مجله تحقیقات مهندسی کشاورزی/جلد ۱۱/ شماره ۳/سال ۱۳۸۹/ص ۴۰-۲۷

مدیریت بهینه بهره‌برداری از کانال‌های آبیاری در شرایط استفاده تلفیقی از آب‌های سطحی و زیرزمینی

علیرضا عمادی*، محمدجواد منعم و کورش محمدی**

* نگارنده مسئول، نشانی: ساری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ص. پ. ۵۷۸، تلفن: ۳۸۲۲۵۷۱ (۰۱۵۱)، پیام‌نگار: emadia355@yahoo.com

** به ترتیب استادیار گروه مهندسی آب دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری؛ و دانشیاران دانشگاه تربیت مدرس

تاریخ دریافت:۸۸/۸/۱۶؛ تاریخ پذیرش: ۸۹/۳/۸

چکیده

استفادهٔ تلفیقی از آب‌های سطحی و زیرزمینی در شبکه‌های آبیاری، بر بهره‌برداری از کانال‌های آبیاری تأثیر می‌گذارد. جهت مدیریت بهینهٔ کانال‌های آبیاری، مدل شبیه‌سازی- بهینه‌سازی ICSS-SCE توسعه یافت. از مدل تهیه شده در بهینه‌سازی بهره‌برداری از کانال L8 شبکه آبیاری قزوین استفاده شد که دارای ۵ چاه تلفیقی است. بدین منظور دو حالت حدوداً ۲۵ و ۴۰ درصد افزایش مجموع نیاز جانبی کانال در نظر گرفته شد به‌طوری‌که این افزایش نیازها از چاه‌های تلفیقی موجود در مسیر کانال تأمین می‌شود. برای هر حالت، ورود جریان آب زیرزمینی به طور همزمان و دو گزینهٔ بهره‌برداری و تنظیم سازه‌ها به صورت معمول و بهینه، جمعاً ٤ گزینه مورد بررسی قرار گرفت. مدیریت بهینهٔ کانال تعیین و عملکرد کانال در هر یک از گزینه‌ها به کمک مدل ICSS-SCE تعیین شد. نتایج نشان می‌دهد که تنظیم سازه‌های کنترل و آبگیر طبق دستورالعمل بهره‌برداری بهینه موجب بهبود شاخص‌های عملکرد کانال و آبگیرهای متأثر از جریان تلفیقی می‌شود. تابع هدف برای کل کانال در دو حالت به میزان ٤۰ تا ٤۸ درصد بهبود یافته است. در مجموع می‌توان گفت که در حالت استفادهٔ تلفیقی از آب سطحی و زیرزمینی، مدل تهیه شده قابلیت تعیین دستورالعمل بهینه بهره‌برداری از کانال‌های آبیاری را به خوبی دارد.

واژه‌های کلیدی

استفادهٔ تلفیقی، روش بهینه‌سازی SCE، کانال‌های آبیاری، مدیریت بهینه و بهره‌برداری

مقدمه

جهت تأمین آب مورد نیاز کشاورزی از آب‌های سطحی، زیرزمینی، یا تلفیقی از آنها استفاده می‌شود. در بسیاری از شرایط، استفادهٔ تلفیقی به صورتی است که از آب سطحی و زیرزمینی در شبکه‌ای با مدیریت واحد بهره‌برداری می‌شود. در این حالت، آب زیرزمینی وارد کانالی می‌شود که آب سطحی را انتقال می‌دهد، و بر حسب نیاز آبگیرهای جانبی در امتداد کانال مصرف می‌شود. ورود آب زیرزمینی در هر نقطه به کانال، یا قطع جریان ورودی، جریانی غیرماندگار ایجاد می‌کند که در طول کانال گسترش می‌یابد و ضمن گسترش تغییر شکل نیز می‌دهد. گسترش جریان غیرماندگار در طول کانال موجب تغییر عمق، سرعت، و دبی طی زمان می‌شود که آثار هیدرولیکی مختلفی از جمله تغییر دبی تحویلی به آبگیرها و دبی عبوری از آب‌بندها را در پی دارد. میزان تغییرات ایجاد شده و آثار هیدرولیکی آن تابعی از میزان جریان آب زیرزمینی و زمان‌بندی ورود یا قطع آن در شرایط اولیه جریان و چگونگی تنظیم سازه‌ها در کانال‌هاست که بر عملکرد کانال تأثیر می‌گذارد. بررسی رفتار متقابل جریان سطحی و زیرزمینی به علت پیچیدگی آنها و غیرماندگار بودن جریان مستلزم بهره‌گیری از مدل‌های هیدرودینامیک در کانال است. بدون استفاده از

© 2013,The Author(s). Published by Agricultural Engineering Research Institute. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

این نوع مدل‌ها امکان مطالعهٔ رفتار هیدرولیکی پیچیده جریان میسر نخواهد بود. از طرفی، تعدد و تنوع عوامل تصمیم‌گیری و اهداف مختلفی که در استفادهٔ تلفیقی از آب‌های سطحی و زیرزمینی مورد نظر است با توجه به محدودیت‌های متعدد حاکم بر پدیده موجب خواهد شد که روش‌های مرسوم مدیریت و تصمیم‌گیری نتواند کارآمدی مطلوب را داشته باشد. در چنین شرایطی، بهره‌گیری از روش‌های بهینه‌سازی برای مدیریت فرایندهای پیچیده راهگشاست. در این زمینه‌ها تاکنون تحقیقاتی صورت گرفته است که می‌توان به تعدادی از آنها اشاره کرد.

منعم به منظور بهینه‌سازی و ارزیابی عملکرد کانال‌های آبیاری، مدل ICSS-POM[1] را تهیه کرد. این مدل ترکیبی است از روش بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک با مدل شبیه‌سازی جریان در شبکه‌های آبیاری ICSS. عملکرد و بهینه‌سازی بهره‌برداری کانال J08 شبکهٔ آبیاری شرق کالگری با استفاده از این مدل ارزیابی شد (Monem, 1994). محسنی موحد به منظور بهینه‌سازی و ارزیابی عملکرد کانال‌های آبیاری، مدل ICSS-DOM را تهیه کرد. این مدل با استفاده از روش بهینه‌سازی SA[2] ارزیابی عملکرد و بهینه‌سازی بهره‌برداری از کانال‌ها را با تکنیک شبیه‌سازی- بهینه‌سازی تعیین می‌کند. این مدل برای ارزیابی عملکرد و بهینه‌سازی بهره‌برداری کانال E1R1 از شبکه آبیاری دز به‌کار برده شد (Mohseni Movahed, 2002).

