تحقیقات آب و خاک ایران، دورهٔ ۴۶، شمارهٔ ۲، تابستان ۱۳۹۴ (ص ۲۹۱-۲۸۳)

کاربرد روش یادگیری تقویتی برای تعیین دستورالعمل بهره‌برداری برحسب درخواست توزیع و تحویل بهینهٔ آب

کاظم شاهوردی[۱]، محمدجواد منعم[۲]*، مجید نیلی[۳]

۱. دانشجوی دکتری سازه‌های آبی دانشگاه تربیت مدرس

۲. دانشیار گروه سازه‌های آبی دانشگاه تربیت مدرس

۳. استاد مهندس برق دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۶/۲۴ـ تاریخ تصویب: ۱۳۹۳/۱۲/۵)

چکیده

یکی از رویکردهای مؤثر تحویل و توزیع آب در شبکه‌های آبیاری روش برحسب درخواست است که با توجه به ساختار هر شبکه قابل اجراست؛ اما به استخراج دستورالعمل بهره‌برداری نیاز دارد. در این تحقیق، مدل تعیین دستورالعمل بهره‌برداری روش برحسب درخواست با الگوریتم یادگیری تقویتی سارسای فازی (FSL) توسعه داده شد و در کانال E1R1 شبکهٔ آبیاری دز آزمون شد. ورودی این الگوریتم دبی‌های درخواست‌شده و خروجی آن دستورالعمل بهره‌برداری سازه‌هاست. برای ارزیابی نتایج دو سناریویی که اجرا شد شاخص‌های ارزیابی عمق و دبی به کار رفت. نتایج نشان‌دهندهٔ توانایی FSL در هم‌گرایی و استخراج الگوها بود. مثلاً در سناریوی ۱، که در آن دبی آبگیرهای ۵ و ۶ از ۰/۱ متر مکعب در ثانیه به ۰/۲ متر مکعب در ثانیه افزایش یافته است و سایر آبگیرها بسته‌اند، حداقل مقدار شاخص‌های راندمان و کفایت برابر ۰/۹۸۹ و ۰/۹۹۴ و حداکثر مقدار شاخص‌های خطای مطلق حداکثر و تجمعی برابر ۸/۴ و ۷/۴ درصد به دست آمد. با توجه به نتایج، FSL را می‌توان در تنظیمات سازه‌ها، به صورت دستی، برای روش‌های برحسب درخواست به کار برد.

کلیدواژگان: توزیع و تحویل آب، دستورالعمل بهره‌برداری، یادگیری سارسای فازی.

مقدمه

ارتقای بهره‌وری مصرف آب در بخش کشاورزی، که بزرگ‌ترین مصرف‌کنندهٔ آب است، اهمیت زیادی در بهبود مصرف آب دارد. روش‌های توزیع و تحویل آب در شبکه‌های آبیاری تأثیری تعیین‌کننده در بهبود بهره‌وری آب دارند. محققان از دهه‌های گذشته به برنامه‌ریزی توزیع و تحویل آب و عوامل مؤثر بر آن در کانال‌های آبیاری توجه کرده‌اند و بر همین اساس روش‌های مختلف بهره‌برداری معرفی شده است.

در برنامه‌ریزی تحویل و توزیع آب باید سه عامل دبی، مدت زمان، و تناوب تعیین شود. ثابت یا متغیر بودن این عوامل و سطح تصمیم‌گیری در آن‌ها روش‌های بهره‌برداری متنوع را با انعطاف‌پذیری متفاوت به وجود می‌آورد؛ شامل روش گردشی[۱]، روش بر حسب تمایل[۲]، و روش برحسب درخواست[۳] (Mathur *et al.*, 2009). در صورتی که دبی، مدت زمان، و تناوب ثابت و از پیش تعیین شده باشند برنامه‌ریزی تحویل آب را گردشی می‌نامند. این روش معمول‌ترین روش توزیع آب در شبکه‌های آبیاری، به‌خصوص در شبکه‌های سنتی، است که پایین‌ترین سطح انعطاف‌پذیری را دارد. در روش بر حسب تمایل هر زارع می‌تواند دبی مورد نظر خود را در هر زمانی و به هر مدتی که تمایل داشته باشد با لحاظ محدودیت‌های فیزیکی سیستم تحویل بگیرد. این روش نیازمند زیرساخت‌های مخصوص، از نظر ظرفیت شبکه و سامانه‌های کنترل خودکار، است و حداکثر انعطاف‌پذیری را دارد. با توجه به ساختار شبکه‌های موجود، روش برحسب درخواست، ضمن انعطاف‌پذیرتربودن نسبت به روش گردشی، در شبکه‌های آبیاری قابل کاربرد است.

روش برحسب درخواست از نظر انعطاف‌پذیری و هزینه مابین روش گردشی و روش برحسب تمایل است؛ طوری که از یک طرف نسبت به روش گردشی انعطاف‌پذیری بیشتر دارد و از طرف دیگر نیازمند زیرساخت‌های پرهزینهٔ روش بر حسب تمایل نیست و به صورت دستی قابل اجراست (Burt, 2011). در این روش زارعان میزان آب مورد نیاز را از قبل اعلام می‌کنند. مدیریت شبکه باید، با توجه به میزان آب موجود و درخواست زارعان، به گونه‌ای برای تحویل آب و تنظیم سازه‌ها برنامه بریزد که نیازها را به مناسب‌ترین وجه تأمین کند.

با توجه به تعداد زیاد سازه‌های آب‌بند و آبگیر در یک کانال، چالش مهمی که در این روش وجود دارد نحوهٔ استخراج

* نویسندهٔ مسئول: javadmonem@gmail.com

1. Rotational
2. On-will or On-demand
3. On-request

Archive of SID

www.SID.ir

دستورالعمل بهره‌برداری است. منظور از دستوالعمل بهره‌برداری در این تحقیق زمان و میزان تنظیم سازه‌های آب‌بند و آبگیر است. با توجه به اینکه سازه‌های آبگیر بالادست هر آب‌بند در مجاورت آن قرار دارند، آب‌بند و آبگیرهای مجاور و بالادست آن هم‌زمان تنظیم می‌شوند.

