

Multiobjective Optimization of Closed-End Border Irrigation Performance Using WinSRFR and Genetic Algorithm (Case Study: Ramshir Irrigation and Drainage Network)

HAMIDREZA GAREMOHAMADLOU¹, VAHID REZAVARDINEJAD¹, REZA LALEZARI^{2*}, NASRIN AZAD¹

1. Department of Water Engineering, Urmia University, Urmia, Iran

2. School of Civil Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.

(Received: Sep. 14, 2019- Revised: Nov. 26, 2019- Accepted: Dec. 1, 2019)

ABSTRACT

The main problem in surface irrigation systems is the low irrigation efficiency due to poor management, inaccurate estimation of design parameters and inadequate design. Losses in surface irrigation include deep infiltration and runoff, which is one of the ways to increase the efficiency of border irrigation, using closed-end mode in irrigation systems. This research was conducted to evaluate the effects of geometrical variables (slope and length of border) and flow control (inlet flow rate and cut-off time) on application efficiency and uniformity of water distribution in closed-end border irrigation system. The length, slope, inflow rate, and cut-off time are considered as the decision-making variables for developing the multi-objective genetic algorithm based on the non-dominated sorting. For this purpose, three irrigation borders with closed-end system were considered in the Ramshir network. The optimization algorithm for calculating the objective functions involves maximizing the minimum water depth and minimizing the infiltration depth in a modeling loop. The optimization algorithm was linked to WinSRFR 4.1.3 software to calculate the objective functions. The results showed that the best combination of inflow rate and the cut-off time for 75 mm of required water depth was 1.9 lit/s/m and 150 min, respectively, which increased application efficiency and distribution uniformity to 79 and 78 percent. Furthermore, the application efficiency in the closed-end border irrigation system is higher (30% to 50%) than the open end method in different scenarios.

Keywords: Application efficiency, Distribution uniformity, Non-dominated sorting, Deep percolation.

بهینه‌سازی چندهدفه عملکرد آبیاری نواری انتها بسته با مدل WinSRFR و الگوریتم ژنتیک (مطالعه موردی: شبکه آبیاری و زهکشی رامشیر)

حمیدرضا قره محمدلو^۱، وحید رضوردی‌نژاد^۱، رضا لاله زاری^{۲*}، نسرين آزاد^۱

۱. گروه مهندسی آب، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

۲. گروه منابع آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران، تهران، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۶/۲۳ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۸/۹/۵ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۸/۹/۱۰)

چکیده

مشکل اصلی سامانه‌های آبیاری سطحی پایین بودن راندمان آبیاری است که عمدتاً از ضعف مدیریتی و تخمین نادرست پارامترهای طراحی ناشی می‌شود. تلفات در آبیاری سطحی شامل نفوذ عمقی و رواناب است که یکی از راهکارهای افزایش راندمان آبیاری نواری، استفاده از حالت انتها بسته در سامانه‌های آبیاری می‌باشد. این مطالعه به منظور ارزیابی اثرات متغیرهای هندسی (شیب و طول نوار) و کنترل جریان (دبی جریان ورودی و زمان قطع جریان) بر راندمان کاربرد و یکنواختی توزیع آب در سامانه آبیاری نواری انتها بسته انجام شده است. بهینه‌سازی طول، شیب، دبی ورودی و زمان قطع جریان به عنوان متغیرهای تصمیم‌گیری ژنتیک چندهدفه مبتنی بر رتبه‌بندی نامغلوب در نظر گرفته شده است. برای این منظور سه نوار آبیاری با سامانه انتها بسته در محدوده شبکه رامشیر در نظر گرفته شد. الگوریتم بهینه‌سازی برای محاسبه توابع هدف شامل بیشینه‌سازی حداقل عمق آب دریافتی و کمینه‌سازی نفوذ عمقی در یک حلقه مدل‌سازی می‌باشد. الگوریتم بهینه‌سازی برای محاسبه توابع هدف به مدل آبیاری سطحی WinSRFR که برای شبیه‌سازی هیدرولیک جریان در نوارهای آبیاری بکار گرفته می‌شود لینک شد. نتایج نشان داد بهترین ترکیب دبی ورودی و زمان قطع جریان برای ۷۵ میلی‌متر عمق آب مورد نیاز به ترتیب ۱/۹ لیتر بر ثانیه در واحد عرض نوار و ۱۵۰ دقیقه است که راندمان کاربرد و یکنواختی توزیع را به ترتیب تا ۷۹ و ۷۸ درصد افزایش می‌دهد. به علاوه، راندمان کاربرد در آبیاری نواری انتها بسته بین ۵۰ تا ۳۰ درصد در سناریوهای مختلف، بیش از روش انتها باز است.

واژه‌های کلیدی: راندمان کاربرد، یکنواختی توزیع، رتبه‌بندی نامغلوب، نفوذ عمقی.

مقدمه

و نفوذ عمقی است (Abbasi, 2012). در گذشته کارایی سامانه‌های مختلف آبیاری از جمله آبیاری نواری (Rezaverinejad et al., 2015) آبیاری شیاری (Zebardast et al., 2014; Ebrahimian and Liaghat, 2011; Lalezari and Gonzalez et al., 2017) و آبیاری کرتی (Boroomand-Nasab, 2017) مورد واسنجی و ارزیابی قرار گرفته است. به دلیل زیاد بودن پارامترهای مؤثر بر آبیاری سطحی و نیز تغییرات زمانی و مکانی آن‌ها، لزوم استفاده از ابزارهایی که بتوان ضمن طرح مناسب به حداکثر بازده آب دست یافت، اجتناب‌ناپذیر می‌باشد. از جمله این ابزارها می‌توان به مدل‌های آبیاری سطحی اشاره کرد که با شبیه‌سازی هیدرولیک آبیاری سطحی، جریان آب، بازده‌های آبیاری و یکنواختی توزیع را با توجه به شرایط مزرعه‌ای شبیه‌سازی می‌کنند. مدل آبیاری سطحی WinSRFR، مدل ریاضی یک بعدی برای تحلیل و شبیه‌سازی آبیاری سطحی است که کاربرد زیادی در طراحی و مدیریت آبیاری سطحی داشته است

کاهش منابع آب تجدیدپذیر در کشورهای خشک و نیمه‌خشک لزوم بهره‌برداری بهینه از آب به‌ویژه در بخش کشاورزی که بزرگ‌ترین سهم مصرف به‌شمار می‌رود را به چالشی انکارناپذیر تبدیل کرده است. اصلاح الگوی کشت (Khasheie et al., 2013; Rezaverdinejad et al., 2010)، برنامه‌ریزی آبیاری (Lalezari et al., 2016)، استفاده از سامانه‌های آبیاری تحت فشار (Lalezari et al., 2014)، بازچرخانی آب (Al-Khamisi et al., 2013) و افزایش کارایی مصرف آب در سامانه‌های آبیاری سطحی (Lalezari et al., 2015) از موضوعاتی است که در این زمینه مورد توجه بوده است. سامانه‌های آبیاری سطحی به دلیل هزینه پایین اجرا و بهره‌برداری، سهولت در احداث و نگهداری، طراحی منطبق با کشت انواع گیاهان و عدم نیاز به نیروی متخصص و انرژی زیاد از پرکاربردترین روش‌های آبیاری در ایران است. یکی از معایب اصلی آبیاری سطحی اتلاف بالای آب به صورت رواناب

ابعاد نوار را براساس خطوط هم‌تراز بازده کاربرد، بهینه کردند. Morris *et al.* (2015) اثر مقدار و مدت زمان دبی ورودی بر شاخص‌های عملکرد آبیاری نواری (بازده کاربرد و نفوذ عمقی) را با مدل WinSRFR تحلیل کردند. این محققان در دامنه دبی ورودی ۲ تا ۷ لیتر بر ثانیه بر متر و مدت آبیاری ۵۰ تا ۳۰۰ دقیقه و مطابق خطوط هم‌تراز بازده کاربرد و نفوذ عمقی، دبی ورودی و مدت آبیاری را بهینه نمودند. استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی و لینک آن‌ها به مدل شبیه‌سازی، فرایند استخراج جواب بهینه را کوتاه کرده و همچنین براساس قیود مساله، جواب با قابلیت عملیاتی شدن را به بهره‌برداران ارائه می‌دهد. امروزه روش‌های بهینه‌سازی مبتنی بر تکامل و هوش جمعی، از قابلیت بالایی در مسائل بهینه‌سازی برخوردار هستند. الگوریتم ژنتیک چندهدفه (MOGAs) و الگوریتم ژنتیک مبتنی بر رتبه‌بندی نامغلوب (NSGA-II) روش‌های استاندارد الگوریتم ژنتیک چندهدفه محسوب می‌شوند. مهم‌ترین مزایای NSGA-II نسبت به MOGAs عبارتند از: سرعت بیشتر در رسیدن به همگرایی، استفاده از عملگر مقایسه پرجمعیت و پراکندگی یکنواخت جبهه پارتو، رتبه‌بندی مؤثر برای کاهش پیچیدگی حاکم بر الگوریتم، قیده‌های بهینه‌سازی مفهوم و قابل بررسی (Fotakis *et al.*, 2012).

