

بهینه‌سازی بهره‌برداري انرژی برقابی از مخازن با استفاده از الگوریتم چرخه آب

حمیدرضا یاوری^۱، امیر
رباطی^{۲*}، نوید جلال کمالی^۳

۱. گروه مهندسی عمران،
دانشگاه آزاد اسلامی واحد
کرمان، کرمان، ایران.

۲. گروه مهندسی عمران، دانشگاه
آزاد اسلامی واحد کرمان،
کرمان، ایران.

۳. گروه علوم و مهندسی آب،
دانشگاه آزاد اسلامی واحد
کرمان، کرمان، ایران.

شناخته‌شده الگوریتم رقابت
استعماری (ICA) مقایسه شد.
WCA و ICA به ترتیب قادر به
تولید انرژی به میزان ۷۲۰۳/۲۹
و ۷۱۳۸/۶۶ مگاوات در طول دوره
آماری بودند. همچنین مقدار
تابع هدف برای WCA و ICA به
ترتیب برابر با ۴/۷۸ و ۵/۸۲
به دست آمد. نتایج به دست آمده
حاکم از عملکرد بالای
الگوریتم WCA در بهره‌برداری
بهینه انرژی برقابی می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم
چرخه آب، بهره‌برداری انرژی
برقابی، حوضه هیلرود، سد
جیرفت

Optimization of Hydropower Reservoirs Operation Using Water Cycle Algorithm

Abstract

Given the fact that hydropower energy is the third largest source of electricity generation and also the most important renewable energy producer, the optimal use of the huge and expensive source of water is essential. In this study, water cycle metaheuristic algorithm was used for optimization of the hydropower operation of Jiroft reservoir (south of Iran) for a period of 223 months. After verifying the reliability of the WCA algorithm using several standard benchmark functions, a model was developed for optimal hydropower operation. The results of the algorithm were compared with the results of known metaheuristic algorithm and Imperialist Competitive Algorithm (ICA). The WCA and ICA algorithms were capable to generate energy 7203.29, and 7138.66 MW during the statistical period, respectively. Also, the objective function value for WCA and ICA, was obtained 4.78, 5.82, respectively. The results were indicated high performance of the WCA in optimization of the hydropower operation.

چکیده

اهمیت انرژی برقابی بعنوان
سومین منبع بزرگ تولید برق و
مهمترین تولیدکننده انرژی‌های
تجدیدپذیر، ضرورت استفاده
بهینه از این منبع عظیم و
گرانبها را نشان می‌دهد. در
این پژوهش از الگوریتم
فراکاوشی چرخه آب (WCA)
به منظور بهره‌برداری بهینه از
انرژی برقابی مخزن سد جیرفت
(جنوب ایران)، برای یک دوره
۲۲۳ ماهه استفاده شده است. پس
از اطمینان از درستی عملکرد
الگوریتم WCA با استفاده از
چندین تابع محک استاندارد،
مدلی برای بهره‌برداری بهینه
برقابی توسعه داده شد. نتایج
حاصل از الگوریتم مورد
بررسی، با نتایج روش

Key Words: Water Cycle Algorithm, Hydropower energy operation, Hailirood Basin, Jiroft Dam

مقدمه

کشور ایران را می‌توان جزء معدود کشورهای دانست که دارای انواع مختلفی سد است که با اهداف گوناگونی از جمله تولید انرژی برقابی شکل‌گرفته‌اند. یکی از سدهای مخزنی مهم کشور، سد مخزنی جیرفت است که در حوزه آبریز هامون جازموریان قرار گرفته که در سال ۱۳۶۳ شروع به ساخت گردیده و در سال ۱۳۷۰ مورد بهره‌برداری قرار گرفته است. از جمله اهداف اولیه سد مخزنی جیرفت، تولید انرژی برقابی به میزان ۸۰ گیگاوات ساعت در سال و کمک به شبکه برق در زمان پیک مصرف بوده است. این سد نیز همانند سایر سدها با مسئله بهره‌برداری مواجه است که یکی از موضوعات کلیدی در بین مسائل گوناگون منابع آب می‌باشد.

یک سیاست بهره‌برداری شامل مجموعه‌ای از قوانین است که در شرایط مختلف بهره‌برداری، مقدار آبی را که بایستی ذخیره یا رهاسازی گردد، تعیین می‌نماید [وربز، ۱۹۹۳]. تعیین یک برنامه بهره‌برداری مناسب از سیستم‌های منابع آب، به‌گونه‌ای که در تمام شرایط

موردنظر بتوان عملکرد مطلوبی از سیستم به دست آورد، بهینه‌سازی نامیده می‌شود که به‌منظور بهینه‌سازی و تعیین برنامه بهره‌برداری از مخازن، استفاده از روش‌های بهینه‌سازی الزامی است. در دنیای واقعی مدیریت بهینه‌سازی مخازن سد می‌تواند بسیار پیچیده باشد. افزایش پیچیدگی در مسائل مهندسی و نگاه سیستمی به مدیریت به‌خصوص در مهندسی منابع آب باعث کاهش کارایی روش‌های بهینه‌یابی کلاسیک شده است که در راستای رفع این مشکل در چند دهه اخیر، تلاش‌های گسترده‌ای به‌منظور تهیه و ارائه الگوریتم‌های بهینه‌یابی مناسب‌تر صورت پذیرفته است که ازجمله آنها می‌توان به الگوریتم‌های تکاملی اشاره کرد. این الگوریتم‌ها که الهام گرفته از طبیعت هستند، در مطالعات تئوریک و کاربردی متعددی توسعه داده شده‌اند و انواع متعددی از آنها شکل‌گرفته است و در سال‌های اخیر در بسیاری از مقوله‌های علمی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. یکی از این الگوریتم‌های به نسبت جدید، الگوریتم چرخه‌ی آب (WCA) است

که توسط اسکندر و همکاران (۲۰۱۲) بر پایه چرخه آب یا چرخه هیدرولوژیکی در طبیعت ارائه شده است [اسکندر و همکاران، ۲۰۱۲]. اسکندر و همکاران (۲۰۱۳) از الگوریتم چرخه آب در بهینه‌سازی وزن سازه‌ی خرپا استفاده کرده‌اند و نشان داده‌اند که الگوریتم ارائه‌شده قادر به دستیابی به راه‌حل‌های بهینه‌ی بهتر و سرعت همگرایی بیشتری نسبت به سایر الگوریتم‌های بهینه‌سازی دیگر است [اسکندر و همکاران، ۲۰۱۳]. این برتری الگوریتم نسبت به الگوریتم‌های رقیب در مطالعات مختلف دیگر نیز به اثبات رسیده است [باقیپور و همکاران، ۲۰۱۴؛ قادری و همکاران ۲۰۱۷].

