

تعیین سیاست بهره‌برداری بهینه‌چندهدفه از مخزن سد بوستان با استفاده از الگوریتم‌های نهنگ و NSGA-II مبتنی بر تئوری بازی‌ها و روش آنترپی شانون

علیرضا دنیائی^۱، امیرپویا صراف^{۲*} و حسن احمدی^۳

چکیده

استفاده از روش‌ها و ابزارهای بهینه‌سازی برای بهره‌برداری چندهدفه از مخازن، امری اجتناب‌ناپذیر است. در این پژوهش پس از معرفی الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه نهنگ (MOWOA)، عملکرد آن در مسأله بهره‌برداری بهینه از مخزن سد بوستان بر اساس روش حل تعارض کالای و اشمورودینسکی ارزیابی شد. در مسأله بهینه‌سازی حاضر، ضمن اعمال محدودیت‌های معادلات پیوستگی مخزن، توابع هدف به صورت کمینه‌سازی کمبودهای نیاز آبی اراضی پایین‌دست و کمینه‌سازی انحراف از حجم ایده‌آل کنترل سیل طی دوره بهره‌برداری تعریف شد. عملکرد حاصل از الگوریتم‌های پیشنهادی با الگوریتم NSGA-II به‌عنوان یکی از الگوریتم‌های رایج در این زمینه مقایسه شد. عملکرد مدل بر اساس شاخص‌های اطمینان‌پذیری، برگشت‌پذیری، آسیب‌پذیری و پایداری مقایسه و ارزیابی شدند و برای حل تعارض موجود بین اهداف، از روش‌های مبتنی بر نظریه بازی‌ها (روش کالای و اشمورودینسکی) برای یافتن جواب بهینه استفاده شد. نتایج حاصل از بهینه‌سازی نشان داد که در هر دو تابع هدف تأمین نیاز آبی و کنترل سیلاب، MOWOA عملکرد بهتری را نسبت به NSGA-II از خود نشان می‌دهد. در خصوص مدت زمان انجام عملیات بهینه‌سازی، MOWOA به دلیل دارا بودن پارامترهای تنظیمی کمتر، سریع‌تر از NSGA-II به همگرایی می‌رسد. شاخص‌های ارزیابی عملکرد مدل، حاکی از این است که از دیدگاه اطمینان‌پذیری MOWOA از مقادیر بالاتری (۸۶٪) نسبت به الگوریتم NSGA-II برخوردار است. نتایج به دست آمده از روش آنترپی شانون برای وزن‌دهی شاخص‌ها نشان داد که پارامترهای ارزیابی مدل دارای وزن بیشتری نسبت به توابع هدف هستند. نتایج حاصل از روش کالای و اشمورودینسکی نشان داد سیاست‌های بهره‌برداری از مخزن بوستان انطباق بسیار مناسبی با MOWOA را نشان می‌دهد. از سوی دیگر از آنجایی که مطلوب‌ترین و نامطلوب‌ترین مقادیر توابع هدف به دست آمده بوسیله MOWOA کمتر است، می‌توان عملکرد MOWOA را مناسب‌تر تشخیص داد.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم بهینه‌سازی NSGA-II، الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه نهنگ، بهینه‌سازی، بهره‌برداری چندهدفه، شاخص‌های ارزیابی عملکرد مدل، روش آنترپی شانون، تئوری بازی‌ها، مخزن سد بوستان.

ارجاع: دنیائی ع. صراف ا. و احمدی ح. ۱۳۹۹. تعیین سیاست بهره‌برداری بهینه‌چندهدفه از مخزن سد بوستان با استفاده از الگوریتم‌های نهنگ و NSGA-II مبتنی بر تئوری بازی‌ها و روش آنترپی شانون. مجله پژوهش آب ایران. ۳۹: ۹۹-۱۱۱.

۱- کاندیدای دکتری مهندسی عمران، گروه مهندسی عمران، واحد رودهن، دانشگاه آزاد اسلامی، رودهن، ایران.

۲- استادیار گروه مهندسی عمران، واحد رودهن، دانشگاه آزاد اسلامی، رودهن، ایران.

۳- استادیار گروه مهندسی عمران، واحد رودهن، دانشگاه آزاد اسلامی، رودهن، ایران.

* نویسنده مسئول: sarraf@riau.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۲/۰۸

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۱/۵۱

مقدمه

انرژی تولیدشده روزانه، نشان دادند هرچند زمان اجرای روش NSGA-II بیش از دو برابر روش MOPSO است، دقت نتایج آن در هر دو هدف ۲۰ درصد بهتر از MOPSO است. تانگ و همکاران (۲۰۲۰)، در پژوهشی ضمن مقایسه سه الگوریتم R-NSGA-II^۱، r-NSGA-II^۲ و g-NSGA-II^۳ با الگوریتم NSGA-II استاندارد در خصوص بررسی عملکرد مخزن در راستای بهبود بازدهی جست‌وجو و کیفیت راه‌حل‌های برتر نتیجه گرفتند که R-NSGA-II و r-NSGA-II می‌توانند بازده جست‌وجو و کیفیت راه‌حل‌های برتر را بهبود بخشند. محمدی و همکاران (۲۰۱۹) بهره‌برداری بهینه از مخزن سد سلمان فارسی را با استفاده از الگوریتم نهنگ و هیبرید آن با الگوریتم ژنتیک به صورت تک‌هدفه مورد بررسی قراردادند و دریافتند که عملکرد الگوریتم هیبریدی نهنگ - ژنتیک نسبت به سایر الگوریتم‌ها در رتبه اول قرار دارد. به همین دلیل در این پژوهش از الگوریتم فراابتکاری NSGA-II و چندهدفه نهنگ که برای نخستین بار برای بهینه‌سازی سیاست‌های بهره‌برداری از مخزن سد بوستان به صورت چندهدفه با رویکرد کاهش کمبودهای نیاز آبی اراضی کشاورزی و مدیریت حجم ذخیره سیلاب (با عنوان دوهدفه) استفاده شده و نتایج آن‌ها با یکدیگر مقایسه شده است.

مواد و روش‌ها

منطقه مطالعه شده و اطلاعات آماری

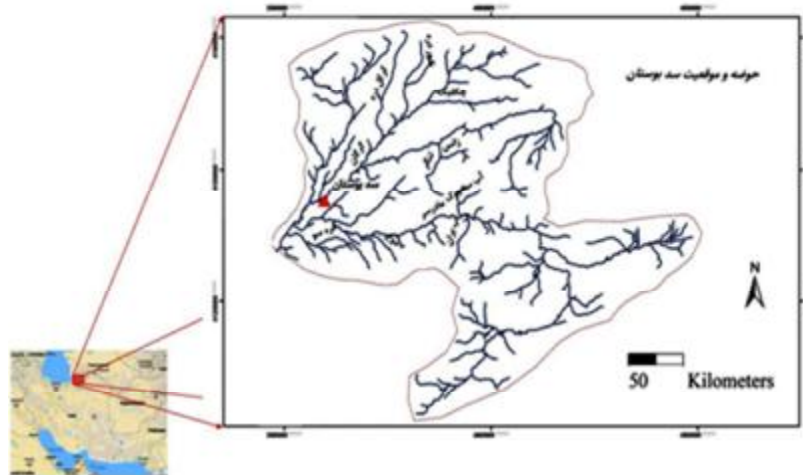
سد مخزنی بوستان روی رودخانه گرگانرود در فاصله ۳۵ کیلومتری شمال شرقی شهر گنبد کاووس در مسیر رودخانه تمر روی رودخانه گرگانرود احداث شده است. هدف از احداث آن، تأمین نیازهای کشاورزی، بهبود و توسعه اراضی ساحل راست، تأمین نیازهای آبی بخش صنعت، حبابه‌های زیست‌محیطی، بهبود عملکرد فعلی شبکه آبیاری و کنترل و مهار سیلاب بود. حجم این مخزن در تراز نرمال ۱۰۰ متر از سطح دریا ۴۳/۷ میلیون مترمکعب و در تراز سرریز ۵۴ میلیون مترمکعب است. در شکل شماره ۱، موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه مشخص شده است.