Srinivas and Deb (1994) مدل NSGA برای بهینه‌سازی چندهدفه ارائه کردند که پس از اصلاح توسط Deb *et al.* (2002) در قالب مدل NSGA-II پیشنهاد شد. در این الگوریتم مشکلات عمده مدل‌های بهینه‌سازی چندهدفه پیشین شامل حجم بالای محاسبات در هر تکرار است که منجر به افزایش زمان اجرای مدل می‌گردد و عدم نگهداری تعداد مناسب مقادیر برتر در طول اجرای مدل برطرف شده است. این روش در مهندسی علوم آب برای تهیه مدل‌های الگوی کشت (Lalehzari *et al.*, 2016) و بهبود عملکرد شبکه‌های آبرسانی استفاده شده است. براساس مطالعات صورت گرفته بهبود سامانه آبیاری نواری بر اساس دو دسته متغیر آبیاری (زمان قطع جریان و دبی ورودی) و متغیر هندسی (شیب و طول نوار) گزارش شده است. با این حال در اکثر مطالعات، روش بهینه‌سازی بر پایه اجرای یک مدل آبیاری سطحی در دامنه‌ای از متغیرهای آبیاری و یا هندسی صورت گرفته است و عمدتاً با یک هدف مشخص بوده‌اند.

در این مطالعه مدل شبیه‌سازی WinSRFR به مدل بهینه‌سازی چندهدفه بر پایه رتبه‌بندی نامغلوب (NSGAII) لینک و یک مدل شبیه‌سازی-بهینه‌سازی توسعه داده شده است. مطالعه حاضر با هدف ارزیابی تأثیر پارامترهای طراحی شامل دبی ورودی، زمان قطع جریان، طول و شیب نوار بر معیارهای ارزیابی سامانه آبیاری نواری انتها بسته انجام گرفته است. با توجه به اینکه

(Taghizadeh *et al.*, 2012). WinSRFR با دو مدل ریاضی اینرسی صفر و موج کینماتیکی، هیدرولیک جریان را شبیه‌سازی می‌کند. مطالعات زیادی بر پایه این نرم‌افزار برای آنالیز و یافتن پارامترهای بهینه طراحی و شبیه‌سازی آبیاری سطحی انجام شده است (Koulaian *et al.*, 2015; Bo *et al.*, 2012). در یک مطالعه به منظور ارزیابی و تحلیل عملکرد سامانه آبیاری جویچه‌ای، آزمایش مزرعه‌ای تحت کشت محصول ذرت علوفه‌ای انجام گرفت. تحلیل حساسیت مدل شبیه‌سازی شده توسط WinSRFR نشان داد که بیشترین حساسیت به ترتیب برای دبی ورودی، زمان قطع جریان و پارامترهای نفوذ معادله می‌باشد. به علاوه نتایج منحنی-های هم‌عملکرد سامانه آبیاری نسبت به دبی و زمان قطع جریان، نشان داد که به شرط تأمین عمق مورد نیاز می‌توان راندمان کاربرد را از ۵۴/۵ درصد در شرایط فعلی به ۷۴ درصد افزایش داد و برای بهبود بیشتر راندمان، نیازمند تغییر و اصلاح خصوصیات هندسی می‌باشد (Taghizadeh *et al.*, 2012). Tafteh *et al.* (2017a) در مطالعه خود، تأثیر تغییرات نوار و عمق آب مورد نیاز را در منطقه حمیدیه خوزستان بر راندمان کاربرد با استفاده از WinSRFR بررسی کردند. نتایج نشان داد پارامترهای جریان و هندسی نوار برای افزایش ۱۰ درصد راندمان کاربرد (از ۳۰ درصد در شرایط فعلی به ۴۰ درصد) نیازمند تغییر و اصلاح به مقادیر بهینه هستند. علاوه بر این با اصلاح عمق آب آبیاری، راندمان کاربرد تا ۵۰ درصد و با انجام عملیات شخم و به‌سازی خاک و مدیریت آبیاری، امکان افزایش نسبی تا ۶۶ درصد نیز فراهم می‌گردد. در مطالعه مشابه در این منطقه، کاهش طول نوار از ۲۰۰ متر به ۱۸۰ متر برای افزایش ۲۲ درصدی راندمان کاربرد پیشنهاد شده است (Tafteh *et al.*, 2017b). در مطالعه دیگر که بر روی سامانه‌های آبیاری نواری انتها باز صورت گرفت، نتایج نشان داد که مدیریت متغیرهای هندسی نوار مانند شیب و طول نوار و متغیرهای جریان (دبی ورودی و زمان قطع جریان) می‌تواند به-طور متوسط ۱۳/۳۵ درصد راندمان کاربرد را نسبت به شرایط موجود افزایش دهد (Rezaverdinejad *et al.*, 2015). (2011) Gonzalez *et al.* اثر شیب طولی مزرعه را روی یکنواختی توزیع آبیاری سطحی با مدل WinSRFR بررسی کردند. نتایج به‌صورت گراف‌های سه بعدی که رابطه شیب مزرعه و یکنواختی توزیع با سایر متغیرهای بی‌بعد شده شامل نفوذ، ضریب زبری، زمان قطع جریان، شدت جریان و طول و عرض مزرعه را نشان می‌داد، ارائه گردید. (Chen *et al.*, 2013) در شبکه آبیاری واقع در چین، عملکرد آبیاری نواری براساس مدل اینرسی-صفر و متغیرهای هندسی عرض و طول نوار را بهینه کردند. این محققان برای بهینه‌سازی جریان مشخص (دبی ورودی و زمان آبیاری مشخص)،

بر ثانیه و در چهار مرحله آبیاری (در مجموع تعداد ۲۴ اندازه-گیری) انجام گرفت و شبیه‌سازی شد. جریان ورودی به نوارها با نصب فلوم‌های WSC اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری سرعت پیشروی و پسروی، مرکز نوارها با میخ‌های چوبی علامت‌گذاری شدند.

ساختار مدل‌سازی

شکل (۱) فرایند شبیه‌سازی و بهینه‌سازی چندهدفه برای جستجوی پاسخ بهینه از دامنه امکان‌پذیر پارامترهای هندسی (طول، عرض و شیب) و جریان (دبی ورودی و زمان قطع جریان) برای یک سامانه آبیاری نواری انتها بسته با عمق مورد نیاز آبیاری معین را نشان می‌دهد. مطابق شکل، پنج متغیر تصمیم یا مقادیر بهینه خروجی مدل در ابتدا در بازه امکان‌پذیر در ۵۰ درصد محدوده انجام آزمایش تعریف و برای مقادیر بهینه بدست آمده در پایان مدل‌سازی، آنالیز حساسیت در دامنه‌های ۱۰، ۲۵ و ۵۰ درصد، صورت گرفت. پارامترهای p و q در شکل (۱) دو عضو فرضی جمعیت در الگوریتم بهینه‌سازی هستند. شبیه‌سازی جریان در نوار با استفاده از روش اینرسی صفر در قالب نرم‌افزار WinSRFR برنامه‌ریزی و اجرا گردید. مطابق شکل (۱) توابع هدف (OF_1 و OF_2) و محدودیت‌های لحاظ شده در مسئله بهینه‌سازی عبارت‌اند از:

$$\text{Max } OF_1 = D_{\min}/D_{\text{req}} \quad (\text{رابطه ۱})$$

$$\text{Min } OF_2 = D_{\text{dp}} \quad (\text{رابطه ۲})$$

Subject to:

$$D_{\min}/D_{\text{req}} \leq 1 \quad (\text{رابطه ۳})$$

$$D_{\text{dp}} < D_{\min} \quad (\text{رابطه ۴})$$

$$0 < k < 10 \quad (\text{رابطه ۵})$$

$$0 < a \leq 1 \quad (\text{رابطه ۶})$$

$$0 \leq b \leq 15 \quad (\text{رابطه ۷})$$

$$0 \leq c \leq 5 \quad (\text{رابطه ۸})$$

$$0.01 \leq n \leq 0.1 \quad (\text{رابطه ۹})$$

در معادله فوق، D_{\min} ، D_{req} و D_{dp} به ترتیب حداقل عمق آب دریافتی، عمق آب موردنیاز و نفوذ عمقی هستند. علاوه بر این، با توجه به اینکه از معادله نفوذ کوستیاکف اصلاح شده به صورت معادله (۱۰) استفاده شده است، محدودیت‌های مسأله شامل حدود تغییرات ضرایب a ، b ، c و نیز ضریب زبری مانینگ، n ، می‌گردد که مقادیر عددی بر اساس بافت خاک و اجزاهای متعدد مدل برای برآورد بهترین دامنه هر یک از آن‌ها به‌دست آمده است.