بنا به اهمیت سد مخزنی جیرفت و همچنین به دلیل آنکه مطالعه‌ای در رابطه با بهره‌برداری بهینه‌ی برقابی و استفاده حداکثری از توان تولیدی نیروگاه آن شکل نگرفته است، لذا ضرورت مطالعه‌ای که به این مهم بپردازد آشکار می‌گردد. بنابراین در مطالعه‌ی حاضر از الگوریتم چرخه آب، که جزء الگوریتم‌های قوی در راستای بهینه‌یابی می‌باشد،

برای بهینه‌سازی انرژی برقابی سد جیرفت استفاده شد، سپس نتایج به دست آمده، با نتایج الگوریتم رقابت استعماری مورد مقایسه قرار گرفت. تا علاوه بر مقایسه توانایی الگوریتم‌ها با یکدیگر، بهترین نتیجه برای بهره‌برداری بهینه از سد مذکور نیز به دست آید.

مرور مطالعات صورت گرفته: محققان زیادی در مطالعات متعددی به بهره‌برداری بهینه از مخازن با استفاده از الگوریتم‌های فراکاوشی مختلف پرداخته‌اند، لیکن در زمینه بهره‌برداری بهینه برقابی از مخازن با توجه به پیچیدگی مسئله، مطالعات کمتری انجام گرفته است. افشار و همکاران (۱۳۹۳) به منظور بهره‌برداری برقابی از مخزن سد دز از چهار الگوریتم مختلف از الگوریتم‌های بهینه‌سازی جامعه‌ی مورچگان استفاده نمودند. نتایج این مطالعه نشان داد که الگوریتم بهینه‌سازی جامعه‌ی مورچگان، الگوریتمی مناسب در حل مسائل بهره‌برداری از مخازن سدها می‌باشد [افشار و همکاران، ۱۳۹۳]. احمدیان فر و ادیب

(۱۳۹۴) به بهینه‌سازی بهره‌برداری انرژی برقابی از سد دز با استفاده از روش ترکیبی الگوریتم ازدحام ذرات و الگوریتم ژنتیک پرداختند. نتایج آن‌ها حاکی از آن است که الگوریتم ترکیبی باعث افزایش انعطاف‌پذیری و بهبود توانایی الگوریتم ازدحام ذرات جهت ایجاد جمعیتی با سرعت همگرایی بالا شده و کارایی بسیاری در حل مسائل بهینه‌سازی بهره‌برداری از منابع آب دارد [احمدیان‌فر و ادیب، ۱۳۹۴]. احترام و همکاران (۱۳۹۵) ترکیبی از الگوریتم جستجوی هارمونی و ازدحام ذرات را به‌منظور افزایش تولید انرژی برقابی از مخزن سدهای مهاباد و کارون ۴ ارائه نمودند. مقایسه‌ی نتایج نشان داد که روش هیبریدی پاسخ نزدیکتری به پاسخ بهینه‌ی مطلق مسائل نسبت به الگوریتم‌های جستجوی هارمونی و ازدحام ذرات دارد [احترام و همکاران، ۱۳۹۵]. حسینی موغاری و همکاران (۱۳۹۶) کاربرد الگوریتم بهینه‌سازی فاخته (COA) را در بهره‌برداری بهینه از آبگیرهای برقابی مخزن سد کارون ۴ مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاکی از آن

بودند که الگوریتم فاخته توانایی بالاتری را در رسیدن به جواب بهینه نسبت به الگوریتم ژنتیک از خود نشان داد و فاصله کمی با جواب بهینه‌ی مطلق دارد [حسینی موغاری و همکاران، ۱۳۹۶].

ژانگ و همکاران (۲۰۱۱) از ترکیب الگوریتم ازدحام ذرات و الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی انرژی در یک سیستم چند مخزنه در چین استفاده کردند. نتایج حاکی از برتری الگوریتم پیشنهادی نسبت به الگوریتم ازدحام ذرات بود [ژانگ و همکاران، ۲۰۱۱]. عزیزپور و همکاران (۲۰۱۶) کاربرد الگوریتم بهینه‌سازی علف‌های هرز مهاجم (IWO) را برای بهره‌برداری بهینه از مخزن برقابی سد دز برای دوره‌های کوتاه، متوسط و بلندمدت مورد بررسی قرار دادند. مقایسه نتایج با الگوریتم‌های ژنتیک و ازدحام ذرات، حاکی از کارآمدی و مؤثرتر بودن الگوریتم IWO در مسئله بهره‌برداری برقابی بوده است [عزیزپور و همکاران، ۲۰۱۶]. وو و همکاران (۲۰۱۸) با استفاده از برنامه‌ریزی پویای تصادفی دو

مرحله ای (SDP) به بهره‌برداری بهینه برقابی از سیستم مخازن در رودخانه لانگانگ چین پرداختند. نتایج نشان داد که محدودیت‌های سیستم به‌خوبی در نظر گرفته‌شده و زمان محاسبات کاهش ۵۰ درصدی به همراه برتری توان تولیدی نسبت به برنامه‌ریزی پویای تصادفی معمولی داشته است [وؤ و همکاران، ۲۰۱۸]. نایر و ساسیکومار (۲۰۱۹) یک مدل بهینه‌سازی مبتنی بر اطمینان‌پذیری فازی را برای یک مخزن برقابی توسعه دادند. نتایج نشان داد که این مدل در ایجاد سیاست بهره‌برداری بهینه مفید بوده و با افزایش قابلیت اطمینان در تولید انرژی برقابی همراه می‌باشد [نایر و ساسیکومار، ۲۰۱۹].