برنامه‌ریزی توزیع و تحویل آب در کانال‌های آبیاری در سال ۱۹۸۶ فرمول‌بندی شد (Suryavanshi and Reddy, 1986). در این تحقیق، با استفاده از برنامه‌ریزی خطی ۰ و ۱ برنامهٔ توزیع و تحویل بهینهٔ آب بین انشعابات مختلف کانال توزیع ارائه شد. در سال ۱۹۹۵ فرم اصلاح‌شدهٔ مدل یادشده پیشنهاد شد که در آن مفهوم لوله‌های جریان جهت تحویل آب به انشعابات واقع در کانال توزیع به کار رفت (Wang *et al.*, 1995). از اوایل قرن بیست‌ویکم، محققان به استفاده از الگوریتم‌های فراکاوشی در بهینه‌سازی توزیع و تحویل آب در شبکه‌های آبیاری توجه کردند. سال ۲۰۰۸ کارایی روش بهینه‌سازی ژنتیک در برنامه‌ریزی توزیع و تحویل آب در کانالی با هشت انشعاب بررسی و با نتایج روش برنامه‌ریزی صحیح، که De Vries and Anwar (2004) ارائه کردند، مقایسه شد و برتری آن نسبت به برنامه‌ریزی صحیح آشکار شد (Haq *et al.*, 2008).

در ایران، در سال ۲۰۰۲، مدلی برای ارزیابی عملکرد و بهینه‌سازی بهره‌برداری از کانال‌های آبیاری توسعه داده شد (Mohseni Movahed and Monem, 2002). در این مدل، روش بهینه‌سازی تابکاری فلزات[1] (SA) در ترکیب با مدل هیدرودینامیک ICSS استفاده شد. هم‌گرایی خوب مدل رسیدن به جواب‌های معتبر و پذیرفتنی را در این مدل تسهیل کرد. در تحقیق Monem and Namdarian (2005) با استفاده از روش SAو با هدف حداقل‌کردن ظرفیت کانال توزیع و تعداد عملیات بهره‌برداری دریچه‌ها مدلی پیشنهاد شد که در آن دبی، زمان، و ترتیب تحویل آب به انشعابات متغیرهای تصمیم انتخاب شدند. نتایج این روش با نتایج مطالعات Wang *et al.* (1995) مقایسه و کارایی آن نشان داده شد. روش‌های فراکاوشی ژنتیک و هوش جمعی ذرات در بهینه‌سازی توزیع و تحویل آب در شبکهٔ آبیاری فومنات و ورامین به کار رفت (Mnem *et al.*, 2007; Monem and Nouri, 2010). بررسی مطالعات نشان می‌دهد بسته به روش توزیع و تحویل آب هر یک از این مطالعات توابع هدف و متغیرهای تصمیم متفاوتی را در فرمول‌بندی لحاظ کرده و با یکی از روش‌های فراکاوشی[2] جواب‌های بهینه را تعیین کرده‌اند.

تحقیقات یادشده با فرض روش توزیع و تحویل گردشی به حل مسئله و بهینه‌سازی آن پرداخته‌اند و سایر روش‌های توزیع و تحویل را بررسی نکرده‌اند.

روش یادگیری تقویتی یکی از روش‌هایی است که می‌تواند به منظور تحویل آب با روش بر حسب درخواست با دقت زیاد استفاده شود. این روش با توجه به شبیه‌سازی هیدرولیکی جریان توسط مدل شبیه‌ساز (در این تحقیق مدل ICSS) عمل یادگیری را انجام می‌دهد. روش یادگیری تقویتی سارسای فازی (FSL: Fuzzy Sarsa Learning) به طور موفق در صنایع و کنترل ربات‌ها استفاده (Glorennec and Jouffe, 1997; Derhami, 2007; Derhami *et al.*, 2008; Kaelbling *et al.*, 1996) و قابلیت‌های آن در مهندسی کنترل بررسی شده است. در نتیجه می‌تواند برای تعیین دستورالعمل بهره‌برداری در روش بر حسب درخواست در شبکه‌های آبیاری نیز به کار رود.

در این تحقیق، ضمن معرفی الگوریتم FSL، مدل ریاضی آن برای تعیین دستورالعمل بهره‌برداری (زمان و میزان تنظیم سازه‌های آب‌بند و آبگیر) بر حسب درخواست توسعه داده شد و در کانال E1R1 از شبکهٔ دز آزمون شد.

معرفی الگوریتم FSL

یک سیستم فازی[3] TSK مرتبهٔ صفر را با n ورودی و یک خروجی و R قانون به فرم رابطهٔ ۱ در نظر بگیرید (Glorennec and Jouffe, 1997):

$$R_i: \text{If } x_1 \text{is } L_{i1} \text{and } \ldots \text{and } x_n \text{is } L_{in}, \text{ then } (\alpha_{i1} \text{with value } w_{i1}) \text{ or } \ldots \text{ or } (\alpha_{im} \text{with value } w_{im}) \quad \text{(رابطهٔ ۱)}$$

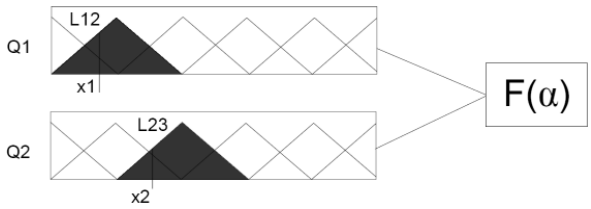
$s = x_1 \times \ldots \times x_n$ بردار n بعدی متغیرهای وضعیت ورودی، $L_i = L_{i1} \times \ldots \times L_{in}$ شامل n مجموعهٔ فازی با مرکزهای یکتا برای iامین قانون، m تعداد کنش‌های گسستهٔ ممکن (بازشدگی دریچه) برای هر قانون، α_{ij} jامین کنش کاندید در قانون iام، و w_{ij} مقدار ارزش تقریب‌زده‌شده برای کنش jام در قانون iام است. تابع تعلق این سیستم با دو ورودی Q1 و Q2 و تابع خروجی F(α) به صورت شکل ۱ است. خروجی سیستم طی فرایند یادگیری با استفاده از وزن‌های wij استخراج می‌شود. قاعدهٔ این سیستم به صورت رابطهٔ ۲ است.

$$R: \text{If } x_1 \text{is } L_{12} \text{and } x_2 \text{is } L_{23} \text{then } F(\alpha) \quad \text{(رابطهٔ ۲)}$$

