

طراحی آبیاری سطحی نواری و تعیین متغیرها با استفاده از بهینه‌سازی چندهدفه

محسن سالکی^۱، محمدرضا نوری^{۲*}، حمیدرضا سالمی^۳ و روح‌الله فتاحی^۴

چکیده

طراحی سامانه‌های آبیاری سطحی نواری یا براساس روابط تجربی مندرج در منابع یا براساس نتایج شبیه‌سازی در مدل‌های مختلف انجام می‌شود که در این روش‌ها امکان بررسی تأثیر همه متغیرهای طراحی بر شاخص‌های مختلف آبیاری وجود ندارد. طراحی براساس کمیته‌سازی حجم آب ورودی به همراه بهینه‌سازی شاخص‌هایی چون راندمان کاربرد، یکنواختی توزیع و کفایت آبیاری رویکرد نوینی است که از طریق بهینه‌سازی چندهدفه می‌تواند بهترین نتایج را ارائه دهد. بهترین انتخاب برای متغیرهای طراحی، شامل: طول، عرض، شیب نوار، دبی آب ورودی و زمان قطع جریان آب در یک مزرعه با هدف دستیابی به شاخص‌های بهینه را می‌توان از این روش به دست آورد. در این تحقیق با اندازه‌گیری پیشروی آب در قطعات نمونه در مزرعه‌ای به مساحت ۱۸۰ هکتار با کشت گندم در غرب اصفهان و شبیه‌سازی حرکت آب در نوارهای آبیاری، ضرایب نفوذ خاک به دست آمد. براین اساس برای عمق خالص آبیاری ۷۵ میلی‌متر و ضریب زبری ۰/۱۵ تعداد ۵۶۷۰۰ رویداد آبیاری نواری انتخاب شده با نرم‌افزار WinSRFR 5.1 شبیه‌سازی شد. در بین نتایج به دست آمده با استفاده از روش بهینه‌سازی چندهدفه، تابع هدف مقید شده، با هدف کمیته‌سازی حجم آب ورودی و راندمان کاربرد بالاتر از ۹۰ درصد، یکنواختی توزیع و کفایت آبیاری بیشتر از ۰/۸، تعداد ۵۱۵ گزینه بهینه برای طراحی نوار آبیاری تعیین شد و در بین آن‌ها جبهه اول پارتو، برای طراحی بهینه نوار آبیاری در این مزرعه و مزارع مشابه ارائه شد. نتایج نشان می‌دهند حجم آب ورودی در گزینه‌های بهینه‌سازی شده بین ۷۱۲/۸ تا ۷۵۷/۳ و در مزرعه بین ۴۶۲ تا ۱۵۸۸ مترمکعب در هکتار است که مقادیر اندازه‌گیری شده تفاوت قابل‌ملاحظه‌ای با مقادیر بهینه دارد. از روش ارائه شده در این تحقیق می‌توان به‌عنوان یک راهکار جدید برای طراحی سامانه آبیاری سطحی نواری و افزایش بهره‌وری آب در کشاورزی استفاده کرد.

واژه‌های کلیدی: آبیاری نواری، بهره‌وری آب، بهینه‌سازی چندهدفه، طراحی آبیاری سطحی

ارجاع: سالکی م.، نوری م.ر.، سالمی ح.ر. و فتاحی ر. ۱۴۰۳ طراحی آبیاری سطحی نواری و تعیین متغیرها با استفاده از بهینه‌سازی چندهدفه. مجله پژوهش آب ایران. ۱۵: ۵۳-۲۳. <https://dx.doi.org/10.22034/IWRJ.2024.14742.2595>

۱- دانشجوی دکتری گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد.

۲- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد.

۳- دانشیار گروه فنی و مهندسی، مرکز تحقیقات کشاورزی اصفهان.

۴- استاد گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد.

* نویسنده مسئول: Nouri1351@sku.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۳/۲۸

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۱/۲۱

مقدمه

با افزایش جمعیت جهان و افزایش نیاز به غذا، لازم است حداکثر استفاده از آب شیرین برای تولید غذا انجام شود (Foley et al., 2011; Brauman et al., 2013). آبیاری سطحی بیشترین سهم در بین روش‌های آبیاری را به خود اختصاص داده و در بین روش‌های کرتی، نواری و شیاری، روش آبیاری نواری در مزارع رایج‌تر است؛ از این رو ارتقای شاخص‌های آبیاری و کاهش مصرف آب در هر نوار آبیاری منجر به کاهش مصرف آب در واحد سطح و به تبع آن زمینه‌افزایش سطح زیرکشت یا حفظ ذخایر آب و افزایش تولید محصول یا به عبارتی افزایش بهره‌وری آب می‌شود (Molden et al., 2010).

تاکنون طراحی نواری آبیاری براساس روابط و جداول تجربی ارائه‌شده در منابع یا با بهینه‌سازی حداکثر یک یا دو متغیر بوده است (Walker and Skogerboe, 1987; Chen et al., 2013; Smith et al., 2016).

به‌طور معمول بهینه‌شدن شاخص‌های آبیاری در تقابل با هم هستند و افزایش مقدار یک شاخص منجر به کاهش مقدار شاخص دیگر می‌شود (Bastiaanssen and Steduto., 2017; Zwarta et al., 2010). برای نمونه، با افزایش دبی ورودی و زمان قطع جریان، شاخص کفایت بهبود، اما راندمان آبیاری کاهش می‌یابد؛ بنابراین محاسبه متغیرها به‌طوری که بتواند بهترین گزینه برای طراحی یک نوار آبیاری در یک مزرعه مشخص باشد، از روش‌های معمول و سنتی امکان‌پذیر نیست و در مطالعات متعددی اثر برخی از متغیرها بر شاخص‌های آبیاری بررسی شده است (González et al., 2011; Bautista et al., 2009; Anwar et al., 2016).