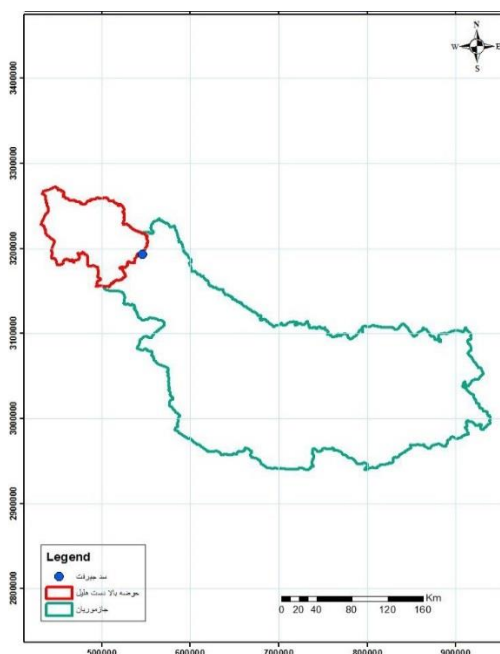
مواد و روش‌ها

حوضه آبریز هلیلرود از زیرحوضه‌های اصلی هامون- جازموریان است که نقش عمده‌ای در تولید جریان سالانه آن دارد و در قسمت غربی هامون- جازموریان، بین طول‌های جغرافیایی 51° - 56° تا 30° - 61° درجه شرقی و عرض جغرافیایی 18° - 26° تا 30° - 29° درجه شمالی واقع گردیده

است. این حوضه قسمت‌هایی از جنوب و شرق استان کرمان، شامل شهرستان‌های بافت، جیرفت، کهنوج و قسمت‌هایی از غرب استان سیستان و بلوچستان شامل ایرانشهر را در برمی‌گیرد. با وجود احداث سدهای متعدد بر روی رودخانه‌های اصلی تأمین‌کننده آب تالاب و سرشاخه‌های آن‌ها، روند رو به افزایش مطالعه و احداث سدهای جدید در این حوضه همچنان ادامه دارد. در نتیجه این امر، با احداث روزافزون سدها و برنامه‌ریزی جهت استحصال آب رودخانه‌ها در این حوضه، بدیهی است که آب ورودی به تالاب جازموریان از طریق منابع آب سطحی تأمین‌کننده آب تالاب تا حد بسیار زیادی کاهش یابد که در این میان، نقش سد جیرفت واقع بر رودخانه هلیل در قسمت غربی جازموریان از دیگر سدها مشهودتر است.

از اهداف اولیه سد مخزنی جیرفت، ذخیره ۴۱۲ میلیون مترمکعب آب سالیانه برای آبیاری اراضی پایین‌دست، کنترل، پیشگیری و کاهش خسارات ناشی از سیل و خشکسالی و تولید انرژی برقابی به میزان ۸۰ گیگاوات ساعت در سال و کمک

به شبکه برق در زمان پیک مصرف، با توجه به انتهای خط واقع شدن موقعیت نیروگاه سد جیرفت می‌باشد. شکل (۱) نیز موقعیت سد جیرفت در بخش غربی حوضه آبریز جازموریان را نمایش می‌دهد.



شکل ۱- موقعیت سد جیرفت در حوضه آبریز هامون-جازموریان

الگوریتم چرخه آب (WCA)

مشابه دیگر الگوریتم‌های فرا ابتکاری، روش WCA نیز با جمعیت اولیه به اصطلاح قطرات باران شروع می‌شود. در ابتدا، فرض می‌شود که باران یا بارش وجود دارد. بهترین فرد (بهترین قطره آب) به عنوان دریا انتخاب می‌شود. پس از آن، تعدادی از قطرات باران خوب به عنوان رودخانه و بقیه قطرات

باران به عنوان نهرها در نظر گرفته می‌شوند که به سمت رودخانه‌ها و دریا جریان پیدا می‌کنند. در روش WCA به یک راه حل واحد «قطره باران» اطلاق می‌شود. در روش ICA اصطلاحاً چنین آرایه‌ای «کشور» نامیده می‌شوند. در یک مسئله بهینه‌سازی چندبعدی، یک قطره باران، آرایه‌ای به شکل $N_{var} \times 1$ است. این آرایه به صورت رابطه (۱) تعریف می‌شود.

$$\text{Raindrop} = [X_1, X_2, X_3, \dots, X_{N_{var}}] \quad (1)$$

که، X_1 تا $X_{N_{var}}$ بیانگر متغیرهای تصمیم می‌باشند. برای شروع، یک نمونه از ماتریس قطرات باران به اندازه $N_{pop} \times N_{var}$ به طور تصادفی ایجاد می‌گردد.

Population of raindrops

$$\begin{aligned} &= \begin{bmatrix} \text{Raindrop}_1 \\ \text{Raindrop}_2 \\ \vdots \\ \text{Raindrop}_{N_{pop}} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} X_1^1 X_2^1 X_3^1 & \dots & X_{N_{var}}^1 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ X_1^{N_{pop}} X_2^{N_{pop}} X_3^{N_{pop}} & \dots & X_{N_{var}}^{N_{pop}} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2)$$

که، N_{pop} و N_{var} به ترتیب تعداد قطرات باران (جمعیت اولیه) و تعداد متغیرهای طراحی می‌باشند. مقادیر تابع هزینه (C) داده شده از رابطه (۳) به دست می‌آید.

که، N_{Sn} تعدادی از نهرها است که به رودخانه‌های خاص و یا دریا جریان می‌یابد. یک نهر جریان تا رسیدن به رودخانه در امتداد خط اتصال بین آن‌ها با استفاده از یک‌فاصله که به‌طور تصادفی انتخاب‌شده، جریان می‌یابد که این فاصله با توجه به رابطه (۷) مشخص می‌شود.

$$X \in (0, C \times d), \quad C > 1 \quad (7)$$

که، C مقداری بین یک و دو (نزدیک به دو) دارد و بهترین مقدار برای C برابر با دو در نظر گرفته می‌شود (۹). d فاصله فعلی بین نهر و رودخانه می‌باشد. مقدار X در رابطه (۷) یک عدد تصادفی توزیع‌شده (یکنواخت و یا هر توزیع مناسب دیگر) بین صفر و $(C \times d)$ می‌باشد. موقعیت جدید نهرها و رودخانه‌ها را می‌توان با روابط (۸) و (۹) محاسبه نمود.

$$X_{Stream}^{i+1} = X_{Stream}^i + rand \times C \times (X_{River}^i - X_{Stream}^i) \quad (8)$$

$$X_{River}^{i+1} = X_{River}^i + rand \times C \times (X_{Sea}^i - X_{River}^i) \quad (9)$$

