



## مدیریت آب و آبیاری

دوره ۶ ■ شماره ۱ ■ بهار و تابستان ۱۳۹۵

صفحه‌های ۲۹-۴۵

# ارائه مدل بهینه‌سازی برآورد پارامترهای نفوذ و ضریب زبری آبیاری نواری با استفاده از داده‌های پیشروی و رواناب

رزا جنوبی<sup>۱</sup>، وحید رضاردی‌نژاد<sup>۲\*</sup>، و فریبرز عباسی<sup>۳</sup>

۱. دانشجوی دکتری آبیاری و زهکشی، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه

۲. استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه

۳. استاد موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، کرج، ایران

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۰۱/۲۵

تاریخ وصول مقاله: ۱۳۹۴/۱۰/۱۹

### چکیده

نفوذ، مهمترین و دشوارترین پارامتر در ارزیابی سامانه‌های آبیاری سطحی است. در این مطالعه، به منظور برآورد پارامترهای نفوذ معادله کوستیاکف-لوئیس و ضریب زبری مانینگ در سامانه‌های آبیاری نواری انتها‌باز، روش بهینه‌سازی بر اساس معادله بیلان حجمی توسعه و ارزیابی شد. پارامترهای نفوذ و ضریب زبری با استفاده از داده‌های پیشروی و رواناب برآورد شد. برای اعتبارسنجی روش پیشنهادی، از اطلاعات آزمایش‌های میدانی شش آبیاری نواری استفاده و نتایج با روش‌های دونقطه‌ای و بهینه‌سازی چند سطحی مقایسه شد. بر اساس نتایج، بیشترین دقت در روش بهینه‌سازی چند سطحی با متوسط ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) ۳/۷ دقیقه را برای زمان پیشروی و درصد خطای نسبی (RE) ۰/۵ درصد برای حجم رواناب نشان داد. علاوه بر آن، روش پیشنهادی با RMSE برابر ۵/۳ دقیقه برای زمان پیشروی و RE برابر ۷/۷ درصد برای حجم رواناب در مرتبه دوم بود. روش دونقطه‌ای با RMSE برابر ۵/۸ دقیقه برای زمان پیشروی و RE برابر ۳۵/۳ درصد برای حجم رواناب پایین‌ترین دقت را نتیجه داد. روش بهینه‌سازی پیشنهادی با دقت نسبتاً خوبی پارامترهای نفوذ و ضریب زبری را برآورد کرد و به سهولت همگرا می‌شود و سریع به جواب می‌رسد.

**کلیدواژه‌ها:** ارزیابی عملکرد، ذخیره زیرسطحی، ذخیره سطحی، مدل بیلان حجمی، معادله کوستیاکف-لوئیس.

## مقدمه

نفوذ آب در خاک یکی از عوامل مهم در طراحی و ارزیابی سامانه‌های آبیاری سطحی است. نفوذپذیری از سطح خاک، فرایندی پیچیده است و با زمان و مکان نیز تغییر می‌کند (۳). برای استفاده بهینه از آب و افزایش بازده آبیاری لازم است که پارامترهای نفوذ با دقت خوبی برآورد شود. در صورتی که پارامترهای نفوذ با دقت مناسب و نزدیک به شرایط مزرعه‌ای تعیین نشود، ممکن است آبیاری بی‌رویه و در نتیجه فرونش عمقی و رواناب صورت پذیرد یا آبیاری کمتر از مقدار مورد نیاز انجام گیرد. مدل‌های بررسی حرکت و نفوذ آب در خاک به سه دسته تحلیلی، فیزیکی و تجربی تقسیم می‌شود. در طراحی سامانه‌های آبیاری سطحی از معادلات پیشرفته ریاضی کمتر استفاده می‌شود و در عمل از معادلات تجربی نفوذ استفاده می‌شود که به نسبت دقیق و به‌ویژه ساده‌تر نیز هست (۳). عمده روش‌های تخمین نفوذ، مبتنی بر معادله بیلان حجمی است و بر اساس داده‌های مرحله پیشروی جریان توسعه یافته است. روش‌های ایوت و واکر (۹)، یک‌نقطه‌ای شپرد و همکاران (۲۳)، یک‌نقطه‌ای والیانتراس و همکاران (۲۵)، یک‌نقطه‌ای میلپالی و همکاران (۱۵)، دو نقطه‌ای ابراهیمیان و همکاران (۸)، بهینه‌سازی مک‌کلایمونت و اسمیت (۱۶) و بهینه‌سازی رودریگز و مارتوس (۲۰) از جمله روش‌های تخمین پارامترهای نفوذ استفاده شده است.

ارزیابی گسترده روش‌های برآورد پارامترهای نفوذ در جویچه و نوارهای آبیاری مبتنی بر مرحله پیشروی نشان داد که روش اصلاح‌شده میلپالی و همکاران و روش دو نقطه‌ای ایوت و واکر در مقایسه با روش یک‌نقطه‌ای شپرد و همکاران، روش دو نقطه‌ای ابراهیمیان و همکاران، روش یک‌نقطه‌ای میلپالی و همکاران و روش یک‌نقطه‌ای والیانتراس و همکاران نتایج بهتری فراهم می‌کند (۸). در

ارزیابی دیگری شش روش تعیین پارامترهای نفوذ در آبیاری جویچه‌ای شامل روش دو نقطه‌ای ایوت و واکر، یک‌نقطه‌ای شپرد و همکاران، استفاده از مدل INFILT، روش آپاده‌یایا و راگوانشی (۲۴)، یک‌نقطه‌ای والیانتراس و همکاران و تابع خطی نفوذ بررسی شد. نتایج این مطالعه نشان داد که مدل INFILT برای همه داده‌های صحرائی بیشترین دقت را داشت و روش‌های دو نقطه‌ای ایوت و واکر و تابع خطی نفوذ نیز عملکرد خوبی داشت (۱۳). با توجه به اینکه آبیاری سطحی ترکیبی از چهار مرحله پیشروی، ذخیره، تخلیه و پسروی است، روشی برای تخمین پارامترهای نفوذ دقیق‌تر خواهد بود که از اطلاعات تمام مراحل استفاده کند (۱). روش بهینه‌سازی چند سطحی یکی از جدیدترین و دقیق‌ترین روش‌های تخمین پارامترهای معادله کوستیاکف-لویس و نیز ضریب زبری مانینگ است که برخلاف روش‌های قبلی، از اطلاعات تمام مراحل آبیاری استفاده می‌کند و واکر مطرح کرد (۲۶). روش بهینه‌سازی گیلز و اسمیت (۱۰) نیز از جمله روش‌هایی است که از داده‌های مراحل پیشروی و ذخیره برای برآورد ویژگی‌های نفوذ و ضریب زبری مانینگ استفاده می‌کند و برای آبیاری جویچه‌ای و در قالب نرم‌افزار IPARM توسعه یافته است. در این تحقیق، روش گیلز و اسمیت برای آبیاری جویچه‌ای توسعه یافته است و برای آبیاری نواری اصلاح و روش جدیدی با رویکرد بهینه‌سازی مطرح شد. اساس این روش بر مراحل پیشروی و ذخیره و مبتنی بر روش بیلان حجمی اصلاح‌شده (برای کل مراحل آبیاری) است. دقت روش پیشنهادی با روش‌های متداول دو نقطه‌ای و بهینه‌سازی چند سطحی واکر ارزیابی شد.

## مواد و روش‌ها

در این مطالعه، روش دو نقطه‌ای ایوت و واکر روش

## مدیریت آب و آبیاری

پارامتر  $k$  با استفاده از پیشروی جریان، به صورت زیر برآورد می‌شود (۲۶).

$$k^* = \min \left[ t_L - \bar{t}_L \right]_{a, f_0, n} \quad (2)$$

در این رابطه،  $k^*$  مقدار برآورد شده  $k$ ،  $t_L$  و  $\bar{t}_L$  مقدار اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده زمان پیشروی به‌زای مقادیر تخمین اولیه  $f_0$ ،  $a$  و  $n$  است.  $f_0$  از هیدروگراف رواناب خروجی تعیین می‌شود.

$$f_0^* = \min \left[ \frac{1}{N} \sqrt{\sum_{i=1}^N (R_i - \bar{R}_i)^2} \right]_{a, k^*, n} \quad (3)$$

در این رابطه،  $f_0^*$  مقدار برآورد شده  $f_0$ ،  $R_i$  و  $\bar{R}_i$  مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده دبی رواناب در زمان‌های مختلف و  $N$  تعداد نقاط اندازه‌گیری رواناب است.

پس از تخمین  $f_0$ ، مرحله قبل با  $f_0^*$  مجدداً در تخمین  $k$  تکرار می‌شود. ضریب  $a$  با استفاده از داده‌های هیدروگراف خروجی و به‌صورت زیر برآورد می‌شود.

$$a^* = \min \left[ \frac{1}{N} \sqrt{\sum_{i=1}^N (R_i - \bar{R}_i)^2} \right]_{k^*, f_0^*, n} \quad (4)$$

در این رابطه،  $a^*$  مقدار برآورد شده  $a$  است. پس از تخمین  $a$ ، مراحل قبلی در برآورد مجدد  $k$  و  $f_0$  تکرار می‌شود.

در نهایت، ضریب زبری مانینگ ( $n$ ) از داده‌های مرحله پیشروی برآورد می‌شود.

$$n^* = \min \left[ t_R - \bar{t}_R \right]_{a^*, f_0^*, k^*} \quad (5)$$

در این رابطه،  $t_R$  و  $\bar{t}_R$  مقادیر زمان پس‌روی اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده است.

