

توسعه مدل شبیه‌سازی - بهینه‌سازی هیدرولیکی - اقتصادی طراحی آبیاری کرتی

محمود اکبری^{*}

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۵/۲۰؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۸/۲۲)

چکیده

هدف این پژوهش، توسعه یک مدل شبیه‌سازی - بهینه‌سازی هیدرولیکی - اقتصادی برای طراحی آبیاری کرتی بود. این مدل شبیه‌سازی هیدرولیکی (طراحی آبیاری کرتی) را با معادله بیلان حجم، شبیه‌سازی اقتصادی را از طریق محاسبه مجموع ۴ هزینه در طول فصل و بهینه‌سازی را با الگوریتم فرا ابتکاری چندهدفه NSGAII انجام می‌دهد. به منظور برنامه‌نویسی، از نرم‌افزار برنامه‌نویسی MATLAB استفاده شد. برای بهینه‌سازی توابع هدف، از بهینه‌سازی تابعی، چندبعدی، ایستا، مقید، پیوسته، چندهدفه و فرا ابتکاری استفاده شد. متغیرهای تصمیم که از بین ورودی‌های شبیه‌سازی انتخاب شدند، به گونه‌ای محاسبه شدند که توابع هدف هیدرولیکی (کمینه‌سازی ترکیب خطی هفت شاخص عملکرد) و اقتصادی (کل هزینه فصل آبیاری بر اساس مجموع هزینه‌های آب، کارگر، آماده‌سازی کرت و حفر نهر) کمینه شود. برای شبیه‌سازی از اطلاعات یک مزرعه آزمایشی استفاده شد. پس از شبیه‌سازی اولیه، بهینه‌سازی مزرعه آزمایشی به وسیله الگوریتم فرا ابتکاری چندهدفه NSGAII با پارامترهای تنظیم شده انجام شد. بهینه‌سازی با استفاده از مدل پیشنهادی باعث کاهش (بهبود) توابع هدف نسبت به عملکرد اولیه شبیه‌سازی شد. در مجموع مدل پیشنهادی که ابزاری تخصصی برای آبیاری کرتی است، با وجود سادگی کارایی مناسبی داشت.

واژه‌های کلیدی: مدل شبیه‌سازی - بهینه‌سازی، آبیاری کرتی، معادله بیلان حجم، الگوریتم NSGAII

۱. گروه علوم و مهندسی آب دانشگاه اراک، اراک

*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: m-akbarii@araku.ac.ir

مقدمه

مدل‌های شبیه‌سازی آبیاری سطحی (معادلات سنت و نانت) به روش‌های دینامیکی (شامل مدل‌های هیدرودینامیک و اینرسی صفر)، سینماتیکی (شامل مدل‌های موج جنبشی و بیلان حجم) و مدل جریان پایدار بیان و به‌طور کامل یا خلاصه شده حل می‌شوند (۱۱). نرم‌افزارهایی نیز با هدف بهبود طراحی و بهره‌برداری این روش آبیاری ارائه شده‌اند (۱۲). اما مدل‌ها و نرم‌افزارهای مذکور قادر به بهینه‌سازی نیستند و فقط مفاهیم هیدرولیکی مورد توجه است و همچنین شاخص‌های عملکرد هیدرولیکی به‌صورت مجزا در نظر گرفته و محاسبه می‌شوند. لذا در سال‌های اخیر تلاش‌هایی برای حل این مشکلات انجام گرفته که می‌توان این اقدامات را در چهار گروه تقسیم‌بندی کرد.

گروه اول در نظر گرفتن همزمان شاخص‌های عملکرد هیدرولیکی (به‌عنوان فاکتورهای تعیین کننده مؤثر بودن آبیاری (۵)) برای تشریح کامل آبیاری سطحی است (۱۰). این شاخص‌ها شامل راندمان کاربرد، راندمان آبیاری، راندمان نیاز آبی، یکنواختی توزیع، راندمان یکنواختی، نسبت رواناب پایاب و نسبت نفوذ عمقی هستند (۱). هر یک از شاخص‌های عملکرد فوق بستگی به پارامترها و متغیرهای آبیاری سطحی مانند توپوگرافی، خصوصیات نفوذ، طول، عرض، دبی ورودی، شیب و غیره دارند. لذا مقدار این کمیت‌ها که از نظر بهینه‌سازی، پارامترها و متغیرهای تصمیم (تعیین کننده ابعاد مسائل) هستند، نقش اساسی در عملکرد هیدرولیکی آبیاری دارند و برای مدیریت و طراحی مناسب این سیستم مهم هستند (۱۶).

گروه دوم استفاده از مفاهیم اقتصادی مثل تابع سود و تعیین هزینه‌های آب، کارگر، حفر نهر و جویچه و تعیین درآمد فروش محصول با استفاده از تابع تولید و قیمت واحد محصول و محاسبه شاخص‌هایی نظیر نسبت سود به هزینه است (۱۳). مفاهیم اقتصادی، از روند تغییرات پارامترها (و غیر قابل پیش بینی بودن آنها) به‌خصوص در کشورهای در حال توسعه متأثر

است.

سومین گروه استفاده از مفاهیم زیست‌محیطی و تعیین شاخص‌های عملکرد آن به‌خصوص در مورد بحث کودآبیاری است (۲۰). در سال‌های اخیر این مفاهیم به‌خاطر تأثیر آلودگی‌ها بر سلامت انسان مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. پس از ارائه مدل‌هایی نظیر HYDRUS که می‌توانند انتقال آلودگی در خاک را مدل کنند این تحقیقات در دهه اخیر شتاب گرفته است (۱۴). البته به‌دلیل همبستگی حرکت آلودگی با حرکت آب در خاک، این مفاهیم به‌ناچار باید با مفاهیم هیدرولیکی ترکیب شوند.

چهارمین گروه نیز تأثیرپذیری از پارامترهای گیاهی و استفاده از مفاهیم تابع تولید و تعیین شاخص‌هایی نظیر بهره‌وری و کارایی مصرف آب که رابطه آب و محصول را تشریح می‌کنند است (۱۵).

بنابراین به‌طور خلاصه می‌توان گفت مسائل مربوط به آبیاری سطحی، معمولاً به‌دنبال بهینه‌سازی عملکرد هیدرولیکی سیستم، بهینه‌سازی سود اقتصادی، کمینه‌سازی تبعات زیست‌محیطی، بهینه‌سازی عملکرد محصول یا ترکیبی از این موارد هستند. لذا برای رسیدن به یک یا چند هدف از مجموعه اهداف فوق، نیاز به ابزار بهینه‌سازی در مدل‌های شبیه‌سازی-بهینه‌سازی است. در مدل‌های شبیه‌سازی-بهینه‌سازی در داخل مدل بهینه‌سازی، مقدار تابع هدف بر حسب متغیرهای تصمیم که بر اساس قیود و محدودیت‌های مسئله تعیین شده‌اند، با استفاده از مدل شبیه‌سازی محاسبه می‌شود (۹).

اکبری و همکاران (۱) یک مدل شبیه‌سازی-بهینه‌سازی برای سامانه‌های آبیاری سطحی با عنوان Evaluation, Design and Optimization of EDOSIM (Surface Irrigation Model) را ارائه دادند. مدل EDOSIM فقط مفاهیم هیدرولیکی را با الگوریتم‌های تک‌هدفه لحاظ می‌کند. مزیت اصلی آبیاری سطحی نسبت به آبیاری تحت فشار، هزینه‌های کمتر است. با استفاده از بهینه‌سازی هیدرولیکی-اقتصادی آبیاری سطحی، هم این نقطه قوت، بهبود

شبیه‌سازی در مدل پیشنهادی

زیرمدل هیدرولیکی

شبیه‌سازی در زیرمدل هیدرولیکی (طراحی آبیاری کرتی)، با استفاده از معادله بیلان حجم (۴) با روش حل پیشروی توانی شامل معادلات نفوذ کوستیاکف لوئیس ($z = kt^a + f_0t$) و پیشروی توانی ($x = pt^n$) انجام شد.

