

طراحی آبیاری نواری انتهاسته با مدل شبیه‌سازی WinSRFR و تکنیک بهینه‌سازی مجموعه ذرات (PSO)

حمیدرضا قره‌محمدلو^۱، وحید رضاوردی‌نژاد^{۲*}، رضا لاله‌زاری^۳، نسرين آزاد^۴

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۸/۳ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۹/۲۴

چکیده

تخمین پارامترهای معادله نفوذ و ضریب زبری مانینگ از فرایندهای ضروری طراحی بهینه و ارزیابی سامانه‌های آبیاری سطحی به شمار می‌رود. تحقیق حاضر به منظور واسنجی این ضرایب برای یک سامانه آبیاری نواری انتهاسته با چهار سری اطلاعات میدانی انجام گرفت. در این راستا هیدرولیک جریان آب توسط نرم افزار WinSRFR و به روش حل اینرسی صفر، شبیه‌سازی و با الگوریتم بهینه‌سازی مجموعه ذرات برای اجرای محاسبات تکراری ترکیب شد. تابع هدف بخش بهینه‌سازی به صورت کمینه‌سازی اختلاف بین زمان‌های پیشروی و پسروی محاسباتی و اندازه‌گیری شده و متغیرهای تصمیم مسأله شامل چهار ضریب معادله نفوذ کوستیاکف اصلاح شده و ضریب زبری مانینگ در نظر گرفته شد. آنالیز حساسیت مدل توسعه یافته نشان داد در فاز پسروی ضریب b از معادله نفوذ و در فاز پیشروی ضریب زبری مانینگ می‌تواند بیشترین خطا را در پیش‌بینی نتایج داشته باشد. نتایج نشان داد که بر اساس پارامترهای بهینه شده در مدل، مجذور میانگین مربعات خطا برای پیش‌بینی زمان‌های پیشروی و پسروی در چهار آبیاری بین $3/77$ تا $12/86$ دقیقه و ضریب جرم مانده بین $0/099$ تا $0/003$ به دست آمد. مطابق نتایج، با بهینه‌سازی مدل WinSRFR، امکان دست‌یابی به بازده کاربرد و یکنواختی به ترتیب 86 و 84 درصد (با حفظ کفایت آبیاری 100 درصد) براساس متغیرهای جریان (دبی ورودی و زمان قطع جریان) وجود دارد.

واژه‌های کلیدی: بازده کاربرد، پارامترهای معادله نفوذ، دبی ورودی، زمان قطع جریان، ضریب زبری مانینگ

مقدمه

بازده آبیاری ضروری می‌باشد. به دلیل زیاد بودن پارامترهای موثر بر آبیاری سطحی و تغییرات زمانی و مکانی آن‌ها و نیز پیچیدگی مدیریت آبیاری سطحی برای بدست آوردن بازده و یکنواختی بالا، استفاده از ابزارهایی که بتوان با طراحی مناسب به حداکثر بازده آب دست یافت، اجتناب‌ناپذیر است. در حقیقت، با مدل‌سازی جریان قبل از فرآیند آبیاری می‌توان در راستای مدیریت، طراحی و بهینه‌سازی و برنامه‌ریزی هرچه بهتر آبیاری سطحی گام برداشت. مدل‌های مختلف جریان آب آبیاری مانند هیدرودینامیک (Katopodes and Strelkoff, 1977)، اینرسی صفر (Strelkoff, 1977)، موج کینماتیک (Walker and Humpherys, 1983) از معادلات موسوم به سنت-ونانت (Chow, 1959; Strelkoff, 1969) به دست آمده‌اند. مدل اینرسی صفر به سبب ساده‌سازی انجام گرفته، دقت و عدم ناپایداری و واگرایی، دامنه‌ی کاربرد وسیع‌تری نسبت به مدل‌های موج کینماتیک و هیدرودینامیک در شبیه‌سازی جریان آب در سطح خاک دارد (عباسی، ۱۳۹۱؛ مرادزاده و همکاران، ۱۳۹۲؛ Ebrahimian and Liaghat, 2011; Lalehzari and Boroomand-Nasab, 2017).

آبیاری سطحی پرکاربردترین سامانه آبیاری گیاهان با پوشش بیش از 90 درصد اراضی زراعی و باغی در ایران است (Ebrahimian and Liaghat, 2011; Lalehzari and Boroomand-Nasab, 2017). از معایب آبیاری سطحی اتلاف بالای آب به صورت رواناب و نفوذ عمقی است و مطالعات مختلفی با هدف افزایش کارایی آب و یکنواختی توزیع آب در این سامانه انجام شده است (رضاوردی‌نژاد و همکاران، ۱۳۹۴؛ زبردست و همکاران، ۱۳۹۳؛ لاله‌زاری و همکاران، ۱۳۹۳؛ Gonzalez et al., 2011; Lalehzari et al., 2015). طراحی بهینه آبیاری سطحی با هدف تعیین و مدیریت متغیرهای دبی جریان، زمان قطع جریان، طول نوار و ... در کاهش تلفات و افزایش

۱- دانشجوی دکتری آبیاری و زهکشی، گروه مهندسی آب، دانشگاه ارومیه

۲- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه

۳- پژوهشگر پسادکتری مهندسی منابع آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران

۴- دکتری آبیاری و زهکشی، گروه مهندسی آب، دانشگاه ارومیه

*- نویسنده مسئول: (Email: v.verdinejad@urmia.ac.ir)

جویچه‌ای نشان داد که روش واسنجی چند سطحی عملکرد بهتری نسبت به روش دو نقطه‌ای داشت (Moravejalakhani et al., 2009).

با توجه به قابلیت‌های زیاد ابزارهای بهینه‌سازی در علوم مختلف، از این روش می‌توان در تخمین پارامترهای معادلات نفوذ نیز استفاده نمود. در میان روش‌های مختلف بهینه‌سازی، الگوریتم بهینه‌سازی مجموعه ذرات (PSO) به عنوان یکی از روش‌های فراکاوشی ابزاری مناسب در جستجوی متغیرهای تصمیم در مسائل مرتبط با مهندسی علوم آب معرفی شده است (مقدسی و همکاران، ۱۳۸۷؛ آذرفزا و همکاران، ۱۳۹۱؛ خاشعی سیوکی و همکاران، ۱۳۹۲؛ Lalehzari et al., 2016). بررسی‌های اخیر نشان داد که تاکنون از ابزارهای بهینه‌سازی در تخمین پارامترهای معادلات نفوذ و همچنین ضریب زبری، به عنوان پارامترهای مهم و حساس در مدل‌های شبیه‌سازی آبیاری سطحی، استفاده نشده است. بنابراین تحقیق حاضر با هدف استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی PSO در برآورد پارامترهای معادله نفوذ و ضریب زبری خاک در مدل شبیه‌سازی آبیاری سطحی به منظور بهبود عملکرد مدل‌سازی با هدف طراحی و مدیریت بهینه آبیاری نواری انجام گرفت. در این راستا برای نخستین بار از مفهوم شبیه‌سازی-بهینه‌سازی با لینک مدل شبیه‌سازی آبیاری سطحی WinSRFR به الگوریتم بهینه‌سازی PSO در نرم‌افزار MATLAB استفاده شده است. در نهایت، منحنی‌های هم‌عملکرد سامانه آبیاری به عنوان یک ابزار مدیریتی جدید و کارا برای طراحی و مدیریت بهینه آبیاری نواری بکار گرفته شد.