1. Simulated Annealing
2. Meta-heuristic
3. Takagi-Sogeno and Kang

Archive of SID

www.SID.ir



شکل ۱. شکل شماتیک سیستم استنتاجی TSK

در هر تکرار یک کنش از میان m کنش کاندیدشده بر مبنای مقدار وزن آن کنش انتخاب می‌شود و آن‌گاه کنش نهایی از ترکیب وزن‌دار این کنش‌ها به دست می‌آید. مقادیر اولیهٔ w_{ij} برابر ۰ است. با توجه به پاداش دریافت‌شده، مقادیر w_{ij} در طول فرایند یادگیری به‌روز می‌شود. خروجی سیستم، یعنی کنش a در وضعیت s (شرایط جریان در کانال) با $a_t(s_t)$ نشان داده می‌شود (t شمارهٔ تکرار است) و با رابطهٔ ۳ به دست می‌آید. ارزش کنش یادشده با رابطهٔ ۴ محاسبه می‌شود:

$$a_t(s_t)=\sum_{i=1}^{R}\mu_i(s_t)a_{ii^+} \qquad \text{(رابطهٔ ۳)}$$

$$\tilde{Q}_t(s_t,a_t)=\sum_{i=1}^{R}\mu_i(s_t)w_t^{ii^+} \qquad \text{(رابطهٔ ۴)}$$

a_{ii^+} و $w_t^{ii^+}$ کنش انتخاب‌شده و وزن مرتبط با آن در قاعدهٔ iام است. μ_i مقدار تعلق قانون iام و i^+ اندیس کنش انتخاب‌شده در قانون iام است. کنش در این روش با رابطهٔ ۵ انتخاب می‌شود.

$$p(u_{ij})=\frac{e^{\frac{\mu_i w^{ij}}{\delta_t}}}{\sum_{j=1}^{m}e^{\frac{\mu_i w^{ij}}{\delta_t}}} \qquad \text{(رابطهٔ ۵)}$$

δ ضریب دماست. ضریب دما بین تجربیات گذشته و اکتشاف‌های جدید تعادل ایجاد می‌کند و مقدار آن در طول فرایند یادگیری به تدریج کاهش می‌یابد. مقادیر اولیهٔ آن را کاربر بر اساس تجربه و نوع مسئله انتخاب می‌کند. معمولاً مقدار ضریب دما در ابتدای آموزش بزرگ است و در حین آموزش، هر چه جلو می‌رویم، با استفاده از رابطهٔ ۶، کاهش می‌یابد تا از تجربیات قبلی بیشتر استفاده شود:

$$\delta_{t+1}=\delta_t-d\delta.\delta_t \qquad \text{(رابطهٔ۶)}$$

δ_0 مقدار اولیهٔ دما و $d\delta$ مقدار تغییر جزئی دماست که مقادیر آن‌ها در این تحقیق به ترتیب ۳۰ و ۰/۰۰۸ در نظر گرفته شد. در صورتی که نسبت ارزشِ یک کنش به مقدار دما خیلی بزرگ شود، فرایند یادگیری تمام و مدل هم‌گرا می‌شود. پس از اعمال کنش بر محیط، مقدار پارامترهای وزن هر قانون با رابطهٔ ۷ به‌روزرسانی می‌شود:

(رابطهٔ ۷)

$$\Delta w_{t+1}^{ij}=\begin{cases}\beta_t\times\Delta Q(s_t,a_t)\times\mu_i(s_t) & \text{if } j=i^+\\ 0 & \text{otherwise}\end{cases}$$

βنرخ آموزش است و به‌روزرسانی مقادیر w را کنترل می‌کند. مقادیر آن بر اساس تجربه و نوع مسئله تعیین می‌شود. مقدار خطای ارزش‌ـ کنش با رابطهٔ ۸ محاسبه می‌شود.

(رابطهٔ ۸)

$$\Delta Q_t(s_t,a_t)=r_{t+1}+\gamma Q_t(s_{t+1},a_{t+1})-Q_t(s_t,a_t)$$

γ ضریب وزنی ارزش پاداش تکرار t+1 را در تکرار t نشان می‌دهد. مقدار آن بین ۰ و ۱ است و با آزمون و خطا تعیین می‌شود. مقدار پاداش (r) با رابطهٔ ۹ به دست می‌آید:

(رابطهٔ ۹)

$$\begin{cases}|y-y_{target}|>0.2y_{target} & \rightarrow r=0\\ |y-y_{target}|<0.2y_{target} & \rightarrow r=\dfrac{100}{(dQc+dQt)+0.01}\end{cases}$$

dQc و dQt به ترتیب مقدار انحراف دبی درخواستی از دبی تحویلی در آب‌بند و آبگیر، y و y_{target} عمق مشاهده‌ای و عمق هدف در محل آب‌بند است.

یادگیری دستورالعمل بهره‌برداری با استفاده از الگوریتم FSL به طور مختصر در ادامه معرفی می‌شود:

۱. مشاهدهٔ وضعیت s_{t+1} و دریافت پاداش تقویتی r_{t+1} از محیط با استفاده از رابطهٔ ۹؛

۲. انتخاب کنش مناسب برای هر قاعده با استفاده از رابطهٔ ۵؛

۳. محاسبهٔ خروجی نهایی a_{t+1} و مقدار ارزش کنش تقریب‌زده‌شده $Q_t(s_t,a_t)$ با استفاده از روابط ۳ و ۴؛

۴. محاسبهٔ ΔQ و به‌روزرسانی w با روابط ۷ و ۸؛

۵. محاسبهٔ مقدار ارزش کنش تقریب‌زده‌شدهٔ جدید $Q_t(s_{t+1},a_{t+1})$ با استفاده از رابطهٔ ۴؛

۶. اعمال خروجی جدید به محیط و شبیه‌سازی با استفاده از مدل هیدرودینامیک ICSS؛

۷. اصلاح پارامتر δ و تکرار این مراحل تا هم‌گرا شدن.

احتمال انتخاب کنش با رابطهٔ ۵ محاسبه می‌شود. در این روش، با توجه به مقدار دما (δ) و مقدار ارزش همهٔ کنش‌های گسسته در وضعیت مورد نظر (w)، در هر تکرار احتمال انتخاب همهٔ کنش‌ها محاسبه و در نهایت کنشی که بیشترین احتمال را داشته باشد، به عنوان کنش نهایی، انتخاب می‌شود. با توجه به ثابت‌بودن مقادیر ضریب μ در رابطهٔ ۵ برای یک وضعیت،

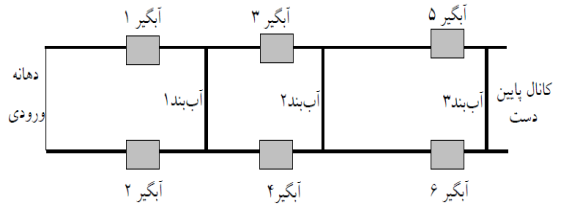
Archive of SID

www.SID.ir

وقتی مقدار $\frac{w}{\delta}$ کم باشد، احتمال انتخاب همهٔ کنش‌ها یکسان و انتخاب کنش تصادفی است. طی فرایند یادگیری با افزایش $\frac{w}{\delta}$، کنش‌های با w بالا انتخاب می‌شوند. در نهایت، مدل با بهترین کنش که بیشترین w را دارد هم‌گرا می‌شود (Glorennec and Jouffe, 1997).

