

معرفی یک مدل ریاضی جدید برای ارزیابی و بهینه سازی عملکرد کanal‌های آبیاری

سید اسدالله محسنی موحد^۱ و محمد جواد منعم^۲

چکیده

عملکرد ضعیف کanal‌های آبیاری و تأثیر آن در کاهش بهره‌وری آب کشاورزی ضرورت ارائه روش‌های مؤثر در بهره‌برداری بهینه از کanal‌های آبیاری را ایجاد نموده است. در این مقاله مدل ریاضی جدیدی معرفی می‌شود که قادر است عملکرد موجود کanal را ارزیابی نموده و براساس نیاز پایین دست دریچه‌های آبگیر، تنظیم بهینه سازه‌های آبگیر و کنترل را بهمنظر نیل به عملکرد بهینه در شرایط و محدودیت‌های واقعی طرح ارائه نماید. در این مدل تابع هدف به صورت ترکیبی خطی از شاخص‌های راندمان، کفایت، عدالت و پایداری در تحويل آب در نظر گرفته شده است. رابطه تابع هدف و مقادیر تنظیم سازه‌ها رابطه غیر صریحی است که از طریق شبیه سازی هیدرودینامیک میسر بوده و برای بهینه سازی آن با استفاده از روش‌های بهینه سازی عددی سود جست. در این مدل از روش بهینه سازی انتقال آب آبیاری (Simulated Annealing)SA که یک روش عددی با ساختار تصادفی هوشمند است در ترکیب با مدل هیدرودینامیک شبیه سازی سیستم انتقال آب آبیاری (Irrigation Conveyance System Simulation) ICSS استفاده شده است. قابلیت انعطاف در کوچک گرفتن طول گام‌های تصادفی در الگوریتم SA مانع از بروز هرگونه ناپایداری و ناهمگرایی در ترکیب با مدل هیدرودینامیک است. علاوه بر آن توانایی SA در خروج از بهینه‌های محلی و همگرایی به سوی بهینه سراسری از جنبه نظری و در کاربردهای عملی به اثبات رسیده است. هم‌چنین در مدل توسعه یافته ICSS برای بهینه سازی تحويل (ICSS-DOM) (ICSS-Delivery Optimization Model) تمهدیات لازم برای تحلیل حساسیت ضرایب وزنی شاخص‌ها در تابع هدف نیز در نظر گرفته شده است. بهمنظر آزمون و ارزیابی مدل تهیه شده از داده‌های واقعی یک کanal توزیع کننده از شبکه آبیاری دز استفاده شده و برای اعتبار سنجی نتایج مدل، علاوه بر مقایسه با وضع موجود از روش‌های ریاضی نیز استفاده به عمل آمده است. نتایج حاصل حاکی از آن است که مدل مورد نظر قادر است پاسخ‌های معتبری را با صحت و دقیقی در زمان نسبتاً کوتاهی ارائه نماید. این مدل می‌تواند به عنوان ابزاری کارآمد و سودمند برای ارزیابی و بهینه سازی عملکرد کanal‌های آبیاری مورد استفاده قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: ارزیابی و بهینه سازی عملکرد کanal‌های آبیاری، روش بهینه سازی SA، ICSS-DOM

مقدمه

و توزیع نامناسب آب به کanal‌ها و انشعابات و به تبع آن توزیع نامناسب آب در سطح اراضی می‌باشد، به‌طوری‌که در یک کanal

یکی از عواقب بهره‌برداری ضعیف در شبکه‌های آبیاری، تحويل

۱. استادیار آبیاری، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان

۲. استادیار آبیاری، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

منعم^(۹) در سال ۱۹۹۶ با به کارگیری مدل شبیه سازی هیدرودینامیک ICSS که در سال ۱۹۹۰ توسعه نیاز واقعی آن مطابقت نداشته و در بعضی به مقدار قابل توجهی از آن بیشتر و در بعضی نیز کمتر است. این عدم تناسب و بی عدالتی در تحويل و توزیع آب نه تنها خسارات کاهش محصول و نارضایتی زارعین را که کمتر از نیاز خود دریافت کرده اند در بردارد بلکه برای مزارعی که آب بیش از حد نیاز اعلام شده دریافت کرده اند نیز ممکن است موجب کاهش محصول در اثر آبیاری بیش از حد و یا افزایش هزینه های کارگری به منظور مهار آب اضافی پیش بینی نشده گردد. تحويل و توزیع نامناسب آب علاوه بر مشکلات فوق نهایتاً موجب افزایش تلفات آب در سطح شبکه و خسارات ناشی از آن نظری ماندابی شدن اراضی پایین دست و در مجموع سبب کاهش بهره وری آب کشاورزی خواهد شد. پس می توان گفت یکی از اساسی ترین راه کارها برای ارتقای بهره وری آب کشاورزی، تعیین روش های بهره برداری بهینه در شبکه های انتقال و توزیع می باشد. به طوری که در یک دوره تحويل آب، شاخص های مهمی نظری کفايت تحويل، راندمان تحويل و عدالت در تحويل، هم زمان برای کلیه آبگیرهای کanal حتی الامکان ارتقا یابند. بنابراین برای تحويل و توزیع بهینه آب در کanal های آبیاری می توان ترکیب مناسبی از شاخص های کمی را در یک تابع هدف در مقایسه با سطح ایده آلان و با رعایت قیدها و محدودیت ها (شرایط واقعی) بهینه کرده و راه کارهای بهبود را استخراج نمود. در این فرایند رابطه شاخص ها با متغیرهای هیدرولیکی کanal به رژیم و معادلات هیدرولیکی حاکم بر پدیده جریان در طول زمان و مکان بستگی دارد و نحوه این ارتباط باید از طریق یک مدل شبیه سازی هیدرودینامیک صورت گیرد. از طرفی ترکیب شاخص ها در تابع هدف، تابعی پیچیده، چند متغیره و غیر صریح را به وجود می آورد که بکارگیری روش های کلاسیک بهینه سازی را دشوار نموده است. با توسعه روش های بهینه سازی عددی و مدل های شبیه سازی هیدرودینامیک امکانات بیشتری فراهم شده لیکن هنوز کارهای محدودی در این زمینه صورت گرفته است.

مواد و روش ها

مبانی تئوری مدل

در مدل مورد نظر چهار معیار کفايت، راندمان، عدالت و پایداری در تحويل مورد استفاده قرار گرفته اند. هدف آن است که در یک دوره تحويل بر حسب نیاز پایین دست هر یک از آبگیرهای کanal، چهار معیار فوق در ترکیب مناسبی در یک تابع هدف به طور هم زمان و با توجه به شرایط واقعی بهینه شوند. راه کار رسیدن به این هدف، تنظیم بهینه دریچه های آبگیر و سازه های کنترل است که در فرایند بهینه سازی تعیین می شود. در بین شاخص های کمی ارائه شده برای معیارهای فوق مجموعه شاخص های ارائه شده توسط مولدن و گیتس^(۸) به

هستند که بستگی به اهمیت نسبی شاخص‌ها داشته و طریقه تعیین آنها متعاقباً بیان خواهد شد. متغیرهای تصمیم‌گیری در این مسئله بهینه سازی عبارت‌اند از میزان تنظیم دریچه‌های آبگیر و سازه‌های کنترل. قیدها و محدودیت‌های این مسئله نیز که بستگی به خصوصیات فیزیکی و هیدرولیکی کانال و سازه‌ها و شرایط بهره برداری دارد با روابط زیر تعریف می‌شود:

حداکثر تعیین شده برای هر سازه \leq میزان تنظیم هر سازه \rangle .