پس از تخمین  $n$ ، تمامی مراحل قبلی در برآورد مجدد  $a$ ،  $k$  و  $f_0$  با  $n^*$  تکرار می‌شود (۲۶، ۳).

متداولی بر اساس داده‌های مرحله پیشروی، و روش بهینه‌سازی چندسطحی روش مینا (۲، ۵، ۱۶، ۱۷) بر اساس داده‌های کل مراحل آبیاری در تخمین پارامترهای معادله نفوذ در نظر گرفته شد و با روش پیشنهادی مقایسه شد که در ادامه تشریح می‌کنیم.

### روش بهینه‌سازی چند سطحی

روش بهینه‌سازی چندسطحی روشی برای واسنجی ضریب زبری مانینگ و پارامترهای معادله نفوذ کوستیاکف-لویس است که در سیستم‌های انتهاباز پیشنهاد شده است. معادله کوستیاکف-لویس یکی از پرکاربردترین معادلات تخمین میزان نفوذ در آبیاری سطحی است که برای گستره وسیعی از خاک‌ها مناسب است (۱۲).

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

در این رابطه،  $I$  حجم نفوذ تجمعی در واحد طول در واحد عرض نوار ( $m^3/m/m$ ) و معادل عمق نفوذ،  $f_0$  سرعت نفوذ نهایی ( $m^3/m/m/min$ ) و معادل عمق نفوذ در واحد زمان،  $t$  زمان ( $min$ )، ضرایب  $a$  (-) و  $k$  ( $m^3/min^a/m/m$ ) پارامترهای تجربی معادله نفوذ است.

روش بهینه‌سازی چند سطحی روشی مبتنی بر داده‌های مراحل مختلف آبیاری است. برخلاف روش دونقطه‌ای لیوت و واکر،  $f_0$  نیز در این روش از داده‌های مراحل آبیاری برآورد می‌شود. علاوه بر پارامترهای نفوذ، ضریب زبری مانینگ نیز با این روش تخمین پذیر است. گام اول بهینه‌سازی چند سطحی، تخمین اولیه پارامترهای مجهول ( $a$ ،  $f_0$  و  $n$ ) است. در این تحقیق برای تخمین اولیه پارامترهای  $k$  و  $a$  از روش دونقطه‌ای و برای تخمین اولیه  $f_0$  از مقادیر حاصل از استوانه‌های مضاعف استفاده شد. در گام دوم، پارامترها به ترتیب اولویت و حساسیت، با روش بهینه‌سازی برآورد می‌شود. واکر با آزمون و خطا، ترتیب تخمین  $k$ ،  $f_0$  و  $a$  را مناسب‌ترین گزینه پیشنهاد کرد.

## روش دونقطه‌ای

این روش را نخستین بار الیوت و واکر در تخمین پارامترهای معادله نفوذ کوستیاکف- لوئیس ( $k$  و  $a$ ) پیشنهاد کردند. اساس آن معادله پیوستگی و رابطه‌نمایی مرحله پیشروی است. در روش دونقطه‌ای، معادله بیلان حجمی در پیشروی جریان آب در سطح مزرعه با معلوم بودن دو نقطه (معمولاً وسط و انتهای نوار) از مرحله پیشروی حل و پارامترهای معادله کوستیاکف- لوئیس از روابط (۶) و (۷) استخراج شد.

$$a = \frac{\left[ \left( \frac{Q_{t_1} - \bar{A} - f_0 t_1}{x_1} \right) \left( \frac{Q_{t_2} - \bar{A} - f_0 t_2}{x_2} \right) \right]}{\log \left( \frac{t_1}{t_2} \right)} \quad (6)$$

$$k = \frac{\frac{Q_{t_1} - \bar{A} - f_0 t_1}{x_1} - \frac{f_0 t_1}{1+r}}{\sigma_z t_1^a} \quad (7)$$

در این روابط،  $t$  زمان پیشروی (min)،  $\bar{A}$  متوسط سطح مقطع جریان ( $m^2$ )،  $Q$  دبی ورودی به نوار ( $m^3 min^{-1}$ )،  $x$  طول پیشروی (m)،  $r$  توان رابطه‌نمایی پیشروی،  $f_0$  سرعت نفوذ پایه ( $m min^{-1}$ ) و  $\sigma_z$  فاکتور شکل زیرسطحی است که از رابطه (۸) محاسبه می‌شود.

$$\sigma_z = \frac{a+r(1-a)+1}{(1+a)(1+r)} \quad (8)$$

در این رابطه،  $a$  (-) پارامتر تجربی معادله نفوذ است.  $f_0$  با دانستن نوع خاک یا آزمایش نفوذ تعیین می‌شود. در این معادلات اندیس‌های ۱ و ۲ به ترتیب مربوط به پیشروی تا نصف و انتهای نوار است.

## روش بهینه‌سازی پیشنهادی

روش بهینه‌سازی پیشنهادی در تخمین ضریب زبری مانینگ و پارامترهای معادله نفوذ کوستیاکف- لوئیس در آبیاری نواری و سیستم‌های انتها باز پیشنهاد شده است. روش پیشنهادی روشی مبتنی بر داده‌های مرحله پیشروی و

رواناب است. در این روش، علاوه بر پارامترهای نفوذ، ضریب زبری مانینگ نیز با روش بهینه‌سازی برآورد می‌شود. این روش بر اساس مدل بیلان حجمی و از دو بخش تشکیل شده است. بخش نخست، مرحله پیشروی و بخش دوم مرحله رواناب است، شامل مراحل ذخیره، تخلیه و پسروی. بخش نخست، بر اساس برآورد مسافت طی شده و بخش دوم بر اساس رواناب خروجی از انتهای نوار، وارد فرایند بهینه‌سازی می‌شود. این روش در آبیاری جویچه‌ای و در غالب مدل IPARM توسعه یافته و در این مطالعه برای آبیاری نواری تصحیح شده است (۱۰). مراحل توسعه این روش و محاسبات در گام‌های زیر انجام شده است.

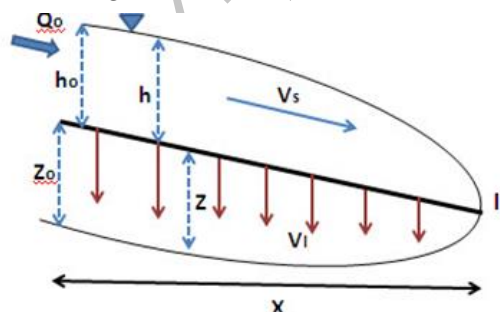
### ۱. مرحله پیشروی

معادله بیلان حجمی در هر زمان طی مرحله پیشروی رویداد آبیاری کاربرد دارد. این مدل بیانگر این است که حجم آب اعمال شده در هر زمان با حجم ذخیره سطحی ( $V_s$ ) به اضافه حجم آب نفوذ کرده ( $V_I$ ) در آن زمان برابر است.

$$q_0 t = V_I + V_s \quad (9)$$

در این رابطه،  $q_0$  مقدار دبی ورودی بر واحد عرض ( $m^2 min^{-1}$ ) و  $t$  زمان (min) است.

شکل ۱ شمایی از ذخیره آب سطحی و زیرسطحی در آبیاری نواری در مرحله پیشروی را ارائه می‌کند.



شکل ۱. ذخیره آب سطحی و زیرسطحی در آبیاری نواری طی مرحله پیشروی جریان

## مدیریت آب و آبیاری

## ۲. ذخیره آب سطحی در مرحله پیشروی ( $V_s$ )

در آبیاری نواری، زمانی که آب به فاصله  $l$  از ابتدا می‌رسد، آب ذخیره شده در واحد عرض به شکل انتگرال زیر محاسبه می‌شود.

$$V_s = \int_0^l h dx \quad (10)$$

در این رابطه،  $h$  عمق آب سطحی در نوار ( $m$ ) است. ونگ و همکاران (۲۸) تابعی نمایی را برای مطرح کردند (رابطه ۱۱).

$$h = h_0 \left(1 - \frac{x}{l}\right)^m \quad (11)$$

در این رابطه،  $h_0$  عمق آب در ابتدای نوار ( $m$ )،  $l$  مسافت طی شده جریان آب ( $m$ ) و  $m$  ضریب شکل پروفیل سطحی آب (-) است.

با جایگذاری رابطه (۱۱) در رابطه (۱۰)، رابطه (۱۲) حاصل می‌شود (۲۹).

$$V_s = \frac{h_0 \cdot l}{1+m} \quad (12)$$

با تعریف فاکتور شکل نیم‌رخ سطحی به صورت  $\sigma_n = l/(1+m)$ ، رابطه (۱۳) استخراج می‌شود.

$$V_s = \frac{h_0 \cdot l}{1+m} = \sigma_n \cdot h_0 \cdot l \quad (13)$$

فاکتور شکل نیم‌رخ سطحی  $\sigma_n$ ، اغلب از ۰/۷ تا ۰/۸ توصیه شده است. برای مقدار فاکتور شکل سطحی در مطالعات مختلف مقادیر ۰/۸، ۰/۷۴، ۰/۷۹، ۰/۷۵ و ۰/۷۹ پیشنهاد شده است (۱۴، ۲۱، ۱۹، ۲۲، ۲۶). در این مقاله متوسط مقادیر مشاهده شده معادل ۰/۷۷ برای فاکتور شکل سطحی در نظر گرفته شد. عمق آب در ابتدای نوار را می‌توان با معادله مانینگ محاسبه کرد (رابطه ۱۴).

$$h_0 = \frac{(nq_0/60)^{\frac{3}{5}}}{J^{\frac{3}{10}}} \quad (14)$$

در این رابطه،  $J$  مقدار شیب سطحی ( $m/m$ )،  $n$  ضریب زبری مانینگ (-) و  $q_0$  مقدار دبی ورودی بر واحد عرض ( $m^2 \min^{-1}$ ) است.