کانال مورد تحقیق

به منظور آزمون قابلیت روش FSL در تعیین دستورالعمل‌های بهره‌برداری از قسمتی از کانال E1R1 از شبکهٔ دز استفاده شد. کانال سه آب‌بند و شش آبگیر جانبی، از نوع دریچهٔ کشویی، دارد که به صورت دستی از آن بهره‌برداری می‌شود. طول این کانال ۲۸۳۰٫۵ متر، مقطع آن ذوزنقه‌ای، پوشش کانال بتنی، و حداکثر ظرفیت آن ۲٫۴۷ متر مکعب بر ثانیه است. شیب کانال از ۰٫۰۰۰۱۲ تا ۰٫۰۰۱۵ متغیر است. عرض کف از ابتدای کانال تا آب‌بند ۱ معادل ۱٫۵ متر و از این نقطه تا محل آب‌بند ۳ معادل ۱ متر است. شیب جانبی کانال در سراسر مسیر ۱٫۵ افقی به ۱ در قائم است. نمای شماتیک کانال E1R1 در شکل ۲ می‌آید:



شکل ۲. نمای شماتیک کانال E1R1

شاخص‌های ارزیابی

شاخص‌های مبتنی بر دبی شامل شاخص‌های کفایت[1] و راندمان[2] تحویل آب (Molden and Gates, 1990) برای بررسی عملکرد تنظیم آبگیرها و شاخص‌های مبتنی بر عمق شامل شاخص‌های خطای مطلق حداکثر (MAE) و خطای مطلق تجمعی (IAE) (Clemmens *et al.*, 1998) برای بررسی مطلوبیت عملکرد سازه‌های تنظیم استفاده شده است. شاخص خطای مطلق حداکثر منعکس‌کنندهٔ حداکثر انحرافی است که مدل در ثابت نگه‌داشتن سطح آب در عمق هدف دارد و شاخص خطای مطلق تجمعی نشان‌دهندهٔ متوسط انحراف عمق آب از عمق هدف است. این شاخص‌ها به ترتیب به صورت روابط ۱۰ تا ۱۳ تعریف می‌شوند:

(رابطهٔ ۱۰)

$$MPA=\frac{1}{N}\sum_{N}\frac{1}{M}\sum_{M}(PA),\quad \begin{cases} PA=\dfrac{QD}{QR} & IF\ QR>QD \\ PA=1 & IF\ 1<\dfrac{QD}{QR} \end{cases}$$

(رابطهٔ ۱۱)

$$MPE=\frac{1}{N}\sum_{N}\frac{1}{M}\sum_{M}(PE),\quad \begin{cases} PE=\dfrac{QR}{QD} & IF\ QR<QD \\ PE=1 & IF\ QR>QD \end{cases}$$

(رابطهٔ ۱۲)

$$MAE=\frac{\max(\left|y_{target}-y\right|)}{y_{target}}$$

(رابطهٔ ۱۳)

$$IAE=\frac{\frac{T}{D}\sum_{T=0}^{D}(\left|y_{target}-y\right|)}{y_{target}}$$

در این روابط MPA شاخص کفایت، MPE شاخص راندمان، M تعداد آبگیرها، QR دبی مورد نیاز یا دبی درخواستی در آبگیر M، QD دبی واقعی تحویلی به آبگیر M، N تعداد گام‌های زمانی مناسب در یک دورهٔ تحویل، T گام زمانی محاسباتی، و D طول دورهٔ بهره‌برداری است. مقدار ایده‌آل شاخص‌های خطای مطلق حداکثر و خطای مطلق تجمعی برابر صفر و مقدار ایده‌آل شاخص‌های کفایت و راندمان برابر ۱ است.

سناریوهای بهره‌برداری

برای بررسی رفتار جریان در شرایط تغییرات نیاز دو سناریوی افزایش و کاهش نیاز پایین‌دست تعریف شد. در سناریوی ۱، که سناریوی افزایش جریان است، دبی ورودی به کانال و دبی آبگیرهای ۵ و ۶ در وضعیت اول به ترتیب برابر ۱، ۰٫۱، و ۰٫۱ متر مکعب در ثانیه بود که در وضعیت دوم به ۱٫۲، ۰٫۲، و ۰٫۲ متر مکعب در ثانیه افزایش یافت. در سناریوی ۲، که سناریوی کاهش جریان است، دبی ورودی به کانال و دبی آبگیرهای ۵ و ۶ در وضعیت اول به ترتیب ۱٫۵ ، ۰٫۲، و ۰٫۲ متر مکعب در ثانیه بود که در وضعیت دوم به ۱٫۲، ۰٫۰۵، و ۰٫۰۵ متر مکعب در ثانیه کاهش یافت. در هر سناریو ابتدا وضعیت اولیه در کانال برقرار شد و سپس جریان ورودی کانال، متناسب با تغییر نیازها، تغییر یافت. مدل FSL برای استخراج دستورالعمل بهره‌برداری (برای تحویل دبی‌های مورد نظر) در فضای مسئله شروع به جست‌وجو می‌کند و جواب‌های مختلف را می‌یابد. سپس، با استفاده از شاخص‌های ارزیابی، مطلوبیت این جواب‌ها را بررسی می‌کند. پاسخی که مقادیر شاخص‌های ارزیابی آن به مقادیر

1. Adequancy
2. Efficiency

Archive of SID

www.SID.ir

بهینهٔ آن نزدیک باشد پاسخ بهینه است و به منزلهٔ دستورالعمل بهره‌برداری انتخاب می‌شود. این سناریوها در هر روش بهره‌برداری می‌توانند مطرح شوند. در این تحقیق، فقط عملکرد روش برحسب درخواست بر این سناریوها بررسی می‌شود.

یافته‌ها و بحث

برای اجرای سناریوها، مدل تهیه‌شدهٔ FSL اجرا و دستورالعمل بهره‌برداری مناسب در هر سناریو استخراج شد.