[۶]

حداکثر عمق مجاز آب در هر بازه از کanal \leq عمق آب در هر بازه از کanal

[۷]

ثابت‌های این مسئله عبارت‌اند از تعداد سازه‌های آبگیر و کنترل کanal، طول دوره بهره برداری (پریود تحویل)، طول گام زمانی محاسبات هیدرولیکی، دبی مورد نیاز هر دریچه آبگیر و دبی ورودی به کanal.

حال با مراجعه به رابطه ۵ ملاحظه می‌شود که رابطه بین تابع هدف (که حداقل آن مورد نظر است) با متغیرهای تصمیم‌گیری (میزان تنظیم سازه‌ها) یک رابطه غیر صریح است که از طریق شبیه سازی هیدرودینامیک امکان پذیر می‌باشد. به علاوه بهینه سازی چنین تابع غیر صریحی با روش‌های کلاسیک بهینه سازی دشوار و گاهی غیر ممکن است و باید از روش‌های عددی بهینه سازی استفاده کرد. در مدل ارائه شده از روش بهینه سازی SA در ترکیب با مدل شبیه سازی هیدرودینامیک ICSS استفاده به عمل آمده است.

روش تعیین ضرایب وزنی C_i

مقادیر C_i ضرایب وزنی جملات تابع هدف، بستگی به اهمیت نسبی شاخص‌ها داشته و تأثیر آن در مقدار بهینه شاخص‌های عملکرد کاملاً بستگی به شکل تابع هدف و فضای امکان‌پذیر حاصل از قیدها و محدودیت‌های مسئله موردنظر دارد به طوری که ممکن است مقادیر مختلف C_i هیچ‌گونه تأثیری در مقدار بهینه نداشته و یا این‌که افزایش آن منجر به بهبود شاخص مربوطه گردد که البته در حالت اخیر به علت محدود بودن

لحاظ بی بعد بودن و سادگی اندازه‌گیری آنها مناسب ترین شاخص‌ها تشخیص داده شده است (۳) که به شرح ذیر در مدل مورد نظر به کار رفته‌اند:

$$\text{MPA} = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (\text{PA})$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{if : } QD < QR \\ \text{PA} = \frac{QD}{QR} \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{if : } QR < QD \\ \text{PA} = 1 \end{array} \right. \quad [۱]$$

$$\text{MPF} = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \frac{1}{N} (\text{PF})$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{if : } QD > QR \\ \text{PF} = \frac{QR}{QD} \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{if : } QD < QR \\ \text{PF} = 1 \end{array} \right. \quad [۲]$$

$$\text{MPE} = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \text{CV}_N \left(\frac{QD}{QR} \right)$$

[۳]

$$\text{MPD} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \text{CV}_T \left(\frac{QD}{QR} \right)$$

[۴]

در این روابط MPE، MPF، MPA و MPD به ترتیب عبارت‌اند از متوسط کفایت، راندمان، عدالت و پایداری در تحویل، در طول دوره بهره برداری می‌باشند. QR دبی مورد تقاضای هر دریچه، QD دبی واقعی تحویلی به هر دریچه، N تعداد دریچه‌های آبگیر و T تعداد گام‌های زمانی مناسب در یک پریود تحویل است و از رابطه $t_{\text{dur}} / \Delta t = t_{\text{dur}}$ محاسبه می‌شود. Δt و t_{dur} به ترتیب طول دوره بهره برداری و طول گام زمانی محاسبات هیدرولیکی بر حسب ساعت است. $\text{CV}_T \left(\frac{QD}{QR} \right)$ و ضریب تغییرات مکانی نسبت $\frac{QD}{QR}$

از آنجایی که مقدار ایدآل شاخص‌های کفایت و راندمان تحویل ۱ و مقدار ایدآل شاخص‌های عدالت و پایداری تحویل صفر است لذا تابع هدفی که مقدار کمینه آن مقدار بهینه شاخص‌های فوق را ارائه می‌دهد به صورت ترکیب خطی زیر است:

$$\text{FF} = C_1(1 - \text{MPA}) + C_2(1 - \text{MPF}) + C_3 \text{MPE} + C_4 \text{MPD}$$

[۵]

مقادیر C_i در رابطه فوق ضرایب وزنی جملات تابع هدف

باشد (مثلاً شاخص کفایت در تحویل مازاد بر نیاز)،^{۷۱} مربوط به آن صفر شده و لذا شاخص مزبور بدون این که از فرایند بهینه‌سازی حذف شود با ضریب وزنی ۱ وارد می‌شود. برای اطلاعات بیشتر می‌توان به منبع (۳) مراجعه کرد.

معرفی اجمالی ICSS-DOM

در این مدل که به زبان فرترن ۷۷ نوشته شده الگوریتم SA به صورت یک حلقه داخلی در ساختار اصلی مدل ICSS قرار گرفته و علاوه بر آن، برنامه‌های فرعی متعددی برای روند اجرای SA در شبیه‌سازی هیدرودینامیک به مجموعه زیر برنامه‌های ICSS اضافه شده است. لازم به ذکر است که مدل ICSS به منظور شبیه سازی هیدرودینامیک و بهره‌برداری از کانال‌های انتقال و توزیع آب آبیاری طراحی شده است و قادر است انواع کانال‌های آبیاری را با طیف وسیعی از سازه‌های مربوطه و تغییرات جریانات ورودی و خروجی شبیه سازی کند. از ویژگی‌های مهم این مدل ساختار مناسب آن جهت افزایش برنامه‌های فرعی به منظور ارتقاء قابلیت‌های مدل می‌باشد. برای اطلاعات بیشتر می‌توان به منبع (۳ و ۷) مراجعه کرد.

روش بهینه سازی SA نیز که یک روش جستجوی تصادفی هوشمند و پیشرفته است اولین بار در سال ۱۹۸۳ توسط کرک پاتریک و همکاران^(۵) بر اساس تشابه با فرایند فیزیکی آنلینگ (Annealing) طراحی شده و تابه امروز الگوریتم‌های پیشرفته‌تری از آن توسعه یافته است. آنلینگ یک فرایند فیزیکی در صنعت است که در آن جسم جامد ابتدا تا حد زیادی گرم می‌شود تا اتم‌های آن بتوانند آزادانه و به طور تصادفی در کنار هم قرار گیرند. سپس دما به تدریج و مرحله به مرحله کاهش داده می‌شود، در هر مرحله کاهش دما که همراه با کاهش انرژی جسم است جایه‌جایی اتم‌ها به طور تصادفی آنقدر صورت می‌گیرد تا جسم به حالت تعادل دمائی برسد. در این مرحله است که مجدداً دما کاهش داده می‌شود و این روند هم‌چنان ادامه می‌یابد تا سرانجام جسم به حداقل انرژی خود و به حالت

فضای امکان‌پذیر این تأثیر نیز محدود است (۱). در هر حال با فرض امکان این تأثیر، منطقی است که بایستی برای شاخصی که اهمیت بیشتری نسبت به بقیه دارد وزن بیشتری قائل شد. اما چون الگوی استانداردی برای تعیین این وزن‌ها ارائه نشده عمولاً با قضاوت کارشناسی تعیین می‌شوند. این طریقه وزن‌دهی به نتایج متفاوت و بعضاً دور از واقعیت منجر می‌شود.