که، $rand$ یک عدد تصادفی یکنواخت توزیع‌شده بین صفر و یک است. اگر راه‌حل ارائه‌شده

$$C_i = Cost_i = f(X_1^i, X_2^i, X_3^i, \dots, X_{N_{var}}^i) \quad (3)$$

$$, i = 1, 2, 3, \dots, N_{pop}$$

که، C_i مقدار هدف هر قطره می‌باشد. در گام اول، به تعداد N_{pop} قطره باران ایجاد و سپس به تعداد N_{SR} از بهترین قطرات (حداقل ارزش) به‌عنوان دریا و رودخانه انتخاب می‌شوند. قطره باران با کمترین مقدار به‌عنوان دریا در نظر گرفته می‌شود. N_{SR} ، مجموع تعداد رودخانه‌ها (که یک پارامتر کاربردی است) و یک دریا (رابطه ۴) می‌باشد. بقیه جمعیت (نهرهایی که ممکن است به رودخانه‌ها و یا به‌طور مستقیم به دریا جریان پیدا کنند) با استفاده از رابطه (۵) محاسبه می‌شود.

$$N_{SR} = \text{Number of Rivers} + \overset{\text{sea}}{\underset{1}{\uparrow}} \quad (4)$$

$$N_{Raindrops} = N_{pop} - N_{SR} \quad (5)$$

به‌منظور تعیین یا اختصاص قطرات باران به رودخانه‌ها و دریا، بسته به شدت جریان از رابطه (۶) استفاده می‌شود.

$$N_{Sn} = \text{round} \left\{ \left| \frac{Cost_n}{\sum_{i=1}^{N_{SR}} Cost_i} \right| \times N_{Raindrops} \right\} \quad (6)$$

$$, n = 1, 2, \dots, N_{SR}$$

رابطه (۱۱) در هر مرحله کاهش می‌یابد.

$$d_{\max}^{i+1} = d_{\max}^i - \frac{d_{\max}^i}{\text{max iteration}} \quad (11)$$

پس از برآورده شدن تبخیر، بارندگی اعمال می‌شود. در فرایند بارندگی، قطرات باران جدید نهرها را در مکان‌های مختلف تشکیل می‌دهند (شبیه به عملگر جهش در GA). رابطه (۱۲) مکان جدید نهرهای تازه شکل‌گرفته را نشان می‌دهد.

$$X_{\text{Stream}}^{\text{new}} = \text{LB} + \text{rand} \times (\text{UB} - \text{LB}) \quad (12)$$

که، LB و UB به ترتیب، کران پایین و بالای تعریف‌شده توسط مسئله است. بهترین قطرات باران جدید تشکیل‌شده به‌عنوان رودخانه و بقیه قطرات باران به‌عنوان نهرهای جدید که به سمت رودخانه‌ها در جریان‌اند در نظر گرفته می‌شوند. به‌منظور افزایش سرعت همگرایی و عملکرد محاسباتی الگوریتم برای مسائل مقید از رابطه (۱۳) استفاده می‌شود.

$$X_{\text{Stream}}^{\text{new}} = X_{\text{Sea}} + \sqrt{\mu} \times \text{randn}(1, N_{\text{var}}) \quad (13)$$

که، μ ضریبی است که محدوده جستجوی در نزدیکی دریا را نشان می‌دهد. randn عدد تصادفی توزیع نرمال است. مقادیر بزرگ

توسط یک نهر، بهتر از رودخانه متصل به آن باشد، موقعیت رودخانه و نهر عوض می‌شود. این تبادل نیز می‌تواند به همین شکل برای رودخانه‌ها و دریا اتفاق افتد. یکی از مهم‌ترین عواملی که از همگرایی سریع الگوریتم و به دام افتادن در بهینه‌های محلی جلوگیری می‌کند تبخیر است. فرایند تبخیر باعث می‌شود که آب دریا با تبخیر به‌صورت جریان رودخانه‌ها و یا نهرها دوباره به دریا بریزد. شبه کد (۱۰) چگونگی تعیین اینکه آیا رودخانه به دریا می‌ریزد یا نه را نشان می‌دهد.

$$\text{if } |X_{\text{Sea}}^i - X_{\text{River}}^i| < d_{\max}, i \quad (10)$$

$$= 1, 2, 3, \dots, N_{\text{SR}} - 1$$

فرایند بارش و تبخیر →
پایان →

که، d_{\max} عدد کوچکی (نزدیک به صفر) است. بنابراین، اگر فاصله بین رودخانه و دریا کمتر از d_{\max} باشد، یعنی رودخانه به دریا رسیده است. در این وضعیت، فرایند تبخیر اثر می‌کند و پس از تبخیر کافی، بارش شروع خواهد شد. d_{\max} شدت جستجو در نزدیکی دریا (راه‌حل بهینه) را کنترل می‌کند. مقدار d_{\max} به‌صورت

μ امکان خروج از منطقه امکان‌پذیر را افزایش می‌دهد و مقادیر کوچک μ منجر به جستجوی الگوریتم در منطقه کوچکتر در نزدیکی دریا می‌شود. مقدار مناسب μ، ۰/۱ تعیین شده است (۹). معیار همگرایی در این پژوهش رسیدن به حداکثر تعداد تکرار برابر ۱۰۰۰ در نظر گرفته شده است.

مدل ریاضی بهره‌برداری انرژی برقابی

هر نیروگاه برقابی از تعدادی واحدهای مستقل تولید انرژی تشکیل شده است که هر واحد، ظرفیت تولید یا ظرفیت نصب (PPC) مشخصی دارد. همچنین، هر نیروگاه برقابی دارای بازده معینی برای تولید برق است که بیان‌گر نحوه عملکرد و کارایی نیروگاه می‌باشد. تولید برق در هر نیروگاه بر اساس ضریب کارکرد آن در طول دوره زمانی مشخص صورت می‌گیرد. این ضریب نشان می‌دهد که در چند درصد از مواقع در بازه‌های زمانی مختلف از طول دوره بهره‌برداری، واحدهای نیروگاهی با بیشترین توان خود (ظرفیت نصب) به تولید برق می‌پردازند.