با جایگذاری رابطه (۱۴) در رابطه (۱۲)، رابطه (۱۵) حاصل می‌شود که بیانگر مقدار حجم آب سطحی در نوار در فاصله  $l$  است (۲۹).

$$V_s = \sigma_n \cdot \frac{(nq_0/60)^{\frac{3}{5}}}{J^{\frac{3}{10}}} \cdot l \quad (15)$$

## ۳. ذخیره آب زیرسطحی در مرحله پیشروی ( $V_I$ )

برای تعیین مقدار ذخیره آب زیرسطحی، از معادله نفوذ کوستیاکف- لویس (رابطه ۱) استفاده شد. زمانی که آب به فاصله  $l$  از ابتدای نوار می‌رسد ذخیره آب زیرسطحی بر واحد عرض به شکل انتگرال زیر محاسبه می‌شود.

$$V_I = \int_0^l I dx \quad (16)$$

ساده‌ترین و معمول‌ترین معادله موجود در مسیر پیشروی در نوار آبیاری تابع نمایی زیر است (۹، ۲۱، ۲۷).

$$x = pt^r \quad (17)$$

در این رابطه،  $p$  و  $r$  ضرایب تجربی (-) است و مقادیر آن را منحنی برازش داده شده با رابطه (۱۷) مطابق با مسافت اندازه‌گیری شده و زمان پیشروی آب در نقاط متعدد تعیین می‌شود. با در نظر گرفتن رابطه (۱) و رابطه (۱۷) و انتگرال‌گیری از رابطه (۱۶)، رابطه (۱۸) برای حجم آب ذخیره زیرسطحی به دست آمد (۲۹).

$$V_I = \sigma_z kt^a l + \frac{f_0 \cdot t}{1+r} l \quad (18)$$

در این رابطه،  $\sigma_z$  همان فاکتور شکل زیرسطحی است که از رابطه (۸) محاسبه می‌شود.

با جایگذاری رابطه (۸) در (۱۸) و جایگذاری رابطه حاصل و رابطه (۱۴) در رابطه (۹)، رابطه (۱۹) حاصل می‌شود (۲۹).

## مدیریت آب و آبیاری

ساحیب (۱۱) برای آبیاری نواری مطرح کردند. فرضیه‌های

این روش عبارت است از:

۱. شدت جریان ورودی به نوار ثابت است.
۲. شیب نوار یکنواخت و سطح مقطع آن منشوری است.
۳. زمان پیشروی در نوار به صورت تابعی نمایی از مسافت پیشروی قابل بیان باشد.

۴. طول نوار بی‌نهایت است و هر آبی که از انتهای واقعی نوار عبور کند رواناب محسوب می‌شود.

شکل ۲، مقطعی طولی از نوار را طی مراحل پیشروی و رواناب نشان می‌دهد که در آن ذخیره سطحی و زیرسطحی آب در گام‌های زمانی مختلف مشخص شده است. برآورد رواناب به این شکل صورت می‌گیرد که طول نوار بی‌نهایت فرض شده است، لذا با رسیدن آب به انتهای واقعی نوار (معادل با زمان شروع رواناب)، در قسمت فرضی نوار ذخیره سطحی و زیرسطحی اتفاق می‌افتد که مجموع آن‌ها معادل با حجم رواناب فرض می‌شود.

(۱۹)

$$q_{0,t} = \sigma_h \cdot \frac{(nq_0/60)^3}{J^{10}} \cdot l + \frac{a+r(1-a)+1}{(1+a)(1+r)} kt^a l + \frac{f_0 \cdot t}{1+r} l$$

بر اساس رابطه (۱۹)، مسافت طی شده جریان در هر زمان از رابطه (۲۰) به دست می‌آید.

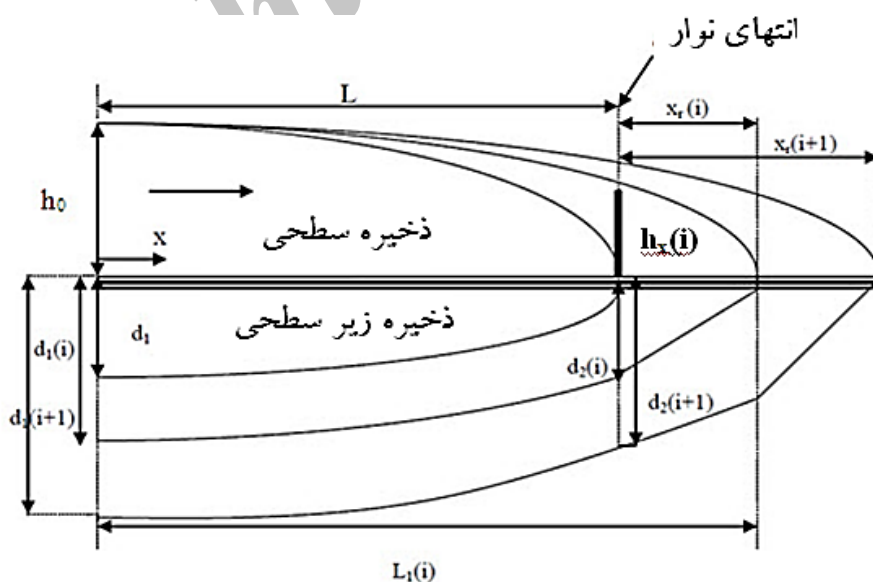
(۲۰)

$$l = \frac{q_0 t}{\sigma_h \cdot \frac{(nq_0/60)^3}{J^{10}} \cdot l + \frac{a+r(1-a)+1}{(1+a)(1+r)} kt^a l + \frac{f_0 \cdot t}{1+r} l}$$

رابطه (۲۰) معادله نهایی ای است که برای بهینه‌سازی پارامترهای نفوذ ( $a$ ،  $k$  و  $f_0$ ) و ضریب زبری وارد تابع هدف می‌شود.

#### ۴. مرحله رواناب

تحلیل هیدروگراف رواناب نیز بر اساس اصل بیلان حجمی است که در آن حجم آب اعمال شده برابر با مجموع حجم‌های ذخیره سطحی و زیرسطحی است. روش به کار رفته در این تحقیق در برآورد رواناب را حامد و



شکل ۲. مقطع طولی نوار طی مرحله‌های پیشروی و رواناب

### مدیریت آب و آبیاری

دوره ۶ ■ شماره ۱ ■ بهار و تابستان ۱۳۹۵

### ۵. ذخیره آب سطحی در مرحله رواناب

همان‌طور که گفتیم، در این روش طول نوار بی‌نهایت فرض می‌شود و با رسیدن آب به انتهای واقعی نوار که معادل با زمان شروع رواناب است، در قسمت فرضی نوار ذخیره سطحی و زیرسطحی اتفاق می‌افتد. حجم آب ذخیره‌شده در نوار تابعی از پروفیل جبهه جریان آب است و از رابطه (۲۱) محاسبه می‌شود (۱۱).

$$h_x(i) = h_0 \sqrt{1 - \left(\frac{x}{L_1(i)}\right)^2} \quad (21)$$

در این رابطه،  $h_0$  عمق جریان در ابتدای نوار ( $m$ ) و محاسبه‌شده از معادله مانینگ (رابطه ۱۴)،  $h_x(i)$  عمق جریان در فاصله  $x$  از انتهای نوار در قسمت طول فرضی نوار ( $m$ ) و  $L_1(i)$  کل مسافت پیشروی طی زمان  $[t_a + \Delta t(i)]$  ( $m$ ) و معادل با  $[L + x_r(i)]$ ،  $i$  اندیس و  $t_a$  زمان مورد نیاز برای پیشروی آب در کل طول نوار ( $\min$ ) است (۱۱). زمان پیشروی ممکن است به صورت تابع نمایشی از مسافت پیشروی (رابطه ۱۷) بیان شود. بنابراین،  $x_r(i)$  بر اساس رابطه (۱۷) به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$x_r(i) = p(t_a + \Delta t(i))^r - L \quad (22)$$

در این رابطه،  $L$  طول نوار،  $x_r(i)$  مسافت فرضی طی شده از انتهای نوار بعد از زمان  $[t_a + \Delta t(i)]$  و  $\Delta t(i)$  گام زمانی طی مرحله رواناب ( $\min$ ) است. با انتگرال‌گیری از  $L$  تا  $L(i)$  کل حجم آب ذخیره‌شده سطحی در واحد عرض نوار حاصل می‌شود.

$$V_{sb}(i) = \int_{x=L}^{x=L_1(i)} h_x(i) dx \quad (23)$$

با جایگذاری روابط (۲۱) و (۲۲) در رابطه (۲۳) و انتگرال‌گیری از  $x = L$  تا  $x = L_1(i)$  کل حجم ذخیره سطحی  $V_{sb}(i)$  در مدت زمان مشخص  $[t_a + \Delta t(i)]$  با در نظر گرفتن طول فرضی از انتهای نوار  $(m^3/m)$  برابر خواهد بود با (۱۱).