نتایج سناریوی ۱

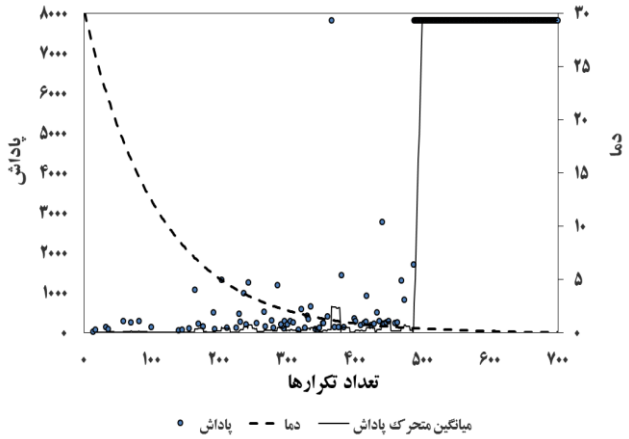
در سناریوی ۱، در هر تکرار، FSL با انتخاب کنش‌های مختلف و اعمال آن بر محیط پاداش‌های مختلفی را با استفاده از رابطهٔ ۹ دریافت کرد و به‌تدریج دما (طبق رابطهٔ ۶) کاهش یافت. تغییرات پاداش و دما در طول فرایند یادگیری در شکل ۳ می‌آید. به منظور مشاهدهٔ بهتر روند تغییرات پاداش، میانگین متحرک پاداش نیز رسم شد. مدل در تکرار حدود ۵۱۰ هم‌گرا شد. پاداش حداکثر اولین بار در تکرار حدود ۳۸۰ مشاهده شد که مقدار آن ۷۸۲۴ است.

بازشدگی اولیهٔ آب‌بندهای ۱ و ۲ به ترتیب برابر ۳۸٫۵ و ۴۱٫۵ سانتی‌متر است. با افزایش دبی ورودی، بازشدگی آب‌بندهای ۱ و ۲ و آبگیرهای ۵ و ۶ افزایش یافت تا دبی مورد نیاز تحویل شود. تنظیم آب‌بندهای ۱ تا ۳ به ترتیب در زمان‌های ۰٫۱۷، ۰٫۲۸، و ۰٫۴۴ ساعت پس از شروع و تنظیم آبگیرهای ۵ و ۶ هم‌زمان با آب‌بند ۳ انجام می‌شود. زمان تنظیم مناسب سبب می‌شود تغییرات عمق آب هنگام تنظیم سازه‌ها کاهش یابد و میزان تنظیم مناسب نیز سبب کاهش تغییرات عمق در طول دورهٔ تحویل دبی می‌شود. نتایج تنظیم دریچه‌ها و شاخص‌های ارزیابی عمق در سناریوی ۱ در جدول ۱ می‌آید.

جدول ۱. نتایج تنظیم آب‌بندها و شاخص‌های ارزیابی عمق در سناریوی ۱

	آب‌بند ۱	آب‌بند ۲	آب‌بند ۳
تنظیم اولیه (cm)	۳۸٫۵	۴۱٫۵	۲۸٫۱
تنظیم ثانویه (cm)	۵۶٫۵	۵۲٫۴	۲۷٫۸
عمق ثانویه (m)	۱٫۱۰	۱٫۱۹	۱٫۲۱
MAE(٪)	۸٫۴	۸٫۰	۳٫۶
IAE(٪)	۷٫۴	۰٫۹	۱٫۳

حداکثر مقدار شاخص MAE برابر ۸٫۴ درصد در آب‌بند ۱ و حداقل آن برابر ۳٫۶ درصد در آب‌بند ۳، نیز مقدار IAE بین ۰٫۹ و ۷٫۴ درصد به دست آمد. بازشدگی ثانویهٔ آبگیرهای ۵ و ۶ در این سناریو به ترتیب ۱۳٫۹ و ۱۱ سانتی‌متر بود. مقدار این شاخص‌ها مناسب است. نتایج دبی آبگیرها در بیست‌وچهار ساعت در جدول ۲ می‌آید.



شکل ۳. مقدار پاداش و دما در تکرارهای مختلف

جدول ۲. نتایج تنظیم آبگیرها و شاخص‌های ارزیابی دبی در سناریوی ۱

	تنظیم اولیه (cm)	تنظیم ثانویه (cm)	دبی ثانویه تثبیت‌شده (m^3/s)	متوسط زمانی دبی تحویلی (m^3/s)	راندمان	کفایت	مازاد (٪)	کمبود (٪)
آبگیر ۵	۷٫۰	۱۳٫۹	۰٫۱۹۷	۰٫۱۹۷	۱٫۰۰۰	۰٫۹۹۸	۰	۱٫۱۲
آبگیر ۶	۵٫۲	۱۱٫۰	۰٫۲۰۹	۰٫۲۰۹	۰٫۹۵۳	۱٫۰۰۰	۴٫۷۲	۰
کانال پایین‌دست	–	–	۰٫۷۹۲	۰٫۷۹۶	۰٫۹۹۸	۰٫۹۹۴	۰	۰٫۴۳
کل کانال	–	–	۱٫۲۰۵	۱٫۲۱۳	۰٫۹۸۹	۱٫۰۰۰	۰٫۳۷	۰

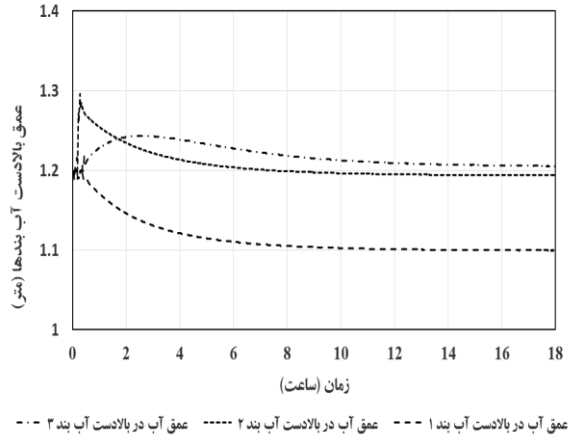
مقدار شاخص‌های راندمان و کفایت در آبگیر ۵ و ۶ بسیار نزدیک به مقدار ایده‌آل است؛ طوری که در آبگیر ۵ فقط ۱۹۴ متر مکعب کمبود و در آبگیر ۶ فقط ۸۱۶ متر مکعب مازاد تحویل آب مشاهده شد. این وضعیت در کانال پایین‌دست و کل کانال نیز قابل مشاهده است. با توجه به اینکه از یک طرف وجود جریان غیر ماندگار در کانال اجتناب‌ناپذیر است و از طرف دیگر تنظیم دریچه‌ها فقط یک بار و به صورت دستی انجام می‌شود، تأثیر جریان غیر ماندگار

Archive of SID
www.SID.ir

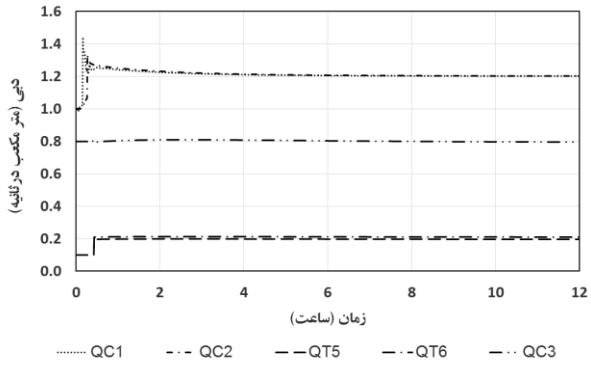
را نمی‌توان به طور کامل حذف کرد و همواره مقداری مازاد یا کمبود مشاهده می‌شود. تغییرات عمق آب در این سناریو در شکل ۴ می‌آید.

