



## Optimization of Multipurpose Reservoir Systems Operation using Cellular Automata

Z. Nourali<sup>1</sup>, S.J. Mousavi<sup>2\*</sup> and S.S. Ghidary<sup>3</sup>

### Abstract

This study employs cellular automata (CA) to deal with the optimal operation of multipurpose reservoir systems functioning for water supply to consumptive agricultural demands, hydropower generation and minimum environmental flow purposes. Discrete time instances (beginning of monthly time periods) are taken as cells and storage volumes at these instances are considered as the states of the cells. The CA updating rule is derived from the analytical optimization of the local objective functions in presence of nonlinear hydropower equations. Additionally, the sub-problem of the optimal water allocation to different downstream users is solved using Lagrange multipliers technique. The proposed method is used to solve the nonlinear, non-convex operation optimization of Balarud reservoir and its hydropower plant as a real case study. The performance of the method is compared with those of the gradient-based optimization methods and Genetic algorithm for periods of 5, 20 and 44 years. The results show that the proposed cellular automata-based optimization model is able to find solutions with acceptable quality from the optimality perspective while rendering considerable reduction in the required computational load.

**Keywords:** Optimization, Reservoir Operation, Multipurpose, Cellular Automata.

Received: June 6, 2017

Accepted: October 27, 2017

## بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخازن سدهای چندمنظوره با استفاده از اتوماتای سلولی

زهرا نورعلی<sup>۱</sup>، سیدجمشید موسوی<sup>۲\*</sup> و سعید شیرینی قیداری<sup>۳</sup>

### چکیده

این مطالعه به مسأله‌ی بهره‌برداری بهینه از یک سیستم تک‌مخزنه چندمنظوره با اهداف تأمین نیاز کشاورزی، نیاز زیست‌محیطی و تولید انرژی برقایی با استفاده از اتوماتای سلولی می‌پردازد. در ساختار سلولی این الگوریتم، نقاط گسسته زمانی به عنوان سلول و حجم ذخیره در این زمان‌ها به عنوان حالت سلول انتخاب می‌شوند. قانون به‌روزرسانی الگوریتم نیز با استفاده از بهینه‌سازی تحلیلی تابع هدف محلی در حضور روابط غیرخطی برقایی استخراج می‌شود. همچنین زیرمسأله تخصیص بهینه آب رها شده از مخزن سد به نیازهای پایین دست با استفاده از روش ضرایب لاگرانژ در ترکیب با CA حل خواهد شد. الگوریتم پیشنهادی برای حل مسأله‌ی بهینه‌سازی غیرخطی و نامحدب بهره‌برداری از مخزن سد و نیروگاه بالارود به عنوان یک مطالعه موردی واقعی، پیاده‌سازی و با نتایج حاصل از روش‌های بهینه‌سازی مشتق-پایه و الگوریتم ژنتیک برای دوره‌های بهره‌برداری ۵، ۲۰ و ۴۴ ساله مقایسه می‌شود. نتایج نشان می‌دهند که روش اتوماتای سلولی ضمن کاهش قابل ملاحظه بار محاسباتی، قادر است به جواب‌هایی با کیفیت قابل قبول از منظر میزان بهینگی دست یابد.

**کلمات کلیدی:** بهینه‌سازی، بهره‌برداری از مخزن، چندمنظوره، اتوماتای سلولی.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۶/۳/۱۶

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۶/۸/۵

1- PhD Student in Water Resources Engineering and Management, Department of Civil and Environmental Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran.

2- Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran. Email: jmosavi@aut.ac.ir

3- Assistant Professor, Department of Computer Engineering and Information Technology, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran.

\*- Corresponding Author

۱- دانشجوی دکتری مهندسی و مدیریت منابع آب، دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر.

۲- استاد گروه آب و محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر.

۳- استادیار گروه هوش مصنوعی، دانشکده مهندسی کامپیوتر و فناوری اطلاعات، دانشگاه صنعتی امیرکبیر.

\*- نویسنده مسئول  
بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان تابستان ۱۳۹۷ امکانپذیر است.

الگوریتم جامعه مورچگان (Kumar and Reddy, 2006; Afshar et al., 2009) و شبکه عصبی مصنوعی (Nourani et al., 2012) نیز در حل مسأله بهره‌برداری و برنامه‌ریزی چندمنظوره مخازن به کار گرفته شده‌اند.

الگوریتم‌های فراکاوشی در دست‌یابی به جواب‌های قابل قبول در مسائل بسیار پیچیده به موفقیت چشمگیری دست یافته‌اند و قابلیت پیاده‌سازی بر طیف وسیعی از مسائل را دارا می‌باشند. با این وجود، این روش‌ها نیازمند پارامترهای آزادی هستند که تعیین مقادیر بهینه و مطلوب این پارامترها مستلزم انجام بررسی‌هایی از قبیل تحلیل حساسیت است. زمان‌بر بودن روش‌های فراکاوشی نیز که پیامد ماهیت آن‌ها و همچنین استفاده از جمعیت جواب در فرایند جستجو است، از دیگر مشکلات به‌کارگیری این روش‌ها می‌باشد. بنابراین توسعه روش‌هایی که علاوه بر بهره‌گیری از مزایای این دو دسته ابزار بهینه‌ساز، ضعف‌ها و مشکلات ذکر شده را کمتر کند، کماکان مورد توجه خواهد بود. از کاربرد الگوریتم اتوماتای سلولی ( $CA^1$ ) به عنوان بهینه‌ساز در بهره‌برداری و طراحی بهینه هیدروسستم‌ها چندسالی بیشتر نمی‌گذرد. این الگوریتم مزایا و نتایج امیدوارکننده‌ای را در حل کلاس خاصی از مسائل بهینه‌سازی با قابلیت تطبیق بر ساختار سلولی از خود نشان داده است. علیرغم آن جنبه‌های مفهومی الگوریتم و کشف دلایل چرایی کارکرد و سرعت بالای آن کماکان محل جستجو و پرسش است. اگرچه مسائل بهینه‌سازی بهره‌برداری از سیستم‌های تک‌مخزنه شناخته شده هستند؛ در این تحقیق جزئیات، قابلیت‌ها و محدودیت‌های کاربرد اتوماتای سلولی در این مسأله در حضور عوامل غیرخطی و عدم تحذب فضای جستجو- ناشی از روابط برقابی و خاصیت چندمنظوره بودن بهره‌برداری از سیستم- مورد کنکاش بیشتر قرار گرفته است. بدین منظور مدل پیشنهادی در مطالعه موردی بهره‌برداری از مخزن و نیروگاه سد بالارود پیاده‌سازی و نتایج آن با نتایج دیگر روش‌های گرادیان-پایه و تکاملی مقایسه شده است. در کنار ارائه این نمونه موفق از کاربرد اتوماتای سلولی به عنوان بهینه‌ساز در بهره‌برداری از مخازن سدها، در این پژوهش چگونگی کارکرد این الگوریتم نیز مورد بررسی قرار گرفته است. این جنبه از منظر تئوریک، امری کلیدی جهت گسترش دانش پیرامون عملکرد، مزایا و احیاناً محدودیت‌های پیاده‌سازی آن در دیگر کاربردهای بهینه‌سازی در هیدروسستم‌ها، سیستم‌های پیچیده و حتی توابع ریاضی می‌باشد. در این راستا، به سرنخ‌هایی از شباهت CA به روش برنامه‌ریزی پویا در بهینه‌سازی مرحله به مرحله یک تابع هدف جمعی و همچنین چگونگی ترکیب CA با روش لاگرانژ در حل زیرمسأله تخصیص بهینه آب رهاشده از مخزن به نیازهای پایین‌دست اشاره شده است که جهت

مدیریت بهینه بهره‌برداری از مخازن آب سدها که از مهم‌ترین منابع تأمین آب و انرژی می‌باشند، با اهدافی از قبیل تأمین نیاز آبی پایین‌دست، تولید انرژی، مدیریت سیلاب و ملاحظات زیست‌محیطی که عمدتاً غیرهم‌سو هستند، سر و کار دارد. مخازن سدهای چندمنظوره ممکن است به‌منظور پاسخگویی به چندین هدف از اهداف فوق‌احداث و بهره‌برداری شوند. مسأله اصلی در برنامه‌ریزی بهره‌برداری از سدها، تعیین میزان ذخیره و رهاسازی از مخزن در هر یک از گام‌های دوره بهره‌برداری جهت تأمین نیازها می‌باشد.