در سامانه سد جیرفت، ضریب کارکرد به‌گونه‌ای در نظر گرفته شده است که هر نیروگاه در ماه‌های مختلف بهره‌برداری، دستکم پنج الی شش ساعت در هر شبانه‌روز توانی معادل با ظرفیت نصب خود را تولید کند. تراز پایاب نیروگاه معادل ۱۰۳۰ متر از سطح دریا منظور شده است و نیروگاه آن از ۲ واحد ۱۶/۲ مگاواتی تشکیل شده است. ظرفیت نصب نیروگاه معادل ۳۲/۴ مگاوات و بازده آن معادل ۸۴ درصد منظور گردیده است. اطلاعات تکمیلی مربوط به نیروگاه بر اساس جدول (۱) در نظر گرفته شده است.

جدول ۱- مشخصات نیروگاه سد جیرفت

پارامتر	واحد	مقدار
تعداد واحد نیروگاه	تعداد	۲
قدرت هر واحد	مگاوات (MW)	۱۶/۲
مجموع ظرفیت دو واحد نیروگاهی	مگاوات (MW)	۳۲/۴
متوسط تولید انرژی سالیانه	گیگاوات ساعت (GWH)	۸۰
بازده تولید انرژی برقابی	درصد	۸۴

$$\text{Min(Max)} Z = \sum_{t=1}^T f(S_t, Re_t) \quad (14)$$

که در این رابطه t : اندیس دوره مورد نظر، T تعداد دوره های بهره برداری، Z هدفی که باید بیشینه و یا کمینه شود، Re_t میزان رهاسازی و S_t حجم ذخیره مخزن در دوره t است.

به منظور بهره برداری بهینه برقابی پیچیدگی های مسئله به خصوص از نظر قیود و شرایط غیرخطی اضافه شده و تابع هدف به صورت حداقل سازی کمبود توان تولیدی نسبت به ظرفیت نصب نیروگاه تعریف می شود:

$$\text{Min } f_3 = \sum_{t=1}^T (1 - \frac{P_t}{PPC}) \quad (15)$$

که در این رابطه P_t توان تولیدی در دوره t ام بر حسب مگاوات و PPC ظرفیت نصب مخزن بر حسب مگاوات است.

سایر روابط حاکم منطبق بر روابط زیر است:

$$P_t = g \times e_t \times \frac{RP_t}{PF} / \text{Mul}_t \times (\bar{H}_t - TW_t) / 1000 \quad (16)$$

$$\bar{H}_t = (H_t + H_{t+1}) / 2 \quad (17)$$

$$H_t = a_0 + a_1 \cdot S_t + a_2 \cdot S_t^2 + a_3 \cdot S_t^3 \quad (18)$$

ضریب کارکرد	درصد	۳۰
رقوم کف پایین دست نیروگاه	متر از سطح دریا (Masl)	۱۰۳۰

متغیرهای تصمیم در مدل بهینه سازی انرژی برقابی از مخزن، مقادیر رهاسازی بهینه از خروجی برقابی ماهانه از مخازن سدها می باشند. افق برنامه ریزی در این پژوهش ۲۲۳ ماه (دوره ۱۳۹۸-۱۳۷۹) در نظر گرفته شده، بنابراین الگوریتم WCA در سیستم دارای ۲۲۳ متغیر تصمیم می باشد. معیار سنجش پاسخ ها، تولید انرژی برقابی در ماه های مختلف سال است. رهاسازی از خروجی برقابی مخزن در هر دوره به عنوان متغیر تصمیم و حجم ذخیره و ورودی به مخازن در هر دوره متغیر حالت می باشند. اطلاعات ورودی به مدل شامل حجم آورد رودخانه، ارتفاع تبخیر، ارتفاع بارش و حجم نیازها به صورت ماهانه می باشد.

در مسائل مخزن، تابع هدف معمول به منظور بهینه سازی قطعی سیستم مخازن می تواند به صورت زیر بیان شود:

ضرایب ثابت تبدیل آب خروجی از نیروگاه به تراز آب پایاب، RP_t میزان رهاسازی از خروجی برقابی به منظور تولید توان در دوره t ام برحسب میلیون مترمکعب، RPS_t میزان سرریز از خروجی برقابی در دوره t ام برحسب میلیون مترمکعب، Q_t جریان ورودی رودخانه در دوره t ام، Sp_t سرریز در دوره t ام، $Loss_t$ کل تلفات آب در دوره t ام، Ev_t مقدار متوسط افت در دوره t ام (تبخیر منهای بارش) برحسب میلی‌متر، \bar{A}_t میانگین میزان سطح آب مخزن در دوره t ام برحسب کیلومترمربع، A_t و A_{t+1} به ترتیب میزان سطح آب مخزن برحسب کیلومترمربع در ابتدا و انتهای دوره t ام، a ، b و c ضرایب ثابت تبدیل حجم مخزن به سطح متناظر مخزن، S_{Min} حداقل حجم ذخیره، S_{Max} حداکثر حجم ذخیره، Re_{Min} حداقل حجم رهاسازی و Re_{Max} حداکثر حجم رهاسازی است.

نتایج و بحث

برای بررسی کارآمدی و درستی عملکرد الگوریتم‌های (WCA و ICA) که کدنویسی آن‌ها در قسمت برنامه‌نویسی نرم افزار MATLAB انجام شد، از چندین تابع محک استاندارد استفاده گردیده

$$TW_t = b_0 + b_1 \cdot Re_t^{Power} + b_2 \cdot (Re_t^{Power})^2 + b_3 \cdot (Re_t^{Power})^3 \quad (19)$$

$$RPS_t = Re_t^{Power} - RP_t \quad (20)$$

$$0 \leq P_t \leq PPC \quad (21)$$

$$S_{t+1} = S_t + Q_t - Re_t^{Power} - Sp_t - Loss_t \quad (22)$$

$$Loss_t = Ev_t \times \bar{A}_t / 1000 \quad (23)$$

$$\bar{A}_t = (A_t + A_{t+1}) / 2 \quad (24)$$

$$A_t = a \times S_t^2 + b \times S_t + c \quad (25)$$

$$S_{Min} \leq S_t \leq S_{Max} \quad (26)$$

$$Re_{Min} \leq Re_t \leq Re_{Max} \quad (27)$$

که در این روابط: g شتاب جاذبه زمین و برابر $9/81$ متر بر مجذور ثانیه، e_t بازده نیروگاه که برای تمامی دوره‌ها ثابت فرض شده است، PF ضریب کارکرد نیروگاه، Mul_t ضریب تبدیل میلیون مترمکعب به مترمکعب بر ثانیه در دوره t ام، \bar{H}_t متوسط تراز آب مخزن در دوره t ام برحسب متر، H_t تراز آب در ابتدای دوره t ام برحسب متر، TW_t تراز آب در انتهای دوره t ام برحسب متر، TW_t تراز آب پایاب در دوره t ام برحسب متر، a_0 ، a_1 ، a_2 و a_3 ضرایب ثابت تبدیل حجم مخزن به ارتفاع متناظر آن، b_0 ، b_1 ، b_2 و b_3