انحنای منحنی تغییرات عمق در این سناریو ملایم بود و در آب‌بندهای ۱ و ۳ تغییرات ناگهانی در عمق مشاهده نشد. دلیل این پدیده تنظیم سازه‌ها بلافاصله در هنگام تغییر عمق است. با توجه به اینکه بهره‌برداری در آب‌بند ۲ هم‌زمان با تغییرات جریان انجام نشد، تغییر ناگهانی عمق روی داد. وجود تغییرات ناگهانی به دلیل این است که مدل زمان و میزان تنظیم آب‌بندها و آبگیرها را طوری تعیین می‌کند که عمق آب را درون محدودهٔ مجاز عمق کنترل کند و خطای تحویل دبی حداقل باشد. بنابراین، هدف اصلی تأمین دبی است، نه کنترل تغییرات تدریجی یا ناگهانی عمق. پس از اعمال بهره‌برداری و افزایش بازشدگی دریچهٔ آب‌بند ۲، عمق آب کاهش یافت و در عمق ثانویه تثبیت شد. در این سناریو تغییرات عمق پس از حدود دوازده ساعت به ترتیب در آب‌بندهای ۱ تا ۳ در مقدار ثانویهٔ ۱٫۱، ۱٫۱۹، و ۱٫۲۱ متر تثبیت شد.

منحنی تغییرات دبی در شکل ۵ می‌آید. تغییرات دبی عبوری به پایین‌دست از آب‌بندهای ۱ و ۲ بسیار کم و به صورت تدریجی است. در آب‌بند ۳ این تغییرات ناچیز است و مدل، با انتخاب بازشدگی مناسب برای آبگیرها، تحویل دبی را با دقت بالا انجام داد؛ طوری که متوسط زمانی دبی تحویل‌شده در آبگیرهای ۵ و ۶ به ترتیب برابر ۰٫۱۹۷ و ۰٫۲۰۹ متر مکعب در ثانیه و دبی ثانویهٔ تثبیت‌شده نیز برابر ۰٫۱۹۷ و ۰٫۲۰۹ متر مکعب در ثانیه بود. در کانال پایین‌دست و کل کانال دبی تثبیت‌شده برابر ۰٫۷۹۲ و ۱٫۲۰۵ متر مکعب در ثانیه و متوسط زمانی دبی تحویل‌شده به ترتیب برابر ۰٫۷۹۶ و ۱٫۲۱۳ متر مکعب در ثانیه بود.



شکل ۴. تغییرات عمق آب در سناریوی ۱

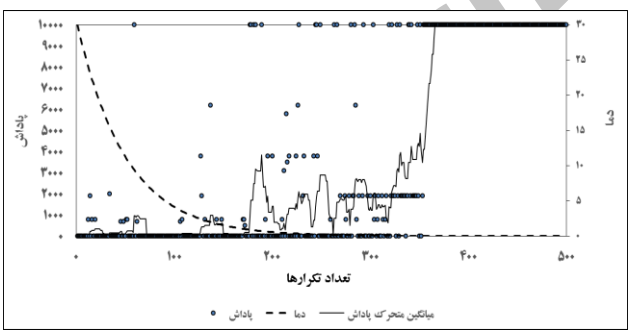


شکل ۵. تغییرات دبی آب‌بند و آبگیر در سناریوی ۱

نتایج سناریوی ۲

تغییرات پاداش و دما طی فرایند یادگیری در هر تکرار سناریوی ۲ در شکل ۶ می‌آید. مدل در تکرار حدود ۳۸۰ هم‌گرا شد. پاداش حداکثر اولین بار در تکرار حدود ۷۱ مشاهده شد، که مقدار آن ۹۹۸۱ بود.

در سناریوی ۲ آبگیرهای ۵ و ۶ در شرایط اولیه به ترتیب دارای بازشدگی ۱۴٫۲ و ۱۰٫۵ سانتی‌متر بودند و هر یک از آن‌ها دبی ۰٫۲ متر مکعب در ثانیه را دریافت کرد. در طول بهره‌برداری، دبی ورودی از ۱٫۵ به ۱٫۲ متر مکعب در ثانیه و دبی آبگیرهای ۵ و ۶ به ۰٫۰۵ متر مکعب در ثانیه کاهش یافت. دبی درخواستی پایین‌دست ۱٫۱ متر مکعب در ثانیه بود که در مدت بهره‌برداری تغییر نکرد. نتایج شبیه‌سازی در آب‌بندها در جدول ۳ می‌آید.



شکل ۶. مقدار پاداش و دما در تکرارهای مختلف در سنایوی ۲

جدول ۳. نتایج شبیه‌سازی آب‌بندها در سناریوی ۲

	آب‌بند ۱	آب‌بند ۲	آب‌بند ۳
تنظیم اولیه (cm)	۶۰٫۰	۶۹٫۶	۴۰٫۱
تنظیم ثانویه (cm)	۳۶٫۳	۵۳٫۵	۴۳٫۲
عمق ثانویه (m)	۱٫۳۷	۱٫۱۶	۱٫۱۰
MAE(٪)	۱۳٫۸	۱۲٫۲	۱۱٫۸
IAE(٪)	۱۲٫۲	۴٫۴	۹٫۷