امروزه دستیابی به مقادیر شاخص‌های بالاتر از ۸۰ یا ۹۰ درصد در آبیاری سطحی با استفاده از اصلاح متغیرهای طراحی امکان‌پذیر شده است. (Jiatun et al., 2019). آزمایش‌های تجربی متعدد در چند مزرعه و با بهینه‌سازی دو متغیر دبی ورودی و زمان قطع جریان توانستند گزینه‌هایی برای آبیاری نواری پیشنهاد کنند که به‌طور هم‌زمان راندمان کاربرد بالای ۹۰ درصد و یکنواختی توزیع بالای ۸۰ درصد داشته باشند.

به‌دلیل زمان و هزینه بالای مورد نیاز روش‌های تجربی، از مدل‌ها و نرم‌افزارهای شبیه‌سازی آبیاری برای دستیابی به

نتایج حاصل از انتخاب گزینه‌های متعدد استفاده می‌شود. نرم‌افزار WinSRFR برای مدلسازی، شبیه‌سازی و آنالیز وقایع آبیاری و طراحی سامانه‌های آبیاری سطحی از سال ۲۰۰۷ مورد استفاده قرار می‌گیرد (Bautista, and Schlegel, 2019). با استفاده از این نرم‌افزار می‌توان گزینه‌های مختلف آبیاری نواری را شبیه‌سازی کرد و نتایج شاخص‌های آن‌ها را به‌دست آورد. در مطالعات متعددی از این نرم‌افزار برای شبیه‌سازی آبیاری و بررسی تأثیر متغیرها بر شاخص‌های آبیاری استفاده شده است (Alavi et al., 2022; Jalily, S., 2022; Sargolzaei et al., 2021; Mazarei et al., 2020; Fadul et al., 2020; Salahou et al., 2018; Heydari and Abbasi, 2016).

با وجود این، طراحی یک نوار آبیاری با رویکرد دستیابی به بهترین شاخص‌های آبیاری و کاهش مصرف آب، جزو مسائل بهینه‌سازی چندهدفه است که دارای پنج متغیر و چهار هدف متفاوت است. متغیرهای طراحی شامل: طول، عرض و شیب نوار و دبی آب ورودی، زمان قطع جریان آب است و اهداف مسئله شامل: راندمان کاربرد آب، یکنواختی توزیع، کفایت آبیاری و حجم آب ورودی به نوار هستند. ضرایب نفوذپذیری خاک و ضریب زبری مانینگ در این مسائل به‌عنوان مقادیر مشخص و ثابت مزرعه (پارامتر) لحاظ شده و به‌عنوان متغیر وارد طراحی نمی‌شوند. (Garemohamadlou et al., 2019). در طراحی آبیاری نواری انتهاسته از مدل شبیه‌سازی WinSRFR و تکنیک بهینه‌سازی مجموعه ذرات PSO استفاده کردند و نشان دادند با این روش امکان دستیابی به بازده کاربرد و یکنواختی توزیع به ترتیب ۸۶ و ۸۴ درصد (با حفظ کفایت آبیاری ۱۰۰ درصد) براساس متغیرهای جریان دبی ورودی و زمان قطع جریان وجود دارد. (Liu et al., 2020). با انجام آزمایش‌های میدانی از یک سامانه آبیاری نواری انتهاسته و با کمک مدل WinSRFR با بهینه‌سازی دبی متغیر ورودی، گزارش کردند که با برقراری دبی کاهنده یعنی دبی که در طول مدت آبیاری کاهش می‌یابد، بهترین نتایج حاصل شده است؛ به‌طوری‌که راندمان‌های کاربرد و یکنواختی توزیع به ترتیب ۹۱/۴ و ۹۵/۵ درصد به‌دست آمده است.

با مروری بر منابع، به نظر می‌آید لحاظ کردن همه متغیرهای طراحی آبیاری نواری و در نظر گرفتن همه

ضریب زبری در ادامه محاسبات به واقعیت نزدیک باشد و باعث بروز خطای معنی‌داری در ادامه تحقیق و نتیجه‌گیری نشود.

فرایند انجام این تحقیق به شرح زیر است:

- برداشت داده‌های مزرعه‌ای شامل پیشروی آب در طول نوار و مشخصات ابعادی و دبی ورودی به نوار آبیاری انتهایی در مزرعه؛

- ورود داده‌های اندازه‌گیری شده به بخش Analysis نرم‌افزار WinSRFR 5.1 و شبیه‌سازی آبیاری‌ها؛

- تعیین مقادیر ضرایب نفوذ کوستیاکوف در قطعات با مقدار پارامتر ضریب زبری مانینگ براساس مقادیر پیشنهادی USDA-NRCS، برای کل قطعات برابر با ۰/۱۵؛

- شبیه‌سازی تعداد ۵۶۷۰۰ رویداد آبیاری سطحی نواری در مزرعه در بخش Simulation نرم‌افزار WinSRFR و استخراج شاخص‌های آبیاری برای همه گزینه‌ها؛

- محاسبه مقدار حجم آب ورودی برای همه گزینه‌های شبیه‌سازی شده و تشکیل جدول نتایج؛

- انجام مراحل بهینه‌سازی براساس روش بهینه‌سازی چندهدفه منتخب؛

- تعیین گزینه‌های بهینه و انتخاب متغیرهای طراحی نوار آبیاری از بین گزینه‌های بهینه.