در مدل مورد نظر این ضرایب بر مبنای یک الگوی ابتکاری و مستقل از قضاوت کارشناسی و توأم با تحلیل حساسیت پارامتری تعیین می‌شوند. توصیف روش و مبانی استدلالی آن خود مستلزم مقاله دیگری است. لیکن به اختصار می‌توان گفت که در این روش وزن هر یک از جملات تابع هدف مناسب با میزان دوری شاخص مربوطه از عملکرد ایدآل آن قرار داده می‌شود تا در فرایند بهینه سازی همه شاخص‌ها به طور همزمان و به نسبت فاصله‌شان از سطح عملکرد ایدآل، حتی الامکان به سمت آن سوق داده شوند. مثلاً اگر در ارزیابی وضع موجود برای شاخص راندمان که مقدار ایدآل آن ۱ است رقم ۰/۶ به دست آمد، این شاخص به اندازه ۰/۴ از مقدار ایدآل خود دور است و هر چه این تفاوت بیشتر باشد بایستی در فرایند بهینه‌سازی برای این شاخص مناسب با این تفاوت وزن یا اهمیت بیشتری قائل شد. بنابراین اگر ۷۱ تفاوت سطح عملکرد هر شاخص با مقدار ایدآل باشد می‌توان مقادیر ۷۲ را به یک نسبت در همه بزرگ کرده و تأثیر این تغییرات را بررسی نمود. بنابراین شکل پارامتری مناسب برای ضرایب وزنی^{۷۳} که در برگیرنده موارد فوق باشد به صورت زیر خواهد بود:

$$C_i = 1 + \theta \gamma_i \quad [8]$$

که در آن γ_i در فرایند ارزیابی وضع موجود تعیین می‌شود و θ نیز پارامتری است که در فرایند بهینه‌سازی با اجرای متسعد، مقادیر مختلف صحیح بزرگ‌تر و مساوی یک به آن اختصاص داده شده و تأثیر آن در جواب‌های بهینه بررسی می‌شود (تحلیل حساسیت) تا احیاناً جواب‌های بهتری اگر امکان پذیر باشند، جستجو شوند. مقدار ۱ در رابطه ۸ برای آن است که اگر شاخصی در وضع موجود به مقدار ایدآل رسیده

جدول ۱. نمایش ساده‌ای از الگوریتم SA در کمینه‌سازی (۱۰)

گام‌های ترتیبی در اجرای الگوریتم

گام ۱- تولید یک جواب اولیه S به روش تصادفی در فضای امکان‌پذیر با توجه به قیودات مسئله و قراردادن: $E=FF(S)$ و $S_b=S$.

گام ۲- انتخاب یک مقدار برای درجه حرارت اولیه، $T_1 > 0$ و طول دوره: $L > 0$ (طول دوره بایستی یک عدد صحیح باشد).

- شماره دوره را: $k=1$ قرار دهید.

گام ۳- عملیات زیر را L بار تکرار کنید. (طول دوره نامیده شده است).

(۱)- تولید جواب \dot{S} در فضای امکان‌پذیر و در همسایگی S به طور تصادفی و با یک ساختار همسایگی مناسب با طبیعت مسئله (فضای امکان‌پذیر با قیودات مسئله مشخص می‌شود).

(۲)- محاسبه تغییر در مقدار تابع هدف: $D = FF(\dot{S}) - FF(S)$

(۳)- اگر $D \leq 0$ در این صورت S را مساوی \dot{S} قرار دهید (حرکت نزولی) یا انتقال‌های رو به پایین

اگر $D > 0$ در این صورت با احتمال پذیرش $(1 - e^{-D/T_k}) > \text{Random}(0 \sim 1)$ جواب S را مساوی \dot{S} در نظر بگیرید. (حرکت صعودی) یا انتقال‌های رو به بالا.

اگر $D < 0$ باشد قرار دهید: $\dot{S} = S_b$ و $E=FF(\dot{S})$ (ذخیره داشتن جواب بهتر).

گام ۴- اگر شرط توقف برقرار شده است متوقف شوید. در غیر این صورت دما را کاهش دهید:

$T_{(k+1)} = f(T_k)$ و قرار دهید: $k=k+1$ و به گام ۳ بروید.

سازه‌ها بایستی در محدوده مجاز تعیین شده (قیود بهینه‌سازی) که در روابط ۶ و ۷ تعریف شده‌اند انجام گیرد. سپس تغییر در مقدار تابع هدف $D = FF(S') - FF(S)$ محاسبه می‌شود. اگر $D < 0$ باشد گزینه جدید پذیرفته شده (حرکت نزولی) و در غیر این صورت گزینه جدید با یک احتمال مشخص پذیرفته می‌شود (حرکت رو به بالا). برای این منظور مطابق با منطق الگوریتم SA یک عدد تصادفی بین صفر و یک تولید شده از $R \in [0, 1]$ و اگر $R < e^{-D/T}$ باشد این گزینه نیز پذیرفته می‌شود در غیر این صورت گزینه جدید رد می‌شود. T یک پارامتر کنترل است که معادل با دما در فرایند آنیلینگ شبیه سازی شده و در طول فرایند مرحله به مرحله کاهش داده می‌شود. در هر مرحله کاهش دما سیکل فوق L بار تکرار می‌شود. L نیز یک پارامتر کنترل است که طول دوره نامیده می‌شود. لازم به ذکر است که پارامترهای کنترلی SA از قبیل

کریستال کامل برسد (۴). در شبیه‌سازی مسائل بهینه‌سازی با فرایند فوق، تابع هدفی که کمینه می‌شود حکم انرژی جسم را داشته و جواب‌های تصادفی تولید شده معادل حالت‌های مختلف قرار گرفتن اتم‌ها در کنار هم در هر دمای تعادل و نهایتاً رسیدن به جواب بهینه (حداقل تابع هدف) معادل رسیدن به حداقل سطح انرژی جسم و تشکیل کریستال کامل است. پرداختن به جزئیات منطق الگوریتم SA و مبانی تئوری آن از حوصله این مقاله خارج است. لیکن به منظور آشنایی بیشتر، در جدول ۱ الگوریتم ساده‌ای از SA نمایش داده شده است که برای هر نوع مسئله بهینه‌سازی قابل بسط و تطبیق است.