$$Z_n = kt^a + bt + c \quad (\text{رابطه ۱۰})$$

که در آن Z_n : عمق تجمعی نفوذ آب در خاک (میلی‌متر) و

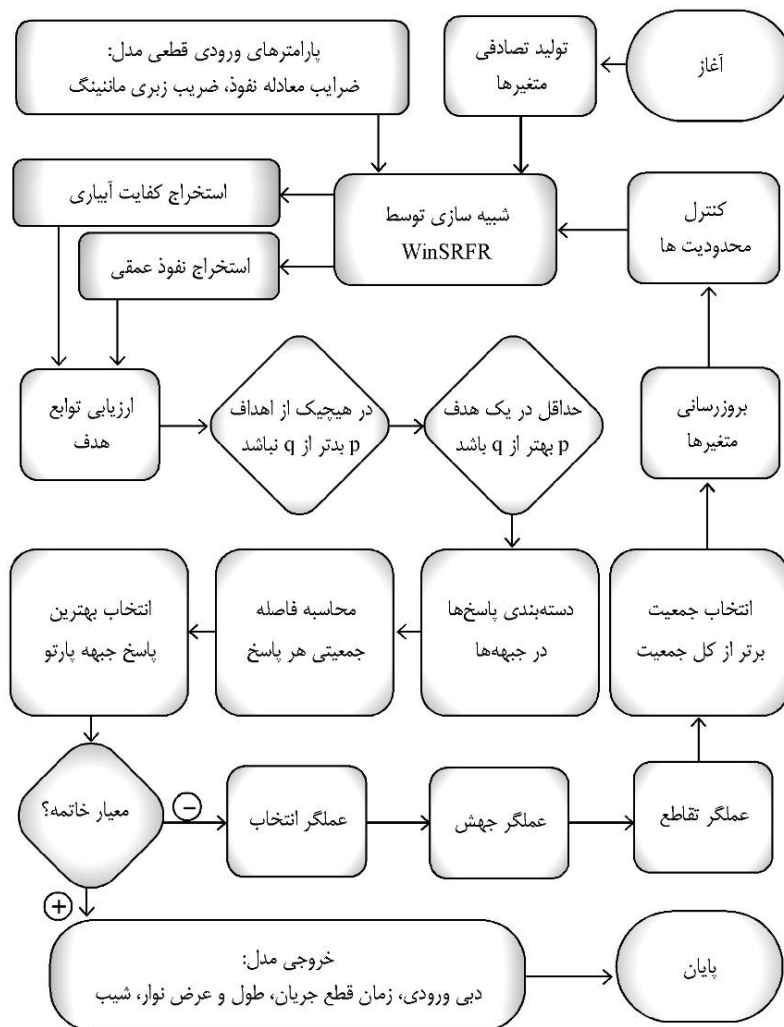
t : فرصت زمان نفوذ (ساعت) می‌باشند.

بیشترین عدم قطعیت در شبیه‌سازی آبیاری نواری مربوط به پارامترهای معادله نفوذ و ضریب زبری مانینگ می‌باشد، لذا ابتدا بهترین معادله نفوذ و ضریب زبری مانینگ برای کاهش اختلاف بین مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده فاز پیشروی و پسروی برازش داده شد. در گام بعد، فرایند توسعه مدل شبیه‌سازی-بهینه‌سازی سامانه آبیاری نواری انتها بسته توسط WinSRFR و مدل بهینه‌سازی چندهدفه الگوریتم ژنتیک بر پایه رتبه‌بندی نامغلوب بصورت زنجیره تبادلی داده‌های ورودی و خروجی ارتباط داده شد.

مواد و روش‌ها

محدوده مورد مطالعه

پروژه شبکه آبیاری و زهکشی رامشیر در استان خوزستان، به-عنوان یکی از واحدهای اجرایی طرح ۵۵۰ هزار هکتاری احیاء دشت‌های خوزستان و ایلام در حال اجرا می‌باشد. این شبکه آبیاری بین 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 واقع گردیده است. روش آبیاری در اراضی ساحل چپ رامشیر (تحت عنوان ناحیه عمرانی یک) به صورت نوار انتها بسته می‌باشد. در این مطالعه یک مزرعه آزمایشی برای جمع‌آوری داده-های مورد نیاز برای واسنجی مدل شبیه‌سازی و سپس توسعه مدل شبیه‌سازی-بهینه‌سازی طرح و عملیات اجرایی مزرعه آزمایشی شامل عملیات تسطیح، مرزبندی و تشکیل نوارهای آبیاری با توجه به نهر درجه چهار آبیاری، در سال ۱۳۹۳ انجام شد. برای بررسی بافت خاک از دو عمق ۰-۲۵ و ۲۵-۵۰ سانتی-متر در پنج نقطه مزرعه پایلوت، نمونه‌برداری صورت گرفت. مطابق تجزیه خاک، بافت خاک محل آزمایش نسبتاً سنگین بوده و به طور متوسط لایه‌های ۰-۲۵ و ۲۵-۵۰ سانتی‌متر به ترتیب دارای بافت خاک لوم رسی سیلتی تا لوم رسی می‌باشند. متوسط وزن مخصوص ظاهری و حقیقی خاک لایه‌های مختلف به ترتیب برابر ۱/۷ و ۲/۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب می‌باشند. سه طول نوار ۱۴۰، ۱۶۰ و ۱۸۰ متر با توجه به طول زمین و نیز شرایط طرح پیشنهادی توسط مشاور طرح در نظر گرفته شد. در مزرعه آزمایشی، اطلاعات مراحل پیشروی، پسروی، هیدروگراف جریان ورودی به نوارها، پارامترهای هندسی نوارها و سایر مشخصات، اندازه‌گیری شد. بر اساس محاسبات منتج از صفحه تسطیح طراحی و اجرا شده در مزرعه آزمایشی، شیب طولی نوار در جهت آبیاری ۰/۰۰۰۲۱ متر بر متر و عرض نوارها ۶/۳ متر می‌باشد. آزمایشات مربوط به جمع‌آوری داده‌های مورد نیاز برای مدل‌سازی



شکل ۱. نمودار گردش کار شبیه‌سازی و بهینه‌سازی چندهدفه پارامترهای طراحی آبیاری نواری انتها بسته

توسط کد توسعه یافته به ساختار ورودی نرم‌افزار WinSRFR تبدیل و در پوشه ورودی آن ذخیره می‌گردد. پنجره شبیه‌سازی نرم‌افزار در بخش اجراهای چندگانه اطلاعات ساخته شده توسط الگوریتم بهینه‌سازی را خوانده و شبیه‌سازی آبیاری نواری به نوبت برای هر دسته داده ذخیره شده انجام و پارامترهای خروجی در همان پوشه به ترتیب اجراها ثبت می‌شود. پس از اتمام اجرای نرم‌افزار که به تعداد جمعیت اولیه (۱۰۰۰ مرحله اجرا) است، پارامترهای ارزیابی به دست آمده برای کلیه ۱۰۰۰ اجرا توسط MATLAB فراخوانی می‌شود. در این بخش توابع هدف برای رتبه‌بندی مطابق با فرایندی که در شکل (۱) نشان داده شده است و در بخش بعد تشریح می‌گردد فرستاده شده و همه اعضای جمعیت دارای شماره رتبه و جبهه می‌شوند. سپس عملگر انتخاب از الگوریتم ژنتیک دو عضو از جبهه‌های ضعیف‌تر را برگزیده و به عملگرهای جهش و تقاطع ارسال می‌کند. با تغییرات اعمال شده بر روی اعضای جمعیت اولیه و تولید اعضای جدید، زیربرنامه‌های

همانگونه که اشاره شد برای محاسبات تکراری بین مدل‌های شبیه‌سازی و بهینه‌سازی از دو هدف متضاد بیشینه‌سازی نسبت کمترین عمق آب دریافتی به عمق آب موردنیاز (میلی‌متر) و کمینه‌سازی ارتفاع نفوذ عمقی (میلی‌متر) استفاده شد. فرایند کار به این صورت است که ابتدا ضرایب معادله نفوذ و ضریب زبری مانینگ بر اساس اطلاعات پیشروی و پسروی در یک آزمایش توسط الگوریتم ژنتیک واسنجی شده و بهترین مقادیر بر اساس شاخص مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE) برآورد می‌شود. در مرحله بعد این ضرایب به‌عنوان داده‌های قطعی در یک ماتریس به عنوان فایل ورودی به WinSRFR قرار می‌گیرند. گام بعدی ایجاد ماتریس متغیرهای تصمیم مسأله شامل دبی ورودی، زمان قطع جریان، طول، عرض و شیب نوار در فضای تصمیم مسأله است (فضای تصمیم یا فضای امکان پذیر معادل ۵۰ درصد افزایش برای حد بالا و ۵۰ درصد کاهش برای تعیین حد پایین متغیرهای تصمیم در نظر گرفته شد). ماتریس متغیرهای تصمیم مسأله

ازای هر پاسخ X در فضای تصمیم امکان پذیر، یک نقطه متناظر آن در فضای تابع هدف وجود دارد (Deb et al., 2002). در یک الگوریتم جمعیت گرا با n هدف در فرایند کمینه سازی اگر دو شرط ذیل همزمان برقرار شوند پاسخ p بر q غلبه می کند:

(رابطه ۱۱)

$$p \leq q \rightarrow \begin{cases} \forall n = 1, 2, \dots, N \quad f_n(p) \leq f_n(q) \\ \exists n = 1, 2, \dots, N \quad f_n(p) < f_n(q) \end{cases}$$

که به عبارتی پاسخ p در تمامی توابع هدف نباید از پاسخ q بدتر باشد و پاسخ p باید حداقل در یک تابع هدف بهتر از پاسخ q باشد (شکل ۱ و معادله ۳). بر این اساس، کلیه جواب هایی که توسط سایر نقاط مغلوب نمی شوند، نامغلوب به شمار می روند. در جبهه پارتو (پاسخ های نامغلوب) بهبود هر یک از اهداف تنها با بدتر شدن حداقل یکی از دیگر اهداف امکان پذیر است. در یک مسئله دو هدفه مجموعه پاسخ ها در یک فضای دو بعدی قرار می گیرند که شکل جبهه پارتو به بیشینه یا کمینه کردن هر یک از اهداف بستگی دارد (شکل ۲). پاسخ های واقع در ناحیه خط چین امکان پذیر ولی غیر بهینه هستند و اگر بهبود هر تابع هدف به سمت افزایش یا کاهش جهت داشته باشد یکی از مرزهای نشان داده شده در شکل به عنوان پاسخ های بهینه یا جبهه پارتو معرفی می شود. در تحقیق حاضر از دستورات کمینه سازی توابع به دلیل تشکیل جبهه قابل تشخیص برای توصیف مناسب تر استفاده شده است.