فرمول‌بندی ریاضی مسأله بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخازن با لحاظ کردن واقعیت‌ها و خصوصیات اصلی مسأله در دنیای واقعی، دچار پیچیدگی‌هایی شامل غیرخطی بودن، بُعددار شدن و در معرض نامعینی‌ها و عدم قطعیت بودن است. با توجه به پیچیدگی‌های مذکور، استفاده از روش‌های کارا در حل این‌گونه مسائل امری اجتناب‌ناپذیر است. این مسأله در قالب مدل‌های ریاضی بهره‌برداری از مخازن سدها با استفاده از روش‌های تحلیل سیستم، شامل طیف وسیعی از روش‌های شبیه‌سازی و الگوریتم‌های بهینه‌سازی، فرمول‌بندی و حل شده است. الگوریتم‌های بهینه‌سازی استفاده شده در این راستا به دو دسته روش‌های سنتی و عمدتاً گرادیان-پایه شامل تکنیک‌های برنامه‌ریزی خطی، برنامه‌ریزی غیرخطی و برنامه‌ریزی پویا و روش‌های فراکاوشی از قبیل الگوریتم‌های ژنتیک، ازدحام ذرات، جامعه مورچگان و چندین روش دیگر تقسیم شده‌اند. نمونه‌هایی از کاربرد روش‌های ریاضی را در کارهای (Hall et al. (1968)، (Simonovic and Mariño (1980)، (Heidari et al. (1971)، (Loucks et al. (1981)، (Yakowitz (1982)، (Yeh (1985) و (Wurbs (1993) می‌توان یافت. ابزار بهینه‌سازی کلاسیک در عین بهره‌مندی از نکات مثبت خود، با محدودیت‌های جدی در مسایل پیچیده با مشخصات بزرگی ابعاد، درجه بالای غیرخطی بودن، ماهیت ترکیباتی و عدم قطعیت مواجه می‌باشند. در مقابل روش‌های فراکاوشی در کنار کندی همگرایی، مزایای قابل توجهی را در رفع دشواری‌های ناشی از عوامل فوق‌از خود نشان داده‌اند. در زمینه کاربرد الگوریتم‌های ژنتیک در بهینه‌سازی تک‌هدفه بهره‌برداری از مخازن چندمنظوره می‌توان به کارهای (Ahmed and Sarma (2005) و (Kim et al. (2006) در بهینه‌سازی چندهدفه با استفاده از الگوریتم ژنتیک چندهدفه با رویکرد مرتب‌سازی نامغلوب به (Ahmadianfar et al. (2016) اشاره کرد. الگوریتم ازدحام ذرات چندهدفه (Fallah-Mehdipour and Haddad, 2013; Kumar and Reddy, 2007; Baltar and Fontane, 2004)

استفاده در کارهای بعدی سودمند می‌باشد.

که تحت محدودیت‌های موجود در روابط (۴) تا (۱۴) شامل قیود بیان، نیاز زیست‌محیطی، بیشینه و کمینه فیزیکی متغیرها، روابط برقابی و رابطه حجم-ارتفاع می‌باشد:

$$S_{t+1} = S_t + I_t - R1_t \quad t = 1, \dots, T \quad (4)$$

$$S_t^{\min} \leq S_t \leq S_t^{\max} \quad t = 1, \dots, T + 1 \quad (5)$$

$$0 \leq R1_t \leq r_{\max} \quad t = 1, \dots, T \quad (6)$$

$$ID_t = I2_t + R1_t - R2_t \quad t = 1, \dots, T \quad (7)$$

$$R2_t \geq MF_t \quad t = 1, \dots, T \quad (8)$$

$$E_t \leq E_{\max_t} \quad t = 1, \dots, T \quad (9)$$

$$E_{\max_t} = I_{\text{cap}} \times n_t \quad t = 1, \dots, T \quad (10)$$

$$E_t = 2.725 \times R1_t \times \bar{h}_t \times \eta \quad t = 1, \dots, T \quad (11)$$

$$S_t = aH_t^2 + bH_t + c \quad t = 1, \dots, T \quad (12)$$

$$\bar{h}_t = 0.5 \times (h_t + h_{t+1}) \quad t = 1, \dots, T \quad (13)$$

$$h_t = H_t - TWL - h_f \quad t = 1, \dots, T \quad (14)$$

در روابط (۱) تا (۱۴) طول دوره بهره‌برداری،  $I_t$  جریان ورودی به مخزن در دوره  $t$ ،  $S_t$  حجم ذخیره در ابتدای دوره  $t$ ،  $S_t^{\min}$  و  $S_t^{\max}$  حداقل و حداکثر حجم ذخیره در ابتدای دوره  $t$ ،  $R1_t$  حجم رهاسازی از مخزن در دوره  $t$ ،  $r_{\max}$  حداکثر رهاسازی از مخزن در دوره  $t$ ،  $MF_t$  حداقل نیاز زیست‌محیطی در دوره  $t$ ،  $ID_t$  انحراف آب آبیاری در دوره  $t$ ،  $D_t$  نیاز کل آبیاری در دوره  $t$ ،  $D_{\max}$  حداکثر نیاز آبیاری (بیشینه  $D_t$  ها)،  $I2_t$  جریان ورودی از حوضه میانی در دوره  $t$  همگی در واحد MCM،  $E_t$  انرژی برقابی تولید شده در دوره  $t$ ،  $E_{\max_t}$  انرژی برقابی (بیشینه  $E_{\max_t}$  ها) همگی برحسب MWh،  $I_{\text{cap}}$  ظرفیت نصب شده در واحد MW،  $n_t$  تعداد روزهای دوره  $t$  (روزهای نیمه اول و نیمه دوم سال متفاوت در نظر گرفته شده‌اند)،  $\eta$  راندمان نیروگاه برقابی،  $\bar{h}_t$  میانگین بلندی خالص آب روی توربین در دوره  $t$ ،  $h_t$  بلندی خالص در ابتدای دوره  $t$ ،  $H_t$  بلندی ناخالص در ابتدای دوره  $t$ ،  $TWL$  تراز پایاب نیروگاه بر حسب متر (نسبت به متوسط تراز سطح دریا)،  $c$ ،  $b$ ،  $a$  پارامترهای منحنی حجم-ارتفاع مخزن و  $h_f$  افت هیدرولیکی بر حسب متر می‌باشد.

### ۳- حل مسأله با روش اتوماتای سلولی

اتوماتای سلولی توسط Stanislaw Ulam (1960) و John von Neumann (1966) برای مدل‌سازی سیستم‌های خود تولید شونده مطرح شد. این روش سابقاً به‌عنوان یک روش شبیه‌ساز برای تحلیل فرآیندهای پیچیده به کار می‌رفت. پژوهش‌های (2000) Marin et al. و (2002) Nagel نمونه‌هایی از کاربرد CA به عنوان شبیه‌ساز می‌باشد. در دهه‌های اخیر کاربرد الگوریتم اتوماتای

## ۲- تعریف و فرمول‌بندی مسأله بهره‌برداری از سیستم مخزن چندمنظوره

سیستم منابع آب مورد بررسی در این پژوهش متضمن اهداف تأمین نیاز شبکه آبیاری، تولید انرژی برقابی و تأمین نیاز زیست‌محیطی با شرط تأمین کامل حبابه بالادست خود می‌باشد. هدف، یافتن مقادیر بهینه احجام ذخیره و مقادیر رهاسازی به گونه‌ای است که هم مجموع مربعات تفاضل جریان رها شده از نیاز آبیاری و نیاز زیست‌محیطی، در کل دوره بهره‌برداری کمینه شود و هم مجموع مربعات اختلاف انرژی تولید شده و ظرفیت تولید انرژی، در کل دوره به حداقل خود برسد. در شکل ۱ طرح کلی این سیستم منابع آب مشاهده می‌شود.

