

## تعیین ضرایب معادله فیلیپ و ضریب زبری بهینه با استفاده از شبیه‌سازی فاز پیشروی در آبیاری نواری با مدل هیدرودینامیک

همایون ابراهیمی گلبوسی، الهام فاضل نجف‌آبادی و محمد شایان‌نژاد\*

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۲۵؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۲/۳۰)

### چکیده

آبیاری سطحی یکی از رایج‌ترین روش‌های آبیاری است، اما به دلیل بهره‌وری کم، تلفات آب در این سیستم چشمگیر است. برای طراحی دقیق و مناسب آبیاری سطحی اطلاع از خصوصیات و ضرایب نفوذ آب در خاک ضروری است. یکی از معادلات استفاده‌شده در این زمینه، معادله نفوذ فیلیپ است. در این مطالعه ضرایب نفوذ معادله فیلیپ و همچنین ضریب زبری مانینگ در آبیاری نواری بر اساس مقایسه منحنی پیشروی واقعی با منحنی پیشروی محاسبه‌شده با مدل هیدرودینامیک به‌صورت بهینه تعیین و نتایج آن با روش استوانه مضاعف و روش دونقطه‌ای ابراهیمیان و همکاران (۵) مقایسه شد. حجم نفوذ واقعی از تفاضل حجم ورودی و حجم خروجی به‌دست آمد. خطای روش یادشده در محاسبه حجم نفوذ ۵/۵۳ درصد بود. این درحالی است که خطا در روش استوانه مضاعف ۵۹/۶۲ درصد و خطا در روش دونقطه‌ای ابراهیمیان و همکاران (۵) ۱۹/۰۸ تعیین شد. در خاک‌های بافت سنگین هر چه طول نوار بیشتر شود، دقت روش در برآورد ضرایب فیلیپ بیشتر می‌شود، درحالی که در خاک‌های بافت سبک هر چه زمان پیشروی که علاوه بر طول تابعی از نفوذپذیری، دبی ورودی و شیب کف بستر است بیشتر شود، دقت روش در برآورد ضرایب نفوذ فیلیپ بیشتر می‌شود.

واژه‌های کلیدی: آبیاری نواری، بهینه‌سازی، ضریب مقاومت در مقابل جریان، فاز آبیاری، معادله فیلیپ، نفوذ

۱. گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران.

\*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: shayannejad@iut.ac.ir

## مقدمه

امروزه حدود سه چهارم از آب شیرین موجود در کره زمین، برای آبیاری در بخش کشاورزی مورداستفاده قرار می‌گیرد (۹). با وجود توسعه روش‌های آبیاری تحت فشار، همچنان آبیاری سطحی حدود ۷۰ درصد سطح را در کشور به خود اختصاص داده است. اگرچه به دلیل ضعف مدیریت و طراحی نامناسب، آبیاری سطحی در بسیاری از موارد بازده کمی دارد. اعمال مدیریت صحیح، اصلاح روش‌های آبیاری سطحی، تسطیح، تجهیز و نوسازی از جمله عواملی هستند که نقش بسزایی در هدررفت آب داشته و انتخاب صحیح آن‌ها باعث افزایش بهره‌وری آب می‌شود (۲۵). از آنجایی که پیش‌بینی دقیق مرحله پیشروی دارای اهمیت زیادی در طراحی و ارزیابی سیستم آبیاری سطحی است، به همین دلیل کارشناسان و پژوهشگران از مدل‌هایی برای توصیف حرکت آب در طول فاز پیشروی استفاده کرده که شامل مدل‌های ساده با دقت محدود و مدل‌هایی دقیق و سطح بالایی از پیچیدگی است (۲۴). در آبیاری به روش نواری، زمین در امتداد شیب به صورت نوارهای مستطیلی قطعه‌بندی می‌شود؛ هر نوار با یک پشته از نوار مجاور مجزا شده و آب توسط سیفون، دریچه یا شکاف وارد نوار شده و به کمک نیروی ثقل به جلو حرکت می‌کند تا خاک و گیاه به طور یکنواخت آبیاری شوند. وجه تشابه نوارها طولانی و باریک بودن آن‌ها است. زمین‌هایی با شیب طولی کمتر از ۵/۰ درصد، بهترین شیب برای این سیستم است. اگر در زمین گیاهانی غیر غلات کشت شده باشند، شیب‌هایی تا ۲ درصد هم قابل قبول است (۱۸).

در ارزیابی، طراحی و یا شبیه‌سازی یک سامانه آبیاری سطحی تعیین ضرایب معادله نفوذ از شروط اصلی بوده که با تخمین دقیق ضرایب معادله نفوذ، طراحی بهتر و مناسب‌تری انجام شده و در نتیجه می‌تواند موجب جلوگیری از هدررفت آب و بیشتر شدن بازده آبیاری شود (۱۲). روش

استوانه مضاعف به دلیل اینکه به‌طور موضعی و ایستا نفوذ را اندازه‌گیری می‌کند و شرایط حرکت آب در نوار در آن لحاظ نمی‌شود، دارای خطا است؛ زیرا همیشه بایستی روش اندازه‌گیری نفوذ مطابق با شرایط آبیاری باشد. علاوه بر این از معایب استفاده از این روش می‌توان به وقت‌گیر بودن اشاره کرد (۱۰). با توجه به معایب و مشکلاتی که عنوان شد، امروزه برای طراحی آبیاری سطحی از مدل‌های ریاضی استفاده می‌شود که روشی کم هزینه، دقیق و در دسترس خواهد بود. بعضی از این مدل‌ها مانند مدل توازن حجمی (۲)، ساده و بعضی دیگر دقیق و پیچیده و بر اساس معادلات سنت - ونانت استوار هستند. این معادلات شامل معادله پیوستگی و مومنت هستند. معادله پیوستگی در همه این مدل‌ها مورداستفاده قرار گرفته شده، اما معادله مومنتوم به صورت کامل یا بخشی از آن در معادلات ذکر شده است. تفاوت آن‌ها در فرم به کارگیری معامله مومنتوم است. اگر معادله مومنتوم به شکل کامل استفاده شود، به آن مدل هیدرودینامیک گویند (۱۹). حل معادلات این مدل به روش تفاضل‌های محدود و به صورت کاملاً ضمنی برای شبیه‌سازی مراحل مختلف جریان در آبیاری نواری استفاده می‌شود (۱). مدل هیدرودینامیک برای ارزیابی و واسنجی مدل‌های ساده‌تر استفاده می‌شود. پیچیدگی بیش از حد، نیاز به برنامه‌نویسی قوی و کامپیوتر با سرعت و حافظه بالا و زمان زیاد برای محاسبات از معایب مدل‌های هیدرودینامیک است (۱۴). سابقه پژوهش در زمینه ارزیابی مدل‌های عددی-هیدرولیکی در آبیاری سطحی تأییدکننده این موضوع است که مدل هیدرودینامیک کامل، مدل برتر در شبیه‌سازی مراحل مختلف جریان است (۶). این مدل دقیق‌ترین و قابل اطمینان‌ترین مدل برای شبیه‌سازی فازهای مختلف آبیاری سطحی است. نتایج پژوهش پژوهشگران بسیاری نشان می‌دهد که مدل فیلپ یکی از پرکاربردترین مدل‌های نفوذ آب برای توصیف ویژگی‌های زمانی نفوذ برای هر خاک خاص است. این