ایجاد توازن بین تغییرات منابع و مصارف آب در بهره‌برداری از طرح‌های آبی به‌ویژه سدها از اهمیت بالایی برخوردار است. در این میان ضروری است که با استفاده از قوانین بهینه، به تأمین و تقاضای آب مورد نیاز دوره‌های آبی توجه شود؛ لذا گزینه‌های تصمیم‌گیری باید با در نظر گرفتن همه اهداف و با استفاده از مدل‌های بهینه‌سازی چندهدفه استخراج شوند. در این میان، الگوریتم‌های فراابتکاری چندهدفه، مجموعه‌ای از پاسخ‌های بهینه را به دست می‌دهند که در قالب منحنی پرتو قابل ارائه هستند. از آنجایی که بهره‌برداری از مخازن مسأله‌ای غیرخطی و پیچیده است، استفاده از هر روش بهینه‌سازی در این زمینه مناسب نیست (دنیائی و همکاران، ۲۰۲۰b). روش‌های فراابتکاری در این زمینه بارها به صورت موفقیت‌آمیزی به کار گرفته شده است (حسینی‌موغاری، ۲۰۱۴). حتی و همکاران (۲۰۱۳) برای بهینه‌سازی یک سامانه دومخزنه با اهداف حداکثر کردن درآمد حاصل از فروش انرژی نیروگاه و افزایش حجم ذخیره سیلاب در حوضه قزل‌اوزن، از الگوریتم‌های ژنتیک ساده و چندهدفه NSGA-II استفاده کردند. با توجه به نتایج حاصل، الگوریتم NSGA-II جواب‌های مناسب‌تری نسبت به الگوریتم ژنتیک ارائه داد. بزرگ‌حداد و همکاران (۲۰۱۸) سه تابع هدف اطمینان‌پذیری، برگشت‌پذیری و آسیب‌پذیری تولید انرژی برقی را در مخزن سد کارون ۴ با استفاده از الگوریتم چندهدفه NSGA-II بهینه‌سازی کردند. دشتی و همکاران (۲۰۱۷) عملکرد الگوریتم تکاملی و تفاضلی الگوریتم اصلاح شده جست و جوی هارمونی در بهره‌برداری بهینه از سیستم تک مخزنه سد علویان را ارزیابی کردند. نتیجه پژوهش آنان بیان‌کننده عملکرد خوب الگوریتم تکاملی تفاضلی بود. احترام و همکاران (۲۰۱۸) به بهره‌برداری از مخزن سد آیدوغموش با استفاده از الگوریتم‌های خفاش، ژنتیک، ازدحام ذرات، کوسه، علف‌های هرز و الگوریتم kidney پرداختند. نتیجه پژوهش آنان نشان داد که الگوریتم kidney بهترین عملکرد را در مقایسه با سایر الگوریتم‌های تکاملی دارد. پرهیزکاری و همکاران (۲۰۱۹) ضمن مقایسه عملکرد الگوریتم‌های NSGA-II و MOPSO در حل مسأله بهره‌برداری بهینه چندهدفه از مخزن برقی سد کارون ۵ با هدف بیشینه‌سازی درآمد سالانه و بیشینه‌سازی حداقل

1- The Reference point Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm II

2- Non-r-dominance sorting genetic algorithm II

3- Gradient-based NSGA-II



شکل ۱- موقعیت سد بوستان در حوضه گرگانرود

که در آن De_t نیاز پایین دست مخزن سد در دوره t ، Re_t خروجی سد در دوره t و De_{max} نیاز بیشینه سد گلستان است.

تابع هدف کنترل سیل

این تابع هدف به صورت کمینه سازی مجموع مربعات انحراف حجم مخزن از حجم ایده آل برای کنترل سیلاب تعریف می شود:

$$\text{Minimize } F_{(\text{Flood Control})} = \sum_{t=1}^T \left(\frac{S_G - S_t}{S_G} \right)^2 \quad (2)$$

که در این معادله S_G حجم ایده آل مخزن برای کنترل سیلاب و S_t حجم مخزن در دوره زمانی t است. معادله پیوستگی نیز از اساسی ترین معادلات مدل سازی بهره برداری از مخزن است که به صورت زیر تعریف می شود:

$$A_{(t)} = aS_{(t)}^3 + bS_{(t)}^2 + cS_{(t)} + d \quad (3)$$

$$\bar{A}_{(t)} = (A_{(t)} + A_{(t+1)})/2 \quad (4)$$

$$Loss_{(t)} = \bar{A}_{(t)} \times Ev_{(t)} \quad (5)$$

$$S_{(t+1)} = S_{(t)} + Q_{(t)} - Re_{(t)} - Sp_{(t)} - Loss_{(t)} \quad (6)$$

که در این معادله، $S_{(t)}$ و $S_{(t+1)}$ به ترتیب حجم مخزن ابتدا و انتهای دوره t ، $Q_{(t)}$ جریان ورودی به مخزن در طول دوره t ، $Sp_{(t)}$ مقدار سرریز از مخزن در طول دوره t ، $Ev_{(t)}$ میزان تبخیر از سطح مخزن در طول دوره t ، $Loss_{(t)}$ تلفات ناشی از تبخیر سطح مخزن در طول دوره t و $\bar{A}_{(t)}$ متوسط سطح مخزن در ابتدا و انتهای دوره t است. a ، b ، c و d هم ضرایب معادله سطح-حجم مخزن هستند. سرریز از مخزن قیدهایی را در محاسبات اعمال می کند، به گونه ای که:

مدل بهره برداری بهینه از مخزن سد

در این پژوهش، استخراج قواعد بهره برداری به صورت چندهدفه (بر اساس سهم تغییر آبدی به مخزن، حجم ذخیره، حجم تقاضا)، در یک افق برنامه ریزی شامل یک دوره زمانی ۹۵ ماهه از مرداد ۱۳۹۰ تا خرداد ۱۳۹۸ در نظر گرفته شده است. اطلاعات ورودی به مدل شامل سری زمانی ماهانه حجم آورد رودخانه، حجم تبخیر از سطح مخزن و حجم نیازهای پایین دست سد است. همچنین حجم رهاسازی از مخزن به عنوان متغیر تصمیم گیری مسأله بهینه سازی تعیین شده است. توابع هدف مدل بهینه سازی به صورت کمینه سازی کل کمبود تأمین آب مورد نیاز پایین دست اعم از کشاورزی، صنعت و محیط زیست و کمینه سازی مجموع مربعات انحراف حجم مخزن از حجم ایده آل برای کنترل سیلاب تعریف می شود. مقایسه سیاست های بهینه تخصیص با استفاده از معیارهای عملکرد و شاخص های کارایی مخزن مشخص می شود. توابع هدف نیز در این پژوهش به صورت زیر تعریف شده اند:

تابع هدف تأمین نیازهای کل

تابع هدف اول مربوط به تأمین نیازهای پایین دست است که به صورت کمینه سازی مجموع مربعات انحراف مقدار تقاضای آب پایین دست از میزان رهاسازی آب تعریف می شود:

$$\text{Minimize } F_{(Re)} = \sum_{t=1}^T \left(\frac{De_t - Re_t}{De_{max}} \right)^2 \quad (1)$$

چندهدفه است. در واقع روش کار الگوریتم NSGA II به گونه‌ای است که ابتدا جمعیت اولیه ایجاد، سپس معیار برانندگی محاسبه می‌شود. در ادامه فاصله ازدحامی^۱ که فاکتوری برای انتخاب بهترین جواب‌ها از نظر پراکندگی روی یک جبهه است محاسبه شده و پس از آن، انتخاب از میان جمعیت اولیه بر اساس رتبه جمعیت و میزان فاصله ازدحامی صورت می‌پذیرد، سپس با فرض این که دو عضو از جمعیت موجود دارای یک رتبه‌اند، عضو انتخاب می‌شود که فاصله ازدحامی بیشتری دارد. البته اولویت انتخاب، ابتدا با رتبه و سپس بر اساس فاصله ازدحامی است. در مرحله بعد انجام تقاطع و جهش برای تولید فرزندان جدید صورت و تلفیق جمعیت اولیه و جمعیت به دست آمده از تقاطع و جهش در دستور کار قرار می‌گیرد. پس از آن جمعیت والدین با بهترین اعضای جمعیت تلفیق، جایگزین و دوباره فرآیند انتخاب بر اساس رتبه، فاصله ازدحامی، تقاطع، جهش و مراحل تلفیق تا رسیدن به شرایط بهینگی تکرار می‌شود (کوتیلو و همکاران، ۲۰۰۷).

در الگوریتم NSGA II، فاصله ازدحامی بر اساس معادله زیر محاسبه می‌شود:

$$CD[i] = \frac{(f_m^{i+1} - f_m^{i-1})}{(f_m^{max} - f_m^{min})} \quad (12)$$

که در آن $CD[i]$ فاصله ازدحامی فرد i ام روی جبهه F ، f_m^{max} مقدار تابع هدف f_m در F و f_m^{min} به ترتیب بیشترین و کمترین مقدار تابع هدف m در جبهه F است. لذا جوابی بهتر است که فاصله ازدحامی بیشتری داشته باشد (معصومی و همکاران، ۲۰۱۰).

الگوریتم بهینه‌سازی نهنگ^۲ (WOA)

این الگوریتم همانند سایر الگوریتم‌های فراابتکاری الهام گرفته از طبیعت، رفتار اجتماعی نهنگ‌های گوژپشت را به تصویر می‌کشد؛ به گونه‌ای که با استفاده از سه عملگر محاصره طعمه، روش حمله حباب - تور (فاز استخراج) و جست‌وجوی طعمه (فاز اکتشاف) به روزرسانی موقعیت عوامل جست‌وجو در هر تکرار انجام می‌شود (دنیائی و همکاران، ۲۰۲۰a).

$$S_{P_t} = \begin{cases} S_t + Q_t - Re_t - Loss(t) - S_{max} \\ \text{if } S_t + Q_t - Re_t - Loss(t) > S_{max} \\ \mathbf{0} \\ \text{if } S_t + Q_t - Re_t \leq S_{max} \end{cases} \quad (7)$$

در معادله فوق S_{max} حجم بیشینه مخزن است.