به طور اجمال استفاده از الگوریتم SA در تطبیق با مسئله مورد نظر ما به این ترتیب است که با شروع از یک جواب اولیه تصادفی برای متغیرهای تصمیم‌گیری (میزان تنظیم سازه‌های آبگیر و کنترل)، جواب جدید (S') در مجاورت جواب قبلی (S) با استفاده از یک ساختار همسایگی مناسب به طور تصادفی تولید می‌شود. تولید تصادفی میزان تنظیم

شبکه آبیاری دز استفاده شده است. کanal مزبور که از انشعبابات فرعی کanal اصلی دزفول محسوب می‌شود یک کanal بتنسی با قطع ذوزنقه‌ای و ظرفیت حداکثر معادل $2/47$ متر مکعب بر ثانیه است. این کanal از طریق هفت آبگیر کشوئی در مسیری به طول $2/6$ کیلومتر آب کشاورزی اراضی پایین دست آبگیرها را تأمین می‌کند. تنظیم تراز سطح آب در کanal برای هر زوج آبگیر توسط یک تنظیم کننده کشوئی صورت می‌گیرد. کلیه آبگیرها و تنظیم کننده‌ها به صورت دستی بهره برداری می‌شوند. بعد از هر آبگیر یک پارشال فلوم برای اندازه‌گیری دبی تحویلی به مزارع تعییه شده است. در هر پریود تحویل که 24 ساعت یکبار و ساعت 8 صبح صورت می‌گیرد، اپراتور میزان بازدشتگی دریچه‌ها را بر مبنای تجربه و بر حسب نیاز پایین دست آنها که تنظیم می‌کند. آمار تحویل (دبی درخواستی، دبی تحویلی و ...) به طور روزانه ثبت و نگهداری می‌شود. برای شبیه سازی شرایط بهره برداری ابتدا با استفاده از اطلاعات موجود و داده‌های حاصل از اندازه‌گیری‌های مستقیم جهت کالیبراسیون دریچه‌ها و ضریب مانینگ، مدل مورد نظر شبیه سازی شد. سپس برای مطالعه، یک دوره تحویل ده روزه از بین آمار ثبت شده برنامه تحویل آب دوره قبل که در جدول 2 نشان داده شده است انتخاب گردید. لازم به ذکر است که بر مبنای روش پیشنهادی، اهمیت نسبی هر شاخص نسبت مستقیمی از پتانسیل بهبود آرمانی، یا اختلاف عملکرد ایده‌آل شاخص (معیار استاندارد) با عملکرد متوسط موجود آن در نظر گرفته می‌شود. بنابراین باقیتی میانگین عملکرد موجود شاخص‌ها با استفاده از آمار ثبت شده دوره‌های قبل محاسبه شود در این رابطه از آمار کوتاه‌مدت دوره قبل (نه دوره‌های خیلی گذشته) استفاده شده است، چون عملکرد فعلی کanal ممکن است تحت تأثیر عوامل مختلفی که اخیراً اتفاق افتاده (نظیر بروز آثار فرسودگی، خرابی دریچه‌ها و غیره) قرار گرفته باشد. بنابراین استفاده از آمار دوره‌های خیلی قبل که احتمالاً شرایط دیگری حاکم بوده ممکن است دقت شبیه سازی‌ها را تحت الشاعع قرار دهد. از

L ، مقدار اولیه T ، مقدار نهائی T و ضریب کاهش α در طول فرایند بهینه سازی بایستی مطابق با روش‌های موجود قبل توسط کاربر تعیین شده باشند (۳). با توجه به تابع احتمال $\exp(-\frac{D}{T})$ ، با کاهش مرحله به مرحله T احتمال پذیرش جواب‌های بد (حرکت‌های رو به بالا) کاهش می‌باید. در حرکت‌های رو به بالا این توانایی برای SA به وجود می‌آید که برای جستجوی کمینه سراسری از دام نقاط کمینه محلی خارج شود. این فرایند آن قدر ادامه می‌یابد تا شرط توقف که رسیدن به مقدار نهایی پارامتر کنترلی T است فراهم شود. از مزایای روش SA قابلیت خروج از دام نقاط کمینه محلی و حرکت به سوی بهینه سراسری است. همگرانی قابل توجه آن در رسیدن به بهینه سراسری هم از نظر تئوری و هم در کاربردهای عملی به اثبات رسیده است (۴، ۵ و ۶). با توجه به الگوریتم ساده آن برای طیف وسیعی از مسائل بهینه سازی با تابع هدف پیچیده مناسب است. SA نسبت به پارامترهایش حساس است و بایستی بهترین ترکیب آنها مطابق با روش‌های توصیه شده در منبع (۳) تعیین و سپس در اجرای نهایی مورد استفاده قرار گیرد. در مدل مورد نظر بخش عمده اطلاعات لازم برای شبیه سازی کردن کanal مورد نظر ابتدا در سه فایل اطلاعات ورودی تنظیم می‌شوند. بخش دیگری از اطلاعات مربوط به تغییر شرایط بهره برداری و داده‌های لازم برای بهینه سازی به روش SA به صورت سوال و جواب به مدل داده می‌شود. پس از اجرای مدل مقادیر تنظیم بهینه سازه‌های آبگیر و کنترل به عنوان راه کار خروجی با مقادیر دبی تحویلی، دبی مورد نیاز و شاخص‌های عملکرد در وضعیت بهینه در فایل‌های خروجی گزارش می‌شود. ضمناً مدل مزبور قادر است متوسط عملکرد موجود را نیز به منظور مقایسه با عملکرد ایده‌آل و عملکرد بهینه محاسبه کرده و نتایج را در فایل جداگانه‌ای گزارش نماید.

آزمون کارایی مدل در یک شرایط واقعی
به منظور آزمون قابلیت ICSS-DOM از داده‌های کanal E1R1 در

جدول ۲. برنامه تحویل آب در وضع موجود برای یک تقسیم ده روزه منتخب از آثار ثبت شده کانال EIRI (رقم دنی بر حسب لیتر بر ثانیه می باشد).

