}^n + \\ &(1-\theta)(Q^2A^{k_7})_i^n] + k_8\theta/2A_{i+1}^{n+1} + k_8\theta/2A_i^{n+1} + k_8(1-\theta)/2A_{i+1}^n \\ &+ k_8(1-\theta)/2A_i^n = 0 \rightarrow \\ &G(Q_i^{n+1}, Q_{i+1}^{n+1}, A_i^{n+1}, A_{i+1}^{n+1}) = C_3Q_{i+1}^{n+1} + C_4Q_i^{n+1} + C_1 \\ &[(Q^2/A)_{i+1}^{n+1} - (Q^2/A)_i^{n+1}] + C_9[(A^{C_{10}})_{i+1}^{n+1} - (A^{k_5})_{i+1}^{n+1}A_i^{n+1}] \\ &+ [(A^{k_5})_{i+1}^{n+1} + (A^{k_5})_i^{n+1}]C_{12} + [(A^{k_5})_i^{n+1}A_{i+1}^{n+1} - (A^{C_{10}})_i^{n+1}]C_9 \end{aligned} \quad (۲۷)$$

که ضرایب معادله ۲۷ به صورت معادلات ۲۸ تا ۴۴ است:

$$C_6 = C_3Q_{i+1}^n \quad (۲۸)$$

$$C_7 = C_4Q_i^n \quad (۲۹)$$

$$C_8 = C_2[(Q^2/A)_{i+1}^n - (Q^2/A)_i^n] \quad (۳۰)$$

$$C_9 = k_4C_1\theta/2 \quad (۳۱)$$

$$C_{10} = 1 + k_5 \quad (۳۲)$$

$$C_{11} = k_4C_2\theta/2 \quad (۳۳)$$

$$C_{12} = C_{11}(A_{i+1}^n - A_i^n) \quad (۳۴)$$

$$C_{13} = k_4C_1(1-\theta)/2 \quad (۳۵)$$

$$C_{14} = C_{13}[(A^{k_5})_{i+1}^n + (A^{k_5})_i^n] \quad (۳۶)$$

$$C_{15} = k_4C_2(1-\theta)/2 \quad (۳۷)$$

$$C_{16} = C_{15}(A_{i+1}^n - A_i^n)[(A^{k_5})_i^n + (A^{k_5})_{i+1}^n] \quad (۳۸)$$

$$C_{17} = k_6\theta/2 \quad (۳۹)$$

$$C_{18} = k_6(1-\theta)/2 \quad (۴۰)$$

$$C_{19} = k_8\theta/2 \quad (۴۱)$$

$$C_{20} = C_{18}[(Q^2A^{k_7})_{i+1}^n + (Q^2A^{k_7})_i^n] \quad (۴۲)$$

$$C_{21} = k_8(1-\theta)/2(A_{i+1}^n + A_i^n) \quad (۴۳)$$

$$C_{22} = -C_6 - C_7 + C_8 + C_{16} + C_{20} + C_{21} \quad (۴۴)$$

معادله ۲۷ نیز برای هر بازه نوشته می‌شود. در این رابطه دبی و

$$\frac{\partial G_N}{\partial Q_N^{n+1}} = C_4 - 2C_1(Q/A)_N^{n+1} + 2C_{17}Q_N^{n+1}(A_N^{n+1})^{k_7} \quad (54)$$

$$\frac{\partial G_N}{\partial A_N^{n+1}} = C_1(Q^2/A^2)_N^{n+1} - C_9C_{10}(A_N^{n+1})^{C_{10}} + C_{17}k_7(Q_N^{n+1})^2(A_N^{n+1})^{k_7-1} + C_{19} \quad (55)$$

$$\frac{\partial G_N}{\partial X} = \frac{\theta}{X^2}(Q^2/A)_N^{n+1} + k_4\theta^2/(2X^2)(A_N^{n+1})^{C_{10}} \quad (56)$$

پس از اتمام محاسبات مرحله پیشروی، نقاطی به دست می‌آید که زمان پیشروی آب به آنها، دبی و سطح مقطع جریان و عمق آب نفوذ یافته در آنها معلوم است. این نقاط در مراحل بعدی آبیاری مورد استفاده می‌شود. در واقع در این مرحله به نوعی ایستگاه‌گذاری نوار یا جویچه انجام شده است.

۲-۵- مدل‌سازی فازهای بعدی در مدل EDOSIM-HD

پس از تکمیل فاز پیشروی با مدل هیدرودینامیک در شبیه‌سازی طراحی جویچه، فازهای ذخیره، تخلیه و پسروی دارای فرضیاتی به شرح زیر هستند:

- زمانی که آب به انتهای زمین رسید، با داشتن Z_{req} و محاسبه t_{req} با استفاده از معادله کاستیاکوف - لویس، زمان قطع جریان (معادله ۲۷) از حاصل جمع زمان پیشروی و نفوذ قابل محاسبه است.

$$t_{co} = t_L + t_{req} \quad (57)$$

- در آبیاری جویچه‌ای مدل EDOSIM-HD، فازهای تخلیه و پسروی ناچیز فرض شده‌اند.

- برای محاسبه حجم واحد طول نفوذ مورد نیاز در انتهای آبیاری (Z_{Final})، حجم واحد طول نفوذ مورد نیاز در انتهای مزرعه (Z_{req})، به حجم واحد طول نفوذ تمامی گره‌ها در فاز پیشروی ($Z_{Advance_i}$) اضافه می‌شود:

$$Z_{Final} = Z_{Advance_i} + Z_{req} \quad (58)$$

سپس حجم نفوذ کل ($\sum Z_z$) که برای محاسبه‌ی شاخص‌های عملکرد از آن بهره برده می‌شود، از قاعده دوزنقه محاسبه می‌شود. در ادامه شاخص‌های عملکرد هشت‌گانه راندمان کاربرد (Ea)، راندمان آبیاری (Ei)، راندمان نیاز آبی (Er)، یکنواختی توزیع (DU)،

نفوذ کوستیاکوف، در گره شماره ۱ برابر با kt_N^a ، در گره شماره ۲ برابر با $k(t_N - t_1)^a$ ، در گره شماره ۳ برابر با $k(t_N - t_2)^a$ و در گره N ام برابر با $k(t_N - t_{N-1})^a$ و در گره N+1 برابر با صفر است.