مواد و روش‌ها

به منظور جمع‌آوری داده‌های مورد نیاز تحقیق، در شبکه آبیاری و زهکشی منطقه خلف‌آباد شهرستان رامشیر در مسیر راه اصلی اهواز-بندر ماهشهر و به فاصله یکصد کیلومتری شهرستان اهواز در استان خوزستان انجام گرفت. این منطقه در محدوده ۴۹ درجه و ۱۴ دقیقه تا ۴۹ درجه و ۲۹ دقیقه طول شرقی و ۳۰ درجه و ۴۷ دقیقه تا ۳۰ درجه و ۵۷ دقیقه عرض شمالی با ارتفاع ۲۳ متر از سطح دریاهای آزاد قرار دارد. بعد از عملیات تهیه زمین، نوارهایی به طول ۱۸۰ متر و عرض ۶/۳ متر ایجاد شده و شیب طولی یکنواخت ۰/۰۰۲۱ توسط دوربین نقشه‌برداری تنظیم گردید. نتایج تجزیه فیزیکی خاک مزرعه آزمایشی در جدول ۱ نشان داده شده است. در این تحقیق چهار نوبت آبیاری (I1، I2، I3 و I4) با دبی ۱۰ لیتر بر ثانیه در یک نوار انتهاسته در مزرعه گندم (در تاریخ‌های ۲۵ آذرماه ۹۳، ۲۵ بهمن ماه ۹۳، ۱۰ اسفندماه ۹۳ و ۱۰ فروردین ماه ۹۴) انجام گردید. برای اندازه‌گیری منحنی‌های پیشروی و پسروی، نوار آبیاری با فواصل ۲۰ متری ایستگاه‌بندی شد.

استفاده از ابزارهای مدل‌سازی در طراحی پارامترهای آبیاری در تحقیقات زیادی مورد توجه محققین قرار گرفته است (تقی‌زاده و همکاران، ۱۳۹۱؛ نوابیان و مسلمی کوچصفهانی، ۱۳۹۱؛ بیک‌زاده و همکاران، ۱۳۹۳؛ تافته و همکاران، ۱۳۹۶ (الف)؛ تافته و همکاران، ۱۳۹۶ (ب)؛ ال‌دیری و همکاران، ۲۰۰۵؛ امپاس و بالتاس، ۲۰۰۹؛ لیما و همکاران، ۲۰۱۴).

در مدل‌سازی آبیاری سطحی، نفوذ آب در خاک یکی از حساس‌ترین پارامترهای هیدرولیکی موثر بر آبیاری سطحی بوده و ضرایب معادله نفوذ یکی از مشکل‌ترین پارامترهایی است که بایستی برآورد شود. تاکنون در مطالعات مختلف از روش‌های متفاوتی برای تخمین پارامترهای نفوذ استفاده شده است. ابراهیمیان و همکاران (۱۳۸۹ و ۲۰۱۰) ضمن ارزیابی روش‌های سریع در تخمین پارامترهای نفوذپذیری در آبیاری جویچه‌ای و نواری، یک روش دو نقطه‌ای جدید ارائه و آن را با سایر روش‌ها از جمله روش‌های دو نقطه‌ای الیوت و واکر، پیشروی بنامی و آفین، یک نقطه‌ای شپارد و همکاران و یک نقطه‌ای الیانتزاس و همکاران مقایسه کردند (Ebrahimian et al., 2010). رضاوودی‌نژاد و همکاران (۱۳۹۴) از روش بهینه‌سازی چندسطحی برای تخمین پارامترهای نفوذ در سامانه آبیاری نواری انتهاها استفاده کردند. بدین منظور معادله نفوذ کوستیاکوف - لوئیز در قالب نرم افزار WinSRFR برای هشت سری آزمایش مزرعه‌ای به کار گرفته شد. در تحقیق آن‌ها متوسط مجذور میانگین مربعات خطا برای واسنجی زمان پیشروی و پسروی به ترتیب ۳/۱ و ۳/۲ دقیقه به دست آمد. در یک مطالعه دیگر، سپاسخواه و افشار چمن‌آباد در تعیین پارامترهای نفوذ معادله کاستیاکوف-لوئیس در دبی‌های مختلف آبیاری جویچه‌ای معمولی و یک‌درمیان از داده‌های منحنی پیشروی (روش اول) و داده‌های منحنی پیشروی و ذخیره (روش دوم) استفاده کردند (Sepaskhah and Afshar-Chamanabad, 2002). هولزافل و همکاران به منظور تعیین ضرایب معادله نفوذ کاستیاکوف، روش‌های یک نقطه‌ای، دو نقطه‌ای، منحنی پیشروی و نفوذسنج جویچه‌ای را با یکدیگر مقایسه نمودند (Holzapfel et al., 2004). ختری و اسمیت از داده‌های منحنی پیشروی و جیلیس و اسمیت نیز از داده‌های منحنی پیشروی و رواناب در محاسبه پارامترهای معادله نفوذ کاستیاکوف اصلاح شده در آبیاری جویچه‌ای استفاده کردند (Khatrri and Smith., 2005; Gillies and Smith, 2005). یک مطالعه دیگر، روش دونقطه‌ای و مدل‌های INFILT و IPARM در تخمین پارامترهای مدل نفوذ کاستیاکوف اصلاح شده، در آبیاری جویچه‌ای معمولی، یک‌درمیان ثابت و متغیر توسط ابراهیمیان مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج تحقیق مذکور نشان داد که مدل IPARM نتایج دقیق‌تری نسبت به دو روش دیگر در هر سه روش آبیاری داشت (Ebrahimian, 2014). بررسی‌های مروج‌الاحکامی و همکاران در تخمین پارامترهای نفوذ کاستیاکوف لوئیس در آبیاری

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی خاک منطقه مورد مطالعه

عمق خاک (سانتیمتر)	درصد رس	درصد سیلت	درصد شن	بافت خاک	جرم مخصوص ظاهری (گرم بر سانتیمتر مکعب)
۵۰-۰	۱۶	۳۳	۵۱	لوم رسی سیلتی	۱/۴۷

الگوریتم بهینه‌سازی مجموعه ذرات (PSO) یک روش حل قدرتمند برای بهینه‌سازی است که برای اولین بار در سال ۱۹۹۵ توسط ابرهارت و کندی به عنوان یک روش جستجوی بهینه‌سازی تابعی مطرح گشت (Eberhart and Kennedy, 1995; Kennedy and Eberhart, 1995). این الگوریتم الهام گرفته شده از رفتارهای اجتماعی برخی گروه‌های دسته جمعی مثل پرندگان و ماهی‌ها می‌باشد. اساس این الگوریتم در این است که هر گونه کنش و واکنش در حرکت گروه تأثیر گذاشته و متعاقباً هر یک از اعضای مجموعه، می‌توانند از اکتشافات و مهارت‌های سایر اعضای گروه بهره‌مند گردند. تفاوت اساسی این الگوریتم با سایر الگوریتم‌های بهینه‌سازی در این است که در این الگوریتم هر ذره علاوه بر داشتن بردار حرکت دارای یک بردار سرعت نیز می‌باشد که اعضای مجموعه را به تغییر موقعیت در فضای جستجو وادار می‌کند.

در این تحقیق به منظور استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی در کنار مدل شبیه‌سازی، از لینک مدل شبیه‌سازی آبیاری سطحی WinSRFR به الگوریتم بهینه‌سازی PSO در نرم‌افزار MATLAB استفاده شد. الگوی توسعه داده شده برای استفاده از روش PSO و ارتباط آن با نرم‌افزار WinSRFR در شکل ۱ نشان داده شده است. مطابق شکل، پارامترهای قطعی و اندازه‌گیری شده برای شبیه‌سازی حرکت جریان شامل دبی ورودی، زمان قطع جریان، طول، عرض و شیب طولی نوار هستند. چهار ضریب تجربی معادله نفوذ k ، a ، b و c و ضریب زبری مایننگ، n ، به‌عنوان پنج متغیر تصمیم مسأله تعریف گردید. تابع هدف موردنظر عبارت است از:

$$\min f(x) = \sum_{i=1}^n (|x_o - x_s|)_i \quad (2)$$

که x_s : زمان پیشروی یا پسروی شبیه‌سازی شده توسط مدل،
 x_o : زمان پیشروی یا پسروی اندازه‌گیری شده در هر ایستگاه،
 n : شماره هر نقطه اندازه‌گیری و n : تعداد گام‌های داده‌برداری است.