پرداختند. در این پژوهش از الگوی پرایزمن برای گسسته‌سازی معادلات استفاده شد، و نتایج مدل با مقایسه با نرم‌افزار SIRMOD و داده‌های مشاهده‌شده مورد ارزیابی قرار گرفت. به‌طور کلی توافق بسیار خوبی بین داده‌های شبیه‌سازی‌شده و مشاهده‌شده در طول کل شیار وجود داشت. دقت هر مدل بستگی به تعداد و دقت پارامترهای ورودی دارد. از مهم‌ترین این پارامترها که مربوط به ویژگی‌های خاک است، ضرایب معادله نفوذ و ضریب زبری خاک است. مطالعات کلمنز و همکاران (۳) نشان داد که در هر آبیاری ضریب زبری مانینگ یکی از پارامترهای مهم بوده و حتی شبیه‌سازی مراحل پیشروی و پسروی با ضریب زبری مانینگ یکسان باعث خطای قابل توجهی می‌شود. بهترین روش‌های تخمین پارامترهای نفوذ، استفاده از داده‌های پیشروی است که تأثیر شرایط دینامیکی نفوذ آب در خاک را نیز در نظر می‌گیرد. روش‌های دونقطه‌ای و بهینه‌سازی چند سطحی و روش پیشروی بنامی و افن (۱) از جمله این روش‌ها است که اساس این روش‌ها، معادله بیلان حجم است (۲۷).

در این پژوهش یک روش بهینه‌سازی چندسطحی برای تعیین ضرایب معادله نفوذ و ضریب زبری مانینگ ارائه شده است. این روش را می‌توان برای هر نوع معادله نفوذ استفاده کرد که در این پژوهش معادله فیلپ مورد استفاده قرار گرفته است. مبنای این روش مقایسه فاز پیشروی شبیه‌سازی‌شده با مدل هیدرودینامیک و اندازه‌گیری‌شده در مزرعه است.

### مواد و روش‌ها

در این پژوهش از معادله فیلپ (معادله ۱) استفاده شده که به صورت زیر است:

$$Z = St^{0.5} + At \quad (1)$$

در این رابطه  $Z$  حجم نفوذ در واحد طول ( $L^3L^{-1}$ )،  $S$  ضریب جذب آب ( $L^2T^{-0.5}$ ) و  $A$  ضریب انتقال ( $LT^{-1}$ ) هستند.

مدل به دلیل سهولت و سادگی در برآورد پارامترها و همچنین دارا بودن قابلیت بیان زمان به صورت تابع ضمنی از نفوذ تجمعی و بالعکس، انتخاب شده است (۱۵). فهد و همکاران (۸) با مقایسه چند مدل نفوذ نشان دادند که مدل‌های فیلپ و کوستیاکوف مطابقت بهتری با داده‌های تجربی دارند. حقیقی و همکاران (۱۱) سرعت نفوذ نهایی خاک را بر اساس معادله فیلپ و هورتون برای کاربری اراضی مرتع و کشت دیم در حوضه آبخیز طالقان به دست آوردند. این پژوهشگران به این نتیجه رسیدند که سرعت نفوذ نهایی در کشت مرتع بیشتر از کشت دیم برآورد شده است. جلینی (۱۳) در پژوهش خود نشان داد که با افزایش زمان پیشروی به بیش از ۲۸۵ دقیقه، مدل‌های تجربی تغییرات بیشتری را نسبت به مدل فیلپ نشان دادند؛ بنابراین مدل فیلپ مناسب‌ترین مدل برای مدت زمان طولانی است. رحیمی و کشکولی (۱۷) نشان دادند که مدل فیلپ در یک خاک لومی رسی و همگن کارایی بهتری در تخمین میزان نفوذ تجمعی و لحظه‌ای نسبت به سایر مدل‌های نفوذ به کار رفته دارا است. این در صورتی است که مهسواری و جاپاوردن (۱۶) مدل فیلپ را برای خاک‌های لایه‌ای و سنگریزه‌ای مناسب نمی‌دانند. آن‌ها عنوان کردند که فرضیات این مدل در چنین خاک‌هایی صادق ناست. ولی‌پور (۲۶) قابلیت مدل‌های هیدرودینامیک، اینرسی صفر و موج سینماتیک را در شبیه‌سازی آبیاری نواری مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که مدل‌های هیدرودینامیک کامل و اینرسی صفر در فرایند شبیه‌سازی نتایج بسیار خوبی را از خود نشان داده‌اند. با افزایش شیب تا ۰/۱ درصد، مدل‌های هیدرودینامیک کامل و اینرسی صفر باهم تفاوتی نداشته، اما برای شیب‌های بیشتر به دلیل حذف جمله شتاب در مدل اینرسی صفر، دقت این مدل کاهش پیدا می‌کند. شایان‌نژاد و همکاران (۲۲) با استفاده از حل عددی معادلات سنت-نونانت به محاسبه عمق جریان و حجم آب نفوذی

## روش‌های تخمین ضرایب معادله فیلیپ

### روش استوانه مضاعف

روش‌های مختلفی برای اندازه‌گیری نفوذ وجود دارد که یکی از ارزان‌ترین و ساده‌ترین آن‌ها، روش استوانه مضاعف است. برای محاسبه ضرایب نفوذ به روش استوانه مضاعف در مزارع مورد مطالعه، در ابتدا مقادیر نفوذ تجمعی آب در خاک تهیه، سپس معادله فیلیپ (معادله ۱) بر این داده‌ها برازش داده شده و بدین ترتیب  $S$  و  $A$  ضرایب معادله فیلیپ به دست آمد.

### روش دونقطه‌ای ابراهیمیان و همکاران (۵)

در این روش همانند روش یک نقطه‌ای شپارد و همکاران (۲۳) از معادله فیلیپ و بیان حجمی آب به منظور پیش‌بینی میزان نفوذ آب به داخل خاک در طول نوار استفاده می‌شود؛ با این تفاوت که به جای فرض  $r=0/5$  مقدار آن مانند روش الیوت و واکر (۷) با استفاده از دونقطه میانی و انتهایی داده‌های مرحله پیشروی تعیین می‌شود.

$$A = \frac{\left[ (Q_0 t_2 - \sigma_y A_0 x_2) x_1^{1+1/2r} - (Q_0 t_1 - \sigma_y A_0 x_1) x_2^{1+1/2r} \right] (1+r) p^{1/r}}{x_2^{1+1/r} x_1^{1+1/2r} - x_2^{1+1/2r} x_1^{1+1/r}} \quad (2)$$

$$S = \frac{2\Gamma(r+3/2) \left[ Q_0 t_2 - \sigma_y A_0 x_2 - \left( A x_2^{1+1/r} / \left( (1+r) p^{1/r} \right) \right) \right]}{\sqrt{\pi} \Gamma(r+1) x_2 (x_2/p)^{1/2r}} \quad (3)$$

که در روابط بالا  $\Gamma$  تابع گاما،  $\sigma_y$  ضریب شکل جریان سطحی،  $x_1$  نصف طول نوار،  $x_2$  طول نوار،  $t_1$  زمان لازم برای طی شدن آب تا وسط طول نوار و  $t_2$  زمان لازم برای طی شدن آب تا انتهای طول نوار،  $p$  و  $r$  به ترتیب ضریب و توان معرفی شده در روش دونقطه‌ای الیوت و واکر (۷) و  $Q_0$  دبی ورودی است.