منابع تأمین آب در شبکهٔ آبیاری دشت قزوین آب‌های سطحی و زیرزمینی هستند. آب زیرزمینی در مواقع کمبود آب سطحی به کانال انتقال آب سطحی وارد و منتقل می‌شود. در این شبکه، ظرفیت کانال‌ها و بهره‌برداری از آنها طوری تعیین شده است که در آن هیچگونه استفادهٔ تلفیقی نمی‌شود (Anon, 2000). شبکهٔ آبیاری دشت چم‌چمال واقع در استان کرمانشاه نیز بر اساس استفاده تلفیقی طراحی شده ولی در بهره‌برداری از آن این امر لحاظ نشده است. با توجه به اینکه در این طرح هیچگونه سد مخزنی جهت ذخیره‌سازی آب سطحی موجود نیست، استفاده از آب‌های زیرزمینی بر حسب اینکه آب سطحی در سال‌های مختلف در دسترس باشد یا نباشد متغیر و از ۱۵ تا ۴۰ درصد تغییر می‌کند (Anon, 1991). مؤسسهٔ بین‌المللی مدیریت آب[3] (IWMI) مطالعاتی در دو منطقهٔ پنجاب پاکستان اجام داد که در آنها از آب‌های سطحی و زیرزمینی به صورت تلفیقی استفاده می‌شد. تحقیقات نشان داد که استفاده از آب زیرزمینی جزیی جدایی ناپذیر از سیستم مزارع آبی است و دیگر اینکه در این دو منطقه ضابطه‌ای مشخص برای تعیین موقعیت چاه‌ها در طول کانال‌ها و تراکم چاه‌های حفر شده و مدیریت بهره‌برداری از کانال‌ها وجود ندارد (Anon, 1995). مؤسسه بین المللی مدیریت آب چگونگی مدیریت کشاورزان را در زمینهٔ استفادهٔ تلفیقی از شبکه‌های آبیاری در منطقهٔ بیهار هندوستان بررسی کرد. از نتایج تحقیق مشخص شد که چاه‌ها گزینهٔ مناسبی برای کشاورزان هستند و به دلیل اعتمادپذیری بالای تأمین آب از آنها می‌توان در جهت افزایش بهره‌وری به کار گرفته شوند (Anon, 1995). ناصحی ضمن بررسی وضعیت منابع آب زیرزمینی شبکهٔ آبیاری و زهکشی نرماب- چهل‌چای در دشت گنبد- مینودشت در استان گلستان با استفاده از مدل ریاضی MODFLOW پتانسیل برداشت آب زیرزمینی را در هر واحد زراعی براورد و با توجه به نیاز آبی هر واحد زراعی، مقدار کمبود آب مورد نیاز را نسبت به آب زیرزمینی تعیین کرد. این کمبودها در واحدهای زراعی مختلف از ۲۰ تا ۴۰ درصد متغیر است که باید از آب سطحی تأمین شوند. بنابراین، ظرفیت کانال‌ها فقط بر اساس آب سطحی مورد نیاز هر واحد زراعی تعیین می‌شود که نسبت به کل آب مورد نیاز هر واحد زراعی کمتر است و هزینه‌های احداث کانال‌ها کاهش می‌یابد. در

1- Irrigation Conveyance System Simulation- Performance Optimization Model
2- Simulated Annealing
3- International Water Management Institute

این طرح، بهره‌برداری از آب‌های سطحی و زیرزمینی جداگانه در نظر گرفته شده است (Nasehi, 2002). با توجه به مطالب ارائه شده تحقیقات شده حاکی از آن است که موضوع استفادهٔ تلفیقی از آب‌های سطحی و زیرزمینی در شبکه‌های آبیاری کمتر مورد توجه قرار گرفته و در موارد محدودی که به آن توجه شده بسیار ابتدایی بوده است و تعامل متقابل آب سطحی و زیرزمینی و رفتار غیرماندگار جریان در سطح شبکه و اثر آن بر عملکرد کانال‌ها نیز نادیده گرفته شده است. در مورد عوامل مدیریت جریان در شبکه، یا اصولاً بحثی به میان نیامده یا اگر آمده به صورت توصیفی و قضاوت‌های کارشناسی در شرایط بسیار ساده بحث بوده است.

هدف از این تحقیق، مدیریت بهینهٔ بهره‌برداری از کانال در حالت استفادهٔ تلفیقی از آب‌های سطحی و زیرزمینی با توجه به شاخص‌های بهره‌برداری راندمان، کفایت، پایداری، و عدالت در توزیع آب است. در این تحقیق، جهت شبیه‌سازی جریان غیرماندگار به وجود آمده از ورود آب زیرزمینی و تغییرات نیاز آبگیرهای کانال، از مدل هیدرودینامیک ICSS استفاده شد.

روش‌های مرسوم و کلاسیک بهینه‌سازی برای مسایلی کاربرد دارد که در آنها تابع هدف رابطه‌ای صریح و نسبتاً ساده با متغیرهای تصمیم‌گیری داشته باشد و تعداد متغیرها نیز محدود باشد. در مسئلهٔ مدیریت استفاده از آب‌های سطحی و زیرزمینی در شبکه‌های آبیاری، که متغیرهای تصمیم‌گیری طی فرایند پیچیدهٔ جریان غیرماندگار و در تعامل آب سطحی و زیرزمینی بر تابع هدف تأثیر می‌گذارند، امکان استفاده از روش‌های معمول بهینه‌سازی وجود ندارد. در این نوع مسایل، باید از روش‌های مناسب شبیه‌سازی- بهینه‌سازی استفاده کرد. بدین منظور در این تحقیق روش بهینه‌سازی SCE (Duan *et al.*, 1992) انتخاب شد که روشی ابتکاری با ساختار جستجوی تصادفی هوشمند است و به علاوه مدل بهینه‌سازی SCE توسعه یافت. جهت مدیریت بهینهٔ کانال‌های آبیاری در حالت استفاده تلفیقی از آب‌های سطحی و زیرزمینی، مدل شبیه‌سازی- بهینه‌سازی ICSS-SCE تهیه شد و جهت کانال L8 شبکهٔ آبیاری قزوین مورد استفاده قرار گرفت و عملکرد کانال در گزینه‌های مختلف تعیین شد.

مواد و روش‌ها

معرفی مدل ICSS

مدل هیدرودینامیکی ICSS را در سال ۱۹۸۵ مانز تهیه کرد (Manz, 1985). این مدل، شبیه‌سازی هیدرولیکی سیستم‌های انتقال و توزیع آب را که دارای تغییرات زمانی جریان ورودی و خروجی هستند انجام می‌دهد. این مدل همچنین قادر به شبیه‌سازی جریان‌های ماندگار و غیرماندگار در کانال‌های آبیاری با انواع شکل مقطع کانال همراه با طیف قابل توجهی از سازه‌ها توأم با جریانات گسترده ورودی و خروجی است. این مدل یک هستهٔ مرکزی دارد که معادلات جریان‌های غیرماندگار را در کانال‌های آبیاری حل می‌کند و شرایط مرزی و سازه‌های مختلف به صورت زیر برنامه‌هایی با آن تلفیق می‌شوند.