برای اجرای الگوریتم PSO، محاسبه معیارهای خطا، ارسال و دریافت اطلاعات به مدل شبیه‌ساز آبیاری سطحی (WinSRFR) و نیز استخراج نتایج از محیط برنامه‌نویسی نرم‌افزار MATLAB R2018b استفاده گردید. محاسبات تکراری برای واسنجی متغیرهای تصمیم با جمعیت اولیه ۵۰ و تعداد تکرار ۱۰۰ اجرا شد. همانگونه که در شکل ۱ نشان داده شده است اولین گام بهینه‌سازی تولید

تحلیل حساسیت، واسنجی و صحت‌سنجی مدل WinSRFR

یکی از ابزارهای مورد استفاده برای شبیه‌سازی آبیاری سطحی مدل WinSRFR می‌باشد که کاربرد زیادی در طراحی و مدیریت آبیاری سطحی دارد. WinSRFR نرم‌افزار جامع شبیه‌سازی و ارزیابی سامانه‌های آبیاری سطحی است که بر اساس حل عددی مدل‌های ریاضی اینرسی-صفر و موج کینماتیکی به تفکیک مشخصات هندسی و رژیم‌های مختلف جریان استوار است (Bautista et al., 2009a; Bautista et al., 2009b). مدل‌های آبیاری سطحی که فرآیند آبیاری را شبیه‌سازی می‌نمایند به ورودی‌هایی نیاز دارند که دقت اندازه‌گیری آنها در نتایج مدل بسیار موثر خواهد بود. پارامترهایی که به عنوان ورودی مدل WinSRFR باید به مدل معرفی شوند شامل دبی ورودی، طول و شیب زمین، ضرایب تابع نفوذ، زبری خاک و مشخصات سطح مقطع جریان می‌باشند. از میان پارامترهای مذکور، ضرایب تابع نفوذ و ضریب زبری نوار بایستی با توجه به خصوصیات خاک و جریان حاکم بر شرایط واسنجی شوند. در این تحقیق معادله نفوذ کوستیاکف اصلاح شده به منظور محاسبه آب نفوذ یافته در خاک به کار گرفته شد.

$$Z = kt^a + bt + c \quad (1)$$

که در این رابطه، Z (mm) نفوذ تجمعی، t (hr) زمان، k ($\text{mm}\cdot\text{hr}^{-a}$)، a (-)، b ($\text{mm}\cdot\text{hr}^{-1}$) و c (mm) ضرایب معادله می‌باشند.

به منظور واسنجی پارامترهای مدل (ضرایب معادله نفوذ و ضریب زبری)، در ابتدا با انجام تحلیل حساسیت، حساس‌ترین پارامترها برای واسنجی مشخص شدند. برای آنالیز حساسیت، با تغییر مشخصی در هر پارامتر (در سه سطح از تغییرات افزایشی و کاهششی شامل ۱۰، ۲۵ و ۵۰ درصد؛ در شرایطی که سایر ضرایب به صورت مقادیر ثابت باقی می‌ماند)، مقدار تغییر در منحنی‌های پیشروی و پسروی شبیه‌سازی شده با یکدیگر مقایسه گردید. بدین ترتیب حساس‌ترین پارامترها که تغییرات آنها موجب تغییر بیشتری در منحنی‌های پیشروی و پسروی گردید، تعیین شدند.

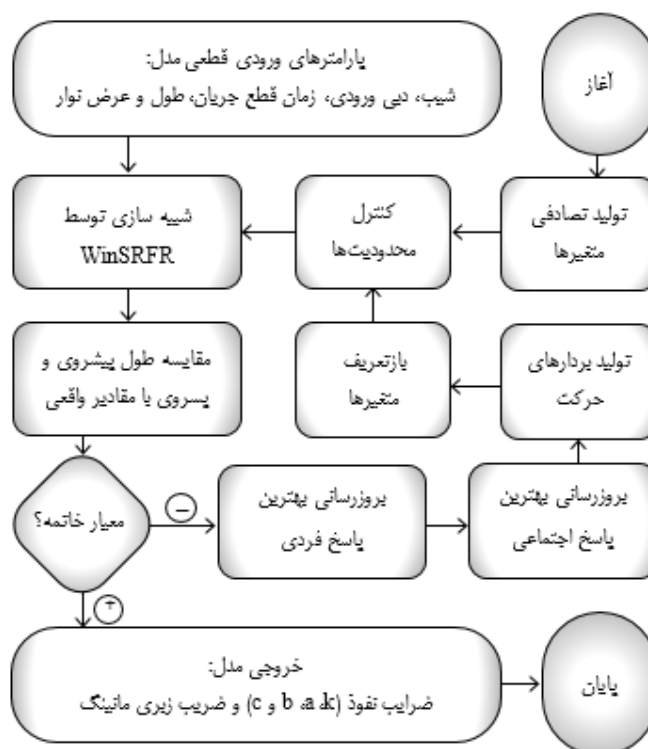
در این مطالعه برای واسنجی پارامترهای مذکور در مدل WinSRFR از روش بهینه‌سازی استفاده گردید. بهینه‌سازی تغییر دادن ورودی‌ها و خصوصیات یک دستگاه، فرآیند ریاضی و یا آزمایش تجربی است، به نحوی که بهترین خروجی یا نتیجه حاصل گردد.

برای هر ذره ارسال می‌گردد. این فرایند در الگوریتم PSO تا رسیدن به مقدار خطای قابل قبول ادامه می‌یابد. برای جستجوی بهترین مقدار برای متغیرهای تصمیم از ضرایب ارائه شده در جدول ۲ استفاده شد. ضرایب مورد استفاده در نسخه اولیه به همراه منابع مربوطه ذکر شده است. هر یک از پارامترها بر اساس مقادیر پیشنهادی (Shi and Eberhart, 1999) متناسب با شرایط مساله برای رسیدن سریعتر و بهتر به پاسخ بهینه در اجراهای مختلف تنظیم گردیدند.

جدول ۲- ضرایب و پارامترهای مدل بهینه‌سازی مجموعه ذرات

ردیف	پارامتر	نماد	مقدار
۱	تعداد متغیر	nvar	۵
۲	فاکتور انقباض	χ	۰/۹
۳	کمترین وزن اینرسی	ω_{min}	۰/۳
۴	بیشترین وزن اینرسی	ω_{max}	۰/۹
۵	ضریب اجتماعی	c_1	۲
۶	ضریب شناختی	c_2	۲

متغیرهای تصادفی اولیه در بازه امکانپذیر ضرایب است. در مرحله دوم ضرایب به همراه اطلاعات قطعی برای شبیه‌سازی طول پیشروی و پسروی به نرم‌افزار WinSRFR فرستاده می‌شود و سپس نتایج به دست آمده به زیربرنامه تحلیل نتایج و تعیین دقت داده‌های واسنجی شده وارد می‌شود. اگر نتایج قابل قبول باشد به زیربرنامه آنالیز حساسیت و در غیراینصورت به الگوریتم PSO برای تولید یا روزرسانی فاکتورهای سرعت و حرکت در مقیاس فردی و اجتماعی



شکل ۱- فلوچارت بهینه‌سازی پارامترهای نفوذ و ضریب زبری

$$ME = \frac{\sum_{i=1}^n (x_o - \bar{x}_o)^2 - \sum_{i=1}^n (x_s - x_o)^2}{\sum_{i=1}^n (x_o - \bar{x}_o)_i^2} \quad (۶)$$

در این روابط، x_o و x_s و \bar{x}_o و \bar{x}_s به ترتیب مقادیر اندازه‌گیری و پیش‌بینی شده در هر نقطه اندازه‌گیری و میانگین مقادیر اندازه‌گیری و پیش‌بینی شده بوده و n تعداد مشاهدات می‌باشد. ضریب تبیین بین صفر تا یک متغیر است و مقادیر نزدیک به یک نتایج بهتر را نشان می‌دهد. شاخص ضریب جرم مانده که نشان‌دهنده بیش‌برآوردی و کم‌برآوردی مدل نسبت به مقادیر واقعی است و به ترتیب با علامت‌های مثبت و منفی محاسبه می‌گردد. ضریب کارایی مدل نیز از یک برای بهترین حالت تا منفی بی‌نهایت برای بدترین حالت متغیر است.