### روش پیشنهاد شده در این پژوهش (روش بهینه‌سازی)

در این پژوهش با استفاده از جعبه‌ابزار بهینه‌سازی متلب علاوه

بر ضرایب معادله نفوذ فیلیپ، ضریب زبری مانینگ به گونه‌ای بهینه شد که تفاوت بین منحنی پیشروی محاسبه‌شده با مدل هیدرودینامیک و مشاهده‌شده کمینه شود (شکل ۱).  
روش کار در این بخش در دو مرحله زیر تشریح می‌شود:

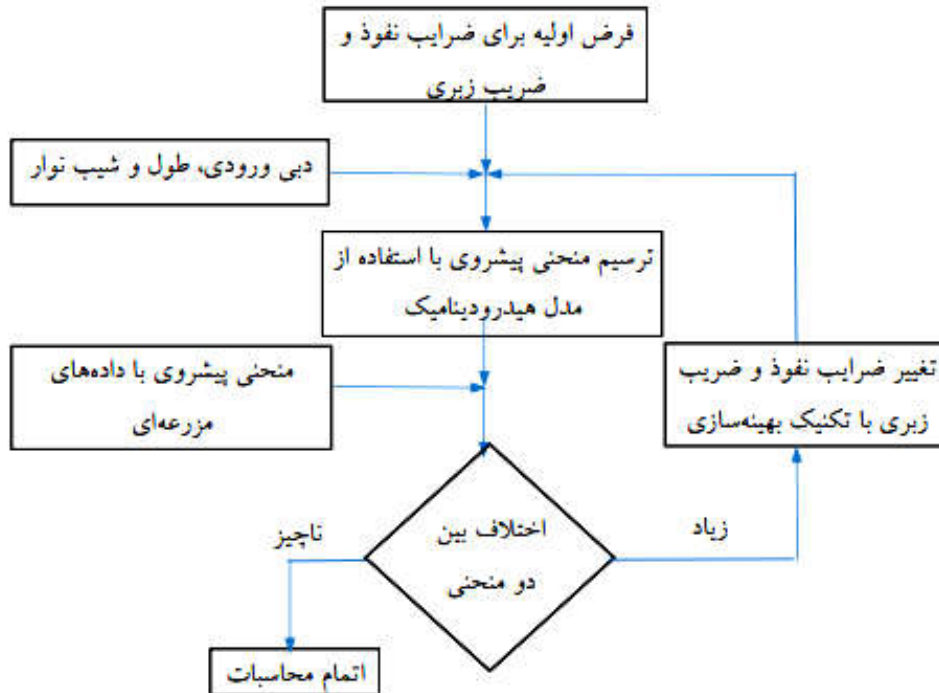
### حل عددی معادلات سنت - ونانت

در یک دسته‌بندی کلی، روش‌های حل معادلات جریان‌های غیردائمی به دو دسته هیدرولیکی و هیدرولوژیک تقسیم می‌شود. در روش‌های هیدرولیکی، معادلات یک‌بعدی پیوستگی و اندازه حرکت که همان معادلات سنت ونانت هستند، به طور هم‌زمان توسط روش‌های مختلف عددی حل شده و می‌توان دبی، عمق آب و سایر مشخصات جریان را به صورت تابعی از زمان و مکان تعیین کرد (۲۰). جریان در آبیاری سطحی غیرماندگار و غیریکنواخت است که باتوجه به نفوذ آب در خاک، دبی در طول نوار کاهش می‌یابد. برای شبیه‌سازی این جریان از معادلات پیوستگی و مومنتم استفاده می‌شود. این معادلات به شکل زیر است:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Z}{\partial t} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(Q^2/A)}{\partial x} + gA \frac{\partial y}{\partial x} + gA(S_f - S_0) = 0 \quad (5)$$

فرضیات استفاده شده در این معادلات عبارت‌اند از منشوری بودن سطح مقطع و شیب کم کف کانال. این معادلات یک جفت معادله غیرخطی دیفرانسیلی بوده که حل تحلیلی آن‌ها بدون فرضیات ساده‌کننده امکان‌پذیر نیست. به همین علت تاکنون حل تحلیلی کاملی از آن‌ها ارائه نشده است. در معادلات یادشده، معادله پیوستگی بر اساس قانون بقای جرم و معادله مومنتم، بر اساس قانون بقای اندازه حرکت استوار است (۲۴). در این پژوهش فاز پیشروی آبیاری نواری بر اساس حل عددی معادلات کامل سنت ونانت (مدل هیدرودینامیک) شبیه‌سازی شد که بدین منظور بایستی این معادلات منفصل گردند.



شکل ۱. روند نمایش روش پیشنهادی در این پژوهش برای به دست آوردن ضرایب معادله نفوذ فیلپ و ضریب زبری مانینگ در آبیاری نواری

$$S_f = \frac{n^2 Q^2}{A^2 R^{4/3}} = \frac{n^2 Q^2}{\rho_1 A^{\rho_2}} = K_3 Q^2 A^{-\rho_2} \quad (8)$$

$$k_1 = \frac{1}{\sigma_2} \left( \frac{1}{\sigma_1} \right)^{k_2+1} \quad k_2 = \frac{1}{\sigma_2} - 1 \quad k_3 = \frac{n^2}{\rho_1} \quad (9)$$

$\sigma_1$ ،  $\rho_2$ ،  $\rho_1$  و  $\sigma_2$  ضرایب مربوط به شکل هندسی جویچه یا نوار است.

با جایگزینی روابط (۷) و (۸) در رابطه معادله اندازه حرکت رابطه زیر حاصل می‌شود:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial \left( \frac{Q^2}{A} \right)}{\partial x} + k_4 A^{k_5} \frac{\partial A}{\partial x} + k_6 Q^2 A^{k_7} + k_8 A = 0 \quad (10)$$

$$k_4 = g k_1 \quad k_5 = k_2 + 1 \quad k_6 = g k_3.$$

$$k_7 = 1 - \rho_2 \quad k_8 = -g S_0$$

(۱۱)

#### الف) انفصال معادله پیوستگی

رابطه معادله پیوستگی با استفاده از شمای پرایزمن به صورت رابطه (۶) منفصل می‌شود:

$$\theta \frac{Q_{i+1}^{n+1} - Q_i^{n+1}}{\Delta x} + (1-\theta) \frac{Q_{i+1}^n - Q_i^n}{\Delta x} + \psi \frac{A_{i+1}^{n+1} - A_{i+1}^n}{\Delta t} + (1-\psi) \frac{A_i^{n+1} - A_i^n}{\Delta t} + \psi \frac{Z_{i+1}^{n+1} - Z_{i+1}^n}{\Delta t} + (1-\psi) \frac{Z_i^{n+1} - Z_i^n}{\Delta t} = 0 \quad (6)$$

رابطه (۶) برای هر بازه نوشته شد. در این رابطه دبی و سطح مقطع جریان در ابتدا و انتهای بازه (یعنی در نقاط  $i$  و  $i+1$ ) و در زمان  $N+1$  مجهول است.