جریان غیرماندگار با حل معادلات غیرماندگار متغیر تدریجی مجاری روباز- معروف به معادلات سنت ونانت- شبیه‌سازی شده است که محققان جمله استرلکوف استخراج کرده‌اند (Strekloff, 1969). این معادلات به صورت زیر هستند:

$$\left(\frac{A}{B}\right)\frac{\partial v}{\partial x}+V\frac{\partial y}{\partial x}+\frac{\partial y}{\partial t}+\frac{V}{B}\left(A_x^y\right)-\frac{1}{B}\left(p-i\right)=0 \quad (۱)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t}+V\frac{\partial v}{\partial x}+g\frac{\partial y}{\partial x}+g\left(S_f-S_0\right)+\frac{V}{A}\left(p-i\right)=0 \quad (۲)$$

که در آنها،

y = عمق جریان؛ x= فاصله در طول کانال؛ p= جریان گسترده ورودی؛ A= سطح مقطع جریان؛ g= شتاب ثقل؛ S_0= شیب کف کانال؛ S_f= شیب خط انرژی در رابطهٔ مانینگ؛ i= جریان گستردهٔ خروجی، A_x^y =تغییرات سطح مقطع جریان نسبت به x با فرض y ثابت؛ B= عرض کانال در سطح فوقانی جریان؛ V= سرعت جریان؛ وt= زمان است. این معادلات از نظر ابعادی همگن می‌باشد و در هر سیستم ابعادی به کار می‌روند.

این معادلات با استفاده از روش تفاضل‌های محدود بر اساس سیستم چهار نقطه‌ای وزنی حل می‌شوند که آرمین آنها را ارائه داده است و دقت، همگرایی، پایداری، و صحت بالایی دارند (Amein, 1968).

روش بهینه‌سازی SCE

روش بهینه‌سازی SCE، که اصول و مبانی آن ابتدا جهت کالیبراسیون پارامترهای مدل‌های بارش- رواناب ارائه شده است، روشی بسیار قوی و کارا برای بسیاری از مسائل است (Duan *et al*., 1992). این روش براساس مفاهیم ترکیب روش‌های قطعی و تصادفی، دسته‌بندی، تکامل نظام‌گرای مجموعه‌ای از نقاط پخش شده در فضای جامعه به سمت بهبود سراسری و تکامل رقابتی به وجود آمده که کارایی آنها برای بهینه‌سازی سراسری به اثبات رسیده است (Duan *et al*., 1993). تاکنون از روش SCE در تحقیقات بسیاری استفاده شده است. کالیبراسیون پارامترهای مدل بارش- رواناب ساکرامنتا با استفاده از دو روش SCE و سیمپلکس[1] انجام شد. در این تحقیق، روش SCE نسبت به روش سیمپلکس مقادیر تابع هدف کمتری به دست آورد. علاوه بر این، تعداد ارزیابی‌های تابع هدف در روش SCE خیلی کمتر از روش سیمپلکس است (Sorooshian *et al*., 1993). همچنین جهت کالیبراسیون پارامترهای جریان پایه در مدل ARNO از این روش استفاده شده است (Abdulla *et al*., 1999). با استفاده از روش SCE، پارامترهای خاک غیراشباع برای حداقل‌سازی مجموع مربعات خطا بین تراز سطح آب چاه در حالات محاسباتی و مشاهداتی در آبخوان گوام غربی به‌کار برده شده است (Contractor & Schuurmans, 1993). با استفاده از این روش، پارامترهای مؤثر خاک جهت مدل نمودن رطوبت خاک در نواحی غیراشباع به دست آمده است (Mertens *et al*., 2004). روش بهینه‌سازی SCE جهت واسنجی پارامترهای هیدرولیکی شبکه‌های انتقال و توزیع آب به کار برده شده است. این محققان با ترکیب مدل EPANET- که یک مدل شبیه‌سازی هیدرولیکی جریان در شبکه‌های انتقال و توزیع آب است- با روش SCE، مدلی جهت تعیین پارامترهای بهینه در شبکه‌های انتقال و توزیع آب ارائه دادند (Kapelan *et al*., 2007). همچنین از این روش جهت محاسبهٔ رواناب ناشی از ذوب برف استفاده شده است (Sorman *et al*., 2009).

الگوریتم SCE

به طور کلی مراحل مختلف روش SCE به صورت زیر است (Duan *et al*., 1992):

- ایجاد نمونهٔ اولیه: ایجاد یک نمونهٔ تصادفی در فضای امکان‌پذیر (Ω) که دارای S نقطه است و به دست آوردن مقدار تابع هدف در هر یک از نقاط.
- مرتب‌سازی نقاط: نقاط S نمونه بر حسب تابع هدف به صورت صعودی مرتب می‌شوند (با فرض اینکه هدف به دست آوردن حداقل مقدار تابع است). نقاط مرتب شده در آرایه‌ای مانند D به صورت $D = \{x_i, f_i, i = 1,2,...,S\}$ قرار داده می‌شوند به‌صورتی‌که $i=1$ بیان کننده نقطه‌ای باشد که دارای کوچکترین مقدار تابع است.
- تقسیم‌بندی نقاط به جوامع: نقاط S نمونه را به P جامعه به صورتی تقسیم کرده که هر جامعه دارای m

1- Simplex

نقطه باشد. در واقع D با استفاده از رابطهٔ ۳ به جوامع $A^1, A^2, ..., A^P$ تبدیل می‌شوند که هر یک دارای m نقطه هستند.

$$A^k = \left\{ x_j^k, f_j^k \mid x_j^k = x_{k+P(j-1)}, f_j^k = f_{k+P(j-1)}, j = 1,..., m \right\} \quad (۳)$$

بر اساس این رابطهٔ جامعهٔ اول شامل تمام نقاط مرتب شده با شماره‌های $P(j-1)+1$ و جامعهٔ دوم شامل تمام نقاط مرتب شده با شماره‌های $P(j-1)+2$ است و به همین ترتیب دیگر اعضای جوامع دیگر به دست می‌آیند.

- توسعه جامعه: هر جامعه A^k , $k = 1,..., P$ را باید بر اساس الگوریتم تکامل رقابتی (CCE[1]) جامعه توسعه داد. این روش در ادامه توضیح داده شده است.
- اختلاط جوامع: نقاط جوامع مختلف را با یکدیگر ترکیب کرده به صورتی که تنها یک نمونه از نقاط وجود داشته باشد. یعنی جوامع $A^1, A^2,...,A^P$ را دوباره به صورت $D = \left\{ A^k, k = 1,..., P \right\}$ در D جایگزین می‌شوند.
- بررسی شرط توقف: در صورت ارضای هر کدام از معیارها و شروط توقف، برنامه متوقف و جواب‌های نهایی به عنوان پاسخ بهینه ثبت می‌شود، در غیر این صورت فرایند بهینه‌سازی با بازگشت به مرحلهٔ ۲ و تکرار مراحل ادامه می‌یابد.

