

ارزیابی و مقایسه روش‌های مختلف تخمین پارامترهای نفوذ در سیستم‌های مختلف آبیاری جویچه‌ای و رژیم‌های مختلف جریان ورودی

وحید رضاوردی نژاد^{۱*}، حجت احمدی^۱، محمد همتی^۱ و حامد ابراهیمیان^۲

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۸/۲۷؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۱۲/۲۵)

چکیده

در این مطالعه، دو دسته از روش‌های تخمین پارامترهای نفوذ در آبیاری جویچه‌ای معمولی، یک در میان ثابت و یک در میان متغیر و نیز شرایط با کاهش و بدون کاهش جریان ورودی، ارزیابی و مقایسه گردید. از دسته روش‌های مبتنی بر داده‌های مرحله پیشروی جریان، چهار روش متداول شامل دو نقطه‌ای الیوت و واکر، یک نقطه‌ای والیانتراس، یک نقطه‌ای میلپالی و بهینه‌سازی رودریگز و مارتوس و از دسته روش‌های مبتنی بر داده‌های مراحل پیشروی، ذخیره و پسروی، روش بهینه‌سازی چندسطحی در نظر گرفته شد. جهت شبیه‌سازی مراحل آبیاری و مقدار نفوذ در هر روش، از مدل آبیاری سطحی WinSRFR استفاده شد. به منظور ارزیابی روش‌های مختلف، از ۱۳ سری داده صحرائی حاصل از دو مطالعه موردی در مناطق کرج و ارومیه استفاده گردید. مطابق نتایج، روش بهینه‌سازی چندسطحی برای هر سه سیستم جویچه‌ای معمولی، یک در میان ثابت و یک در میان متغیر، مراحل پیشروی، پسروی، نفوذ و رواناب را با دقت بالا پیش‌بینی کرد. روش بهینه‌سازی چندسطحی برای روش جویچه‌ای معمولی نسبت به روش‌های یک در میان ثابت و یک در میان متغیر، عملکرد دقیق‌تری در پیش‌بینی مراحل پیشروی و پسروی داشت و متوسط ریشه میانگین مربعات خطای (RMSE) تخمین پیشروی برای این سه روش آبیاری به ترتیب ۱/۳۷، ۱/۸ و ۱/۵۷ دقیقه و تخمین پسروی به ترتیب ۳/۷۶، ۵ و ۳/۰۳ دقیقه محاسبه گردید. در آزمایشات با کاهش دبی نیز بهینه‌سازی چندسطحی روش دقیق در پیش‌بینی پیشروی و پسروی بود و متوسط RMSE پیشروی و پسروی برای شرایط کاهش جریان به ترتیب ۳/۵۷ و ۲/۱۳ دقیقه و بدون کاهش جریان به ترتیب ۳/۸ و ۱/۳ دقیقه به دست آمد. روش بهینه‌سازی چندسطحی در فاز ذخیره نیز عملکرد دقیق‌تری نشان داد. متوسط خطای نسبی (RE) تخمین رواناب در آزمایشات جویچه‌ای معمولی، یک در میان ثابت و یک در میان متغیر به ترتیب ۰/۵، ۰/۴ و ۰/۴ درصد به دست آمد. متوسط خطای نسبی برآورد رواناب روش بهینه‌سازی چندسطحی، در شرایط کاهش دبی و بدون کاهش دبی به ترتیب ۱/۸۵ و ۰/۸۵ درصد محاسبه شد که نشان می‌دهد برای حالت بدون کاهش دبی نسبت به حالت کاهش دبی، عملکرد دقیق‌تر دارد. به این ترتیب جهت تخمین پارامترهای نفوذ در آبیاری جویچه‌ای، استفاده از داده‌های تمام مراحل آبیاری، عملکرد بهتر در پیش‌بینی مراحل آبیاری و اجزای بیلان آب دارد.

واژه‌های کلیدی: پیشروی، پسروی، رواناب خروجی، معادله نفوذ، مدل بیلان حجم، مدل WinSRFR

۱. گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه

۲. گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران

* نویسنده مسئول: v.verdinejad@urmia.ac.ir

مقدمه

نفوذ آب در خاک یکی از عوامل مهم در طراحی و ارزیابی سامانه‌های آبیاری سطحی است. نفوذ آب در خاک، فرایندی پیچیده و با زمان و مکان متغیر است که ممکن است از یک نقطه مزرعه به نقطه دیگر و از زمانی به زمان دیگر، چندین برابر تغییر کند (۲). مدل‌های تخمین نفوذ آب در خاک به سه دسته تحلیلی، فیزیکی و تجربی تقسیم می‌گردند. تخمین پارامترهای مدل‌های فیزیکی دشوار بوده و کمتر در آبیاری استفاده می‌شوند. همچنین حل معادلات تحلیلی پیچیده و به‌روش‌های عددی امکان‌پذیر است. لذا در طراحی و ارزیابی سیستم‌های آبیاری سطحی، از معادلات تجربی نفوذ استفاده می‌شود (۲). معادلات نفوذ کوستیاکف، کوستیاکف-لوئیس، سازمان حفاظت خاک آمریکا (SCS) و کوستیاکف اصلاح شده شاخه‌ای، مهم‌ترین مدل‌های تجربی نفوذ می‌باشند. عمده روش‌های تجربی تخمین پارامترهای نفوذ، مبتنی بر رابطه بیلان حجمی (رابطه ۱) بوده و براساس داده‌های پیشروی جریان توسعه یافته‌اند:

$$Q_t = \sigma_y A_s x + \int_{s=0}^{s=x} Z(t-t_s) ds \quad [1]$$

که در آن، y فاکتور شکل سطحی (-)، A_s سطح مقطع ورودی جریان (m^2)، Z حجم آب نفوذ یافته در واحد طول که توسط رابطه‌ای مانند کوستیاکف و ... بیان می‌شود (m^3/m)، s مسیر پیشروی جریان که از ابتدای مزرعه شروع و تا فاصله پیشروی x ادامه دارد (m)، x فاصله پیشروی جریان در زمان t (m)، t_s زمان رسیدن جریان به محل s (min)، t زمان پیشروی آب تا فاصله x (min) و Q دبی ورودی ($m^3 min^{-1}$) می‌باشد. روش‌های الیوت و واکر (۷)، یک نقطه‌ای شپرد و همکاران (۱۴)، یک نقطه‌ای والیانتراس و همکاران (۱۵)، یک نقطه‌ای میلاپالی و همکاران (۱۰)، دو نقطه‌ای ابراهیمیان و همکاران (۶)، بهینه‌سازی مک کلایمونت و اسمیت (۹) و بهینه‌سازی رودریگز و مارتوس (۱۳) از جمله روش‌های هستند که از یک، دو و یا چند نقطه مرحله پیشروی جریان برای تخمین پارامترها، استفاده می‌نمایند. با این حال آبیاری سطحی ترکیبی از چهار

مرحله پیشروی، ذخیره، تخلیه و پسروی (عقب‌نشینی) می‌باشد و لذا روشی برای تخمین نفوذ، دقیق‌تر خواهد بود که از اطلاعات تمام مراحل استفاده نماید (۲). روش‌های مبتنی بر معادله بیلان حجم، دارای این ضعف هستند که فقط از داده‌های مرحله پیشروی استفاده کرده و بخشی از فرایند جریان در تخمین پارامترها، نادیده گرفته می‌شود. برای تخمین دقیق‌تر پارامترهای نفوذ، به‌جای داده‌های پیشروی، باید از اطلاعات کل مراحل آبیاری استفاده نمود (۲، ۴ و ۱۶). جدیدترین و دقیق‌ترین روش‌های تخمین پارامترهای نفوذ، بر مبنای استفاده از اطلاعات تمام مراحل آبیاری می‌باشند (۵). روش بهینه‌سازی چند سطحی، یکی از جدیدترین و دقیق‌ترین روش‌های تخمین پارامترهای معادله کوستیاکف-لوئیس و نیز ضریب زبری مانینگ می‌باشد که برخلاف روش‌های قبلی، از اطلاعات تمام مراحل آبیاری استفاده می‌نماید و توسط واکر ارائه شده است (۱۶). تنها عیب این روش نیاز به محاسبات نسبتاً طولانی بوده و نیز به یک مدل ریاضی آبیاری سطحی برای شبیه‌سازی عوامل آبیاری نیاز دارد. در این تحقیق روش بهینه‌سازی چند سطحی به‌عنوان یک روش مبتنی بر داده‌های مراحل مختلف آبیاری سطحی، در نظر گرفته شد و با برخی روش‌های متداول مبتنی بر داده‌های پیشروی شامل روش دو نقطه‌ای الیوت و واکر (۷)، روش یک نقطه‌ای میلاپالی و همکاران (۱۰)، روش یک نقطه‌ای والیانتراس و همکاران (۱۵) و روش بهینه‌سازی رودریگز و مارتوس (۱۳) مقایسه گردید. برای مدل ریاضی مورد نیاز در روش بهینه‌سازی چند سطحی و سایر روش‌ها از مدل WinSRFR استفاده گردید که براساس دو مدل ریاضی اینرسی-صفر و موج کینماتیکی محاسبات را انجام می‌دهد (۳ و ۴). مدل اینرسی-صفر به‌سبب سادگی، دقت و دامنه کاربرد زیاد، مدل برتر در مدل‌سازی هیدرولیک جریان روی سطح خاک بوده و دقت مدل هیدرودینامیک را داشته و فاقد نقاط ضعف آن (ناپایداری) می‌باشد (۲ و ۸). با توجه به این‌که نفوذ در آبیاری جویچه‌ای تابع نوع سیستم و مدیریت جریان ورودی به جویچه است؛ در این مطالعه سه نوع سیستم آبیاری جویچه‌ای معمولی،

$$k = \frac{\frac{Qt_1}{x_1} - \sigma_y A_0 - \frac{f_0 t_1}{1+r}}{\sigma_z t_1^a} \quad [5]$$