#### ب) انفصال معادله اندازه حرکت

معادله اندازه حرکت بر حسب دبی و سطح مقطع جریان است؛ بنابراین باید  $S_f$  و  $y$  بر حسب سطح مقطع جریان به صورت زیر نوشته شود:

$$A = \sigma_1 y^{\sigma_2} \cdot \frac{\partial y}{\partial x} = K_1 A^{K_2} \frac{\partial A}{\partial x} \quad (7)$$

رابطه (۱۰) با استفاده از الگوی پرایزمن مفصل می‌شود:

$$\begin{aligned} & \psi \frac{Q_{i+1}^{n+1} - Q_{i+1}^n}{\Delta t} + (1-\psi) \frac{Q_i^{n+1} - Q_i^n}{\Delta t} + \theta \frac{\left(\frac{Q^2}{A^2}\right)_{i+1}^{n+1} - \left(\frac{Q^2}{A^2}\right)_i^{n+1}}{\Delta x} + (1-\theta) \frac{\left(\frac{Q^2}{A}\right)_{i+1}^n - \left(\frac{Q^2}{A}\right)_i^n}{\Delta x} + \\ & \left[ \frac{k_4 \theta}{2(A^{K_5})_{i+1}^{n+1}} + \frac{k_4 \theta}{2((A^{K_5})_i^{n+1})} + \frac{k_4(1-\theta)}{2(A^{K_5})_{i+1}^n} + \frac{k_4(1-\theta)}{2(A^{K_5})_i^n} \right] \cdot \left[ \theta \frac{A_{i+1}^{n+1} - A_i^{n+1}}{\Delta x} + (1-\theta) \frac{A_{i+1}^n - A_i^n}{\Delta x} \right] + \\ & \frac{k_6}{2} \left[ \theta \left(Q^2 A^{k_7}\right)_{i+1}^{n+1} + \theta \left(Q^2 A^{k_7}\right)_i^{n+1} + (1-\theta) \left(Q^2 A^{k_7}\right)_{i+1}^n + (1-\theta) \left(Q^2 A^{k_7}\right)_i^n \right] \\ & + \frac{k_8 \theta}{2A_{i+1}^{n+1}} + \frac{k_8 \theta}{2A_i^{n+1}} + \frac{k_8(1-\theta)}{2A_{i+1}^n} + \frac{k_8(1-\theta)}{2A_i^n} = 0 \end{aligned} \quad (12)$$

#### منطقه مورد مطالعه

در این پژوهش از داده‌های پانزده مزرعه واقع در منطقه شرق استان اصفهان با طول جغرافیایی  $51^{\circ}50'15''/8$  و عرض جغرافیایی  $32^{\circ}38'37''/8$  استفاده شده است. در هر مزرعه داده‌های پیشروی و پسروی برای نوارهای با انتهای بسته، با عرض  $0.75$  متر و به‌منظور محاسبه فرصت نفوذ برداشت شده و آزمایش نفوذ با استفاده از استوانه‌های مضاعف انجام شده است. همچنین شیب طولی کف نوارها برای استفاده در مدل هیدرودینامیک اندازه‌گیری شد و نوارها فاقد شیب عرضی بودند. دبی ورودی به هر نوار با کنتور حجمی اندازه‌گیری شد. بدین‌صورت که حجم آب اندازه‌گیری و با تقسیم آن بر زمان جمع‌آوری آب، دبی محاسبه شد. برای اندازه‌گیری فاز پیشروی، طول نوار به فواصل  $5$  متری میکروبی و زمان رسیدن به هر میخ ثبت شد. همچنین برای اندازه‌گیری فاز پسروی، زمانی که آب در مکان هر میخ از روی زمین محو شد، ثبت شد. حجم نفوذ واقعی از تفاضل حجم ورودی و حجم خروجی به‌دست آمد. مشخصات مزارع در جدول ۱ ارائه شده است (۴).

#### نتایج و بحث

همان‌گونه که عنوان شد، منحنی‌های پیشروی و پسروی برای پانزده مزرعه رسم شده و فرصت نفوذ در هر نقطه‌ای

رابطه (۱۲) را برای هر بازه می‌توان نوشت. در این رابطه دبی و سطح مقطع جریان در ابتدا و انتهای بازه یعنی در نقاط  $i$  و  $i+1$  و در زمان  $n+1$  مجهول است (۲۱).

#### روش بهینه‌سازی

هر مسئله بهینه‌سازی شامل چند قسمت بوده که در این پژوهش استفاده شده است: الف) متغیرهای تصمیم‌گیری شامل ضرایب معادله نفوذ و ضریب زبری مانینگ. ب) قیود که شامل محدودیت‌هایی است که برای متغیرهای تصمیم‌گیری اعمال می‌شود. در این پژوهش متغیرهای تصمیم‌گیری مثبت هستند. ج) تابع هدف که بایستی حداقل شود. این تابع شاخصی از اختلاف بین مقادیر فاز پیشروی محاسباتی و مشاهداتی است که می‌توان با RMSE به‌صورت زیر تعریف کرد:

$$RMSE = \frac{\sum_{i=1}^N (tm_i - tc_i)^2}{N} \quad (13)$$

که  $tm_i$  = زمان رسیدن آب به نقطه  $i$  که در مزرعه اندازه‌گیری شده است،  $tc_i$  = زمان رسیدن آب به نقطه  $i$  که با استفاده از مدل هیدرودینامیک محاسبه شده است و  $N$  = تعداد نقاط در مزرعه. از تقسیم RMSE بر میانگین مقادیر مشاهداتی زمان رسیدن آب به نقاط مختلف مزرعه NRMSE به‌دست می‌آید. د) مقادیر معلوم شامل دبی ورودی، ابعاد نوار و شیب کف.