ورودی‌ها شامل طول مزرعه (L_T, m)، طول هر کرت (L, m)، ضریب مانینگ (n)، حداکثر سرعت حرکت آب ($V_{max}, m/min$)، دبی واحد عرض ($q_0, m^3/min/m$)، دبی کل ($Q_T, m^3/min$)، عرض مزرعه (W_f, m)، ضرایب سطح مقطع (σ_1 و σ_2)، ضرایب محیط خیس شده (γ_1 و γ_2)، ضریب معادله نفوذ ($k, m/min^a$)، نمای معادله نفوذ (a)، سرعت نفوذ پایه ($f_0, m/min$)، کمبود رطوبت ناحیه توسعه ریشه (Z_{req}, m) و نیاز آبیاری (LF) است. در طراحی کرت، σ_1 و σ_2 ، γ_1 و γ_2 به ترتیب ۰ و ۱ و ۱ و ۱ هستند. ضمن اینکه حداقل نفوذ در انتها صورت می‌گیرد. در طراحی کرت، شیب برابر صفر فرض شد. همه ورودی‌ها باید مثبت باشند. به جز دو ورودی L_f و f_0 که این دو باید صفر یا مثبت باشند. قیودی که قبل از اجرا، روی ورودی‌ها اعمال می‌شوند شامل $\{Q_T \geq q_0 \text{ و } L_T \geq L\}$ (حداقل عرض یک متر) هستند.

خروجی‌ها شامل تعداد کرت در طول مزرعه (N_{sl})، دبی واحد عرض بیشینه ($q_{max}, m^3/min/m$)، عمق بیشینه (y_{max}, m)، عمق آب در ورودی کرت (y_0, m)، عرض هر کرت (W_0, m)، تعداد کرت در عرض مزرعه (N_{bw})، تعداد کرت (N_b)، حجم نفوذ در واحد طول ($Z_{req}, m^3/m$)، فرصت نفوذ (t_{req}, min)، فاکتور شکل زیر سطحی (σ_z)، زمان پیشروی به انتهای مزرعه (t_L, min)، نمای معادله پیشروی (f)، ضریب معادله پیشروی (p)، زمان قطع جریان (t_{co}, min)، زمان تخلیه (t_d, min)، زمان پسروی (t_r, min)، عمق نفوذ در ابتدای مزرعه (Z_0, m)، عمق نفوذ در انتهای مزرعه (Z_L, m)، عمق آبیاری (Z_{Lf}, m)، حجم نفوذ (V_z, m^3)، راندمان کاربرد ($E_a, \%$)، راندمان آبیاری ($E_i, \%$)، راندمان نیاز آبی ($E_r, \%$)، یکنواختی توزیع

می‌یابد که با توجه به مشکلات اقتصادی کشور، می‌تواند بخشی از مشکلات کشاورزان را مرتفع سازد؛ و هم ضعف عملکرد هیدرولیکی مرتفع می‌شود. لذا در این تحقیق، مفاهیم اقتصادی با مفاهیم هیدرولیکی ترکیب شده و از الگوریتم چندهدفه NSGAII برای حل آن استفاده است.

مواد و روش‌ها

در این تحقیق یک مدل شبیه‌سازی - بهینه‌سازی جدید برای آبیاری کرتی با لحاظ کردن اهداف هیدرولیکی و اقتصادی تهیه شد. در این مدل، شبیه‌سازی در دو زیرمدل هیدرولیکی و اقتصادی انجام می‌شود. در زیرمدل هیدرولیکی (طراحی آبیاری کرتی)، معادله بیلان حجم، و در زیرمدل اقتصادی، روابطی با اقتباس (۱۳، ۱۷ و ۱۸) استفاده شده است. برای بهینه‌سازی نیز الگوریتم فرا ابتکاری چندهدفه NSGAII استفاده شد.

پس از شبیه‌سازی، بهینه‌سازی انجام می‌شود. از نظر علم بهینه‌سازی، می‌توان به‌طور مستقیم بهینه‌سازی را بدون شبیه‌سازی اولیه انجام داد. اما ورود به بهینه‌سازی پس از شبیه‌سازی اولیه مزایایی دارد. از جمله اینکه با مقایسه شرایط قبل و بعد از بهینه‌سازی، امکان بررسی نقش بهینه‌سازی در بهبود شرایط فراهم می‌شود. همچنین می‌توان به نقش متغیرهای تصمیم در بهبود عملکرد پی برد. به علاوه می‌توان پس‌پردازش (شبیه‌سازی پس از بهینه‌سازی) را انجام داد.

به دلیل عدم وجود ابزارهای مربوطه با شرایط مسئله، تمام مراحل متناسب با ساختار مطالعه در نرم‌افزار MATLAB برنامه‌نویسی شد. از مزیت‌های مدل پیشنهادی اینکه برای هر مزرعه که داده‌های موردنیاز را دارا باشد، برنامه‌ریزی مورد نظر بهره‌بردار بدون تغییر در کد برنامه، با تنظیم ضرایب مدل، انجام خواهد گرفت. به عبارت دیگر، مسئله و الگوریتم مستقل از هم پیاده‌سازی شده‌اند. در ادامه شبیه‌سازی (شامل دو زیرمدل) و شبیه‌سازی - بهینه‌سازی در مدل پیشنهادی بررسی شده‌اند.

$$(t_{req})_{i+1} = (t_{req})_i + \frac{z_{req} - k(t_{req})_i^a - f_0(t_{req})_i}{\frac{a.k}{(t_{req})_i^{1-a}} + f_0} \quad (9)$$

از رابطه نیوتن رافسون محاسبه می‌شوند (۱۹).

$$p = \frac{L}{(t_L)^r} \quad (10)$$

$$t_{co} = \max \left(t_L + \frac{z_{req} \cdot L - 0.8 y_0 \cdot L}{q_0}, t_L \right) \quad (11)$$

$$Z_0 = k \cdot t_L^a + f_0 \cdot t_L + 0.8 y_0 + \frac{q_0(t_{co} - t_L)}{L} \quad (12)$$

$$Z_L = k(t_{co} - t_L)^a + f_0(t_{co} - t_L) + \frac{q_0 \cdot t_{co}}{L} - \left(\frac{k \cdot t_{co}^a + f_0 \cdot t_{co} + k(t_{co} - t_L)^a + f_0(t_{co} - t_L)}{2} \right) \quad (13)$$

زمان تخلیه t_d از رابطه نیوتن رافسون و معادله کوستیاکوف-لویس با عمق نفوذ Z_0 محاسبه می‌شود.

$$t_r = t_d \quad (14)$$

$$Z_{Lf} = z_{req} \cdot LF \quad (15)$$

حجم نفوذ از روش پیشنهادی اکبری و همکاران (۱) تعیین می‌شود.

$$Ea = \frac{z_{req} \cdot L}{q_0 \cdot t_{co}} \times 100 \quad (16)$$

$$Ei = \frac{L(z_{req} + Z_{Lf})}{q_0 \cdot t_{co}} \times 100 \quad (17)$$

$$Er = \frac{z_{req} \cdot L}{z_{req} \cdot L} \times 100 \quad (18)$$

$$DU = \frac{\frac{Z_L + Z_{75}}{2}}{\frac{Z_0 + Z_{25} + Z_{50} + Z_{75} + Z_L}{5}} \times 100 \quad (19)$$

$$DE = \frac{z_{req}}{\frac{Z_0 + Z_{25} + Z_{50} + Z_{75} + Z_L}{5}} \times 100 \quad (20)$$

$$TWR = \left(1 - \frac{\nabla z / w_0}{q_0 \cdot t_{co}} \right) \times 100 \quad (21)$$

$$DPR = \left(\frac{\nabla z}{w_0} - \frac{z_{req} \cdot L}{q_0 \cdot t_{co}} \right) \times 100 \quad (22)$$

(DU, %) راندمان توزیع (DE, %) نسبت رواناب پایاب (TWR, %) نسبت نفوذ عمق (DPR, %) و محاسبه تابع هدف (تابع وضع موجود) هیدرولیکی (zHyd) است. کلیه اطلاعات ورودی و خروجی که بعداً در بهینه‌سازی مورد نیاز هستند، ذخیره می‌شوند.