محدودیت حجم ذخیره مخزن: این محدودیت بیان می‌کند که در تمام مراحل بهره‌برداری از مخزن می‌بایست حجم ذخیره مخزن بین مقادیر حداقل و حداکثر حجم ذخیره مخزن قرار داشته باشد. محدودیت حجم ذخیره مخزن به صورت معادله زیر تعریف می‌شود (دنیائی و همکاران، ۲۰۲۱):

$$S_{min} \leq S_t \leq S_{max} \quad (8)$$

در معادله فوق S_{min} حجم کمینه مخزن است. برای اعمال محدودیت حجم ذخیره مخزن از تابع جریمه P_1 استفاده می‌شود (محمدی و همکاران، ۲۰۱۹):

$$P_1 = \begin{cases} \sum_{i=1}^T \left(\frac{S_t - S_{min}}{S_{min}} \right) \text{ if } S_t < S_{min} \\ \sum_{i=1}^T \left(\frac{S_t - S_{max}}{S_{max}} \right) \text{ if } S_t > S_{max} \\ \mathbf{0} \text{ if } S_{min} \leq S_t \leq S_{max} \end{cases} \quad (9)$$

محدودیت حجم رهاسازی از مخزن: به این معنی که در تمام مراحل بهره‌برداری از مخزن باید حجم رهاسازی از مخزن علاوه بر مثبت بودن، بین مقادیر حداقل و حداکثر حجم موردنیاز پایین دست قرارداد داشته باشد که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$De_{min,t} \leq Re_t \leq De_{max,t} \quad (10)$$

که در معادله فوق $De_{min,t}$ و $De_{max,t}$ به ترتیب حداقل و حداکثر حجم آب موردنیاز پایین دست طی ماه t هستند. برای اعمال محدودیت حجم رهاسازی از مخزن تابع جریمه P_2 اعمال که به صورت معادله زیر تعریف می‌شود (محمدی و همکاران، ۲۰۱۹):

$$P_2 = \begin{cases} \sum_{i=1}^T \left(\frac{Re_t - De_{min}}{De_{min}} \right) \text{ if } Re_t < De_{min} \\ \sum_{i=1}^T \left(\frac{Re_t - De_{max}}{De_{max}} \right) \text{ if } Re_t > De_{max} \\ \mathbf{0} \text{ if } De_{min} \leq Re_t \leq De_{max} \end{cases} \quad (11)$$

الگوریتم ژنتیک چندهدفه با مرتب‌سازی نامغلوب

(NSGA-II)

الگوریتم ژنتیک چندهدفه با مرتب‌سازی نامغلوب، از الگوریتم‌های شاخص و پرکاربرد در زمینه بهینه‌سازی

1- Crowding distance

2- Whale Optimization Algorithm

محاصره شکار

از آنجاکه محل طراحی بهینه در فضای جست و جوی نهنگ‌های گوژ پشت شناخته شده نیست، الگوریتم بهینه‌سازی نهنگ، فرض می‌کند بهترین راه حل در حال حاضر طعمه هدف است. پس از شناسایی بهترین عامل جست و جو، سایر عوامل تلاش می‌کنند که مکان خود را نسبت به بهترین عامل تغییر دهند (معادلات (۱۳) و (۱۴)).

$$\vec{D} = |\vec{C} \cdot \vec{X}^*(t) - X(t)| \quad (13)$$

$$\vec{X}(t+1) = \vec{X}^*(t) - \vec{A} \cdot \vec{D} \quad (14)$$

در معادلات فوق، t: تکرار جاری، \vec{A} و \vec{C} بردارهای ضرایب، \vec{X}^* بردار مکان بهترین راه حل به دست آمده در حال حاضر، \vec{X} بردار مکان، | | علامت قدرمطلق و . ضرب نقطه‌ای المان در المان است. در صورت وجود راه حل بهتر، نیاز است که در هر تکرار \vec{X}^* به‌روزرسانی شود. بردارهای \vec{A} و \vec{C} با معادلات زیر محاسبه می‌شوند:

$$\vec{A} = 2\vec{a} \cdot \vec{r} - \vec{a} \quad (15)$$

$$\vec{C} = 2 \cdot \vec{r} \quad (16)$$

که در آن \vec{a} به‌صورت خطی از مقدار ۲ تا صفر طی تکرارها کاهش می‌یابد و \vec{r} بردار تصادفی در فاصله صفر تا یک است.

تصویر سمت چپ شکل ۳ منطق نهفته در معادله (۱۴) را برای یک مسأله دوبعدی نشان می‌دهد. مکان (X, Y) یک عامل جست و جو می‌تواند با توجه به بهترین مکان فعلی (X*, Y*) به‌روز شود. مناطق مختلف پیرامون بهترین عامل می‌تواند با تنظیم مقدار بردارهای \vec{A} و \vec{C} و با توجه به موقعیت فعلی به دست آید. همچنین در تصویر سمت راست شکل ۳ موقعیت تغییر یافته امکان‌پذیر برای یک عامل جست و جو در فضای سه بعدی نشان داده شده است. باید توجه داشت که با تعریف بردار تصادفی \vec{r} دستیابی به هر موقعیتی در فضای جست و جو واقع شده میان نقاط کلیدی امکان‌پذیر است. بنابراین معادله (۱۴) به هر عامل جست و جو امکان تغییر موقعیت خود در منطقه بهترین راه حل فعلی را می‌دهد و محاصره شکار را شبیه‌سازی می‌کند.

روش حمله شبکه حباب (فاز استخراج)

برای مدل‌سازی ریاضی رفتار شبکه حبابی نهنگ‌های گوژپشت، دو روش به‌صورت زیر طراحی شده است:

مکانیزم محاصره انقباضی: این رفتار با افزایش مقدار \vec{a} در معادله (۱۵) حاصل می‌شود. توجه شود که محدوده نوسان \vec{A} به‌وسیله \vec{a} کاهش می‌یابد؛ به عبارت دیگر \vec{A} مقداری تصادفی در فاصله a تا $-a$ است که در آن a در طی تکرارها، از مقدار ۲ تا صفر کاهش می‌یابد.

با انتخاب مقادیر تصادفی \vec{A} در فاصله ۱ تا -۱، مکان جدید یک عامل جست و جو می‌تواند در هر جایی بین مکان اصلی عامل و مکان بهترین عامل کنونی، قرار گیرد. تصویر شکل ۲، مکان‌های ممکن از (X, Y) تا (X*, Y*) را با داشتن شرط $0 \leq A \leq 1$ در فضای دوبعدی حاصل می‌شود، نشان می‌دهد.

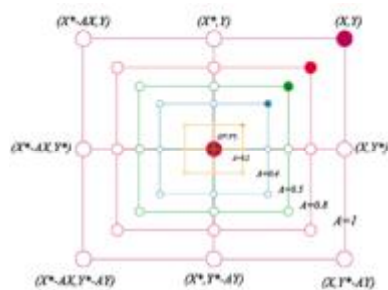
موقعیت به‌روزرسانی مارپیچی: همان‌گونه که در شکل ۴ دیده می‌شود، این روش ابتدا فاصله بین نهنگی که در مکان (X, Y) و طعمه‌ای را که در مکان (X*, Y*) قرار گرفته است محاسبه می‌کند. سپس یک معادله مارپیچی بین موقعیت نهنگ و شکار ایجاد می‌شود تا حرکت حلزونی شکل نهنگ گوژپشت را به شکل زیر نشان دهد:

$$\vec{X}(t+1) = \vec{D} \cdot e^{bl} \cdot \cos(2\pi l) + \vec{X}^*(t) \quad (17)$$

به طوری که \vec{D} از معادله (۱۳) به دست می‌آید و به فاصله نأمین نهنگ تا شکار (بهترین راه حل به دست آمده تا کنون) اشاره دارد، b ثابتی برای تعریف شکل مارپیچی لگاریتمی، l عددی تصادفی بین -۱ تا +۱ است. برای مدل‌سازی این رفتار فرض می‌شود که نهنگ با احتمال ۵۰٪ از بین سازوکار محاصره انقباضی یا مدل مارپیچی یکی از آن‌ها را انتخاب می‌کند تا موقعیت نهنگ‌ها طی فرآیند بهینه‌سازی به‌روز شود. مدل ریاضی آن مرحله به‌صورت معادله زیر تعریف می‌شود:

$$\vec{X}(t+1) = \begin{cases} \vec{X}^*(t) - \vec{A} \cdot \vec{D} & \text{if } p < 0.5 \\ \vec{D} \cdot e^{bl} \cdot \cos(2\pi l) + \vec{X}^*(t) & \text{if } p \geq 0.5 \end{cases} \quad (18)$$

که در آن P عددی تصادفی بین صفر و یک می‌باشد. ضمناً \vec{A} با مقادیر تصادفی بین -۱ تا +۱ نشانگر نزدیکی عامل جست و جو به نهنگ مرجع است.