جدول ۱. مشخصات پانزده مزرعه مورد بررسی

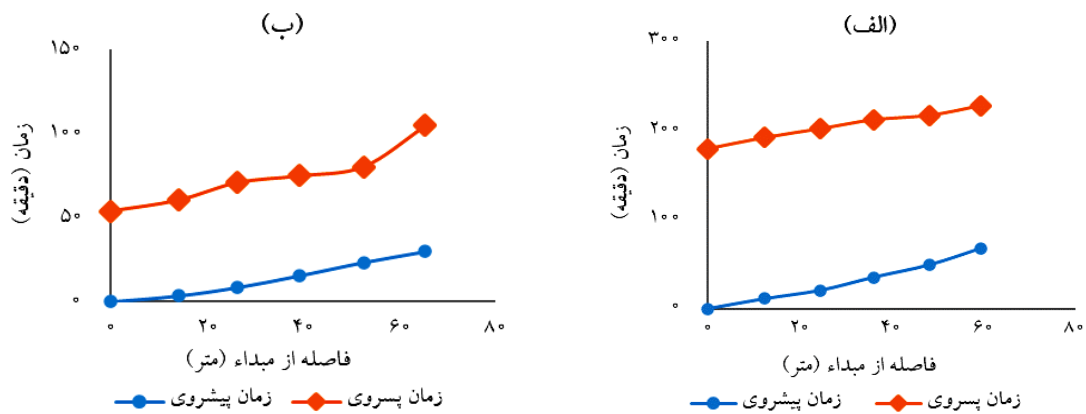
شماره مزرعه	نوع محصول	شیب زمین	طول نوار (m)	عرض نوار (m)	دبی ورودی (lit/s/m)	مدت آبیاری (min)	بافت خاک
۱	گندم	۰/۰۰۳	۶۰	۱۶/۰۰	۱/۴۴	۸۱	لوم رسی
۲	گندم	۰/۰۰۶	۵۵	۲/۳۰	۳/۴۸	۲۰	رس سیلتی
۳	گندم	۰/۰۰۵	۷۷	۳/۴۰	۳/۳۷	۲۹	لوم رسی
۴	گندم	۰/۰۰۳	۶۷	۷/۰۰	۲/۷۴	۵۰	رس سیلتی
۵	گندم	۰/۰۰۲	۶۷	۷/۰۰	۲/۸۶	۵۰	لوم سیلتی
۶	گندم	۰/۰۰۱	۲۷	۸/۵۰	۱/۸۸	۴۰	رس سیلتی
۷	گندم	۰/۰۰۱	۹۰	۸/۰۰	۲/۲۵	۶۵	لوم رس سیلتی
۸	جو	۰/۰۰۱	۳۵	۱۷/۰۰	۲/۶۵	۲۱	لوم رسی
۹	یونجه	۰/۰۰۲	۳۳	۱۲/۰۰	۳/۰۰	۲۰/۵	لوم
۱۰	شبدر	۰/۰۰۲	۲۲/۲	۹/۰۰	۱/۶۷	۲۷	لوم
۱۱	یونجه	۰/۰۰۴	۸۶	۱۱/۰۰	۲/۰۰	۱۰۳/۵	لوم سیلتی
۱۲	یونجه	۰/۰۰۵	۶۵	۵/۵۵	۴/۲۹	۳۰	رس سیلتی
۱۳	یونجه	۰/۰۰۴	۶۵	۴/۹۰	۳/۲۷	۴۵	رس سیلتی
۱۴	ذرت	۰/۰۰۱	۵۳	۱۰/۵۰	۳/۲۴	۲۰	لوم سیلتی
۱۵	ذرت	۰/۰۰۳	۲۷۵	۱۰/۵۰	۶/۴۸	۱۳۰	لوم سیلتی

از مزارع مختلف محاسبه شد. نمونه‌ای از این منحنی‌ها در شکل ۲ ارائه شده است. فرصت‌های نفوذ به‌دست‌آمده را در معادله فیلیپ قرار داده و عمق‌های نفوذ و در نهایت حجم نفوذ برای هر مزرعه محاسبه شد. این کار بر اساس همه روش‌های مورد استفاده برای تعیین ضرایب معادله فیلیپ انجام شد. همچنین حجم نفوذ واقعی از تفاضل حجم ورودی و حجم خروجی به‌دست آمد.

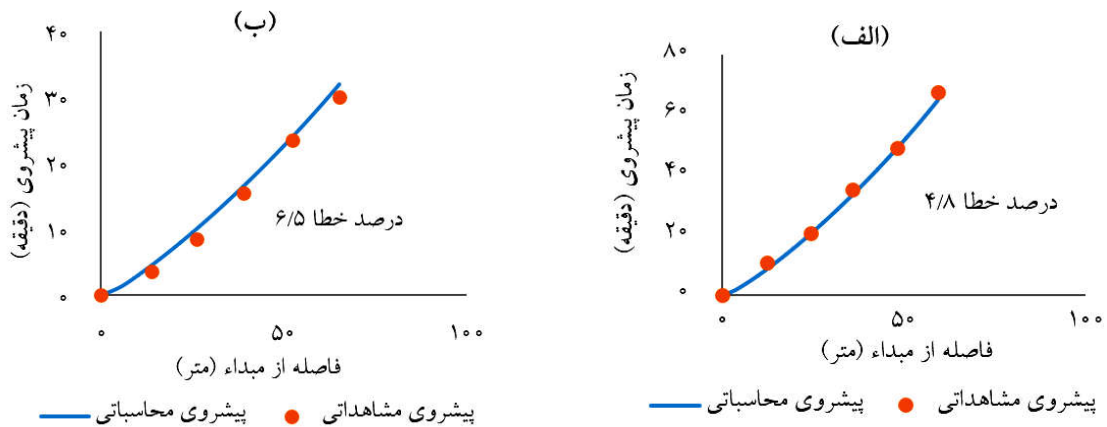
دقت مدل هیدرودینامیک در شبیه‌سازی فاز پیشروی بررسی شد که در شکل ۳ دو نمونه از آن ارائه شده است.

متوسط خطای این مدل در ترسیم منحنی پیشروی ۸/۰۵ درصد است.

در ادامه ضرایب معادله نفوذ فیلیپ به سه روش استوانه مضاعف، بهینه‌سازی و روش دونقطه‌ای ابراهیمیان و همکاران (۵) ارائه شده است. همچنین در روش بهینه‌سازی علاوه بر ضرایب نفوذ معادله فیلیپ، ضریب زبری مانینگ بهینه نیز محاسبه شد. مقادیر محاسبه‌شده در جدول ۲ ارائه شده‌اند.



شکل ۲. منحنی پیشروی و پسروی الف) مزرعه شماره ۱، ب) مزرعه شماره ۱۲



شکل ۳. درصد خطای منحنی پیشروی ترسیم شده با مدل هیدرودینامیک: الف) مزرعه شماره ۱، ب) مزرعه شماره ۱۲

جدول ۲. نتایج ضرایب نفوذ فیلیپ از روش بهینه‌سازی شده، روش دونقطه‌ای ابراهیمیان و همکاران (۵) و روش استوانه مضاعف

روش استوانه مضاعف		روش دونقطه‌ای ابراهیمیان و همکاران (۵)		روش بهینه‌سازی			مزرعه
S	A	S	A	n	S	A	
۰/۰۰۱۰۹۷	۰/۰۰۰۳۲	۰/۰۰۲۲۸	۰/۰۰۵۳۴	۰/۶۱۲	۰/۰۰۱۴۱	۰/۰۰۰۶۸	۱
۰/۰۰۲۰۷۸	۰/۰۰۰۳۲	۰/۰۰۶۲۱	۰/۰۰۱۵۵	۰/۱۳۲	۰/۰۰۰۶۰۲	۰/۰۰۰۱۶۳	۲
۰/۰۰۴۷۲۹	۰/۰۰۱۲۲۶	۰/۰۰۵۶۳۴	۰/۰۰۰۷۵۲	۰/۲۳۶	۰/۰۰۰۳۴۲	۰/۰۰۰۱۰۳	۳
۰/۰۰۸۷۷۸	۰/۰۰۰۶۶	۰/۰۰۹۲۸۷	۰/۰۰۰۳۰۶	۰/۴۹۶	۰/۰۰۵۹۶۴	۰/۰۰۰۰۸۶	۴
۰/۰۰۵۴۰۴	۰/۰۰۰۳۳	۰/۰۰۳۱۷۲	۰/۰۰۰۰۵۲	۰/۶۴۲	۰/۰۰۰۲۸۳۷	۰/۰۰۰۰۸۷	۵
۰/۰۰۴۳۵۲	۰/۰۰۰۳۲	۰/۰۰۵۹۲	-۰/۰۱۳۴	۰/۵۹۸	۰/۰۰۵۸۲۱	۰/۰۰۰۰۴۹	۶
۰/۰۰۵۵۵	۰/۰۰۰۹۰۸	۰/۰۰۰۴۶۹۲	۰/۰۰۱۱۲۱	۰/۲۱۹	۰/۰۰۰۲۵۶۴	۰/۰۰۰۰۷۳	۷
۰/۰۰۱۰۹۷	۰/۰۰۰۳۲	۰/۰۱۴۷	-۰/۰۰۵۹	۰/۴۳۵	۰/۰۰۰۲۳۶۵	۰/۰۰۰۰۶۲	۸