الگوریتم CCE

تکامل رقابتی هر جامعه بخش مهمی از الگوریتم SCE است. این روش برای توسعهٔ هر جامعه یا در واقع تولید مثل جامعه یا تولید خصوصیات بهتر مورد احتیاج است. فرایند تکامل رقابتی **(CCE)** بر این اساس عمل می‌کند که در طول تولید مثل و زاد و ولد، والدین با خصوصیات بهتر نسبت به والدین با خصوصیات ضعیف‌تر امکان مشارکت بیشتری در تولید مثل دارند. الگوریتم CCE به صورت زیر است (Duan *et al*., 1992):

۱- یک زیرمجموعه q نقطه‌ای $u_1, u_2,..., u_q$ را از جامعه A^k به صورت تصادفی انتخاب کنید.

۲- نقاط انتخاب شده در مرحلهٔ فوق والدین نام دارند. آنها را در آرایه $B = \left\{ u_i, v_i, i = 1,..., q \right\}$ قرار دهید به صورتی که v_i برابر با مقدار تابع هدف در نقطهٔ u_i باشد. موقعیت A^k را که جهت ساختن B استفاده شده است در L ذخیره کنید.

۳- تولید فرزندان:

الف- B و L را طوری مرتب کنید که نقاط q بر اساس مقدار افزایش تابع هدف مرتب شده باشند. سپس نقطه‌ای که دارای بدترین ارزش است کنار بگذارید و مرکز ثقل بقیه نقاط (g) را با استفاده از رابطهٔ ۴ محاسبه کنید.

$$g = \left[\frac{1}{(q-1)} \right] \sum_{j=1}^{q-1} u_j \quad (۴)$$

ب- با توجه به موقعیت مرکز ثقل و نقطه‌ای که دارای بدترین ارزش بود، (u_q)، نقطه‌ای جدید (r) با استفاده از رابطهٔ ۵ تعیین کنید. این گام را انعکاس[2] می‌نامند. در این گام، نقطه‌ای جدید تولید می‌شود که اصطلاحاً انعکاس بدترین نقطهٔ قبلی حول مرکز ثقل است.

$$r = 2g - u_q \quad (۵)$$

ج- اگر نقطهٔ جدید به دست آمده درون محدودهٔ جستجو قرار داشت، f_r ، مقدار تابع هدف در r را محاسبه کنید و به گام (د) بروید. در غیر این صورت

1- Competitive Complex Evolution
2- Reflection
3- Mutation

نقطه‌ای مانند z را به صورت تصادفی در فضای امکان‌پذیر تولید کنید، f_z را محاسبه کنید، و سپس قرار دهید: $r = z$ و $f_r = f_z$. این گام اصطلاحاً جهش[1] نام دارد که موجب تقویت اکتشاف و خروج از نقاط بهینه موضعی می‌شود.

د- اگر نقطهٔ جدید ایجاد شده در مرحلهٔ انعکاس بهتر از بدترین نقطه موجود در زیر مجموعه بود، یعنی $f_r < f_q$ باشد، آنگاه نقطهٔ جدید پذیرفته شده، r، را جایگزین u_q کنید و به گام (م) بروید. در غیر اینصورت نقطهٔ c را که در وسط فاصلهٔ مرکز ثقل و بدترین نقطه قرار دارد به صورت $c = (g + u_q)/2$ محاسبه کنید و تابع هدف را در آن نقطه به دست آورید. این مرحله اصطلاحاً گام انقباض[2] نام دارد.

ل- اگر نقطهٔ جدید ایجاد شده در گام انقباض دارای ارزش بهتری از بدترین نقطه بود یعنی $f_c < f_q$ ، این نقطهٔ پذیرفته شده، c را جایگزین u_q کنید و به مرحلهٔ (م) بروید. در غیر اینصورت یک نقطهٔ تصادفی z درون فضای امکان‌پذیر تولید کنید و مقدار تابع در آن نقطه، f_z را محاسبه و z را جایگزین u_q کنید. (گام جهش).

م- مراحل (الف) تا (ل) را α بار تکرار کنید. مقدار $\alpha > 1$ یک پارامتر ویژه است که تعداد توالی تولید فرزندان را توسط اعضای زیرمجموعه‌ها تعیین می‌کند. مقدار این پارامتر را با توجه به نوع مسئله، کاربر تعیین می‌کند.

۴- گذاشتن فرزندان به جای والدین: B را با استفاده از موقعیت اصلی ذخیره شده در L درون جامعه A^k جایگذاری کنید. سپس A^k را بر اساس افزایش مقدار تابع هدف مرتب کنید.

۵- مراحل ۲ تا ۴ را β بار تکرار کنید. مقدار $\beta > 1$ یک پارامتر ویژه است که تعداد گام‌های تکاملی هر جامعه را مشخص می‌کند که قبل از اختلاط با دیگر جوامع باید طی کند.

بر اساس مفاهیم و الگوریتم SCE، یک مدل کامپیوتری به زبان فرترن جهت بهینه‌سازی تهیه شد. مدل تهیه شده با مدل شبیه‌سازی ICSS تلفیق شد و مدل شبیه‌سازی- بهینه‌سازی ICSS-SCE[3] به دست آمد.

متغیرهای تصمیم‌گیری و تابع هدف

در این تحقیق، متغیرهای تصمیم‌گیری میزان تنظیم سازه‌هاست که باید به نحوی تعیین شود که عملکرد کانال بهینه باشد. جهت ارزیابی عملکرد کانال، در این تحقیق از شاخص‌های راندمان، کفایت، عدالت، و پایداری در تحویل استفاده شده است که مولدن و گیتس ارائه داده‌اند. تعریف این شاخص‌ها به صورت زیر است (Molden & Gates, 1990):

کفایت تحویل

$$MPA = \frac{1}{T}\sum_{T}\frac{1}{N}\sum_{N}(P_A),\ \begin{cases} Q_D < Q_R \\ P_A = \dfrac{Q_D}{Q_R} \end{cases},\ \begin{cases} Q_D > Q_R \\ P_A = 1 \end{cases} \quad (۶)$$

راندمان تحویل

$$MPF = \frac{1}{T}\sum_{T}\frac{1}{N}\sum_{N}(P_F),\ \begin{cases} Q_D > Q_R \\ P_F = \dfrac{Q_R}{Q_D} \end{cases},\ \begin{cases} Q_D < Q_R \\ P_F = 1 \end{cases} \quad (۷)$$

عدالت در تحویل

$$MPE = \frac{1}{T}\sum_{T} CV_N\left(\frac{Q_D}{Q_R}\right) \quad (۸)$$

1- Mutation
2- Contraction
3- Irrigation Conveyance System Simulation- Shuffled Complex Evolution

پایداری در تحویل

$$MPD = \frac{1}{N}\sum_{N} CV_T\left(\frac{Q_D}{Q_R}\right) \qquad (۹)$$

که در آنها،

Q_D = دبی واقعی تحویلی به هر دریچهٔ آبگیر؛ Q_R = دبی مورد نیاز هر دریچهٔ آبگیر جهت تأمین اراضی پایین دست آن؛ N = تعداد دریچه‌های آبگیر؛ T = تعداد گام‌های زمانی مناسب در یک دورهٔ تحویل (وابسته به طول دوره بهره‌برداری و Δt)؛ $CV_N\left(\frac{Q_D}{Q_R}\right)$ = انحراف معیار نسبت Q_D/Q_R تقسیم بر متوسط مقادیر Q_D/Q_R برای تک تک آبگیرهای موجود در طول کانال در یک گام زمانی (با عنوان ضریب تغییرات مکانی نسبت به Q_D/Q_R)؛ و $CV_T\left(\frac{Q_D}{Q_R}\right)$ = انحراف معیار نسبت Q_D/Q_R تقسیم بر متوسط مقادیر Q_D/Q_R در طول زمان و برای یک آبگیر (با عنوان ضریب تغییرات زمانی نسبت Q_D/Q_R) است.