شکل ۲- روش حمله حباب - تور (مکانیزم محاصره انقباضی)

ابتدا باید جمعیت اولیه در نظر گرفته شود.

$$X = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_1 \\ \vdots \\ X_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{1,1} & \dots & X_{1,d} \\ X_{2,1} & \dots & X_{2,d} \\ \vdots & & \vdots \\ X_{n,1} & \dots & X_{n,d} \end{bmatrix} \quad (21)$$

n تعداد نهنگ‌ها و d مبین ابعاد است

سپس تابع برازندگی جمعیت اولیه نهنگ ارزیابی شود. برای هر نهنگ حداقل دو یا چند تابع برازندگی به تناسب مسأله (F₂ و F₁) مورد نیاز است. پس از آن راه حل‌های نامغلوب تعیین و وارد مخزن و پس از مشخص شدن موقعیت بهترین نهنگ، موقعیت سایر نهنگ‌ها بر اساس آن با توجه به شرایط زیر به‌روز می‌شود:

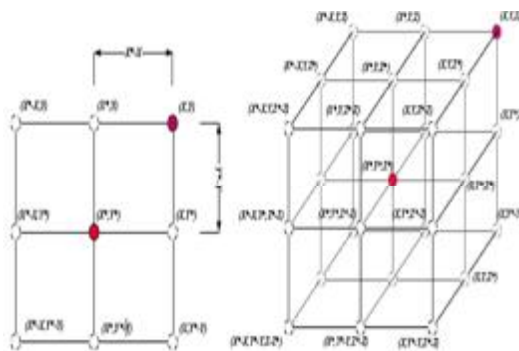
$$FX = \begin{bmatrix} F_1(X_1) & F_2(X_1) \\ F_1(X_2) & F_2(X_2) \\ \vdots & \vdots \\ F_1(X_n) & F_2(X_n) \end{bmatrix} \quad (22)$$

- برای هر نهنگ ابتدا مقادیر p و A، a، c، l باید محاسبه شود و در صورتی که |A| < 1 باشد، باید موقعیت نهنگ فعلی بر اساس معادله $\vec{X}(t+1) = \vec{X}^*(t) - \vec{A} \cdot \vec{D}$ به‌روز شود. در غیر این صورت (|A| > 1) موقعیت نهنگ فعلی بر اساس معادله $\vec{X}(t+1) = \vec{X}_{rand} - \vec{A} \cdot \vec{D}$ به‌روز می‌شود. - در صورتی که مقادیر p کوچک‌تر یا بزرگ‌تر مساوی ۰/۵ باشند، موقعیت نهنگ فعلی بر اساس معادله زیر به‌روز شود.

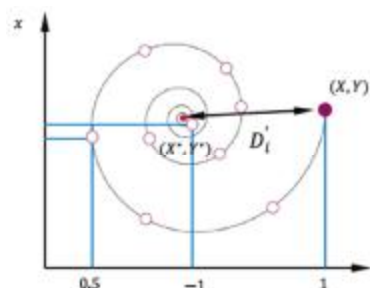
$$\vec{X}(t+1) = \begin{cases} \vec{X}^*(t) - \vec{A} \cdot \vec{D} & \text{if } p < 0.5 \\ \vec{D} \cdot e^{bt} \cdot \cos(2\pi l) + \vec{X}^*(t) & \text{if } p \geq 0.5 \end{cases}$$

پس از بررسی مکان هر یک از عوامل، در صورتی که خارج از فضای جست و جو قرار بگیرند، اصلاحات لازمه صورت گیرد. سپس تابع برازندگی نهنگ‌های به‌روز شده دوباره محاسبه می‌شود. در صورت وجود راه حل‌های بهتر، ضمن به‌روزرسانی مخزن، مکان عوامل جست و جو دوباره به‌روز می‌شود. در نهایت الگوریتم تا حداکثر تکرار اجرا می‌شود (کوماوات و همکاران، ۲۰۱۷).

در پژوهش حاضر از الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه نهنگ و NSGA-II برای اولین بار برای حل مسأله بهینه‌سازی مخزن سد بوستان با رویکرد مقایسه‌ای استفاده شده است.



شکل ۳- بردارهای مکان دو و سه بعدی و مکان‌های امکان‌پذیر بعدی آن‌ها (X* بهترین راه‌حلی است که تا به حال به دست آمده است)



شکل ۴- روش حمله حباب- تور (مدل‌بروزرسانی مارپیچی)

جست و جوی شکار (فاز شناسایی)

در جست و جو برای طعمه جهت به روزرسانی موقعیت عامل جست و جو، به جای استفاده از داده‌های بهترین عامل جستجو، انتخاب تصادفی عامل مدنظر قرار می‌گیرد که مدل ریاضی آن به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\vec{D} = |\vec{c} \cdot \vec{X}_{rand} - \vec{X}(t)| \quad (19)$$

$$\vec{X}(t+1) = \vec{X}_{rand} - \vec{A} \cdot \vec{D} \quad (20)$$

که \vec{X}_{rand} بردار موقعیت تصادفی منتخب از جمعیت جاری بوده و بردار \vec{A} با مقادیر تصادفی بزرگتر از +1 و یا کمتر از -1 به کار گرفته می‌شود تا عامل جست و جو مجبور به دور شدن از نهنگ مرجع شود.

برای حل مسائل چند هدفه، راه‌حل‌های نامغلوب توسط یک کنترل‌کننده^۱ شناسایی شده و بهترین راه‌حل‌های به دست آمده در یک مخزن^۲ ذخیره می‌شوند.

مراحل اجرای الگوریتم بهینه‌سازی چند هدفه نهنگ به شرح زیر است.

1- Archive controller
2- Archive repository

شاخص‌های ارزیابی عملکرد مدل‌ها

عملکرد مدل‌ها با استفاده از شاخص‌های اطمینان‌پذیری، برگشت‌پذیری، آسیب‌پذیری و پایداری ارزیابی می‌شوند. برای محاسبه شاخص‌های ارزیابی ابتدا پارامتر C_t به صورت معادله زیر محاسبه می‌شود:

$$C_t = \left(\frac{S}{D}\right)_t \quad (23)$$

که در آن S میزان تأمین، D میزان نیاز، T و $t=1, \dots, T$. طول دوره شبیه‌سازی است. در یک سیستم زمانی که C_t در بین حد بالا و پایین محدوده قابل قبول واقع شود، آن‌گاه سیستم در حالت مطلوب قرار گرفته است و در غیر این صورت، سیستم در حالت شکست قرار دارد. در پژوهش حاضر حدود بالا و پایین محدوده قابل قبول C_t به ترتیب یک و $0/8$ در نظر گرفته شده است.

شاخص اطمینان‌پذیری (R_E): اطمینان‌پذیری عبارت است از: تعداد دفعاتی که C_t در حالت مطلوب قرار دارد نسبت به کل دوره شبیه‌سازی. شاخص اطمینان‌پذیری به صورت رابطه زیر محاسبه می‌شود (حافظ‌پرست و همکاران، ۲۰۱۵):

$$R_E = \frac{\text{number of satisfactory } C_t \text{ value}}{\text{Total number of simulated period}} \quad (24)$$

برگشت‌پذیری (R_S): برگشت‌پذیری عبارت است از تعداد دفعاتی که C_t از حالت شکست به حالت مطلوب می‌رسد نسبت به کل مقادیر شکست. شاخص برگشت‌پذیری به صورت رابطه زیر محاسبه می‌شود (حافظ‌پرست و همکاران، ۲۰۱۵):

$$R_S = \frac{\text{number of times a satisfactory } C_{t+1} \text{ values follows an unsatisfactory } C_t \text{ value}}{\text{Total number of unsatisfactory } C_t \text{ values}} \quad (25)$$

آسیب‌پذیری (V_U): آسیب‌پذیری عبارت است از مجموع مقادیر C_t در حالت شکست نسبت به تعداد کل مقادیر C_t در حالت شکست. شاخص آسیب‌پذیری به صورت معادله زیر محاسبه می‌شود (حافظ‌پرست و همکاران، ۲۰۱۵):

$$V_U = \frac{\text{Individual extents of } C_t \text{ failures}}{\text{Total number of Individual extents of } C_t \text{ failures}} \quad (26)$$

پایداری (S_I): برای پایداری شاخص‌های اطمینان‌پذیری، برگشت‌پذیری حداکثر و آسیب‌پذیری حداقل است. شاخص پایداری به صورت معادله زیر محاسبه می‌شود (حافظ‌پرست و همکاران، ۲۰۱۵):

$$S_I = \{R_E \times R_S \times (1 - V_U)\} \quad (27)$$

روش آنتروپی شانون برای وزن‌دهی شاخص‌ها

روش آنتروپی، از روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره برای محاسبه وزن معیارها بر اساس ماتریس معیار-گزینه است. آنتروپی بیان‌کننده مقدار عدم اطمینان در یک توزیع احتمال پیوسته است. ایده اصلی این روش آن است که هرچه پراکندگی در مقادیر یک شاخص بیشتر باشد آن شاخص از اهمیت بیشتری برخوردار است (پارسامهر و همکاران، ۲۰۱۷).

این روش دارای پنج مرحله است:

مرحله اول: ابتدا ماتریس تصمیم تشکیل می‌شود که در آن ستون‌ها، معیار و سطرها، گزینه‌ها هستند.