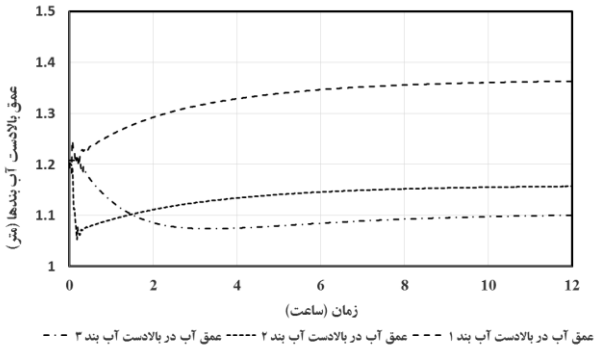
Archive of SID
www.SID.ir

آب‌بندهای ۱ تا ۳ به ترتیب در زمان‌های ۰٫۰۶، ۰٫۱۹، و ۰٫۳۳ ساعت پس از شروع بهره‌برداری انجام شد. تنظیم آبگیرهای ۵ و ۶ هم‌زمان با آب‌بند ۳ انجام شد. مقایسهٔ زمان تنظیم در سناریوی ۱ و ۲ نشان می‌دهد زمان تنظیم آب‌بندهای ۱ و ۲ در سناریوی ۲ کمتر از مقادیر متناظر آن در سناریوی ۱ است. در سناریوی ۲، آب‌بند ۳ و آبگیرهای ۵ و ۶ نسبت به سناریوی ۱ زودتر تنظیم شدند. حداکثر مقدار شاخص MAE برابر ۱۳٫۸ و حداقل آن برابر ۱۱٫۸ درصد به دست آمد. در آب‌بند ۲، حداکثر تغییر عمق به دلیل فاصلهٔ زمانی بین رسیدن جریان افزایشی و تنظیم آب‌بند بود و به صورت ناگهانی مشاهده شد؛ در صورتی که در آب‌بندهای دیگر رسیدن به حداکثر اختلاف عمق و عمق هدف به سبب تنظیم به‌موقع آب‌بندها تغییرات ناگهانی بزرگ به وجود نیامد. تثبیت عمق در آب‌بندها حدود دوازده ساعت طول کشید. مقدار IAE بین ۴٫۷ و ۱۲٫۲ درصد به دست آمد. با توجه به تغییرات زیاد عمق در این سناریو، مقادیر MAE و IAE در این سناریو نسبت به سناریوی ۱ بزرگ‌تر بود. بازشدگی ثانویهٔ آبگیرهای ۵ و ۶ در این سناریو به ترتیب ۳۶ و ۲۷ سانتی‌متر به دست آمد (جدول ۴).

جدول ۴. نتایج شبیه‌سازی در آبگیرها در سناریوی ۲

	تنظیم اولیه (cm)	تنظیم ثانویه (cm)	دبی ثانویهٔ تثبیت‌شده (m^3/s)	متوسط زمانی دبی تحویلی (m^3/s)	راندمان	کفایت	مازاد (٪)	کمبود (٪)
آبگیر ۵	۱۴٫۲	۳۶٫۰	۰٫۰۵۰	۰٫۰۵۰	۰٫۹۹۹	۰٫۹۹۵	۰	۱۹
آبگیر ۶	۱۰٫۵	۲۷٫۰	۰٫۰۵۰	۰٫۰۵۰	۰٫۹۹۹	۰٫۹۹۶	۰	۱۲
کانال پایین‌دست	–	–	۱٫۰۹۸	۱٫۰۹۳	۰٫۹۹۸	۰٫۹۹۲	۰	۵۸۳
کل کانال	–	–	۱٫۱۹۰	۱٫۱۸۶	۰٫۹۹۸	۰٫۹۹۲	۰	۶۱۶

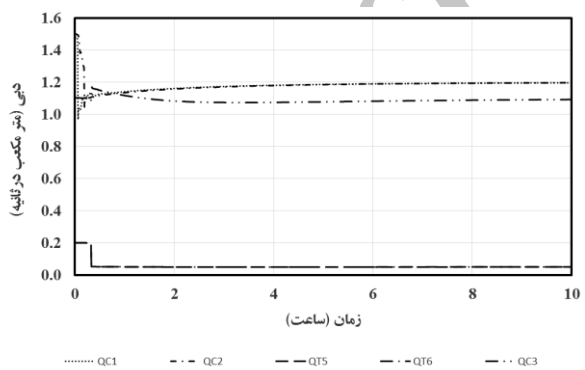
مقدار شاخص‌های راندمان و کفایت در آبگیر ۵ به ترتیب برابر ۰٫۹۹۹ و ۰٫۹۹۵ به دست آمد. کمبود تحویل آب برابر ۱۹ متر مکعب بود. منحنی تغییرات عمق در شکل ۷ می‌آید.



شکل ۷. تغییرات عمق آب در سناریوی ۲

انحنای منحنی تغییرات عمق در این سناریو ملایم بود و در آب‌بندهای ۱ و ۳ تغییرات ناگهانی در عمق مشاهده نشد. در این سناریو نیز تغییرات عمق پس از حدود دوازده ساعت به ترتیب در آب‌بندهای ۱ تا ۳ در مقدار ثانویهٔ ۱٫۳۷، ۱٫۱۶، و ۱٫۱۰ متر تثبیت شد. منحنی تغییرات دبی در شکل ۸ می‌آید.

تغییرات دبی عبوری به پایین‌دست از آب‌بندهای ۱ و ۲ بسیار کم و با تغییرات تدریجی بود. متوسط زمانی دبی تحویل‌شده در دورهٔ بهره‌برداری بیست‌وچهار ساعته به آبگیرها و دبی ثانویهٔ تثبیت‌شده برای هر دو آبگیر به ترتیب برابر ۰٫۰۵۰ و ۰٫۰۵۰ متر مکعب در ثانیه بود.



شکل ۸. تغییرات دبی آب‌بند و آبگیر در سناریوی ۲

در مجموع در سناریوی ۱ مقادیر شاخص‌های MAE و IAE کمتر از سناریوی ۲ بود. از نظر شاخص‌های تحویل آب، گزینهٔ ۱ بهتر از گزینهٔ ۲ است. در کل کانال در گزینهٔ ۳۸۳ متر مکعب مازاد در تحویل آب مشاهده شد؛ در صورتی که در گزینهٔ ۲ کمبود آب ۶۱۶ متر مکعب بود. در مجموع، می‌توان گفت مدل FSL از نظر شاخص‌های عمق و دبی در هر دو گزینه عملکردی مناسب داشت و در گزینهٔ ۱ بهتر از گزینه ۲ بود.