دستگاه معادلات تشکیل شده با 2N معادله و 2N مجهول، یک دستگاه غیر خطی است که بایستی به روش نیوتن-رافسون به دستگاه خطی تبدیل شود. در این صورت نیاز به مشتقات توابع است که پیش‌ازین اشاره شد. دستگاه خطی شده به صورت شکل ۳ است.

در این دستگاه $X = \Delta x_N$ است. زمان مد نظر برای سطح مقطع و دبی جریان در ماتریس ضرایب یادشده n+1 است. تمام اعضای ماتریس اول و سوم در این دستگاه به ازای مقادیر فرضی برای مجهولات، محاسبه می‌شود و با حل دستگاه به روش ماتریس اسپارس (ماتریس ضرایب ۵ قطری است)، Δ ها به دست می‌آید. مقدار جدید هر مجهول برابر با مقدار فرضی آن به علاوه Δ مربوط به آن است. محاسبات تا رسیدن به همگرایی تکرار می‌شود. نکته قابل توجه این است که معادلات پیوستگی و اندازه حرکت برای بازه آخر با توجه به اینکه در انتهای این بازه دبی، سطح مقطع جریان و $Q^2/A = A.V$ صفر است، به صورت ساده شده زیر تبدیل می‌شود (معادلات ۴۹ و ۵۰):

$$F_N = -C_1Q_N^{n+1} + C_4A_N^{n+1} + C_5, C_5 = C_4Z_N^{n+1} \quad (49)$$

$$G_N = C_4Q_N^{n+1} - C_1(Q_2/A)_N^{n+1} - C_9(A_N^{n+1})^{C_{10}} + C_{17}(Q_N^{n+1})^{k_7} + C_{19}A_N^{n+1} \quad (50)$$

برای بازه آخر، مشتقات این توابع نسبت به A_{N+1}^{n+1} و Q_{N+1}^{n+1} صفر و نسبت به سایر متغیرها به صورت معادلات ۵۱ تا ۵۶ نوشته می‌شود.

$$\frac{\partial F_N}{\partial Q_N^{n+1}} = -C_1 \quad (51)$$

$$\frac{\partial F_N}{\partial A_N^{n+1}} = C_4 \quad (52)$$

$$\frac{\partial F_N}{\partial X} = \frac{\theta}{X^2}Q_N^{n+1} \quad (53)$$

$$\begin{bmatrix}
 \frac{\partial F_1}{\partial A_1} & \frac{\partial F_1}{\partial A_2} & \frac{\partial F_1}{\partial Q_2} & 0 & - & - & - & - & 0 \\
 \frac{\partial G_1}{\partial A_1} & \frac{\partial G_1}{\partial A_2} & \frac{\partial G_1}{\partial Q_2} & 0 & - & - & - & - & 0 \\
 0 & \frac{\partial F_2}{\partial A_2} & \frac{\partial F_2}{\partial Q_2} & \frac{\partial F_2}{\partial A_3} & \frac{\partial F_2}{\partial Q_3} & 0 & - & - & 0 \\
 0 & \frac{\partial G_2}{\partial A_2} & \frac{\partial G_2}{\partial Q_2} & \frac{\partial G_2}{\partial A_3} & \frac{\partial G_2}{\partial Q_3} & 0 & - & - & 0 \\
 0 & - & - & - & - & - & - & - & 0 \\
 0 & - & - & - & - & - & - & - & 0 \\
 0 & - & - & - & - & - & \frac{\partial F_N}{\partial A_N} & \frac{\partial F_N}{\partial Q_N} & \frac{\partial F_N}{\partial X} \\
 0 & - & - & - & - & - & \frac{\partial G_N}{\partial A_N} & \frac{\partial G_N}{\partial Q_N} & \frac{\partial G_N}{\partial X}
 \end{bmatrix}
 \begin{bmatrix}
 \Delta A_1 \\
 \Delta A_2 \\
 \Delta Q_2 \\
 \Delta A_3 \\
 \Delta Q_3 \\
 - \\
 - \\
 \Delta A_N \\
 \Delta Q_N \\
 \Delta X
 \end{bmatrix}
 =
 \begin{bmatrix}
 -F_1 \\
 -G_1 \\
 -F_2 \\
 -G_2 \\
 - \\
 - \\
 - \\
 -F_N \\
 -G_N
 \end{bmatrix}$$

شکل ۳. دستگاه معادلات فاز پیشروی در مدل EDOSIM-HD

۳- شبیه‌سازی - بهینه‌سازی در مدل EDOSIM-HD

شبیه‌سازی در مدل EDOSIM-HD در نهایت منجر به محاسبه شاخص‌های عملکرد (معادلات ۵۹ تا ۶۶) و تابع هدف (به عبارت بهتر، تابع وضع موجود) (معادله ۶۷) می‌شود. پس از شبیه‌سازی، شبیه‌سازی - بهینه‌سازی انجام می‌شود. تابع هدف (Z) متشکل از ترکیب خطی هشت شاخص عملکرد است. تابع هدف هیدرولیکی کمینه متشکل از شاخص‌های یادشده به‌نحوی فرمول‌بندی شد که از نظر تئوری دارای بهینه سراسری صفر باشد. دبی ورودی به‌عنوان متغیر تصمیم لحاظ شد. با توجه به ساختار مسئله، فقط نیاز به قیود محدوده (حد کمینه و بیشینه دبی ورودی) و ارتباط حد کمینه و بیشینه (کمینه بیشتر از بیشینه نباشد). بود. این قیود به روش برخورد ساختاری برقرار شدند و نیاز به عبارت جریمه نبود. قید محدوده از کاربر درخواست می‌شود. برای حل تابع هدف، از حل‌گر الگوریتم فراابتکاری Particle Swarm Optimization (particleswarm) جعبه‌ابزار بهینه‌سازی نرم‌افزار MATLAB بدون تغییر در پارامترها و گزینه‌های بهینه‌سازی استفاده شد.