در هر مسئله بهینه سازی دو هدف عمده شامل: یافتن مجموعه جواب های واقع بر جبهه بهینه پارتو و حفظ تنوع^۱ در پاسخ های بهینه در طول جبهه پارتو دنبال می شود. به عبارت دیگر اولویت اول جستجوی بهترین تقریب از جبهه پارتو و اولویت بعدی یافتن پاسخ هایی است که با بیشترین یکنواختی در جبهه پارتو توزیع شده اند. گزینش اعضا در یک دسته با رتبه یکسان بر اساس پارامتر کنترلی فاصله جمعیت انجام می گیرد. این پارامتر برای اعضای هر گروه محاسبه می شود و بیانگر اندازه ای از نزدیکی نمونه مورد نظر به دیگر اعضای جمعیت آن دسته می باشد. مقدار بزرگ فاصله جمعیت منجر به واگرایی و پراکنش بهتر در مجموعه اعضای جمعیت می شود. برای محاسبه این پارامتر برای هر یک از اعضا از رابطه (۱۲) و براساس توابع هدف استفاده شد (Deb et al., 2002).

$$CD_i = \sum_{m=1}^2 \frac{OF_m(i+1) - OF_m(i-1)}{OF_i^{\max} - OF_i^{\min}} \quad (\text{رابطه ۱۲})$$

که در رابطه فوق، CD ، معیار فاصله جمعیتی، OF ، تابع هدف، m ، شماره تابع هدف و i شماره هر عضو در جمعیت می باشد.

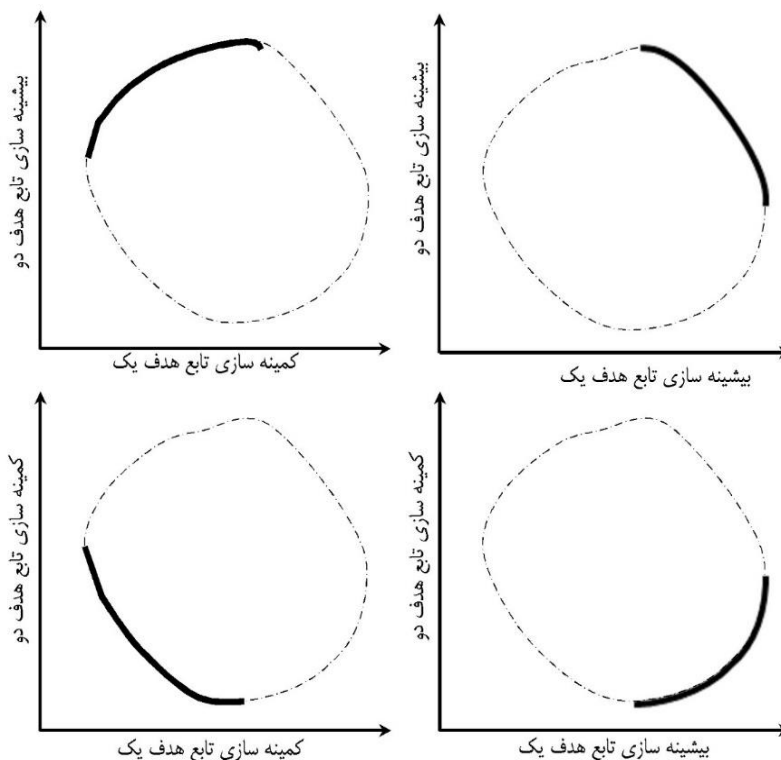
رتبه بندی نامغلوب و فاصله جمعیتی مجدداً همه اعضا را طبقه بندی کرده و به تعداد جمعیت اولیه از بهترین اعضا انتخاب می شوند. سایر معیارهای ارزیابی (راندمان کاربرد، یکنواختی توزیع و ...) برای اعضای قرار گرفته در جبهه اول مجموعه جواب ها کدگذاری می گردد تا در فرایند تحلیل و انتخاب پاسخ بهینه از مجموعه جواب های جبهه پارتو به کار گرفته شوند. معیار خاتمه در این مکانیزم بر اساس همگرایی پاسخ های واقع در دو انتهای جبهه پارتو صورت می گیرد.

الگوریتم ژنتیک

در تحقیق حاضر، عملگرهای الگوریتم ژنتیک به عنوان موتور جستجو برای بهبود متغیرها در تکرارهای مدل بهینه سازی با حداکثر تکرار ۲۰۰ مورد استفاده قرار گرفته است. الگوریتم ژنتیک یک الگوریتم محاسباتی بهینه سازی است که با در نظر گرفتن مجموعه ای از نقاط فضای جواب در هر تکرار محاسباتی، به نحو مؤثری نواحی مختلف فضای جواب را جستجو می کند. در الگوریتم ژنتیک دو نوع عملگر شامل: عملگرهای تکاملی مانند انتخاب و عملگرهای ژنتیک مانند تقاطع و جهش وجود دارد. بر این اساس الگوریتم ژنتیک در این تحقیق با عملگرهای انتخاب دودویی، جهش با نرخ جهش ۰/۰۱ و تقاطع با ضریب تقاطع ۰/۸ به کار گرفته شده است. در روش های کلاسیک، مسائل بهینه سازی که نیاز به اعمال بیش از یک هدف داشت با روش وزن دهی به توابع هدف به یک تابع تک هدفه تبدیل و حل آن به آسانی صورت می گرفت. انتخاب مناسب و دقیق ضریب وزنی برای هر یک از توابع هدف کار ساده ای نیست و در برخی مسائل جواب بهینه محاسبه شده به وزن انتخاب شده حساسیت بالایی دارد و تغییرات جزئی در این ضرایب، نوسانات زیادی در مقدار بهینه ایجاد می کند. از طرفی تصمیم گیرنده ها اغلب ترجیح می دهد مجموعه ای از پاسخ های مطلوب را در اختیار داشته باشد. این موضوع به دلیل تمایل به یافتن یک دید کلی نسبت به مسئله و آگاهی یافتن از پاسخ های جایگزین می باشد. از این رو در مسائل تک هدفه جبهه پارتو با چندین بار اجرای مستقل برنامه حاصل می گردد که زمان بر بوده و حجم محاسباتی زیادی را نیز به دنبال دارد. همچنین به دلیل اجرای مستقل برنامه، الگوریتم قادر به استفاده از اطلاعات مفید پیرامون و یا پاسخ غیر مفید قبلی نیست لذا امکان پدید آمدن پاسخ های مشابه در نتیجه اجراهای متعدد برنامه وجود دارد.

بهینه سازی چندهدفه مبتنی بر رتبه بندی نامغلوب

در مسائل بهینه سازی چندهدفه، توابع هدف یک فضای دو بعدی (به تعداد اهداف) از جواب های بهینه را تشکیل می دهند که به



شکل ۲. چهار وضعیت ممکن جبهه پارتو در یک مسئله دوهدفه

به عنوان معیارهای مقایسه پاسخ‌های بهینه قرار گرفته در جبهه پارتو هستند.

نتایج و بحث

واسنجی ضرایب نفوذ و شبیه‌سازی آزمایش‌ها

همانگونه که در روش تحقیق آمده است آبیاری نواری انتها بسته با سه طول ۱۴۰، ۱۶۰ و ۱۸۰ متر با دبی‌های ۱۰ و ۱۵ لیتر بر ثانیه در چهار مرحله آبیاری شده و اطلاعات پیشروی و پسروی آنها ثبت شده است. در این مرحله پارامترهای معادله نفوذ کوستیاکف اصلاح شده و ضریب زبری مانینگ به عنوان پارامترهای واسنجی و با هدف حداقل‌سازی اختلاف پیشروی و پسروی جریان با مقادیر شبیه‌سازی مدل، در نظر گرفته شد. مقادیر به دست آمده برای این پارامترها به همراه مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE) برای آزمایش‌ها در جدول (۱) آمده است. مطابق جدول، مدل بهینه‌سازی قابلیت برآورد ضرایب را با مجذور میانگین مربعات خطا حدود ۲/۲ تا ۲/۹ دقیقه دارد. در مطالعه مشابه، ضرایب نفوذ و ضریب زبری مانینگ برای آبیاری نواری انتها با روش بهینه‌سازی چندسطحی با مجذور میانگین مربعات خطا برابر با ۳/۱ دقیقه محاسبه شده است (Rezaverinejad et al., 2015).