پس از واسنجی پارامترهای مذکور، به منظور ارزیابی عملکرد مدل WinSRFR در پیش‌بینی زمان پیشروی و پسروی، از روابط همبستگی و خطا بین مقادیر مشاهده و برآورد شده توسط مدل در ۴ نوبت آبیاری استفاده گردید. بدین منظور از چهار شاخص مجذور میانگین مربعات خطا، $RMSE$ ، ضریب تبیین، R^2 ، ضریب جرم مانده، CRM و کارایی مدل‌سازی، ME استفاده شده است.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_s - x_o)_i^2}{n}} \quad (۳)$$

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (x_o - \bar{x}_o)(x_s - \bar{x}_s)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_o - \bar{x}_o)^2 \sum_{i=1}^n (x_s - \bar{x}_s)^2}} \right)^2 \quad (۴)$$

$$CRM = \frac{\sum_{i=1}^n x_o - \sum_{i=1}^n x_s}{\sum_{i=1}^n x_o} \quad (۵)$$

ضرب شده و در طول فاز پیشروی و پسروی با افزایش زمان اهمیت بیشتری پیدا می‌کند. کاهش ۵۰ درصدی ضریب b موجب خطای $۱۱/۰۷$ می‌گردد. به دلیل وابستگی b به زمان، کم‌برآوردی یا بیش‌برآوردی آن موجب آب گرفتگی یا فروکش نمودن سریع جریان در فاز پسروی به ویژه در انتهای نوار می‌گردد و اثرات آن در فاز پیشروی با دیگر پارامترها نسبتاً یکسان است.

پارامتر c در معادله نفوذ کوستیاکف اصلاح شده که مقدار آن در آبیاری‌های اول و دوم، صفر و در آبیاری‌های سوم و چهارم به ترتیب $۰/۸$ و $۰/۹$ برآورد شده است، تأثیر زیادی در حساسیت مدل ایجاد نمی‌کند. زیرا دامنه تغییرات خطا ناچیز و قابل چشم‌پوشی است. در نوارهای با طول و یا زمان قطع جریان کمتر و در فاز پیشروی جریان، برای رسیدن به بهترین زمان در نزدیکی مقادیر اندازه‌گیری شده، ضریب c در بازه اعداد مثبت نزدیک صفر به وسیله مدل بهینه‌سازی جستجو می‌شود که در این مطالعه برای ضرایب a کمتر از $۰/۵$ برابر با صفر به دست آمد. در فاز پیشروی تأثیر این پارامتر بیشتر از فاز پسروی است. آنالیز حساسیت مدل شبیه‌سازی به ضریب زبری مانینگ نشان می‌دهد که بیش‌برآوردی یا کم‌برآوردی این پارامتر تأثیر یکسانی بر دقت نتایج خواهد داشت. همچنین اثرگذاری زبری بستر بر جریان در آبیاری نواری انتهایی نسبت به ضرایب نفوذ متفاوت است. اختلاف تغییرات ضریب زبری بر فازهای پیشروی و پسروی نشان می‌دهد در جبهه پیشروی جریان، زبری بستر نقش زیادی در نفوذ آب به داخل خاک و سرعت حرکت آب در سطح خاک دارد، اما در فاز تخلیه به ویژه در شرایط آبیاری نواری انتهایی که حالت ماندابی به وجود خواهد آمد، فرایند نفوذ تنها تحت تأثیر بافت و ساختمان خاک قرار می‌گیرد.

واسنجی متغیرهای تصمیم و ارزیابی عملکرد مدل WinSRFR

در شبیه‌سازی منحنی‌های پیشروی و پسروی

پارامترهای معادله نفوذ کوستیاکف اصلاح شده و ضریب زبری مانینگ که از طریق واسنجی برآورد شده‌اند در جدول ۳ خلاصه شده است. ضریب زبری مانینگ با توجه به رشد محصول گندم و افزایش پوشش گیاه، از آبیاری اول تا چهارم افزایش داشته است. دقت پیش‌بینی زمان پیشروی و پسروی توسط این ضرایب در جدول ۴ آمده است. همچنین منحنی‌های پیشروی و پسروی برای چهار آزمایش I1، I2، I3 و I4 در شکل ۳ ترسیم شده است. مطابق جدول ۴ و شکل ۳، دقت ضرایب برآورد شده توسط مدل بهینه‌سازی PSO قابل قبول بوده است.

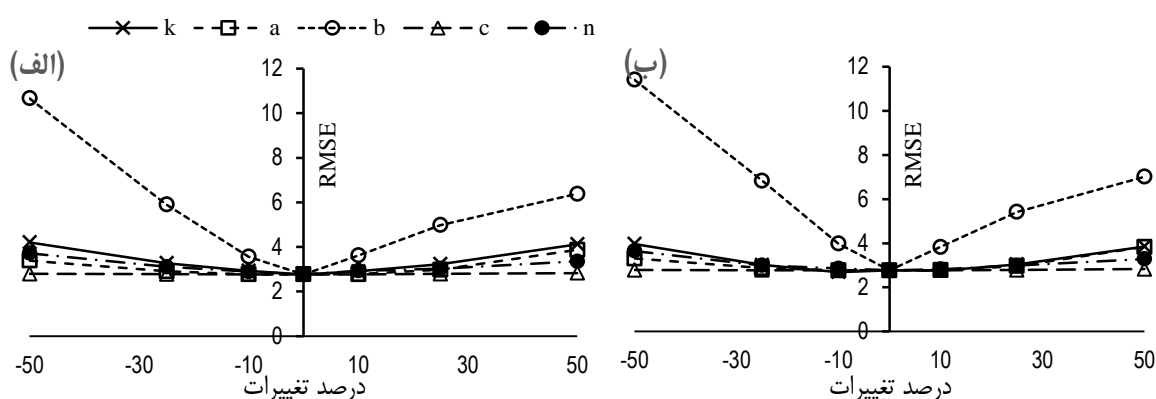
بهینه‌سازی دبی ورودی و زمان قطع جریان با استفاده از منحنی‌های هم‌بازده

در این تحقیق به منظور بررسی عملکرد ترکیب مقادیر متفاوت دبی ورودی (Q) و زمان قطع جریان (T_{co}) و بهینه‌سازی این متغیرهای تصمیم، از تحلیل منحنی‌های هم‌بازده استفاده گردید. این تحلیل تغییرات پارامترهای عملکردی آبیاری را به عنوان تابعی از متغیرهای تصمیم‌گیری نشان داده و بر اساس حداکثر بودن عملکرد انجام می‌شود. تحلیل ممکن است یک توصیه عملیاتی برای شرایط متوسط تخمینی زمین (نفوذ، زبری، عمق به کارگیری مورد نظر) ایجاد کند و یا ممکن است نیاز برای یک طرح جایگزین را پیشنهاد کند. این منحنی‌ها با درون‌یابی از نتایج شبیه‌سازی مدل در شبکه‌ای مستطیل شکل از نقاط و تولید خطوط تراز بازده در یک فضای امکان‌پذیر از مقادیر دبی و زمان قطع جریان ایجاد می‌شوند. منحنی‌های هم‌تراز بازده در این تحقیق، شامل بازده کاربرد (AE)، یکنواختی توزیع (DU) و درصد نفوذ عمقی (DP) می‌باشند. در این فرآیند به عنوان متغیرهای تصمیم‌گیری ۱۰ میزان دبی بر اساس حداقل و حداکثر دبی مجاز جریان ورودی و بازده مطلوب آبیاری در محدوده دبی‌های ۵ تا ۲۰ لیتر بر ثانیه و ۱۰ زمان قطع جریان در محدوده ۹۰ تا ۲۴۰ دقیقه (بر اساس ملاحظات مربوط به رسیدن آب به انتهای نوار و حد مطلوب بازده آبیاری) در نظر گرفته شده و با اجرای مدل، پارامترهای عملکرد مشخص گردید. سپس با تحلیل منحنی‌های هم‌بازده، پارامترهای طراحی و مدیریتی سامانه آبیاری نواری انتهایی بر اساس تحلیل منحنی‌های مذکور بهینه گردید.