نام درجه آبگیر	تاریخ	EIRI-1		EIRI-2		EIRI-3		EIRI-4		EIRI-5		EIRI-6		EIRI-7		
		تحویل	درخواست													
۷۹/۸/۱۶	۳۶	۴۰/۵	۴۲	۴۰/۵	۲۷	۴۰	۳۲	۴۰	۴۲	۴۰	۴۰/۵	۴۰	۲۲	۲۰	۲۷	۲۰
۷۹/۸/۱۷	۳۶	۲۰	۴۰	۴۰/۵	۲۷	۳۰	۳۱	۲۸	۴۲	۴۰/۵	۴۰/۵	۲۲	۲۰	۲۷	۲۰	۲۷
۷۹/۸/۱۸	۳۷	۲۰	۴۰	۴۰/۵	۲۷	۳۰	۳۱	۳۰	۳۰	۴۰	۴۰	۲۲	۲۰	۲۷	۲۰	۲۷
۷۹/۸/۱۹	۳۷	۱۸/۲	۴۰	۳۶/۶	۲۹	۳۰	۳۱	۳۰	۳۰	۴۰	۴۰	۲۲	۲۰	۲۷	۲۰	۲۷
۷۹/۸/۲۰	۳۷	۱۸/۲	۴۰	۳۶/۷	۲۹	۳۰	۳۱	۳۰	۳۰	۴۰	۴۰	۲۲	۲۰	۲۷	۲۰	۲۷
۷۹/۸/۲۱	۳۷	۱۸/۲	۴۰	۴۰	۲۹	۳۰	۳۱	۳۰	۳۰	۴۰	۴۰	۲۲	۲۰	۲۷	۲۰	۲۷
۷۹/۸/۲۲	۳۷	۱۸/۲	۴۰	۴۰	۲۹	۳۰	۳۱	۳۰	۳۰	۴۰	۴۰	۲۲	۲۰	۲۷	۲۰	۲۷
۷۹/۸/۲۳	۱۴	۱۸/۲	۲۶	۴۰	۱۴	۳۰	۲۲	۳۰	۳۰	۴۰	۴۰	۲۲	۲۰	۱۴	۲۰	۱۴
۷۹/۸/۲۴	۱۴	۱۸/۲	۲۶	۴۰	۱۴	۳۰	۲۲	۳۰	۳۰	۴۰	۴۰	۲۲	۲۰	۱۴	۲۰	۱۴
۷۹/۸/۲۵	۱۴	۱۸/۲	۲۶	۴۰	۱۴	۳۰	۲۲	۳۰	۴۰	۴۰	۴۰	۲۰	۱۴	۲۰	۱۴	۱۴

مشکلات بر طرف شده است. در گزینه اول نتایج حاصل از بهینه سازی در جدول ۳ نشان داده شده است. در این جدول مقادیر هر یک از شاخص‌ها و تابع هدف به تفکیک برای وضع موجود و حالت بهینه در مقایسه با مقدار ایدآل آنها به صورت روزانه و متوسط ده روزه آورده شده است. در این جدول تفاوت بین مقادیر بهینه و مقادیر موجود تابع هدف و شاخص‌ها به عنوان میزان بهبود و نسبت میزان بهبود به مقدار وضع موجود تحت عنوان درصد بهبود ارائه شده است. ملاحظه می‌شود که نه تنها تابع هدف بلکه تک تک شاخص‌ها در حالت بهینه نسبت به وضع موجود در تمامی روزها بهبود یافته و به مقدار ایدآل خود نزدیک‌تر شده‌اند اما میزان بهبود شاخص‌های راندمان و کفايت تحويل چشمگیر ۴/۴ نبوده و متوسط ده روزه آنها بهتر ترتیب به میزان ۳/۵ و ۴/۴ درصد بهبود یافته‌اند. این امر به لحاظ بالا بودن سطح این شاخص‌ها در وضع موجود است که خود ناشی از کمبود تحويل در برخی روزها و یا تحويل مازاد بر نیاز در برخی دیگر از روزهای است که در جدول ۲ بهبود مشهود است. در عوض متوسط ده روزه شاخص‌های عدالت و پایداری در تحويل بهتر ترتیب به میزان ۵/۳ و ۶/۵ درصد بهبود نشان داده است که بسیار قابل توجه می‌باشد. در شرایطی که دبی ورودی به کanal کمتر و یا بیشتر از مجموع دبی مورد نیاز آبگیرها باشد شاخص‌های پایداری و بهویژه عدالت اهمیت بیشتری پیدا می‌کنند. تابع هدف نیز که هم‌زمان بیانگر مجموعه اهداف مورد نظر است به میزان قابل ملاحظه‌ای بین ۳۶/۶ الی ۷۴/۱ درصد و به طور متوسط ۵۰ درصد بهبود نشان داده است.

در نمودار شکل ۱ مقدار تابع هدف در حالت بهینه که حداقل آن مورد نظر است با وضع موجود مقایسه شده است. در گزینه دوم مقادیر ضرایب وزنی جملات تابع هدف مطابق با روش پیشنهادی به شکل پارامتری تعیین و سپس در بهینه‌سازی، تحلیل حساسیت تغییرات آنها و تأثیر شان در عملکرد بهینه مورد بررسی قرار گرفته است. از آنجا که در برخی روزها

طرف دیگر گرچه دوره انتخابی اخیر از نظر آماری به عنوان یک جامعه واقعی کوچک در نظر گرفته می‌شود لیکن ممکن است طول دوره انتخابی (تعداد روزها) برای محاسبه میانگین شاخص‌ها کافی نباشد. بنابراین لازم است بر مبنای روش‌های آماری توصیه شده برای جوامع کوچک (۲) ضریب اطمینان دوره آماری انتخابی برای محاسبه میانگین بررسی شود بر همین اساس در این تحقیق برای دوره ۴ روزه ضریب اطمینان ۹۰٪ و برای دوره ۱۰ روزه ضریب اطمینان ۹۵٪ به دست آمده که به نظر می‌رسد از دقت کافی برخوردار است.

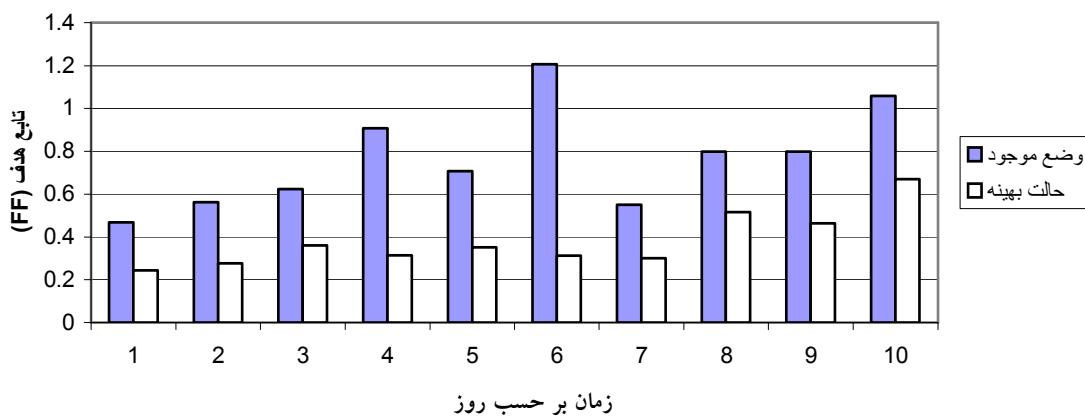
در مرحله بعد مناسب ترین پارامترهای SA در اجراهای اولیه تعیین و سپس محاسبات مربوط به ارزیابی عملکرد موجود و بهینه سازی بهره برداری توسط مدل و در سه گزینه مختلف انجام گرفته و نتایج با یکدیگر مقایسه گردیده‌اند. در گزینه اول دبی ورودی به کanal عیناً مساوی دبی ورودی در شرایط موجود قرار داده شد تا بهتر بتوان تأثیر بهینه سازی را در مقایسه با عملکرد موجود به نمایش گذاشت. در این گزینه ضرایب وزنی در تابع هدف جهت سهولت همه یکسان و معادل ۱ در نظر گرفته شده‌اند. در گزینه دوم شرایط بهره برداری عیناً مثل گزینه اول است لیکن ضرایب وزنی در تابع هدف مطابق روش پیشنهادی تعیین شده است و هدف از این گزینه آزمون روش وزن دهی پیشنهادی و میزان تأثیر آن در بهبود عملکرد بوده است. در گزینه سوم فقط سه روز آخر تقویم انتخابی که در آن تحويل مازاد بر نیاز بوده است مد نظر قرار گرفته و دبی ورودی به کanal تا حد دبی مورد نیاز کاهش داده شده و تأثیر تعادل دبی در عملکرد بهینه و جلوگیری از تلفات آب بررسی شده است.