جدول ۲. نتایج ضرایب نفوذ فیلیپ از روش بهینه‌سازی شده، روش دونقطه‌ای ابراهیمیان و همکاران (۵) و روش استوانه مضاعف (ادامه)

روش استوانه مضاعف		روش دونقطه‌ای ابراهیمیان و همکاران (۵)		روش بهینه‌سازی			مزرعه
S	A	S	A	n	S	A	
۰/۰۰۵۱۹۱	۰/۰۰۰۳۲	-۰/۰۳۵۳	۰/۰۱۰۳	۰/۵۵۳	۰/۰۰۶۹۵۴	۰/۰۰۱۵۸	۹
۰/۰۰۰۶۳	۰/۰۰۰۰۹۶	-۰/۰۱۴۷	۰/۰۰۰۵۷	۰/۶۶۴	۰/۰۰۷۸۶۹	۰/۰۰۱۵۴	۱۰
۰/۰۰۰۵۳۲۱	۰/۰۰۰۰۸۸۹	۰/۰۰۰۱۷۹	۰/۰۰۰۰۹۳	۰/۷۹۶	۰/۰۰۲۲۱۳	۰/۰۰۰۰۶۹	۱۱
۰/۰۰۰۹۵۹۳	۰/۰۰۰۰۶۱۶	۰/۰۰۰۸۷	۰/۰۰۰۰۲۷۸	۰/۳۰۲	۰/۰۰۰۵۴۸۶	۰/۰۰۰۰۹۷	۱۲
۰/۰۰۰۹۶	۰/۰۰۰۰۶۱۵	۰/۰۰۰۶۰۵۶	۰/۰۰۰۱۱۶۳	۰/۷۴۸	۰/۰۰۰۶۵۸۷	۰/۰۰۰۱۴۲	۱۳
۰/۰۰۰۱۰۹۷	۰/۰۰۰۰۳۲	-۰/۰۱۴۹	۰/۰۰۰۳۸	۰/۱۴۳	۰/۰۰۰۱۰۹۷	۰/۰۰۰۰۳۲	۱۴
۰/۰۱۴۹	۰/۰۰۰۰۳۲	۰/۰۱۳	-۰/۰۰۰۰۳۹	۰/۲۲۸	۰/۰۰۰۲۸۶۵	۰/۰۰۰۰۸۸	۱۵

به‌دست‌آمده حاکی از آن است که اختلاف حجم نفوذ واقعی و حجم نفوذ بهینه‌سازی شده نسبت به روش دونقطه‌ای ابراهیمیان و همکاران (۵) و روش استوانه مضاعف بسیار ناچیز است. گفتنی است که در روش دو نقطه‌ای ابراهیمیان و همکاران (۵)، در برخی از مزرعه‌ها ضرایب معادلات نفوذ فیلیپ (S و A) به‌صورت منفی به‌دست‌آمده که این امر منجر به پدید آمدن اختلاف زیادی بین حجم محاسباتی با حجم واقعی شده که می‌توان به‌عنوان یکی از معایب این روش نام برد.

جدول ۴ شاخص‌های آماری RMSE و NRMSE را برای بررسی و ارزیابی دقت روش‌ها در محاسبه حجم نفوذ نشان می‌دهد.

همان‌گونه که در جدول نشان داده شده است، میزان خطا در روش بهینه‌سازی شده برابر با ۵/۵۳ درصد، در روش دونقطه‌ای ابراهیمیان و همکاران (۵) برابر ۱۹/۰۸ درصد و در روش استوانه مضاعف برابر با ۵۹/۶۲ درصد است. طبق نتایج به‌دست‌آمده روش بهینه‌سازی شده، حجم نفوذ را نزدیک به حجم نفوذ واقعی برآورد کرده است؛ در نتیجه ضرایب نفوذ به‌دست‌آمده از این روش قابل قبول و قابل اطمینان‌تر است. در خاک‌های بافت سبک که شامل مزارع ۱، ۵، ۷، ۹، ۱۰، ۱۱، ۱۴ و ۱۵ می‌شود،

به‌منظور مشخص شدن هر یک از روش‌ها در تخمین ضرایب نفوذ از مقایسه حجم آب نفوذ یافته محاسباتی و واقعی و همچنین از شاخص‌های RMSE، NRMSE و  $R^2$  استفاده شد. در محاسبه حجم آب نفوذ یافته درصد خطا برای سه روش نامبرده در جدول ۳ ارائه شده است.

همان‌گونه که دیده می‌شود، حجم نفوذ به روش پیشنهادی در بیشتر مزارع دارای اختلاف بسیار ناچیز با حجم واقعی است. در روش بهینه‌سازی شده مزرعه شماره پانزده با ۰/۴ درصد دارای کمترین خطا و مزرعه شماره نه با ۲۴/۵۸ درصد دارای بیشترین خطا است. در کل میانگین درصد خطا در تمامی مزارع برای روش پیشنهادی برابر با ۸/۷۵ درصد بوده که نتیجه قابل قبولی است. در روش دونقطه‌ای ابراهیمیان و همکاران (۵)، مزرعه شماره سه با ۳/۲۶ درصد دارای کمترین خطا و مزرعه شماره پنج با ۲۷/۲ درصد دارای بیشترین خطا است. میانگین درصد خطا در این روش برابر ۱۴/۱۳ است. همچنین در روش استوانه مضاعف مزرعه شماره چهار با ۱۰/۷۱ درصد دارای کمترین خطا و مزرعه دو با ۷۱/۹۶ درصد دارای بیشترین خطا است و میانگین درصد خطا در این روش برابر ۳۶/۸۸ است. نتایج

جدول ۳. درصد خطای حجم نفوذ برای سه روش بهینه‌سازی، استوانه مضاعف و دونقطه‌ای ابراهیمیان و همکاران (۵)