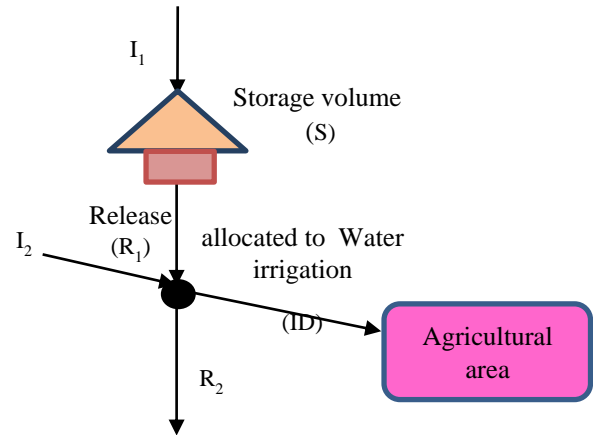


Fig. 1- Schematic illustration of the multipurpose single-reservoir system

شکل ۱- طرح کلی سیستم تک مخزن چندمنظوره

اهداف بهره‌برداری مسأله با استفاده از مدل‌سازی ریاضی در قالب روابط (۱) و (۲) قابل بیان است:

$$\text{Minimize } F_1 = \frac{\sum_{t=1}^T (D_t + MF_t - R1_t)^2}{(D_{\max} + MF_{\max})^2} \quad (1)$$

$$\text{Minimize } F_2 = \frac{\sum_{t=1}^T (E_{\max_t} - E_t)^2}{(E_{\max})^2} \quad (2)$$

برای حل مسأله بهینه‌سازی بهره‌برداری چندمنظوره فوق از روش مجموع وزن‌دار ( $WSA^2$ ) استفاده شد. بنابراین تابع هدف مسأله مورد نظر به صورت رابطه (۳) منظور گردید:

$$\text{Minimize } F = W_1 \frac{\sum_{t=1}^T (D_t + MF_t - R1_t)^2}{(D_{\max} + MF_{\max})^2} + W_2 \frac{\sum_{t=1}^T (E_{\max_t} - E_t)^2}{(E_{\max})^2} \quad (3)$$

که جایگاه سلول‌ها (مقدار متغیرهای تصمیم) را به سمت بهترین جایگاه نسبت به یک یا چند هدف هدایت نماید، می‌تواند مبنای استفاده از این الگوریتم به عنوان بهینه‌ساز باشد.

به منظور حل مسأله‌ی بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخزن چندمنظوره با روش اتوماتای سلولی، در گام نخست مسأله بر اساس مؤلفه‌های این الگوریتم بازتعریف می‌شود. در مدل پیشنهادی، سلول‌بندی روی نقاط گسسته زمانی در دوره بهره‌برداری (ابتدا یا انتهای هر دوره) صورت می‌گیرد. بنابراین سلول یک لحظه زمانی و حجم ذخیره در آن لحظه به عنوان حالت سلول (متغیر تصمیم) تعریف می‌شود. به عبارت دیگر متغیر حجم ذخیره مخزن در ابتدای هر ماه حالت سلول در فرمول‌بندی روش اتوماتای سلولی است و فرایند به‌روزرسانی در هر گام حل الگوریتم روی این متغیر انجام می‌شود. برای سلول دلخواه (ابتدای هر ماه)، سلول‌های مجاور (ابتدای ماه‌های قبل و بعد) به عنوان همسایگی سلول در نظر گرفته می‌شوند. سلول‌های مربوط به ماه  $t=1$  و  $t=T+1$  به علت قرار گرفتن در مرزهای افق بهره‌برداری ناگزیر به داشتن یک همسایه می‌باشند. گام بعدی در مدل اتوماتای سلولی تعریف قانون به‌روزرسانی است که در این مطالعه به شیوه تحلیل استخراج می‌شود؛ بدین معنی که با به کارگیری فرم محلی تابع هدف برای هر سلول دلخواه  $z$  و مشتق‌گیری از آن بر حسب متغیر تصمیم در هر تکرار دلخواه  $k$  (حجم ذخیره سلول  $z$  یا  $S_j^k$ )، رابطه‌ای برای به‌روزرسانی حالت سلول  $z$  در تکرار بعدی ( $S_j^{k+1}$ ) به‌دست می‌آید. بر این اساس فرم محلی توابع هدف این مسأله مطابق رابطه (۱۵) می‌باشد:

$$\begin{aligned} \text{Minimize } F1_j^{k+1} &= \frac{(D_{j-1} + MF_{j-1} - R1_{j-1}^{k+1})^2 + (D_j + MF_j - R1_j^{k+1})^2}{(D_{\max} + MF_{\max})^2} \\ \text{Minimize } F2_j^{k+1} &= \frac{(E_{\max_{j-1}} - E_{j-1}^{k+1})^2 + (E_{\max_j} - E_j^{k+1})^2}{(E_{\max})^2} \end{aligned} \quad (15)$$

دو هدف فوق با استفاده از روش مجموع وزن‌دار به شکل رابطه (۱۶) نوشته می‌شوند:

$$\begin{aligned} \text{Minimize } F_j^{k+1} = W_1 & \times \frac{(D_{j-1} + MF_{j-1} - R1_{j-1}^{k+1})^2 + (D_j + MF_j - R1_j^{k+1})^2}{(D_{\max} + MF_{\max})^2} \\ & + W_2 \times \frac{(E_{\max_{j-1}} - E_{j-1}^{k+1})^2 + (E_{\max_j} - E_j^{k+1})^2}{(E_{\max})^2} \end{aligned} \quad (16)$$

با مشتق‌گیری از تابع هدف اولیه بر حسب متغیر تصمیم (حجم ذخیره در سلول  $z$ ) به عنوان شرط ضروری مرتبه اول برای کمینه‌سازی تابع هدف محلی، رابطه (۱۷) حاصل می‌شود:

سلولی به عنوان یک روش بهینه‌ساز جدید مورد توجه پژوهشگران در حوزه‌های مختلفی مانند مهندسی سازه (Kita and Toyoda, 2000; Tattin and Gürdal, 2000) قرار گرفته است. CA در مهندسی آب نیز در ترکیب با الگوریتم‌های GA و NSGAII برای طراحی شبکه‌های توزیع آب و فاضلاب در کارهای (Guo (2005), Keedwell and Khu (2005, 2006), Guo et al. (2006), Guo et al. (2007), Afshar et al. (2011), Afshar and Rohani (2012), Afshar and Rohani (2013) و Afshar et al. (2016) استفاده شده‌اند.

کاربرد CA بهینه‌ساز در مسأله‌ی بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخزن با کار (Afshar and Shahidi (2009) آغاز شد که در آن، مسأله برای یک سیستم تک‌مخزنه با اهداف تأمین آب و تولید انرژی برقایی حل شد و نتایج امیدوارکننده‌ای را در مقایسه با الگوریتم‌های فراکاوشی، ارائه کرد. (Sedaghat (2011) نیز از این الگوریتم برای استخراج منحنی فرمان مخزن سد دز استفاده کرد. در ادامه (Afshar (2013) استفاده از این الگوریتم را به بهینه‌سازی بهره‌برداری از سیستم‌های چندمخزنه برقایی تعمیم داد. (Ghalenoee (2015) با استفاده از روش اتوماتای سلولی دو مدل متفاوت را برای طراحی بهینه مخزن همراه با قید اعتمادپذیری تأمین نیاز ارائه کرد. (Afshar and Azizipour (2016) الگوریتم اتوماتای سلولی را برای مسائل بهره‌برداری از مخزن همراه با قیود احتمالاتی ضمنی به کار گرفتند. در کارهای فوق تمرکز عمدتاً بر جنبه‌های الگوریتمیک CA در مسائل بهره‌برداری از مخزن، بدون توجه به برخی جزئیات این مسأله در دنیای واقعی، بوده است. اگرچه پژوهش حاضر از منظر تک‌مخزنه بودن و پیگیری رویکردهای کلی استفاده شده، در مقایسه با کارهای ذکر شده از افشار و همکاران حاوی نکته جدیدی نیست، اما تلاش شده است سرنخ‌هایی از چگونگی عملکرد مناسب CA در مسائل بهینه‌سازی ارائه شود که تاکنون کمتر به آن پرداخته شده است.