نتایج و بحث

در جدول ۲ ملاحظه می‌شود که در هیچ یک از روزهای تقویم انتخابی دبی تحويلی با دبی مورد نیاز تطبیق نداشته و توزیع دبی ورودی به کanal بین آبگیرها بر حسب نیازشان عادلانه صورت نگرفته و در برخی موارد نیز همراه با تلفات قابل توجهی آب است و چنانکه خواهیم دید در توزیع بهینه این

تاریخ	دانشمنان در تحویل		کفایت در تحویل		عدالت در تحویل		پایداری در تحویل		تابع هدف		هدف	
	مقدار ایدال=۱		مقدار ایدال=۰		مقدار ایدال=۰		مقدار ایدال=۰		مقدار ایدال=۰			
	محبود	بیخوبه	محبود	بیخوبه	محبود	بیخوبه	محبود	بیخوبه	محبود	بیخوبه		
۷۹/۸/۱۴	۰/۹۱	۰/۸۹	۰/۹۷	۰/۹۰	۱/۰۰۰	۰/۱۹	۰/۸۳	۰/۱۴	۰/۶۹	۰/۴۳	۰/۲۲۶	
۷۹/۸/۱۷	۰/۹۹	۱/۰۰	۰/۸۴	۰/۸۵	۰/۸۵	۰/۱۹	۰/۸۱	۰/۲۰	۰/۴۷	۰/۵۵	۰/۲۸۶	
۷۹/۸/۱۸	۰/۹۸	۱/۰۰	۰/۸۵	۰/۸۷	۰/۸۷	۰/۲۱	۰/۱۳۳	۰/۲۵	۰/۸۹	۰/۲۴	۰/۲۶۳	
۷۹/۸/۱۹	۰/۹۵	۱/۰۰	۰/۸۱	۰/۸۹	۰/۳۴	۰/۱۱۵	۰/۳۳	۰/۰۸۷	۰/۹۰۷	۰/۳۱۵	۰/۵۹۲	
۷۹/۸/۲۰	۰/۹۸	۱/۰۰	۰/۸۱	۰/۸۵	۰/۸۵	۰/۲۵	۰/۱۱۵	۰/۲۴	۰/۰۸۲	۰/۰۸	۰/۳۵۷	
۷۹/۸/۲۱	۰/۹۷	۱/۰۰	۰/۷۳	۰/۸۹	۰/۴۹	۰/۱۱۵	۰/۴۱	۰/۰۸۷	۰/۰۹۶	۰/۳۱۲	۰/۸۹۴	
۷۹/۸/۲۲	۰/۹۷	۱/۰۰	۰/۸۶	۰/۹۱	۰/۸۴	۰/۲۴	۰/۱۰۳	۰/۱۵	۰/۱۰۳	۰/۳۰۱	۰/۲۴۹	
۷۹/۸/۲۳	۰/۹۶	۰/۹۹	۱/۰۰	۱/۰۰	۰/۸۵	۰/۱۱۲	۰/۰۹۳	۰/۰۹۳	۰/۷۹۹	۰/۱۶	۰/۲۸۳	
۷۹/۸/۲۴	۰/۹۶	۰/۹۱	۱/۰۰	۱/۰۰	۰/۲۵	۰/۱۰۴	۰/۰۷۲	۰/۰۷۲	۰/۹۹	۰/۲۶۲	۰/۳۴۲	
۷۹/۸/۲۵	۰/۹۹	۰/۹۳	۱/۰۰	۱/۰۰	۰/۳۲	۰/۱۸۳	۰/۱۳۳	۰/۱۱۹	۰/۰۵۸	۰/۹۷۱	۰/۳۸۸	
متوسط ده روز	۰/۸۹۴	۰/۸۹۷	۰/۸۹۷	۰/۸۹۷	۰/۲۷۳	۰/۱۱۴	۰/۲۴۵	۰/۰۸۵	۰/۷۶۸	۰/۳۸۱	۰/۳۸۷	
درصد بهبود متوسط ده روزه	۰/۳٪	۰/۴٪	۰/۴٪	۰/۴٪	۰/۵٪	۰/۵٪	۰/۵٪	۰/۵٪	۰/۵٪	۰/۵٪	۰/۵٪	

جدول ۳. خلاصه تابع بهینه سازی تابع هدف و شاخصهای عملکرد برای ایجاد مدل ریاضی جدید برای ارزیابی و بهینه سازی عملکرد کانالهای آبیاری



شکل ۱. نمودار تغییرات روزانه تابع هدف در وضع موجود و حالت بیینه برای یک دوره ده روزه بر اساس گزینه اول (مقدار ایدآل تابع هدف صفر است).

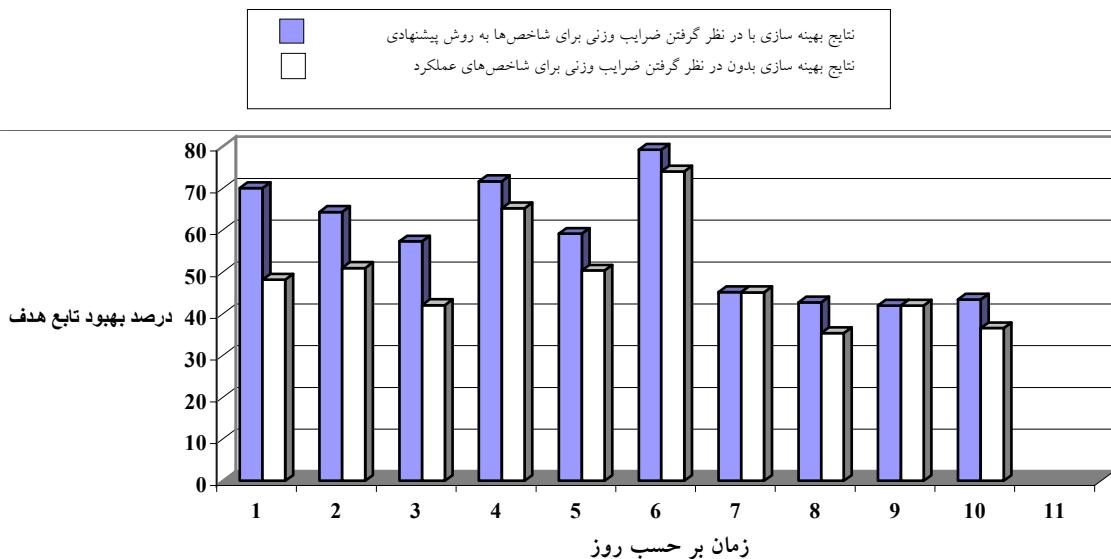
جدول ۴. خلاصه محاسبات اهمیت نسبی شاخص‌ها و ضرایب C_i برای روزهایی که دبی تحویلی به سیستم کمتر از دبی مورد نیاز است.