(۲۴)

$$V_{sb}(i) = \frac{h_0 L_1(i)}{2} \left[ \frac{\pi}{2} - \frac{1}{2} \sin \left( 2 \sin^{-1} \left( \frac{L}{L_1(i)} \right) \right) - \sin^{-1} \left( \frac{L}{L_1(i)} \right) \right]$$

### ۶. ذخیره آب زیرسطحی در مرحله رواناب

ذخیره زیرسطحی شامل حجم آب نفوذ کرده در بازه‌ای از طول نوار است. مدل پیشنهادی بر اساس معادله نفوذ کوستیاکف-لوئیس رابطه (۱) ارائه شد. حجم ذخیره زیرسطحی آب طی اولین گام زمانی  $\Delta t(i)$  بعد از شروع رواناب به‌طور تقریبی با توجه به شکل ۲ به صورت زیر تعیین می‌شود.

$$V_{ib}(i) = \frac{(K \Delta t(i)^a + f_0 \Delta t(i)) \times x_r(i)}{2} \quad (25)$$

طی گام‌های زمانی بعدی، جبهه مرطوب با در نظر گرفتن خطوطی مستقیم و متصل به هم مطابق با شکل ۲ به‌طور تقریبی مشخص می‌شود و حجم آب ذخیره زیرسطحی به صورت رابطه (۲۶) است.

$$V_{ib}(i) = \sum_{i=2}^{n_d} \sum_{j=2}^i \left[ \frac{K(\Delta t(j))^a + f_0 \Delta t(j) + k(\Delta t(j-1))^a + f_0 \Delta t(j-1)}{2} \right]$$

$(x_r(i+2-j) - x_r(i+1-j))$  در این رابطه،  $V_{ib}(i)$  حجم ذخیره زیرسطحی در طول نوار در گام زمانی  $\Delta t(i)$  ( $m^3/m$ )،  $n_d$  شماره گام‌های زمانی و  $i$  اندیس است.

با معلوم بودن مقدار حجم ذخیره سطحی و زیرسطحی در مرحله رواناب و با در نظر گرفتن طول فرضی از انتهای نوار، بر اساس رابطه بیلان حجمی، حجم رواناب ( $m^3/m$ ) از رابطه (۲۷) محاسبه می‌شود.

$$V_{Run-off} = V_{sb}(i) + V_{ib}(i) \quad (27)$$

## مدیریت آب و آبیاری

## ۷. تابع هدف

بر اساس روش پیشنهادی پارامترهای نفوذ ( $f_0$  و  $k$  و  $a$ ) و ضریب زبری ( $n$ ) با کمینه سازی اختلافات بین مسافت پیشروی اندازه گیری و محاسباتی، همچنین حجم رواناب اندازه گیری و محاسباتی در مرحله رواناب (مراحل ذخیره، تخلیه و عقب نشینی) برآورد می شود. الگوریتم مربوط به هر مرحله به صورت روابط (۲۸) و (۲۹) تعریف می شود.

(۲۸)

$$SSE_{advance} = \sum_{i=1}^{N_a} \left[ x_i - \frac{q_0 t}{\sigma_h \cdot \frac{(nq_0/60)^3}{J^{10}} \cdot 1 + \frac{a+r(1-a)+1}{(1+a)(1+r)} k t^l + \frac{f_0 \cdot t}{1+r}} \right]^2$$

$$SSE_{Runoff} = \sum_{i=1}^{N_r} [V_{Ri} - (V_{sb}(i) + V_{ib}(i))]^2 \quad (29)$$

در این روابط،  $SSE_{advance}$  مجموع مربعات خطای استاندارد مرحله پیشروی،  $SSE_{Runoff}$  مجموع مربعات خطای استاندارد مرحله رواناب،  $V_{Ri}$  و  $x_i$  به ترتیب مسافت پیشروی اندازه گیری شده ( $m$ ) و حجم رواناب اندازه گیری شده ( $m^3/m$ )،  $N_a$  تعداد نقاط پیشروی و  $N_r$  تعداد حجم رواناب اندازه گیری شده است.

در نهایت، تابع هدف به شکلی بدون بعد و با جمع خطاهای رواناب و پیشروی به صورت رابطه (۳۰) تعریف می شود.

(۳۰)

$$Objective \ Function = \left[ \frac{SSE_{advance}}{\sum_{i=1}^{N_a} x_i^2} \right]^{\frac{1}{2}} + \left[ \frac{SSE_{Runoff}}{\sum_{i=1}^{N_r} V_{Ri}^2} \right]^{\frac{1}{2}}$$

به منظور حل مسئله بهینه سازی، از ابزار Solver استفاده شد که یکی از امکانات جانبی نرم افزار اکسل است و قدرت حل مسائل بهینه سازی خطی و غیرخطی را دارد. در برنامه

Solver از الگوریتم گرادیان نزول تعمیم یافته (GRG)<sup>۱</sup>

برای مسائل بهینه سازی غیرخطی (NLP) معمول، از الگوریتم تکاملی<sup>۲</sup> برای بهینه سازی مسائل غیرخطی غیرمعمول (پیچیده) و از الگوریتم سیمپلکس برای حل مسائل برنامه ریزی خطی (LP) استفاده می شود. برای حل مسئله بهینه سازی فوق و با توجه به غیرخطی بودن تابع هدف، الگوریتم تکاملی به کار گرفته شد. قیدها برای متغیرهای  $a$ ،  $f_0$  و  $k$  به صورت بزرگتر از صفر و برای ضریب زبری ( $n$ ) بزرگتر از صفر و کوچکتر از  $0/1$  (با توجه به شرایط مزرعه) تعریف شد.

## ارزیابی روش ها

به منظور ارزیابی عملکرد روش های دو نقطه ای، بهینه سازی چندسطحی و بهینه سازی پیشنهادی در تخمین حجم رواناب و نفوذ، از معیار خطای نسبی (RE) و زمان های پیشروی و پسروی از شاخص ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و ضریب تعیین ( $R^2$ ) استفاده شد.

$$RE = \frac{|V_p - V_m|}{V_m} \times 100 \quad (31)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (T_{mi} - T_{pi})^2}{N}} \quad (32)$$

(۳۳)

$$R^2 = \left( \frac{\sum (T_{mi} \times T_{pi}) - n \times \bar{T}_m \times \bar{T}_p}{\sqrt{(\sum T_{mi}^2 - n \times \bar{T}_m^2)(\sum T_{pi}^2 - n \times \bar{T}_p^2)}} \right)$$

در این رابطه،  $V_p$  حجم رواناب یا نفوذ پیش بینی شده ( $m^3/m$ )،  $V_m$  حجم رواناب یا نفوذ اندازه گیری شده ( $m^3/m$ )،  $T_p$  زمان پیشروی یا پسروی پیش بینی شده در ایستگاه نام ( $\min$ )،  $T_m$  زمان پیشروی یا پسروی

1. Generalized Reduced Gradient
2. evolutionary



هندسه نوار (طول، عرض و شیب نوار)، ضریب زبری مانینگ، دبی ورودی به نوار، زمان قطع جریان، بافت خاک و سرعت نفوذ پایه است. مشخصات سری داده‌های صحرائی ارزیابی آبیاری نواری در جدول ۱ ارائه شده است. این داده‌ها برگرفته از گزارش‌های عباسی (۴) و عباسی و همکاران (۵) است. در این گزارش‌ها، اطلاعات مراحل پیشروی، پسروی، هیدروگراف جریان ورودی و خروجی، پارامترهای هندسی و سایر مشخصات اندازه‌گیری شده است. شرایط پایین دست جریان در تمامی نوارها به صورت انتها باز بود و با نصب فلوم‌های WSC در انتهای نوارها، هیدروگراف رواناب خروجی اندازه‌گیری شد. سرعت نفوذ پایه ( $f_0$ ) از روش ورودی-خروجی در مزرعه اندازه‌گیری است (جدول ۱).

اندازه‌گیری شده در ایستگاه نام (min) و  $N$  تعداد ایستگاه است.

در این تحقیق از مدل WinSRFR استفاده شد که مدل ریاضی یک‌بعدی در تحلیل و شبیه‌سازی آبیاری سطحی است و کاربرد زیادی در طراحی و مدیریت آبیاری سطحی دارد. پارامترهای تخمینی معادله نفوذ به روش‌های دونقطه‌ای، بهینه‌سازی چندسطحی و بهینه‌سازی پیشنهادی، به مدل WinSRFR وارد و مراحل پیشروی، پسروی و هیدروگراف رواناب برای شش رویداد آبیاری نواری شبیه‌سازی و ارزیابی شد.