یک متغیر کمکی به نام Flag تعریف شد. زمانی که محاسبه طراحی انجام می‌شود، این متغیر برابر یک و زمانی که بهینه‌سازی طراحی صورت می‌گیرد این متغیر برابر دو است. پس از محاسبه q_{max} , y_0 , w_0 در طراحی با پیغام خطا و در بهینه‌سازی طراحی با اعمال ترم جریمه، قیود $\{q_{max} \geq q_0 \text{ و } y_{max} \geq y_0, W_f \geq w_0\}$ برقرار می‌شوند. معادلات حاکم در این بخش شامل موارد زیر است:

$$N_{sl} = \left[\frac{L_T}{L} \right] \quad (1)$$

$$q_{max} = (V_{max} \left(\frac{n^2 \cdot L}{7200} \right)^{0.23})^{1.857} \rightarrow \text{If } q_0 > q_{max} \rightarrow \begin{cases} \text{Error (Violation}_1 = 0) & \text{Flag} = 1 \\ \text{Violation}_1 = \frac{q_0}{q_{max}} - 1 & \text{Flag} = 2 \end{cases} \quad (2)$$

$$y_{max} = \left(\frac{q_{max}^2 \cdot n^2 \cdot L}{7200} \right)^{0.23} \quad (3)$$

$$y_0 = \left(\frac{q_0^2 \cdot n^2 \cdot L}{3600} \right)^{0.23} \rightarrow \text{If } y_0 > y_{max} \rightarrow \begin{cases} \text{Error (Violation}_2 = 0) & \text{Flag} = 1 \\ \text{Violation}_2 = \frac{y_0}{y_{max}} - 1 & \text{Flag} = 2 \end{cases} \quad (4)$$

$$w_0 = \frac{Q_T}{q_0} \rightarrow \text{If } W_f < w_0 \rightarrow \begin{cases} \text{Error (Violation}_3 = 0) & \text{Flag} = 1 \\ \text{Violation}_3 = \frac{w_0}{W_f} - 1 & \text{Flag} = 2 \end{cases} \quad (5)$$

$$N_{bw} = \left[\frac{W_f}{w_0} \right] \quad (6)$$

$$N_b = N_{sl} \cdot N_{bw} \quad (7)$$

$$Z_{req} = z_{req} \cdot w_0 \quad (8)$$

فرصت نفوذ t_{req} از رابطه نیوتن رافسون محاسبه می‌شود (۱۹):

۳- هزینه آماده‌سازی کرت برای یکبار آبیاری کل مزرعه: هزینه آماده‌سازی کرت برای کل فصل، از ضرب مساحت مزرعه در هزینه آماده‌سازی واحد سطح کرت به دست می‌آید. برای یکبار آبیاری باید آنرا بر تعداد دفعات آبیاری در طول فصل زراعی (N_i) تقسیم کرد:

$$C_{tf} = \frac{L_T \cdot W_f \cdot C_f}{N_i} \quad (27)$$

که در آن C_{tf} و C_f به ترتیب هزینه آماده‌سازی کرت برای یکبار آبیاری کل مزرعه (MillionRial) و هزینه آماده‌سازی واحد سطح کرت ($\text{MillionRial}/\text{m}^2$) است. هزینه مذکور تابعی از متغیرهای تصمیم مانند دبی ورودی به جویچه و طول هر کرت نیست. بنابراین مقدار آن ثابت است و در محاسبات بهینه‌سازی نقشی ندارد و فقط در محاسبه هزینه‌ها دخالت دارد.

۴- محاسبه هزینه حفر نهرهای آبیاری برای یکبار آبیاری کل مزرعه: برای چند کرت، یک نهر آبیاری در ابتدای آنها حفر می‌شود که کرت‌ها از آن آبیاری می‌کنند. هزینه این نهرها از حاصل ضرب طول کل آنها در هزینه حفر واحد طولشان محاسبه می‌شود. شبیه هزینه قبلی، این هزینه نیز بایستی بر تعداد دفعات آبیاری تقسیم شود:

$$C_{td} = \frac{W_f \cdot N_{sl} \cdot C_d}{N_i} \quad (28)$$

که در آن C_{td} و C_d به ترتیب هزینه حفر نهرهای آبیاری برای یکبار آبیاری کل مزرعه (MillionRial) و هزینه حفر واحد طول نهر ($\text{MillionRial}/\text{m}$) است.

هزینه کل برای یکبار آبیاری مزرعه (C_t) با جمع هزینه‌های چهارگانه فوق محاسبه می‌شود. در نهایت تابع هدف (تابع وضع موجود) اقتصادی ($zEco$, MillionRial) برای کل فصل به صورت زیر حساب می‌شود:

$$zEco = C_t \cdot N_i \cdot (1 + \beta \cdot Violation) \quad (29)$$

بهینه‌سازی در مدل پیشنهادی

در مدل پیشنهادی بهینه‌سازی تابعی (ارائه تابع هدف با یک رابطه ریاضی)، چندبعدی (بیش از یک متغیر تصمیم)، ایستا

$$Violation = Violation_1 + \frac{Violation_2}{\beta = 100} + Violation_3 \rightarrow \quad (23)$$

$$zHyd = \left[\begin{array}{l} \left(1 - \frac{Ea}{100}\right) + \left(1 - \frac{Ei}{100}\right) \\ + \left(1 - \frac{Er}{100}\right) + \left(1 - \frac{DU}{100}\right) \\ + \left(1 - \frac{DE}{100}\right) + \left(\frac{TWR}{100}\right) + \frac{DPR}{100} \end{array} \right] (1 + \beta \cdot Violation) \quad (24)$$

که در آن Violation مقدار جریمه و $(1 + \beta \cdot Violation)$ ترم جریمه است و زمانی که در بهینه‌سازی طراحی، تخطی از قیود رخ می‌دهد عمل می‌کند. با توجه به اینکه تابع هدف می‌تواند بین صفر تا هفت باشد، مقدار β (ضریب جریمه) برابر ۱۰۰ فرض شد که نشانگر جریمه سنگین است.

زیرمدل اقتصادی

برای طراحی آبیاری جویچه‌ای، بحث اقتصادی شامل ۴ هزینه توسط والیاتنزاس (۱۷ و ۱۸) و نادری و همکاران (۱۳) ارائه شده است. با اقتباس از منطق آنها و انجام اصلاحات لازم، در این مطالعه هزینه‌های آبیاری کرتی به چهار قسمت تقسیم شد:

۱- هزینه آب مورد نیاز برای یکبار آبیاری کل مزرعه: از ضرب حجم آب مورد نیاز در قیمت یک متر مکعب آب محاسبه شد:

$$C_{tw} = Q_T \cdot t_{co} \cdot N_b \cdot C_w \quad (25)$$

که در آن C_{tw} و C_w به ترتیب هزینه آب مورد نیاز برای یکبار آبیاری کل مزرعه (MillionRial) و قیمت واحد حجم آب ($\text{MillionRial}/\text{m}^3$) است.

۲- هزینه کارگر برای یکبار آبیاری کل مزرعه: از ضرب زمان مورد نیاز برای آبیاری کل مزرعه در هزینه کارگر در واحد زمان محاسبه شد:

$$C_{tl} = t_{co} \cdot N_b \cdot C_l \quad (26)$$

که در آن C_{tl} و C_l به ترتیب هزینه کارگر برای یکبار آبیاری کل مزرعه (MillionRial) و هزینه کارگر در واحد زمان ($\text{MillionRial}/\text{min}$) است.