که در آن، A_0 سطح مقطع ورودی جریان، x فاصله پیشروی، t زمان پیشروی، Q دبی ورودی به جویچه، اندیس های ۱ و ۲، مربوط به پیشروی تا نصف و انتهای جویچه می باشند. σ فاکتور شکل سطحی بوده که بین ۰/۷ تا ۰/۸ متغیر بوده و الیوت و واکر ۰/۷۷۸ و رونالت و والندر مقدار ۰/۷۹ را پیشنهاد کردند (۷ و ۱۲). z نیز فاکتور شکل زیرسطحی بوده و از رابطه ۶ محاسبه می گردد (۷):

$$\sigma_z = \frac{a+r(1-a)+1}{(1+a)(1+r)} \quad [6]$$

در این روش، فرض بر این است که f قبلاً از سایر روشها مانند روش ورودی- خروجی تعیین شده است.

روش یک نقطه ای والیانتراس و همکاران (۱۵)

این روش یک نقطه ای و برای تخمین پارامترهای نفوذ معادله SCS توسعه یافته است:

$$Z = (kt^a + c) \frac{P}{w} \quad [7]$$

که در آن Z حجم نفوذ تجمعی در واحد طول (m^3/m)، t فرصت نفوذ (min)، a ، c (برابر ۷ میلی متر) و k ($m^3/m/min^a$) پارامترهای ثابت، w عرض جویچه (m) و P محیط خیس شده (m) بوده که از رابطه زیر محاسبه می گردد:

$$P = 0.265 \left(\frac{6.0nQ}{1000\sqrt{S}} \right)^{0.425} + 0.227 \quad [8]$$

که در آن Q دبی ورودی (m^3/min)، n ضریب زبری مانینگ، S شیب جویچه (m/m) می باشند. والیانتراس برای تعیین مجهولات (a و k)، با تابع کردن یک مجهول از دیگری، دو مجهول معادله را به یک مجهول کاهش داد و با روش غیرخطی حداقل مربعات، رابطه زیر را (با حداکثر خطای ۵ درصد) ارائه کرد (۱۵):

یک در میان ثابت و یک در میان متغیر و نیز شرایط با کاهش و بدون کاهش جریان ورودی، در نظر گرفته شد. کارایی روش های مبتنی بر فاز پیشروی با روش مبتنی بر داده های تمام مراحل آبیاری در تخمین پارامترهای نفوذ، ارزیابی و برای شرایط مختلف جریان ورودی و نوع سیستم جویچه ای مورد مقایسه قرار گرفت.

مواد و روش ها

روش های دو نقطه ای الیوت و واکر، یک نقطه ای والیانتراس و همکاران، یک نقطه ای میلپالی و همکاران و روش بهینه سازی رودریگز و مارتوس از متداول ترین روش های مبتنی بر داده های پیشروی می باشند. تشریح معادلات این روش ها به صورت ذیل می باشد.

روش دو نقطه ای الیوت و واکر (۷)

این روش بر اساس معادله بیلان حجم (پیوستگی) و فرم تابع نمایی مرحله پیشروی و برای آبیاری جویچه ای، توسعه یافته و برای سامانه های آبیاری کرتی و نواری نیز قابل استفاده است. در این روش از دو نقطه میانی و انتهای پیشروی برای تخمین دو پارامتر معادله کوستیاکف- لوئیس (a و k) استفاده می شود.

$$Z = kt^a + f_0 t \quad [2]$$

که در آن Z حجم نفوذ تجمعی در واحد طول (m^3/m)، f_0 سرعت نفوذ نهایی ($m^3/m/min$)، t زمان (min) و a و k ($m^3/m/min^a$) پارامترهای تجربی معادله نفوذ کوستیاکف- لوئیس می باشند. با فرض رابطه توانی پیشروی و لگاریتم گرفتن از طرفین آن برای دو نقطه میانی و انتهای جویچه، ضرایب ثابت p و r محاسبه می گردد (۷):

$$x = pt^r \quad [3]$$

$$a = \frac{\log\left(\frac{Qt_1}{x_1} - \sigma_y A_0 - \frac{f_0 t_1}{1+r}\right) - \log\left(\frac{Qt_2}{x_2} - \sigma_y A_0 - \frac{f_0 t_2}{1+r}\right)}{\log\left(\frac{t_1}{t_2}\right)} \quad [4]$$

زده شود. میلپالی و همکاران برای تخمین فاکتور شکل زیرسطحی، رابطه ۱۴ را پیشنهاد دادند (۱۰). دو مجهول r و a با استفاده از solver برنامه اکسل و براساس الگوریتم بهینه‌سازی تکاملی تعیین شدند.

$$\sigma_z = 1 - \frac{ar}{1+r} + \frac{ar(a-1)}{2(2+r)} \quad [14]$$

روش بهینه‌سازی رودریگز و مارتوس (۱۳)

رودریگز و مارتوس یک روش بهینه‌سازی معکوس چند هدفه را به منظور تخمین پارامترهای معادله نفوذ کوستیاکف (رابطه ۱۵) و ضریب زبری مانینگ (n)، براساس یک مدل هیبرید از بیلان حجم، شبکه عصبی مصنوعی و الگوریتم بهینه‌سازی تکاملی تفاضلی، توسعه و برای این منظور نرم‌افزار SIPAR-ID ارائه کردند (۱۳).

$$Z = kt^a \quad [15]$$

مدل SIPAR-ID براساس داده‌های پیشروی، ضرایب نفوذ و زبری مانینگ را به نحوی پیدا می‌کند که مجموع مربعات اختلاف بین مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده پیشروی جریان، حداقل شود. توابع هدف در نظر گرفته شده در این مدل، عبارتند از:

$$OF_1 = \text{Min. SSE}_{\text{Advance Distance}} = \sum_{i=1}^{N_s} (x_i - \bar{x}_i)^2 \quad [16]$$

$$OF_2 = \text{Min. SSE}_{\text{Flow Depth}} = \sum_{t=1}^{N_t} (Y_t - \bar{Y}_t)^2$$

که در آن SSE مجموع مربعات خطا، x_i و \bar{x}_i پیشروی اندازه‌گیری و برآورده شده مدل، Y_t و \bar{Y}_t عمق جریان اندازه‌گیری و برآورده شده مدل در یک ایستگاه مشخص در زمان‌های مختلف، N_s تعداد ایستگاه‌های اندازه‌گیری پیشروی جریان و N_t تعداد اندازه‌گیری‌های عمق جریان در زمان‌های مختلف در ایستگاه مشخص می‌باشند. تابع هدف نهایی در مدل، به صورت رابطه ۱۷ می‌باشد:

$$OF_{\text{Aggre.}} = w(OF_1) + (1-w)(OF_2) \quad [17]$$

$$k(a) = \frac{14088a^{25} + 0.148(-\ln a)^{-1/652}}{1000} \quad [9]$$

با جایگزینی معادله نفوذ SCS در بیلان حجمی و حل معادله برای دو نقطه از مرحله پیشروی با فرض این که t_1 نصف t_2 باشد، و نیز در نظر گرفتن رابطه توانی پیشروی (رابطه ۳)، روابط زیر را استخراج کردند:

$$x_1 = x_2 \times \frac{Qt_1}{(0.5)^a (Qt_2 - \sigma_y A_o x_2 - cPx_2) + \sigma_y A_o x_2 + cPx_2} \quad [10]$$

$$r = \frac{\log\left(\frac{x_1}{x_2}\right)}{\log\left(\frac{t_1}{t_2}\right)} = \frac{\log\left[\frac{(0.5Qt_1)/\left((0.5)^a (Qt_2 - \sigma_y A_o x_2 - cPx_2) + \sigma_y A_o x_2 + cPx_2\right)}{\log(0.5)}\right]}{\log(0.5)} \quad [11]$$

$$\sigma_z kt_1^a = \frac{Qt_2 - \sigma_y A_o x_2 - cPx_2}{x_2 P} \quad [12]$$

تنها مجهول رابطه ۱۲، a بوده که با یک الگوریتم بهینه‌سازی استخراج می‌شود. به این صورت که ابتدا یک مقدار برای a فرض و سپس از روابط ۱۰، ۱۱ و ۱۲ به ترتیب x_1 ، r و k محاسبه و دوباره a محاسبه و با مقدار اولیه مقایسه می‌شود (۱۵). در این مطالعه، برای محاسبه a از solver برنامه اکسل استفاده گردید.