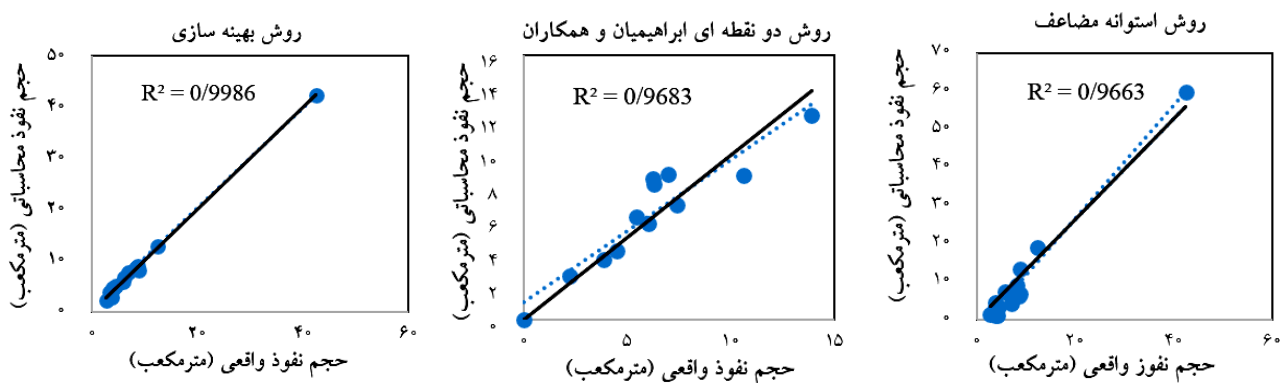
مزرعه	درصد خطا روش استوانه مضاعف	درصد خطا روش بهینه‌سازی	درصد خطا روش دونقطه‌ای ابراهیمیان و همکاران (۵)
۱	۳۹/۳۱	۹/۴۹	۶/۳۹
۲	۷۱/۹۶	۹/۴۳	۷/۶
۳	۲۶/۴۶۶	۱/۰۸	۳/۲۶
۴	۱۰/۷۱	۳/۸۵	۲۳/۴
۵	۲۵/۳۳	۱/۲	۲۷/۲
۶	۲۳/۸۴	۹/۳۲	—
۷	۵۱/۵۷	۲/۳	۲۱/۳۴
۸	۴۲/۴۳	۱۴/۶	—
۹	۶۶/۶۶	۲۴/۵۸	۴/۷۳
۱۰	۴۴/۸۲	۲۱/۸۷	۱۶/۴۹
۱۱	۵۳/۰۶	۲/۰۱	۱۲/۱
۱۲	۱۶/۲۸	۵/۲۱	۱۲/۲۹
۱۳	۲۳/۴۳	۷/۴۷	۲۰/۶۳
۱۴	۱۸/۶۴	۱۸/۵۱	—
۱۵	۴۰/۸۱	۰/۴	—

جدول ۴. مقادیر RMSE و NRMSE از روش بهینه‌سازی، روش استوانه مضاعف و روش دونقطه‌ای ابراهیمیان و همکاران (۵)

روش بهینه‌سازی	روش استوانه مضاعف	روش دونقطه‌ای ابراهیمیان و همکاران (۵)
RMSE (مترمکعب)	۵/۱۹۳	۱/۳۲۶
NRMSE (درصد)	۵/۵۳	۱۹/۰۸

با افزایش زمان پیشروی دقت روش در برآورد ضرایب فیلپ بیشتر شده است. زمان پیشروی علاوه بر طول تابعی از نفوذپذیری، دبی ورودی و شیب کف بوده است؛ بنابراین در خاک‌های با بافت سبک‌تر دقت روش تابعی از این خصوصیات است. در خاک‌های بافت سنگین که شامل مزارع ۲، ۳، ۴، ۶، ۸، ۱۲ و ۱۳ می‌شود، با افزایش طول نوار، دقت روش در برآورد

ضرایب فیلپ افزایش یافته است. در شکل ۴ میانگین همبستگی بین حجم نفوذ واقعی و سه روش محاسباتی نشان داده شده است. مقایسه بین سه روش در تمامی مزارع نشان می‌دهد که میانگین همبستگی بین حجم نفوذ به روش بهینه‌سازی شده با حجم نفوذ واقعی بیشتر است. ضریب همبستگی برای روش



شکل ۴. ضریب تعیین  $R^2$  در محاسبه حجم نفوذ به روش الف) استوانه مضاعف، ب) دونقطه‌ای ابراهیمیان و همکاران (۵)، ج) بهینه‌سازی

تفاضل حجم ورودی و حجم خروجی به‌دست آمد. میزان NRMSE در روش بهینه‌سازی شده در محاسبه حجم نفوذ ۵/۵۳ درصد بود. این در حالی است که NRMSE در روش دو نقطه‌ای ابراهیمیان و همکاران (۵)، ۱۹/۰۸ درصد و در روش استوانه مضاعف ۵۹/۶۲ درصد تعیین شد. طبق نتایج به‌دست‌آمده، روش بهینه‌سازی شده در تخمین حجم نفوذ در پانزده نوار، به‌طور میانگین، عملکرد بهتری داشته و از دقت بیشتری برخوردار است. تفاوت مدل پیشنهادی نسبت به سایر روش‌ها این است که بیشتر روش‌های تعیین ضرایب معادلات نفوذ بر پایه بیلان حجمی بوده و به‌ترتیب با استفاده از دو و یک نقطه پیشروی در مزرعه ضریب نفوذ را تخمین می‌زنند؛ حال آنکه در این پژوهش می‌توان با شبیه‌سازی فاز پیشروی، کل نقاط مزرعه را در تعیین ضرایب نفوذ دخیل کرد. نشان داد که در خاک‌های بافت سنگین هر چه طول نوار بیشتر شود، دقت روش در برآورد ضرایب فیلیپ بیشتر می‌شود. این در حالی است که در خاک‌های بافت سبک هر چه زمان پیشروی بیشتر شود، دقت روش در برآورد ضرایب فیلیپ بیشتر می‌شود.

بهینه‌سازی شده برابر با  $R^2=0/9973$ ، برای روش دونقطه‌ای ابراهیمیان و همکاران (۵) برابر با  $R^2=0/8431$ ، و برای روش استوانه مضاعف برابر با  $R^2=0/95$  است؛ بنابراین روش بهینه‌سازی شده در تخمین حجم نفوذ در پانزده مزرعه عملکرد بهتری داشته و از دقت بیشتری برخوردار است.