معیارهای ارزیابی

برای ارزیابی هر یک از گزینه‌های مدیریتی به دست آمده از مدل توسعه یافته از شاخص‌های راندمان کاربرد (AE)، نسبت نفوذ عمقی (DP)، نسبت رواناب (RO)، کفایت آبیاری حداقل (AD_{min}) و چارک پایین (AD_{lq}) و یکنواختی آبیاری حداقل (DU_{min}) ربع پایین (DU_{lq}) استفاده شد:

$$AE = \frac{D_z}{D_{app}} \quad \text{(رابطه ۱۳)}$$

$$DP = \frac{D_{dp}}{D_{app}} \quad \text{(رابطه ۱۴)}$$

$$RO = \frac{D_{ro}}{D_{app}} \quad \text{(رابطه ۱۵)}$$

$$AD_{lq} = \frac{D_{lq}}{D_{req}} \ \& \ AD_{min} = \frac{D_{min}}{D_{req}} \quad \text{(رابطه ۱۶)}$$

$$DU_{min} = \frac{D_{min}}{D_{inf}} \ \& \ DU_{lq} = \frac{D_{lq}}{D_{inf}} \quad \text{(رابطه ۱۷)}$$

که در آن D_z : عمق آب مورد نیاز، D_{app} : عمق آب آبیاری، D_{dp} : ارتفاع آب نفوذ یافته به صورت عمقی از ناحیه ریشه، D_{app} : ارتفاع آب آبیاری، D_{ro} : ارتفاع رواناب خروجی، D_{min} و D_{lq} : عمق نفوذ حداقل و عمق نفوذ چارک پایین، D_{req} : عمق خالص مورد نیاز و D_{inf} : عمق متوسط نفوذ یافته برحسب میلی‌متر می‌باشند و

جدول ۱. نتایج بهینه‌سازی ضرایب نفوذ و ضریب زبری مانینگ

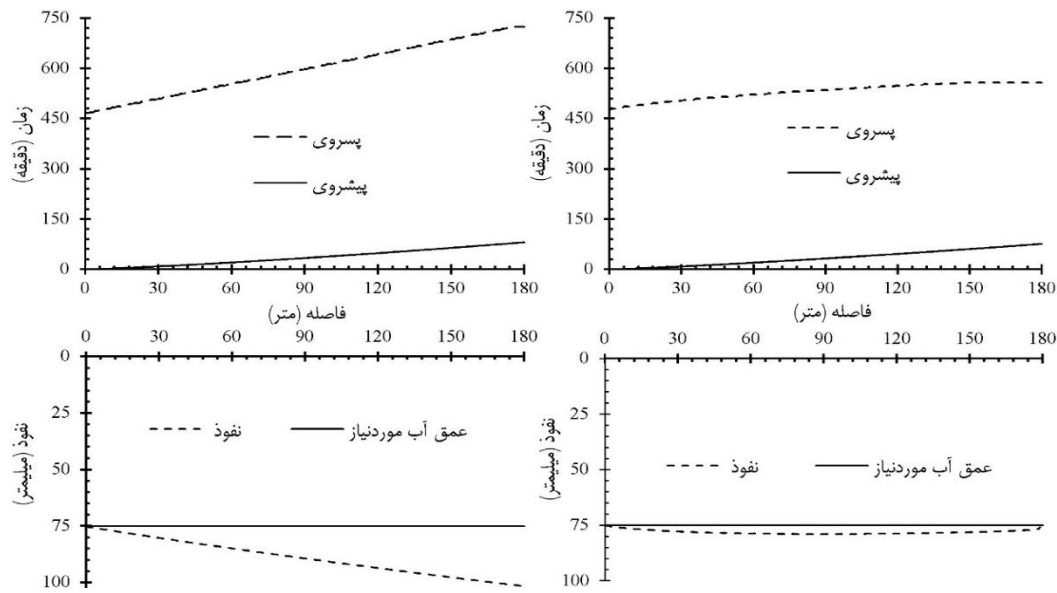
طول نوار (m)	دبی جریان (l/sec)	زمان قطع جریان (min)	k (mm/ha ³)	a -	b (mm/hr)	c (mm)	ضریب زبری مانینگ	RMSE (min)
۱۰	۷۵	۲/۸	۰/۶۸	۵/۶	۰	۰/۰۵۱	۲/۲۶	
		۳/۶	۰/۵۲	۷/۴	۰	۰/۰۵۱	۲/۶	
		۴/۳	۰/۴۷	۷/۸	۰/۸	۰/۰۵۱	۲/۴۶	
		۴/۱	۰/۴۸	۷/۹	۰/۹	۰/۰۵۲	۲/۶۴	
۱۸۰	۶۰	۵/۱	۰/۳۲	۸/۳	۱/۲	۰/۰۵۱	۲/۸۶	
		۷/۷	۰/۳۷	۸/۱	۰/۴۳	۰/۰۵۱	۲/۸۳	
		۴/۱	۰/۲۸	۷/۵	۰/۱۴	۰/۰۵۲	۲/۷۵	
		۱/۶	۰/۶۸	۵/۱	۰/۱۲	۰/۰۵۳	۲/۶۷	
۱۰	۵۴	۴/۳	۰/۵۴	۷/۷	۰/۰۵	۰/۰۵۰	۲/۴۳	
		۳/۱	۰/۵۸	۶/۱	۰	۰/۰۵۱	۲/۳۶	
		۲/۶	۰/۴۲	۷/۴	۰/۱	۰/۰۵۱	۲/۷۶	
		۳/۱	۰/۴۹	۸/۰	۰/۰۸	۰/۰۵۳	۲/۴۵	
۱۶۰	۴۸	۴/۴	۰/۶۴	۵/۹	۰	۰/۰۴۸	۲/۶۷	
		۵/۲	۰/۴۶	۶/۲	۱	۰/۰۴۸	۲/۸۱	
		۴/۸	۰/۵۱	۷/۸	۰/۱	۰/۰۵۱	۲/۳۷	
		۳/۴	۰/۶۳	۵/۴	۰/۲۱	۰/۰۵۱	۲/۵۳	
۱۰	۴۰	۳/۷	۰/۴۳	۶/۹	۰/۶۸	۰/۰۵۲	۲/۷۶	
		۴/۸	۰/۷۱	۴/۸	۰/۹۲	۰/۰۵۲	۲/۲۴	
		۳/۲	۰/۵۳	۸/۳	۰/۳۲	۰/۰۵۳	۲/۸۴	
		۲/۹	۰/۴۴	۶/۱	۰/۱۱	۰/۰۵۵	۲/۶۴	
۱۴۰	۳۱	۴/۶	۰/۳۸	۵/۸	۱/۳	۰/۰۴۹	۲/۳۳	
		۳/۷	۰/۶۸	۷/۳	۰/۸۳	۰/۰۵۱	۲/۵۹	
		۵/۱	۰/۴۷	۸/۲	۰/۵۵	۰/۰۵۲	۲/۲۱	
		۳/۲	۰/۳۸	۹/۱	۰	۰/۰۵۲	۲/۹۰	

مقایسه آبیاری نواری انتها بسته و انتها باز

زمان قطع جریان

هر یک از پارامترهای طراحی شامل طول و عرض نوار، دبی و زمان قطع جریان و شیب زمین برای پاسخ بهینه، در شرایطی که سایر داده‌های ورودی ثابت باشد، محاسبه گردید. همچنین برای ارزیابی قابلیت‌های آبیاری نواری انتها بسته، هر یک از شرایط بهینه با مقادیر نظیر آن در سامانه آبیاری نواری انتها باز مقایسه شد. بر این اساس، بهترین زمان قطع جریان برای تأمین حداقل عمق آب مورد نیاز (۷۵ میلی‌متر محاسبه شده بر اساس نیاز آبی گندم) در مقابل کمترین میزان نفوذ

عمقی، ۱۶۸ دقیقه به دست آمد (شکل ۳). این زمان برای توابع هدف در سامانه انتها باز به ۴۲۹ دقیقه افزایش یافته است. بنابراین حجم آب مورد استفاده در سامانه انتها باز بیش از ۱۵۶ مترمکعب افزایش یافته است. مطابق شکل، نفوذ عمقی و یکنواختی توزیع در سامانه انتها باز بیشتر بوده است. سایر معیارهای ارزیابی در جدول (۲) ارائه شده است. مطابق جدول، آبیاری با شرایط موجود با دبی ۱۰ لیتر بر ثانیه و زمان قطع جریان ۹۰ دقیقه به سور متوسط به میزان ۴۸ میلی‌متر در خاک نفوذ کرده و با کفایت آبیاری ۴۵ درصد و یکنواختی توزیع ۷۲ درصد نمی‌تواند نیاز آبی محصول را تأمین کند.