نتایج و بحث

آنالیز حساسیت

هر مدل واسنجی با هدف یافتن متغیرهای تصمیم‌گیری برای انطباق اطلاعات مشاهده‌ای و محاسبه‌ای نیازمند تحلیل حساسیت مدل توسعه یافته به تغییرات در مقادیر غیرقطعی برآورد شده می‌باشد. شکل ۲ نتایج تحلیل حساسیت مدل نسبت به تغییرات ضرایب معادله نفوذ و زبری را نشان می‌دهد. بر اساس نتایج بدست آمده از این شکل، افزایش ضریب k در سطح ۱۰ درصد نسبت به کاهش آن خطای بیشتری داشته و بنابراین تخمین بیشتر آن، موجب کم‌برآوردی داده‌های محاسباتی خواهد بود. حساسیت مدل شبیه‌سازی به تغییرات ضریب a کمتر از ضریب k می‌باشد. بیشترین مقدار مجذور میانگین مربعات خطا برای این پارامتر $۳/۸۷$ دقیقه محاسبه شده است که در اثر ۵۰ درصد افزایش بدست می‌آید. بیشترین حساسیت معادله نفوذ به محاسبه دقیق ضریب b در فرایند واسنجی باز می‌گردد. این موضوع به این دلیل است که فرصت زمان نفوذ با توان یک در پارامتر b



شکل ۲- آنالیز حساسیت مدل شبیه‌سازی آبیاری نواری انتها بسته به ضرایب واسنجی (الف: فاز پیش‌روی، ب: فاز پس‌روی)

منحنی‌های هم‌بازده و تحلیل آنها

شکل ۴ منحنی‌های هم‌بازده بازده کاربرد (AE)، یکنواختی توزیع (DU) و نفوذ عمقی (DP) را در انتخاب مقادیر بهینه دبی و زمان قطع جریان آب را در آبیاری نواری انتها بسته نشان می‌دهند. در این شکل، خط نقطه‌چین موقعیت مجموعه نقاط برابری عمق مورد نیاز آبیاری ($D_{req}=75\text{mm}$) و کمترین عمق آب نفوذ یافته (D_{min}) را نشان می‌دهد. در حقیقت، این خط نشان‌دهنده مکان نقاطی از Q و T_{co} می‌باشد که در آن‌ها در ابتدای نوار عمق مورد نیاز آبیاری تامین می‌گردد. ترکیبات $Q-T_{co}$ در سمت چپ خط نقطه‌چین، $D_{min} < D_{req}$ را نشان می‌دهد؛ در حالیکه در سمت راست، $D_{min} > D_{req}$ می‌باشد.

بازده کاربرد در شرایط کم آبی (سمت چپ خط نقطه‌چین) به تدریج افزایش می‌یابد و بیشترین مقدار خود را خواهد داشت و در سمت راست منحنی‌ها با افزایش دبی و زمان قطع جریان کاهش می‌یابد. از این رو اگر چه در بخش چپ خط نقطه‌چین، ترکیبات مختلف دبی ورودی و زمان قطع جریان موجب دستیابی به بازده کاربرد بالا می‌گردد، اما کفایت آبیاری به دلیل تامین نشدن حداقل عمق آب مورد نیاز در ابتدای نوار کمتر از ۱۰۰ درصد است. شرایط موجود که با دایره تیره در سمت چپ منحنی‌ها نشان داده شده است یکی از همین حالات به شمار می‌رود که با بازده کاربرد ۹۸ درصد نمی‌تواند آب مورد نیاز گیاه را تامین نماید. برای برآورده شدن عمق مورد نیاز آبیاری در ابتدای نوار، دبی ورودی و زمان قطع جریان

بایستی در راستای خط چین $D_{req}=D_{min}$ انتخاب گردد. مطابق شکل ۴ دبی ورودی $1/9$ لیتر بر ثانیه در واحد عرض نوار و زمان قطع جریان 150 دقیقه، می‌تواند عمق مورد نیاز آبیاری را با بازده کاربرد حدود ۸۰ درصد تامین نماید.

در سامانه آبیاری نواری انتها باز رواناب نقش بیشتری در کاهش بازده کاربرد آب نسبت به نفوذ عمقی دارد (وردی نژاد و همکاران ۱۳۹۴؛ Ebrahimian and Liaghat, 2011). اما در شرایط انتها بسته تنها عامل مؤثر بر کنترل بازده کاربرد آب آبیاری نفوذ عمقی است. بنابراین الگوی تغییرات منحنی‌های هم‌تراز نفوذ عمقی با بازده کاربرد مطابقت دارد و در شرایط بهینه توصیه شده (دبی ورودی $1/9$ لیتر بر ثانیه در زمان آبیاری 150 دقیقه) حدود ۲۰ درصد از حجم آب آبیاری به صورت عمقی از ناحیه ریشه گیاه خارج می‌گردد. با توجه به منحنی‌های هم‌تراز یکنواختی توزیع، هر دو پارامتر دبی ورودی و زمان قطع جریان تأثیر یکسانی بر میزان افزایش یکنواختی توزیع در طول نوار داشته‌اند.