با توجه به ابعاد قطعات موجود و دبی قابل تأمین توسط شبکه لوله‌های سامانه کم‌فشار اجرا شده در مزرعه مورد مطالعه، با اختیار کردن مقادیر ذیل برای متغیرهای سیستم آبیاری در مجموع ۵۶۷۰۰ گزینه طراحی بررسی شد.

عرض (W، متر): ۱۲، ۱۱، ۱۰، ۹، ۸، ۷، ۶، ۵، ۴، ۳
طول (L، متر): ۱۲۰، ۱۱۰، ۱۰۰، ۹۰، ۸۰، ۷۰، ۶۰، ۵۰، ۴۰، ۳۰
شیب (S، متر/متر): ۰/۰۰۴، ۰/۰۰۵، ۰/۰۰۶، ۰/۰۰۷، ۰/۰۰۸، ۰/۰۰۹، ۰/۰۱۰، ۰/۰۱۱، ۰/۰۱۲

دبی ورودی (Q، لیتر بر ثانیه): ۱۰، ۱۱، ۱۲، ۱۳، ۱۴، ۱۵، ۱۶، ۱۷، ۱۸، ۱۹، ۲۰، ۲۱، ۲۲، ۲۳، ۲۴، ۲۵، ۲۶، ۲۷، ۲۸، ۲۹، ۳۰

محل قطع جریان نسبت به طول نوار (RCD): ۰/۸، ۰/۹، ۱.

در شبیه‌سازی آبیاری در همه گزینه‌ها مقادیر ضرایب نفوذ و ضریب زبری به‌عنوان پارامترهای ثابت لحاظ شده و

شاخص‌های آبیاری برای طراحی، تاکنون چندان مورد توجه قرار نگرفته است؛ همچنین تأثیر شاخص‌ها و متغیرها بر کمینه‌سازی مصرف آب در نوار به‌طور همزمان در هیچ‌یک از مطالعات پیشین در نظر گرفته نشده است. به‌علاوه شاخص‌های آبیاری به‌دست‌آمده در مطالعات گذشته حاکی از آن است که دستیابی به راندمان کاربرد بالای ۹۰ درصد و یکنواختی توزیع و کفایت آبیاری بیش از ۸۰ درصد در آبیاری سطحی با تصحیح طراحی‌ها امکانپذیر است؛ بنابراین در این تحقیق با هدف دستیابی به شاخص‌های آبیاری بیشینه و حجم آب ورودی کمینه، در یک رویداد آبیاری نواری، با به‌کاربردن قابلیت‌های نرم‌افزار WinSRFR 5.1 و درپیش‌گرفتن روش‌های بهینه‌سازی چندهدفه، روش نوینی برای طراحی سامانه آبیاری سطحی نواری در یک مزرعه ارائه می‌شود.

مواد و روش‌ها

برای انجام آزمایش‌ها و داده‌برداری این تحقیق، مزرعه‌ای واقع در اراضی موسوم به قسنو به وسعت ۱۸۰ هکتار در مجاورت شهر قهدریجان در ۱۸ کیلومتری غرب اصفهان انتخاب شده است. مزرعه تحت مالکیت و بهره‌برداری ۷۰۰ مالک خرده‌پا بود و ابعاد زمین‌ها و جهت شخم و کاشت زمین‌ها بسیار متفاوت است. منبع تأمین آب این مزرعه از محل حقاچه رودخانه زاینده‌رود به میزان ۱۵۰ لیتر در ثانیه و در زمان‌های قطع آب رودخانه از محل ۱۴ حلقه چاه موجود در مزرعه است. بیشترین سهم کشت در این مزرعه گندم زمستانه و یونجه و سامانه آبیاری نوارهای انتهایی است.

برای انجام آزمایش‌های مورد نیاز ۶ قطعه مزرعه تحت کشت گندم زمستانه با ابعاد هندسی متفاوت انتخاب شدند. ابعاد هندسی نوارها توسط متر، دبی ورودی با استفاده از فلوم و زمان پیشروی آب در نوار در گام‌های ۵ متری اندازه‌گیری شد. برداشت داده‌های مزرعه‌ای در بازه زمانی مناسب و محدودی (متناسب با مراحل نمو گیاه و اتفاق آبیاری برابر) انجام شد، به‌طوری‌که بتوان شرایط مزرعه از نظر تثبیت شرایط خاک و ضریب زبری بستر را یکنواخت فرض کرد. همچنین تلاش شد داده‌برداری از مزارع منتخب، در مرحله نمو و شرایط مزرعه‌ای تقریباً برابر انجام شود تا انتخاب پارامترهای ثابتی همچون

$$DU_{\min} = \frac{D_{\min}}{D_{\text{inf}}} , \quad AE = \frac{D_z}{D_{\text{app}}} \times 100 \quad (2)$$

$$AD_{\min} = \frac{D_{\min}}{D_{\text{req}}}$$

D_z : عمق متوسط نفوذیافته در محدوده ریشه
 D_{app} : عمق متوسط آب واردشده به نوار آبیاری
 D_{\min} : حداقل عمق نفوذیافته
 D_{inf} : عمق متوسط آب نفوذیافته: حجم آب نفوذیافته تقسیم بر مساحت نوار آبیاری
 D_{req} : عمق نفوذ مورد نیاز
 همچنین مقدار حجم آب ورودی به نوار (VT) برای یکسان‌سازی مقادیر حجم آب ورودی به نوارها برای مقایسه از رابطه (۳) بر حسب مترمکعب در هکتار براساس زمان قطع جریان T_{co} بر حسب دقیقه که توسط نرم‌افزار تعیین می‌شود، محاسبه می‌شود:

$$VT = (T_{\text{co}} \times Q) \times \frac{10000}{W \times L} \times \left(\frac{60}{1000}\right) \quad (3)$$