جدول ۱. متغیرهای تصمیم، پارامترها و قیود بهینه‌سازی

متغیرهای تصمیم	L, q0, zreq, LF
پارامترها	a, f0, Ni, Cw, Cl, Cf, Cd, LT, n, Vmax, QT, Wf, k,
قیود	$(LF \geq 0)$, $LT \geq LMax$, $QT \geq q0Max$

a: همه مقادیر کمینه و بیشینه ورودی‌های دیگر باید اعداد حقیقی مثبت باشند.

نسبت رواناب پایاب برابر صفر است. بنابراین در مدل پیشنهادی تابع هدف هیدرولیکی کمینه متشکل از شاخص‌های فوق به‌نحوی فرمول‌بندی شد که از نظر تئوری دارای بهینه‌سراسری صفر باشد.

تابع هدف اقتصادی نیز طبق رابطه ۲۹ حساب می‌شود. این تابع، کل فصل آبیاری را در نظر می‌گیرد. چون بحث هزینه در این تابع وجود دارد، کمینه‌سازی آن ایده‌آل است.

متغیرهای تصمیم

در جدول ۱ متغیرهای تصمیم و پارامترها (از ورودی‌های شبیه‌سازی انتخاب شدند) و قیود بهینه‌سازی طراحی آبیاری کرتی ارائه شده است. متغیرهای تصمیم در مدل پیشنهادی، توسط الگوریتم چندهدفه NSGAIII پیشنهاد می‌شوند و همراه با پارامترهای شبیه‌سازی، وارد محاسبات شده و خروجی‌ها را ایجاد می‌کنند. در انتهای خروجی‌ها، توابع هدف حساب شده و شایستگی متغیرهای تصمیم پیشنهاد شده بررسی می‌شود. در انتها، متغیرهایی که به‌ازای آنها، توابع هدف در منحنی پرتو یا آرشیو قرار بگیرد، گزارش می‌شوند.

تشخیص متغیر(های) تصمیم مناسب که بیشترین تأثیر را در بهینه‌سازی دارند، تا حدود زیادی به تجربه و اندکی به سعی و خطا بستگی دارد. اگر در شبیه‌سازی، بیش آبیاری صورت گرفته باشد، در بهینه‌سازی، کاهش دبی و افزایش طول مفید است. در آبیاری کامل و بیش آبیاری، از نظر تئوری می‌توان متغیرهای تصمیم Z_{req} و LF که به ترتیب حد بهینه آبیاری و آبشویی را تعیین می‌کنند را افزایش داد تا تابع هدف کاهش یابد. اما با توجه به بحران آب، توصیه می‌شود این متغیرها یا در نظر گرفته

(عدم تغییرات مکانی و زمانی ورودی‌ها و خروجی‌ها و لحاظ نشدن پنجره زمانی (Time Window))، مقید (لحاظ شدن قیود در تابع هدف)، پیوسته (استفاده از الگوریتم‌های پیوسته برای حل مسئله پیوسته)، چندهدفه (دو تابع هدف شامل مباحث هیدرولیکی و اقتصادی) و فرا ابتکاری (استفاده از ساز و کارهایی برای خروج از بهینه محلی) استفاده شد (۶). ورودی‌ها در بهینه‌سازی مدل پیشنهادی شامل توابع هدف، متغیرهای تصمیم، الگوریتم بهینه‌سازی و پارامترهای الگوریتم بهینه‌سازی هستند. خروجی‌ها نیز شامل نمودار همگرایی و مشاهده نتایج بهینه است.

توابع هدف

در این تحقیق، دو هدف برای توسعه مدل بهینه هیدرولیکی اقتصادی اعمال شد.

تابع هدف هیدرولیکی مطابق رابطه ۲۴ از ترکیب خطی هفت شاخص عملکرد تشکیل شد. این هفت شاخص عملکرد، دربرگیرنده سه مفهوم یکنواختی، کفایت و راندمان بودند که برای تشریح کامل آبیاری سطحی لازم و کافی هستند (۲). مسئله چندهدفه موجود در زیرمدل هیدرولیکی مدل پیشنهادی، به روش تابع مطلوبیت (۸) فرمول‌بندی شد. در این روش از ترکیب خطی مجموع توابع هدف، تابع مطلوبیت یا تابع هدف کل به دست می‌آید. به‌خاطر هم‌بعد بودن اهداف، بیان تابع هدف هیدرولیکی با روش تجزیه از نوع مجموع وزن‌دار (Weighted Sum) (۲۱) امکان‌پذیر شد. مقادیر ایده‌آل راندمان کاربرد، راندمان آبیاری، راندمان نیاز آبی، یکنواختی توزیع و راندمان توزیع برابر یک و مقادیر ایده‌آل نسبت نفوذ عمقی و

پارامترهای الگوریتم بهینه‌سازی

در الگوریتم NSGAI سپری شدن تعداد تکرار معین (MaxIt) به‌عنوان شرایط خاتمه در نظر گرفته شد. این مقدار در واقع جزء پارامترهای الگوریتم نیست. اما در مدل پیشنهادی به‌عنوان پارامتر اول لحاظ شد. پارامترهای NSGAI شامل تعداد تکرار (MaxIt)، تعداد اعضای جمعیت (nPop)، نسبت تقاطع (pCrossover)، نسبت جهش (pMutation) و نرخ تأثیر جهش (mu) است. علاوه بر قید ورود اعداد حقیقی مثبت، باید pCrossover، pMutation و mu کوچک‌تر مساوی یک باشند. در این مطالعه برای تنظیم پارامترها از روش ارجاع به مطالعات گذشته استفاده شد.

فرایند شبیه‌سازی- بهینه‌سازی در مدل پیشنهادی

پنج مرحله برای حل مسئله با الگوریتم NSGAI طی شد: ۱- ایجاد مکانیزمی برای تعریف، ذخیره و بازخوانی مدل، ۲- تعریف مکانیزمی برای ایجاد راه حل تصادفی شامل متغیرهای تصمیم خام (کدگذاری یا Coding)، ۳- ایجاد مکانیزم تبدیل متغیرهای تصمیم خام به متغیرهای تصمیم اصلی مسئله (تفسیر پاسخ یا Parsing)، ۴- محاسبه مقدار تابع هدف و برآورده کردن قیود مسئله، ۵- اتصال تابع هدف به الگوریتم بهینه‌سازی. بیان مسئله، تابع هدف و الگوریتم جدا از هم صورت گرفت و این سه مورد با دستگیره‌هایی بهم متصل شدند.