روش یک نقطه‌ای میلپالی و همکاران (۱۰)

روشی برای تخمین پارامترهای نفوذ کوستیاکف- لوئیس بوده و مانند روش الیوت و واکر از تابع نمایی برای پیشروی استفاده می‌کند. در این روش، پارامتر k مانند روش الیوت و واکر از رابطه ۵ محاسبه و برای برآورد a و r رابطه زیر را پیشنهاد کرد (۱۰):

$$f(r, a) = r \log(0.5) - \log \left(\frac{Q(0.5t_2)}{(0.5)^a \left[Qt_2 - \sigma_y A_o x_2 - \frac{f_o t_2 x_2}{1+r} + \sigma_y A_o x_2 + \frac{f_o (0.5t_2) x_2}{1+r} \right]} \right) = 0 \quad [13]$$

دو مجهول (r و a) با یک الگوریتم بهینه‌سازی بایستی تخمین

$$a^* = \min \left[\frac{1}{N} \sqrt{\sum_{i=1}^N (R_i - \bar{R}_i)^2} \right]_{k^*, f^*, n} \quad [20]$$

که در آن a^* مقدار برآورد شده a است. پس از تخمین a مراحل قبلی برای برآورد مجدد k و f تکرار می شوند. نهایتاً ضریب زبری مانینگ (n) از داده های مرحله پسروی برآورد می شود:

$$n^* = \min \left[|t_R - \bar{t}_R| \right]_{a^*, f^*, k^*} \quad [21]$$

که در آن t_R و \bar{t}_R مقادیر زمان پسروی اندازه گیری و شبیه سازی شده می باشند. پس از تخمین n کلیه مراحل قبلی برای برآورد مجدد a ، k و f با n^* تکرار می شوند (۲ و ۱۶).

داده های مورد استفاده

برای ارزیابی عملکرد روش ها، از اطلاعات سری آزمایشات صحرایی آبیاری جویچه ای استفاده گردید. برای این منظور از داده های دو مطالعه موردی استفاده گردید که در ادامه تشریح می گردد. مطالعه موردی اول مربوط به تحقیق ابراهیمیان و همکاران بوده که در مزرعه پژوهشی پردیس کشاورزی و منابع طبیعی کرج انجام گردید. در این مطالعه موردی، فواصل و طول جویچه ها به ترتیب ۰/۷۵ و ۸۶ متر، شیب ۰/۰۹۳ متر بر متر و تحت کشت ذرت علوفه ای و با بافت خاک لوم رسی انجام گردید. در این تحقیق، سه روش آبیاری جویچه ای: معمولی، یک در میان ثابت و یک در میان متغیر، تحت آزمایش قرار گرفت. ۹ سری آزمایش به صورت سیستم انتها باز بود. مشخصات داده های صحرایی مورد استفاده در این مطالعه موردی، مطابق جدول (۱) می باشد. در مطالعه موردی دوم از چهار سری داده آبیاری جویچه ای استفاده به عمل آمد که توسط عباسی و همکاران، جمع آوری شده است. مشخصات این سری از داده های مورد استفاده، به صورت جدول (۲) می باشد. سری آزمایشات ۱ تا ۳ با کاهش دبی (Cutback) و آزمایش سری چهارم، بدون رژیم کاهش جریان می باشد. پیشروی و پسروی در تمام آزمایش ها، با فواصل ۱۰ متر و دبی ورودی و خروجی

که در آن w پارامتر وزن می باشد. مدل SIPAR-ID علاوه بر داده های جریان ورودی و پیشروی، نیازمند هندسه مقطع و داده های عمق جریان در یک ایستگاه معین می باشد. متغیرهای تصمیم مدل بهینه سازی شامل ضرایب معادله نفوذ کوستیاکف و ضریب زبری مانینگ بوده و دامنه ای برای متغیرها و قيود مدل بهینه سازی، تعریف می گردند (۱۳).

روش بهینه سازی چند سطحی

روش بهینه سازی چند سطحی به عنوان یک روش مبتنی بر داده های مراحل مختلف آبیاری سطحی در نظر گرفته شد. بر خلاف روش دو نقطه ای الیوت و واکر، f نیز در این روش از داده های مراحل آبیاری برآورد می شود. علاوه بر پارامترهای نفوذ، ضریب زبری مانینگ نیز توسط این روش قابل تخمین است. گام اول بهینه سازی چند سطحی، تخمین اولیه برای پارامترهای مجهول می باشد. در گام دوم به ترتیب اولویت، با بهینه سازی برآورد می شوند. واکر با آزمون و خطا، ترتیب تخمین k ، f ، a و n را مناسب ترین گزینه پیشنهاد کرد. پارامتر k با استفاده از پیشروی جریان، به صورت زیر برآورد می شود (۲ و ۱۶):

$$k^* = \min \left[|t_L - \bar{t}_L| \right]_{a, f, n} \quad [18]$$

که در آن k^* مقدار برآورد شده k ، t_L و \bar{t}_L مقدار اندازه گیری و شبیه سازی شده زمان پیشروی به ازای مقادیر تخمین اولیه f_0 و a می باشد. f_0 از هیدروگراف رواناب خروجی تعیین می شود:

$$f_0^* = \min \left[\frac{1}{N} \sqrt{\sum_{i=1}^N (R_i - \bar{R}_i)^2} \right]_{a, k^*, n} \quad [19]$$

که در آن f_0^* مقدار برآورد شده f_0 ، R_i و \bar{R}_i مقادیر اندازه گیری و شبیه سازی شده دبی رواناب در زمان های مختلف و N تعداد نقاط اندازه گیری رواناب است. پس از تخمین f_0^* ، مرحله قبل با f_0^* مجدداً برای تخمین k تکرار شود. ضریب a با استفاده از داده های هیدروگراف خروجی و به صورت زیر برآورد می شود:

جدول ۱. مشخصات داده‌های صحرائی مورد استفاده برای ۹ سری آزمایش مطالعه موردی اول

سری آزمایش صحرائی*									متغیر	پارامتر آبیاری
۱۲AF	۸AF	۴AF	۱۲FF	۸FF	۴FF	۱۲TF	۸TF	۴TF		
۰/۳۲	۰/۳۸۸	۰/۲۶	۰/۳۲	۰/۳۸۸	۰/۲۶	۰/۳۲	۰/۳۸۸	۰/۲۶	Q _۱ **	دبی ورودی (lit/s)
۰/۰۰۹۳	۰/۰۰۹۳	۰/۰۰۹۳	۰/۰۰۹۳	۰/۰۰۹۳	۰/۰۰۹۳	۰/۰۰۹۳	۰/۰۰۹۳	۰/۰۰۹۳	S	شیب جویچه (m/m)
۸۶	۸۶	۸۶	۸۶	۸۶	۸۶	۸۶	۸۶	۸۶	L	طول جویچه (m)
۳۰۰	۳۶۰	۲۴۰	۳۰۰	۳۶۰	۲۴۰	۳۰۰	۳۶۰	۲۴۰	T _{co}	زمان قطع جریان (min)
۰/۷۵	۰/۷۵	۰/۷۵	۰/۷۵	۰/۷۵	۰/۷۵	۰/۷۵	۰/۷۵	۰/۷۵	w	عرض جویچه (m)
۰/۴۴	۰/۴۳	۰/۴۴	۰/۴۲	۰/۴۲	۰/۴۱	۰/۴۵	۰/۴۷	۰/۴۶	۱	پارامترهای هیدرولیکی
۲/۸۰	۲/۸۳	۲/۸۱	۲/۸۴	۲/۸۸	۲/۹۱	۲/۸۲	۲/۸۱	۲/۸۴	۲	مقطع (-)
۰/۹۸	۰/۹۵	۰/۹۳	۱/۰۵	۱/۰۷	۱/۰۶	۱/۰۸	۱/۰۷	۱/۰۷	۱	پارامترهای هندسی
۱/۵۵	۱/۵۵	۱/۵۴	۱/۵۸	۱/۵۸	۱/۵۹	۱/۶۳	۱/۶	۱/۵۸	۲	مقطع (-)

TF: آبیاری جویچه‌ای معمولی، FF: آبیاری جویچه‌ای یک در میان ثابت، AF: آبیاری جویچه‌ای یک در میان متغیر و اندیس‌ها مربوط به نوبت آبیاری می‌باشند