روزهایی که دبی تحویلی به کانال کمتر از دبی مورد نیاز است	عملکرد موجود شاخص‌ها که با شبیه‌سازی توسط مدل محاسبه شده است				
	پایداری در تحویل	عدالت در تحویل	کفایت در تحویل	راندمان تحویل	عملکرد موجود شاخص
۷۹/۸/۱۷	۰/۹۹	۰/۸۴	۰/۱۹	۰/۲۰	
۷۹/۸/۱۸	۰/۹۸	۰/۸۵	۰/۲۱	۰/۲۵	
۷۹/۸/۱۹	۰/۹۵	۰/۸۱	۰/۳۴	۰/۳۳	
۷۹/۸/۲۰	۰/۹۸	۰/۸۱	۰/۲۵	۰/۲۴	
۷۹/۸/۲۱	۰/۹۷	۰/۸۴	۰/۲۶	۰/۳۱	
۷۹/۸/۲۲	۰/۹۷	۰/۸۶	۰/۲۵	۰/۱۷	
متوسط عملکرد موجود شاخص	۰/۹۷	۰/۸۴	۰/۲۵	۰/۲۵	
عملکرد ایدآل شاخص (معیار استاندارد)	۱	۱	۰	۰	
* پتانسیل بهبود آرمانی*	۰/۰۳	۰/۱۶	۰/۲۵	۰/۲۵	
اهمیت نسبی شاخص	۰/۰۳۰	۰/۱۶۰	۰/۲۵۰	۰/۲۵۰	
C_i ضرایب وزنی جملات تابع هدف	۱+۰/۰۳۰	۱+۰/۱۶۰	۱+۰/۲۵۰	۱+۰/۲۵۰	

*: پتانسیل بهبود آرمانی عبارت است از اختلاف بین متوسط عملکرد موجود شاخص با عملکرد ایدآل آن

تعیین و مورد استفاده قرار گرفته است. جدول ۴ چگونگی محاسبه اهمیت نسبی شاخص‌ها و ضرایب وزنی C_i را برای روزهایی که دبی تحویلی کمتر از دبی مورد نیاز است، نشان می‌دهد. برای سایر روزها که دبی تحویلی مازاد بر نیاز است

تحویل مازاد بر نیاز باعث افزایش شاخص کفایت تحویل شده و در برخی روزها کمبود دبی تحویلی نسبت به دبی مورد نیاز راندمان تحویل را افزایش می‌دهد لذا متوسط عملکرد موجود شاخص‌ها و ضرایب وزنی C_i ترجیحاً برای این روزها جدگانه

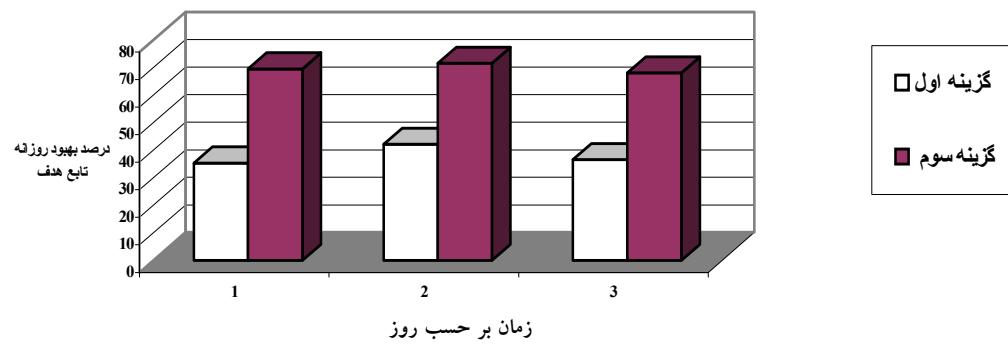


شکل ۲. مقایسه درصد بهبود روزانه تابع هدف در گزینه اول و دوم

نتایج حاکی از آن است که در گزینه سوم عملکرد متوسط سه روزه شاخص‌های راندمان، عدالت و پایداری در تحويل بهترین بهمیزان $52/63$ و $67/67$ درصد بهبود یافته‌اند که نسبت به مقادیر متناظر در گزینه اول ($6/25$ ، $52/60$ و $60/60$ درصد) بهبود قابل ملاحظه‌ای می‌باشد.

در نمودار شکل ۳ نیز درصد بهبود تابع هدف در این سه روز با گزینه اول مقایسه شده است، ملاحظه می‌شود که در گزینه سوم تابع هدف روزانه به میزان $5/69$ ، $5/71$ و $1/68$ درصد بهبود یافته است که نسبت به مقادیر متناظر در گزینه اول ($4/35$ ، $6/36$ ، $1/42$ ، $4/35$ درصد) بهبود نسبتاً زیادی را نزدیک به دو برابر نشان می‌دهد. علاوه بر همه اینها یک محاسبه ساده نشان می‌دهد که به لحاظ تعادل بین دبی مورد نیاز و دبی انحرافی به کanal حجم قابل ملاحظه‌ای آب (50000 متر مکعب) طی سه روز بهره برداری صرفه‌جوئی و از اتلاف آن جلوگیری خواهد شد که مسأله بسیار مهمی در نیل به بهره‌وری آب کشاورزی است. لازم به ذکر است که در شرایط موجود علت تحويل مازاد بر نیاز را به طور کلی می‌توان به دو صورت تفسیر کرد. یا آن‌که اپراتور نتوانسته است سازه ورودی از کanal بالا دست به کanal مورد نظر را بر مبنای تجربه تنظیم کند و یا این‌که از بیم پایین افتادن کفایت تحويل در آبگیرها بر مبنای نیاز اعلام شده توسط

نیز روش محاسبه یکسان بوده و فقط مقادیر C_i برای بعضی شاخص‌ها کمی تفاوت می‌کند. در اینجا جهت اختصار از ذکر جدول مربوط به آن خودداری می‌شود. مقدار بهینه پارامتر θ با تحلیل حساسیت در این مطالعات معادل 10 به دست آمده است به طوری که بیش از آن هیچ‌گونه بهبود بیشتری در مقدار تابع هدف و شاخص‌ها در هیچ‌یک از روزها حاصل نشده است. خلاصه نتایج کلی در این گزینه به صورت نمودار شکل ۲ نشان داده شده است که در آن درصد بهبود روزانه تابع هدف در گزینه اول و دوم با یکدیگر مقایسه شده‌اند. در این نمودار ملاحظه می‌شود که به غیر از روزهای هفتم و نهم که تابع هدف بهبود چشمگیری نیافر است در سایر روزها تابع هدف در گزینه دوم نسبت به گزینه اول بین 7 الی 21 درصد افزایش داشته است که می‌تواند بیانگر تأثیر مثبت در نظر گرفتن ضرایب وزنی به روش پیشنهادی باشد. در گزینه سوم دبی ورودی به کanal در سه روز آخر تقویم انتخابی که تحويل مازاد بر نیاز بوده است تا حد دبی مورد نیاز کاهش داده شده و تأثیر آن روی عملکرد شاخص‌ها و تابع هدف و میزان صرفه‌جوئی در آب بررسی شده است. در این حالت جهت سهولت ضرایب وزنی C_i همه یکسان و معادل 1 قرار داده شده و نتایج با گزینه اول مقایسه شده است. خلاصه این



شکل ۳. مقایسه درصد بهبود روزانه تابع هدف در گزینه‌های اول و سوم برای سه روز آخر تقویم انتخابی

حاکی از آن است که مدل مورد نظر توانسته است جواب‌های معترضی را در زمان نسبتاً کوتاهی ارائه نماید. برای اطلاع از جزئیات روش‌های به کار گرفته شده و نتایج به دست آمده می‌توان به مرجع (۳) مراجعه نمود.