در این مسئله توابع AE , DU_{\min} , AD_{\min} می‌بایست بیشینه شوند و تابع VT می‌بایست کمینه شود. در واقع هدف کلی این مسئله، به دست آوردن گزینه‌هایی است که با لحاظ کردن عمق خالص آبیاری مورد نیاز، کمترین حجم آب ورودی به زمین و بیشترین شاخص‌های آبیاری را داشته باشند.

با توجه به معلوم بودن هدف نهایی در هر یک از توابع هدف می‌توان از روش بهینه‌سازی چندهدفه با پیش‌دسته‌بندی برتری‌ها مانند تابع هدف مقیدشده^۱ استفاده کرد (Arora and Marler., 2003). براساس روش تابع هدف مقیدشده، حجم آب ورودی به نوار به‌عنوان تابع هدف اصلی برای کمینه‌سازی و مقادیر حدی سایر شاخص‌ها به‌عنوان قیده‌های مسئله در نظر گرفته می‌شود. مقادیر حداکثر شاخص‌های آبیاری برابر با ۱ یا ۱۰۰ درصد و مقادیر کمینه شاخص‌های یکنواختی توزیع و کفایت آبیاری برابر با ۰/۸ و راندمان کاربرد ۹۰ درصد در نظر گرفته می‌شود (Jiatun et al., 2019; Liu et al., 2020)؛ بنابراین تعریف مسئله بهینه‌سازی به صورت رابطه (۴) است.

$$\text{Min} \quad VT(x) \quad (4)$$

$$\text{s. t:} \quad 90 \leq AE(x) \leq 100, \quad 0.8 \leq AD(x) \leq 1$$

$$0.8 \leq DU(x) \leq 1$$

$$x \in \{W, L, S, Q, RCD\}$$

مقدار عمق خالص آبیاری ۷۵ میلی‌متر در نظر گرفته شده است.

روش بهینه‌سازی چندهدفه

بهینه‌سازی، رویکردی است که با استفاده از آن می‌توان بهترین جواب‌ها را برای حل مسائل یافت. در برخی از مسائل تنها یک هدف وجود دارد و راهکار دستیابی به بهترین راه‌حل این مسئله بهینه‌سازی یا کمینه‌سازی این هدف است؛ اما در اغلب مسائل واقعی و طراحی، هدف‌های متعددی وجود دارد که برخی می‌بایست بیشینه و برخی کمینه شده و از طرفی روابط بین این اهداف به صورت غیرخطی است؛ از این رو روش‌های بهینه‌سازی چندهدفه در حل این‌گونه مسائل کارساز است. گزینه بهینه در مسائل بهینه‌سازی چندهدفه تعریف متفاوتی از بهینه‌سازی یا کمینه‌سازی اهداف دارد. یک پاسخ قابل قبول برای یک مسئله چندهدفه هنگامی بهینه است که پاسخ قابل قبول دیگری وجود نداشته باشد که به بهبود یک هدف بدون ایجاد خلل در حداقل یک هدف دیگر منجر شود (Arora and Marler., 2003). روش‌های متفاوتی برای دستیابی به پاسخ‌های بهینه پارتو در حل مسائل بهینه‌سازی چندهدفه ارائه شده است که براساس ماهیت مسئله می‌توان روش مناسب را انتخاب کرد (Gunantara., 2018).

توابع هدف در این مسئله به صورت رابطه (۱) تعریف می‌شود:

$$F(x) = \{AE(X), DU(X), AD(X), VT(X)\} , \quad (1)$$

$$\& \quad X = \{L, W, S, Q, RCD\}$$

که در آن AE راندمان کاربرد، DU یکنواختی توزیع، AD کفایت آبیاری و VT حجم آب آبیاری ورودی به زمین است. این مقادیر مطابق با راهنمای نرم‌افزار WinSRFR به صورت زیر محاسبه می‌شود (Bautista and Schlegel, 2019). در این تحقیق به دلیل افزایش دقت محاسبات و مقایسه دقیق‌تر بین گزینه‌ها، به جای DU_{Iq} و AD_{Iq} از مقادیر DU_{\min} و AD_{\min} استفاده شده که در رابطه (۲) تعریف می‌شوند:

¹ Bounded Objective Function Method

WinSRFR در جدول ۱ ارائه شده است. خاک مزرعه از نوع لومی رسی است و عمق آبیاری مورد نیاز برابر با ۷۵ میلی‌متر در نظر گرفته شده است.

مطابق با جدول ۱ شاخص‌های آبیاری و حجم آب ورودی به نوار در قطعات مورد آزمایش در مزرعه کاملاً باهم متفاوت هستند و در برخی قطعات کم‌آبیاری و در برخی بیش‌آبیاری صورت گرفته و میزان حجم آب ورودی به نوارها برابر نیست. همچنین براساس معیارهای بهینه‌سازی هیچ‌کدام از قطعات به‌صورت بهینه آبیاری نمی‌شوند.