الگوریتم اتوماتای سلولی دارای چهار مؤلفه اصلی شامل سلول<sup>۳</sup>، حالت سلول<sup>۴</sup>، همسایگی<sup>۵</sup> و قانون انتقال<sup>۶</sup> یا قانون محلی<sup>۷</sup> است که بسته به هر مسئله خاص تعریف می‌شوند. هریک از اجزای شبکه اتوماتای سلولی را سلول و مشخصه هر سلول را حالت سلول می‌نامند. رفتار اتوماتای سلولی کاملاً بر اساس ارتباط و تعامل محلی استوار است و هر سلول، وضعیت جدید خود را مطابق قوانین آن در هر مرحله با در نظر گرفتن همسایگی مجاور خود به‌دست می‌آورد. با اعمال این قوانین ساده که قانون محلی نامیده می‌شوند، جایگاه جدید سلول‌ها بر اساس جایگاه قبلی خود و همسایگان‌شان تعیین می‌شوند. بنابراین ارائه الگویی

$$S_{j+1} = S_j + I_j - R1_j \rightarrow \frac{\partial R1_j}{\partial S_j} = 1 \quad (24)$$

$$S_j = S_{j-1} + I_{j-1} - R1_{j-1} \rightarrow \frac{\partial R1_{j-1}}{\partial S_j} = -1 \quad (25)$$

به همین شکل و با استفاده از رابطه تولید انرژی، مقادیر مشتقات انرژی برقایی در دوره‌های  $z$  و  $z-1$  از مشتق‌گیری رابطه (۱۱) بر حسب  $S_j$  به صورت روابط (۲۶) و (۲۷) به دست می‌آید:

$$\frac{\partial E_j}{\partial S_j} = 2.725 \times \eta \times \left( \frac{\partial R1_j}{\partial S_j} \times \bar{h}_j + \frac{\partial \bar{h}_j}{\partial S_j} \times R1_j \right) \quad (26)$$

$$\frac{\partial E_{j-1}}{\partial S_j} = 2.725 \times \eta \times \left( \frac{\partial R1_{j-1}}{\partial S_j} \times \bar{h}_{j-1} + \frac{\partial \bar{h}_{j-1}}{\partial S_j} \times R1_{j-1} \right) \quad (27)$$

مشتقات بلندای آب روی توربین در دوره‌های  $z$  و  $z-1$  که در روابط (۲۵) و (۲۶) ظاهر شده‌اند، بر اساس روابط (۱۲)، (۱۳) و (۱۴) مطابق رابطه (۲۸) حاصل می‌شود:

$$\frac{\partial \bar{h}_j}{\partial S_j} = \frac{\partial \bar{h}_{j-1}}{\partial S_j} = 0.5 \times \frac{\partial H_j}{\partial S_j} = 0.5 \times \frac{1}{\sqrt{b^2 - 4a(c - S_j)}} \quad (28)$$

برای یافتن روابط دقیق مقادیر جریان‌های منشعب از رهاسازی مخزن (R2 و ID)، دانستن چگونگی تخصیص بهینه جریان رها شده از مخزن بین انواع نیازهای پایین دست ضروری است. با این وصف، یک مسأله بهینه‌سازی دیگر پیش‌روست که به دنبال تخصیص بهینه حجم آب موجود، یعنی مجموع جریان  $I2 + R1$ ، با توجه به نیازهای آبیاری و زیست‌محیطی پایین دست خواهد بود. مدل ریاضی این مسأله مطابق رابطه (۲۹) می‌باشد:

$$\begin{aligned} & \text{Min } (ID - D)^2 \\ & \text{s. t:} \\ & R2 + ID = I2 + R1 \\ & R2 \geq MF \end{aligned} \quad (29)$$

برای حل این مسأله بهینه‌سازی خصوصاً در صورت وجود گره‌های نیاز بیشتر، می‌توان از روش ضرایب لاگرانژ استفاده کرد. حل دستگاه معادلات حاصل از این روش به مقادیر بهینه زیرمسأله تخصیص آب در پایین دست مخزن می‌انجامد. این شرایط در روابط (۳۰) تا (۳۲) ملاحظه می‌شود:

$$I2 + R1 < MF + D \rightarrow R2 = MF, \quad (30)$$

$$\begin{aligned} ID &= I2 + R1 - MF \\ I2 + R1 &> MF + D \rightarrow R2 = I2 + R1 - D, \quad ID = D \end{aligned} \quad (31)$$

$$I2 + R1 = MF + D \rightarrow R2 = MF, \quad ID = D \quad (32)$$

اگرچه به دلیل وجود اولویت در تأمین نیاز زیست‌محیطی روابط به دست آمده از حل لاگرانژ ساده به نظر می‌رسند؛ آنچنان که آنها را صرفاً مبتنی بر اولویت نیز می‌توان به دست آورد. اما نکته مهم در ذکر مبنای تحلیلی روابط این است که قابلیت تلفیق حل زیرمسأله تخصیص آب در پایین دست مخزن با بهره‌گیری از روش ضرایب

$$\frac{\partial F_j^{k+1}}{\partial S_j} = 0 \rightarrow W_1 \quad (17)$$

$$\begin{aligned} & -2 \frac{\partial R1_{j-1}}{\partial S_j} (D_{j-1} + MF_{j-1} - R1_{j-1}^{k+1}) - 2 \frac{\partial R1_j}{\partial S_j} (D_j + MF_j - R1_j^{k+1}) \\ & \times \frac{(D_{\max} + MF_{\max})^2}{(E_{\max})^2} \\ & + W_2 \times \frac{-2 \frac{\partial E_{j-1}}{\partial S_j} (E_{\max j-1} - E_j^{k+1}) - 2 \frac{\partial E_j}{\partial S_j} (E_{\max j} - E_j^{k+1})}{(E_{\max})^2} = 0 \end{aligned}$$

در تعیین متغیرها و ثابت‌های فرایند مشتق‌گیری باید بدین نکته توجه کرد که تغییر در حجم ذخیره  $\Delta S_j$  منجر به تغییر در احجام رهاسازی جریان در دوره‌های  $z$  و  $z-1$  ( $\Delta R1_{j-1}$  و  $\Delta R1_j$ )، و همچنین تغییر در انرژی تولیدی در این دوره‌ها ( $\Delta E_{j-1}$  و  $\Delta E_j$ ) می‌شود. بنابراین روابط (۱۸) تا (۲۱) را می‌توان نوشت:

$$\Delta R1_{j-1} = \frac{\partial R1_{j-1}}{\partial S_j} \Delta S_j, \quad (18)$$

$$\Delta R1_{j-1} = R1_{j-1}^{k+1} - R1_{j-1}^k \quad (19)$$

$$\Delta R1_j = \frac{\partial R1_j}{\partial S_j} \Delta S_j, \quad \Delta R1_j = R1_j^{k+1} - R1_j^k \quad (19)$$

$$\Delta E_{j-1} = \frac{\partial E_{j-1}}{\partial S_j} \Delta S_j, \quad (20)$$

$$\Delta E_{j-1} = E_{j-1}^{k+1} - E_{j-1}^k \quad (20)$$

$$\Delta E_j = \frac{\partial E_j}{\partial S_j} \Delta S_j, \quad \Delta E_j = E_j^{k+1} - E_j^k \quad (21)$$

با جای‌گذاری روابط (۱۸) تا (۲۱) در رابطه (۱۷) و مرتب کردن معادله بر حسب  $\Delta S_j$ ، نهایتاً معادله (۲۲) نتیجه می‌شود:

$$\begin{aligned} & \Delta S_j = \\ & \left( \frac{W_1}{(D_{\max} + MF_{\max})^2} \times \left( \frac{\partial R1_{j-1}}{\partial S_j} (D_{j-1} + MF_{j-1} - R1_{j-1}^k) + \frac{\partial R1_j}{\partial S_j} (D_j + MF_j - R1_j^k) \right) + \frac{W_2}{(E_{\max})^2} \right. \\ & \quad \left. \times \left( \frac{\partial E_{j-1}}{\partial S_j} (E_{\max j-1} - E_j^k) + \frac{\partial E_j}{\partial S_j} (E_{\max j} - E_j^k) \right) \right) \\ & / \left( \frac{W_1}{(D_{\max} + MF_{\max})^2} \times \left( \left( \frac{\partial R1_{j-1}}{\partial S_j} \right)^2 + \left( \frac{\partial R1_j}{\partial S_j} \right)^2 \right) + \frac{W_2}{(E_{\max})^2} \right. \\ & \quad \left. \times \left( \left( \frac{\partial E_{j-1}}{\partial S_j} \right)^2 + \left( \frac{\partial E_j}{\partial S_j} \right)^2 \right) \right) \end{aligned}$$

مقدار به‌روزرسانی شده حجم ذخیره سلول  $z$  در هر تکرار الگوریتم به صورت رابطه (۲۳) جایگاه جدید سلول را تعیین خواهد کرد:

$$S_j^{k+1} = \Delta S_j + S_j^k \quad (23)$$

در معادله (۲۲) مشتقاتی وجود دارند که رابطه آنها می‌بایست از طریق روابط فیزیکی حاکم بر مسأله (قیود پیوستگی جریان) تعیین شوند. در این راستا مقادیر مشتقات متغیرهای رهاسازی از مخزن در دوره‌های  $z$  و  $z-1$  نسبت به متغیر تصمیم  $S_j$  با مشتق‌گیری از رابطه پیوستگی مطابق روابط (۲۴) و (۲۵) می‌باشند:

از گذر تبدیل تابع هدف به روابط بازگشتی حاوی تعداد متغیرهای بسیار کمتر، دارد. در این راستا بررسی نقش و تأثیر جمع‌پذیر و جدپذیر بودن یا نبودن تابع هدف در انتخاب تابع هدف محلی و تعریف همسایگی مطلوب در آن جای بررسی بیشتر دارد. روندنمای الگوریتم CA پیشنهادی در شکل ۲ ارائه شده است.