لازم به ذکر است که همیشه نمی‌توان به راحتی از روش‌های ریاضی اعتبار سنجی استفاده نمود چرا که هر چه شکل تابع هدف پیچیده و تعداد شاخص‌های عملکرد و متغیرهای تصمیم‌گیری افزایش یابد استفاده از این روش‌ها مشکل‌تر و حتی گاهی غیرممکن خواهد بود. در حالت اخیر تنها معیار اعتبارسنجی همان مقایسه جواب‌های بهینه با عملکرد موجود حاصل از فرایند ارزیابی است.

نتیجه‌گیری

با توجه به آن‌چه گذشت خلاصه نتایج در این مقاله را می‌توان به صورت زیر عنوان کرد:

۱- از عوامل عمده ضعیف بودن عملکرد کانال‌های آبیاری و کاهش بهره وری آب کشاورزی، تحویل و توزیع ناعادلانه و نامناسب آب بهویژه تحویل آب مازاد بر نیاز به مزارع زیر دست کانال‌های آبیاری است.

۲- یکی از راه‌های مؤثر در بهبود عملکرد کانال‌های آبیاری و ارتقای بهره وری آب کشاورزی، بهینه سازی بهره برداری از کانال‌های آبیاری با توجه به نیازمندی‌ها و شرایط و محدودیت‌های موجود است.

زارعین، دبی بیشتری را به کanal منحرف نموده است. در هر حال بروز چنین شرایطی که طی سالیان متتمادی در بهره برداری از شبکه آبیاری ممکن است به کرات اتفاق افتاد باعث تلفات حجم قابل ملاحظه‌ای از آب و خسارات متعدد ناشی از آن و در یک کلام کاهش بهره وری آب کشاورزی خواهد شد. در اینجا ضرورت اتخاذ روش‌های بهره برداری بهینه قویاً احساس می‌شود که جز با روش‌های علمی و استفاده از روش‌های بهینه سازی مبتنی بر شبیه سازی هیدرودینامیک میسر نمی‌باشد. در این راستا ICSS-DOM ابزار مناسبی است که کارائی آن در عمل موقفيت آمیزه بوده و در کلیه مراحل آزمون به علت امکان کوچک گرفتن طول گام‌های تصادفی هیچ‌گونه ناپایداری و ناهمگرائی در فرایند توان بهینه‌سازی - شبیه سازی مشاهده نشده است. به منظور اعتبار سنجی جواب‌های مدل، علاوه بر مقایسه نتایج با وضع موجود که شرح آن گذشت، از دو روش ریاضی در اعتبار سنجی تحت عنوان روش حد پایین (Asymtote method) و روش مجانب (Low extent method) استفاده به عمل آمده است. در این روش‌ها مقدار بهینه سراسری تابع هدف به طور تئوری و به روش‌های ریاضی که توصیف آنها در این مقاله نمی‌گنجد تخمین زده می‌شود سپس مقدار بهینه تابع هدف که در اجراء‌های واقعی عملاً به دست آمده است با مقدار بهینه سراسری تخمینی مقایسه می‌شود. هر چه درصد اختلاف کمتر باشد حاکی از اعتبار بیشتر جواب‌های حاصله است. نتایج حاصل از کاربرد روش‌های مذبور در این تحقیق

مدیران، کارشناسان و مسئولین بهره‌برداری از شبکه‌های آبیاری قرار گیرد.

سپاسگزاری

از مدیریت محترم شرکت بهره‌داری از شبکه‌های آبیاری ناحیه شمال خوزستان، مسئولان و کارشناسان دفتر فنی و پرسنلی که به ترتیب در فراهم نمودن امکانات برای تهیه اطلاعات مورد نیاز مساعدت لازم را مبذول داشته‌اند تشکر و قدردانی می‌شود.

- بهینه سازی بهره‌برداری از کانال‌های آبیاری به طریق علمی و کمی که منجر به راه کارهای عملی مؤثر گردد جز از طریق بهینه سازی توام با شبیه سازی هیدرودینامیک امکان پذیر نمی‌باشد و مدل‌های ریاضی که بدین منظور تهیه می‌شوند می‌توانند مناسب‌ترین ابزار علمی برای نیل به این اهداف باشند. در این رابطه ICSS-DOM به لحاظ قابلیت، دقیق و کارائی آن ابزار توانا و سودمندی است که می‌تواند مورد استفاده محققین،

منابع مورد استفاده

۱. شهیدی‌پور، س. م. ۱۳۷۳. بهینه‌سازی (تموری و کاربرد). جلد اول، انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد.
۲. عمیدی، ع. ۱۳۷۳. آمار کاربردی (ترجمه). چاپ اول، مرکز نشر دانشگاهی، تهران
۳. محسنی موحد، س. ا. ۱۳۸۱. تهیه مدل ریاضی بهینه‌سازی عملکرد هیدرولیکی کانال‌های آبیاری با استفاده از روش آنلین‌گ شبیه‌سازی شده (SA) و تعیین ارزش نسبی شاخص‌های ارزیابی. رساله دوره دکتری آبیاری، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران.
4. Egles, R.W. 1990. Simulated annealing : A tool for operational research. *Europ. J. Operational Res.* 46: 271-281.
5. Kirkpatrick, S. , C.D Jr. Gelatt and M.P. Vecchi. 1983. Optimization by Simulated annealing. *Sci.* 220: 671-680.
6. Lundy, M. and A. Mees. 1986. Convergence of an annealing algorithm. *Mathemat. Program.* 34: 111-124.
7. Manz, D.H. 1990. Use of the ICSS model for prediction of conveyance system operational characteristics. *Transactions of the fourteenth International Congress on Irrigation and Drainage (ICID)*, Rio de Janeiro, Brazil. 1: 1-18.
8. Molden, D.J. T.K. and Gates. 1990. Performance measures for evaluation of irrigation water delivery systems. *J. Irrig. and Drain. Eng.* 116:804-822.
9. Monem, M.J. 1996. Performance evaluation and optimization of irrigation canal systems using genetic algorithm. Ph.D. Dissertation, Department of Civil Eng., Calgary Univ., Alberta, Canada.
10. Park, M-W. and Y-D. Kim. 1998. A Systematic procedure for setting parameters in simulated annealing algorithms. *J. Comput. Operational Res.* 25:207-217.