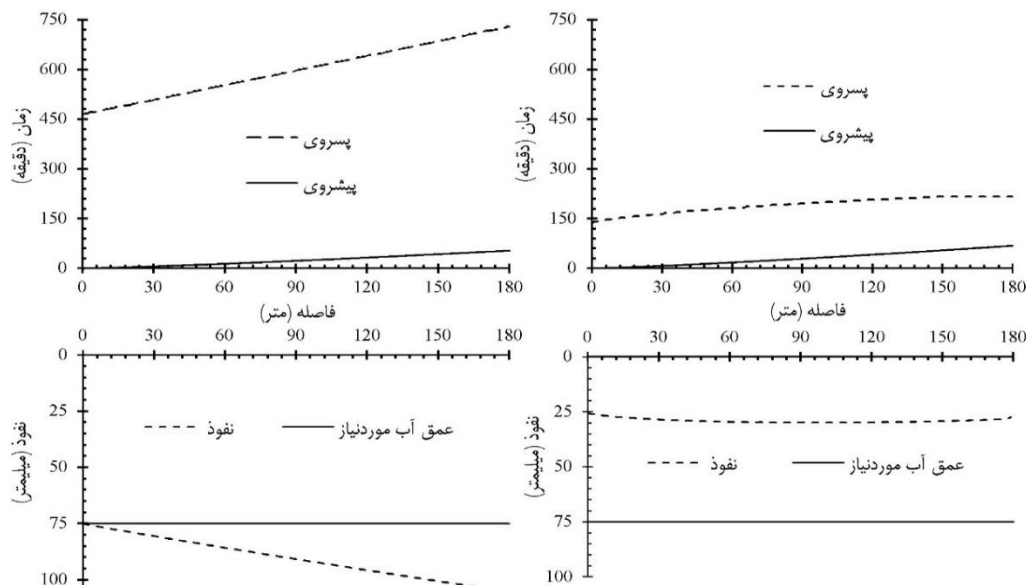


شکل ۳. مقایسه سامانه آبیاری انتها بسته (سمت چپ) و انتها باز (سمت راست) در زمان قطع جریان بهینه

مقایسه شده است (جدول ۲). نتایج نشان می‌دهد متغیر تصمیم دبی ورودی برای شرایط مسأله در سامانه انتها بسته باید تا حدود دو برابر افزایش یابد. مطابق ارزیابی این دو سامانه در جدول (۲) یکنواختی توزیع ۸۳ و ۸۸ درصد و کفایت آبیاری ۱۰۰ و ۳۴ درصد به ترتیب برای سامانه انتها بسته و انتها باز برآورد شده است. راه حل استفاده از سامانه آبیاری انتها باز برای تأمین حداقل آب مورد نیاز، کاهش دبی ورودی و فواصل آبیاری است که موجب کاهش عمق آب مورد نیاز در نتیجه افزایش کفایت آبیاری می‌گردد (Ebrahimain and Liaghat, 2011).

دبی ورودی

نمودار تأثیر دبی ورودی بر نفوذ آب در خاک به عنوان پارامتر دوم مورد نظر برای توابع هدف مسأله، در شکل (۴) ارائه شده است. بهترین مقدار دبی ورودی برای آبیاری نواری انتها بسته ۱۹ لیتر بر ثانیه در مقابل ۱۱/۸ لیتر بر ثانیه برای سامانه انتها باز به دست آمد. منحنی‌های پیشروی و پسروی و پروفیل نفوذ آب در خاک ترسیم شده در سمت راست شکل (۴) (سامانه انتها باز) و با توجه به نتایج مدل بهینه‌سازی، در زمان قطع جریان ۹۰ دقیقه با هیچ دبی ورودی نمی‌توان به کفایت آبیاری ۱۰۰ درصد رسید و دبی به دست آمده بر اساس بهترین مقدار راندمان کاربرد انتخاب و

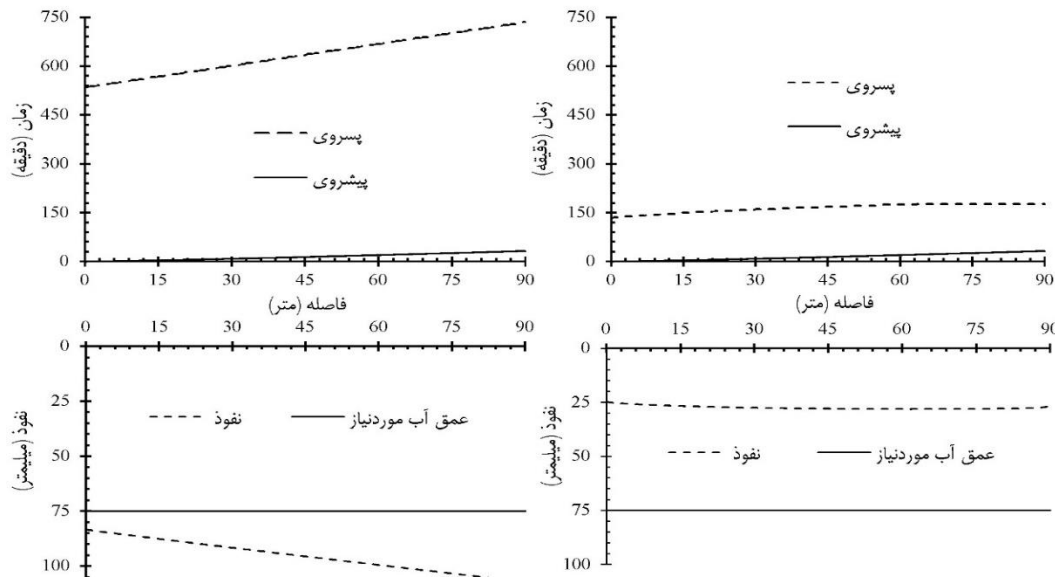


شکل ۴. مقایسه سامانه آبیاری انتها بسته (سمت چپ) و انتها باز (سمت راست) با دبی ورودی بهینه

طول نوار

به کار برده شده، ۲۰ میلی‌متر آب به صورت نفوذ عمقی تلف شده و مابقی با حداقل یکنواختی توزیع ۸۷ درصد به مصرف گیاه می‌رسد (جدول ۲). به دلیل افزایش حداقل عمق آب دریافتی نسبت به عمق آب مورد نیاز (کفایت آبیاری بالای ۱۰۰ درصد)، برای افزایش راندمان کاربرد به بالاتر از ۷۹ درصد باید دبی ورودی یا زمان قطع جریان را کاهش داد.

طول بهینه برای شرایط ذکر شده نوار آبیاری موجود، ۱۰۳ متر محاسبه شده است که به دلیل ابعاد مزرعه برای طراحی و مدیریت مطلوب آب می‌تواند نصف طول اصلی (۹۰ متر) برای شبیه‌سازی در نظر گرفته شود. بنابراین در شکل (۵) با کاهش طول نوار، زمان فاز پیشروی به ۳۲ دقیقه کاهش یافته است. از ۹۵ میلی‌متر آب



شکل ۵. مقایسه آبیاری نواری انتها بسته (سمت چپ) و انتها باز (سمت راست) با طول بهینه

ترکیب از پارامترهای طراحی موجب بیشترین ترکیب راندمان کاربرد و یکنواختی توزیع و کمترین درصد نفوذ عمقی در مقایسه با سایر سناریوها شده است. لازم به توضیح است در صورت محدودیت در اجرای طول‌های مختلف در مزرعه یا تأمین دبی ورودی موردنیاز می‌توان تنها از طریق تغییر در زمان قطع جریان به نتایجی در نزدیک‌ترین محدوده پاسخ بهینه دست یافت. در مطالعات (Morris et al. (2015)، (Chen et al. (2013) و Taftah (2017a) نیز زمان قطع جریان مهمترین عامل طراحی در افزایش کارایی آبیاری سطحی به شمار آمده است.

بهینه سازی دبی ورودی، زمان قطع جریان و طول نوار
 پس از ارزیابی هر یک از پارامترهای طراحی برای کاربرد در شرایط واقعی موجود، نتایج ارزیابی بهینه‌سازی همزمان سه پارامتر دبی ورودی، زمان قطع جریان و طول نوار در جدول (۲) با سایر گزینه‌ها مقایسه شده است. معیار انتخاب این پاسخ از مجموعه جواب‌های جبهه پارتو بر اساس حداکثر راندمان کاربرد و اعداد نزدیک به مقادیر قابل کاربرد در مزرعه بوده است. با این رویکرد دبی ورودی پیشنهادی، ۲ لیتر بر ثانیه در واحد عرض، زمان قطع جریان، ۱۲۰ دقیقه و طول نوار، ۱۶۰ متر پیشنهاد شده است. این

جدول ۲. معیارهای ارزیابی سامانه آبیاری نواری در حالت پارامترهای ورودی بهینه

پارامتر بهینه	شرایط مرزی پایین دست	راندمان کاربرد (درصد)	یکنواختی توزیع (درصد)	نفوذ عمقی (درصد)	رواناب (درصد)	کفایت آبیاری (درصد)	عمق آب آبیاری (میلی‌متر)
شرایط موجود		۱۰۰	۷۲	۰	۰	۴۵	۴۸
زمان قطع جریان	نوار انتها بسته	۸۴	۸۴	۱۶	۰	۱۰۰	۸۹
	نوار انتها باز	۳۳	۹۶	۱	۶۶	۱۰۰	۲۲۷
دبی ورودی	نوار انتها بسته	۸۳	۸۳	۱۷	۰	۱۰۰	۹۰
	نوار انتها باز	۵۲	۸۸	۰	۴۸	۳۴	۵۶
طول نوار	نوار انتها بسته	۷۹	۸۷	۲۱	۰	۱۱۱	۹۵
	نوار انتها باز	۲۹	۹۱	۰	۷۱	۳۳	۹۵
	دبی، زمان قطع جریان و طول نوار	۸۴	۸۵	۱۴	۰	۱۰۰	۸۸