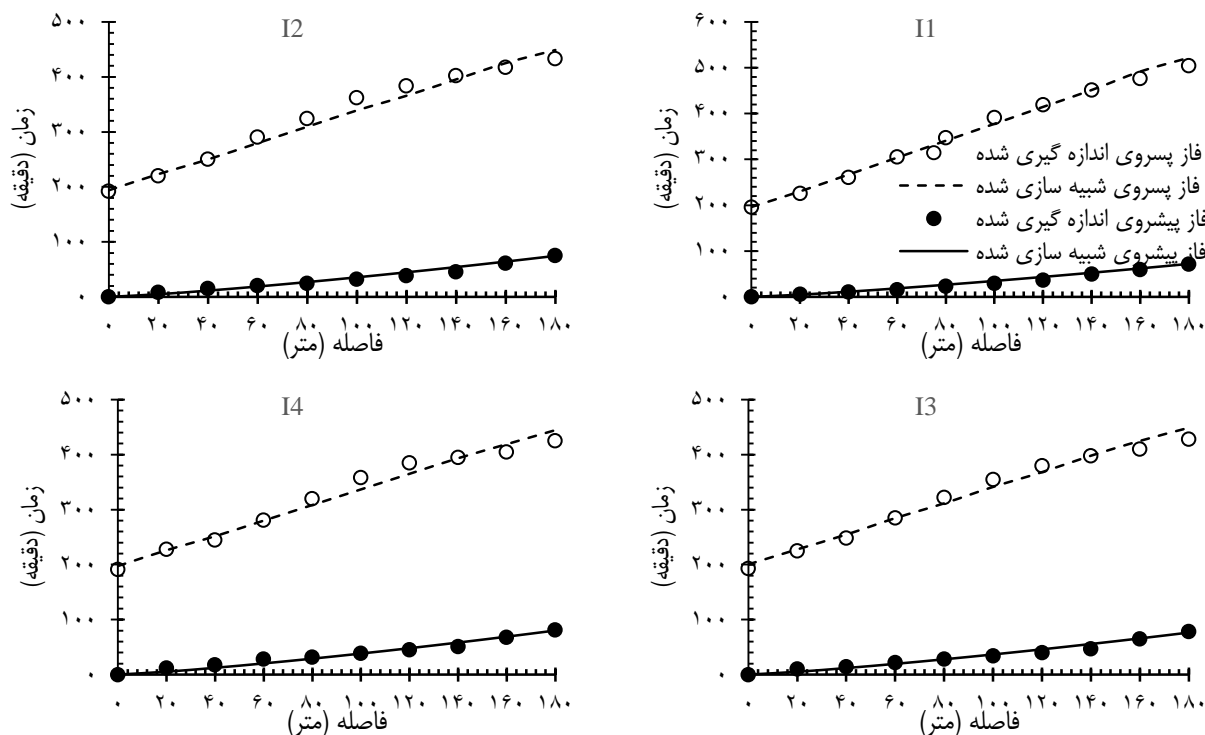
در حالت کلی یک ترکیب مطلوب $Q-T_{co}$ ترکیبی است که بازده کاربرد و یکنواختی توزیع را به حداکثر برساند. در این صورت کفایت آبیاری نیز ۱۰۰ درصد خواهد بود. با حرکت بر روی خط $D_{req}=D_{min}$ و با هدف تامین عمق مورد نیاز آبیاری در این تحقیق، با انتخاب دبی $1/9$ لیتر بر ثانیه و زمان قطع جریان 150 دقیقه، بازده کاربرد و یکنواختی توزیع حدود ۸۰ درصد خواهد بود و کفایت آبیاری نیز بیشترین مقدار خود یعنی ۱۰۰ درصد را خواهد داشت.

جدول ۳- ضرایب واسنجی شده توسط مدل بهینه‌سازی مجموعه ذرات

نوبت آبیاری	ضرایب معادله نفوذ				ضریب زبری مانینگ
	k	a	b	c	n
	mm/h ^a	-	mm/h	mm	m ^{1/6}
I1	۲/۸۵	۰/۶۸	۵/۵۶	۰	۰/۰۵
I2	۳/۶	۰/۵۲	۷/۴۳	۰	۰/۰۵۱
I3	۴/۳۲	۰/۴۷	۷/۸	۰/۸	۰/۰۵۱۸
I4	۴/۰۷	۰/۴۸	۷/۹۱	۰/۹	۰/۰۵۲۱

جدول ۴- ارزیابی دقت واسنجی در آزمایش های II تا I4

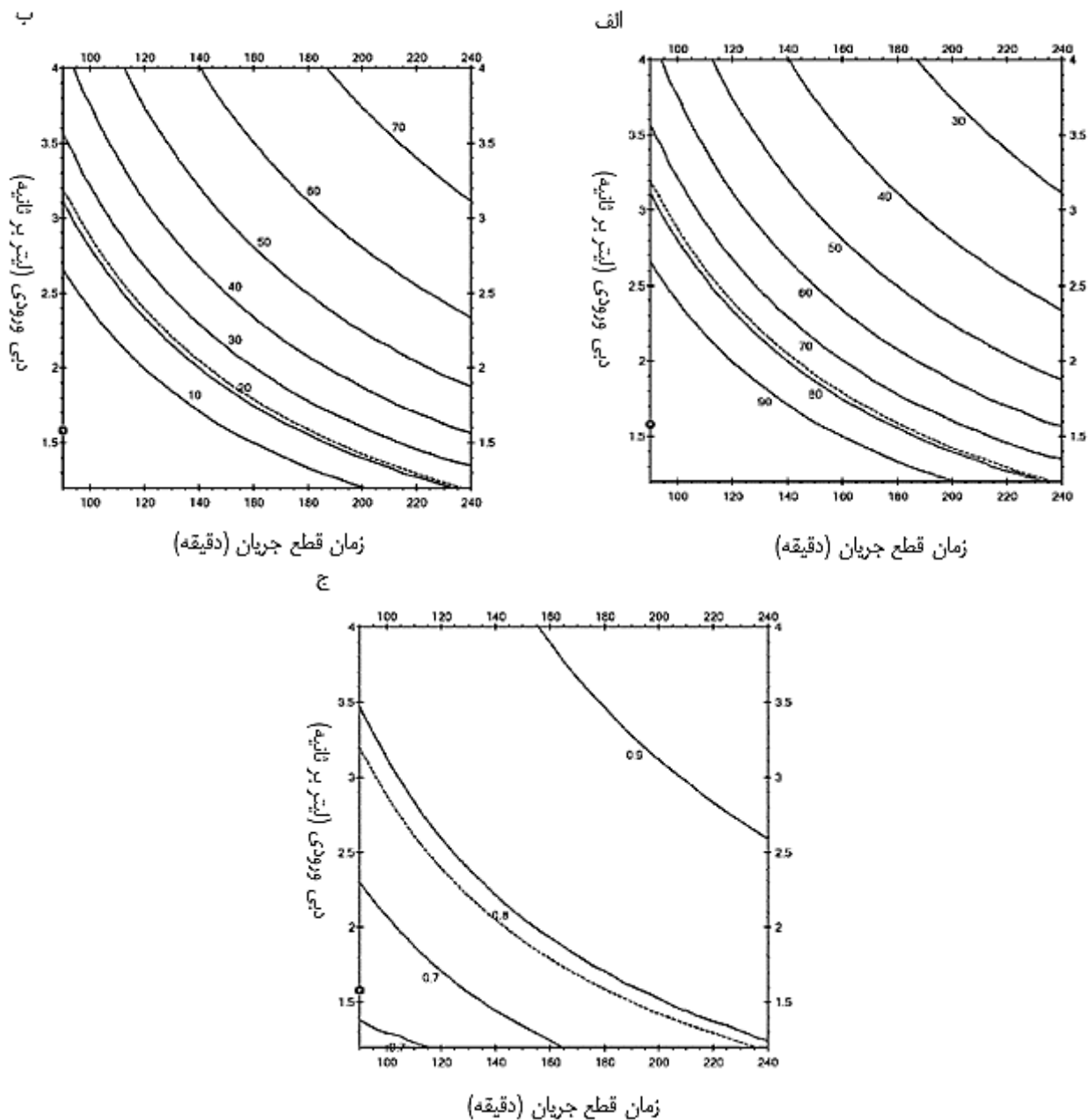
ME		CRM		R ²		RMSE (min)		نوبت آبیاری
پیشروی	پسروی	پیشروی	پسروی	پیشروی	پسروی	پیشروی	پسروی	
۰/۹۹۹	۰/۹۷۲	-۰/۰۰۶	-۰/۰۹۹	۰/۹۹۳	۰/۹۹۱	۹/۳۵۹	۳/۷۶۷	I1
۰/۹۹۸	۰/۹۶۳	-۰/۰۱۳	-۰/۰۵۴	۰/۹۸۰	۰/۹۷۸	۱۲/۳۴۲	۴/۲۹۸	I2
۰/۹۹۹	۰/۹۷۲	-۰/۰۰۵	-۰/۰۱۹	۰/۹۸۲	۰/۹۷۸	۱۰/۹۷۴	۳/۹۲۶	I3
۰/۹۹۸	۰/۹۶۶	-۰/۰۰۳	-۰/۰۳۶	۰/۹۷۴	۰/۹۷۸	۱۲/۸۵۵	۴/۵۷۳	I4