۴- اعتبارسنجی مدل EDOSIM-HD

در این پژوهش به‌منظور شبیه‌سازی اولیه و سپس شبیه‌سازی - بهینه‌سازی، از داده‌های منبع (۱۲) مطابق جدول ۱ برای طراحی آبیاری جویچه‌ای بهره برده شد. طراحی آبیاری جویچه‌ای با استفاده از داده‌های یادشده در سه مدل EDOSIM، EDOSIM-HD و SIRMOD صورت گرفت.

یکنواختی توزیع کریستیانسن (CU)، راندمان توزیع (DE)، نسبت رواناب پایاب (TWR)، نسبت نفوذ عمقی (DPR)، به صورت معادلات ۵۹ تا ۶۶ محاسبه می‌شوند.

$$Ea = \frac{Z_{req} \cdot L}{Q_0 \cdot t_{co}} \times 100 \quad (59)$$

$$Ei = \frac{L \cdot w \cdot (Z_{req} + Z_{Lf})}{Q_0 \cdot t_{co}} \times 100 \quad (60)$$

$$Er = \frac{Z_{req} \cdot L}{Z_{req} \cdot L} \times 100 \quad (61)$$

$$DU = \frac{Z_{lq}}{Z_{avg}} \times 100 \quad (62)$$

$$DE = \frac{Z_{req}}{Z_{avg}} \times 100 \quad (63)$$

$$TWR = \left(1 - \frac{\sum Z}{Q_0 \cdot t_{co}} \right) \times 100 \quad (64)$$

$$DPR = \left(\frac{\sum Z - Z_{req} \cdot L}{Q_0 \cdot t_{co}} \right) \times 100 \quad (65)$$

$$CU = 100 - \left(\frac{\sum |Z_i - Z_{avg}|}{n Z_{avg}} \right) \times 100 \quad (66)$$

که در آنها Z_{req} عمق نفوذ مورد نیاز، Q_0 دبی اولیه، t_{co} زمان قطع، L طول جویچه، w عرض جویچه، Z_{Lf} عمق آبشویی شده، Z_{lq} ربع کمترین نفوذها و Z_{avg} میانگین عمق نفوذها هستند. در نهایت مقدار تابع هدف (وضع موجود) Z به صورت معادله ۶۷ قابل محاسبه است.

$$\begin{aligned}
 Z = & \left(1 - \frac{Ea}{100} \right) + \left(1 - \frac{Ei}{100} \right) + \left(1 - \frac{Er}{100} \right) + \left(1 - \frac{DU}{100} \right) \\
 & + \left(1 - \frac{CU}{100} \right) + \left(1 - \frac{DE}{100} \right) + \left(\frac{TWR}{100} \right) + \left(\frac{DPR}{100} \right)
 \end{aligned} \quad (67)$$

جدول ۱. داده‌های مورد استفاده برای طراحی آبیاری جویچه‌ای (۱۲)

L (m)	Q _{in} (L/S)	S ₀ (m/m)	n	a	k (m ³ /min ^a /m)	f ₀ (m ³ /m / min)	Z _{req} (m ³ /m)	ρ ₁	ρ ₂	σ ₁	σ ₂	LF
۶۰	۱/۴	۰/۰۰۳	۰/۰۴	۰/۳۵	۰/۰۰۵	۰/۰۰۱۱۹	۰/۰۵۵	۰/۲۵	۲/۷	۰/۶	۱/۲	۰/۱

نزدیک‌تر شده‌اند؛ به جز TWR که البته افزایش آن به خاطر دبی بیشتر، نسبت به کاهش شدیدتر DPR و افزایش Ea قابل اغماض است.

شکل ۴ نمایانگر نیمرخ گام‌به‌گام جریان سطحی و زیرسطحی در طراحی بهینه آبیاری جویچه‌ای در فاز پیشروی است. فرصت نفوذ در ابتدای مزرعه به اندازه زمان پیشروی است و در انتهای مزرعه صفر است. نیمرخ گام‌به‌گام با دبی بهینه نسبت به نیمرخ گام‌به‌گام با دبی اولیه نشانگر آن بود که با افزایش دبی، عمق جریان سطحی و زیرسطحی به ترتیب بیشتر و کمتر شده است.

شکل ۵ نمایانگر این است که جریان بهینه در نصف زمان پیشروی، طولی بیشتر از نصف مزرعه را می‌پیماید و در زمان پیشروی، کل مزرعه را طی می‌کند. پیمایش طول بیشتر در نصف زمان پیشروی، به علت کاهش شیب سطح آب در طول فاز پیشروی است. در شبیه‌سازی اولیه، فاصله طولی متناظر با نصف زمان پیشروی و زمان پیشروی، کمتر از ۱۰ متر بود. دلیل آن کم‌بودن دبی و به درازا کشیده شدن زمان پیشروی است. با بهینه‌شدن (افزایش) میزان دبی، نیمرخ عمق جریان سطحی نشان می‌دهد که عمق آب در ابتدای مزرعه بیشتر شده و نصف زمان پیشروی در کمی بعد از ۴۰ متر رخ داده است. این نشانگر رخداد فاز پیشروی در زمان مطلوب‌تر و همچنین کاهش تلفات عمقی است.

شکل ۶ نشانگر این است که در انتهای آبیاری، آب به اندازه عمق مورد نیاز در انتهای مزرعه نفوذ کرده است؛ گرچه پس از اتمام آبیاری، بیش‌آبیاری در ابتدای مزرعه وجود دارد. با این تأکید مجدد که در فاز پیشروی (نمودارهای آبی و قرمز شکل ۶)، معادلات سنت - ونانت حل شده و در سه فاز بعد، با فرضیات ارائه شده، مقدار Z_{req} (نمودار افقی سبز) به اعماق نفوذ

مدل SIRMOD به‌منظور اعتبارسنجی طراحی مدل EDOSIM-HD و EDOSIM استفاده شد. سپس بهینه‌سازی دبی در مدل EDOSIM-HD و EDOSIM صورت گرفت. در مجموع مدل‌های EDOSIM-HD و EDOSIM دارای قابلیت بهینه‌سازی هستند و مدل SIRMOD فاقد این قابلیت است؛ ازاین‌رو چندین اجرا با دبی‌ها (بین حدود پایین و بالای تعریف‌شده) و زمان‌های قطع متناظر با SIRMOD صورت گرفت و شاخص‌های عملکرد حاصل‌شده در طراحی و بهینه‌سازی طراحی مقایسه شدند.