#### ۴- مطالعه موردی

به منظور کاربرد عملی الگوریتم پیشنهادی و همچنین برای مقایسه نتایج آن با دیگر روش‌ها، مسأله بهره‌برداری از طرح سد و نیروگاه بالارود به عنوان مطالعه موردی در نظر گرفته شده است. رودخانه بالارود یکی از مهم‌ترین شاخه‌های الحاقی به رودخانه دز در پایین دست سد مخزنی دز می‌باشد. این رودخانه از دامنه کوه‌های گلاهور واقع در ۵۸ کیلومتری شمال شهرستان اندیمشک سرچشمه گرفته و پس از طی مسافتی حدود ۱۰۰ کیلومتر با عبور از کنار شهرستان اندیمشک، در جنوب شهرستان دزفول به رودخانه دز می‌پیوندد (Iran Ministry of Energy, 2013).

سد بالارود برای تأمین نیاز شبکه آبیاری، تأمین نیازهای زیست‌محیطی و تولید انرژی برقی در منطقه مورد نظر منظور گردیده است. مجموعه مشخصات پایه مخزن و نیروگاه سد بالارود شامل حجم کل مخزن MCM ۹۱/۵، حجم نظیر حداقل رقوم بهره‌برداری MCM ۰/۳، متوسط آب ورودی به مخزن MCM ۱۳/۷۸ در دوره ۴۴ ساله و MCM ۹/۵۷ در دوره ۵ ساله، ضرایب منحنی حجم-ارتفاع a، b و c به ترتیب ۰/۰۴۱، ۰/۲۳/۱- و ۳۲۴۲/۵، نیروگاه شامل ۲ واحد با مجموع ظرفیت ۲ MW، راندمان ۸۵٪، حداکثر دبی عبوری از هر واحد نیروگاه ۲/۳۴ m<sup>3</sup>/s (میانگین) ۲۶۴ Masl و افت هیدرولیکی ۳ m می‌باشد. نیاز آبیاری منطقه کشاورزی در پایین دست سد بالارود به تفکیک ماه‌های سال در جدول ۱ درج شده است.

همچنین نیاز زیست‌محیطی ادامه جریان رودخانه پس از تخصیص آب به منطقه کشاورزی، ۰/۲۱ میلیون مترمکعب در ماه می‌باشد (Iran Ministry of Energy, 2013).

#### ۵- نتایج و بحث

به منظور امکان تحلیل بهتر خصوصیات CA نسبت به بزرگی فضای جستجوی مدل بهینه‌سازی، مسأله برای دوره‌های بهره‌برداری ۵ ساله (۶۰ ماهه)، ۲۰ ساله (۲۴۰ ماهه) و ۴۴ ساله (۵۲۸ ماهه) بررسی شده است.

لاگرانژ را با حل مسأله اصلی بهره‌برداری از مخزن بالادست با الگوریتم CA نشان می‌دهد. این روش در شرایطی که در پایین دست تعداد نیازهای آبی بیشتر شود و سیستم به یک سیستم تخصیص آب حوضه‌ای تعمیم یابد، بسیار حایز اهمیت است. ترکیب روش اتوماتای سلولی و ضرایب لاگرانژ، ترکیب بهینه‌سازی تحلیلی مشتق‌پایه کلاسیک با مزیت‌های CA است که ارزش آن در مسائل با نیازهای بیشتر و پیچیده‌تر شدن توابع سود بیشتر مشخص می‌شود.

پس از استخراج قانون محلی مدل اتوماتای سلولی، محدودیت‌های مسأله نیز می‌بایست در چارچوب این روش مدل شوند. روابط (۵) و (۶) قیودی هستند که می‌بایست صریحاً اعمال شوند که با بازنویسی این محدودیت‌ها در قالب CA به رابطه (۳۳) می‌رسیم:

$$\begin{aligned} S_j^{\min} &\leq S_j^{k+1} \leq S_j^{\max} \\ S_j^{\min} - S_j^1 &\leq \Delta S_j \leq S_j^{\max} - S_j^k \\ 0 &\leq R_{1j}^{k+1} \leq R_{1j}^{\max} \rightarrow \\ -R_{1j}^k &\leq \Delta R_{1j} \leq R_{1j}^{\max} - R_{1j}^k \\ 0 &\leq R_{1j-1}^{k+1} \leq R_{1j-1}^{\max} \\ -R_{1j-1}^k &\leq \Delta R_{1j-1} \leq R_{1j-1}^{\max} - R_{1j-1}^k \end{aligned} \quad (33)$$

با توجه به روابط (۲۴) و (۲۵) می‌توان  $\Delta R_{1j}$  و  $\Delta R_{1j-1}$  را در رابطه (۳۳) به شکل  $\Delta S_j$  بازنویسی کرد. با تبدیل این رابطه به فرم  $\Delta S_j$ ، رابطه (۳۴) نتیجه می‌شود که در مدل اتوماتای سلولی مستقیماً بر مقدار به‌روزرسانی شده از متغیر حجم ذخیره مخزن اعمال خواهند شد:

$$\begin{aligned} S_j^{\min} - S_j^k &\leq \Delta S_j \leq S_j^{\max} - S_j^k \\ -R_{1j}^k &\leq \Delta S_j \leq R_{1j}^{\max} - R_{1j}^k \\ R_{1j-1}^k &\geq \Delta S_j \geq -(R_{1j-1}^{\max} - R_{1j-1}^k) \end{aligned} \quad (34)$$

سایر قیود نیز در محاسبات متغیرهای مختلف دخیل هستند و به شکل ضمنی در الگوریتم ارضا می‌شوند. باور نویسندگان بر آن است که امکان ارضای برخی از قیود در دل رابطه به‌روزرسانی یکی از دلایل سرعت بالای الگوریتم CA است که این امر در ترکیب با سرعت بالای روش‌های گرادین-پایه در بهینه‌سازی تابع محلی از دلایل اصلی سریع بودن این الگوریتم می‌باشد. بنابراین می‌خواهیم نتیجه بگیریم که در هر کاربرد دیگر از CA اگر بتوان در حل مسأله بهینه‌سازی تابع محلی و استخراج قانون انتقال یا همان قانون به‌روزرسانی، قیود بیشتری از مسأله را ارضا کرد، مزیت و سرعت این الگوریتم بیشتر خواهد شد؛ چراکه فرایند ارضای قیود در هر روش بهینه‌سازی مفید چه از نوع کلاسیک و چه فراکاووشی بخش مهمی از کار بهینه‌سازی و تحمیل‌کننده بار محاسباتی است. در تبیین نحوه کارکرد CA به عنوان یک بهینه‌ساز شایان ذکر است که بهینه‌سازی تابع هدف محلی در CA به نوعی شباهت‌هایی با روش برنامه‌ریزی پویا در مرحله‌ای کردن فرایند بهینه‌سازی یک تابع با متغیرهای زیاد