## داده‌ها

در ارزیابی عملکرد روش‌ها، از اطلاعات آزمایش‌های میدانی آبیاری نواری استفاده شد. این اطلاعات شامل داده‌های پیشروی، پسروی، هیدروگراف رواناب، اطلاعات

جدول ۱. مشخصات داده‌های صحرائی مورد استفاده (۴، ۵)

آزمایش صحرائی						علامت	متغیر آبیاری
نوار ۶	نوار ۵	نوار ۴	نوار ۳	نوار ۲	نوار ۱		
۱/۳۷	۱/۵	۱/۳۷	۱/۳۵	۱/۶۶	۱/۱۱	$q$	دبی ورودی (lit/s/m)
۰/۰۰۱۵۶	۰/۰۰۰۸۶	۰/۰۰۰۸۲	۰/۰۰۰۸۲	۰/۰۰۰۸۲	۰/۰۰۰۸۲	$S$	شیب طولی نوار (m/m)
۱۴۷	۱۱۰	۱۷۰	۱۸۰	۱۸۰	۱۸۰	$L$	طول نوار (m)
۱۳۷	۱۷۸	۲۶۰	۳۹۰	۲۷۰	۳۲۰	$t_{co}$	زمان قطع جریان (min)
۷/۲	۵/۲	۸	۸	۸	۸	$w$	عرض نوار (m)
رسی	رسی	لوم رسی سیلتی	لوم رسی سیلتی	لوم رسی سیلتی	لوم رسی سیلتی	-	بافت خاک <sup>†</sup>
۰/۰۴۹	۰/۰۶۳	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۰۴	$n$	ضریب زبری مانینگ (-)
۷/۸	۷/۸	۱۳/۱	۱۳/۲	۱۳/۱	۱۳/۲	$f_0$	سرعت نفوذ پایه (mm/hr)

<sup>†</sup> بافت خاک در عمق ۰-۶۰ سانتی متری نیمرخ خاک اندازه‌گیری شده است.

## مدیریت آب و آبیاری

دوره ۶ ■ شماره ۱ ■ بهار و تابستان ۱۳۹۵

## نتایج و بحث

نتایج برآورد پارامترهای معادله نفوذ ( $f_0$  و  $k$  و  $a$ ) و ضریب زبری مانینگ ( $n$ ) به روش بهینه‌سازی چند سطحی و روش پیشنهادی و پارامترهای معادله نفوذ ( $k$  و  $a$ ) به روش دونقطه‌ای برای هر یک از نوارهای آبیاری برآورد شد (جدول ۲). مقادیر ضریب  $R^2$  و RMSE برآورد زمان پیشروی و پسروی در نوارهای مورد مطالعه به سه روش در جدول ۳ آمده است. همچنین، مقادیر رواناب و نفوذ اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده، به همراه مقادیر خطای نسبی رواناب و حجم نفوذ مربوط به سه روش در شش نوار مورد مطالعه در جدول ۴ ارائه شده است. در نهایت، مقایسه نتایج مراحل پیشروی، پسروی و رواناب اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده حاصل از سه روش در هر یک از نوارهای آبیاری در شکل‌های ۳ تا ۵ بررسی شده است.

نتایج جدول ۲ نشان می‌دهد که پارامترهای نفوذی برآورد شده به روش بهینه‌سازی چندسطحی، با روش بهینه‌سازی پیشنهادی اختلاف کم و با روش دونقطه‌ای اختلاف بیشتری دارد؛ به گونه‌ای که ضریب  $a$  در روش بهینه‌سازی چند سطحی در نوار ۲ برابر ۰/۳۵، در روش بهینه‌سازی پیشنهادی ۰/۳۸ و در روش دونقطه‌ای ۰/۴۸ به دست آمد. ضریب  $k$  هم در روش بهینه‌سازی چندسطحی در نوار ۲ برابر ۴۴/۵، در روش بهینه‌سازی پیشنهادی ۴۴/۱۳ و در روش دونقطه‌ای ۴۹/۷۱ حاصل شد. همچنین، مقدار ضریب  $f_0$  در روش بهینه‌سازی چند سطحی در نوار ۲ برابر ۱۷/۰، و در روش بهینه‌سازی پیشنهادی ۱۶/۴۴ بود. مقدار ضریب  $n$  در روش بهینه‌سازی چند سطحی در نوار ۲ برابر ۰/۰۳۵ و در روش بهینه‌سازی پیشنهادی ۰/۰۴ بود. در روش دونقطه‌ای مقدار ضریب  $f_0$  براساس روش ورودی - خروجی و ضریب  $n$  از قبل مشخص شد و جز پارامترهای محاسباتی نبود. اختلاف کمی که بین دو روش

بهینه‌سازی چند سطحی و روش بهینه‌سازی پیشنهادی وجود دارد، تأثیر تفاوت روش‌ها در محاسبه پارامترهاست، به طوری که در روش بهینه‌سازی چند سطحی علاوه بر داده‌های مراحل پیشروی، پسروی و رواناب خروجی، از مدل آبیاری سطحی در برآورد ویژگی‌های نفوذ و ضریب زبری مانینگ استفاده می‌شود؛ ولی، در روش بهینه‌سازی پیشنهادی، مطابق معادله بیلان حجمی ضرایب معادله نفوذ و ضریب زبری مانینگ برآورد می‌شود. علاوه بر این، در روش بهینه‌سازی چندسطحی، پارامترها به ترتیب و گام به گام محاسبه می‌شود، در حالی که در روش بهینه‌سازی پیشنهادی پارامترهای  $f_0$ ،  $k$  و  $a$  به صورت هم‌زمان بهینه می‌شود (۶). به این ترتیب، در نظر گرفتن اثر متقابل متغیرهای تصمیم (مجهول) بر روی هم، وقت گیر نبودن و عدم نیاز به یک مدل شبیه‌سازی آبیاری سطحی در برآورد ترتیبی پارامترها از محاسن این روش است.

مقدار RMSE در زمان پیشروی در روش‌های دونقطه‌ای، بهینه‌سازی چندسطحی و بهینه‌سازی پیشنهادی تفاوت زیادی ندارد. ولی روش بهینه‌سازی چند سطحی متوسط RMSE کمتری (۳/۷ دقیقه) نسبت به بهینه‌سازی پیشنهادی (۵/۳ دقیقه) و روش دونقطه‌ای (۵/۸ دقیقه) دارد. نتایج نشان‌دهنده دقت نزدیک و نسبتاً خوب سه روش در برآورد زمان پیشروی است. متوسط RMSE در زمان پسروی در روش بهینه‌سازی چندسطحی ۳/۷ دقیقه، روش بهینه‌سازی پیشنهادی ۷/۰ دقیقه و روش دونقطه‌ای ۶/۸ دقیقه است. روش بهینه‌سازی چند سطحی دقت بالاتری از دیگر روش‌ها در برآورد زمان پسروی دارد، و روش دونقطه‌ای و روش پیشنهادی عملکرد مشابهی در برآورد زمان پسروی داشته است.

زمان پسروی برآورد شده به سه روش دقت نسبتاً خوبی دارد که ممکن است ناشی از این باشد که زمان پسروی به پارامترهای معادله نفوذ ( $k$  و  $a$ ) چندان حساس نیست و به

بر اساس مشاهدات مزرعه‌ای، یک مقدار برای  $n$  فرض می‌شود و مطابق روش ورودی- خروجی مقدار تقریبی  $f_0$  و با استفاده از اطلاعات هیدروگراف جریان خروجی در مزرعه در نظر گرفته می‌شود. اطمینان به مقدار  $f_0$  تعیین شده به هیدروگراف خروجی در رسیدن به مقدار ثابت بستگی دارد؛ شرایطی که ممکن است در زمانی طولانی‌تر از زمان مورد نیاز برای تأمین عمق مورد نیاز اتفاق بیافتد (۲۶). علاوه بر این، در بیشتر موارد آزمایش تعیین  $f_0$  به روش ورودی- خروجی در بازه‌ای کوچک‌تر از طول واقعی جویچه (معمولاً در طول ۲۰ الی ۳۰ متر) انجام می‌گیرد. به علت تغییرات مکانی نفوذ، تعمیم نتایج بازه اندازه‌گیری به کل طول جویچه عامل خطاست. همچنین، به منظور کاهش خطای تخمین سرعت نفوذ پایه، پیشنهاد شده است که در روش ورودی- خروجی، دبی جریان ورودی ثابت باشد؛ اما، ثابت نگه‌داشتن دبی ورودی نیاز به تجهیزات و کنترل کننده‌های جریان دارد. در اغلب آزمایش‌های مزرعه‌ای ثابت نگه‌داشتن دبی ورودی به سختی امکان‌پذیر است.

مقدار ضریب زبری حساس‌تر است (۳، ۲۶). مقدار  $n$  نیز در اکثر نوارهای مورد مطالعه برای روش‌های دونقطه‌ای و روش پیشنهادی یکسان و در روش بهینه‌سازی پیشنهادی به مقدار جزئی متفاوت است. مقدار  $R^2$  در زمان پیشروی در روش‌های دونقطه‌ای، بهینه‌سازی چندسطحی و بهینه‌سازی پیشنهادی در محدوده ۰/۹۷ تا ۰/۹۹ قرار دارد که به معنای همبستگی بالای سه روش در برآورد زمان پیشروی است. در زمان پسروی مقدار  $R^2$  در محدوده ۰/۶ تا ۰/۹۸ قرار دارد، به طوری که در روش بهینه‌سازی چندسطحی در محدوده ۰/۸۵ تا ۰/۹۸، در روش بهینه‌سازی پیشنهادی در محدوده ۰/۸۲ تا ۰/۹۸ و در روش دونقطه‌ای در محدوده ۰/۶۰ تا ۰/۹۸ قرار دارد. نتایج نشان می‌دهد که روش بهینه‌سازی چندسطحی و بهینه‌سازی پیشنهادی دقت بالاتری نسبت به روش دونقطه‌ای دارد. ممکن است به این علت باشد که روش‌های مذکور هر چهار پارامتر ( $a$ ،  $k$ ،  $f_0$  و  $n$ ) را بر اساس اندازه‌گیری‌های مزرعه‌ای برآورد می‌کند. در حالی که در روش دونقطه‌ای و