ضرایب نفوذ آب در خاک در این مزرعه براساس معادله کوستیاکوف در رابطه (۵) به‌دست آمده است. برای سایر شبیه‌سازی‌ها در مزرعه نیز از این ضرایب استفاده شد.

$$Z = kt^a \quad ; \quad K = 110 \text{ mm/hr}^a, \quad a = 0.735 \quad (5)$$

به‌منظور حل این مسئله ابتدا گزینه‌هایی که مقدار راندمان کاربرد آن‌ها بالاتر از ۹۰ درصد است از بین سایر گزینه‌ها انتخاب می‌شود و سپس در بین این گزینه‌ها، مواردی که یکنواختی توزیع آن‌ها بالاتر از ۰/۸ بوده و در بین آن‌ها گزینه‌هایی که کفایت آبیاری آن‌ها بالاتر از ۰/۹ یا ۰/۸ باشد، انتخاب می‌شوند.

در بین گزینه‌های به‌دست‌آمده، گزینه‌های با کمترین مقدار حجم آب ورودی به نوار، پاسخ بهینه‌سازی مورد نظر هستند.

نتایج و بحث

نتایج اندازه‌گیری‌های مزرعه‌ای و شبیه‌سازی قطعات نمونه

نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌های مزرعه‌ای و شاخص‌های به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی آبیاری در نرم‌افزار

جدول ۱- مشخصات، نتایج اندازه‌گیری و شاخص‌های آبیاری در قطعات نمونه

F6	F5	F4	F3	F2	F1	قطعات منتخب
۵۰	۸۵	۳۹	۹۳	۳۷	۴۲	طول نوار (متر)
۶	۴	۵	۵/۹	۶/۵	۵	عرض نوار (متر)
۳۰۰	۳۴۰	۱۹۵	۵۴۸/۷	۲۴۰/۵	۲۱۰	مساحت نوار (متر مربع)
۲۳.۸	۲۰	۹.۵	۱۴	۲۸.۴	۱۴	دبی آبیاری (لیتر بر ثانیه)
۰/۰۰۴	۰/۰۰۵	۰/۰۰۶	۰/۰۰۸	۰/۰۰۵	۰/۰۰۵	شیب زمین (متر بر متر)
۲۴	۴۷	۱۶	۵۲	۱۵	۱۷	زمان رسیدن آب به انتهای نوار (دقیقه)
۳۳.۲	۵۵	۹	۴۳.۳	۲۵.۴	۱۴	حجم آب ورودی به نوار (متر مکعب)
۶۷	۴۷	۱۰۰	۸۳	۷۱	۹۱	راندمان کاربرد (درصد)
۰/۷۶	۰/۷۹	۰/۸۴	۰/۷۶	۰/۸۸	۰/۷۶	یکنواختی توزیع
۱/۱۴	۱/۶۸	۰/۵۱	۰/۹۱	۱/۲۴	۰/۶۷	کفایت آبیاری
۱۱۱۹	۱۵۸۸	۴۶۲	۸۹۴	۱۰۵۶	۶۶۴	حجم آب ورودی به نوار (متر مکعب در هکتار)

بر متر با قطع آب در انتهای نوار (RCD=1L) برای برخی از دبی‌های بین ۱۰ تا ۳۰ لیتر بر ثانیه در جدول ۲ ارائه شده است که نشان‌دهنده تأثیر بالای دبی ورودی بر شاخص‌ها و حجم آب ورودی به نوار است.

شبیه‌سازی گزینه‌های محتمل طراحی نوار آبیاری

با شبیه‌سازی گزینه‌ها، شاخص‌های آبیاری و حجم آب ورودی برای ۵۶۷۰۰ گزینه به‌دست آمد؛ برای نمونه نتایج حاصل برای عرض ۵ متر، طول ۸۰ متر، شیب ۰/۰۰۴ متر

جدول ۲- نمونه‌ای از نتایج شبیه‌سازی گزینه‌های آبیاری و خروجی نرم‌افزار WinSRFR

W (m)	L (m)	Q (l/s)	S (m/m)	AE (%)	DU _{min}	AD _{min}	T _{co} (min)	VT(m ³ /hec)
۵	۸۰	۱۰	۰/۰۰۴	۵۳	۰/۶۵	*۱/۲۵	۹۴/۸	۱۴۲۲
۵	۸۰	۱۱	۰/۰۰۴	۶۱	۰/۷۳	۱/۲۱	۷۴/۹	۱۲۳۶
۵	۸۰	۲۰	۰/۰۰۴	۸۵	۰/۸۲	۰/۹۶	۲۹/۲	۸۷۶
۵	۸۰	۲۱	۰/۰۰۴	۸۵	۰/۸۰	۰/۹۴	۲۷/۹	۸۷۹
۵	۸۰	۲۹	۰/۰۰۴	۷۶	۰/۶۵	۰/۸۰	۲۱/۳	۹۲۶
۵	۸۰	۳۰	۰/۰۰۴	۷۵	۰/۶۳	۰/۷۹	۲۰/۸	۹۳۶

* مقادیر $AD_{min} > 1$ نشان می‌دهد که در این شرایط، مقدار حداقل عمق آبیاری بیشتر از مقدار عمق آبیاری مورد نیاز است.