در شکل ۱ نمودار گردش فرایند شبیه‌سازی- بهینه‌سازی در مدل پیشنهادی بر مبنای ۵ مرحله مذکور نشان داده شده است. مرحله یک همان پارامترهای شبیه‌سازی است. در مرحله دو یک جواب تصادفی اولیه بین حد کمینه و بیشینه (یک بردار افقی با سائزی برابر تعداد متغیرهای تصمیم که همگی در یک جواب هستند) در یک فایل جداگانه ایجاد می‌شود. متغیرهای تصمیم که در یک جواب تولید شدند، خام و جملگی با توزیع یکنواخت بین صفر و یک هستند. این جواب تصادفی اولیه در تابع هدف ارزیابی می‌شود (مطابق مرحله چهار). در داخل تابع هدف، فرایند تولید جواب

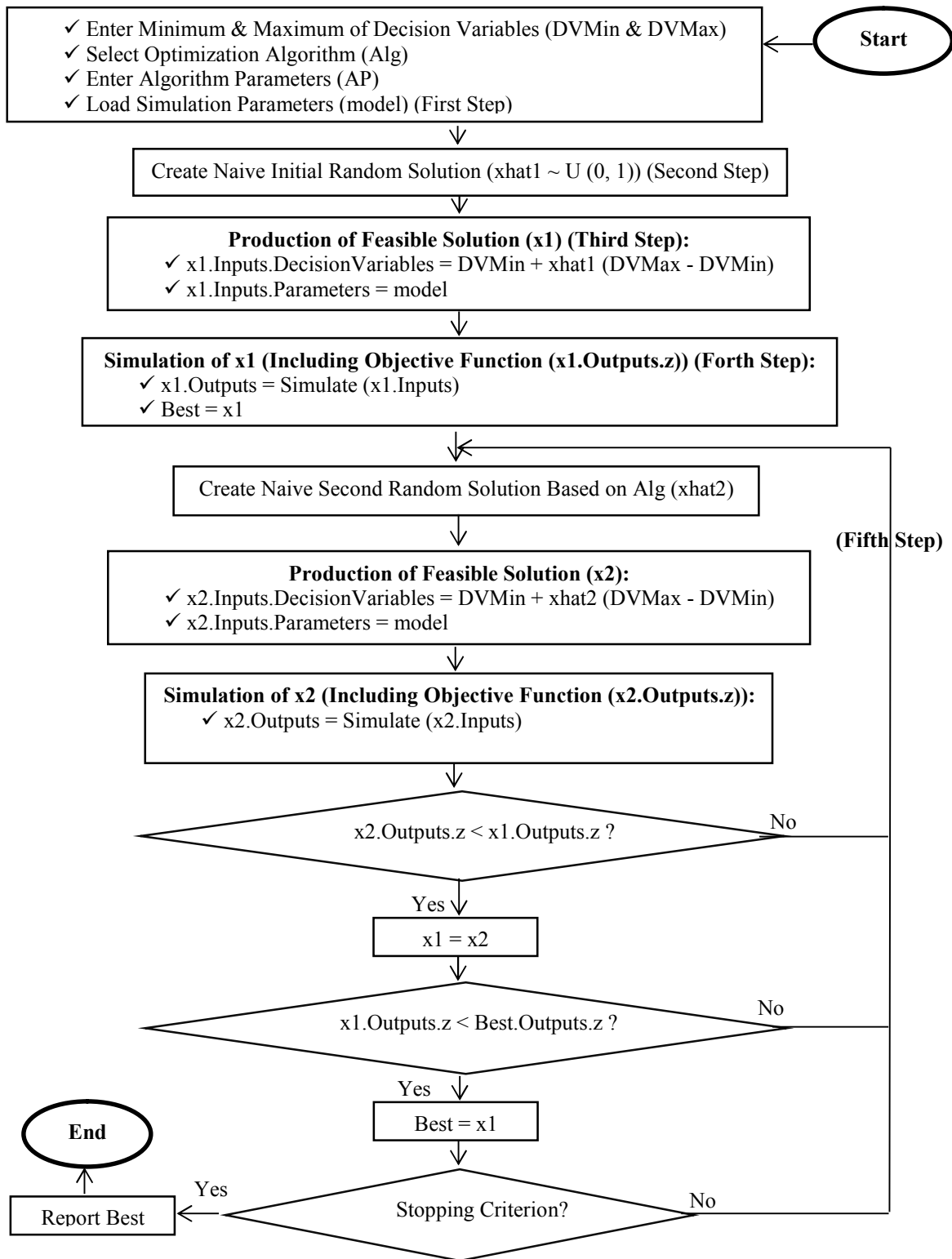
نشوند یا برای بهینه‌سازی، کمتر از مقدار اولیه خود تعیین حدود شوند. این تأکید روی متغیر تصمیم Z_{req} بیش از LF است. چرا که ممکن است بحث آبتوی در مواردی نیاز مبرم باشد که با مدل پیشنهادی می‌توان حد بهینه آن را مشخص کرد.

لحاظ کردن متغیر تصمیم Z_{req} به مباحثی نظیر سند ملی عمق بهینه آب مصرفی کمک می‌کند. در واقع هدف از لحاظ کردن این متغیر تصمیم، به‌دست آوردن سطح بهینه کم‌آبیاری است. امری که موضوع بسیاری از تحقیقات را به‌خود اختصاص می‌دهد. در تحقیقات دیگر، مقدار Z_{req} با آزمایش آب و خاک، مشخص و ثابت است و سطوح کم‌آبیاری از نوع کاهش عمق آبیاری در هر آبیاری، معمولاً اعماقی کمتر از این عمق ثابت را به‌دست می‌دهند (V). اما در مدل پیشنهادی، می‌توان از نظر تئوری مقدار Z_{req} را در حد بهینه کاهش داد و مانند آبیاری کامل با این حد کاهش‌یافته برخورد کرد. در واقع تفاوت نگرش و نه تفاوت منطق در مدل پیشنهادی وجود دارد. به‌خاطر پیوسته بودن بهینه‌سازی این مدل، سطح بهینه کم آبیاری محدود به سطوحی که در تحقیقات دیگر در نظر گرفته می‌شود نیست.

الگوریتم بهینه‌سازی

الگوریتم دقیق برای حل توابع هدف مدل پیشنهادی وجود ندارد. لذا استفاده از الگوریتم‌های ابتکاری یا فرا ابتکاری اجتناب‌ناپذیر بود. به‌خاطر عدم وجود مکانیزم خروج از بهینه موضعی در الگوریتم‌های ابتکاری، در مدل پیشنهادی از الگوریتم شناخته شده و پرکاربرد فرا ابتکاری چندهدفه NSGAI (۳) استفاده شد. برای پیاده‌سازی آن، پنج مرحله زیر طی شد:

۱- تعریف مسئله شامل تعریف تابع هدف، تعداد و حدود متغیرهای تصمیم، ۲- پارامترهای الگوریتم بهینه‌سازی، ۳- شروع و مراحل اولیه مثل جمعیت اولیه، تنظیمات اولیه و حافظه لازم، ۴- حلقه اصلی الگوریتم که جواب‌های بعدی در آن تولید، ارزیابی و احتمالاً جایگزین می‌شوند. ۵- نمایش نتایج.



شکل ۱. نمودار گردش فرایند شبیه‌سازی - بهینه‌سازی در مدل پیشنهادی

جدول ۲. داده‌های مزرعه طراحی کرت

متغیر	LT	L	n	Vmax	q ₀	QT	Wf	k	a	f ₀	zreq	LF
مقدار	۳۶۰	۱۸۰	۰/۰۴	۱۳	۰/۱۴	۱۲/۶	۳۶۰	۰/۰۰۳۲	۰/۴۹	۰/۰۰۰۱۰۷	۰/۱	۰/۰۵

جدول ۳. پارامترهای اقتصادی

پارامتر	Ni	Cw	Cl	Cf	Cd
مقدار	۷	۵۰۰۰	۳۰۰۰	۵۰۰۰	۴۰۰۰۰

مقدار محاسبه شده توابع هدف برگردانده می‌شود. در مرحله پنج، بسته به مکانیزم الگوریتم، جواب ثانویه خام تولید، ارزیابی (و در داخل آن امکان‌پذیر) شده و با جواب اولیه مقایسه می‌شود. به همین ترتیب در داخل حلقه، منحنی پرتو یا آرشیو مشخص می‌شود.

نتایج و بحث

نتایج شبیه‌سازی

طراحی کرت مدل پیشنهادی، با استفاده از اطلاعات مثال ۶-۵ منبع (۱۹) انجام شد. در جدول ۲ داده‌های این مزرعه ارائه شده است. در این مزرعه، نیاز آبتوی ۰/۰۵ فرض شد. در جدول ۳ نیز پارامترهای اقتصادی مورد استفاده در این مزرعه ارائه شده است. تمامی مقادیر، دارای واحدهایی مطابق با بخش مواد و روش‌ها بودند. در جدول ۴ نتایج طراحی این مزرعه با استفاده از مدل پیشنهادی ارائه شده است. در این مزرعه توابع هدف هیدرولیکی و اقتصادی می‌توانند با بهینه‌سازی مقادیر کمتری (بهتری) را اختیار کنند.