با توجه به روابط ۶ تا ۹، مقدار ایده‌آل شاخص‌های کفایت و راندمان تحویل برابر با ۱ و مقدار ایده‌آل شاخص‌های عدالت و پایداری در تحویل صفر است. جهت در نظر گرفتن تأثیر همهٔ این شاخص‌ها یک ترکیب خطی از آنها به عنوان تابع هدف به صورت زیر در نظر گرفته شد که هرچه مقدار آن کمتر باشد عملکرد کانال مطلوب‌تر است.

$$OF = (1-MPA)+(1-MPF)+MPE+MPD \qquad (۱۰)$$

معرفی کانال L8 شبکه آبیاری قزوین

کانال L8 یک کانال بتنی با مقطع ذوزنقه‌ای است که از ابتدای کانال اصلی در فاصلهٔ ۷۳۶۳۰ متری می‌کند. حداکثر ظرفیت این کانال در ابتدا و انتهای آن به ترتیب ۴/۳ و ۰/۷ متر مکعب بر ثانیه است؛ این کانال با طول ۱۸۹۰۰ متر نیاز آبی اراضی پایین دست را تأمین می‌کند. چاه‌های تلفیقی در ابتدای این کانال قرار دارند و هدف از این تحقیق نیز تعیین مدیریت بهینه بهره‌برداری از کانال در حالت استفادهٔ تلفیقی از آب‌های سطحی و زیرزمینی است و از این رو فقط ۷۵۵۰ متر از ابتدای کانال مورد بررسی قرار می‌گیرد. عرض کف کانال L8 از ابتدا تا فاصله ۲۸۲۱ متری برابر با ۱/۵ و پس از آن تا انتها برابر با ۱/۲ متر است. مقطع کانال ذوزنقه‌ای و شیب جانبی کانال در تمام طول مسیر ۱/۵ به ۱ طراحی شده است. متوسط ضریب زبری مانینگ در طول مسیر برابر با ۰/۰۱۷ گزارش شده است. این کانال ۵ دریچهٔ آبگیر نیرپیک دارد. در پایین‌دست هر یک از این آبگیرها به فاصلهٔ ۲ متری یک دریچه آمیل جهت کنترل سطح آب تعبیه شده است. جهت تأمین بخشی از آب مورد نیاز اراضی تحت پوشش این کانال، ۵ چاه تلفیقی در نظر گرفته شده است که دبی آنها وارد کانال می‌شود. در جدول ۱ مشخصات سازه‌های کانال ذکر شده است (Anon, 2000). سازه‌های کانال L8 از نوع خودکار هیدرولیکی هستند و دستورالعمل بهره‌برداری خاص نیاز ندارند. با توجه به این مسئله، به منظور ارائهٔ قابلیت‌های مدل ISCC-SCE در تعیین دستورالعمل بهره‌برداری بهینه، سازه‌های این کانال با قابلیت تنظیم دستی در نظر گرفته شدند. به‌طوری‌که دریچه‌های آبگیر کشوی و سازهٔ آب‌بند به ترتیب جایگزین دریچه‌های آبگیر نیرپیک و سازه‌های کنترل آمیل شدند. بنابراین، کانال مورد مطالعه از نظر مشخصات هندسی کلی کانال L8 است ولی از نظر سازه‌ای مشابه آن کانال نیست.

روش انجام تحقیق

به منظور کاربرد مدل تهیه شده در مدیریت بهینه بهره‌برداری از آب‌های سطحی و زیرزمینی در کانال‌های آبیاری، دو حالت افزایش مجموع نیاز آبگیرها به میزان

حدوداً ۲۵ و ۴۰ درصد مطابق جدول ۲ در نظر گرفته شده است. افزایش نیازها باید با دبی چاه‌های تلفیقی موجود در مسیر کانال مطابق جدول ۳ که همزمان وارد کانال می‌شود تأمین شود. در هریک از دو حالت افزایش نیاز آبگیرها دو گزینه در نظر گرفته می‌شود، به‌طوری‌که یک‌بار بدون بهینه‌سازی یعنی بهره‌برداری کانال و سازه‌های دستی (آب بند و دریچه کشوی) به صورت معمول اجرا می‌شود. در این نوع بهره‌برداری پس از ورود همزمان آب زیرزمینی به کانال، دریچه‌های آبگیر با توجه به رقوم سطح آب موجود در آب‌بندها که سعی می‌شود ثابت نگه داشته شود جهت دبی مورد نیاز تنظیم می‌شوند. سپس با بهینه‌سازی با استفاده از مدل ICSS-SCE دستورالعمل بهره‌برداری بهینه به دست می‌آید. بنابراین، در مجموع چهار گزینهٔ بهره‌برداری در نظر گرفته و برای هر یک شاخص‌های بهره‌برداری و تابع هدف نیز محاسبه شده است.

جدول ۱- مشخصات سازه‌های کانال L8

سازه	فاصله از ابتدای کانال (متر)	نوع سازه
آبگیر ابتدای کانال	۰	نیرپیک
دریچه آبگیر ۱	۱۲۴	نیرپیک
سازه کنترل ۱	۱۲۶	آمیل
چاه تلفیقی ۱	۲۰۰	-
چاه تلفیقی ۲	۱۲۵۰	-
دریچه آبگیر ۲	۲۸۲۱	نیرپیک
سازه کنترل ۲	۲۸۲۳	آمیل
چاه تلفیقی ۳	۲۹۰۰	-
دریچه آبگیر ۳	۳۶۴۸	نیرپیک
سازه کنترل ۳	۳۶۵۰	آمیل
چاه تلفیقی ۴	۴۰۵۰	-
چاه تلفیقی ۵	۶۳۵۰	-
دریچه آبگیر ۴	۶۴۰۸	نیرپیک
سازه کنترل ۴	۶۴۱۰	آمیل
دریچه آبگیر ۵	۷۵۴۸	نیرپیک
سازه کنترل ۵	۷۵۵۰	آمیل

جدول ۲- نیاز اولیه و افزایش نیاز آبگیرها در حالات حدود ۲۵ و ۴۰ درصد افزایش نیاز آبگیرها (متر مکعب بر ثانیه)