ارزیابی تغییرات پارامترهای ورودی

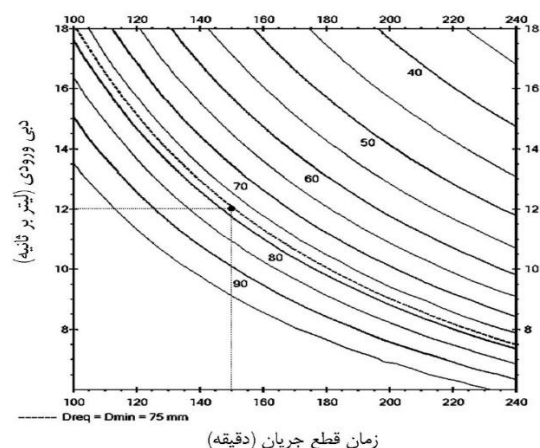
یکی از مراحل که اعتمادپذیری نتایج را نشان می‌دهد تحلیل معیارهای ارزیابی مدل نسبت به تغییر پارامترهای ورودی است. با این مفهوم با ایجاد ۱۰، ۲۵ و ۵۰ درصد تغییر در جهات مثبت و منفی در مقادیر زمان قطع جریان، دبی ورودی، طول و شیب نوارها، واکنش عوامل ارزیابی مدل شبیه‌سازی، نسبت به این تغییرات بررسی شده است. شکل (۷) و جدول (۳) مقایسه پارامترهای ارزیابی آبیاری نواری مطالعه شده در برابر چهار پارامتر اصلی تغییرات در زمان قطع جریان، دبی ورودی، طول و شیب نوار را نشان می‌دهند. مطابق این شکل، مشاهده می‌شود که کفایت آبیاری، با افزایش زمان قطع جریان افزایش یافته و شیب افت آن در برابر کاهش زمان به نسبت ملایم‌تر بوده است. به علاوه با کاهش زمان، یکنواختی توزیع کمینه و چارک پایین به دلیل کاهش آبرفتگی انتهای نوار افزایش داشته است. در این شرایط، ۲۰ میلی‌متر از کل ۲۳ میلی‌متر آب اضافه شده به عمق آب بهینه به صورت نفوذ عمقی از دسترس گیاه خارج و موجب کاهش ۲۶ درصدی راندمان کاربرد شده است. یکنواختی توزیع کمینه به تغییر جریان ورودی حساسیت قابل توجهی نداشته و حدود تغییرات آن در چارک پایین به ۶ درصد می‌رسد. علاوه بر این با ثابت بودن زمان قطع جریان، عمق آب آبیاری، نفوذ عمقی و کفایت آبیاری با تغییر شدت جریان ورودی نسبت مستقیم دارند. واکنش پارامترهای ارزیابی آبیاری نواری انتها بسته به تغییر طول نوار فرایند متفاوتی نسبت به حجم آب ورودی به مزرعه دارد. با نصف شدن طول نوار، کفایت آبیاری به حدود سه برابر افزایش خواهد یافت ولی افزایش آن تنها حدود ۲۰ درصد از مقدار اولیه کاهش نشان می‌دهد. این موضوع با توجه به جدول به دلیل صفر شدن نفوذ عمقی و افزایش چهار درصدی راندمان کاربرد می‌باشد. یکنواختی توزیع نیز در محدود ۷۰ تا ۹۰ درصد متغیر است که کمترین آن در طول ۲۰۰ متر اتفاق افتاده است. نتایج نشان داد که همه پارامترهای ارزیابی با شیب نوار رابطه خطی دارند و تغییرات جریان نسبت به شیب، کاملاً قابل پیش‌بینی خواهد بود. تسطح نوار می‌تواند راندمان کاربرد و یکنواختی توزیع را تا حد بالایی افزایش دهد.

نتیجه‌گیری

طراحی و مدیریت بهینه یک سامانه آبیاری نواری به فاکتورهای طراحی و معیارهای ارزیابی بستگی دارد. از جمله فاکتورهای طراحی که قابلیت برنامه‌ریزی در طرح اولیه یک سامانه آبیاری نواری با انتهای بسته در WinSRFR را دارند عبارتند از: طول نوار،

منحنی‌های هم‌تراز راندمان کاربرد

تغییرات دبی ورودی و زمان قطع جریان منجر به ایجاد موقعیت‌های هم‌تراز راندمان کاربرد می‌گردد که با توجه به آن می‌توان ترکیب‌های متفاوتی از این دو مقدار را در طراحی اعمال نمود (Rezaverinejad et al., 2015; Taghizadeh et al., 2012). چنین‌های نشان داده شده موقعیت نقاطی است که در آن‌ها دبی و زمان قطع جریان، حداقل عمق آب مورد نیاز در ابتدای نوار را تأمین می‌کند. طبق نتایج مدل بهینه‌سازی چندهدفه از بین پاسخ‌های جبهه پارتو که کفایت آبیاری ۱۰۰ درصد و کمترین نفوذ عمقی را داشته‌اند، یکی از پاسخ‌ها که قابلیت اجرا بر اساس شرایط مزرعه را دارد انتخاب و در شکل (۶) نشان داده شده است. دبی ورودی و زمان قطع جریان به ترتیب ۱/۹ لیتر بر ثانیه در عرض نوار و ۱۵۰ دقیقه محاسبه گردید که در این نقطه راندمان کاربرد، یکنواختی توزیع و نفوذ عمقی به ترتیب ۷۹، ۷۸ و ۲۱ درصد تخمین زده شده‌اند. مطابق شکل، این نقطه بر روی خط حداقل عمق نفوذ آب قرار دارد. نتایج مقایسه این نقطه بهینه با شرایط پیشنهاد شده از بهینه‌سازی سه عامل جدول (۲) نشان می‌دهد کاهش ۲۰ متر طول نوار معادل کاهش ۳۰ دقیقه زمان آبیاری برآورد شده است. این نسبت به نسبت شیب زمین و بافت خاک متغیر است اما با توجه به حذف رواناب در آبیاری نواری انتها بسته می‌تواند یک قاعده کلی برای مدیریت مطلوب این سامانه محسوب گردد. از سوی دیگر کاهش طول نوار موجب افزایش یکنواختی توزیع و کاهش نفوذ عمقی در مقیاس کل مزرعه نیز می‌گردد. در نهایت اگر شرایط اولیه آبیاری (دبی ۱۰ لیتر در ثانیه در زمان ۹۰ دقیقه) در شکل موقعیتیابی شود نشان می‌دهد اگرچه در این نقطه راندمان کاربرد نزدیک یا مساوی به ۱۰۰ است اما آب مورد نیاز آبیاری نمی‌تواند تأمین شود و فاصله زیادی با اهداف مسأله وجود دارد.



شکل ۶. منحنی‌های هم‌تراز راندمان کاربرد نسبت به دبی ورودی و زمان قطع جریان

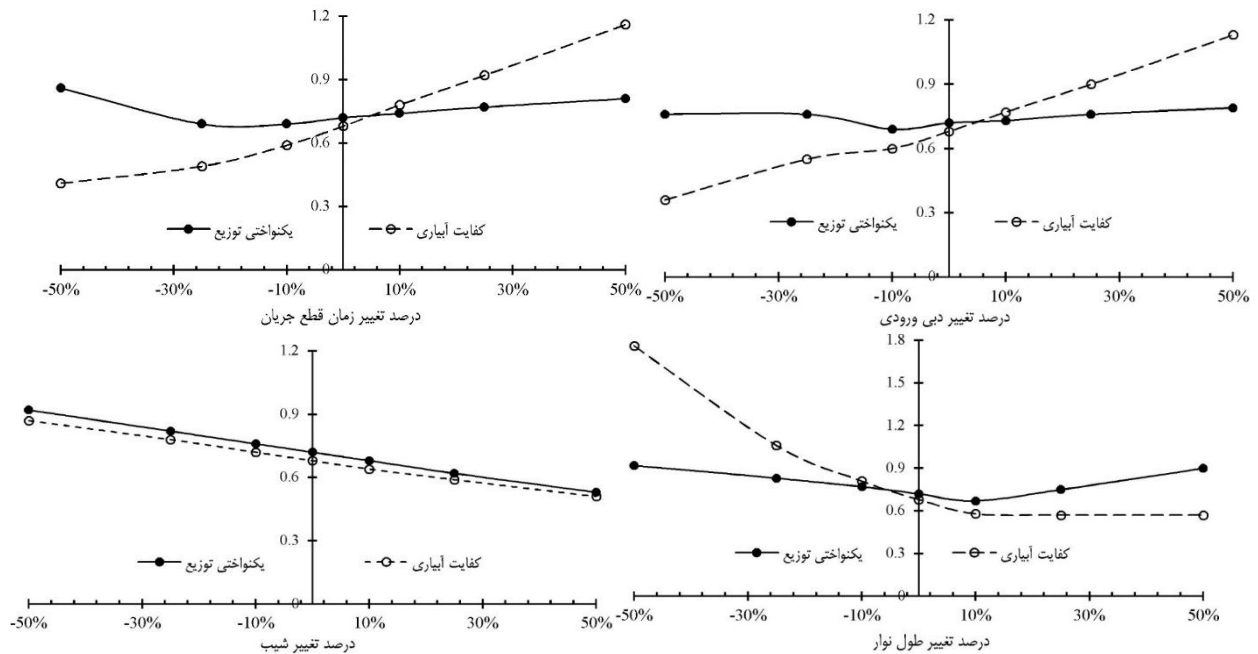
جریان

ورودی نمی‌توان در سامانه انتها باز به کفایت آبیاری ۱۰۰ درصد رسید و دبی به دست آمده برای سامانه انتها بسته حدود ۲۰ لیتر بر ثانیه با یکنواختی توزیع ۸۳ درصد برآورد شده است. تغییرات پارامترهای ارزیابی آبیاری نواری انتها بسته به تغییر طول نوار نشان داد در صورت کاهش طول نوار تا حد ۵۰ درصد می‌تواند کفایت آبیاری را به حدود سه برابر افزایش دهد اما معادل این مقدار افزایش در طول نوار موجب کاهش ۲۰ درصدی در کفایت آب می‌شود. نتایج نشان می‌دهد مدیریت اصلی توزیع آب در آبیاری نواری اغلب به تنظیم زمان قطع جریان و طول نوار باز می‌گردد و کاهش طول نوار تأثیر قابل توجهی در افزایش یکنواختی توزیع و در نتیجه کاهش تلفات عمقی داشته است.