مرحله دوم یا نرمال‌سازی ماتریس: منظور از نرمال‌سازی این است که درایه هر ستون بر مجموع آن ستون تقسیم شود. هر درایه نرمال‌شده p_{ij} نامیده می‌شود.

مرحله سوم محاسبه آنتروپی هر شاخص: آنتروپی E_j به صورت زیر محاسبه می‌شود و $k = 1/\ln m$ به عنوان مقدار ثابت مقدار E_j را بین صفر و یک نگه می‌دارد.

$$E_j = -k \sum_{i=1}^m (P_{ij} * \ln P_{ij}) \quad (28)$$

مرحله چهارم: در ادامه مقدار d_j (درجه انحراف) محاسبه می‌شود که بیان می‌کند شاخص مربوطه (d_j) به چه میزان اطلاعات مفید برای تصمیم‌گیری در اختیار تصمیم‌گیرنده قرار می‌دهد.

$$d_j = 1 - E_j \quad (29)$$

مرحله پنجم: سپس مقدار وزن W_j محاسبه می‌شود. در واقع وزن معیار برابر با هر d_j تقسیم بر مجموع d_j ها است.

$$W_j = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^n d_j} \quad (30)$$

کاربرد نظریه بازی‌ها (روش حل تعارض‌ها)

نظریه بازی‌ها شاخه‌ای از ریاضیات کاربردی بوده است که رفتار ریاضی حاکم بر یک موقعیت استراتژیک را مدل‌سازی می‌کند. با توجه به این‌که در نظریه بازی‌ها حداقل دو تصمیم‌گیرنده با منافع متضاد وجود دارند و در مسأله تصمیم‌گیری حاضر، تنها یک نهاد تصمیم‌گیر موجود است، استفاده از نظریه بازی‌ها برای حل تعارض بین اهداف امکان‌پذیر نیست؛ لذا در این پژوهش، از روش‌هایی که از اصول حاکم بر نظریه بازی‌ها استفاده می‌کنند، بهره گرفته شد. از آنجایی‌که هر دو تابع هدف تأمین نیاز و کنترل سیلاب از نوع کمینه‌سازی هستند، تعارض میان اهداف به روش ریاضی، با زوج (S, d) تعریف

نتایج و بحث

در اغلب الگوریتم‌های فراابتکاری پارامترهای قابل تنظیم مختلفی تعبیه شده‌اند که تغییر هر یک از آن‌ها زمان اجرای الگوریتم و حتی مقادیر جواب بهینه توابع هدف را تغییر می‌دهد. جداول ۱ و ۲ مقادیر عددی مناسب پارامترهای الگوریتم‌های فراابتکاری NSGA-II و چندهدفه نهنگ (MOWA) را در بهینه‌سازی توابع هدف مخزن سد بوستان که با روش آزمون و خطا تنظیم شده‌اند، نشان می‌دهد. مقدار مطلوب این پارامترها با توجه به نوع مسأله متفاوت است و به دامنه داده‌ها و پیچیدگی مسائل بستگی دارد. در این مطالعه برای بررسی نتایج حاصل از بهینه‌سازی با الگوریتم‌های مذکور، کدنویسی الگوریتم‌ها در محیط نرم‌افزار MATLAB R2015 با استفاده از کامپیوتری با مشخصات 12.0 GB RAM، 2.81GHZ Core(TM) i7 HQ CPU انجام شد که نتایج حاصل از آن با ۱۰ مرحله اجرا و ۱۰۰ تکرار در هر مرحله در جدول ۳ آمده است. همان‌گونه که در جدول ۳ نشان داده شده است، کارایی الگوریتم‌ها در توابع هدف تأمین آب و کنترل سیلاب متفاوت است، به گونه‌ای که در تابع هدف تأمین نیاز آبی، الگوریتم چندهدفه نهنگ با ۵۲/۱۴۱ میلیون مترمکعب، عملکرد بهتری را نسبت به NSGA-II از خود نشان می‌دهد. در تابع کنترل سیلاب اگرچه هر دو الگوریتم در نهایت مقدار صفر را به دست می‌دهند، ولی با مقایسه سایر پارامترها، می‌توان دریافت که این الگوریتم چندهدفه نهنگ است که با ارائه کمترین مقدار حتی در مقادیر ماکزیمم دوباره کارآمدتر است. نکته جالب توجه این است که در هر یک از مراحل ده‌گانه بهینه‌سازی، در تمامی الگوریتم‌ها حداقل مقادیر به دست آمده برای هدف کنترل سیلاب صفر بوده که شاید دلیل این موضوع عدم به کارگیری تابع هدف دوم (کنترل سیلاب) در طول ۱۲ ماه سال باشد؛ چراکه این تابع صرفاً در ماه‌های سیلابی اجازه وارد شدن به فرآیند بهینه‌سازی را داشته و در بقیه ماه‌های سال، حجم ذخیره سیلاب در مدل لحاظ نمی‌شود. در خصوص مدت زمان انجام عملیات بهینه‌سازی، الگوریتم چندهدفه نهنگ سریع‌تر از NSGA-II به همگرایی می‌رسد. شاید کاهش نسبی زمان اجرای الگوریتم چندهدفه نهنگ را بتوان به کاهش تعداد پارامترهای تنظیمی این الگوریتم نسبت داد. در این پژوهش با ثابت فرض کردن پارامترهای طراحی مخزن اعم

می‌شوند که مجموعه‌ای از منافع و یدترین نتیجه‌های ممکن است. در این مجموعه S فضای جواب و d مقادیر نامطلوب هر یک از توابع هدف است. معیاری که برای ارزیابی استفاده می‌شود، بهینگی پرتویی است. چون هدف این پژوهش کمینه‌سازی هر دو تابع هدف است، لذا مرز پرتو توسط یک تابع محدب اکیدا نزولی g در فاصله $[f_1^*, d_1]$ مشخص می‌شود که در آن $g(d_1) = f_1^*$ و $g(f_1^*) = d_2$. به گونه‌ای که محور افقی مقادیر نرمال شده تابع هدف تأمین نیاز و محور قائم مقادیر نرمال شده تابع هدف کنترل سیلاب است و فضای امکان‌پذیر هم به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$S = \{f = (f_1, f_2) | f \in S, f \leq d\} \quad (31)$$

برخی موارد بردار d به عنوان بردار منافع در حالت نبود توافق و ترکیبی از منافع ذینفعان در حالتی که به یک توافق کلی نمی‌رسد، در نظر گرفته می‌شود. در این موارد مجموعه منافع ممکن S به مجموعه S_+ که در زیر تعریف شده، محدود می‌شود (ناکاو و همکاران، ۲۰۰۲).

$$S_+ = \{f = (f_1, f_2) | f \in S, f \geq d\} \quad (32)$$

اگر بردار d به عنوان بدترین نتایج ممکن دو گروه هدف انتخاب شود، آنگاه $S=S_+$ خواهد بود. کالای و اشمورودینسکی در (۱۹۷۵) اصول اولیه نش را اصلاح و اصل استقلال از گزینه‌های نامربوط را به وسیله یکنواختی منحصر به فرد جایگزین کردند. در این روش یک پاره‌خط میان نقطه نامطلوب یا عدم‌توافق و نقاط مطلوب رسم می‌شود. جواب بهینه عبارت است از محل تقاطع این خط با جبهه پرتو؛ بنابراین جواب بهینه از رابطه زیر در فاصله $[f_1^*, d_1]$ محاسبه می‌شود (کالای و اشمورودینسکی، ۱۹۷۵).

$$f_1^* + \frac{[w_1(d_2 - f_2^*)]}{[w_2(d_1 - f_1^*)]} \times (f_1 - f_1^*) - g(f_1) = 0 \quad (33)$$

اگر هر دو تابع هدف نرمال‌سازی شوند، آنگاه $d_1 = d_2 = 1$ و $f_1^* = f_2^* = 0$ خواهد بود؛ بنابراین در صورت داشتن وزن برابر، مقادیر دو تابع هدف f_1 و f_2 در طول خط واصل نقطه نامطلوب و نقطه ایده آل با میزان مساوی افزایش می‌یابند. چنانچه اهمیت توابع هدف یکسان نباشند، مقدار تابع با وزن بیشتر با سرعت بیشتری افزایش خواهد یافت که این فرضیه منجر به شکل‌گیری روش نامتقارن کالای-اشمورودینسکی خواهد شد.

و تمام توجه خود را به تأمین نیازها معطوف می‌کند. با حرکت به سمت دیگر منحنی پرتو، از درجه اهمیت تأمین نیاز کاسته و به اهمیت کنترل سیلاب افزوده می‌شود. در نهایت در نقطه سمت راست (نقطه آخر پرتو) تنها، هدف کنترل سیلاب در نظر گرفته و کمترین توجه به تأمین نیاز معطوف می‌شود؛ به گونه‌ای که در الگوریتم نهنگ کمترین اهمیت به تابع کنترل سیلاب اختصاص و با کاهش حجم مخزن به صفر، میزان تأمین نیاز کشاورزی ۹۵٪ افزایش می‌یابد که کاملاً منطقی و معقول است. در حالی که در الگوریتم NSGA-II اگر این کاهش حجم در نظر گرفته شود، مقادیر تأمین نیاز به میزان ۳٪ بیشتر از حجم بیشینه مخزن برآورد می‌شود که به نوعی غیرقابل قبول و حاکی از دقت کمتر الگوریتم NSGA-II در برآورد نسبت به نهنگ است. از سوی دیگر، از آنجایی که مطلوب‌ترین و نامطلوب‌ترین مقادیر توابع هدف به دست آمده بوسیله الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه نهنگ کمتر است، می‌توان عملکرد الگوریتم چندهدفه نهنگ را مناسب‌تر تشخیص داد. مضاف بر این، می‌توان نتیجه گرفت که الگوریتم نهنگ از عملکرد مناسب‌تر و همگرایی بهتری نیز برخوردار است.