نتایج و بحث

۱- نتایج شبیه‌سازی

نتایج زمان‌های مهم آبیاری، حجم نفوذ و شاخص‌های عملکرد سه مدل با دبی اولیه (۱/۴ لیتر بر ثانیه) به شرح جدول ۲ است. بررسی زمان‌های پیشروی، قطع، تخلیه و پسروی نشان داد نتایج مدل EDOSIM-HD نسبت به مدل EDOSIM-VB نزدیکی بیشتری به مدل SIRMOD-HD دارد. همچنین حجم نفوذ و شاخص‌های عملکرد نشانگر برتری مدل EDOSIM-HD نسبت به مدل EDOSIM-VB بود.

۲- نتایج شبیه‌سازی - بهینه‌سازی

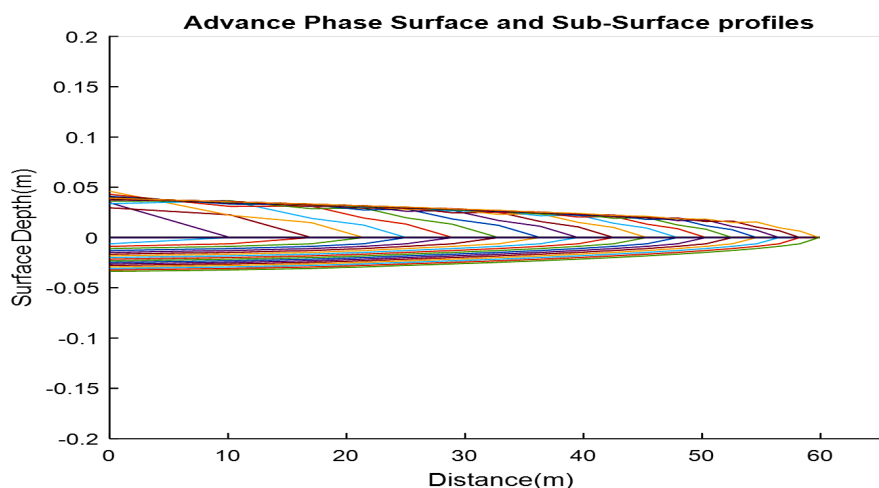
نتایج زمان‌های مهم آبیاری، حجم نفوذ و شاخص‌های عملکرد دو مدل با دبی بهینه (۱/۸ لیتر بر ثانیه) به شرح جدول ۳ است. با افزایش دبی بهینه نسبت به دبی اولیه (جدول ۳ نسبت به جدول ۲)، کاهش زمان‌های پیشروی، قطع جریان، تخلیه و پسروی و عدم تغییر زمان مورد نیاز نفوذ مورد انتظار است. کاهش حجم نفوذ نیز به‌واسطه اعمال دبی بیشتر در زمان کمتر است. تمامی شاخص‌های عملکرد نیز به وضع بهینه خود

جدول ۲. نتایج زمان‌های مهم آبیاری، حجم نفوذ و شاخص‌های عملکرد سه مدل با دبی اولیه (۱/۴ لیتر بر ثانیه)

Ea	∇_z	t_r (min)	t_d (min)	t_{co} (min)	t_{req} (min)	t_l (min)	Model
۴۹/۷	۶/۹	۷۹/۱	۷۹/۱	۷۹/۱	۳۲/۱	۴۷	EDOSIM-HD
۵۵/۳	۵/۴	۷۱/۰	۷۱/۰	۷۱/۰	۳۲/۱	۳۸/۹	EDOSIM
۴۹/۵	۶/۵	۸۴	۸۲	۷۹	۳۲	۴۹/۵	SIRMOD_HD
CU	DPR	TWR	DE	DU	Er	Ei	Model
۸۱/۹	۵۰/۳	۰	۵۶/۶	۷۲/۸	۱۰۰	۵۴/۷	EDOSIM-HD
---	۳۵/۲	۹/۴	۶۲/۴	۷۶/۲	۱۰۰	۶۰/۹	EDOSIM
---	۴۸/۳	۲/۲	۵۰/۶	۹۶/۶	۹۹/۷	۵۵/۰	SIRMOD_HD

جدول ۳. نتایج زمان‌های مهم آبیاری، حجم نفوذ و شاخص‌های عملکرد دو مدل با دبی بهینه (۱/۸ لیتر بر ثانیه)

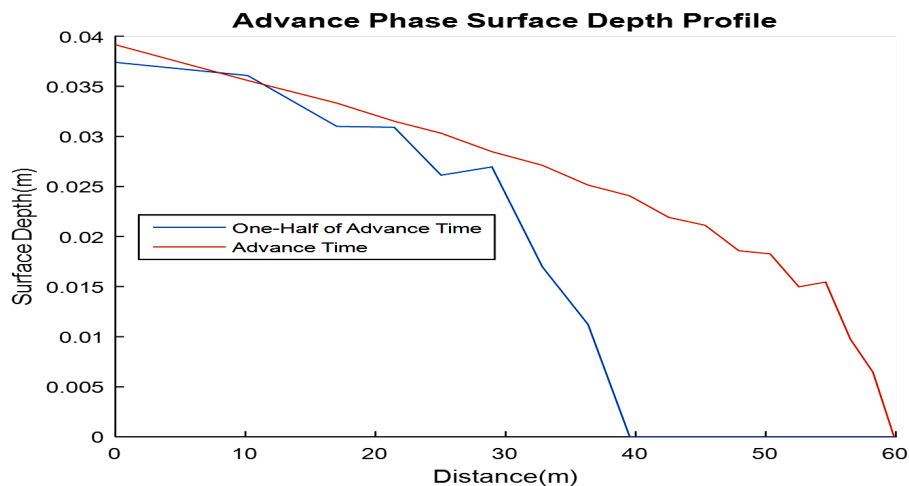
Ea	∇_z	t_r (min)	t_d (min)	t_{co} (min)	t_{req} (min)	t_l (min)	Model
۵۹/۸	۴/۹	۵۱/۱	۵۱/۱	۵۱/۱	۳۲/۱	۱۹	EDOSIM-HD
۵۸/۸	۴/۳	۵۲	۵۲	۵۲	۳۲/۱	۱۹/۹	EDOSIM
CU	DPR	TWR	DE	DU	Er	Ei	Model
۸۸/۹	۲۸/۴	۱۱/۷	۷۱/۹	۸۳/۶	۱۰۰	۶۵/۸	EDOSIM-HD
---	۱۷/۸	۲۳/۴	۷۷/۴	۸۴/۸	۱۰۰	۶۴/۶	EDOSIM