شکل ۳- مقایسه زمان های پیشروی و پسروی اندازه گیری و شبیه سازی شده

جدول ۵- نتایج بهینه سازی دبی و زمان قطع جریان در آزمایش های II تا I4

پارامتر	واحد	I1	I2	I3	I4
دبی ورودی	لیتر بر ثانیه	۱۱/۵	۱۱/۴	۱۱/۲	۱۱/۲
زمان قطع جریان	دقیقه	۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰
عمق آب آبیاری	میلیمتر	۹۱	۹۰	۸۹	۸۹
حداقل عمق آب دریافتی	میلیمتر	۷۵	۷۵	۷۵	۷۵
بازده کاربرد	درصد	۸۳	۸۴	۸۶	۸۴
نفوذ عمقی	درصد	۱۷	۱۶	۱۴	۱۶
حداقل یکنواختی توزیع	درصد	۸۳	۸۴	۸۴	۸۴
یکنواختی توزیع	درصد	۹۸	۹۷	۹۵	۹۵



شکل ۴- منحنی‌های هم‌تراز به عنوان تابعی از دبی و زمان قطع جریان در آبیاری نواری انتها بسته: الف: منحنی هم‌تراز بازده کاربرد آب (AE)، ب: درصد نفوذ عمقی (DP) و ج: یکنواختی توزیع آب (DU)

لیتر بر ثانیه در ۱۵۰ دقیقه زمان آبیاری می‌تواند با بازده کاربرد بین ۸۲ تا ۸۴ درصد و یکنواختی توزیع حدود ۸۴ درصد کفایت آبیاری موردنیاز را برآورده نماید. لازم به توضیح است که بیشترین زمان قطع جریان و کمترین دبی ورودی امکان‌پذیر مقادیری است که با تکمیل فاز پیشروی و بدون آب گرفتگی در انتهای نوار، کفایت آبیاری یا حداقل عمق آب موردنیاز را تأمین می‌کند و بیشترین بازده کاربرد و یکنواختی توزیع را دارد.

نتایج بهینه‌سازی چهار آبیاری مورد آزمایش (I1 تا I4) در جدول ۵ آمده است. دبی ورودی نمی‌تواند دچار تغییرات ناگهانی شود زیرا عمدتاً حجم آب تحویلی به مزارع تابع تصمیم بهره‌بردار نبوده و با اعمال مدیریت توزیع آب در بازه محدودی قابلیت تغییر خواهد داشت. از این رو برای محاسبه پاسخ بهینه برای تأمین حداقل آب موردنیاز گیاه در ابتدای نوار باید قابلیت اجرایی آن با توجه به امکانات موجود فراهم آید. همانگونه که در جدول ۵ آمده است دبی ورودی حدود ۱۲

نتیجه‌گیری

پایه اصلی طراحی و مدیریت بهینه سامانه آبیاری سطحی انتخاب دقیق پارامترهای طراحی و تخمین دقیق ضرایب غیرقطعی است. ضرایبی که اندازه‌گیری مزرعه‌ای مستقیم آنها پیچیده بوده و یا غیرقابل اندازه‌گیری است عبارتند از ضرایبی که برای برآزش معادله نفوذ به کار گرفته می‌شوند و ضریب زبری مانینگ که سرعت و میزان نفوذ جریان در خاک را تحت تأثیر قرار می‌دهد. این ضرایب در قالب متغیرهای تصمیم‌گیری به مدل شبیه‌سازی - بهینه‌سازی وارد و مقادیر بهینه آنها برای کاهش اختلاف زمان پیشروی و پسروی محاسباتی و مشاهداتی به عنوان تابع هدف به دست آمد. نتایج نشان داد که مدل بهینه‌سازی مجموعه ذرات سرعت و قابلیت لازم برای جستجو و یافتن مقادیر بهینه متغیرهای تصمیم این مسأله که هر یک واحد اندازه‌گیری و نقش متفاوتی در حرکت جریان دارند را دارد. دبی ورودی و زمان قطع جریان موجود نمی‌تواند حداقل عمق آب مورد نیاز به میزان ۷۵ میلیمتر را تأمین نماید. برای رسیدن به کفایت آبیاری ۱۰۰ درصد در شرایط بهینه نیازمند ۱/۲ تا ۱/۵ لیتر بر ثانیه افزایش در دبی ورودی و ۶۰ دقیقه افزایش زمان قطع جریان در آزمایش‌های II تا I4 است.

منابع

آذرفزا، ه.، رضایی، ح.، بهمنش، ج. و بشارت، س. ۱۳۹۱. مقایسه نتایج بکارگیری الگوریتم‌های PSO، GA و SA در بهینه‌سازی سیستم‌های تک مخزنه (مطالعه موردی: سدشهرچای، ارومیه). نشریه آب و خاک. ۲۶: ۵: ۱۱۰۱-۱۱۰۸.

ابراهیمیان، ح.، قنبریان علویجه، ب.، عباسی، ف. و هورفر، ع. ۱۳۸۹. ارائه روش دوتقطه‌ای جدید به‌منظور برآورد پارامترهای نفوذپذیری در آبیاری جویچه‌ای و نواری و مقایسه آن با سایر روش‌ها. نشریه آب و خاک. ۲۴: ۴: ۶۹۰-۶۹۸.

بیک‌زاده، ا.، نقی ضیایی، ع.، داوری، ک. و انصاری، ح. ۱۳۹۳. بهینه‌سازی میزان جریان ورودی و زمان آبیاری در آبیاری جویچه‌ای با استفاده از مدل هیدرودینامیک کامل. نشریه آبیاری و زهکشی ایران. ۲: ۸: ۳۷۷-۳۸۵.

تافته، آ.، امداد، م.ر. و غالبی، س. ۱۳۹۶. بررسی تاثیر عوامل مؤثر بر راندمان کاربرد آب آبیاری در شرایط عمق توسعه ریشه موجود و قابل توسعه گندم در اراضی زراعی حمیدیه (خوزستان). نشریه حفاظت منابع آب و خاک. ۶: ۴: ۷۵-۹۰.

تافته، آ.، امداد، م.ر. و غالبی، س. ۱۳۹۶. تعیین مناسب‌ترین شرایط آبیاری نواری به منظور افزایش راندمان کاربرد آب با استفاده از مدل SRFR. فصلنامه علمی و پژوهشی مهندسی آبیاری و آب. ۸: ۳۰: ۲۰۰-۲۱۰.

تقی‌زاده، ز.، رضوردی‌نژاد، و.، ابراهیمیان، ح. و خان‌محمدی، ن. ۱۳۹۱. ارزیابی مزرعه‌ای و تحلیل سیستم آبیاری سطحی با WinSRFR (مطالعه موردی آبیاری جویچه‌ای). نشریه آب و خاک. ۲۶: ۶: ۱۴۵۰-۱۴۵۹.

خاشعی سیوکی، ع.، قهرمان، ب. و کوچک زاده، م. ۱۳۹۲. کاربرد تخصیص و مدیریت آب کشاورزی با استفاده از تکنیک بهینه‌سازی PSO (مطالعه موردی: دشت نیشابور). نشریه آب و خاک. ۲۷: ۲: ۲۹۲-۳۰۳.

رضوردی نژاد، و.، جنوبی، ر.، بشارت، س. 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.

زبردست، س.، ریاحی، ح. و طباطبایی، س.ح. ۱۳۹۳. ارزیابی دقت روش‌های حل مدل بیلان حجمی در تخمین پیشروی آب در آبیاری جویچه‌ای. نشریه حفاظت منابع آب و خاک. ۴: ۱: ۱-۱۲.

عباسی، ف. ۱۳۹۱. اصول جریان در آبیاری سطحی. انتشارات کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران.

لاله‌زاری، ر.، برومندنسب، س. و بهرامی، م. ۱۳۹۳. اصلاح معادله بیلان حجم برای محاسبه پیشروی جریان آب در نهر با استفاده از عمق واقعی جریان در مقطع ورودی. مجله علوم خاک و آب. ۱۸: ۱-۹.