پارامترهای الگوریتم بهینه‌سازی

مقادیر پارامترهای الگوریتم NSGAI با ارجاع به مطالعات گذشته در جدول ۵ گزارش شده است.

نتایج بهینه‌سازی

جدول ۶ در بهینه‌سازی طراحی کرت، مقادیر کمینه و بیشینه

امکان‌پذیر (مرحله سه) صورت می‌گیرد.

در تولید جواب امکان‌پذیر طراحی کرت تابع $x = \text{ParseSolutionDesignBasin}(xhat, model)$ از فایل تابع هدف فراخوانی می‌شود. model ساختاری است که تمام اطلاعات مورد نیاز طراحی کرت (پارامترها) و بهینه‌سازی طراحی کرت (مقادیر کمینه و بیشینه متغیرهای تصمیم) را در خود دارد. $xhat$ جواب خام اولیه است که توسط الگوریتم بهینه‌سازی تولید می‌شود و x جواب امکان‌پذیر است. در این تابع ابتدا متغیرهای تصمیم خام ($zreqhat, qohat, Lhat$) و $Lfhat$ از $xhat$ و اطلاعات مورد نیاز از model استخراج می‌شوند. سپس نوبت به تولید جواب امکان‌پذیر می‌رسد. مثلاً برای متغیر تصمیم L داریم: $L = LMin + Lhat(LMax - LMin)$. با توجه به اینکه $Lhat$ همیشه بین صفر و یک است، لذا $LMin \leq L \leq LMax$ خواهد بود. پس قید طول خود به خود برقرار می‌شود. این روش قابل قبول نگه‌داشتن پاسخ‌ها (برخورد ساختاری) است که در بحث برخورد با مسائل مقید بهینه‌سازی مطرح است. برای سایر متغیرهای تصمیم هم همین فرایند صورت می‌گیرد.

در ادامه یک ساختار تشکیل می‌شود. بخشی از اطلاعات این ساختار، از model تأمین می‌شود (همان پارامترها). بخشی دیگر از تولید جواب امکان‌پذیر که به‌تازگی بررسی شد تأمین می‌شود (همان متغیرهای تصمیم). حال تمام اطلاعات مورد نیاز اجرای تابع طراحی کرت آماده است. در بهینه‌سازی، متغیر کمکی Flag برابر دو است و پس از شبیه‌سازی، درنهایت

جدول ۴. نتایج طراحی مزرعه طراحی کرت با استفاده از مدل پیشنهادی

متغیر	Nsl	qmax	y _{max}	y _o	w _o	Nbw	Nb	Zreq	treq	σz	tL
مقدار	۲	۱/۵۵	۰/۱۲	۰/۰۵	۹۰	۴	۸	۹	۳۸۳/۱	۰/۷۱	۷۵/۸
متغیر	r	p	tco	td	tr	Z0	ZL	ZLf	Vz	Ea	Ei
مقدار	۰/۸۱	۵/۵۱	۱۵۶/۸	۵۸۲/۵	۵۸۲/۵	۰/۱۳۵	۰/۱۱۳	۰/۰۰۵	۲۰۰۴	۸۲/۰	۸۶/۱
متغیر	Er	DU	DE	TWR	DPR	zHyd	Ctw	Ctl	Ctf	Ctd	zEco
مقدار	۱۰۰	۹۴/۰	۸۰/۸	۰	۱۸/۰	۰/۷۵	۷۹/۰	۳/۷۶	۹۲/۶	۴/۱	۱۲۵۶

جدول ۵. مقادیر پارامترهای الگوریتم NSGAII

پارامتر	MaxIt	nPop	pc	pm	mu
مقدار	۱۰۰	۵۰	۰/۷	۰/۴	۰/۰۲

جدول ۶. کمینه، بیشینه و دو سناریوی جواب‌های بهینه در بهینه‌سازی طراحی کرت

متغیر تصمیم	کمینه	بیشینه	بهینه سناریوی هیدرولیکی	بهینه سناریوی اقتصادی
L	۵۹/۹	۳۶۰	۵۹/۹	۱۸۰/۴
q _o	۰/۰۵	۱	۰/۵۷۴۰	۰/۵۹۱۱

یکی از ملاک‌های برتری یک الگوریتم بر الگوریتم دیگر است. در بهینه‌سازی طراحی کرت که مبتنی بر آبیاری کامل است، متغیرهای تصمیم Zreq و LF لحاظ نشدند و مقادیر ابتدایی آنها باقی ماند و دو متغیر تصمیم دیگر لحاظ شدند. در جدول ۷ نتایج دو سناریوی جواب‌های بهینه ارائه شده است.

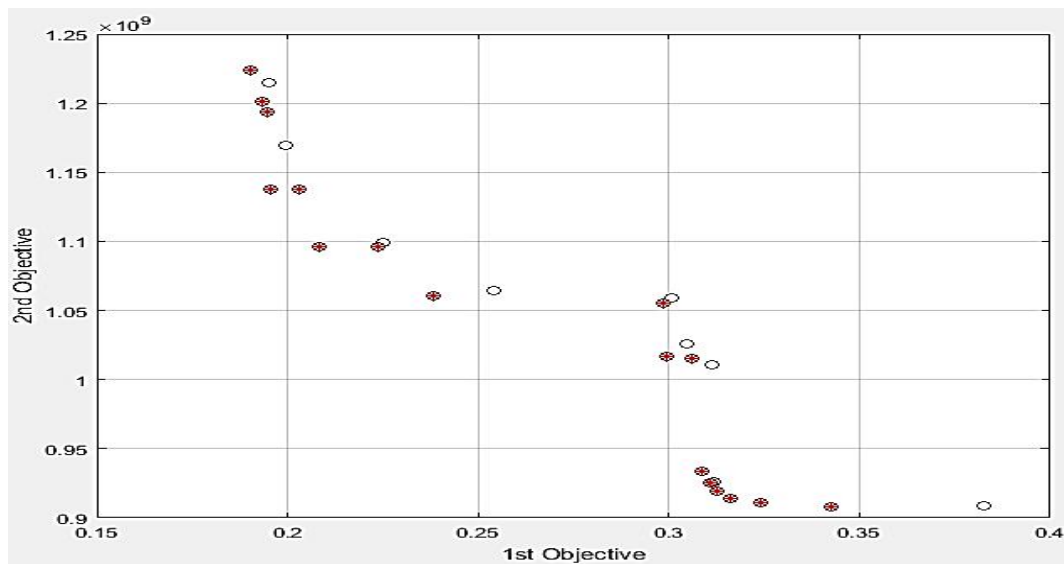
بهینه‌سازی طراحی کرت، در هر دو سناریو توابع هدف را به سطح مناسبی رساند که بیانگر پتانسیل بالای این روش است. چرا که توابع هدف (۱۲۵۶ و ۰/۷۵) (جدول ۴) به ۱۲۲۴ و ۰/۱۹) در سناریوی هیدرولیکی و (۹۰۸ و ۰/۳۴) در سناریوی اقتصادی (جدول ۷) کاهش یافتند. سایر جواب‌های موجود در منحنی پرتو نیز در شکل ۲ قابل مشاهده هستند. نقاط تو خالی جواب‌های مغلوب هستند. تعداد زیاد نقاط تو پر (جواب‌های نامغلوب) موجود در این منحنی، نشانگر گزینه‌های بهینه زیاد است.