شماره آبگیر	حالت اولیه		حالت ثانویه
	۲۵ درصد	۴۰ درصد	
۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱۵
۲	۰/۱	۰/۱	۰/۱۵
۳	۰/۲	۰/۱۵	۰/۲۵
۴	۰/۲	۰/۱	۰/۲۵
۵	۰/۲	۰/۲	۰/۳۰
پایین دست	۰/۴	۰/۴	۰/۴
مجموع	۱/۲	۱/۰۵	۱/۵

جدول ۳- دبی چاه‌های تلفیقی در حالات حدود ۲۵ و ۴۰ درصد افزایش نیاز آبگیرها (لیتر بر ثانیه)

مجموع درصد افزایش نیاز	شماره چاه تلفیقی					مجموع
آبگیرها	۱	۲	۳	۴	۵	برداشت
۲۵ درصد	۷۲	۵۰	۵۸	۴۸	۷۲	۳۰۰
۴۰ درصد	۱۰۷	۸۵	۹۱	۵۹	۱۰۸	۴۵۰

گزینه‌های MI25E و MI25O

در این گزینه‌ها مجموع افزایش نیاز آبگیرها حدود ۲۵ درصد است. دبی کانال در حالت اولیه یعنی حالتی که کلیه نیاز آبگیرها از آب سطحی تأمین شوند، ۱/۲ متر مکعب بر ثانیه و دبی چاه‌های تلفیقی صفر است. نیاز آبگیرهای ۱ تا ۵ و پایین‌دست در حالت اولیه و ثانویه مطابق جدول ۲ است. حالت ثانویه حالتی است که افزایش نیاز عملی شده است و نیاز آبگیرها علاوه بر آب سطحی از آب زیرزمینی نیز تأمین می‌شود. جهت تامین این نیاز که در مجموع برابر با ۰/۳ متر مکعب بر ثانیه است دبی همهٔ چاه‌های تلفیقی مطابق جدول ۳ همزمان وارد کانال می‌شود. در گزینهٔ MI25E، دبی‌های مورد نیاز در حالت ثانویه به صورت دستی و در حالت وضع معمول[1] انجام می‌شوند. در گزینهٔ MI25O، میزان تنظیم سازه‌های آب‌بند و آبگیر با بهینه[2] با مدل ICSS-SCE تعیین می‌شود. عملکرد سیستم بر اساس مقادیر شاخص‌ها و تابع هدف برای تحویل ۲ ساعته آب به آبگیرها محاسبه می‌شود.

گزینه‌های MI40E و MI40O

در این گزینه‌ها مجموع افزایش نیاز آبگیرها حدود ۴۰ درصد است. دبی کانال در حالت اولیه ۱/۰۵ متر مکعب بر ثانیه و دبی چاه‌های تلفیقی صفر است. نیاز آبگیرهای ۱ تا ۵ و پایین‌دست در حالت اولیه و ثانویه مطابق جدول ۲ است. جهت تأمین این افزایش نیاز که در مجموع برابر با ۰/۴۵ متر مکعب بر ثانیه است دبی همهٔ چاه‌های تلفیقی مطابق جدول ۳ همزمان وارد کانال می‌شود. در گزینهٔ MI40E، آبگیرها جهت برداشت دبی‌های مورد نیاز در حالت ثانویه به صورت دستی و در حالت وضع معمول بهره‌برداری و تنظیم می‌شود ولی در گزینهٔ MI40O میزان

1- Existing 2- Optimal

تنظیم سازه‌های آب‌بند و آبگیر به صورت بهینه با مدل ICSS-SCE تعیین می‌شود. عملکرد سیستم بر اساس مقادیر شاخص‌ها و تابع هدف برای تحویل ۲ ساعته آب به آبگیرها محاسبه می‌شود.

نتایج و بحث

در جداول ۴ و ۵، شاخص‌ها برای آبگیرهای مختلف و کل کانال به ترتیب در حالات ۲۵ و ۴۰ درصد افزایش نیاز آبگیرها ارائه شده است. مقادیر راندمان و کفایت آبگیر ۱ در هر چهار گزینه ایده‌ال است. دلیل این امر آن است که در بالادست آبگیر ۱ چاه تلفیقی وجود ندارد. بنابراین، این آبگیر تحت تاثیر جریان غیرماندگار قرار نمی‌گیرد. بیشترین میزان بهبود در مقدار کفایت در هر دو حالت ۲۵ و ۴۰ درصد افزایش نیاز آبگیرها در آبگیر ۴ ایجاد شده است که به ترتیب برابر با ۰/۴۷ و ۱/۴۶ است. چنین شرایطی به دلیل آن است که در بازهٔ آبگیر ۴ تا آبگیر بالادست آن دو چاه تلفیقی وجود دارد و این آبگیر تحت تاثیر جریان غیرماندگار ناشی از ورود دبی دو چاه تلفیقی قرار می‌گیرد. میزان بهبود شاخص پایداری نسبت به دو شاخص دیگر در هر دو حالت خیلی بیشتر است به طوری که در هر دو حالت، کمترین میزان بهبود این شاخص در آبگیر ۱ و بیشترین آن در آبگیر ۲ ایجاد شده است.

به طور کلی، مقادیر بهبود ایجاد شده در حالت ۴۰ درصد افزایش نیاز آبگیرها نسبت به مقادیر بهبود ایجاد شده در حالت ۲۵ درصد افزایش نیاز آبگیرها بیشتر است. این امر به دلیل زیاد بودن افزایش نیاز آبگیرها و دبی چاه‌های تلفیقی در حالت ۴۰ درصدی نسبت به حالت ۲۵ درصدی است که سبب افزایش تأثیر جریان غیرماندگار می‌شود.

جدول ۴- شاخص‌های راندمان، کفایت و پایداری آبگیرها در گزینه‌های MI25E و MI25O

شاخص	مقدار ایده‌ال	گزینه	آبگیر ۱	آبگیر ۲	آبگیر ۳	آبگیر ۴	آبگیر ۵	کل کانال
MPF	۱	MI25E	۱/۰۰	۰/۹۹۷۳	۰/۹۹۵۲	۰/۹۸۷۸	۰/۹۹۹۷	۰/۹۹۶۰
		MI25O	۱/۰۰	۰/۹۹۷۹	۰/۹۹۵۶	۰/۹۸۸۷	۰/۹۹۹۸	۰/۹۹۶۴
		بهبود (درصد)	۰/۰۰	۰/۰۶	۰/۰۴	۰/۰۹	۰/۰۱	۰/۰۴
MPA	۱	MI25E	۱/۰۰	۰/۹۹۲۵	۰/۹۹۴۲	۰/۹۸۵۷	۰/۹۹۹۶	۰/۹۹۴۴
		MI25O	۱/۰۰	۰/۹۹۶۹	۰/۹۹۸۱	۰/۹۹۰۳	۰/۹۹۹۷	۰/۹۹۷۱
		بهبود (درصد)	۰/۰۰	۰/۴۴	۰/۳۹	۰/۴۷	۰/۰۱	۰/۲۷
MPD	۰	MI25E	۰/۰۰۲۵	۰/۰۲۱۰	۰/۰۱۹۱	۰/۰۱۹۲	۰/۰۱۲۷	۰/۰۱۴۹
		MI25O	۰/۰۰۲۱	۰/۰۱۰۲	۰/۰۱۵۵	۰/۰۰۹۶	۰/۰۰۶۵	۰/۰۰۸۸
		بهبود (درصد)	۱۶/۰۰	۵۱/۴۳	۱۸/۸۵	۵۰/۰۰	۴۸/۸۲	۴۰/۹۴