عرض نوار، دبی ورودی، زمان قطع جریان و شیب نوار. انتخاب بهترین مقادیر برای این پارامترها که به‌عنوان متغیر تصمیم در مدل بهینه‌سازی چند هدفه NSGAI به کار گرفته شده‌اند موجب بهبود معیارهای ارزیابی می‌گردد. کمینه‌سازی نفوذ عمقی و بیشینه‌سازی حداقل عمق آب دریافتی دو معیار ارزیابی در نظر گرفته شده برای این منظور هستند که توابع هدف مسأله را تشکیل می‌دهند. بر این اساس نتایج تحقیق نشان می‌دهد بهترین زمان قطع جریان برای تأمین ۷۵ میلی‌متر عمق آب مورد نیاز در مقابل کمترین میزان نفوذ عمقی در سامانه انتها بسته ۱۶۸ دقیقه و در سامانه انتها باز ۴۲۹ دقیقه بوده است که بیش از ۱۵۰ مترمکعب آب و بیش از ۴ ساعت زمان در هر آبیاری باید اضافه گردد. از سوی دیگر در زمان قطع جریان ۹۰ دقیقه با هیچ دبی

جدول ۳. مقایسه معیارهای ارزیابی نسبت به پارامترهای طراحی و جریان

درصد تغییرات	پارامتر طراحی	۵۰٪	۲۵٪	۱۰٪	۰	-۱۰٪	-۲۵٪	-۵۰٪
راندمان کاربرد	زمان قطع جریان	۷۰	۸۴	۹۱	۹۶	۹۹	۱۰۰	۱۰۰
	دبی ورودی	۷۰	۸۳	۹۱	۹۶	۹۹	۱۰۰	۱۰۰
	طول نوار	۱۰۰	۱۰۰	۹۸	۹۶	۹۱	۷۹	۵۳
درصد نفوذ عمقی	شیب طولی	۹۱	۹۳	۹۵	۹۶	۹۷	۹۸	۱۰۰
	زمان قطع جریان	۳۰	۱۶	۹	۴	۱	۰	۰
	دبی ورودی	۳۰	۱۷	۹	۴	۱	۰	۰
عمق آب آبیاری	طول نوار	۰	۰	۲	۴	۹	۲۱	۴۸
	شیب طولی	۹	۷	۵	۴	۳	۲	۰
	زمان قطع جریان	۷۱	۶۰	۵۲	۴۸	۴۳	۳۶	۲۴
نفوذ عمقی	دبی ورودی	۷۱	۶۰	۵۲	۴۸	۴۳	۳۶	۲۴
	طول نوار	۳۲	۳۸	۴۳	۴۸	۴۸	۶۳	۹۵
	شیب طولی	۴۸	۴۸	۴۸	۴۸	۴۸	۴۸	۴۸
کمترین عمق آب دریافتی	زمان قطع جریان	۲۲	۱۰	۵	۲	۱	۰	۰
	دبی ورودی	۲۲	۱۰	۵	۲	۰/۵	۰	۰
	طول نوار	۰	۰	۱	۲	۵	۱۴	۴۵
یکنواختی توزیع در چارک پایین	شیب طولی	۴	۳	۳	۲	۲	۱	۰
	زمان قطع جریان	۵۸	۴۶	۳۹	۳۴	۲۹	۲۵	۲۰
	دبی ورودی	۵۷	۴۵	۳۸	۳۴	۳۰	۲۷	۱۸
کفایت آبیاری در چارک پایین	طول نوار	۲۸	۲۸	۲۹	۳۴	۴۱	۵۳	۸۸
	شیب طولی	۲۵	۲۹	۳۲	۳۴	۳۶	۳۹	۴۴
	زمان قطع جریان	۱/۲۳	۰/۹۹	۰/۸۵	۰/۷۶	۰/۶۶	۰/۵۴	۰/۴۴
دبی ورودی	دبی ورودی	۱/۲۱	۰/۹۸	۰/۸۵	۰/۷۶	۰/۶۷	۰/۵۸	۰/۳۸
	طول نوار	۰/۵۹	۰/۶۱	۰/۶۵	۰/۷۶	۰/۸۸	۱/۱۲	۱/۸
	شیب طولی	۰/۶۱	۰/۶۸	۰/۷۳	۰/۷۶	۰/۷۸	۰/۸۳	۰/۹



شکل ۷. کفایت آبیاری و یکنواختی توزیع در نسبت‌های مختلف پارامترهای طراحی

REFERENCES

Abbasi, F. (2012). Principles of Flow in Surface Irrigation. Publications of the National Committee on Irrigation and Drainage of Iran (In Farsi)

Al-Khamisi, S. A., Prathapar, S. A. and Ahmed, M. (2013). Conjunctive use of reclaimed water and groundwater in crop rotations. *Agricultural Water Management*, 116:228–234.

Bo, C., Zhu, O., and Shaohui, Z. (2012). Evaluation of hydraulic process and performance of border irrigation with different regular bottom configurations. *Journal of Resources and Ecology*, 3(2): 151-160.

Chen, B., Ouyang, Z., Sun, Z., Wu, L. and Li, F. (2013). Evaluation on the potential of improving border irrigation performance through border dimensions optimization: a case study on the irrigation districts along the lower Yellow River. *Irrigation science*, 31(4): 715-728.

Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S. and Meyarivan, T. (2002). A fast and elitist multi-objective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE Transaction on Evolutionary Computation*, 6:181-197.

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.

Fotakis, D.G., Sidiropoulos, E., Myronidis, D. and Ioannou, K. (2012). Spatial genetic algorithm for multi-objective forest planning. *Forest Policy and Economics*, 21:12-19.

Gonzalez, C., Cervera, L., and Fernández, D. M. (2011). Basin irrigation design with longitudinal slope. *Agricultural Water Management*, 98: 1516–1522.

Khashei Siuki, A., Ghahraman, B., and Kuchakzadeh, M. (2013). Application of Agricultural Water Allocation and Management by PSO Optimization Technic (Case study: Nayshabur Plaine). *Journal of Water and Soil*, 27 (2): 292-303. (In Farsi)

Koulaian, A., Gholami Sefidkouhi, M.A., Ziatabar Ahmadi, M., and Dadashzadeh, H. 2015. Modelling and numerical analysis of flow under furrow irrigation. *Journal of Irrigation and Drainage*, 4(9):665-667. (In Farsi)

Lalezari, R., and Boroomand-Nasab, S. (2017). Improved volume balance using upstream flow depth for advance time estimation. *Agricultural Water Management*, 186: 120-126.

Lalezari, R., Boroomand-Nasab, S., Moazed, H. and Haghighi, 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).

Lalezari, 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.

Morris, M. R., Hussain, A., Gillies, M. H. and O’Halloran, N.J. (2015). Inflow rate and border irrigation performance. *Agricultural Water Management*, 155: 76-86.

Rezaverdinejad, V., Sohrabi, T., Eraghinejad, S., and Heydari, N. (2010). Optimization of crop pattern and water allocation under water constraint conditions. PhD Thesis on Irrigation and Drainage Engineering, Faculty of Agricultural Engineering and Technology, University of Tehran, 193 (In Farsi)

Rezaverdinejad, V., Jonoobi, R., Besharat, S., and

- Abbasi, F. (2015). Investigation and analysis of flow and geometrical variables on optimal border irrigation performance using WinSRFR model. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 46(4): 695-706 (In Farsi)
- Srinivas, N. and Deb, K. (1994). Multiobjective optimization using nondominated sorting in genetic algorithms. *Evolutionary computation*, 2(3):221-248.
- Tafteh, A., Emdad M. R., and Ghalebi, S. (2017a). Investigation of effective factors on water use efficiency of border irrigation at actual and extensible root zone depth of wheat in hamidieh (Khuzestan). *Journal of Conservation of Soil and Water Resources*, 6(4): 75-89. (In Farsi)
- Tafteh, A., Emdad M. R., and Ghalebi, S. (2017b). Determination of the most suitable border irrigation conditions to increase water use efficiency using SRFR model. *Journal of Irrigation and Water Engineering*, 8(30): 200-210 (In Farsi)
- Taghizadeh, Z., Rezaverdinejad, V., Ebrahimian, H., and Khanmohammadi, N. (2012). Field evaluation and analysis of surface irrigation system with WinSRFR (Case study furrow irrigation). *Journal of Water and Soil*, 26 (6): 1450-1459 (In Farsi)
- Zebardast, S., Riahi Farsani, H., and Tabatabaei, S. H. (2014). Accuracy assessment of volume balance model solution methods in estimation of advance phase of furrow irrigation. *Journal of water and soil resources conservation*, 4(1):1-12 (In Farsi)