براساس نتایج به‌دست‌آمده از بهینه‌سازی، طراح سامانه آبیاری می‌تواند براساس معیارهای خود بهترین گزینه طراحی برای شرایط مختلف را پیشنهاد کند. با پیاده‌سازی این روش در مزرعه، علاوه بر اینکه شاخص‌های آبیاری در کل مزرعه حداکثر می‌شود، حجم آب ورودی به نوارهای آبیاری در کل مزرعه نیز تقریباً برابر بوده و عدالت توزیع آب در سطح مزرعه برقرار خواهد شد.

مقایسه شرایط موجود در مزرعه مورد مطالعه با حالت طراحی بهینه

گزینه‌های بهینه برای نوارهای موجود در مزرعه مورد مطالعه را می‌توان از جدول ۳ انتخاب کرد و به‌عنوان گزینه‌های طراحی نوار آبیاری این مزرعه در نظر گرفت. مقایسه وضعیت موجود با شرایط بهینه در جدول ۵ ارائه شده است. همان‌گونه که در نتایج جدول ۵ مشاهده می‌شود، حجم آب ورودی به نوار بین شرایط بهینه با شرایط موجود، از منفی ۳۸ درصد تا مثبت ۱۱۲ درصد اختلاف وجود دارد. همچنین به‌دلیل اختلاف زیاد حجم آب مصرفی توسط مالکان مزرعه، توزیع آب در مزرعه عادلانه نیست.

گزینه‌های بهینه طراحی نوار آبیاری

قیدهای تعریف‌شده برای مسئله عبارت‌اند از: راندمان کاربرد آب بالاتر از ۹۰ درصد، یکنواختی توزیع آب در نوار بیشتر از ۰/۸ و کفایت آبیاری در نوار بالای ۰/۸ ($AE > 90$) پس از انجام مراحل $DU > 0.8$ & $AD > 0.8$. در مجموع ۵۱۵ گزینه بهینه برای طراحی نوار آبیاری در این مزرعه وجود دارد که از بین این گزینه‌ها طراح می‌تواند براساس شرایط حاکم بر مزرعه، متغیرهای مورد نظر را انتخاب کند. جدول ۳ نمونه‌ای از نتایج گزینه‌هایی که کمترین حجم آب ورودی به نوار را داشته‌اند، نشان می‌دهد. در این جدول نتایج پنج متغیر و سه شاخص و حجم آب ورودی به نوار ارائه شده است.

جمع‌بندی نتایج در جدول ۴ ارائه شده است. با استفاده از داده‌های این جدول به‌راحتی می‌توان محدوده قابل‌انتخاب هر یک از متغیرهای طراحی نوار آبیاری در این مزرعه و مزارع مشابه را تعیین کرد. طراح می‌تواند براساس این جدول هر یک از متغیرهای عرض، طول، شیب نوار، دبی آبیاری و زمان قطع جریان بهینه با کمترین حجم آب ورودی به نوار را انتخاب کند.

این نتایج به‌دست‌آمده برای همه مزارعی که ضرایب نفوذ آب در خاک آن‌ها مشابه این خاک است، قابل‌استفاده است و در طراحی نوارهای آبیاری در مزارع مشابه می‌توان از این نتایج استفاده کرد.

جدول ۳- نمونه گزینه‌های بهینه با کمترین حجم آبیاری و قیده‌های $AE > 90$ & $DU > 0.8$ & $AD > 0.8$

RCD	L (m)	W (m)	Q (l/s)	S (m/m)	AE (%)	DU _{min}	AD _{min}	T _{co} (min)	VT (m ³ /hec)
۱	۴۰	۱۱	۱۶	۰/۰۰۴	۹۷	۰/۸۲	۰/۸۰	۳۳/۵	۷۳۱
۱	۵۰	۶	۱۴	۰/۰۰۴	۹۷	۰/۸۶	۰/۸۰	۲۵	۷۰۰
۱	۶۰	۸	۲۳	۰/۰۰۵	۹۴	۰/۸۳	۰/۸۰	۲۵/۲	۷۲۴
۱	۷۰	۵	۱۷	۰/۰۰۶	۹۲	۰/۸۰	۰/۸۰	۲۵/۷	۷۴۹
۱	۸۰	۵	۱۸	۰/۰۰۷	۹۲	۰/۸۰	۰/۸۳	۲۸/۹	۷۸۰
۰/۹	۸۰	۶	۲۲	۰/۰۰۴	۹۶	۰/۸۲	۰/۸۲	۲۷/۱	۷۴۵
۰/۹	۸۰	۸	۲۹	۰/۰۰۴	۹۷	۰/۸۲	۰/۸۲	۲۷/۴	۷۴۵
۰/۹	۹۰	۵	۲۱	۰/۰۰۵	۹۴	۰/۸۱	۰/۸۱	۲۶/۹	۷۵۳
۰/۹	۹۰	۶	۲۶	۰/۰۰۵	۹۴	۰/۸۰	۰/۸۱	۲۶/۱	۷۵۴
۰/۹	۹۰	۷	۲۹	۰/۰۰۵	۹۵	۰/۸۰	۰/۸۰	۲۷/۳	۷۵۴
۰/۸	۱۰۰	۵	۲۷	۰/۰۰۴	۹۵	۰/۸۲	۰/۸۰	۲۲/۵	۷۲۹
۰/۸	۱۰۰	۳	۱۶	۰/۰۰۴	۹۵	۰/۸۲	۰/۸۰	۲۲/۸	۷۲۹
۰/۸	۱۰۰	۴	۲۲	۰/۰۰۴	۹۴	۰/۸۲	۰/۸۰	۲۲/۲	۷۳۲
۰/۸	۱۱۰	۵	۲۶	۰/۰۰۴	۹۶	۰/۸۲	۰/۸۰	۲۶/۴	۷۴۸
۰/۸	۱۱۰	۴	۲۱	۰/۰۰۴	۹۶	۰/۸۰	۰/۸۰	۲۶/۲	۷۵۰
۰/۸	۱۲۰	۴	۲۵	۰/۰۰۵	۹۳	۰/۸۰	۰/۸۱	۲۴/۳	۷۵۹
۰/۸	۱۲۰	۳	۱۹	۰/۰۰۵	۹۲	۰/۸۰	۰/۸۲	۲۴/۲	۷۶۶
۰/۸	۱۲۰	۵	۲۹	۰/۰۰۴	۹۳	۰/۸۰	۰/۸۵	۲۷/۱	۷۸۶