** دبی ورودی به صورت هیدروگراف بوده و ارقام این جدول متوسط وزنی دبی ورودی می‌باشند

جدول ۲. مشخصات داده‌های صحرائی مورد استفاده برای چهار سری آزمایش مطالعه موردی دوم

سری آزمایش صحرائی				متغیر	پارامتر آبیاری
سری ۴	سری ۳	سری ۲	سری ۱		
۱/۳۰۶	۱/۱۴	۱/۲۱	۰/۹۸۸	Q _۱ **	دبی ورودی (lit/s)
۱۲۰	۸۷	۵۷	۳۲	T _۲	زمان کاهش دبی (min)
-	۰/۶۴۷	۰/۷۳۶	۰/۶۲۳	Q _۲ **	دبی کاهش یافته (lit/s)
۰/۰۱۷۵	۰/۰۱۷۴	۰/۰۱۷۱	۰/۰۱۷۳	S	شیب جویچه (m/m)
۲۰۰	۲۰۰	۲۰۰	۲۰۰	L	طول جویچه (m)
۱۲۰	۱۲۰	۱۲۰	۱۲۰	T _{co}	زمان قطع جریان (min)
۰/۷۵	۰/۷۵	۰/۷۵	۰/۷۵	w	عرض جویچه (m)
۰/۴۲۲	۰/۳۹	۰/۳۸	۰/۳۵۷	۱	پارامترهای هیدرولیکی
۲/۷۹	۲/۷۹	۲/۷۸	۲/۷۷	۲	مقطع (-)
۰/۳۹	۰/۳۸	۰/۴۰	۰/۴۳	σ _۱	پارامترهای هندسی
۰/۶۰	۰/۵۹	۰/۵۹	۰/۵۸	σ _۲	مقطع (-)

** دبی ورودی به صورت هیدروگراف بوده و ارقام این جدول متوسط وزنی دبی ورودی و خروجی می‌باشند.

۱/۳۷ و ۲/۰۳ دقیقه می‌باشد. در جویچه‌های یک در میان ثابت (FF۴، FF۸ و FF۱۲)، دقیق‌ترین روش، بهینه‌سازی چندسطحی و سپس روش بهینه‌سازی رودریگز و مارتوس حاصل شد. متوسط RMSE روش‌های بهینه‌سازی چندسطحی و رودریگز و مارتوس در سری آزمایشات جویچه‌های یک در میان ثابت به ترتیب ۱/۸ و ۲/۸۶ دقیقه محاسبه گردید. برای جویچه‌های یک در میان متغیر نیز نتایج مشابه به دست آمد.

روش بهینه‌سازی رودریگز و مارتوس و بهینه‌سازی چندسطحی در جویچه‌های یک در میان متغیر، دقیق‌ترین روش بوده و متوسط RMSE تخمین پیشروی در این جویچه‌ها به ترتیب ۱/۴ و ۱/۵۷ دقیقه محاسبه گردید.

به طور کلی و برای تمام آزمایشات جویچه‌های معمولی، یک در میان ثابت و متغیر و برای ۹ سری آزمایش، حداقل RMSE برآورد پیشروی در روش‌های بهینه‌سازی چندسطحی و بهینه‌سازی رودریگز و مارتوس به دست آمد؛ به طوری که متوسط RMSE برای این دو روش به ترتیب ۱/۶ و ۲/۱ دقیقه محاسبه گردید. متوسط RMSE برای روش‌های والیانتراس و همکاران، دو نقطه‌ای الیوت و واکر و میلپالی و همکاران، به ترتیب ۳/۳، ۵/۵ و ۷/۰ دقیقه به دست آمد. به این ترتیب در پیش‌بینی زمان پیشروی، روش‌های بهینه‌سازی چندسطحی، والیانتراس و همکاران و بهینه‌سازی رودریگز و مارتوس عملکرد مناسب و نسبتاً دقیق داشتند. براساس نتایج حاصل، روش بهینه‌سازی چندسطحی برای روش جویچه‌ای معمولی (تیمارهای TF) نسبت به روش جویچه‌های یک در میان ثابت (تیمارهای FF) و یک در میان متغیر (تیمارهای AF)، عملکرد دقیق‌تری در پیش‌بینی مرحله پیشروی داشت و متوسط RMSE برای این سه نوع سیستم آبیاری جویچه‌ای به ترتیب ۱/۳۷، ۱/۸ و ۱/۵۷ دقیقه محاسبه شد. عملکرد روش بهینه‌سازی چندسطحی (در پیش‌بینی فاز پیشروی) برای جویچه‌های یک در میان متغیر نسبت به یک در میان ثابت، دقیق‌تر می‌باشد.

تأثیر نوع هیدروگراف جریان ورودی بر روش بهینه‌سازی تخمین پارامترهای نفوذ، مطابق جدول ۴ می‌باشد. در سری آزمایشات با کاهش دبی (آزمایشات ۱ تا ۳)، بهینه‌سازی چندسطحی روش

با استفاده از فلوم‌های WSC اندازه‌گیری شد. در سری آزمایش‌های دوم، طول جویچه‌ها ۲۰۰ متر و زمان قطع جریان ۱۲۰ دقیقه بود. به منظور ارزیابی عملکرد روش‌ها در تخمین حجم رواناب، از معیار خطای نسبی (RE) و پیشروی و پسروی از شاخص ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) استفاده شد.

$$RE = \frac{|V_p - V_m|}{V_m} \times 100 \quad [22]$$

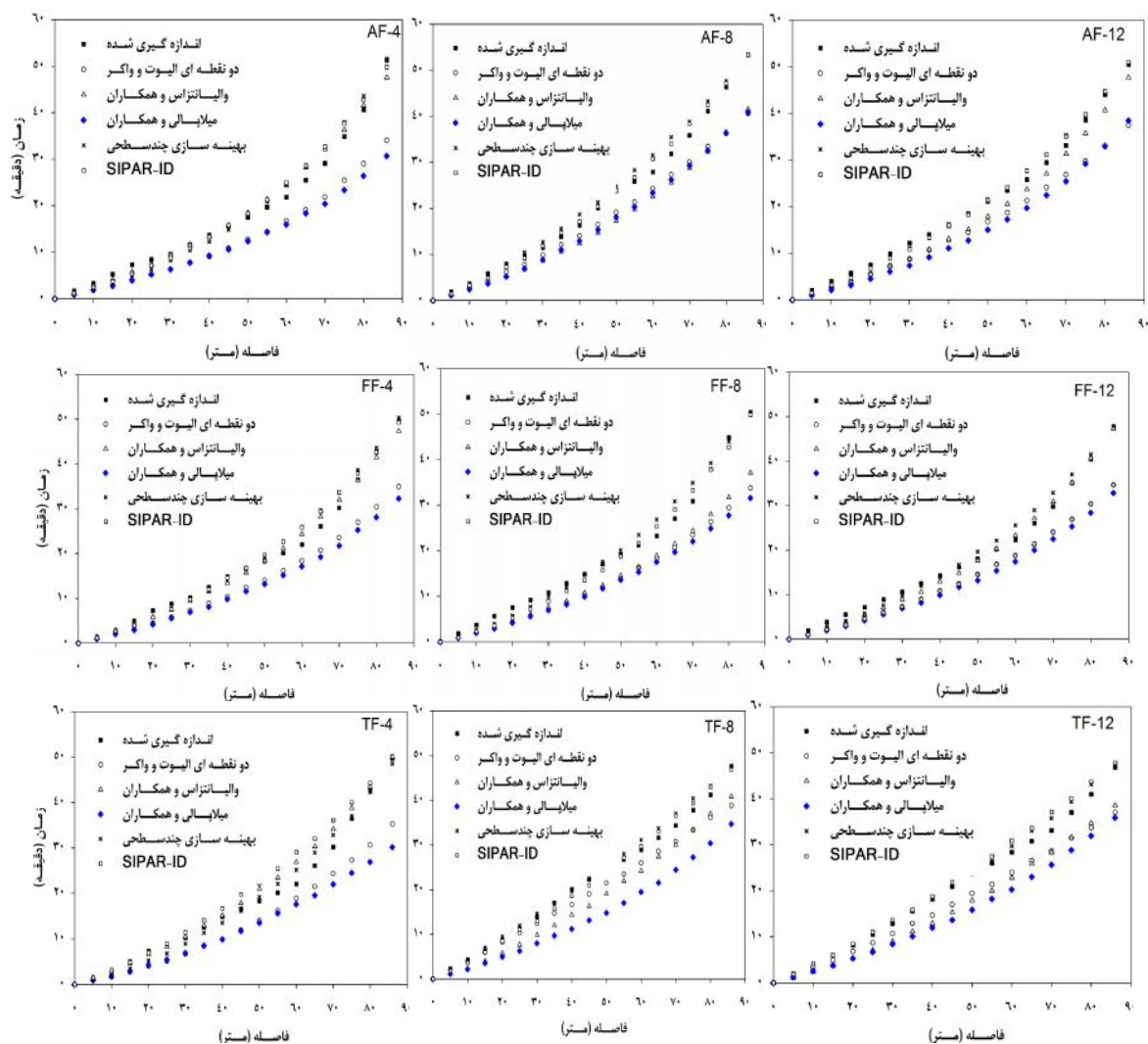
$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (T_{mi} - T_{pi})^2}{N}} \quad [23]$$

که در آن، V_p حجم نفوذ یا رواناب پیش‌بینی شده، V_m حجم نفوذ یا رواناب اندازه‌گیری شده، T_m زمان پیشروی یا پسروی اندازه‌گیری شده، T_p زمان پیشروی یا پسروی پیش‌بینی شده، N تعداد ایستگاه‌های اندازه‌گیری پیشروی و پسروی می‌باشند.