نتایج بهینه سناریوی هیدرولیکی طول بهینه در کمینه بازه

متغیرهای تصمیم (قبل اجرا) و اعداد بهینه حاصل شده برای آنها (بعد اجرا) در دو سناریوی هیدرولیکی و اقتصادی را نمایش می‌دهد. با این توضیح که بهینه‌سازی چندهدفه، معمولاً منتج به بیش از یک جواب بهینه می‌شود. این جواب‌ها معمولاً روی منحنی یا رویه پرتو قرار می‌گیرند. دو جواب موجود در گوشه منحنی پرتو هر یک، یکی از اهداف را بیش از دیگری لحاظ می‌کنند. جواب‌های دیگر، بین این دو جواب قرار می‌گیرند و بهره‌ای از هر یک از اهداف را ندارند. با این توضیحات، منظور از دو سناریوی هیدرولیکی و اقتصادی، دو جواب موجود در گوشه منحنی پرتو است. گزارش این دو جواب فقط به منظور بیان حدود تغییرات تابع هدف و متغیرهای تصمیم است. درحالی که جواب موجود در میانه‌های این منحنی، هر دو هدف را به طور عادلانه برآورده می‌کند. جواب‌های دیگر موجود در منحنی پرتو نیز هر یک بهینه محسوب می‌شوند. تعداد جواب‌های موجود در منحنی پرتو،

جدول ۷. نتایج دو سناریوی جواب‌های بهینه در بهینه‌سازی طراحی کرت

سناریو	Nsl	qmax	y _{max}	y ₀	w ₀	Nbw	Nb	Zreq	treq	σz	tL
هیدرولیکی	۶	۰/۹۶۸۵	۰/۰۷	۰/۰۷	۲۲/۰	۱۶	۹۶	۲/۲۰	۳۸۳	۰/۶۸	۶/۳
اقتصادی	۱	۱/۵۵۰۸	۰/۱۲	۰/۰۹	۲۱/۳	۱۶	۱۶	۲/۱	۳۸۳	۰/۶۷	۲۴/۶
سناریو	r	p	tco	td	tr	Z ₀	ZL	ZLf	Vz	Ea	Ei
هیدرولیکی	۰/۹۵	۱۱/۰	۹/۴۵	۴۳۰	۴۳۰	۰/۱۰۹	۰/۱۰۴	۰/۰۰۵	۱۴۰	۹۴/۵	۹۹/۳
اقتصادی	۰/۹۹	۷/۷	۳۳/۳	۴۸۴	۴۸۴	۰/۱۱۸	۰/۱۰۳	۰/۰۰۵	۴۲۶	۹۱/۷	۹۶/۳
سناریو	Er	DU	DE	TWR	DPR	zHyd	Ctw	Ctl	Ctf	Ctd	zEco
هیدرولیکی	۱۰۰	۹۸/۵	۹۴/۲	۰	۵/۵	۰/۱۹	۶۶/۸	۳/۲	۹۲/۶	۱۲/۳	۱۲۲۴
اقتصادی	۱۰۰	۹۵/۶	۹۰/۳	۰	۸/۳	۰/۳۴	۳۳/۵	۱/۶	۹۲/۶	۲/۱	۹۰۸



شکل ۲. منحنی پرتو بهینه‌سازی طراحی کرت

متر مکعب بر دقیقه بر متر باعث پیشروی در ۷۶ دقیقه می‌شود و زمان قطع ۱۵۷ است. به‌طور خلاصه، طرح بهینه سناریوی هیدرولیکی نسبت به شرایط اولیه شبیه‌سازی، ابعاد کرت‌ها را کوچک‌تر، تعداد کرت‌ها را بیشتر، دبی را بیشتر، زمان پیشروی و قطع را کمتر پیشنهاد می‌دهد. توزیع رطوبت مناسب، شاخص‌های عملکرد نزدیک بهینه و توابع هدف کم در این سناریو به‌دست آمد.

نتایج بهینه سناریوی اقتصادی طول بهینه را اندکی بیش از نصف طول مزرعه حاصل کرد (جدول ۶) و فقط یک کرت در

مجاز را حاصل کرد (جدول ۶). نسبت به شبیه‌سازی (جدول‌های ۲ و ۴)، که ابعاد هر کرت بزرگ (۱۸۰ متر طول و ۹۰ متر عرض) است و تعداد ۸ کرت در مزرعه ایجاد می‌شود، در بهینه‌سازی، طول بهینه ۵۹/۹ متر باعث تشکیل ۶ کرت در راستای طول شد. دبی بهینه به‌نسبت زیاد ۰/۵۷۴۰ متر مکعب بر دقیقه بر متر نیز باعث شد عرض کرت‌ها حدود ۲۲ متر شوند. در راستای عرض مزرعه ۱۶ کرت و در کل ۹۶ کرت ایجاد شد. زمان پیشروی و قطع بهینه اندکی (به‌ترتیب ۶ و ۹ دقیقه) حاصل شد. درحالی‌که در شبیه‌سازی (جدول‌های ۲ و ۴)، دبی ۰/۱۴

جدول ۸. نتایج پس‌پردازش با لحاظ کردن ۱۸۰ متر برای طول و ۵۹۱۱/۰ متر مکعب بر دقیقه بر متر عرض برای دبی

متغیر	Nsl	qmax	y _{max}	y ₀	w ₀	Nbw	Nb	Zreq	treq	σz	tL
مقدار	۲	۱/۵۴۹۵	۰/۱۲	۰/۰۹	۲۱/۳	۱۶	۳۲	۲/۱۳	۳۸۳/۱	۰/۶۷	۲۴/۶
متغیر	r	p	tco	td	tr	Z ₀	ZL	ZLf	Vz	Ea	Ei
مقدار	۰/۹۹	۷/۷	۳۳/۲	۴۸۴	۴۸۴	۰/۱۱۸	۰/۱۰۳	۰/۰۰۵	۴۲۵	۹۱/۸	۹۶/۳
متغیر	Er	DU	DE	TWR	DPR	zHyd	Ctw	Ctl	Ctf	Ctd	zEco
مقدار	۱۰۰	۹۵/۶	۹۰/۳	۰	۸/۲	۰/۳۴	۶۶/۹	۳/۱۹	۹۲/۶	۴/۱	۱۱۶۸

برابر با ۱۸۰ متر است و بقیه ورودی‌ها مطابق جدول ۲، با هم برابر هستند. بهبود شرایط در پس‌پردازش نسبت به شبیه‌سازی اولیه، بیانگر اهمیت انتخاب دبی مناسب در آبیاری کرتی است.

نتیجه‌گیری

یک مدل شبیه‌سازی- بهینه‌سازی جدید برای آبیاری کرتی با لحاظ کردن اهداف هیدرولیکی و اقتصادی تهیه شد. این مدل نسبت به مدل‌های قبل، رویکرد شبیه‌سازی- بهینه‌سازی با قابلیت در نظر گرفتن همزمان هفت شاخص عملکرد و متغیرهای تصمیم با لحاظ کردن محدودیت‌های موجود برای هر متغیر را دارد. لذا قادر به ارائه راهکاری بهینه برای کاهش همزمان نفوذ عمقی و رواناب و افزایش راندمان‌ها و یکنواختی آبیاری و کاهش هزینه‌ها است. پژوهشگر این تحقیق در حال اعمال رویکرد فوق برای طراحی آبیاری جویچه‌ای و نواری و ارزیابی هر سه روش آبیاری، بررسی کارایی الگوریتم‌های دیگر بهینه‌سازی فرا ابتکاری و لحاظ کردن اهداف گیاهی و زیست‌محیطی است.

قدردانی

از معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه اراک که در قالب طرح پژوهشی درون‌دانشگاهی حمایت کردند، قدردانی می‌شود.