جدول ۴- محدوده بهینه متغیرهای طراحی نوار آبیاری در مزرعه مورد مطالعه

نسبت قطع جریان	عرض m	طول m	شیب m/m	دبی ورودی l/s	دبی در واحد عرض l/s.m	حجم آب ورودی m ³ /hec	تعداد گزینه‌های بهینه
۱	۳-۱۲	۴۰-۸۰	-۰/۰۰۷ ۰/۰۰۴	۱۰-۳۰	۱/۳۶-۳/۶۳	۷۰۰-۸۳۵	۳۸۵
۰/۹	۳-۹	۱۰۰-۸۰	-۰/۰۰۵ ۰/۰۰۴	۱۱-۳۰	۳/۳۳-۵/۰	۷۴۵-۸۰۶	۹۰
۰/۸	۳-۵	-۱۲۰ ۱۰۰	-۰/۰۰۵ ۰/۰۰۴	۱۶-۳۰	۵/۳۳-۶/۷۵	۷۲۹-۸۱۶	۴۰

جدول ۵- مقایسه شرایط موجود در مزرعه مورد مطالعه با حالت طراحی بهینه

F6	F5	F4	F3	F2	F1	قطعه مورد آزمایش
۵۰	۸۵	۳۹	۹۳	۳۷	۴۲	طول نوار (متر)
۱۱۱۸	۱۵۸۸	۴۶۲	۸۹۴	۱۰۵۵	۶۶۴	حجم آب ورودی به نوار در شرایط موجود (متر مکعب در هکتار)
۷۱۲	۷۵۰	۷۴۰	۷۵۷	۷۳۵	۷۴۵	حجم آب ورودی به نوار در گزینه طراحی بهینه (متر مکعب در هکتار)
۵۷	۱۱۲	-۳۸	۱۸	۴۴	-۱۱	اختلاف (درصد)

نتیجه‌گیری

در این تحقیق ۵۶۷۰۰ گزینه ممکن برای طراحی نوار آبیاری در مزرعه بررسی شد که ۵۱۵ گزینه بهینه دارای شاخص‌های آبیاری بیشینه و حجم آب ورودی به نوار کمینه هستند.

به‌طور کلی با این روش بهینه‌سازی برای مزارع با خاک لومی-رسی، ضرایب نفوذ $K=110 \text{ mm/hr}^a$ و $a=0.735$ و برای عمق آبیاری مورد نیاز برابر با ۷۵ میلی‌متر می‌توان گفت:

شیب بهینه نوارهای آبیاری بین ۰/۰۰۴ تا ۰/۰۰۷ متر در متر است. زمان بهینه قطع جریان آب برای نوارهای با طول تا ۷۰ متر، هنگام رسیدن آب به انتهای نوار بوده و برای طول نوار ۸۰ و ۹۰ متر در هنگام رسیدن جبهه آب به ۰/۹ طول نوار و برای طول نوار ۱۰۰ تا ۱۲۰ متر در ۰/۸ طول نوار است. با افزایش طول نوار مقدار دبی در واحد عرض بهینه افزایش می‌یابد.

با استفاده از روش ارائه‌شده در این تحقیق می‌توان گزینه‌های بهینه برای طراحی نوارهای آبیاری در هر مزرعه را به‌نحوی به‌دست آورد که راندمان کاربرد آب بالاتر از ۹۰ درصد، یکنواختی توزیع آب در نوار بیشتر از ۸۰ درصد و کفایت آبیاری در نوار نیز بالای ۸۰ درصد بوده و مقدار حجم آب ورودی در حداقل ممکن باشد. راندمان کاربرد به‌دست‌آمده از این روش در مقایسه با سایر روش‌های موجود بالاتر بوده و هر سه شاخص آبیاری به‌طور هم‌زمان بیشینه می‌شوند. نکته مهم‌تر آن است که در هیچ‌کدام از روش‌های پیشین برای طراحی نوار آبیاری، کمینه‌سازی حجم آب ورودی به نوار به‌عنوان معیار طراحی در نظر گرفته نشده است که در این روش اساس طراحی بر کمینه‌کردن حجم آب ورودی به نوار آبیاری بوده‌است.

بنابراین استفاده از روش بهینه‌سازی چندهدفه با بیشینه‌سازی شاخص‌های آبیاری و کمینه‌سازی حجم آب ورودی به نوار، راه‌حلی نوین در طراحی نوارهای آبیاری و انتخاب متغیرهای نوار آبیاری است که منجر به کاهش مصرف آب و افزایش بهره‌وری آب در آبیاری سطحی مزارع می‌شود.