است. جدول (۲) نتایج پیاده‌سازی الگوریتم WCA و دیگر الگوریتم‌های فرا ابتکاری را بر روی توابع محک استاندارد نشان می‌دهد. تعداد اعضای جمعیت و تعداد ارزیابی تابع هدف در هر الگوریتم

یکسان و متناسب با بعد هر تابع بوده و تعداد تکرارها برابر ۱۰۰۰ می‌باشد.

جدول ۲- نتایج پیاده‌سازی الگوریتم‌های فرا ابتکاری بر روی توابع محک استاندارد

ICA	WCA	مقدار هدف	بعد	تابع
۳	۳	۳	۲	Goldsten-Price
-۱/۹۱۳۲	-۱/۹۱۳	-۱/۹۱۳۳	۲	Mccormick
۲/۷×۱۵-۱۰	۸/۹×۹-۱۰	۰	۲	Rosenbrock
۲/۱۱	۲/۸۲×۶-۱۰	۰	۲	Rosenbrock
۳۷۱/۶۶	۲/۲۱×۵-۱۰	۰	۱۲۰	Rosenbrock
-۱۰/۵۳۲	-۱۰/۵۳۱۶	-۱۰/۵۳۶	۴	Shekel
-۱/۰۳۱۶	-۱/۰۳۱۶	-۱/۰۳۱	۲	Six-Hump Camel

نتایج جدول (۲) نشان‌دهنده عملکرد بالای الگوریتم WCA در مقایسه با الگوریتم فرا ابتکاری دیگر می‌باشد. همان‌طور که در جدول (۲) مشاهده می‌شود، در مسائل با ابعاد کوچک عملکرد هر دو الگوریتم به‌طور تقریبی یکسان و مناسب می‌باشد. با افزایش بعد مسئله و پیچیدگی آن (تابع Rosenbrock با ابعاد ۳۰ و ۱۲۰) عملکرد الگوریتم ICA سیر نزولی داشته و از مقدار بهینه فاصله گرفته است اما الگوریتم WCA نسبت به الگوریتم دیگر

به‌مراتب به جواب بهینه نزدیکتر بوده و خطای پایین‌تری دارد. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده در جدول (۲)، الگوریتم چرخه آب چه در مسائل با بعد کم و چه در مسائل بزرگ‌مقیاس دارای عملکرد مناسبی می‌باشد. پس از صحت‌سنجی الگوریتم‌های مورد بررسی با استفاده از توابع محک استاندارد، سه مدل برای بهره‌برداری بهینه از سیستم مخازن سدهای گلستان و وشمگیر بر اساس الگوریتم‌های WCA و ICA توسعه داده شد.

جدول ۵- نتایج الگوریتم‌های مختلف به ازای ۱۰ اجرای مختلف

ICA	WCA	تعداد اجرا
۸/۳۸	۶/۵۸	۱
۹/۷۸	۵/۵۷	۲
۹/۳۲	۵/۸۱	۳
۶/۸۸	۶/۲۹	۴
۷/۲۲	۵/۶۴	۵
۱۱/۰۶	۵/۴۷	۶
۹/۳۸	۴/۷۸	۷
۱۱/۵۴	۶/۲۹	۸
۵/۸۲	۵/۵۷	۹
۱۰/۶	۵/۵۶	۱۰
۹	۵/۷۵	میانگین
۵/۸۲	۴/۷۸	حداقل
۱۱/۵۴	۶/۵۸	حداکثر
۱/۸۹	۰/۵۲	انحراف معیار

نتایج حاصل از جدول (۶) نشان‌دهنده برتری الگوریتم WCA نسبت به دیگر الگوریتم‌ها در مینیمم سازی تابع هدف می‌باشد. میانگین تابع هدف در ۱۰ اجرای مختلف برای الگوریتم WCA برابر ۵/۷۵ می‌باشد که این مقدار برای الگوریتم‌های ICA به ترتیب برابر ۹ می‌باشد. همچنین انحراف معیار حاصل از الگوریتم‌های WCA، ICA به ترتیب برابر ۰/۵۲، ۱/۸۹ است که نشان‌دهنده همگرایی بهتر الگوریتم WCA در اجراهای مختلف می‌باشد. نمودار همگرایی الگوریتم‌های مورد بررسی در اجرای مدل بهره‌برداری بهینه برقابی سد جیرفت در شکل (۲) آورده شده

بهترین مقادیر پارامترهای اولیه الگوریتم‌های مورد بررسی در مسئله بهره‌برداری بهینه برقابی از مخزن جیرفت که با تحلیل حساسیت بر روی آن‌ها به دست آمد، در جداول (۳) و (۴) نشان داده شده است.