نتایج و بحث

پیشروی و پسروی

زمان پیشروی اندازه‌گیری شده و برآورد شده توسط پنج روش تخمین پارامترهای نفوذ، برای مطالعه موردی اول در شکل (۱) ارائه شده است. در اکثر سری آزمایشات مربوط به جویچه‌های معمولی، یک در میان ثابت و یک در میان متغیر، روش‌های دو نقطه‌ای (الیوت و واکر) و میلپالی و همکاران، زمان پیشروی را کمتر از مقادیر اندازه‌گیری شده، برآورد نمودند. روش والیانتراس و همکاران در تخمین پیشروی، در برخی موارد بیش برآورد و در برخی دیگر کم برآورد نشان داد. روش‌های بهینه‌سازی چندسطحی و روش بهینه‌سازی رودریگز و مارتوس، تقریباً منطبق بر مقادیر اندازه‌گیری شده پیشروی بوده و عملکرد بهتری نسبت به سایر روش‌ها نشان دادند. مقادیر RMSE تخمین پیشروی در سری آزمایش‌های مطالعه موردی اول، در جدول (۳) ارائه گردیده است. در سری آزمایشات جویچه‌های معمولی (TF۴، TF۸ و TF۱۲)، حداقل خطای تخمین زمان پیشروی مربوط به روش بهینه‌سازی چندسطحی سپس روش بهینه‌سازی رودریگز و مارتوس به دست آمد که متوسط RMSE این دو روش به ترتیب



شکل ۱. مقایسه مرحله پیشروی اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده توسط مدل WinSRFR با روش‌های مختلف برای مطالعه موردی اول

جدول ۳. مقادیر ریشه میانگین مربعات خطای (RMSE) برآورد زمان پیشروی در ۹ سری آزمایش مطالعه موردی اول (برحسب دقیقه)

سری آزمایش صحرائی

متوسط	جویچه‌های یک در میان متغیر			جویچه‌های یک در میان ثابت			جویچه‌های معمولی			روش تخمین
	۱۲AF	۸AF	۴AF	۱۲FF	۸FF	۴FF	۱۲TF	۸TF	۴TF	
۵/۵	۵/۶	۵/۱	۶/۶	۵/۳	۷/۲	۶/۰	۴/۳	۳/۴	۶/۰	دو نقطه‌ای الیوت و واکر
۳/۳	۲/۵	۵/۷	۱/۷	۱/۲	۶/۱	۱/۳	۴/۸	۴/۳	۲/۲	والیانتراس و همکاران
۷/۰	۶/۳	۵/۶	۷/۷	۶/۳	۸/۱	۷/۲	۶/۴	۸/۱	۷/۶	میلاپالی و همکاران
۱/۶	۱/۰	۱/۸	۱/۹	۱/۷	۱/۹	۱/۸	۱/۲	۱/۳	۱/۶	بهینه‌سازی چندسطحی
۲/۱	۱/۱	۱/۲	۱/۹	۵/۳	۱/۶	۱/۷	۱/۷	۱/۱	۳/۳	بهینه‌سازی رودریگز و مارتوس

جدول ۴. مقادیر ریشه میانگین مربعات خطای برآورد زمان پیشروی برای چهار سری آزمایش مطالعه موردی دوم (برحسب دقیقه)

متوسط	سری آزمایش صحرائی				روش برآورد
	سری ۴	سری ۳	سری ۲	سری ۱	
۶/۱	۱۳/۴	۸/۰	۲/۳	۰/۸	دو نقطه ای الیوت و واکر
۸/۵	۱۴/۶	۱۱/۴	۶/۷	۱/۱	والیانتزاس و همکاران
۳/۷	۵/۵	۴/۸	۳/۱	۱/۵	میلاپالی و همکاران
۳/۶	۳/۸	۶/۸	۲/۵	۱/۴	بهینه سازی چندسطحی
۵/۲	۹/۵	۸/۰	۲/۱	۱/۲	بهینه سازی رودریگز و مارتوس

جدول ۵. ریشه میانگین مربعات خطای (RMSE) برآورد زمان پسروی برای سری آزمایشات مطالعه موردی اول (برحسب دقیقه)

متوسط	سری آزمایش صحرائی									روش تخمین
	جویچه های یک در میان متغیر			جویچه های یک در میان ثابت			جویچه های معمولی			
	AF۱۲	AF۸	AF۴	FF۱۲	FF۸	FF۴	TF۱۲	TF۸	TF۴	
۴/۰	۳/۰	۱/۲	۴/۷	۴/۹	۵/۳	۵/۳	۵/۰	۵/۷	۱/۰	دو نقطه ای الیوت و واکر
۳/۸	۲/۴	۱/۰	۳/۹	۴/۳	۵/۰	۴/۷	۵/۶	۶/۸	۰/۸	والیانتزاس و همکاران
۴/۱	۳/۱	۱/۲	۴/۶	۴/۹	۵/۳	۵/۳	۵/۳	۶/۲	۰/۹	میلاپالی و همکاران
۳/۹	۳/۱	۱/۲	۴/۸	۴/۹	۵/۲	۴/۹	۴/۶	۶/۰	۰/۷	بهینه سازی چندسطحی
۴/۱	۳/۱	۱/۲	۴/۷	۴/۹	۵/۴	۵/۳	۵/۱	۵/۹	۰/۹	بهینه سازی رودریگز و مارتوس

جدول ۶. ریشه میانگین مربعات خطای برآورد زمان پسروی برای سری آزمایشات مطالعه موردی دوم (برحسب دقیقه)

متوسط	سری آزمایش صحرائی				روش برآورد
	سری ۴	سری ۳	سری ۲	سری ۱	
۲/۱	۱/۳	۱/۵	۳/۰	۲/۴	دو نقطه ای الیوت و واکر
۲/۴	۱/۸	۲/۵	۲/۹	۲/۴	والیانتزاس و همکاران
۲/۹	۳/۸	۱/۷	۴/۲	۱/۸	میلاپالی و همکاران
۹/۱	۱/۳	۲/۳	۱/۵	۲/۶	بهینه سازی چندسطحی
۲/۸	۲/۳	۱/۰	۴/۶	۳/۳	بهینه سازی رودریگز و مارتوس

حاصل شد. مطابق نتایج در هر دو حالت کاهش جریان و بدون کاهش جریان، بهینه سازی چندسطحی دقیق ترین روش می باشد. در پیش بینی پسروی در مطالعه موردی اول مطابق نتایج جدول ۵

دقیق در پیش بینی پسروی بوده و متوسط RMSE این روش برای سری آزمایشات با کاهش جریان برابر ۳/۵۷ دقیقه و برای بدون کاهش جریان (آزمایش سری چهارم) برابر ۳/۸ دقیقه

جدول ۷. نتایج اندازه‌گیری و پیش‌بینی اجزای بیلان و خطای نسبی روش‌های مختلف تخمین پارامترهای نفوذ برای سری آزمایشات مطالعه موردی اول