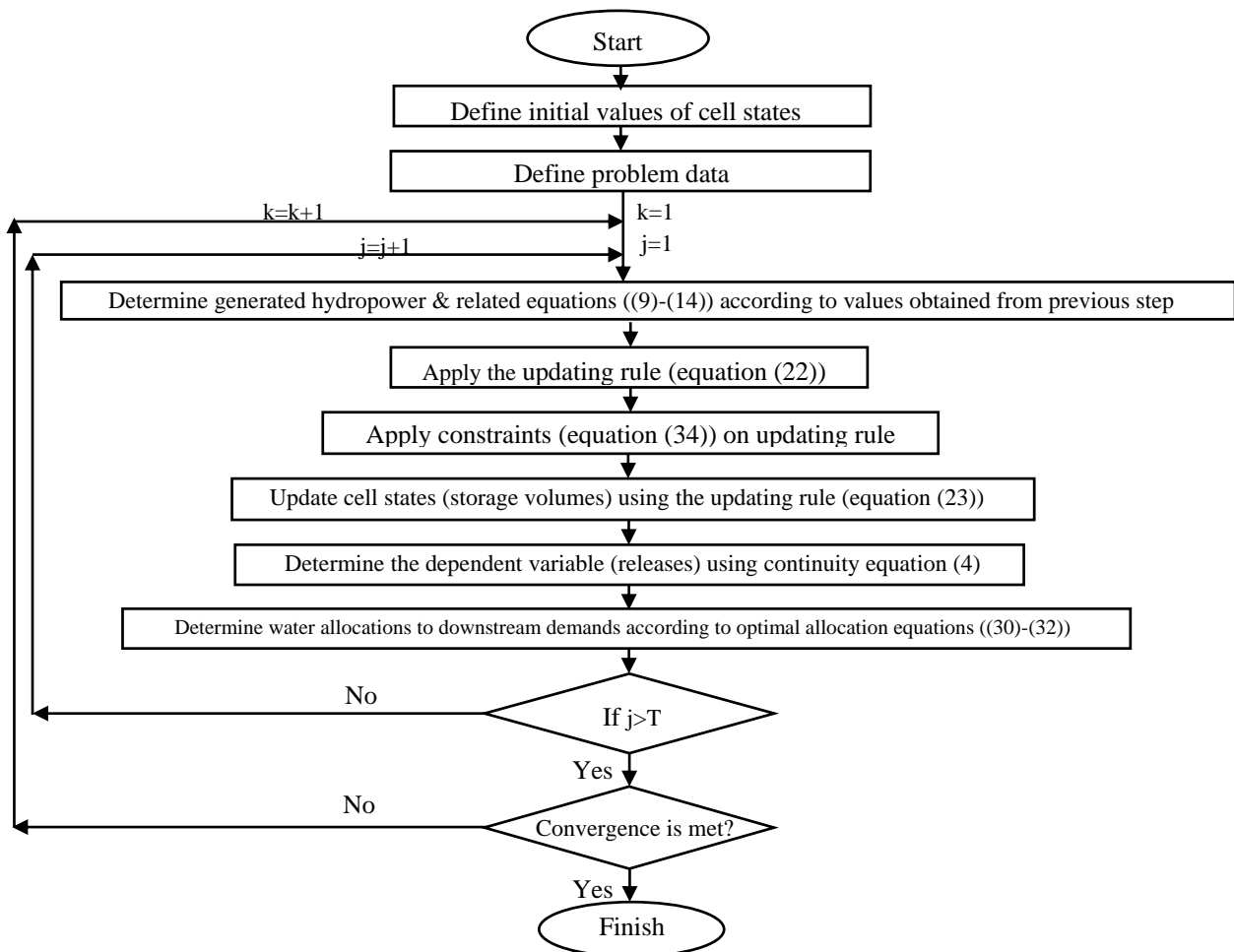


Fig. 2- Flowchart of solving problem using Cellular Automata

شکل ۲- روندنمای حل مسأله با اتوماتای سلولی

Table 1- Monthly water demand of agricultural lands downstream of Balarud reservoir (Iran Ministry of Energy, 2013)

جدول ۱- نیاز آبیاری ماهانه اراضی کشاورزی پایین دست مخزن (Iran Ministry of Energy, 2013)

Month	Mehr	Aban	Azar	Dey	Bahman	Esfand	Farvardin	Ordibehesht	Khordad	Tir	Mordad	Shahrivar
Irrigation Demand (MCM)	8.83	2.71	0	0.04	2.14	6.11	12.85	17.41	8.94	11.21	11.95	11.65

از بین سه جمعیت ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ برای هر سه افق بهره‌برداری و همچنین جمعیت‌های ۲۴۰ برای مسأله ۲۰ ساله و جمعیت ۵۲۸ برای مسأله ۴۴ ساله گزارش شده است. با دقت در نتایج فوق مشخص می‌شود که روش CA با زمان اجرای بسیار کمتر جواب‌های با کیفیت تقریباً یکسان تولید کرده است. شایان ذکر است که زمان و کیفیت جواب‌های CA به خطای تعریف شده برای شرط توقف وابستگی دارد و چنانچه مقدار خطای قابل قبول کمتر تعریف شود، جواب‌های CA به نتایج حل روش کلاسیک نزدیک‌تر می‌شود.

نتایج به دست آمده از منظر تابع هدف و بار محاسباتی در جدول ۲ ارائه شده است. ضمناً مدل ریاضی مسأله توسط روش‌های گرادین-پایه در نرم‌افزار LINGO 12 و همچنین الگوریتم ژنتیک جعبه‌ابزار نرم‌افزار MATLAB حل شده و نتایج برای مقایسه گزارش شده است.

شرط توقف الگوریتم اتوماتای سلولی و GA کوچکتر شدن تغییرات مقدار تابع هدف در تکرارهای متوالی الگوریتم از یک حد ( $1 \times 10^{-4}$ ) انتخاب شده است. برای GA بهترین نتیجه حاصل از میانگین ۱۰ اجرا

**Table 2- Results of classical optimization (LINGO), GA and CA methods for Balarud reservoir operation problem**

جدول ۲- مقایسه نتایج روش‌های بهینه‌سازی کلاسیک (LINGO)، GA و CA در حل مسأله بهره‌برداری سیستم بالارود

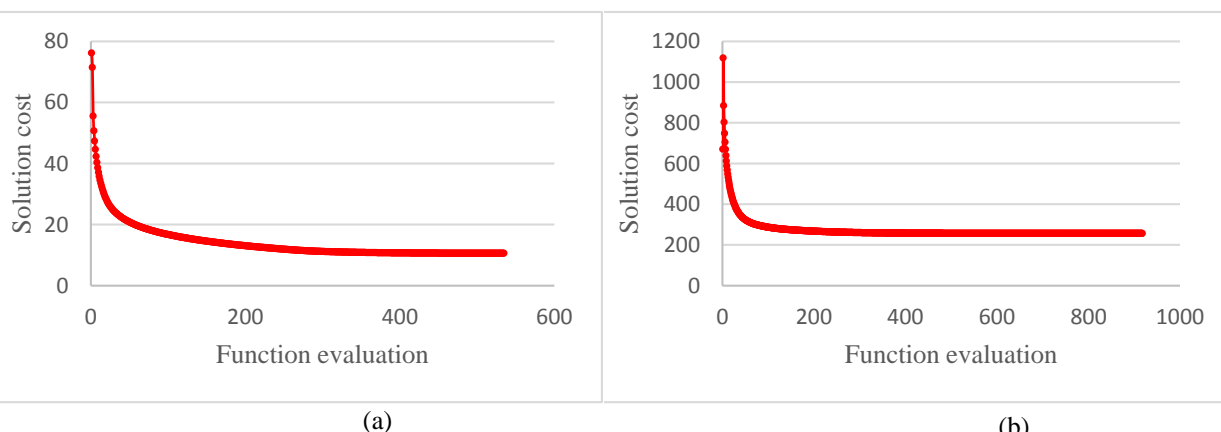
Operation horizon (Months)		60		240		528	
Monthly obj. function (cost)	Lingo	10.5405		80.0068		255.748	
	GA	Pop 50	13.3964	Pop 50	145.3888	Pop 50	369.6221
		Pop 100	12.9671	Pop 100	155.0433	Pop 100	366.0354
		Pop 150	13.0943	Pop 150	146.9876	Pop 150	363.8440
	CA (Average over 10 runs)	10.5440		80.0200		255.7610	
No. function evaluations	Lingo	9814095		3008305		1498821	
	GA	Pop 50	19100	Pop 50	30250	Pop 50	41450
		Pop 100	37600	Pop 100	58300	Pop 100	60900
		Pop 150	36900	Pop 150	82500	Pop 150	144300
	CA (Average over 10 runs)	534		879		917	
Run time (s)	Lingo	3600 (Interrupted)		3600 (Interrupted)		3600 (Interrupted)	
	GA	Pop 50	95.893	Pop 50	479.960	Pop 50	1203.957
		Pop 100	212.443	Pop 100	820.725	Pop 100	2259.788
		Pop 150	173.511	Pop 150	1334.858	Pop 150	4490.528
	CA (Average over 10 runs)	11.7683		45.0170		71.5855	

حسب درصد خطا نسبت به برترین جواب در شکل ۴ نشان داده شده است.

در شکل ۳ نمونه روند همگرایی تابع هدف در مدل اتوماتای سلولی مربوط به دوره‌های ۶۰ و ۵۲۸ ماهه ارائه شده است.