جدول ۳- مقادیر پارامترهای الگوریتم WCA در بهره‌برداری بهینه برقابی از مخزن جیرفت

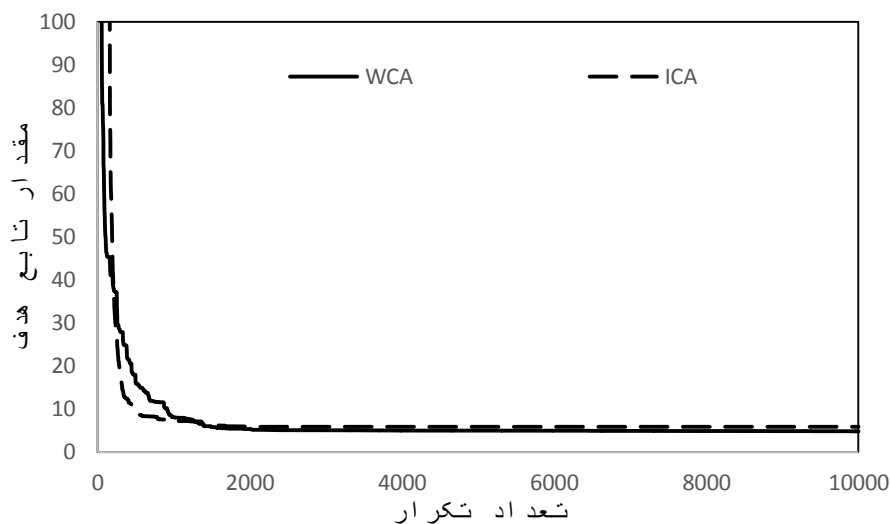
تعداد	تعداد	تعداد	تعداد	تعداد
۱۰۰	۱۰۰	۲۲۳	۵۰	۲
۱۰۰	۱۰۰	۲۲۳	۵۰	۲

جدول ۴- مقادیر پارامترهای مدل ICA در مسئله بهره‌برداری بهینه برقابی از مخزن جیرفت

تعداد	تعداد	تعداد	تعداد	تعداد	تعداد
۱۰۰۰۰	۱۰۰	۲۲۳	۱۰	۰/۴	۰/۵

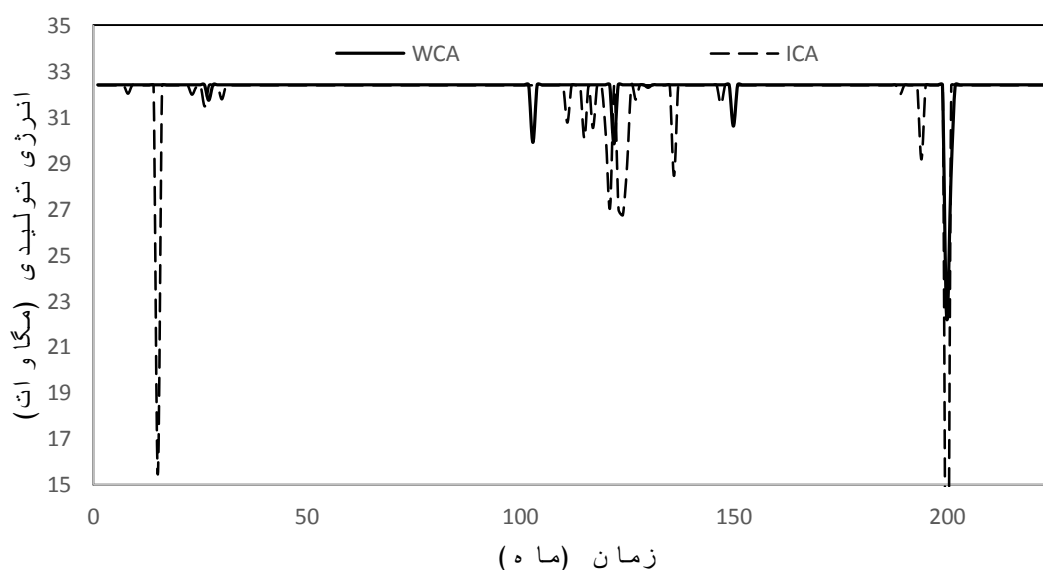
مسئله موردنظر با استفاده از الگوریتم‌های چرخه آب، رقابت استعماری برای سری زمانی ۱۹ ساله (مهر ۱۳۷۹ تا فروردین ۱۳۹۸) از آمار در دسترس و به ازای مقادیر پارامترهای جداول (۳) تا (۴) حل شده است. تعداد تکرارها برای الگوریتم‌های مورد بررسی برابر ۱۰۰۰۰ می‌باشد. جدول (۵) مقادیر تابع هدف مسئله را به ازای ۱۰ اجرای مختلف، نشان می‌دهد.

است. همان‌طور که در شکل (۲) همگرایی رسیده و به مقدار نشان داده شده است الگوریتم چرخه آب نسبت به الگوریتم رقابت استعماری سریع‌تر به

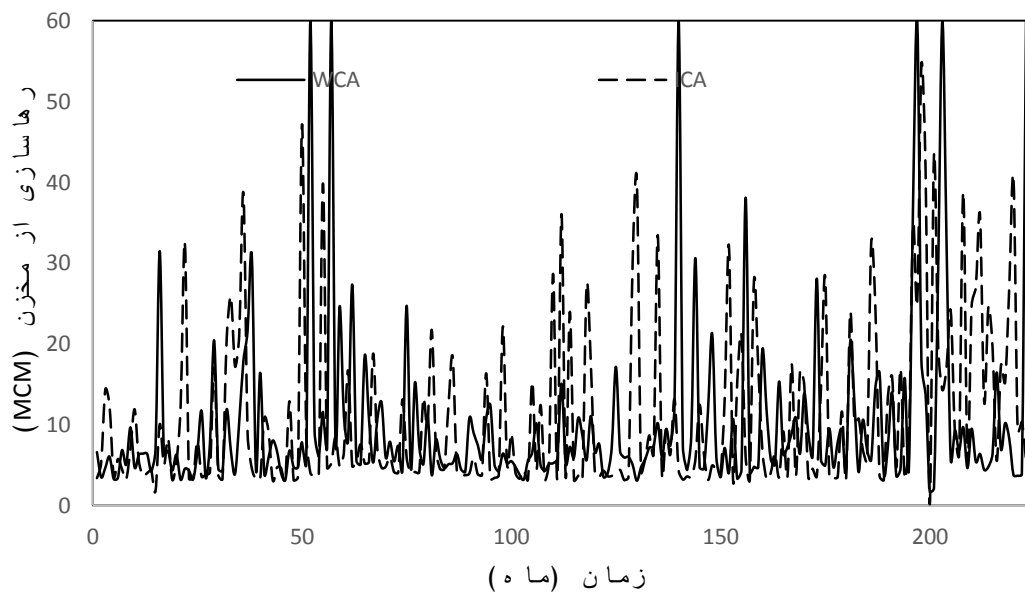


شکل ۲- روند همگرایی الگوریتم‌های مورد بررسی در بهره‌برداری بهینه برقابی از سد جیرفت

شکل (۳) مقادیر انرژی تولیدی به دست آمده برای دوره آماری بلندمدت ۲۲۳ ماهه را نشان می‌دهند. همچنین در شکل (۴) مقادیر رها سازی به دست آمده از الگوریتم‌های مورد بررسی برای دوره آماری مذکور، ارائه شده است.