از حجم بیشینه و کمینه مخزن و ... به بهینه‌سازی بهره‌برداری بهنگام در یک دوره ۹۵ ماهه از مرداد ۱۳۹۰ لغایت خرداد ۱۳۹۸ پرداخته شده است؛ از این‌رو، قواعد ماهانه بهره‌برداری به صورت چندهدفه مورد بررسی قرار گرفتند. مطابق مندرجات جدول ۴، اگرچه الگوریتم NSGA-II از دیدگاه برگشت‌پذیری، آسیب‌پذیری و پایداری مناسب‌تر از الگوریتم نهنگ ارزیابی شد، ولی از دیدگاه اطمینان‌پذیری، این الگوریتم نهنگ است که مقادیر بالاتری را نسبت به الگوریتم NSGA-II از خود نشان داد. در بهینه‌سازی چندهدفه، مجموعه‌ای از پاسخ‌های بهینه به عنوان جواب به دست می‌آید که منحنی پرتو نامیده می‌شوند. در شکل‌های ۵- الف و ب، منحنی‌های پرتوی حاصل از مدل‌های مختلف بهینه‌سازی نمایش داده شده است. شایان توجه است که هیچ یک از راه‌حل‌های (راه‌حل نامغلوب) به دست آمده در منحنی پرتو بر دیگری ارجحیت ندارد و بسته به وضعیت می‌توان هر یک از این راه‌حل‌ها را با توجه به اولویت و معیار موردنظر بهره‌بردار در وضعیت خاص، به عنوان راه‌حل بهینه در نظر گرفت. بدین صورت که در این پرتوها نقطه انتهایی سمت چپ مربوط به تصمیماتی است که در آن بهره‌بردار کمترین اهمیت را برای کنترل سیلاب قائل شده

جدول ۱- مقادیر مناسب پارامترهای الگوریتم NSGA-II

| پارامتر | جمعیت اولیه | حداکثر تکرار | درصد تقاطع | درصد جهش | احتمال جهش |
|---------|-------------|--------------|------------|----------|------------|
| مقادیر | ۵۰ | ۱۰۰ | ۰/۸ | ۰/۲ | ۰/۰۲ |

جدول ۲- مقادیر مناسب پارامترهای الگوریتم چندهدفه نهنگ MOWA

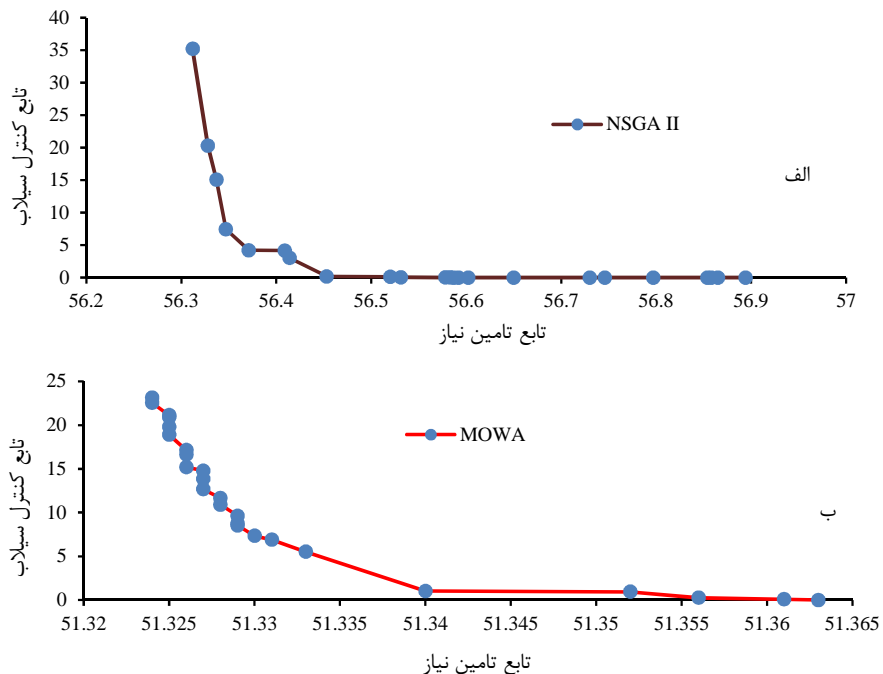
| پارامتر | جمعیت اولیه | حداکثر تکرار |
|---------|-------------|--------------|
| مقادیر | ۵۰ | ۱۰۰ |

جدول ۳- نتایج حاصل از بهینه‌سازی با الگوریتم‌های NSGA-II و MOWA

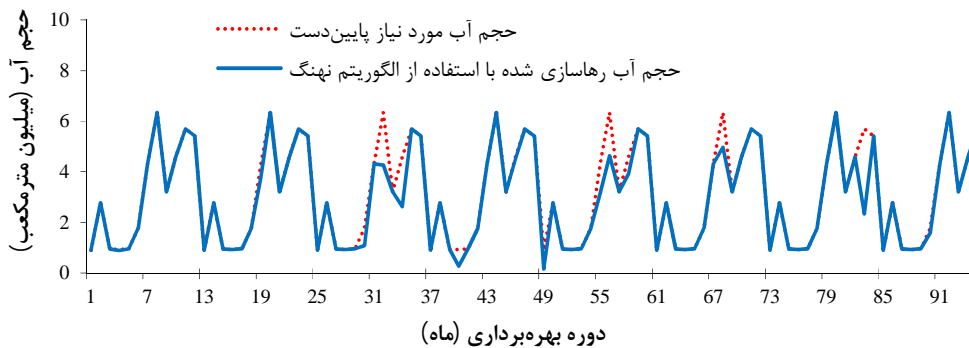
| الگوریتم | تابع | واحد | ماکزیمم | متوسط | مینیمم | انحراف معیار | تکرار | تعداد اجرای الگوریتم |
|----------|---------------------|----------------|---------|--------|--------|--------------|-------|----------------------|
| NSGA-II | کنترل سیلاب | میلیون مترمکعب | ۳۵/۲ | ۱۳/۳۹ | صفر | ۸/۶۹ | ۱۰۰ | ۱۰ |
| | تأمین نیاز | میلیون مترمکعب | ۵۶/۹۹ | ۵۶/۴۸ | ۵۶/۲۹ | ۰/۱۷ | ۱۰۰ | ۱۰ |
| | زمان اجرای الگوریتم | ثانیه | ۵۲/۶۵ | ۵۲/۱۲ | ۵۲/۰۰ | ۰/۰۷ | ۱۰۰ | ۱۰ |
| MOWA | کنترل سیلاب | میلیون مترمکعب | ۲۳/۱۲ | ۱۰/۳۸ | صفر | ۰/۳۸ | ۱۰۰ | ۱۰ |
| | تأمین نیاز | میلیون مترمکعب | ۴۵/۱۸۸ | ۵۲/۱۴۱ | ۵۱/۲۳۴ | ۰/۸۸ | ۱۰۰ | ۱۰ |
| | زمان اجرای الگوریتم | ثانیه | ۴۹/۹۰ | ۴۹/۵۹ | ۴۹/۱۷ | ۰/۰۰ | ۱۰۰ | ۱۰ |

جدول ۴- درصد مقادیر شاخص‌های ارزیابی عملکرد مدل‌های مختلف

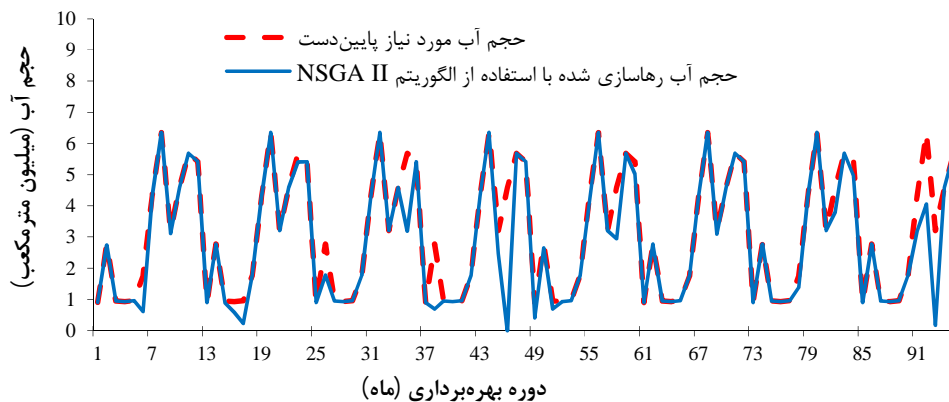
| الگوریتم بهینه‌سازی | اطمینان‌پذیری | برگشت‌پذیری | آسیب‌پذیری | پایداری |
|---------------------|---------------|-------------|------------|---------|
| NSGA-II | ۷۰٪ | ۶۴٪ | ۲۹٪ | ۳۲٪ |
| MOWA | ۸۶٪ | ۴۵٪ | ۳۲٪ | ۲۶٪ |