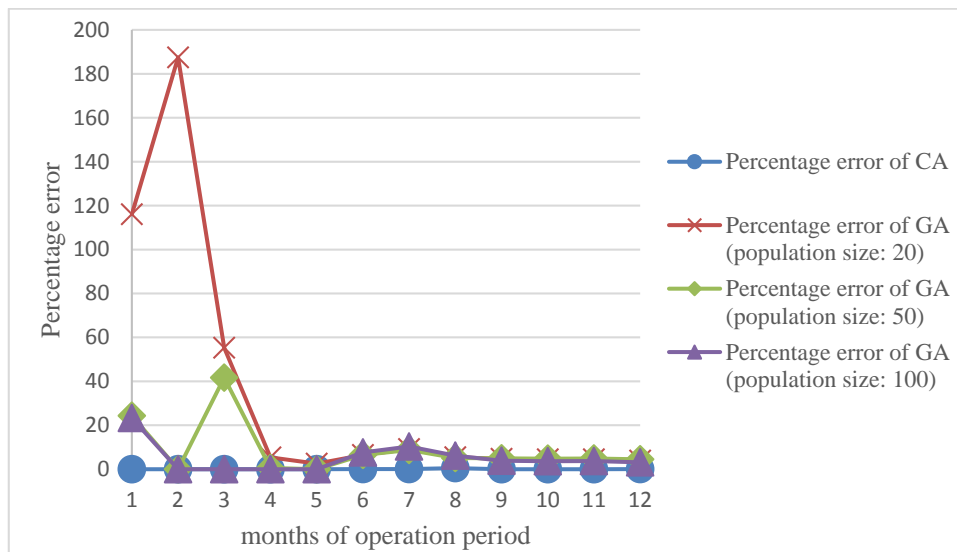
شکل ۴ نشان می‌دهد که درصد انحراف جواب به دست آمده از الگوریتم اتوماتای سلولی از بهترین جواب موجود بسیار اندک و در همه دوره‌ها نزدیک به صفر است. در شکل ۵ نیز هیستوگرام انحراف یا خطای مجموعه جواب اتوماتای سلولی و مجموعه جواب الگوریتم ژنتیک (جمعیت ۱۰۰) نسبت به بهترین جواب ارائه شده است. اطلاعات آماری هیستوگرام‌های فوق در جدول ۳ درج شده است.

برای مقایسه بیشتر تفاوت جواب‌های روش‌های اتوماتای سلولی و الگوریتم ژنتیک (جمعیت ۱۰۰) نسبت به بهترین جواب (احتمالاً بهینه سراسری) که برای یک مسأله با اندازه کوچک توسط روش‌های بهینه‌سازی کلاسیک (LINGO) به دست می‌آید، مسأله برای دوره بهره‌برداری ۱۲ ماهه نیز حل و مقادیر اختلاف احجام ذخیره مخزن بر



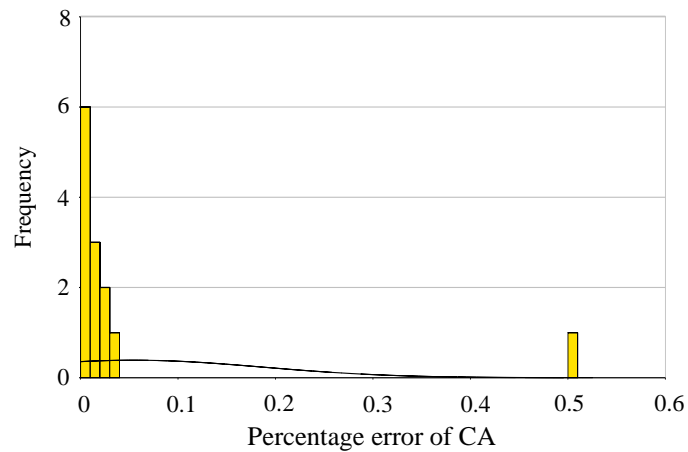
**Fig. 3- Convergence curve of the CA algorithm for problems with (a) 60-month period (b) 528-month period**  
 شکل ۳- همگرایی تابع هدف در الگوریتم CA برای مسائل با دوره‌های بهره‌برداری الف) ۶۰ و ب) ۵۲۸ ماهه



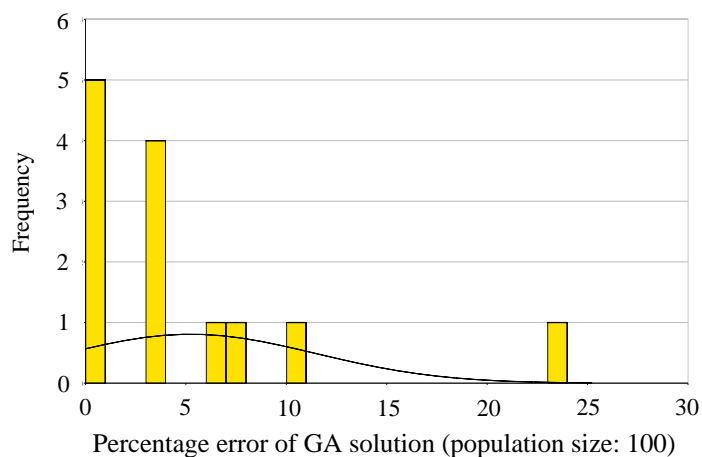


**Fig. 4- Difference between decision variables (storage volumes of the reservoir) of CA and GA methods and best solution (Lingo)**

شکل ۴- تفاوت جواب متغیرهای تصمیم (احجام ذخیره مخزن) الگوریتم‌های اتوماتای سلولی و ژنتیک با بهترین جواب (Lingo)



(a)



(b)

**Fig. 5- Deviation (error) histogram for (a) CA solution (b) GA solution (population size: 100) in comparison with best solution**

شکل ۵- هیستوگرام انحراف (خطا) برای جواب‌های (الف) اتوماتای سلولی و (ب) الگوریتم ژنتیک (جمعیت ۱۰۰) نسبت به بهترین جواب

**Table 3- Descriptive statistics of percentage error for CA and GA solutions compared to the best solution**  
**جدول ۳- آمار توصیفی درصد خطای جواب روش‌های CA و GA نسبت به بهترین جواب**

Index	Percentage error histogram of CA solution	Percentage error histogram of GA solution (pop 100)
Minimum	0.000	0.000
Maximum	0.506	23.275
Mean	0.049	4.752
Variance	0.017	38.722
STD	0.132	6.223

به منظور ارزیابی عملکرد الگوریتم پیشنهادی، نتایج حاصل از CA با جواب‌های روش‌های کلاسیک گرادیان-پایه در نرم‌افزار LINGO و الگوریتم ژنتیک مقایسه شد. نتایج نشان دهنده قابلیت بالای روش اتوماتای سلولی در نیل به جواب‌های با کیفیت مطلوب و بسیار نزدیک به بهترین جواب موجود در زمان بسیار کمتر در مسأله فوق بوده است. در این رابطه لازم به ذکر است که CA از طریق بهینه‌سازی تابع محلی عملاً به نوعی یک مسأله بهینه‌سازی با تعداد متغیرهای زیاد را به تعدادی زیرمسأله با تعداد متغیرهای بسیار کمتر که از طریق همسایگی با هم هم‌پوشانی دارند، تبدیل می‌کند. از این منظر CA شباهت‌هایی با روش برنامه‌ریزی پویا یا DP دارد. در ادامه اگر بتوان جواب بهینه سراسری این زیرمسأله‌ها را با روش‌های تحلیلی مبتنی بر مشتق‌گیری و همراه با ارضای مستقیم قیود در ساختار قواعد به روزسانی متغیرها، بدست آورد، ضمن استفاده از مزیت سرعت روش‌های تحلیلی، به نظر می‌رسد که هم‌پوشانی و وجود متغیرهای مشترک بین زیرمسأله‌های مختلف (ساختار همسایگی در توابع محلی مجاور) یکی از دلایل موفقیت CA در فرار از گرفتار شدن در جواب‌های بهینه‌های محلی است. بررسی موشکافانه این مطلب نیازمند کارهای بیشتر در آینده است.