جدول ۲. پارامترهای معادله نفوذ و ضریب زبری مانینگ براساس روش‌های دونقطه‌ای، بهینه‌سازی چندسطحی و روش پیشنهادی

روش اندازه‌گیری	پارامتر	نوار ۱	نوار ۲	نوار ۳	نوار ۴	نوار ۵	نوار ۶
روش دونقطه‌ای	$a$ (-)	۰/۴۳	۰/۴۸	۰/۱۷	۰/۴۳	۰/۷۲	۰/۱۸
	$f_0$ (mm h <sup>-1</sup> )	۱۳/۲	۱۳/۲	۱۳/۲	۱۳/۲	۷/۸	۷/۸
	$k$ (mm h <sup>-3</sup> )	۲۸/۶۴	۴۹/۷۱	۲۶/۷۲	۳۷/۱۷	۲۱/۰۶	۲۸/۵۳
	$n$ (-)	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۰۶۳	۰/۰۴۹
روش بهینه‌سازی چندسطحی	$a$ (-)	۰/۳	۰/۳۵	۰/۲۴	۰/۴۳	۰/۴۳	۰/۱۶
	$f_0$ (mm h <sup>-1</sup> )	۸/۵	۱۷	۱۳/۶	۱۱/۷	۱/۶۸	۱۱
	$k$ (mm h <sup>-3</sup> )	۴۲	۴۴/۵	۳۰	۴۰/۶	۳۹/۲	۲۵/۸
	$n$ (-)	۰/۰۲۲	۰/۰۳۵	۰/۰۲۸	۰/۰۲۷	۰/۰۳۵	۰/۰۵۲
روش پیشنهادی	$a$ (-)	۰/۳۵	۰/۳۸	۰/۲۳	۰/۳۳	۰/۴	۰/۱۲
	$f_0$ (mm h <sup>-1</sup> )	۷/۴۰	۱۶/۴۴	۱۲/۰۶	۱۳/۴۲	۱/۶۸	۱۰/۸۶
	$k$ (mm h <sup>-3</sup> )	۶۱/۸۸	۴۴/۱۳	۳۱/۸	۴۱/۹۶	۳۹/۲	۲۵/۹
	$n$ (-)	۰/۰۲	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۶

جدول ۳. مقادیر ضریب تعیین و ریشه میانگین مربعات خطا در برآورد مرحله پیشروی و پسروی<sup>†</sup>

روش اندازه‌گیری	پارامتر	نوار ۱	نوار ۲	نوار ۳	نوار ۴	نوار ۵	نوار ۶
روش	RMSE (min)	۶/۱۴ (۷/۸۸)	۱۱/۱۶ (۴/۰۷)	۵/۶۳ (۱۰/۰۱)	۲/۶۵ (۵/۱۵)	۷/۱۹ (۹/۵۴)	۲/۴۲ (۴/۷۲)
دو نقطه‌ای	R <sup>2</sup> (-)	۰/۹۹ (۰/۶۰)	۰/۹۹ (۰/۸۵)	۰/۹۹۸ (۰/۸۶۸)	۰/۹۹ (۰/۹۲)	۰/۹۹ (۰/۹۱)	۰/۹۹ (۰/۹۸)
روش	RMSE (min)	۶/۱ (۲/۳۰)	۵/۲۱ (۳/۱۸)	۳/۳۵ (۴/۰۲)	۳/۰۳ (۲/۶۴)	۱/۹۶ (۶/۲۷)	۲/۷۴ (۴/۰۳)
بهینه‌سازی چند سطحی	R <sup>2</sup> (-)	۰/۹۸ (۰/۸۹)	۰/۹۸ (۰/۸۹)	۰/۹۹ (۰/۸۵)	۰/۹۹ (۰/۹۲)	۰/۹۹ (۰/۹۲)	۰/۹۹ (۰/۹۸)
روش	RMSE (min)	۱۲/۷۶ (۲/۹۳)	۴/۷۱ (۳/۸۰)	۲/۲۹ (۱۰/۰۸)	۲/۱۳ (۳/۸۵)	۵/۸۷ (۱۴/۷۱)	۴/۲۶ (۶/۸۷)
پیشنهادی	R <sup>2</sup> (-)	۰/۹۷ (۰/۸۳)	۰/۹۹ (۰/۸۷)	۰/۹۹ (۰/۸۵)	۰/۹۹ (۰/۸۳)	۰/۹۹ (۰/۸۲)	۰/۹۹ (۰/۹۸)

<sup>†</sup> مقادیر داخل پارانتر مربوط به مرحله پسروی است.

پارامترهای نفوذ و ضریب زبری در آبیاری جویچه‌ای با در نظر گرفتن سه شکل هیدروگراف ورودی مختلف شامل ثابت، کاهشی و کابلی با استفاده از مدل اینرسی صفر به کار رفت و صحت‌سنجی نتایج با داده‌های مزرعه‌ای بررسی شد. نتایج نشان داد که روش بهینه‌سازی چند سطحی در برآورد پارامترهای معادله نفوذ کوستیاکف-لویس و ضریب زبری با دقت بیشتری نسبت به روش دو نقطه‌ای عمل کرد و حجم کل رواناب، حجم کل نفوذ و هیدروگراف خروجی با خطای نسبی کمتری (در مقایسه با روش دو نقطه‌ای) پیش‌بینی شد (۱۷).

در تحقیقی دیگر، دو روش بهینه‌سازی چندسطحی و موازنه حجم با هم مقایسه و طبق نتایج، عملکرد روش بهینه‌سازی چند سطحی، بهتر از روش موازنه حجم در برآورد پارامترهای نفوذ داشت (۱۸). در بررسی دیگر، دو روش بهینه‌سازی چند سطحی و مدل IPARM در تخمین پارامترهای معادله نفوذ کوستیاکف-لویس ارزیابی و مقایسه شد تا دقت هر یک در آبیاری جویچه‌ای تعیین شود.

مقدار متوسط خطای نسبی رواناب در روش بهینه‌سازی چندسطحی ۰/۵ درصد، در روش بهینه‌سازی پیشنهادی ۷/۸ درصد، و در روش دو نقطه‌ای ۳۵/۳ درصد است. همچنین، مقدار متوسط خطای نسبی حجم نفوذ در روش بهینه‌سازی چند سطحی ۰/۳ درصد، در روش بهینه‌سازی پیشنهادی ۲/۱ درصد و در روش دو نقطه‌ای ۹/۵ درصد است. روش بهینه‌سازی چند سطحی و روش بهینه‌سازی پیشنهادی حجم رواناب را در تخمین پارامترهای نفوذ و ضریب زبری وارد می‌کند. در نتیجه، با دقت بالاتری رواناب و در نتیجه حجم نفوذ را برآورد می‌کند. اما، روش دو نقطه‌ای فقط از داده‌های مرحله پیشروی در برآورد ویژگی‌های نفوذ استفاده می‌کند و بخشی از فرایند جریان را در تخمین پارامترها در نظر نمی‌گیرد (۳). بنابراین، قادر نیست حجم رواناب و حجم نفوذ را به درستی تخمین بزند که نتایج نیز بیانگر این حقیقت است. در مطالعه‌ای، روش بهینه‌سازی چند سطحی در تخمین

ارائه مدل بهینه‌سازی برآورد پارامترهای نفوذ و ضریب زبری آبیاری نواری با استفاده از داده‌های پیشروی و رواناب

روش بهینه‌سازی چند سطحی انجام شد. مطابق روش بهینه‌سازی چند سطحی، متوسط خطای نسبی تخمین حجم رواناب ۵/۰ درصد و متوسط ریشه میانگین مربعات خطای تخمین زمان پیشروی و پسروی به ترتیب ۳/۱ و ۳/۲ دقیقه محاسبه شد. نتایج نشان داد که روش بهینه‌سازی چند سطحی در تخمین پارامترهای نفوذ آبیاری نواری روش قابل قبول و بادقت مناسب است (۲). در این مطالعه نیز روش بهینه‌سازی چندسطحی و روش بهینه‌سازی پیشنهادی در برآورد حجم آب نفوذ یافته عملکرد مناسبی داشت و از هر دو روش می‌توان در تخمین پارامترهای نفوذ استفاده کرد.

نتایج حاکی از عملکرد قابل قبول هر دو روش در برآورد پارامترهای نفوذ در آبیاری جویچه‌ای بود (۶).

در تحقیقی، از دو مدل INFILT و IPARM و روش دونقطه‌ای الیوت و واکر در برآورد پارامترهای معادله نفوذ کاستیاکف- لوئیس در آبیاری جویچه‌ای معمولی، یک در میان ثابت و یک در میان متغیر استفاده شد. نتایج نشان داد که مدل IPARM دقیق‌ترین و مطمئن‌ترین عملکرد را در مقایسه با روش‌های دیگر دارد (۷).