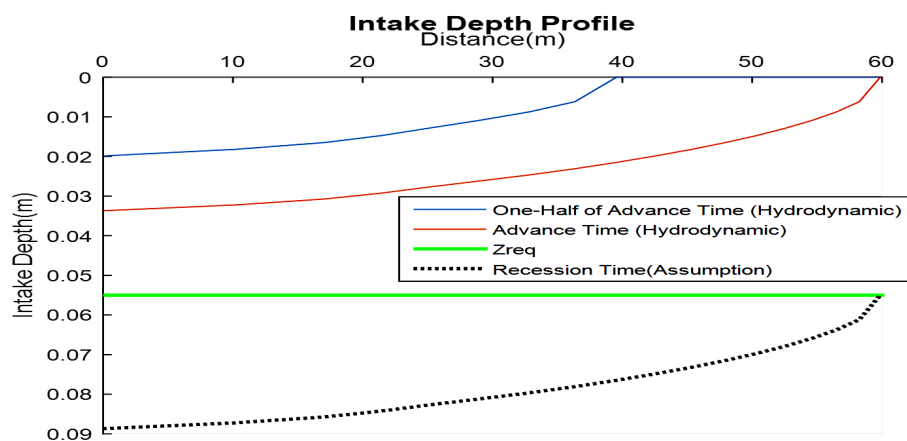
شکل ۴. نیمرخ گام‌به‌گام جریان سطحی و زیرسطحی در طراحی بهینه فاز پیشروی

شکل ۷ ترسیم شده است. منحنی پیشروی در ابتدا در زمان‌های کوتاهی سریع به جلو حرکت می‌کند و پس از آن با سرعت کمتری پیشروی انجام می‌شود. دلیل آن را می‌توان f_0 زیاد و کاهش

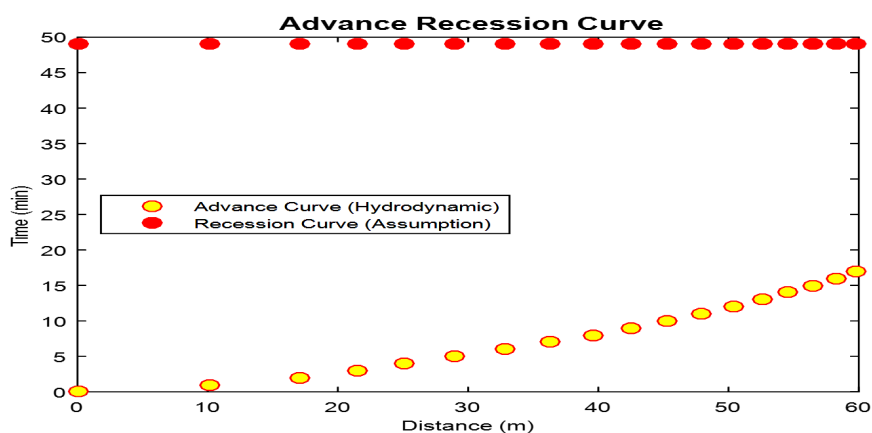
در زمان پیشروی افزوده شده و نیمرخ نهایی نفوذ (نمودار مشکی خط‌چین) حاصل شده است. منحنی پیشروی پسروی بهینه با فرض‌های مورد اشاره در



شکل ۵. نیمرخ عمق جریان سطحی در طراحی بهینه آبیاری جویچه‌ای در فاز پیشروی



شکل ۶. نیمرخ نفوذ در طراحی بهینه آبیاری جویچه‌ای در فاز پیشروی و اتمام آبیاری



شکل ۷. پیشروی و پسروی با دبی بهینه (ترسیم فاز پسروی با فرضیات)

پس از رسیدن به اوج تا رسیدن به زمان پشروی و صفر شدن ادامه خواهد داد.

آبنمود عمق جریان در ابتدای مزرعه دارای نوساناتی است که پس از گذشت زمان میرا شده (شکل ۱۰) و در صورت ادامه آبیاری تا انتها، تا رسیدن به اوج خود در زمان قطع ادامه می‌یابد. سپس کاهش یافته تا در زمان تخلیه به صفر می‌رسد. آبنمود عمق جریان در وسط مزرعه پس از میرا شدن جریان و رسیدن به بیشینه در کمی بعد از زمان قطع شروع به کاهش می‌گذارد تا کمی بعد از زمان تخلیه صفر می‌شود.

باتوجه به شکل ۱۱ آبنمود عمق نفوذ در ابتدای مزرعه و در وسط مزرعه در صورت ادامه آبیاری تا انتها، همواره به ترتیب تا زمان‌های تخلیه و اندکی پس از آن افزایش می‌یابد. با در نظر گرفتن آبنمود نفوذ عمقی در انتهای مزرعه از زمان پشروی تا رسیدن به زمان پشروی پیوسته رو به افزایش است. شکل ۱۲ بیانگر این است که با دبی اولیه در ابتدای آبیاری، سطح مقطع جریان داری نوساناتی است که علت آن حرکت موج‌گون آب است که در صورت ادامه آبیاری تا انتها، پس از رسیدن به زمان قطع، به اوج خود می‌رسد و در زمان تخلیه صفر می‌شود. در این شکل سطح مقطع جریان در وسط مزرعه به تدریج تا اندکی پس از زمان قطع دارای روند افزایشی است و پس از آن تا اندکی پس از زمان تخلیه ادامه داشته تا به صفر برسد.