جدول ۵- شاخص‌های راندمان، کفایت و پایداری آبگیرها در گزینه‌های MI40E و MI40O

شاخص	مقدار ایده‌ال	گزینه	آبگیر ۱	۲	۳	۴	۵	کل کانال
MPF	۱	MI40E	۰/۹۹۶۹	۰/۹۸۷۶	۰/۹۹۲۸	۰/۹۸۳۲	۰/۹۸۲۹	۰/۹۸۸۷
		MI40O	۰/۹۹۹۹	۰/۹۹۹۲	۰/۹۹۷۲	۰/۹۹۲۹	۰/۹۸۶۸	۰/۹۹۵۲
		بهبود (درصد)	۰/۳۰	۱/۱۷	۰/۴۴	۰/۹۹	۰/۴۰	۰/۶۶
MPA	۱	MI40E	۰/۹۹۶۸	۰/۹۸۴۷	۰/۹۹۲۵	۰/۹۷۴۶	۰/۹۷۲۹	۰/۹۸۴۳
		MI40O	۱/۰۰	۰/۹۹۶۲	۰/۹۹۶۱	۰/۹۸۸۸	۰/۹۷۸۶	۰/۹۹۱۹
		بهبود (درصد)	۰/۳۲	۱/۱۷	۰/۳۶	۱/۴۶	۰/۵۹	۰/۷۷
MPD	۰	MI40E	۰/۰۱۲۸	۰/۰۴۶۱	۰/۰۲۹۵	۰/۰۳۸۷	۰/۰۲۴۶	۰/۰۳۰۳
		MI40O	۰/۰۰۹۵	۰/۰۲۰۷	۰/۰۱۸۴	۰/۰۱۹۵	۰/۰۱۴۶	۰/۰۱۶۵
		بهبود (درصد)	۲۵/۷۸	۵۵/۱۰	۳۷/۶۳	۴۹/۶۱	۴۰/۶۵	۴۵/۵۴

شاخص‌های بهره‌برداری و تابع هدف در دو حالت برای کل کانال در جدول ۶ ارائه شده است. پتانسیل بهبود تابع هدف در گزینهٔ بهینه نسبت به گزینهٔ اجرای دستی و وضع معمول برای هر دو حالت برابر با ۳۹/۸۶ و ۴۸/۱۶ درصد است. این امر نشان می‌دهد که تنظیم سازه‌های کنترل و آبگیر طبق دستورالعمل بهره‌برداری بهینه تأثیر قابل توجهی بر بهبود عملکرد خواهد داشت.

جدول ٦- شاخص‌های بهره‌برداری و تابع هدف در حالات حدود ۲۵ و ٤٠ درصد افزایش نیاز آبگیرها

	شاخص	MPF	MPA	MPE	MPD	OF
	مقدار ایده‌ال	۱	۱	۰	۰	۰
۲۵ درصد	MI25E	۰/۹۹۶۰	۰/۹۹۴۴	۰/۰۱۷۳	۰/۰۱۴۹	۰/۰۴۱۹
	MI25O	۰/۹۹۶۴	۰/۹۹۷۱	۰/۰۰۹۸	۰/۰۰۸۸	۰/۰۲۵۲
	بهبود (درصد)	۰/۰۴	۰/۲۷	۴۳/۳۵	۴۰/۹۴	۳۹/۸۶
۴۰ درصد	MI40E	۰/۹۸۸۷	۰/۹۸۴۳	۰/۰۳۴۹	۰/۰۳۰۳	۰/۰۹۲۲
	MI40O	۰/۹۹۵۲	۰/۹۹۱۹	۰/۰۱۸۴	۰/۰۱۶۵	۰/۰۴۷۸
	بهبود (درصد)	۰/۶۶	۰/۷۷	۴۷/۲۸	۴۵/۵۴	۴۸/۱۶

کمترین و بیشترین درصد بهبود در هر دو حالت به ترتیب در شاخص‌های راندمان تحویل و عدالت در تحویل ایجاد شده است. با توجه به اینکه در این گزینه‌ها نیاز همهٔ آبگیرها افزایش می‌یابد موج مثبت ناشی از ورود دبی چاه‌های تلفیقی به کانال صرف تأمین نیاز آبگیرها می‌شود. بنابراین، در گزینه‌های بهره‌برداری وضع معمول، آبگیرها بیشتر از نیاز آبگیری نمی‌کنند لذا شاخص راندمان تحویل در وضع معمول به مقدار ایده‌ال بسیار نزدیک است و در شرایط بهینه نیز تغییر چندانی نکرده است. ورود دبی چاه‌های تلفیقی به صورت همزمان و همچنین افزایش همزمان دبی مورد نیاز آبگیرها در این گزینه‌ها شرایط هیدرولیکی پیچیده‌ای به

وجود می‌آورد که باعث می‌شود عدالت در تحویل در شرایط بهینه نسبت به وضع معمول و همچنین پایداری در هر دو حالت به شکلی چشمگیر بهبود یابد.

معمولاً در بهره‌برداری به صورت دستی و وضع معمول تنظیم سازه‌ها برای تحویل مناسب جریان به هر آبگیر خوب اجرا می‌شود و به تغییرات زمانی و مکانی جریان تحویلی به آبگیرها کمتر توجه می‌شود. در واقع، شخص بهره‌بردار هر آبگیر را جداگانه و موضعی[1] در نظر می‌گیرد. بنابراین در شاخص‌های راندمان و کفایت در گزینه‌های بهینه نسبت به گزینه‌های وضع معمول، بهبود قابل ملاحظه‌ای توجهی دیده نمی‌شود. ولی در گزینه‌های بهینه، سراسر[2] کانال در کل زمان بهره‌برداری توسط مدل ICSS-SCE در نظر گرفته می‌شود. بنابراین، درصد بهبود شاخص‌های عدالت و پایداری نسبت به شاخص‌های راندمان و کفایت، در گزینه‌های بهینه نسبت به گزینه‌های وضع معمول به مراتب بیشتر است. در وضع معمول بهره‌برداری تلفیقی، پس از ورود همزمان جریان آب زیرزمینی به کانال، دریچه‌های آبگیر با توجه به رقوم سطح آب موجود در آب‌بندها که سعی می‌شود ثابت نگه داشته شود، جهت دریافت دبی مورد نیاز تنظیم می‌شوند. بنابراین در حالت وضع معمول برای تأمین این نیاز آبگیرها فقط بازشدگی دریچه‌ها تغییر داده می‌شود در حالی که در گزینه‌های بهینه تغییرات هم در تنظیم آب‌بندها اعمال می‌شود و هم در بازشدگی دریچه‌ها. چنین امری در کنار تعیین میزان تنظیم سازه‌ها به صورت بهینه باعث می‌شود شاخص‌ها در گزینه‌های بهینه، در مقایسه با گزینه‌های وضع معمول بهره‌برداری، بهبود یابد.