راستای طول تشکیل شد (جدول ۷). مدل پیشنهادی علاوه بر شبیه‌سازی- بهینه‌سازی، قابلیت شبیه‌سازی دارد. لذا برای از دست نرفتن طول مزرعه، با پس‌پردازش (شبیه‌سازی پس از شبیه‌سازی- بهینه‌سازی) می‌توان طول کرت‌ها را ۱۸۰ متر در نظر گرفت تا ۲ کرت در راستای طول مزرعه قابل تشکیل باشد. این اقدام به‌خاطر افزایش توابع هدف علمی نیست، اما عملی است. سپس طرح اخیر در شبیه‌سازی (طراحی کرت) مدل پیشنهادی بررسی شد. به بیان دیگر، با لحاظ کردن ۱۸۰ متر برای طول و ۵۹۱۱/۰ متر مکعب بر دقیقه بر متر عرض برای دبی، همان مزرعه شبیه‌سازی شد. نتایج پس‌پردازش در جدول ۸ ارائه شده است.

مقایسه پس‌پردازش (جدول ۸) با شبیه‌سازی اولیه (جدول ۴) و بهینه‌سناریوی اقتصادی (جدول ۷) نشان می‌دهد، نتایج پس‌پردازش و بهینه‌سناریوی اقتصادی به‌جز مباحث اقتصادی، تقریباً شبیه یکدیگر است و این دو با شبیه‌سازی اولیه تفاوت زیادی دارند. با توجه به تعداد ۲ کرت در راستای طول در پس‌پردازش، تقریباً تمام هزینه‌ها دو برابر شده است. به‌جز هزینه آماده‌سازی کرت که در بخش مواد و روش‌ها به آن اشاره شد، مقدار آن ثابت است و در محاسبات بهینه‌سازی نقشی ندارد و فقط در محاسبه هزینه‌ها دخالت دارد. این هزینه در سناریوی هیدرولیکی نیز همین مقدار ۹۲/۶ میلیون ریال است. از دیدگاه دیگر، تنها تفاوت پس‌پردازش با شبیه‌سازی اولیه در مقدار دبی واحد عرض است. چرا که مقدار طول، در هر دو

منابع مورد استفاده

1. Akbari, M., M. Gheysari, B. Mostafazadeh-Fard and M. Shayannejad. 2018. Surface irrigation simulation-optimization model based on meta-heuristic algorithms. *Agricultural Water Management* 201: 46-57.
2. Canone, D., M. Previati, I. Bevilacqua, L. Salvai and S. Ferraris. 2015. Field measurements based model for surface irrigation efficiency assessment. *Agricultural Water Management* 156: 30-42.
3. Deb, K., A. Pratap, S. Agarwal and T. Meyarivan. 2002. A fast and elitist multi-objective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE Transaction on Evolutionary Computation* 6: 181-197.
4. Elliott, R. L. and W. R. Walker. 1982. Field evaluation of furrow infiltration and advance functions. *Transactions of the ASAE* 25(2): 396-400.
5. Hart, W. E., G. V. Skogerboe and G. Peri. 1979. Irrigation performance: an evaluation. *Journal of the Irrigation and Drainage Division* 105(3): 275-288.
6. Haupt, R. L. and S. E. Haupt. 2004. Practical Genetic Algorithms. John Wiley & Sons.
7. Heydari Soreshjani S., M. Shayannejad, M. Naderi and B. Haghghati. 2015. Effect of different levels of irrigation on qualitative and quantitative properties of corn (Cultivar NS) and determination of the optimum depth of irrigation in water shortage conditions. *Journal of Water and Soil Science* 19(73): 125-138. (In Farsi).
8. Keeney, R. L. 1982. Decision analysis: an overview. *Operations Research* 30(5): 803-838.
9. Lalehzari, R., S. Boroomand Nasab, H. Moazed, A. Haghighi and M. Yaghoobzadeh. 2020. Simulation-optimization modelling for water resources management using nsgaii-oip and modflow. *Irrigation and Drainage* 69(3): 317-332.
10. Liu, K., X. Jiao, W. Guo, Y. An and M. K. Salahou. 2020a. Improving border irrigation performance with predesigned varied-discharge. *Plos One* 15(5): e0232751.
11. Liu, K., X. Jiao, J. Li, Y. An, W. Guo, M. K. Salahou and H. Sang. 2020b. Performance of a zero-inertia model for irrigation with rapidly varied inflow discharges. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering* 13(2): 175-181.
12. Mazarei, R., A. S. Mohammadi, A. A. Naseri, H. Ebrahimian and Z. Izadpanah. 2020. Optimization of furrow irrigation performance of sugarcane fields based on inflow and geometric parameters using WinSRFR in Southwest of Iran. *Agricultural Water Management* 228: 105899.
13. Naderi, M., M. Shayannejad, B. Haghghati, S. Karimi and S. Heydari. 2017. Economic optimization of design parameters of furrow irrigation under deficit irrigation for corn in Shahrekord region. *Journal of Water and Soil Science* 21(3): 181-192. (In Farsi).
14. Ranjbar, A., A. Rahimikhoob, H. Ebrahimian and M. Varavipour. 2019. Simulation of nitrogen uptake and distribution under furrows and ridges during the maize growth period using HYDRUS-2D. *Irrigation Science* 37(4): 495-509.
15. Sarker, K. K., A. Hossain, J. Timsina, S. K. Biswas, B. C. Kundu, A. Barman, K. F. I. Murad and F. Akter. 2019. Yield and quality of potato tuber and its water productivity are influenced by alternate furrow irrigation in a raised bed system. *Agricultural Water Management* 224: 105750.
16. Smith, R. J. and M. J. Uddin. 2020. Selection of flow rate and irrigation duration for high performance bay irrigation. *Agricultural Water Management* 228: 105850.
17. Valiantzas, J. D. 2001a. Optimal furrow design. I: Time of advance equation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 127(4): 201-208.
18. Valiantzas, J. D. 2001b. Optimal furrow design. II: Explicit calculation of design variables. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 127(4): 209-215.
19. Walker, W. R. and G. V. Skogerboe. 1987. Surface Irrigation. Theory and Practice. Prentice-Hall.
20. Zhang, K., M. Bai, Y. Li, S. Zhang and D. Xu. 2020. A non-uniform broadcast fertilization method and its performance analysis under basin irrigation. *Water* 12(1): 292.
21. Zhang, Q. and Li, H. 2007. MOEA/D: A multiobjective evolutionary algorithm based on decomposition. *IEEE Transaction on Evolutionary Computation* 11(6): 712-731.

Development of Hydraulic-Economic Simulation-Optimization Model for the Design of Basin Irrigation

M. Akbari^{1*}

(Received: August 10-2020 ; Accepted: November 12-2020)

Abstract

The objective of this research was the development of a hydraulic-economic simulation-optimization model for the design of basin irrigation. This model performed hydraulic simulation (design of basin irrigation), using Volume Balance model, economic simulation through calculating sum of four seasonal costs and optimization using NSGAI multi-objective meta-heuristic algorithm. For programming, MATLAB programming software was applied. The optimizations of functional, multi-dimensional, static, constraint, continuous, multi-objective and meta-heuristic were applied for the optimization of the objective functions. Decision variables selected from simulation inputs were calculated in such a way that the hydraulic objective function (minimizing linear combination of seven performance indicators) and economic objective function (total seasonal cost based on sum of water cost, labor cost, basin preparing cost and channel drilling cost) were minimized. Data of one the experimental field was used for the purpose of simulation. After initial simulation, optimization of the experimental field was done using NSGAI multi-objective meta-heuristic algorithm with tuned parameters. Optimization using the suggested model showed the decrease (improvement) of objective functions rather than initial simulation performance. As a result, the suggested model could be regarded as a specialized tool for basin irrigation, showing a good performance, despite its simplicity.

Keywords: Simulation-optimization model, Basin irrigation, Volume balance model, NSGAI algorithm

1. Department of Water Sciences and Engineering, Arak University, Arak, Iran.

*: Corresponding author, Email: m-akbarii@araku.ac.ir