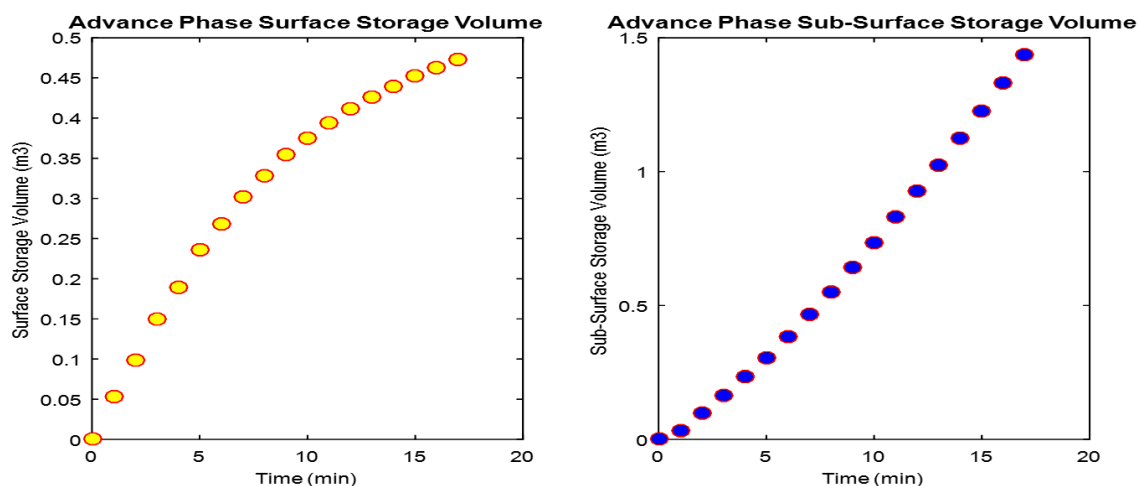
۳- نتایج شاخص‌های عملکرد در SIRMOD به ازای دبی‌های مختلف

با توجه به این که SIRMOD فاقد بهینه‌ساز است، با دبی‌های مختلف بین حد کمینه و بیشینه، شاخص‌های عملکرد بررسی شدند (جدول ۴). همان‌طور که دیده می‌شود، با دبی ۱/۸ لیتر بر ثانیه، شاخص‌های عملکرد در SIRMOD در بهترین حالت هستند. نتایج مدل پیشنهادی با دبی بهینه به نسبت مدل توازن حجمی EDOSIM به نتایج SIRMOD نزدیک‌تر است.

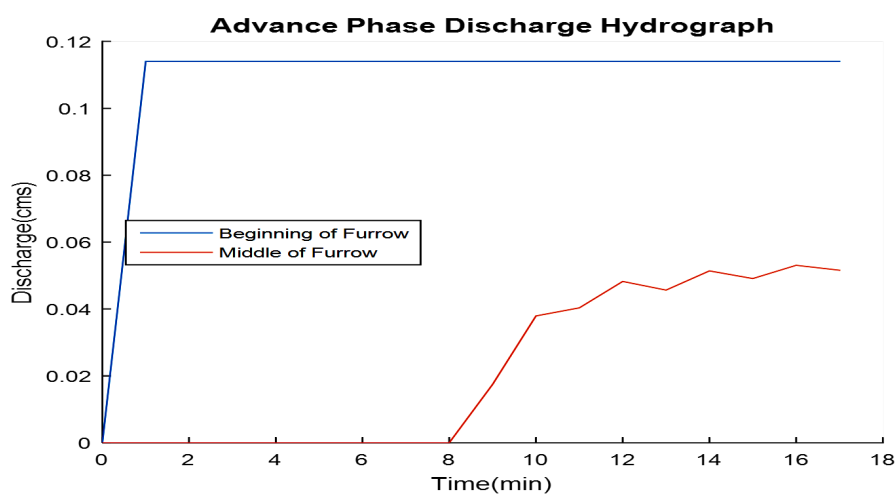
شیب سطح آب در طول پشروی بیان کرد. منحنی پشروی با توجه به فرض برابری با زمان قطع ترسیم شده است. به علاوه همان‌طور که قابل مشاهده است، فاصله‌های پشروی با هم برابر نیستند که علت آن، کاهش شیب سطح آب نسبت به هر فاصله پشروی شده است. اعمال دبی بهینه منجر به کاهش تعداد بازه‌ها و سریع‌تر طی شدن فاز پشروی شده است و همچنین موجب کاهش زمان پشروی فرضی شده است.

آبنمود حجم ذخیره سطحی و زیرسطحی در طراحی بهینه آبیاری جویچه‌ای در فاز پشروی در شکل ۸ نمایش داده شده است. با ادامه آبیاری تا انتها، آبنمود حجم ذخیره سطحی از ابتدای آبیاری تا رسیدن به اوج خود در زمان قطع، همواره افزایشی است؛ گرچه با گذشت زمان با شدت کمتر نسبت به ابتدای زمان آبیاری افزایش می‌یابد. پس از آن به صورت زنگوله‌ای تا رسیدن به زمان پشروی، کاهش می‌یابد تا به صفر برسد. آبنمود حجم ذخیره زیرسطحی نیز با گذشت زمان تا انتهای آبیاری همواره افزایش می‌یابد. آبنمود حجم رواناب پایاب نیز که در فاز پشروی موضوعیت ندارد، پس از زمان پشروی تا انتهای آبیاری افزایشی خواهد بود.