## نتیجه‌گیری

در این پژوهش، یک مدل پیشنهادی برای بهینه‌سازی پارامترهای معادله نفوذ فیلیپ و ضریب زبری مانینگ در آبیاری نواری با استفاده از شبیه‌سازی فاز پیشروی با مدل هیدرودینامیک معرفی شد. از روش استوانه مضاعف برای تخمین پارامترهای معادلات نفوذ و ارزیابی و مقایسه این روش با روش پیشنهادی و دو نقطه‌ای ابراهیمیان و همکاران (۵) و تعیین دقت هر یک از آنها با ارزیابی نتایج ضرایب معادله نفوذ از طریق مقایسه حجم آب نفوذ یافته محاسباتی و اندازه‌گیری شده انجام شد. پس از تعیین ضرایب در ۱۵ نوار کشت‌شده از سه روش بهینه‌سازی شده، دو نقطه‌ای ابراهیمیان و همکاران (۵) و استوانه مضاعف، حجم نفوذ با قراردادن فرصت نفوذ در معادله نفوذ محاسبه و برای تأیید روش با حجم نفوذ واقعی مقایسه شد. حجم نفوذ واقعی از

## منابع مورد استفاده

1. Benami, A. and A., Ofen. 1983. Irrigation engineering. Sprinkler, trickle, surface irrigation principles and agricultural practices. Irrigation Engineering Scientific Publications, Haifa.
2. Benham, B., D. Reddell and T. Marek. 2000. Performance of three infiltration models under surge irrigation. *Irrigation Science* 20: 37-43
3. Clemmens, A. J., D. Eisenhauer and B. Maheshwari. 2001. Infiltration and roughness equations for surface irrigation: How form influences estimation. ASAE Annu Meet, July 28-Aug 1, Sacramento, California, USA.
4. Ebrahimi Golboui, H. 2023. Determination of Philip equation coefficients and optimal roughness coefficient coefficient using the progressive phase simulation for strip irrigation using dynamic wave model. Master thesis, Isfahan University of Technology, Isfahan, I.R. Iran.
5. Ebrahimian Taleshi H., A. Liaghat, B. Ghanbarian Alavijeh and F. Abbasi. 2010. Evaluation of various quick methods for estimating furrow and border infiltration parameters. *Irrigation Science* 28(6): 479-488.
6. Ebrahimian, H. and A. Liaghat. 2011. Field evaluation of various mathematical models for furrow and border irrigation systems. *Soil Water Research* 6: 91-101.
7. Elliott, R. L. and W. R. Walker. 1982. Field evaluation of furrow infiltration and advance functions. *Transactions of the ASAE* 25(2): 396-0400.
8. Fahad, A., L. Mielke, A. Flowerday and D. Swartzendruber. 1982. Soil physical properties as affected by soybean and other cropping sequences. *Soil Science Society of America Journal* 46(2): 377-381.
9. García-Garizábal, I., J. Causapé and R. Abrahao. 2011. Application of the irrigation land environmental evaluation tool for flood irrigation management and evaluation of water use. *Catena* 87: 260-267.
10. Ghahremannejad, M., S. Boroomandnasab, M. Behzad, A. Naseri and A. Sheini Dashtgol. 2015. Evaluating the Accuracy of Revised USDA-NRCS Method in Estimating Infiltration Parameters in Amir Kabir Agro Industrial Fields' Furrow Irrigation Systems. *Journal of Water and Soil Science* 18 (70): 69-79 (in Farsi).
11. Haghghi, F., M. Gorji and M. Shorafa. 2010. A study of the effects of land use changes on soil physical properties and organic matter. *Land Degradation and Development* 21: 496-502.
12. Holzappel, E. A., J. Jara, C. Zuniga, M. A. Marino, J. Paredes and M. Billib. 2004. Infiltration parameters for furrow irrigation. *Agricultural Water Management* 68: 19-32.
13. Jelini, M. 1996. Evaluation and determination of different infiltration models in Karkach soils. Master thesis, Faculty of Agriculture. University of Tabriz, Tabriz. I. R. Iran. 99 p.
14. Kamali, P. and H. Ebrahimian. 2017. Comparison and evaluation of different methods for inverse estimation of the infiltration equation parameters in vegetated furrows. *Iranian Journal of Soil and Water Research* 48(1): 39-48. doi: 10.22059/ijswr.2017.61339 (in Farsi).
15. Machiwal, D., M. K. Jha and B. Mal. 2006. Modelling infiltration and quantifying spatial soil variability in a wasteland of Kharagpur, India. *Biosystems Engineering* 95: 569-582.
16. Maheshwari, B. and N., Jayawardane. 1992. Infiltration characteristics of some clayey soils measured during border irrigation. *Agricultural Water Management* 21: 265-279.
17. Rahimi, A. and H. A. Kashkouli. 2006. Evaluation and determination of different infiltration models in lands of Faculty of Agriculture, Islamic Azad University of Sanandaj. First National Conference on Irrigation and Drainage Networks. University of Chamran, Ahvaz (in Farsi).
18. Rahimi, A. and V. Rezaei. 2017. Principles and operations of public irrigation. Iran Agricultural Science. Tehran.
19. Rezaverdinejad, V., R. Jonoobi, S. Besharat and F. Abbasi. 2015. Investigation and analysis of flow and geometric variables on optimal performance of border irrigation using WinSRFR model. *Iranian Journal of Soil and Water Research* 46(4): 695-706 (in Farsi).
20. Safavi, H. 2015. Hydrology Engineering. Isfahan University of Technology, Iran.
21. Shayannejad, M. 2017. Computational Methods in Water Engineering Modeling by Using MATLAB Software. Jahade Daneshgahi of Isfahan University of Technology, Isfahan.
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: 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. 1997. Surface irrigation advance equation: Variation of subsurface shape factor. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 123(4): 300-306.
25. Valiantzas, J. D. 2000. Surface water storage independent equation for predicting furrow irrigation advance. *Irrigation Science* 19: 115-123.

26. Valipour, M. 2012. Comparison of surface irrigation simulation models: full hydrodynamic, zero inertia, kinematic wave. *Journal of Agricultural Science* 4(12): 68.
27. Zarakani, K., H. Ramezani Etedali and P. Daneshkar Arasteh. 2020. Estimation of infiltration parameters and Manning roughness coefficient under continuous and cutback flows. *Journal of Water and Soil Resources Conservation* 9(2): 89-100.

## Determining the Coefficients of Philip's Equation and the Optimal Roughness Coefficient Using the Simulation of the Advancing Phase in Border Irrigation with the Dynamic Wave Model

H. Ebrahimi Golbosi, E. Fazel Najafabadi\* and M. Shayannejad<sup>1</sup>

(Received: February 14-2024 ; Accepted: May 19-2024)

### Abstract

Surface irrigation is one of the most common irrigation methods. Due to the low efficiency of surface irrigation, water loss is significant in this system. It is necessary to know the characteristics and coefficients of water infiltration rate in the soil for accurate and adequate planning of surface irrigation. One of the equations used in this field is Phillip's infiltration equation. In this study, the infiltration coefficients of Phillip's equation and Manning's roughness coefficient in border irrigation are determined based on the comparison of the actual advance curve with the advance curve calculated with the dynamic wave model, and the results were compared with the double cylinder method and the two-point method of Ebrahimi et al. (5). The actual infiltration volume was obtained from the difference between the inlet and outlet volumes. The error of the mentioned method in calculating the infiltration volume was 5.53%. Meanwhile, the errors in the double cylinder and two-point Ebrahimi (5) method were 59.62% and 19.08%, respectively. In heavy soils, the longer the length of the border increases, the method is more accurate in estimating Philip's coefficients, while in light soils, the advancing time, which in addition to length is a function of permeability, input discharge, and the slope of the bottom of the bed is increased, the accuracy of the method in estimating Philip's penetration coefficients is increased.

**Keywords:** Border irrigation, Optimization, Flow resistance coefficient, Irrigation phase, Philip's equation, Infiltration

---

1. Department of Water Engineering, College of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

\*: Corresponding author, Email: efazel@iut.ac.ir