سری آزمایش									پارامتر ارزیابی	روش برآورد
۱۲AF	۱۲FF	۱۲TF	۸AF	۸FF	۸TF	۴AF	۴FF	۴TF		
۵/۸۳	۵/۸۳	۵/۸۳	۸/۳۳	۸/۴۳	۸/۳۶	۳/۷۹	۳/۷۷	۳/۷۶	جریان ورودی (m ^۳)	داده‌های اندازه‌گیری
۱/۵۹	۱/۷۴	۳/۱۹	۳/۲۷	۳/۴۷	۴/۷۹	۰/۸۷	۱/۰۶	۱/۲۲	رواناب اندازه‌گیری شده (m ^۳)	
۲۷/۲	۲۹/۸	۵۴/۷	۳۹/۳	۴۱/۲	۵۷/۳	۲۳/۰	۲۸/۲	۳۲/۴	رواناب اندازه‌گیری شده (%)	
۴/۲۵	۴/۰۹	۲/۶۴	۵/۰۶	۴/۹۵	۳/۵۷	۲/۹۱	۲/۷۱	۲/۵۴	نفوذ اندازه‌گیری شده (m ^۳)	
۱/۸۱	۱/۸۷	۳/۶۸	۳/۴۱	۳/۴۵	۵/۶۹	۱/۰۶	۱/۱۷	۱/۳۲	حجم رواناب پیش‌بینی شده (m ^۳)	دو نقطه‌ای الیوت و واکر
۳۱/۰	۳۲/۰	۶۳/۰	۴۱/۰	۴۱/۰	۶۸/۰	۲۸/۰	۳۱/۰	۳۵/۰	درصد رواناب پیش‌بینی شده (%)	
۱۳/۹	۷/۲	۱۵/۱	۴/۴	۰/۵	۱۸/۶	۲۱/۷	۱۰/۱	۸/۱	خطای نسبی پیش‌بینی رواناب (%)	
۴/۰۳	۳/۹۷	۲/۱۶	۴/۹۱	۴/۹۷	۲/۶۸	۲/۷۳	۲/۶۰	۲/۴۴	حجم نفوذ پیش‌بینی شده (m ^۳)	
۵/۲	۳/۱	۱۸/۲	۲/۸	۰/۴	۲۵/۰	۶/۵	۴/۰	۳/۹	خطای نسبی پیش‌بینی نفوذ (%)	
۲/۱۰	۲/۱۰	۲/۸۶	۳/۵۰	۳/۵۴	۴/۰۱	۱/۳۶	۱/۳۶	۱/۳۵	حجم رواناب پیش‌بینی شده (m ^۳)	والیانتزاس و همکاران
۳۶/۰	۳۶/۰	۴۹/۰	۴۲/۰	۴۲/۰	۴۸/۰	۳۶/۰	۳۶/۰	۳۶/۰	درصد رواناب پیش‌بینی شده (%)	
۳۲/۲	۲۰/۶	۱۰/۵	۷/۰	۱/۹	۱۶/۳	۵۶/۵	۲۷/۸	۱۱/۲	خطای نسبی پیش‌بینی رواناب (%)	
۳/۷۳	۳/۷۳	۲/۹۸	۴/۸۳	۴/۸۹	۴/۳۵	۲/۴۲	۲/۴۱	۲/۴۱	حجم نفوذ پیش‌بینی شده (m ^۳)	
۱۲/۱	۸/۸	۱۲/۷	۴/۵	۱/۳	۲۱/۹	۱۶/۹	۱۰/۹	۵/۳	خطای نسبی پیش‌بینی نفوذ (%)	
۱/۸۱	۱/۸۷	۳/۶۸	۳/۴۱	۳/۴۵	۵/۶۹	۱/۰۶	۱/۱۷	۱/۳۲	حجم رواناب پیش‌بینی شده (m ^۳)	میلادالی و همکاران
۲۸/۰	۳۲/۰	۵۶/۰	۳۸/۰	۴۲/۰	۵۹/۰	۳۰/۰	۳۲/۰	۴۱/۰	درصد رواناب پیش‌بینی شده (%)	
۱۳/۹	۷/۲	۱۵/۱	۴/۴	۰/۵	۱۸/۶	۲۱/۷	۱۰/۱	۸/۱	خطای نسبی پیش‌بینی رواناب (%)	
۴/۰۳	۳/۹۷	۲/۱۶	۴/۹۱	۴/۹۷	۲/۶۸	۲/۷۳	۲/۶۰	۲/۴۴	حجم نفوذ پیش‌بینی شده (m ^۳)	
۵/۲	۳/۱	۱۸/۲	۲/۸	۰/۴	۲۵/۰	۶/۵	۴/۰	۳/۹	خطای نسبی پیش‌بینی نفوذ (%)	

ادامه جدول ۷. نتایج اندازه‌گیری و پیش‌بینی اجزای بیلان و خطای نسبی روش‌های مختلف تخمین پارامترهای نفوذ

برای سری آزمایشات مطالعه موردی اول

										بهبودسازی چندسطحی
۱/۵۸	۱/۷۵	۳/۲۱	۳/۲۵	۳/۴۵	۴/۷۷	۰/۸۷	۱/۰۶	۱/۲۰	حجم رواناب پیش‌بینی شده (m ^۳)	
۲۷/۰	۳۰/۰	۵۵/۰	۳۹/۰	۴۱/۰	۵۷/۰	۲۳/۰	۲۸/۰	۳۲/۰	درصد رواناب پیش‌بینی شده (%)	
۰/۸	۰/۵	۰/۵	۰/۷	۰/۵	۰/۶	۰/۰	۰/۶	۱/۲	خطای نسبی پیش‌بینی رواناب (%)	
۴/۲۶	۴/۰۸	۲/۶۳	۵/۰۸	۴/۹۷	۳/۶۰	۲/۹۱	۲/۷۲	۲/۵۶	حجم نفوذ پیش‌بینی شده (m ^۳)	
۰/۳	۰/۲	۰/۶	۰/۴	۰/۴	۰/۸	۰/۰	۰/۲	۰/۶	خطای نسبی پیش‌بینی نفوذ (%)	
										بهبودسازی رودریگز و مارتوس
۱/۶۳	۳/۴۴	۳/۵۰	۳/۰۰	۳/۰۳	۵/۱۹	۰/۹۵	۱/۰۶	۱/۳۵	حجم رواناب پیش‌بینی شده (m ^۳)	
۲۸/۰	۵۹/۰	۶۰/۰	۳۶/۰	۳۶/۰	۶۲/۰	۲۵/۰	۲۸/۰	۳۶/۰	درصد رواناب پیش‌بینی شده (%)	
۲/۹	۹۷/۷	۹/۶	۸/۳	۱۲/۷	۸/۱	۸/۷	۰/۶	۱۱/۲	خطای نسبی پیش‌بینی رواناب (%)	
۴/۲۰	۲/۳۹	۲/۳۳	۵/۳۳	۵/۳۹	۳/۱۸	۲/۸۴	۲/۷۲	۲/۴۱	حجم نفوذ پیش‌بینی شده (m ^۳)	
۱/۱	۴۱/۶	۱۱/۶	۵/۴	۸/۹	۱۰/۹	۲/۶	۰/۲	۵/۳	خطای نسبی پیش‌بینی نفوذ (%)	

(در صورت انتها باز بودن جویچه) و حجم آب نفوذ یافته، اجزای بیلان آب را تشکیل می‌دهند. نتایج اندازه‌گیری و پیش‌بینی حجم رواناب، حجم جریان ورودی و حجم نفوذ، توسط روش‌های مختلف تخمین پارامترهای نفوذ مطالعه موردی اول، در جدول (۷) آورده شده است. متوسط RE پیش‌بینی رواناب برای پنج روش دو نقطه‌ای الیوت و واکر، والیانتراس و همکاران، میلپالی و همکاران، بهینه‌سازی چندسطحی و بهینه‌سازی رودریگز و مارتوس به ترتیب ۱۱/۱، ۲۰/۴، ۱۱/۰۶، ۰/۶ و ۱۷/۷ درصد حاصل شد. متوسط خطای نسبی پیش‌بینی نفوذ برای پنج روش فوق به ترتیب ۷/۷، ۱۰/۵، ۷/۶، ۰/۴ و ۹/۷ درصد محاسبه گردید. در سری آزمایشات جویچه‌های معمولی (TF۴، TF۸، TF۱۲)، حداقل خطای تخمین رواناب مربوط به روش بهینه‌سازی چندسطحی به دست آمد. متوسط RE تخمین رواناب در این روش حدود ۰/۵ درصد حاصل شد. در جویچه‌های یک در میان ثابت (FF۴، FF۸، FF۱۲ و FF۱۶)، نیز دقیق‌ترین روش بهینه‌سازی چندسطحی بود و متوسط RE این روش در سری آزمایشات جویچه‌های یک در

برای جویچه‌های معمولی، یک در میان ثابت و یک در میان متغیر، عملکرد روش بهینه‌سازی چندسطحی دقیق‌تر بوده و متوسط RMSE برای این سه نوع سیستم آبیاری جویچه‌ای به ترتیب ۳/۷۶، ۵ و ۳/۰۳ دقیقه به دست آمد. خطای پیش‌بینی روش بهینه‌سازی چندسطحی در جویچه‌های یک در میان ثابت نسبت به جویچه‌های معمولی و یک در میان متغیر قابل ملاحظه می‌باشد. در سری آزمایشات با کاهش دبی (آزمایشات ۱ تا ۳) در پیش‌بینی فاز پسروی، بهینه‌سازی چندسطحی همانند پیش‌بینی پیشروی، روش دقیق بود. براساس نتایج جدول ۶، متوسط RMSE پیش‌بینی پسروی این روش در سری آزمایشات با کاهش جریان برابر ۲/۱۳ دقیقه و برای بدون کاهش جریان (آزمایش سری چهارم) برابر ۱/۳ دقیقه محاسبه شد که نشان می‌دهد روش فوق برای حالت بدون کاهش جریان نسبت به حالت کاهش جریان، در پیش‌بینی پسروی دقیق‌تر است.