Archive of SID
www.SID.ir

نتیجه‌گیری

در این تحقیق مدل ریاضی الگوریتم یادگیری سارسای فازی (FSL) برای تعیین دستورالعمل بهره‌برداری سازه‌های آب‌بند و آبگیر با روش بر حسب درخواست در کانال‌های آبیاری در محیط برنامهٔ متلب توسعه داده شد. مقادیر بهینهٔ زمان و میزان تنظیم سازه با استفاده از این مدل در کانال E1R1 شبکهٔ دز برای سناریوهای تعریف‌شده استخراج شد. نتایج با استفاده از شاخص‌های کفایت، راندمان، خطای مطلق حداکثر، و خطای مطلق تجمعی ارزیابی شد. تحلیل شاخص‌های ارزیابی نشان می‌دهد نتایج این مدل دقت بالایی دارد؛ طوری که اختلاف دبی‌های درخواستی و دبی‌های تحویلی کم است. مثلاً، در سناریوی ۱ حداقل مقدار شاخص‌های راندمان و کفایت به ترتیب برابر ۰٫۹۸۹ و ۰٫۹۹۴ به دست آمد. حداکثر مقدار شاخص‌های خطای مطلق حداکثر و خطای مطلق تجمعی به ترتیب برابر ۸٫۴ و ۷٫۴ درصد بود. نتایج نشان می‌دهد مدل FSL با دقت زیادی قادر به استخراج الگوهای بهره‌برداری برای توزیع و تحویل بهینهٔ آب در کانال‌های آبیاری است. بنابراین، می‌توان از نتایج FSL در عمل برای تنظیمات سازه‌ها به صورت دستی برای روش‌های برحسب درخواست استفاده کرد.

فهرست علائم و نمادها

t: شمارهٔ تکرار

s_t: وضعیت در تکرار t

a_t: عمل در تکرار t

r: پاداش

s_{t+1}: وضعیت در تکرار t+1

a_{t+1}: عمل در تکرار t+1

β: نرخ آموزش

γ: ضریب تنزیل

$Q_t(s_t, a_t)$: ارزش در تکرار t برای عمل a و وضعیت s در تکرار t

$Q_t(s_{t+1}, a_{t+1})$: مقدار ارزش در تکرار t برای عمل a و وضعیت s در تکرار t+1

A: مجموعهٔ عمل‌های گسسته

R: قاعدهٔ فازی

μ: مقدار تعلق در تابع عضویت فازی

n: تعداد ورودی‌های سیستم استنتاج فازی

X: متغیر ورودی سیستم استنتاج فازی

L: مجموعهٔ فازی

m: تعداد عمل‌های گسسته

F(α) : تابع خروجی سیستم استنتاج فازی

a_{ii^+}: عمل انتخاب‌شده از میان m عمل گسسته برای iامین قاعده

$w_t^{ii^+}$: ارزش عمل انتخاب‌شده از میان m عمل گسسته برای iامین قاعده

δ: مقدار دما

ΔQ: خطای ارزش- عمل

y: عمق مشاهده‌شده

y_{target}: عمق هدف

dQc: انحراف دبی درخواست‌شده از دبی تحویل‌داده‌شده در آب‌بند

dQt: انحراف دبی درخواست‌شده از دبی تحویل‌داده‌شده در آبگیر

T: گام زمانی شبیه‌سازی

MPA: کفایت تحویل

MPE: راندمان تحویل

QR: دبی درخواست‌شده

M: تعداد آبگیرها

QD: دبی تحویل‌شده

N: تعداد گام‌های زمانی در یک دورهٔ تحویل

MAE: شاخص خطای مطلق حداکثر

IAE: شاخص خطای مطلق تجمعی

D: طول دورهٔ بهره‌برداری

REFERENCES

Burt, C. M. (2011). The Irrigation Sector Shift from Construction to Modernization: What is Required for Success? *8th N.D. Gulhati Memorial Lecture for International Cooperation in Irrigation and Drainage*. 7-22.

Clemmens, A. J., Kacerek, T. F., and Grawitz, B., and Schuurmans, W. (1998). Test cases for canal control algorithms. *Journal of irrigation and drainage engineering.* 124(1), 23-30.

Derhami, V. (2007). *Intelligent Agent Based Controller Design for Robot Navigation*. Ph. D. dissertation, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. (In Farsi).

Derhami, V., Majd, V. J., and Nili, M. (2008). Fuzzy Sarsa learning and the proof of existence of its stationary points. *Asian Journal of Control*. 10(5), 535-549.

De Vries, T. and Anwar, A. (2004). Irrigation Scheduling. I: Integer Programming Approach. *Journal of Irrigation and Drain Engineering*, 130(1), 9-16.

Glorennec, P. Y. and Jouffe, L. (1997). Fuzzy Q-learning fuzzy systems. *Proceedings of the Sixth IEEE International Conference on*. IEEE.

Archive of SID

www.SID.ir

Haq, Z. U., Anwar, A. A., and Clarke, D. (2008). Evaluation of a genetic algorithm for the irrigation scheduling problem. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 134(6), 737-744.

Kaelbling, L. P., Littman, M. L., and Moore, A. W. (1996). *Reinforcement learning: A survey*. Arxiv preprint cs/9605103.

Mathur, Y., Sharma, G., and A. Pawde (2009). Optimal Operation Scheduling of Irrigation Canals Using Genetic Algorithm, International Journal of Recent Trends in Engineering, 1(6): 11-15.

Mohseni Movahed, A. and Monem, M. J. (2002). Introducing ICSSDOM model for performance evaluation and optimizing irrigation canals operation, *11th national congress on irrigation and drainage*, 16-17 Nov, Tehran, Iran, pp: 95-110. (In Farsi)

Molden, D. J. and Gates, T. K. (1990). Performance measures for evaluation of irrigation-water-delivery systems. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering.* 116(6), 804-823.

Monem, M. J. and Namdarian, R. (2005). Application of simulated annealing (SA) techniques for optimal water distribution in irrigation canals. *Irrigation and Drainage.* 54(4), 365-373.

Monem, M. J., Najaf, M. R., and Khoshnavaz, S. (2007). Optimal water scheduling in irrigation networks using genetic algorithm. *Iran-Water Resources Research*, 3(1), 100-110. (In Farsi)

Monem, M. J. and Nouri, M. A. (2010). Application of PSO method for optimal water delivery in irrigation networks, *Iranian Journal of lrrigation and drainage*, 1(4), 73-82. (In Farsi).

Suryavanshi, A. and Reddy, J. M. (1986). Optimal operation schedule of irrigation distribution systems. *Agricultural Water Management.* 11(1), 23-30.

Wang, Z., Reddy, J. M., and Feyen, J. (1995). Improved 0–1 programming model for optimal flow scheduling in irrigation canals. *Irrigation and Drainage Systems*. 9(2), 105-116.

Archive of SID

www.SID.ir