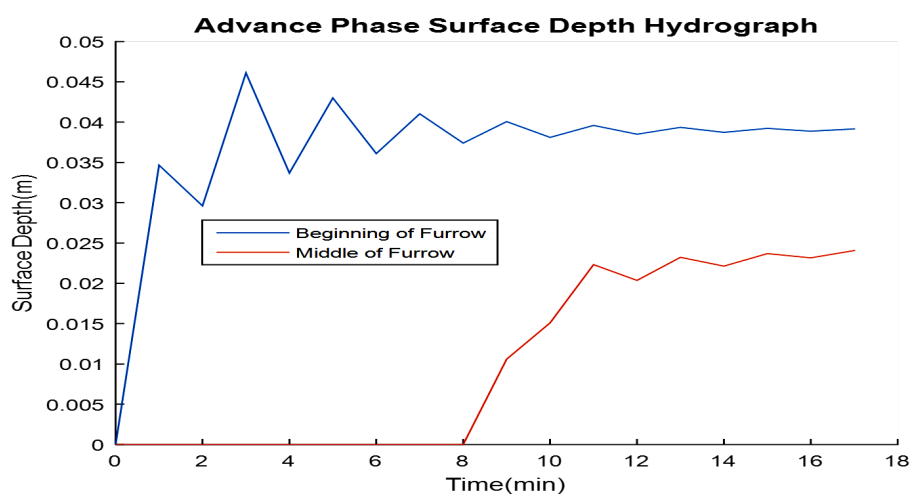
با توجه به شکل ۹ به واسطه ثبات دبی ورودی، آبنمود دبی در ابتدای مزرعه ثابت است. در این آبنمود، دبی جریان در ابتدای آبیاری در ابتدای مزرعه صفر بوده است. پس از گذشت یک واحد زمانی، دبی جریان به میزان دبی ورودی مزرعه (Q_{in}) شده است. در صورت ادامه آبیاری تا انتها، این مقدار تا رسیدن به زمان قطع ثابت می‌ماند و به محض قطع جریان تا انتهای آبیاری، مقدار دبی جریان در ابتدای مزرعه صفر خواهد شد. آبنمود دبی ورودی در نصف طول مزرعه در کمتر از نصف زمان پشروی شروع می‌شود و تا کمی پس از زمان قطع افزایشی است و پس از آن تا زمان تخلیه به صورت کاهشی تا صفر شدن ادامه می‌یابد. آبنمود دبی جریان در خروجی تا کمی بعد از زمان قطع افزایشی است و اگر انتها بسته یا باز باشد، تفاوت می‌کند. در انتها بسته دبی صفر است و در انتها باز، دبی



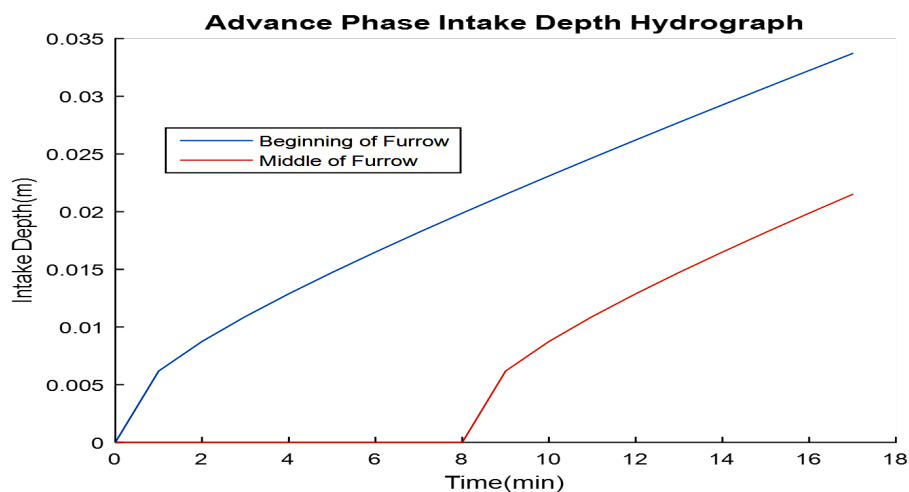
شکل ۸. آبنمود حجم ذخیره سطحی و زیرسطحی در طراحی بهینه آبیاری جویچه‌ای در فاز پیشروی



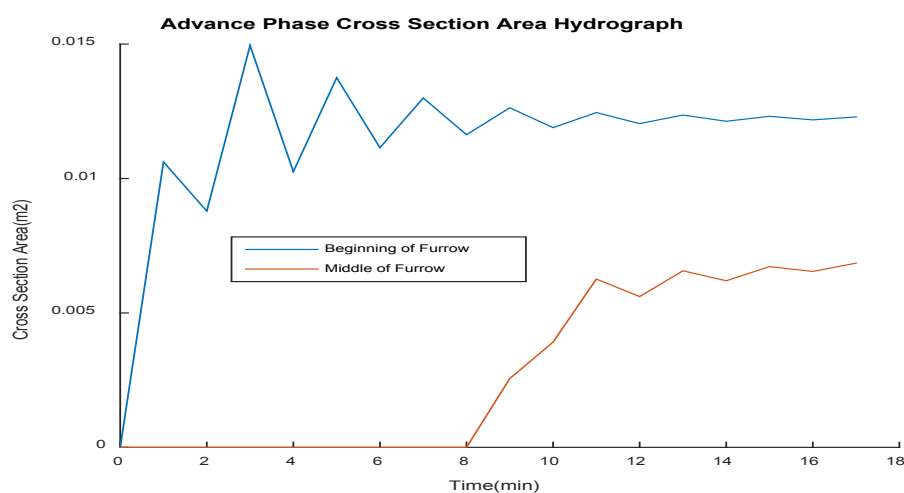
شکل ۹. آبنمود دبی بهینه در طراحی آبیاری جویچه‌ای در فاز پیشروی



شکل ۱۰. آبنمود عمق جریان در طراحی بهینه آبیاری جویچه‌ای در فاز پیشروی



شکل ۱۱. آبنمود عمق نفوذ در طراحی بهینه آبیاری جویچه‌ای در فاز پیشروی



شکل ۱۲. آبنمود سطح مقطع جریان بهینه در فاز پیشروی

جدول ۴. شاخص‌های عملکرد SIRMOD به‌ازای دبی‌های متفاوت

Q	Ea	Er	Ei	DU	DE	TWR	DPR
۱/۴	۴۹/۴۷	۹۹/۶۷	۵۴/۹۷	۹۶/۶۵	۵۰/۵۹	۲/۲۰	۴۸/۳۳
۱/۵	۵۷/۱۰	۹۹/۶۷	۶۳/۴۵	۹۳/۳۴	۶۰/۰۵	۴/۹۲	۳۷/۹۸
۱/۶	۶۰/۱۱	۹۹/۶۷	۶۶/۷۸	۹۲/۹۸	۶۵/۴۱	۸/۱۱	۳۱/۷۹
۱/۷	۶۲/۰۱	۹۹/۶۷	۶۸/۹۰	۹۲/۱۰	۶۹/۸۷	۱۱/۲۵	۲۶/۷۴
۱/۸	۶۲/۱۵	۹۹/۶۷	۶۹/۰۶	۹۳/۳۶	۷۲/۶۹	۱۴/۵۰	۲۳/۳۵
۱/۹	۶۱/۳۸	۹۹/۶۷	۶۸/۲۱	۹۳/۵۵	۷۴/۵۴	۱۷/۶۴	۲۰/۹۷