مردادزاده، م.، برومندنسب، س.، لاله‌زاری، ر. و بهرامی، م. ۱۳۹۲. بررسی کارایی و تحلیل حساسیت مدل‌های مختلف نرم‌افزار Sirmod در طراحی جویچه. مجله مهندسی منابع آب. ۶۳: ۶۳-۷۴.

مقدسی، م.، مرید، س. و عراقی‌نژاد، ش. ۱۳۸۷. بهینه‌سازی تخصیص آب در شرایط کم‌آبی با استفاده از روش‌های برنامه‌ریزی غیرخطی، هوش جمعی و الگوریتم ژنتیک (مطالعه موردی). تحقیقات منابع آب ایران. ۴: ۳: ۱-۱۳.

نویان، م. و مسلمی کوچصفهانی، م. ۱۳۹۱. بهینه‌یابی طول جویچه و دبی جریان در آبیاری جویچه‌ای. مجله پژوهش آب ایران. ۶: ۱۱:

- Hydrodynamics of border irrigation-complete model. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 103.3:309-324.
- Kennedy, J. and Eberhart, R.C. 1995. Particle swarm optimization. In: *Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks*. IEEE Press. Piscataway, N. J.
- 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.
- Lalehzari, R., Ansari Samani, F. and Boroomand-Nasab, S. 2015. Analysis of evaluation indicators for furrow irrigation system using opportunity time. *Irrigation and Drainage*. 64.1:85-92.
- Lalehzari, R., Boroomand-Nasab, S., Moazed, H. and Haghghi, A. 2016. Multi-objective management of water allocation to sustainable irrigation planning and optimal cropping pattern. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE*. 142(1): 05015008.
- Lalehzari, R., and Boroomand-Nasab, S. 2017. Improved volume balance using upstream flow depth for advance time estimation. *Agricultural Water Management*. 186:120-126.
- Lima, V.I.A., Pordeus, R.V., Azevedo, C.A.V., Pereira, J.O., Lima, V.L.A. and Azevedo, M.R.Q.A. 2014. Optimization of furrow irrigation systems with continuous flow using the software applied to surface irrigation simulations- SASI. *African Agricultural Research*. 9.42:3115-3125.
- 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*. 103:374-381.
- Sepaskhah, A.R. and Afshar-Chamanabad. H. 2002. Determination of infiltration rate for every-other furrow irrigation. *Biosystems Engineering*. 82.4:479-484.
- Shi, Y. and Eberhart, R. 1998. Parameter selection in particle swarm optimization, In: Porto VW, Saravanan N, Waagen D and Eiben AE (eds) *Evolutionary Programming VII*, pp. 611-616.
- Shi, Y. and Eberhart, R. 1999. Empirical study of particle swarm optimization. *Proceeding IEEE International Congress Evolutionary Computation*, Washington, DC., USA, pp. 1945-1950.
- Strelkoff, T. 1969. One-dimensional equation of open channel flow. *Journal of Hydraulic Division*.
- Ampas, V. and Baltas, E. 2009. Optimization of the furrow irrigation efficiency. *Global NEST*. 11.4:566-574.
- Bautista, E., Clemmens, A.J., Strelkoff, T.S. and Niblack, M. 2009b. Analysis of surface irrigation systems with WinSRFR-Example application. *Agricultural Water Management*. 96:1162-1169.
- Bautista, E., Clemmens, A.J., Strelkoff, T.S. and Schlege, J. 2009a. Modern analysis of surface irrigation systems with WinSRFR. *Agricultural Water Management*. 96:1146-1154.
- Carlisle, A. and Dozier, G. 2001. An Off-The-Shelf PSO, *Proc. of the Particle Swarm Optimization Workshop*. pp. 1-6.
- Chow, V.T. 1959. *Open Channel Hydraulics*. McGrawHill Book Co., Inc., New York.
- Eberhart, R.C. and Kennedy, J., 1995. A new optimizer using particle swarm theory. In: *Proceedings of the Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science*. IEEE Press. Piscataway, N. J.
- 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.
- Ebrahimian, H. and Liaghat, A.M. 2011. Field evaluation of various mathematical models for furrow and border irrigation systems. *Soil and Water Research*. 6.2:91-101.
- Ebrahimian, H. 2014. Soil infiltration characteristics in alternate and conventional furrow irrigation using different estimation methods. *KSCE Journal of Civil Engineering*. 18.6:1904-1911.
- Eldeiry, A.A., Garcia, L.A., El-Zaher, A.S.A. and El-Sherbini, K. 2005. Furrow irrigation system design for clay soils in arid regions. *American Society of Agricultural Engineers*. 21.3:411-420.
- Gillies, M.H., and Smith, R.J. 2005. Infiltration parameters from surface irrigation advance and run-off data. *Irrigation Science*. 24.1:25-35.
- González, C., Cervera, L. and Fernández, D.M. 2011. Basin irrigation design with longitudinal slope. *Agricultural Water Management*. 98:1516-1522.
- Holzapfel, E.A., Jara, J., Zuñiga, C., Mariño, M.A., Paredes, J. and Billib, M. 2004. Infiltration parameters for furrow irrigation. *Agricultural Water Management*. 68:19-32.
- Katopodes, N.D. and T. Strelkoff. 1977.

- Awad, M. 1999. Surface-irrigation evaluation models: Application to level basins in Egypt. Transactions of the ASAE. 42.4:1027-1036.
- Walker, W.R. and Humpherys. A.S. 1983. Kinematic-wave furrow irrigation model. Journal of Irrigation and Drainage Engineering. 109.4:377-392.
- 95:861-876.
- Strelkoff, T. and Katopodes N.D. 1977. Border-irrigation hydraulics with zero inertia. Journal of Irrigation and Drainage Engineering. 103.3:325-342.
- Strelkoff, T.S., Clements, A.J., El-Ansary, M. and

Closed-End Border Irrigation Design with WinSRFR Simulation Model Using Particle Swarm Optimization Technique

H.R. Garemoahadlou¹, V.R. Verdinejad^{2*}, R. Lalezari³, N. Azad⁴

Recived: Oct.25, 2019

Accepted: Dec.15, 2019

Abstract

Estimating the parameters of infiltration equation and Manning's roughness coefficient are essential for the optimal design and evaluation of surface irrigation systems. The present study was carried out to calibrate these coefficients for a closed-end border irrigation system with four series of field information. In this regard, the hydraulic surface water flow is simulated using zero-inertia model by WinSRFR simulation model that linked to the particle swarm optimization algorithm for repetitive calculations. The objective function of the optimization problem was the minimization of the difference between the calculated and measured times of advance and recession phases, and four coefficients of the modified Kostiaikov equation and Manning's roughness coefficient were considered as decision variables. The sensitivity analysis of the developed model showed that the coefficient b of infiltration equation in the recession phase and the Manning's roughness coefficient in the advance phase have the most errors in the predicted results. The results showed that based on the optimized parameters in the model, the values of root mean square error, RMSE, were obtained between 3.77 to 12.86 minutes and the coefficients of residual mass were varied between -0.099 and 0.003 to predict the advance and recession times in the four experimental irrigations. Based on results, with optimization of WinSRFR model, there is accessibility to achieve in application efficiency and distribution uniformity about 86 and 84 percent, respectively (with adequacy about 100 percent) by flow variable (inflow rate and cutoff time).

Keywords: Application efficiency, Cutoff time, Infiltration equation parameters, Inflow rate, Manning's roughness coefficient

1- Ph.D. Student of Irrigation and Drainage, Department of Water Engineering, Urmia University

2- Associate Professor, Department of Water Engineering, Urmia University

3- Postdoc Researcher, Department of Water Resources Engineering, Faculty of Civil Engineering, University of Tehran

4- Ph.D. of Irrigation and Drainage, Department of Water Engineering, Urmia University

(* - Corresponding Author Email: v.verdinejad@urmia.ac.ir)