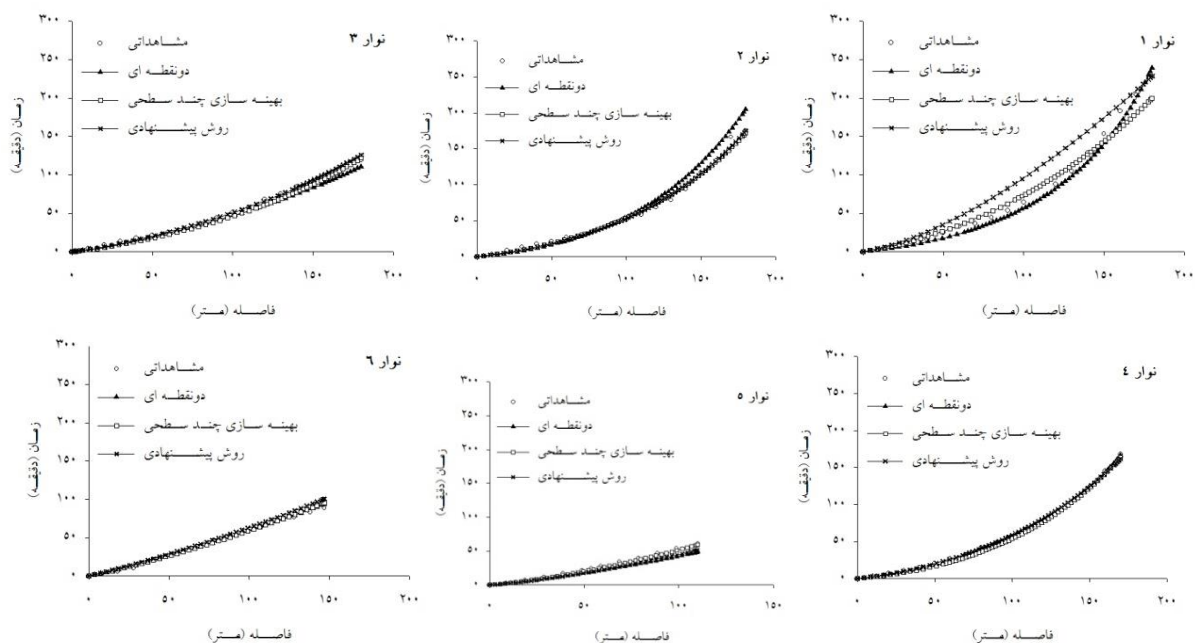
در مطالعه‌ای که هدف بهبود عملکرد آبیاری نواری بر اساس چهار متغیر دبی ورودی، زمان قطع جریان، طول و شیب نوار بود، واسنجی پارامترهای نفوذ نوارها بر اساس

جدول ۴. مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده رواناب و حجم نفوذ و خطای نسبی تخمین رواناب و نفوذ

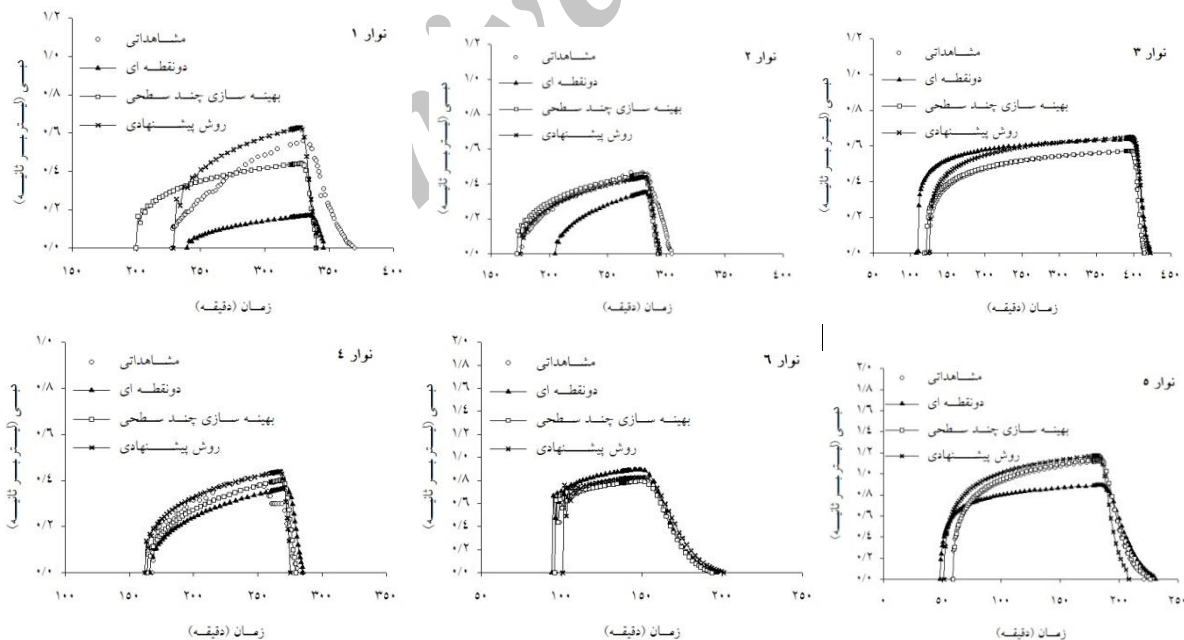
روش اندازه‌گیری	پارامتر	نوار ۱	نوار ۲	نوار ۳	نوار ۴	نوار ۵	نوار ۶
جریان ورودی (lit)		۲۱۱۲۰/۰	۲۶۸۹۲/۰	۳۱۵۹۰/۰	۲۱۳۷۲/۰	۱۶۰۲۰/۰	۴/۱۱۲۶۱
			۹۲				
داده‌های اندازه‌گیری شده	رواناب اندازه‌گیری شده (lit)	۲۹۲۰/۲	۲۴۷۱/۵	۸۵۶۰/۰	۲۰۲۴/۹	۸۴۲۰/۰	۳۲۴۰/۰
	حجم نفوذ اندازه‌گیری شده (lit)	۱۸۱۹۹/۸	۲۴۴۲۰/۵	۲۳۰۳۰/۰	۱۹۳۴۷/۱	۷۶۰۰/۰	۸۰۲۱/۴
روش دونقطه‌ای	رواناب شبیه‌سازی شده (lit)	۷۵۳/۵	۱۲۸۲/۳	۱۰۵۱۴/۱	۱۸۶۹/۹	۷۵۶۷/۳	۴۸۲۲/۶
	خطای نسبی رواناب (%)	۷۴/۲	۴۸/۱	۲۲/۸	۷/۷	۱۰/۱	۴۸/۸
	حجم نفوذ شبیه‌سازی شده (lit)	۲۰۳۶۷	۲۵۶۱۰	۲۱۰۷۶	۱۹۵۰۲	۸۴۵۳	۶۴۳۹
روش بهینه‌سازی چند سطحی	خطای نسبی حجم نفوذ (%)	۱۱/۹	۴/۹	۸/۵	۰/۸	۱۱/۲	۱۹/۷
	رواناب شبیه‌سازی شده (lit)	۲۹۰۸/۲	۲۴۷۰/۳	۸۵۵۹/۴	۲۰۲۰/۱	۸۳۲۹/۷	۳۲۷۴/۰
	خطای نسبی رواناب (%)	۰/۴۱	۰/۰۵	۰/۰۱	۰/۲۴	۱/۰۷	۱/۰۵
روش پیشنهادی	حجم نفوذ شبیه‌سازی شده (lit)	۱۸۲۱۲	۲۴۴۲۲	۲۳۰۳۱	۱۹۳۵۲	۷۶۹۰	۷۹۸۷
	خطای نسبی حجم نفوذ (%)	۰/۱	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۱/۲	۰/۴
	رواناب شبیه‌سازی شده (lit)	۳۱۸۵/۸	۲۲۹۹/۲	۹۴۲۰/۱	۲۲۸۹/۲	۸۶۹۲/۹	۳۳۷۳/۳
روش پیشنهادی	خطای نسبی رواناب (%)	۹/۰۹	۶/۹۷	۱۰/۰۵	۱۳/۰۵	۳/۲۴	۴/۱۲
	حجم نفوذ شبیه‌سازی شده (lit)	۱۷۹۳۴	۲۴۵۹۳	۲۲۱۷۰	۱۹۰۸۳	۷۳۲۷	۷۸۸۸
	خطای نسبی حجم نفوذ (%)	۱/۵	۰/۷	۳/۷	۱/۴	۳/۶	۱/۷

مدیریت آب و آبیاری

رزا جنوبی، وحید رضاوردی نژاد، و فریبرز عباسی



شکل ۳. مقایسه پیشروی اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده با روش‌های مختلف مورد مطالعه

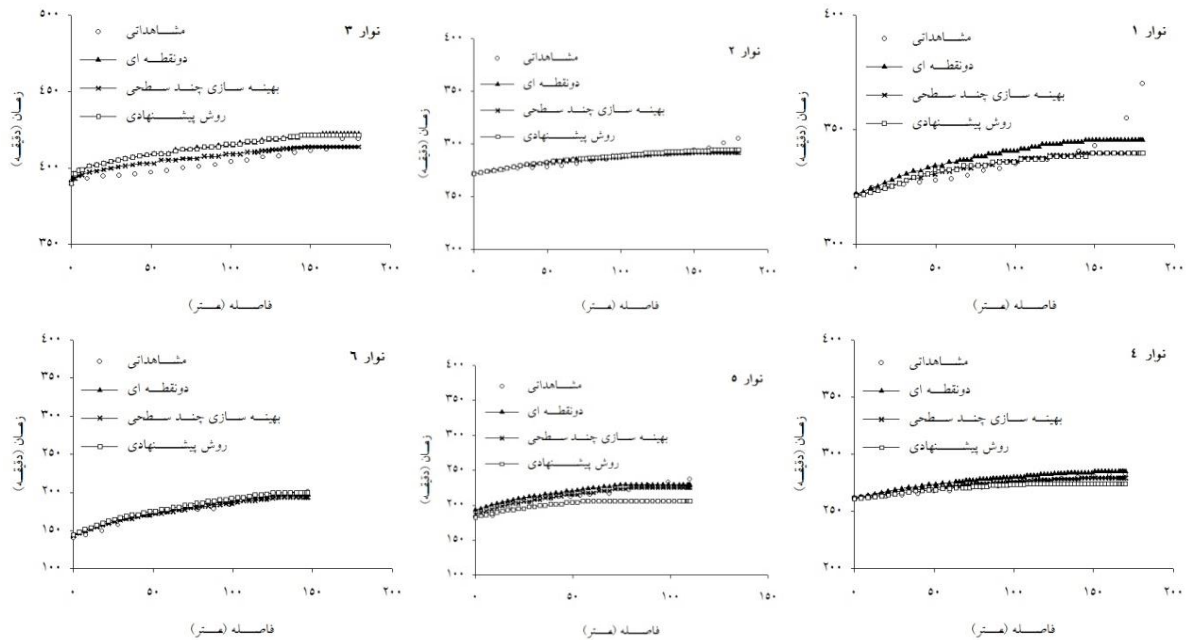


شکل ۴. مقایسه هیدروگراف رواناب اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده با روش‌های مختلف مورد مطالعه