#### پی‌نوشت

- 1- Cellular Automata
- 2- Weighted Sum Approach
- 3- Cell
- 4- Cell State
- 5- Neighborhood
- 6- Transition Rule
- 7- Local Rule

#### ۷- مراجع

- Afshar MH (2013) A cellular automata approach for the hydro-power operation of multi-reservoir systems. *Water Management* 166(9):465-478
- Afshar MH, Azizpour M (2016) Chance-constrained water supply operation of reservoirs using Cellular

مشاهده می‌شود که درصد خطای بیشینه روش اتوماتای سلولی حدود ۰/۵ درصد بوده و جواب این روش به بهترین جواب موجود بسیار نزدیک است؛ در حالی که خطای جواب‌های الگوریتم ژنتیک بسیار بیشتر بوده است. ضمناً روش اتوماتای سلولی قادر بوده است با هر جواب اولیه‌ای با روند همگرایی مناسبی به نتیجه مطلوب برسد، در حالیکه جواب الگوریتم ژنتیک به جواب اولیه حساس بوده است. متذکر می‌شود که در این بررسی و به منظور امکان مقایسه و سنجش کیفیت جواب‌های الگوریتم CA نسبت به یک جواب مینا، مسأله قدری ساده‌تر شده است (ساده‌سازی رابطه دی-اشل پایاب و...) تا روش‌های بهینه‌سازی گرادیان-پایه در Lingo قادر به حل مسأله و تولید جواب مبنای مورد نظر برای مقایسه باشند. این در شرایطی است که به عنوان مثال در صورت اضافه شدن معیار اعتمادپذیری تأمین نیاز یا تولید انرژی به مسأله و ضرورت افزودن متغیرهای دومقداره به فرمول‌بندی مسأله غیرخطی موجود، روش‌های کلاسیک بهینه‌سازی قادر به حل مسأله نخواهند بود. شایان توجه است که الگوریتم CA به سادگی قابلیت اداره معادلات پیچیده مذکور را در فرایند حل خود داراست. زیرا این‌گونه معادلات در CA به دلیل ماهیت شبیه‌ساز-مینا بودن روش، با استفاده از گزاره‌های شرطی اعمال می‌شوند و دخیل شدن آنها روند حل را با دشواری مواجه نمی‌سازد. همچنین با دقت در نتایج می‌توان نتیجه گرفت که بی‌نیازی روش اتوماتای سلولی از پارامترهای آزاد و تحلیل حساسیت‌های مربوطه، عدم تأثیرپذیری روند همگرایی از جواب اولیه و ابتکار این روش در تقسیم مسأله به زیرمسأله‌های دارای هم‌پوشانی و بهره‌گیری از حل مرحله به مرحله، منجر به پتانسیل بالای روش برای حل مسائل بزرگ‌مقیاس شده است.

#### ۶- نتیجه‌گیری

در این تحقیق کاربرد الگوریتم اتوماتای سلولی (CA) در بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخازن سد‌های چندمنظوره ارزیابی شد. بدین منظور مدلی جهت بهینه‌سازی بهره‌برداری از سیستم تک مخزنه سد و نیروگاه بالارود با اهداف تأمین نیاز آبیاری پایین‌دست، تولید انرژی برقایی و تأمین نیاز زیست‌محیطی مورد بررسی قرار گرفت. همچنین

- NSGAI for multi-objective design of urban water networks. *Lecture Notes in Computer Science* 4403:546-559
- Guo Y, Walters GA, Khu ST, Keedwell E (2006) Optimal design of sewer networks using cellular automata and genetic algorithm. in IWA Pub., London, UK
- Guo Y, Walters GA, Khu ST, Keedwell E (2007) A novel cellular automata based approach to storm sewer design. *Engineering Optimization* 39(3):345-364
- Hall WA, Butcher WS, Esogbue A (1968) Optimization of the operation of a Multiple-Purpose Reservoir by Dynamic Programming. *Water Resources Research* 4(3):471-477
- Heidari M, Chow VT, Kokotović PV (1971) Discrete differential dynamic programming approach to water resources systems optimization. *Water Resources Research* 7(2):273-282
- Iran Ministry of Energy (2013) Water resources and hydropower planning report-Balarud reservoir, Khuzestan water and power authority (In Persian)
- Keedwell E, Khu ST (2005) A hybrid genetic algorithm for the design of water distribution networks. *J. of Engineering Application of Artificial Intelligence* 18(4):461-472
- Keedwell E, Khu ST (2006) Novel cellular automata approach to optimal water distribution network design. *Journal of Computing in Civil Engineering* 20(1):49-56
- Kim T, Heo JH, Jeong CS (2006) Multireservoir system optimization in the Han River basin using multi-objective genetic algorithms. *Hydrological Processes* 20(9):2057-2075
- Kita E, Toyoda T (2000) Structural design using Cellular Automata. *Structural and Multidisciplinary Optimization* 19(1):64-73
- Kumar DN, Reddy MJ (2006) Ant Colony Optimization for multi-purpose reservoir operation. *Water Resources Management* 20(6):879-898
- Kumar DN, Reddy MJ (2007) Multi-purpose reservoir operation using particle swarm optimization. *Journal of Water Resources planning and management* 133(3)
- Loucks DP, Stedinger JR, Haith DA (1981) *Water resource systems planning and analysis*, Prentice-Hall, 559p
- Marín M, Rauch V, Rojas-Molina A, López-Cajún CS, Herrera A, Castaño VM (2000) Cellular automata simulation of dispersion of pollutants. *Computational Materials Science* 18(2):132-140
- Automata. *Lecture Notes in Computer Science* 9863:201-209
- Afshar MH, Rohani M (2012) Optimal design of sewer networks using cellular automata-based hybrid methods: Discrete and continuous approaches. *Engineering Optimization* 44(1):1-22
- Afshar MH, Rohani M (2012) Optimal design of gravitational sewer networks with general cellular automata. *Journal of Water and Wastewater* 90:12-25 (In Persian)
- Afshar MH, Shahidi M, Rohani M, Sargolzaei M (2011) Application of cellular automata to sewer network optimization problems. *Scientia Iranica* 18(3):304-312
- Afshar MH, Shahidi M (2009) Optimal solution of large-scale reservoir-operation problems: Cellular-automata versus heuristic-search methods. *Journal of Engineering Optimization* 41(3):275-293
- Afshar A, Sharifi F, Jalali MR (2009) Non-dominated archiving multi-colony ant algorithm for multi-objective optimization: Application to multi-purpose reservoir operation. *Engineering Optimization* 41(4):313-325
- Afshar MH, Zaheri MM, Kim JH (2016) Improving the efficiency of Cellular Automata for sewer network design optimization problems using Adaptive Refinement. *Procedia Engineering* 154:1439-1447
- Ahmadianfar I, Adib A, Taghian M, Haghghi A (2016) Optimization operation from storage dams using non-dominated sorting Genetic Algorithm. *Irrigation Sciences and Engineering* 39(2):89-100 (In Persian)
- Ahmed JA, Sarma AK (2005) Genetic Algorithm for optimal operating policy of a multipurpose reservoir. *Water Resources Management* 19(2):145-161
- Baltar A, Fontane DG (2004) A multiobjective Particle Swarm Optimization model for reservoir operations and planning. Dept. of Civil and Environmental Engineering, Colorado State University, USA
- Fallah-Mehdipour E, Haddad OB (2013) Optimization of multipurpose reservoir operation with application of Particle Swarm Optimization Algorithm. *Journal of Water & Wastewater* 23(4):97-105 (In Persian)
- Ghalenoe SV (2015) Reliability based optimal design and operation of reservoirs using Cellular Automata. MSc Thesis, Iran university of science and technology, Tehran, Iran (In Persian)
- Guo Y (2005) Sewer network optimal design base on cellular automata principles. In: Proc. of XXXI IAHR Congress, Seoul, South Korea
- Guo Y, Keedwell E, Walters GA, Khu ST (2007) Hybridizing cellular automata principles and

- Tatting B, Gürdal Z (2000) Cellular Automata for design of two dimensional continuum structures. In: Proc. of 8th symposium on Multidisciplinary Analysis and Optimization, Long Beach, CA, USA
- Ulam SM (1960) A collection of mathematical problems. Interscience Publishers, New York, NY, USA
- Von Neumann J (1966) Theory of Self-Reproducing Automata. University of Illinois Press, Champaign, IL, USA
- Wurbs RA (1993) Reservoir system simulation and optimization models. Journal of water resources planning and management 119(4):455-472
- Yakowitz S (1982) Dynamic programming applications in water resources. Water resources research 18(4):673-696
- Yeh WWG (1985) Reservoir management and operations models: a state-of-the-art review. Water resources research 21(12):1797-1818
- Nagel K (2002) Cellular Automata models for transportation applications. Lecture Notes in Computer Science 2493:20-31
- Nourani K, Abolvaset N, Salehi K (2012) A hybrid Goal Programming method and Adaptive Neural-Fuzzy Inference System for Optimal Operation of a Multi-Objective Two-Reservoir System. Journal of Iran-Water Resources Research 8(2):1-11 (In Persian)
- Rohani M, Afshar MH (2013) Sewer networks optimization using Cellular Automata. Studies in Engineering and Technology 1(1)
- Sedaghat S (2011) Optimal rule curve of single reservoirs using Cellular Automata. MSc Thesis, Iran university of science and technology, Tehran, Iran (In Persian)
- Simonovic SP, Mariño MA (1980) Reliability programming in reservoir management: 1. Single multipurpose reservoir. Water Resources Research 16(5):844-848