شکل ۵- الف) منحنی پرتوی حاصل از بهینه‌سازی چندهدفه با الگوریتم NSGA-II و ب) منحنی پرتوی حاصل از بهینه‌سازی چندهدفه با الگوریتم چندهدفه نهنگ (MOWA)



شکل ۶- مقایسه حجم آب مورد نیاز و رهاسازی شده از مخزن با استفاده از الگوریتم چندهدفه نهنگ



شکل ۷- مقایسه حجم آب مورد نیاز و رهاسازی شده از مخزن با استفاده از الگوریتم NSGA-II

مقادیر ماتریس تصمیم‌گیری را نشان می‌دهد. گزینه‌های تصمیم‌گیری شامل الگوریتم‌های بهینه‌سازی NSGA-II و چندهدفه نهنگ بوده و شاخص‌های اطمینان‌پذیری، برگشت‌پذیری، آسیب‌پذیری، پایداری و همچنین توابع هدف (تأمین نیاز و کنترل سیلاب) به‌عنوان معیارهای اول تا ششم انتخاب شده‌اند. در جدول ۶ اوزان معیارهای حاصل از روش آنترویی با عنایت به مثبت یا منفی بودن معیارها به تصویر کشیده شده است.

نمودار مقایسه‌ای حجم آب موردنیاز و رهاسازی شده از مخزن سد بوستان در دوره آماری ۹۵ ماهه در الگوریتم‌های سه‌گانه با در نظر گرفتن ۶۰٪ تابع هدف تأمین نیاز و ۴۰٪ تابع هدف کنترل سیلاب در شکل‌های ۶ و ۷ نشان داده شده است. همان‌گونه که از نمودارهای مربوطه برمی‌آید با توجه به این مطلب که تفاوت میان منحنی نیاز و رهاسازی در ماه‌های مختلف به‌ویژه در ماه‌های اوج نیاز در الگوریتم نهنگ کمتر است، می‌توان کارایی بهتر الگوریتم نهنگ را تشخیص داد. جدول ۵.

جدول ۵- ماتریس تصمیم‌گیری

| گزینه‌ها/ معیار | اطمینان‌پذیری | برگشت‌پذیری | آسیب‌پذیری | پایداری | تأمین نیاز | کنترل سیلاب |
|-----------------|---------------|-------------|------------|---------|------------|-------------|
| NSGA-II | ۰/۲۸۹۳ | ۰/۳۱۳۷ | ۰/۳۱۵۲ | ۰/۲۸۰۷ | ۰/۳۵۳۱ | ۰/۰۰۰۰ |
| نهنگ | ۰/۳۵۵۴ | ۰/۲۲۰۶ | ۰/۳۴۷۸ | ۰/۲۲۸۱ | ۰/۳۲۶۰ | ۰/۰۰۰۰ |

جدول ۶- بردار وزن محاسبه شده به روش آنترویی

| معیار | اطمینان‌پذیری | برگشت‌پذیری | آسیب‌پذیری | پایداری | تأمین نیاز | کنترل سیلاب |
|---------------------------|---------------|-------------|------------|---------|------------|-------------|
| مثبت یا منفی بودن معیارها | مثبت | مثبت | منفی | مثبت | منفی | منفی |
| وزن معیارها | ۰/۱۸۰۲ | ۰/۱۸۴۸ | ۰/۱۷۹۴ | ۰/۱۸۶۱ | ۰/۱۷۸۵ | ۰/۰۹۰۹ |
| رتبه | ۳ | ۲ | ۴ | ۱ | ۵ | ۶ |

نرمال‌سازی شد؛ به شیوه‌ای که به نامطلوب‌ترین مقدار تابع هدف عدد صفر و به بهترین مقدار آن عدد یک اختصاص داده، سپس بر اساس مرز پرتو به روش کالای و اشمورودینسکی و اعمال وزن‌های مختلف از ۰/۰۱ تا یک هر یک از دوگروه هدف، میزان بهینه آن‌ها محاسبه شد. با توجه به نتایج حاصل از جدول ۷ می‌توان گفت با نزدیک شدن ضرایب وزنی به یکدیگر، یکی از توابع هدف از نقطه مطلوب خود دور و دیگری به نقطه مطلوب نزدیک‌تر می‌شود تا این‌که در زمانی که این ضرایب با هم برابر می‌شوند. در این حالت مقدار هر دو تابع هدف در حالت متعادل خود قرار می‌گیرند.

نتایج به دست آمده نشان داد که دو معیار پایداری و برگشت‌پذیری به ترتیب، دارای بیشترین وزن در بین معیارها بوده و معیارهای اطمینان‌پذیری، آسیب‌پذیری، تأمین نیاز و کنترل سیلاب به‌ترتیب در رده‌های سوم تا ششم قرار دارند؛ به عبارت دیگر می‌توان نتیجه گرفت که در روش آنترویی، پارامترهای ارزیابی مدل دارای وزن بیشتری نسبت به توابع هدف هستند.

برای حل تعارض موجود بین اهداف، از روش‌های مبتنی بر نظریه بازی‌ها برای یافتن جواب بهینه استفاده شد. به گونه‌ای که ابتدا مقادیر توابع هدف در هر یک از الگوریتم‌های بهینه‌سازی چند هدفه NSGA-II و نهنگ

جدول ۷- بردار وزن محاسبه شده به روش آنترویی

| NSGA-II | وزن f_1^* | w_1 | ۰/۹۹ | ۰/۸۰ | ۰/۶۰ | ۰/۵۰ | ۰/۴۰ | ۰/۲۰ | ۰/۱ |
|---------|-------------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | وزن f_2^* | w_2 | ۰/۰۱ | ۰/۲۰ | ۰/۴۰ | ۰/۵۰ | ۰/۶۰ | ۰/۸۰ | ۰/۹۹ |
| | f_1 | ۵۶/۳۱۶ | ۵۶/۳۲۳ | ۵۶/۳۲۴ | ۵۶/۳۲۵ | ۵۶/۳۲۶ | ۵۶/۳۲۷ | ۵۶/۳۲۸ | ۵۶/۳۲۸ |
| | f_2 | ۲۹۰۰ | ۱۳۱۶ | ۱۲۷۵ | ۱۲۶۶ | ۱۲۶۱ | ۱۲۵۴ | ۱۲۵۰ | ۱۲۵۰ |
| | f_1 | ۵۱/۳۴۰ | ۵۱/۳۲۴ | ۵۱/۳۴۴ | ۵۱/۳۴۷ | ۵۱/۳۵۰ | ۵۱/۳۵۵ | ۵۱/۳۶۰ | ۵۱/۳۶۰ |
| نهنگ | f_2 | ۰/۰۰۰۵۶۰ | ۰/۰۰۰۶۰ | ۰/۰۰۰۴۵ | ۰/۰۰۰۴۳ | ۰/۰۰۰۴۱ | ۰/۰۰۰۳۸ | ۰/۰۰۰۳۵ | ۰/۰۰۰۳۵ |

f_2 : تابع هدف کنترل سیلاب

f_1 : تابع هدف تأمین نیاز

به‌عبارت دیگر با افزایش اهمیت هدف تأمین نیاز، مقدار هدف کنترل سیلاب کاهش می‌یابد؛ بنابراین وقتی تنها انحراف نیازهای پایین‌دست از میزان رهاسازی مورد توجه قرار می‌گیرد، میزان انحراف از حجم ایده‌آل در بیشترین حالت خود قرار دارد و برعکس به منظور دستیابی به یک دستورالعمل مشخص برای بهره‌برداری از سد بوستان استفاده از نظرات نهاد بهره‌بردار آن باید مدنظر قرار بگیرد. از آنجایی‌که با عنایت به تداوم خشک‌سالی‌های اخیر و وضعیت کاهش بارندگی نسبت به دوره دراز مدت، در صورتی‌که وزن $0/4$ برای کنترل سیلاب و $0/6$ برای هدف تأمین نیاز در نظر گرفته شود، سیاست‌های بهره‌برداری از مخزن بوستان انطباق بسیار مناسبی را با الگوریتم چندهدفه نهنگ نشان می‌دهد. لذا در این مورد نیز الگوریتم نهنگ که از برتری و قابلیت چشمگیری نسبت به NSGA-II برخوردار است.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش عملکرد الگوریتم‌های بهینه‌سازی چندهدفه نهنگ (MOWA) و الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب (NSGA-II) در بهینه‌سازی مسأله بهره‌برداری از سد مخزنی بوستان واقع در استان گلستان با دیدگاه نظریه بازی‌ها - در یک دوره ۹۵ ماهه از مرداد ۱۳۹۰ تا خرداد ۱۳۹۸ - مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت. اطلاعات استفاده شده شامل سری زمانی ماهانه حجم آورد رودخانه، حجم تبخیر از سطح مخزن و حجم نیازهای آبی پایین‌دست سد هستند. در بهینه‌سازی چندهدفه مخزن سد بوستان توابع هدف با دو هدف: ۱- کاهش کمبود نیازهای آبی پایین‌دست و ۲- کمینه‌سازی مجموع مربعات انحراف حجم مخزن از حجم ایده‌آل برای کنترل سیلاب تعریف شدند. پس از آن، محدودیت‌های معادله پیوستگی به توابع هدف اعمال شدند. عملکرد الگوریتم‌های بهینه‌سازی MOWA و NSGA-II بر اساس معیارهای اطمینان‌پذیری، برگشت‌پذیری، آسیب‌پذیری و پایداری ارزیابی شدند. نتایج به دست آمده از جواب‌های بهینه نشان داد که کارایی الگوریتم‌ها در توابع هدف تأمین آب و کنترل سیلاب متفاوت است. به گونه‌ای که در تابع هدف تأمین نیاز آبی، الگوریتم MOWA با $52/141$ میلیون مترمکعب در ماه عملکرد بهتری را نسبت به NSGA-II از خود نشان می‌دهد. در تابع کنترل سیلاب الگوریتم