منابع

- Alavi, S.A., Naseri, A.A., Ritzema, H., van Dam, J. and Hellegers, P., 2022. A combined model approach to optimize surface irrigation practice: SWAP and WinSRFR. *Agricultural Water Management*, 271, p.107741.
- Arora, S. and Marler, R.T., 2003. Survey of multi-objective optimization methods for engineering. Optimal Design Laboratory. College of Engineering. The University of Iowa.
- Anwar, A.A., Ahmad, W., Bhatti, M.T. and Ul Haq, Z., 2016. The potential of precision surface irrigation in the Indus Basin Irrigation System. *Irrigation science*, 34: 379-396.
- Bautista, E., Clemmens, A.J., Strelkoff, T.S. and Niblack, M., 2009a. Analysis of surface irrigation systems with WinSRFR—example application. *Agricultural Water Management*, 96: 1162-1169.
- Bautista, E. and Schlegel, J., 2019. WinSRFR 5.1 User Manual. USDA-Agricultural Research Service, Arid Land Agricultural Research Center.
- Bastiaanssen, W.G., and Steduto, P., 2017. The Water Productivity Score (WPS) at Global and Regional Level: Methodology and First Results from Remote Sensing Measurements of Wheat, Rice and Maize. *Science of the Total Environment*, 575: 595-611.
- Brauman, K.A., Siebert, S. and Foley, J.A., 2013. Improvements in Crop Water Productivity Increase Water Sustainability and Food Security – A Global Analysis. *Environmental Research Letters*, 8(2): 1-10.
- 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: 715-728.
- Fadul, E., Masih, I., De Fraiture, C. and Suryadi, F.X., 2020. Irrigation performance under alternative field designs in a spate irrigation system with large field dimensions. *Agricultural Water Management*, 231, p.105989.
- Foley, J.A., Ramankutty, N., Brauman, K.A., Cassidy, E.S., Gerber, J.S., Johnston, M., Mueller, N.D., O'Connell, C., Ray, D.K., West, P.C. and Balzer, C., 2011. Solutions for a cultivated planet. *Nature*, 478(7369): 337-342.
- Garemohamadlou, H., Verdinejad, V., Lalezari, R., Azad, N., 2019. Multiobjective Optimization of Closed-End Border Irrigation Performance Using WinSRFR and Genetic Algorithm (Case Study: Ramshir Irrigation and Drainage Network). *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 51(2): 427-440. [In Persian].

- of sugarcane fields based on inflow and geometric parameters using WinSRFR in Southwest of Iran. *Agricultural Water Management*, 228, p.105899.
19. Molden, D., Oweis, T., Steduto, P., Bindraban, P., Hanjra, M.A. and Kijne, J., 2010. Improving Agricultural Water Productivity: Between Optimism and Caution. *Agricultural Water Management*, 97(4): 528-535.
 20. Salahou, M.K., Jiao, X. and Lü, H., 2018. Border irrigation performance with distance-based cut-off. *Agricultural Water Management*. 201: 27-37.
 21. Smith, R.J., Uddin, J.M., Gillies, M.H., Moller, P. and Clurey, K., 2016. Evaluating the performance of automated bay irrigation. *Irrigation science*, 34: 175-185.
 22. Sargolzaei, A., Chari, M.M., Delbari, M. and Afrasiab, P., 2021. Determination of Cutoff Time and Optimal Length of Border Irrigation with Closed-Ended. *Environmental and Water Engineering*, 7(3): 533-540.
 23. Walker, W.R. and Skogerboe, G.V., 1987. surface irrigation theory and practice, Prentice Hall, 386 pp.
 24. Zwart, S.J., Bastiaanssen, W.G., de Fraiture, C. and Molden, D.J., 2010. A global benchmark map of water productivity for rainfed and irrigated wheat. *Agricultural Water Management*, 97(10): 1617-1627.
 12. González, C., Cervera, L. and Moret-Fernández, D., 2011. Basin irrigation design with longitudinal slope. *Agricultural water management*, 98(10): 1516-1522.
 13. Gunantara, N., 2018. A review of multi-objective optimization: Methods and its applications. *Cogent Engineering*, 5(1), p.1502242.
 14. Heydari, N. and Abbasi, F., 2016. Optimization of Design and Management Parameters of Border Irrigation: A Case Study of Ramshir Irrigation and Drainage Network. *Irrigation and Drainage Structures Engineering Research*, 17(66): 55-70. [In Persian].
 15. Jalily, S., 2022. Optimization of surface irrigation by low-cost water management. *Journal of Water and Soil Conservation*. 29 (3): 101-112.
 16. Xu, J., Cai, H., Saddique, Q., Wang, X. Li L., Ma, C. and Lu, Y., 2019. Evaluation and optimization of border irrigation in different irrigation seasons based on temporal variation of infiltration and roughness. *Agricultural Water Management*, 214: 64-77.
 17. Liu, K., Jiao, X., Guo, W., An, Y. and Salahou, M.K., 2020. Improving border irrigation performance with predesigned varied-discharge. *PloS one*, 15(5), p.e0232751.
 18. Mazarei, R., Mohammadi, A.S., Naseri, A.A., Ebrahimian, H. and Izadpanah, Z., 2020. Optimization of furrow irrigation performance