نتیجه‌گیری

مدیریت بهینه شبکه‌های آبیاری، به خصوص در شرایط بهره‌برداری تلفیقی آب سطحی و زیرزمینی که بسیار پیچیده است، بدون استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی- بهینه‌سازی مقدور نخواهد بود. مدل توسعه یافته برای این منظور از تلفیق مدل هیدرودینامیک ICSS و روش بهینه‌سازی SCE به دست آده است که روش ابتکاری جستجوی هوشمند است. کاربرد مدل توسعه یافته در کانال L8 شبکه آبیاری قزوین نشان داد که استفاده از دستورالعمل بهره‌برداری بهینه در این شرایط موجب بهبود چشمگیر عملکرد کانال و آبگیرها می‌شود تا آنجا که عملکرد کانال حدود ۴۰ تا ۴۸ درصد بهبود خواهد یافت. در حالت استفاده تلفیقی از آب سطحی و زیرزمینی، مدل تهیه شده قابلیت تعیین دستورالعمل بهینه بهره‌برداری از کانال‌های آبیاری را به خوبی دارد.

مراجع

Abdulla, F. A., Lettenmaier, D. P. and Liang, X. 1999. Estimation of the ARNO model baseflow parameters using daily stream flow data. J. Hydrol. 222, 37-54.

Amein, M. 1968. An implicit method for numerical flood routing. J. Water Resour. Res. 4(3): 719-726.

Anon. 1991. First phase report on conjunctive use of surface and ground water resources in Chamchamal plain, Ab & Khak Consulting Engineering. (in Farsi)

Anon. 1995. Expanding the frontiers of irrigation management research. A report of conjunctive use of surface and ground water in Pakistan and India. IWMI.

1- Local 2- Global

Anon. 2000. The reason of no achievement to long term program of water sell and distribution in Qazvin irrigation network. Professional Office of Operation Company from Qazvin Irrigation Network. (in Farsi)

Contractor, D. N. and Schuurmans, W. 1993. Informed use and potential pitfalls of canal models. J. Irrig. Drain. Eng. ASCE. 119(4): 663-672.

Duan, Q., Sorooshian, S. and Gupta, V. K. 1992. Effective and efficient global optimization for conceptual Rainfall-Runoff models. Water Resour. Res. 28(4): 2493-2508.

Duan, Q., Gupta, V. K. and Sorooshian, S. 1993. Shuffled complex evolution approach for effective and efficient global minimization. J. Optimiz. Theory Appl. 76(3): 501-521.

Kapelan, Z. S., Savic, D. A. and Walters, G. A. 2007. Calibration of Water Distribution Hydraulic Models Using a Bayesian-Type Procedure. J. Hydraul. Eng. ASCE. 133(8): 927-936.

Manz, D. H. 1985. System analysis of irrigation conveyance system. Ph.D Thesis. Department of Civil Engineering. University of Alberta. Edmonton. Alberta. Canada.

Mertens, J., Madsen, H., Feyen, L., Jacques, D. and Feyen, J. 2004. Including prior information in the estimation of effective soil parameters in unsaturated zone modeling. J. Hydrol. 294, 251-269.

Mohseni Movahed, S. A. 2002. Mathematical model development of irrigation canals hydraulic performance Optimization using simulated annealing and determination of weighting performance indicators. Ph.D. Thesis. Faculty of Agriculture. Tarbiat Modarres University. Tehran. Iran. (in Farsi)

Molden, D. J. and Gates, T. K. 1990. Performance measures for evaluation of irrigation water delivery systems. J. Irrig. Drain. Eng. ASCE. 116(6): 804-822.

Monem, M. J. 1994. Performance evaluation and optimization of irrigation canal system using Genetic Algorithm. Ph.D. Thesis. Department of Civil Engineering. Calgary University. Alberta. Canada.

Nasehi, M. 2002. Conjunctive use of surface and ground water for optimization of irrigation canals discharge. Research Report. IWMI. (in Farsi)

Sorman, A. A., Sensoy, A., Tekeli, A. E., Sorman, A. U. and Akyurek, Z. 2009. Modelling and forecasting snowmelt runoff process using the HBV model in the eastern part of Turkey. Hydrological Processes. 23, 1031-1040.

Sorooshian, S., Duan, Q. and Gupta, V. K. 1993. Calibration of Rainfall-Runoff models: application of global optimization to the Sacramento soil moisture accounting model. Water Resour. Res. 29(4): 1185-1194.

Strekloff, T. 1969. One dimensional equation of open channel flow. J. Hydraul. Div. ASCE. 7(4): 861-876.

Journal of Agricultural Engineering Research/Vol.11/No.3/2010/P: 27-40

Optimal Operation of Irrigation Canals with Conjunctive Use of Surface and Ground Water

A. R. Emadi*, M. J. Monem and K. Mohamadi

* Corresponding Author: Assistant Professor, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, P. O. Box: 578, Sari, Iran. E-mail: emadia355@yahoo.com

The conjunctive use of surface and groundwater in irrigation networks influences the performance of canals. One condition of conjunctive use is to add the groundwater to the surface water via a canal to satisfy demand. Management and operation of the canal is a complex task that must consider demand variation and groundwater entering the canal. The variety of decision variables in conjunctive use requires the use of optimization techniques to determine optimal operation. Simulation models should be combined with optimization models for this purpose. In this research, an irrigation conveyance system simulation (ICSS) hydrodynamic model was used to simulate the flow in an irrigation canal. A combined optimization technique was used that considered the complex and implicit relations between the objective function and decision variables. A model based on the shuffled complex evolution (SCE) optimization technique, a heuristic intelligent search technique, was used to develop an ICSS-SCE model. The proposed model was applied to the L8 canal of the Qazvin irrigation network, consisting of five conjunctive wells. Two options (25 and 40%) for demand increase provided by groundwater was considered. For each option, regular and optimum operations (four options in total) were taken into account. Optimal control settings (for water flow) were determined and canal performance for each option was calculated using the ICSS-SCE model. The results showed that setting controls according to optimal recommendations influenced by conjunctive use led to considerable performance improvement of the canal and intakes. The objective function of the canal was improved in two cases by 40-48%. In general, it was concluded that the proposed model was capable of determining optimal operation of the irrigation canals under conjunctive surface and groundwater use.

Key Words: Conjunctive Use, Operation, Optimal Management, Irrigation Canals, SCE