مدیریت آب و آبیاری

دوره ۶ ■ شماره ۱ ■ بهار و تابستان ۱۳۹۵

## ارائه مدل بهینه‌سازی برآورد پارامترهای نفوذ و ضریب زبری آبیاری نواری با استفاده از داده‌های پیشروی و رواناب



شکل ۵. مقایسهٔ پسروی اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده با روش‌های مختلف مورد مطالعه

زمان قطع جریان و رسیدن به مقدار ثابت در دبی خروجی بستگی دارد، روش دونقطه‌ای به نسبت دقت پایین‌تری دارد و حجم رواناب را با دقت دو روش دیگر پیش‌بینی نمی‌کند. روش بهینه‌سازی پیشنهادی با در نظر گرفتن اطلاعات تمام مراحل آبیاری با دقت نسبتاً بالا پارامترهای نفوذ و ضریب زبری را برآورد و زمان‌های پیشروی و پسروی و رواناب را شبیه‌سازی می‌کند.

### منابع

۲۱. انصاری ح. (۱۳۹۰) آبیاری سطحی؛ ارزیابی، طراحی و شبیه‌سازی. انتشارات جهاد دانشگاه مشهد. ۳۶۰ ص.
۲۲. رضاوردی‌نژاد و، جنوبی ر. و عباسی ف. (۱۳۹۴) بررسی و تحلیل متغیرهای جریان و هندسی بر عملکرد بهینه آبیاری نواری با استفاده از مدل WinSRFR. تحقیقات آب و خاک ایران. ۴۶(۴): ۶۹۵-۷۰۶.

### نتیجه‌گیری

در این مطالعه، یک روش بهینه‌سازی توسعه و ارزیابی می‌شود که پارامترهای نفوذ و ضریب زبری را بر اساس داده‌های مراحل پیشروی و رواناب و بر اساس اصل بیلان حجمی برآورد می‌کند. سپس، دقت و کارایی آن با روش‌های دونقطه‌ای و بهینه‌سازی چند سطحی آبیاری نواری ارزیابی شد. نتایج نشان داد که روش بهینه‌سازی چند سطحی با اختلاف کمی پارامترهای نفوذ را بهتر از روش پیشنهادی برآورد می‌کند. روش بهینه‌سازی چند سطحی نیاز به محاسبات طولانی و وقت‌گیر دارد، در حالی که روش پیشنهادی روشی ساده است و به سرعت همگرا می‌شود. علاوه بر این، روش بهینه‌سازی چند سطحی نیاز به نرم‌افزار شبیه‌سازی آبیاری سطحی دارد. در شبیه‌سازی جریان مطابق روش دونقطه‌ای، بر اساس مشاهدات مزرعه‌ای یک مقدار برای  $n$  فرض می‌شود. علاوه بر این، مقداری تقریبی نیز برای  $f_0$  با روش ورودی-خروجی در نظر گرفته می‌شود. با توجه به اینکه این مقدار تقریبی  $f_0$  به

### مدیریت آب و آبیاری

دوره ۶ ■ شماره ۱ ■ بهار و تابستان ۱۳۹۵

۳۳. عباسی ف. (۱۳۹۱) اصول جریان در آبیاری سطحی. انتشارات کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران. ۲۱۱ ص.
۳۴. عباسی ف. (۱۳۷۳) استفاده از مدل‌های ریاضی در طراحی آبیاری نواری. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.
۳۵. عباسی ف.، جلینی م.، معیری م.، طائفه رضایی ح. و محمویان شوشتری م. (۱۳۸۷) تهیه یک مدل ریاضی برای طراحی و ارزیابی روش‌های آبیاری سطحی. گزارش نهایی، شماره ۱۲۲، مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی. ۱۷۵ ص.
۳۶. کمالی پ.، ابراهیمیان ح. و رضاوردی نژاد و. (۱۳۹۴). ارزیابی و مقایسه روش بهینه‌سازی چندسطحی و مدل IPARM در تخمین پارامترهای نفوذ در آبیاری جوپچه‌ای. مجله مدیریت آب و آبیاری. ۵(۱): ۴۳-۵۴.
27. Ebrahimian H. (2014) Soil infiltration characteristics in alternate and conventional furrow irrigation using different estimation methods. Korean Society of Civil Engineers. 18(6):1904-1911.
28. Ebrahimian H., Liaghat A., Ghanbarian-Alavijeh B. and Abbasi F. (2010) Evaluation of various quick methods for estimating furrow and border infiltration parameters. Irrigation Science. 28: 479-488.
29. Elliott R.L. and Walker W.R. (1982) Field evaluation of furrow infiltration and advance functions. Transactions of the ASAE. 25(2): 396-400.
30. Gillies M.H. and Smith R.J. (2005) Infiltration parameters from surface irrigation advance and run-off data. Irrigation Science. 24(1): 25-35.
31. Hamed S. and Sahib A. (2007) Runoff discharge from border and furrow irrigation. Engineering and Development. 11(2): 156-175.
32. Hanson B.R., Prichard T.L. and Schulbach H. (1993) Estimating furrow infiltration. Agricultural Water Management. 24(4): 281-298.
33. Khatri K.L. and Smith R.J. (2005) Evaluation of methods for determining infiltration parameters from irrigation advance data. Irrigation and Drainage. 54: 467-482.
34. Maihol J.C. and Gonzalze J.M. (1993) Furrow irrigation model for real-time applications on cracking soils. Irrigation and Drainage Engineering. 119(5): 768-783.
35. Mailapalli D.R., Wallender W.W., Raghuwanshi N.S. and Singh R. (2008) Quick method for estimating furrow infiltration. Irrigation and Drainage Engineering. 134(6): 788-795.
36. McClymont D.J. and Smith R.J. (1996) Infiltration parameters from optimization on furrow irrigation advance data. Irrigation Science. 17(1): 15-22.
37. Moravejalahkami B., Mostafazadeh-Fard B., Heidarpour M. and Abbasi F. (2009) Furrow infiltration and roughness prediction for different furrow inflow hydrographs using a zero-inertia model with a multilevel calibration approach. Biosystems Engineering. 103(3): 371-381.
38. Moravejalahkami B., Mostafazadeh-Fard B., Heidarpour M. and Abbasi F. (2012) Comparison of multilevel calibration and volume balance method for estimating furrow infiltration. Irrigation and Drainage Engineering. 138(8): 777-781.
39. Renault D. and Wallender W.W. (1997) Surface storage in furrow irrigation evaluation. Irrigation and Drainage Engineering. 123(6): 415-422.
40. Rodriguez J.A. and Martos J.C. (2008) SIPAR\_ID: Freeware for surface irrigation parameter identification. Environmental Modelling and Software. 25(11): 1487-1488.



41. Scaloppi E.J., Merkley G.P. and Willardson L.S. (1995) Intake parameters from advance and wetting phases of surface irrigation. *Irrigation and Drainage Engineering*. 121(1): 57-70.
42. Sepaskhah A.R. and Afshar-Chamanabad H. (2002) Determination of infiltration rate for every other furrow irrigation. *Biosystems Engineering*. 82(4): 479-484.
43. Shepard J.S., Wallender W.W. and Hopmans J.W. (1993) One method for estimating furrow infiltration. *Transactions of the ASAE*. 36(2): 395-404.
44. Upadhyaya S.K. and Raghuwanshi N.S. (1999) Semiempirical infiltration equations for furrow irrigation systems. *Irrigation and Drainage Engineering*. 125(4): 173-178.
45. Valiantzas J.D., Aggelides S. and Sassalou A. (2001) Furrow infiltration estimation from time to a single advance point. *Agricultural Water Management*. 52: 17-32.
46. Walker W.R. (2005) Multilevel calibration of furrow infiltration and roughness. *Irrigation and Drainage Engineering*. 131(2): 129-136.
47. Walker W.R. and Skogerboe G.V. (1987) *Surface irrigation. Theory and practice*. Prentice-Hall, NJ, USA.
48. Wang Q.J., Wang W.Y., Zhang J.H. and Ding X.L. (2005) Determination of Philip infiltration parameter and Manning roughness according to hydraulic factors in the advance of irrigation water. *Hydraulic Engineering*. 36(1): 125-128.
49. Weibo N., Liangjun F. and Xiaoyi M. (2012) Estimated infiltration parameters and manning roughness in border irrigation. *Irrigation and Drainage Engineering*. 61: 231-239.

Archive