نتیجه‌گیری نهایی

در این پژوهش، مدل EDOSIM-HD به منظور بهبود نتایج طراحی مدل EDOSIM در فاز پیشروی آبیاری جویچه‌ای با استفاده از مدل هیدرودینامیک ارائه شد؛ لذا فاز پیشروی واقعه آبیاری حل عددی شد و دبی، سطح مقطع، عمق و سرعت جریان در هر مکان و هر زمان مشخص گردید که منجر به ترسیم نیمرخ‌های مدنظر در هر زمان و آنمودهای مدنظر در هر مکان گردید.

نتایج، هدررفت عمقی حدود ۵۰ درصدی آب در شبیه‌سازی اولیه با دبی ورودی ۱/۴ لیتر در ثانیه، با بررسی زمان‌های مهم آبیاری، حجم نفوذ، شاخص‌های عملکرد، نیمرخ‌ها و آنمودها را نشان داد. همچنین نتایج مدل EDOSIM-HD نسبت به مدل EDOSIM نزدیکی بیشتری به مدل هیدرودینامیک نرم‌افزار SIRMOLD داشت. بهینه‌سازی منجر به افزایش دبی بهینه (۱/۸ لیتر بر ثانیه) نسبت به دبی اولیه شد. در نتیجه کاهش زمان‌های پیشروی، قطع جریان، تخلیه و

پسروی و عدم تغییر زمان مورد نیاز نفوذ صورت گرفت. اعمال دبی بیشتر در زمان کمتر نیز باعث کاهش حجم نفوذ شد. شاخص‌های عملکرد به وضع بهینه خود نزدیک‌تر شدند؛ به جز TWR که افزایش اندک آن (به خاطر دبی بیشتر)، نسبت به افزایش Ea و کاهش شدید DPR قابل چشم‌پوشی بود.

پژوهشگران این پژوهش در حال توسعه مدل هیدرودینامیک کامل در سایر فازهای آبیاری در کنار افزودن متغیرهای تصمیم دیگر مانند طول مزرعه و توسعه روش ارائه‌شده برای طراحی آبیاری کرتی و نواری و ارزیابی هر سه روش آبیاری هستند. همچنین مدل‌سازی توأم جریان سطحی و زیرسطحی در تمام فازهای آبیاری، افزودن اهداف دیگر مانند اقتصادی، گیاهی و زیست‌محیطی، بررسی تحلیل حساسیت نتایج به تغییرات پارامترهای کلیدی (مانند ضرایب نفوذ یا زبری مانینگ)، بررسی اثر تغییرات مکانی خاک، تبخیر و ناهمواری سطح زمین، اعتبارسنجی مدل با سری داده‌های مزرعه‌ای بیشتر به منظور افزایش تعمیم‌پذیری مدل و تأثیر کیفیت آب آبیاری بر نفوذ یا تلفات عمقی و رواناب پیشنهاد می‌شود.

References

منابع مورد استفاده

- 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.
- Akbari, M. 2020. Development of Hydraulic-Economic Simulation-Optimization Model for the Design of Basin Irrigation. *Journal of Water and Soil Science* 24(4): 313-326 (in Farsi).
- Akbari, M. and S. Farahani. 2025. Enhancement of Border Irrigation Systems: Leveraging Simulation-Optimization Techniques. *Agricultural Water Management* 321: 109891.
- 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.
- 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.
- Bautista, E., A.J. Clemmens, T.S. Strelkoff and M. Niblack. 2009. Analysis of surface irrigation systems with WinSRFR—Example application. *Agricultural Water Management* 96(7): 1162-1169.
- Chavez, C. and C. Fuentes. 2019. Design and evaluation of surface irrigation systems applying an analytical formula in the irrigation district 085, La Begoña, Mexico. *Agricultural Water Management* 221: 279-285.
- Golestani Kermani, S., S. Sayari, O. Kisi and M. Zounemat-Kermani. 2019. Comparing data driven models versus numerical models in simulation of waterfront advance in furrow irrigation. *Irrigation Science* 37(5): 547-560.
- Lighthill, M.J. and G.B. Whitham. 1955. On kinematic waves I. Flood movement in long rivers. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences* 229(1178): 281-316.
- McClymont, D. 2007. Development of a decision support system for furrow and border irrigation (Doctoral dissertation, PhD Thesis, University of Southern Queensland, Toowoomba, Australia).
- Pazouki, E., 2021. A practical surface irrigation design based on fuzzy logic and meta-heuristic algorithms. *Agricultural Water Management* 256: 107069.

12. Shayannejad, M. 2016. Computational Methods in Modeling of Water Engineering Using MATLAB. Isfahan University of Technology Publications, Esfahan (in Farsi).
13. 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: 1103-1113.
14. Soroush, F., J.D. Fenton, B. Mostafazadeh-Fard, S.F. Mousavi and F. Abbasi. 2013. Simulation of furrow irrigation using the Slow-change/slow-flow equation. *Agricultural Water Management* 116: 160-174.
15. Strelkoff, T. and N.D. Katopodes. 1977. Border-irrigation hydraulics with zero inertia. *Journal of the Irrigation and Drainage Division* 103(3): 325-342.
16. 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.
17. Wilke, O.C. 1968. A hydrodynamic study of flow in irrigation furrows. Texas A&M University, Texas.
18. Zhang, S., D. Xu and Y. Li. 2011. A one-dimensional complete hydrodynamic model of border irrigation based on a hybrid numerical method. *Irrigation Science* 29(2): 93-102.