رواناب و نفوذ

در آبیاری سطحی، حجم جریان ورودی، حجم رواناب خروجی

بهینه‌سازی رودریگز و مارتوس در مطالعه موردی دوم، به ترتیب ۶/۵، ۷/۱، ۸/۷، ۰/۲ و ۳/۶ درصد محاسبه شد. بنابراین در هر دو مطالعه موردی می‌توان نتیجه گرفت که روش تخمین بهینه‌سازی چندسطحی، اجزای بیلان را در آبیاری جویچه‌ای با دقت بسیار بالا در مقایسه با سایر روش‌های تخمین پارامترهای نفوذ، پیش‌بینی کرد. در تحقیق مروج‌الاحکامی و همکاران که دو روش بهینه‌سازی چندسطحی واکر و دو نقطه‌ای الیوت و واکر مورد مقایسه قرار گرفت، روش بهینه‌سازی چندسطحی نسبت به روش دو نقطه‌ای عملکرد بهتری داشت (۱۱).

نتیجه‌گیری

در این مطالعه به منظور تخمین پارامترهای نفوذ دو دسته از روابط پرکاربرد و مطرح در آبیاری جویچه‌ای با سیستم جریان معمولی، یک در میان ثابت و یک در میان متغیر و برای شرایط جریان ورودی بدون کاهش و با کاهش جریان ورودی، مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت. با این‌که در پیش‌بینی مرحله پیشروی، روش بهینه‌سازی چندسطحی از دقت بالاتری برخوردار بود، اما با این‌حال روش‌هایی مانند بهینه‌سازی رودریگز و مارتوس، نیز با دقت خوب، این مرحله از آبیاری را پیش‌بینی کردند که این به دلیل ماهیت این روش‌ها است که از داده‌های مرحله پیشروی اندازه‌گیری شده، برای تخمین ضرایب نفوذ استفاده می‌کنند. زمان پسروی نسبت به زمان پیشروی کوتاه می‌باشد اما مقدار خطا در تخمین زمان پسروی در مقایسه با خطاهای زمان پیشروی، قابل ملاحظه به دست آمد که یکی از دلایل آن را می‌توان به زمان تخلیه نسبت داد. به این ترتیب که در عمل و بعد از قطع جریان، مدت زمانی طول می‌کشد که آب از ابتدای جویچه محو شود. اما در مدل‌های آبیاری سطحی معمولاً این زمان در نظر گرفته نمی‌شود و یا اینکه بسیار کوتاه لحاظ می‌گردد و شروع مرحله پسروی، بلافاصله با قطع جریان ورودی شروع می‌شود. روش بهینه‌سازی چندسطحی برای روش جویچه‌ای معمولی نسبت به روش‌های یک در میان ثابت و یک در میان متغیر، عملکرد دقیق و مشابه در پیش‌بینی مرحله

میان ثابت ۰/۴ درصد محاسبه گردید. برای جویچه‌های یک در میان متغیر نیز نتایج مشابه به دست آمد. روش بهینه‌سازی چندسطحی در جویچه‌های یک در میان متغیر، دقیق‌ترین روش بوده و متوسط RE در این جویچه‌ها ۰/۴ درصد محاسبه شد. این نتایج نشان می‌دهد که دقت روش بهینه‌سازی چندسطحی در هر سه نوع سیستم آبیاری جویچه‌ای تقریباً یکسان می‌باشد. در روش بهینه‌سازی چند سطحی حداکثر خطای نسبی تخمین رواناب و نفوذ به ترتیب برابر ۰/۸ درصد (۱۳/۱ لیتر) و ۰/۷۹ درصد (۲۸/۱ لیتر) به دست آمد. براساس روش تخمین بهینه‌سازی چند سطحی، خطای تخمین رواناب و نفوذ در بین ۹ سری آزمایش و صرف‌نظر از نوع سیستم جویچه‌ای، بسیار کم و کمتر از ۰/۸ درصد بوده که نشان دهنده دقت و قابلیت بالای این روش در تخمین نفوذ و رواناب در آبیاری جویچه‌ای می‌باشد.

نتایج اندازه‌گیری و پیش‌بینی حجم رواناب، حجم جریان ورودی و حجم نفوذ روش‌های مختلف تخمین پارامترها در ۴ سری آزمایش مطالعه موردی دوم، در جدول (۸) آورده شده است. با توجه به جدول (۸)، حداقل خطای برآورد رواناب، مربوط به روش تخمین بهینه‌سازی چندسطحی می‌باشد. خطای نسبی برآورد رواناب در این روش برای سری آزمایشات ۱، ۲، ۳ و ۴ به ترتیب ۰/۸۴، ۰/۷۳، ۴/۰ و ۰/۸۵ درصد به دست آمد. متوسط خطای نسبی برآورد رواناب روش بهینه‌سازی چندسطحی، در حالت کاهش دبی و بدون کاهش دبی به ترتیب ۱/۸۵ و ۰/۸۵ درصد بوده که نشان می‌دهد این روش تخمین پارامترهای نفوذ برای حالت بدون کاهش دبی نسبت به حالت کاهش دبی، عملکرد دقیقتری دارد. در آزمایشات مطالعه موردی دوم، متوسط خطای نسبی برآورد رواناب روش‌های دو نقطه‌ای، والیانتراس و همکاران، میلپالی و همکاران، بهینه‌سازی چندسطحی و بهینه‌سازی رودریگز و مارتوس به ترتیب ۴۸/۸، ۹۶/۷، ۱۷۳/۵ و ۱/۶ و ۹۹/۵ درصد به دست آمد. همچنین خطای نسبی پیش‌بینی نفوذ روش‌های دو نقطه‌ای، والیانتراس و همکاران، میلپالی و همکاران، بهینه‌سازی چندسطحی و

جدول ۸. نتایج اندازه گیری و پیش بینی اجزای بیلان و خطای نسبی روش های مختلف تخمین پارامترهای نفوذ برای سری آزمایشات مطالعه موردی دوم

روش برآورد	سری آزمایش			
	سری ۱	سری ۲	سری ۳	سری ۴
داده های اندازه گیری	جریان ورودی (m^3)	۵/۲۱	۶/۳۶	۹/۴۸
	رواناب اندازه گیری شده (m^3)	۱/۵۵	۰/۹۶	۰/۱۹
	درصد رواناب (%)	۲۹/۸	۱۵/۱	۲/۰
	نفوذ اندازه گیری شده (m^3)	۳/۶۶	۵/۴۰	۹/۲۹
دو نقطه ای البوت و واکر	حجم رواناب پیش بینی شده (m^3)	۲/۱۴	۰/۸۳	۰/۲۴
	درصد رواناب پیش بینی شده (%)	۴۱/۰	۱۳/۰	۲/۵
	خطای نسبی پیش بینی رواناب (%)	۳۷/۸	۱۴/۰	۲۶/۱
	حجم نفوذ پیش بینی شده (m^3)	۳/۰۷	۵/۵۳	۹/۲۴
والیانتزاس و همکاران	خطای نسبی پیش بینی نفوذ (%)	۱۶/۰	۲/۵	۰/۵
	حجم رواناب پیش بینی شده (m^3)	۱/۰۹	۰/۵۷	۰/۶۶
	درصد رواناب پیش بینی شده (%)	۲۱/۰	۹/۰	۷/۰
	خطای نسبی پیش بینی رواناب (%)	۲۹/۴	۴۰/۴	۲۵۳/۰
میلانپالی و همکاران	حجم نفوذ پیش بینی شده (m^3)	۴/۱۲	۵/۷۹	۸/۸۲
	خطای نسبی پیش بینی نفوذ (%)	۱۲/۵	۷/۲	۵/۱
	حجم رواناب پیش بینی شده (m^3)	۱/۷۲	۱/۷۲	۱/۱۴
	درصد رواناب پیش بینی شده (%)	۳۳/۰	۲۷/۰	۱۲/۰
بهینه سازی چندسطحی	خطای نسبی پیش بینی رواناب (%)	۱۰/۹	۷۸/۷	۵۰۵/۱
	حجم نفوذ پیش بینی شده (m^3)	۳/۴۹	۴/۶۴	۸/۳۴
	خطای نسبی پیش بینی نفوذ (%)	۴/۶	۱۴/۰	۱۰/۲
	حجم رواناب پیش بینی شده (m^3)	۱/۵۴	۰/۹۵	۰/۱۹
بهینه سازی رودرنگ و ماترس	درصد رواناب پیش بینی شده (%)	۲۹/۵	۱۵/۰	۲/۰
	خطای نسبی پیش بینی رواناب (%)	۰/۸۴	۰/۷۳	۰/۸۵
	حجم نفوذ پیش بینی شده (m^3)	۳/۶۷	۵/۴۱	۹/۲۹
	خطای نسبی پیش بینی نفوذ (%)	۰/۳۶	۰/۱۳	۰/۰۲
بهینه سازی رودرنگ و ماترس	حجم رواناب پیش بینی شده (m^3)	۱/۷۲	۱/۰۲	۰/۸۵
	درصد رواناب پیش بینی شده (%)	۳۳/۰	۱۶/۰	۹/۰
	خطای نسبی پیش بینی رواناب (%)	۱۰/۹۲	۵/۸۹	۳۵۳/۸۳
	حجم نفوذ پیش بینی شده (m^3)	۳/۴۹	۵/۳۴	۸/۶۳
خطای نسبی پیش بینی نفوذ (%)	۴/۶۳	۱/۰۵	۷/۱۶	