MOWA با ارائه کمترین مقدار حتی در مقادیر ماکزیم دوباره کارآمدتر است. در خصوص مدت زمان انجام عملیات بهینه‌سازی، الگوریتم MOWA سریع‌تر از NSGA-II به همگرایی می‌رسد. شاید کاهش نسبی زمان اجرای الگوریتم MOWA را بتوان به کاهش تعداد پارامترهای تنظیمی این الگوریتم نسبت داد. اگرچه الگوریتم NSGA-II از دیدگاه برگشت‌پذیری، آسیب‌پذیری و پایداری مناسب‌تر از MOWA ارزیابی می‌شود، از دیدگاه اطمینان‌پذیری این الگوریتم MOWA است که مقادیر بالاتری (۸۶ درصد) را نسبت به الگوریتم NSGA-II از خود نشان می‌دهد. از سوی دیگر از آنجایی‌که مطلوب‌ترین و نامطلوب‌ترین مقادیر توابع هدف به دست آمده به وسیله الگوریتم MOWA کمتر است، می‌توان عملکرد MOWA را مناسب‌تر تشخیص داد. نتایج به دست آمده روش آنتروپی شانون برای وزن‌دهی شاخص‌ها نشان می‌دهد دو معیار پایداری و برگشت‌پذیری به ترتیب، دارای بیشترین وزن در بین معیارها هستند و معیارهای اطمینان‌پذیری، آسیب‌پذیری، تأمین نیاز و کنترل سیلاب به ترتیب در رده‌های سوم تا ششم قرار دارند؛ به‌عبارت دیگر می‌توان نتیجه گرفت که در روش آنتروپی، پارامترهای ارزیابی مدل دارای وزن بیشتری نسبت به توابع هدف هستند. برای حل تعارض موجود بین اهداف، از روش‌های مبتنی بر نظریه بازی‌ها (روش کالای و اشمورودینسکی) برای یافتن جواب بهینه استفاده شده است. بر اساس نتایج حاصل این روش حل تعارض، برای دستیابی به یک دستورالعمل مشخص برای بهره‌برداری از سد بوستان با فرض تداوم خشک‌سالی‌های اخیر و وضعیت کاهش بارندگی نسبت به دوره دراز مدت، وزن $0/4$ برای کنترل سیلاب و $0/6$ برای هدف تأمین نیاز در نظر گرفته شد. نتایج حاصل نشان داد سیاست‌های بهره‌برداری از مخزن بوستان انطباق بسیار مناسبی را با الگوریتم چندهدفه نهنگ نشان می‌دهد. لذا در این مورد نیز الگوریتم نهنگ از برتری و قابلیت چشمگیری نسبت به NSGA-II برخوردار و در کل الگوریتم نهنگ از عملکرد مناسب‌تر و همگرایی بهتری برخوردار است.

منابع

۱. پارسامهر م. ح. و خسروانی ز. ۱۳۹۶. تعیین شدت خشک‌سالی با استفاده از تصمیم‌گیری چندمعیاره بر

- Algorithm: Kidney Algorithm. *Water Resources Management*. 32(14): 4681706.
11. Hafezparast M. Araghinezhad SH. and Sharifazari S. 2015. Sustainability criteria in assessment of integrated water resources management in the Aras Basin based on DPSIR approach. *Journal of Soil and Water Conservation*. 22(2): 61-77.
 12. Hojati A. Farid Hosseini A. Ghahreman B. and Alizadeh A. 2013. Comparison of the application of Meta-heuristic methods in optimizing Multi-Objective Water Resources Systems. Case Study: Estor Dam and Pirtaqi Dam in Ghezel Ozen Basin. *Iranian Journal of Water and Environmental Engineering*. 1(2): 9-14.
 13. Hosseini M. S. and Banihabib M. 2014. Optimizing operation of reservoir for agricultural water supply using firefly Algorithm, *Journal of Conservation of Soil and Water Resources*. 3(4): 17-31.
 14. Kalai E. and Smorodinsky M. 1975. Other Solutions to Nash's bargaining problem. *Econometrical*. 43(3): 513-518.
 15. Kumawat I. R. Nanda S. J and Maddila R. K. 2017. Multi-objective Whale Optimization, Proc. of the 2017 IEEE Region 10 Conference (TENCON), Malaysia, November 5-8, 2747-2752.
 16. Nakao M. Wichelns J. D. and Montgomery J. 2002. Game Theory Analysis of Competition for Groundwater Involving El Paso, Texas and Ciudad Juarez. Mexico. the 2002 annual meeting of the American Agricultural Economic Association. Long Beach. CA.
 17. Parhizkari M. and Mazandarani Zadeh H. 2019. Multi-Objective Operation Optimization of Hydropower Reservoirs by MOPSO, Case Study: Karun 5 Dam. *Iran-Water Resources Research*. 15(1):384-38.
 18. Tang R. Li K. Ding W. and Wang Y. 2020. Reference Point Based Multi-Objective Optimization of Reservoir Operation: A Comparison of Three Algorithms. *Water Resources Management*. DOI: 10.1007/s11269-020-02485-9.
 - مبنای TOPSIS (مطالعه موردی: ایستگاه‌های منتخب استان اصفهان). *مجله تحقیقات مرتع و بیابان ایران*. ۲۴ (۱): ۱۶-۲۹.
 ۲. دشتی م. ستاری م. و نورانی و. ۱۳۹۶. ارزیابی عملکرد الگوریتم تکاملی تفاضلی در بهره‌برداری بهینه از سیستم تک مخزنه سد علویان. *مجله حفاظت منابع آب و خاک*. ۶ (۳): ۶۱-۷۵.
 ۳. محمدی م. موسوی س. ف. فرزین س. و کرمی ح. ۱۳۹۸. بهره‌برداری بهینه از مخزن سد سلمان فارسی با استفاده از الگوریتم وال و هیبرید آن با الگوریتم ژنتیک بر اساس روش تصمیم‌گیری چندمعیاره. *مجله اکوهیدرولوژی*. ۶ (۲): ۲۸۱-۲۹۳.
 ۴. معصومی ز. و منصوریان ع. و مسگری م. ۱۳۸۹. کاربرد الگوریتم ژنتیک چند هدفه در مطالعات مکان‌یابی کاربرهای صنعتی. *مجله سنجش از دور و GIS ایران*. ۲ (۴): ۱-۲۲.
 5. Bozorg Haddad O. Azarnivand A. Hosseini Moghari S. Hugo M. and Loáiciga A. 2018. Development of a Comparative Multiple Criteria Framework for Ranking Pareto Optimal Solutions of a Multi-Objective Reservoir Operation Problem. *Int. Journal Irrigation and Drainage Engineering*. 142(7): 04016019
 6. Coello C. A. Lamont G. B. and Van Veldhuizen D. A. 2007. *Evolutionary Algorithms for Solving Multi-Objective Problems*. 2th edn. New York, Springer.
 7. Donyaii A. Sarraf. A. P. and Ahmadi H. 2020a. A Novel Approach to Supply the Water Reservoir Demand Based on a Hybrid Whale Optimization Algorithm, Shock and Vibration Journal. Volume 2020, Article ID 8833866, 15 pages. <https://doi.org/10.1155/2020/8833866>.
 8. Donyaii A. Sarraf. A. P. and Ahmadi H. 2020b. Water Reservoir Multiobjective Optimal Operation Using Grey Wolf Optimizer, Shock and Vibration Journal. Volume 2020, Article ID 8870464, 10 pages. <https://doi.org/10.1155/2020/8870464>.
 9. Donyaii A. Sarraf. A. P. and Ahmadi H. 2021. Comparison of meta-heuristic algorithms in optimum operation of a single-reservoir dam system, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Engineering Sustainability*. <https://doi.org/10.1680/jensu.20.00065>.
 10. Ehteram M. Karami H. Mousavi SF. Farzin S. Celeste AB. and Shafie AE. 2018. Reservoir Operation by a New Evolutionary