۱/۸۵ و ۰/۸۵ درصد محاسبه شد که نشان می‌دهد برای حالت بدون کاهش دبی نسبت به حالت کاهش دبی، عملکرد دقیقتر دارد. به این ترتیب می‌توان نتیجه گرفت که برای تخمین پارامترهای نفوذ، در صورتی که از داده‌های تمام مراحل آبیاری استفاده گردد، علاوه بر پیش‌بینی دقیق پیشروی و پسروی، اجزای بیلان در آبیاری جویچه‌ای نیز با دقت بالا برآورد می‌گردد. روش‌های تخمین دو نقطه‌ای، والیانتراس و همکاران، میلپالی و همکاران و بهینه‌سازی رودریگز و مارتوس، فقط مبتنی بر داده‌های مرحله پیشروی بوده و با این که پیشروی را با دقت بالا برآورد کردند اما در تخمین مراحل بعدی آبیاری (مانند فاز ذخیره و پسروی) کارایی و عملکرد قابل قبول نسبت به بهینه‌سازی چندسطحی، نشان ندادند.

پیشروی و پسروی داشت. در آزمایشات با کاهش دبی نیز بهینه‌سازی چندسطحی روش دقیق در پیش‌بینی پیشروی و پسروی بود. در پیش‌بینی اجزای بیلان آب، روش بهینه‌سازی چندسطحی نسبت به سایر روش‌ها، با دقت بسیار بالا رواناب خروجی و مقدار نفوذ را برآورد نمود. متوسط خطای نسبی کل آزمایشات در تخمین رواناب، در روش بهینه‌سازی چندسطحی، برای مطالعه موردی اول و دوم به ترتیب ۱/۶ و ۰/۶ درصد به دست آمد. روش بهینه‌سازی چندسطحی در فاز ذخیره نیز عملکرد دقیقتری نشان داد. متوسط خطای نسبی (RE) تخمین رواناب در آزمایشات جویچه‌ای معمولی، یک در میان ثابت و یک در میان متغیر به ترتیب ۰/۵، ۰/۴ و ۰/۴ درصد به دست آمد. متوسط خطای نسبی برآورد رواناب روش بهینه‌سازی چندسطحی، در شرایط کاهش دبی و بدون کاهش دبی به ترتیب

منابع مورد استفاده

- بهبهانی، م. ر. و ح. بابازاده. ۱۳۸۴. ارزیابی مزرعه‌ای مدل سیستم آبیاری سطحی SIRMOD. مجله علوم کشاورزی و منابع طبیعی. ۱۲(۲): ۱-۱۰.
- عباسی، ف. ۱۳۹۱. اصول جریان در آبیاری سطحی. انتشارات کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران.
- Bautista, E., A. J. Clemmens, T. S. Strelkoff and J. Schlegel. 2009a. Modern analysis of surface irrigation systems with WinSRFR. *Agric. Water Manage.* 96: 1146-1154.
- Bautista, E., A. J. Clemmens, T. S. Strelkoff and M. Niblack. 2009b. Analysis of surface irrigation systems with WinSRFR-Example application. *Agric. Water Manage.* 96: 1162-1169.
- Bautista, E., T. Strelkoff, A. J. Clemmens and D. Zerihun. 2008. Surface volume estimates for infiltration parameter estimation. *In: Babcock, R. W., Walton, R. (Eds.), Proc. World environmental and water resources congress 2008, ASCE/EWRI. Hon-olulu HI, May 12-16 CDROM, 10 pp.*
- Ebrahimian, H., A. M. Liaghat, B. Ghanbarian and F. Abbasi. 2010. Evaluation of various quick methods for estimating furrow and border infiltration parameters. *Irrig. Sci.* 28: 479-488.
- Elliott, R. L. and W. R. Walker. 1982. Field evaluation of furrow infiltration and advance functions. *Trans. ASAE.* 25 (2): 396-400.
- Esfandiari, M. and B. L. Maheshwari. 2001. Field evaluation of surface irrigation models. *J. Agric. Eng. Res.* 459-479.
- McClymont, D. J. and R. J. Smith. 1996. Infiltration parameters from optimization on furrow irrigation advance data. *Irrig. Sci.* 17(1): 15-22.
- Mailapalli, D. R., W. W. Wallender, N. S. Raghuwanshi and R. Singh. 2008. Quick method for estimating furrow infiltration. *J. Irrig. Drain. Eng.* 134(6): 788-795.
- Moravejalahkami, B., B. Mostafazadeh-Fard, M. Heidarpour and F. Abbasi. 2009. Furrow infiltration and roughness prediction for different furrow inflow hydrographs using a zero-inertia model with a multilevel calibration approach. *Biosyst. Eng.* 103 (3): 371-381.
- Renault, D. and W. W. Wallender. 1997. Surface storage in furrow irrigation evaluation. *J. Irrig. Drain. Eng.* 123(6): 415-422.
- Rodriguez, J. A. and J. C. Martos. 2008. SIPAR_ID: Freeware for surface irrigation parameter identification. *Environ. Model. Softw.* 25(11): 1487-1488.
- Shepard J. S., W. W. Wallender and J. W. Hopmans. 1993. One method for estimating furrow infiltration. *Trans.*

ASAE. 36(2): 395-404.

15. Valiantzas J. D., S. Aggelides and A. Salsalou. 2001. Furrow infiltration estimation from time to a single advance point. *Agric. Water Manage.* 52: 17-32.
16. Walker, W. R. 2005. Multilevel calibration of furrow infiltration and roughness. *J. Irrig. Drain. Eng.* 131(2): 129-136.

Evaluation and Comparison of Different Approaches of Infiltration Parameters Estimation under Different Furrow Irrigation Systems and Inflow Regimes

V. Rezaverdinejad^{1*}, H. Ahmadi¹, M. Hemmati¹ and H. Ebrahimian²

(Received: Nov. 18-2015; Accepted: March 15-2016)

Abstract

In this study, two different approaches of infiltration parameters estimation in traditional, variable and fixed alternate furrow irrigation, with and without cutback inflow, were performed and compared. Four usual methods including two-point (Elliott and Walker), Valiantzas one-point, Mailapalli one-point and Rodriguez and Martos optimization methods, as approaches based on advance data, and multilevel optimization method as an approach based on the advance, storage and recession data, were considered. Surface irrigation model: WinSRFR was used to simulate irrigation phases and infiltration value in each method. 13 furrow irrigation field experiments, from two case studies: Karaj and Urmia, were used to perform different methods. Based on the results, the multilevel optimization method predicted the advance and recession phases and runoff-infiltration with high accuracy for traditional, variable and fixed alternate furrow irrigation. The multilevel optimization method for traditional furrow irrigation, showed more accuracy than variable and fixed alternate furrow irrigation in advance and recession phases and the average root mean square error (RMSE) for predicting advance phase for the three furrow irrigation methods was 1.37, 1.8, and 1.57 minutes and for the recession phase was 3.76, 5.0, and 3.03 minutes, respectively. Also the multilevel optimization method for cutback options indicated high performance to advance and recession prediction and the average RMSE of advance and recession prediction were obtained 3.57 and 2.13 minutes for cutback option and 3.8 and 1.3 minutes for no cutback option, respectively. The multilevel optimization method indicated high performance in storage phase, too. The average of relative error (RE) of runoff estimation for traditional, variable and fixed alternate furrow irrigation was calculated 0.5, 0.4 and 0.4 percent, respectively. The runoff average RE of multilevel optimization method with cutback and no cutback option were obtained 1.85 and 0.85 percent, respectively; that showed high performance of this method for no cutback option in comparison with the cutback option. Therefore, the use of data of all irrigation phases to estimate infiltration parameters shows better performance in the prediction of irrigation and water balance components. (run-off and infiltration).

Keywords: Advance, Recession, Run-off, Infiltration Function, Volume Balance Model, WinSRFR Model

1. Dept. of Water Eng., Faculty of Agric., Urmia Univ., Urmia, Iran.

2. Dept. of Irrigation and Reclamation Eng., Faculty of Agric. and Natural Resour., Tehran Univ., Tehran, Iran.

*: Corresponding author: Email: v.verdinejad@urmia.ac.ir