شکل ۳- مقادیر انرژی تولیدی در دوره آماری بلندمدت ۲۲۳ ماهه سد جیرفت



شکل ۴- مقادیر آب رهاسازی شده از خروجی برقابی مخزن جیرفت در دوره آماری بلندمدت ۲۲۳ ماهه

طبیعت است که توانایی آن در حل مسائل بهینه‌سازی در مقالات مختلف به اثبات رسیده است. الگوریتم چرخه آب که در این مقاله مورد استفاده قرار گرفته است می‌تواند از مشکلاتی که الگوریتم‌های قدیمی‌تر در به دست آوردن بهینه مطلق که همان همگرایی زودرس و کند آن است جلوگیری کرده و باعث ارتقاء و افزایش اعتمادپذیری در پیدا کردن جواب بهینه گردد، که نتایج حاصل از آن تا حد زیادی قابل قبول می‌باشد به طوری که بدون قرار گرفتن در بهینه موضعی، در مسائل منابع آب از جمله بهینه‌سازی انرژی برقابی سد، به طور مؤثری کارآمد است. پس از بررسی کارآمدی الگوریتم چرخه آب

همان‌طور که در شکل (۳) مشاهده می‌شود میزان انرژی تولیدی حاصل از الگوریتم WCA نسبت به الگوریتم ICA مورد بررسی، در سطح بالاتری قرار دارد و در اکثر ماه‌ها به ظرفیت تولید نیروگاه نزدیکتر می‌باشد. میزان انرژی تولیدی حاصل از الگوریتم‌های WCA و ICA به ترتیب برابر $7203/29$ ، $7138/66$ مگاوات در طول دوره ۲۲۳ ماهه (از مهر ۱۳۷۹ تا فروردین ۱۳۹۸) بوده که حاکی از برتری الگوریتم چرخه آب در تولید انرژی مخزن جیرفت می‌باشد.

نتیجه‌گیری

الگوریتم چرخه آب بر اساس شبیه‌سازی چرخه هیدرولوژی در

حاصل شده بهبود قابل توجهی داشته است، به طوری که بهترین مقدار برای تابع هدف در الگوریتم WCA برابر با ۴/۷۸ نسبت به الگوریتم ICA با مقدار ۵/۸۲ کاهش محسوستری داشته و این موضوع بیانگر عملکرد مناسب این روش در زمینه بهینه سازی انرژی برقابی سد جیرفت می باشد.

توسط تعدادی توابع محک استاندارد، از آن برای بهینه سازی انرژی برقابی سد جیرفت در دوره بلندمدت ۲۲۳ ماهه استفاده شد. نتایج حاصل از اجرای الگوریتم چرخه آب با نتایج الگوریتم رقابت استعماری مقایسه گردید. با توجه به نتایج به دست آمده از الگوریتم WCA، در مقایسه با الگوریتم ICA جواب های

منابع

1. Wurbs, R. A., (1993). Reservoir-system simulation and optimization models J. Water Resource Planning and Management 119(4): 455-472.
2. Eskandar, H., Sadollah, A., Bahreininejad, A., & Hamdi, M., (2012). water cycle algorithm -A novel metaheuristic optimization method for solving constrained engineering optimization problems. Computers and Structures 110-111, 151-166.
3. Eskandar, H., Sadollah, A., & Bahreininejad, A., (2013). Weight optimization of truss structures using water cycle algorithm. International Journal of Optimization in Civil Engineering 1:115-129.
4. Baghipour, R., Hosseini, S. M., & Boor, Z., (2014). A water cycle algorithm for optimal allocation of DGs in distribution systems considering environmental profits. International Journal of Mechatronics, International Journal of Mechatronics, Electrical and Computer Technology (IJMEC) 4(11):430-454.
5. Qaderi, K., Akbarifard, S., Madadi, M. R., & Bakhtiari, B., (2018). Optimal operation of multi-reservoirs by water cycle algorithm. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Management 171(4): 179-190.
۶. افشار، م. رضایی سنگدهی، س. معینی، ر. (۱۳۹۳) الگوریتم بهینه سازی جامعه مورچگان در مسئله بهره برداری بهینه از مخازن سدها: مطالعه مقایسه ای چهار الگوریتم. فصلنامه مهندسی عمران فردوسی. ۲۵ (۲): ۱۱۷-۱۳۴.
۷. احمدیان فر، ا. ادیب، آ. (۱۳۹۴) بهینه سازی بهره برداری انرژی برقابی از سدها با استفاده از روش ترکیبی الگوریتم ازدحام ذرات و الگوریتم ژنتیک (مطالعه موردی: سد دز) علوم و مهندسی آبیاری. ۳۸ (۳): ۶۳-۷۱.
۸. احترام، م. موسوی، س. ف. کرمی، ح. تهرانی، ن. امیری، آ. (۱۳۹۵) ارائه روش هیبریدی برای بهینه سازی مخازن سدها مبتنی بر هوش مصنوعی. نشریه سد و نیروگاه برقابی ایران. ۳ (۱۱): ۵۴-۴۴.
۹. حسینی موغاری، س. م. مقدس، م. عراقی نژاد، ش. (۱۳۹۶) کاربرد الگوریتم بهینه سازی فاخته در بهره برداری بهینه از مخزن برقابی (مطالعه موردی: مخزن کارون ۴). فصلنامه علمی پژوهشی مهندسی منابع آب. ۱۰ (۳۲): ۱۹-۲۳.
10. Zhang, J., Wu, Z., Cheng, C. T., & Zhang, S. Q., (2011). Improved particle swarm optimization algorithm for multi-reservoir system operation. Water Science and Engineering 4(1): 61-74.

11. Azizpour, M., Ghalenoei, V., Afshar, M. H., & Solis, S. S., (2016). Optimal operation of hydropower reservoir systems using weed optimization algorithm. *Water resources management* 30(11): 3995-4009 .
12. Wu, X., Cheng, C., Lund, J. R., Niu, W., & Miao, S., (2018). Stochastic dynamic programming for hydropower reservoir operations with multiple local optima. *Journal of hydrology* 564: 712-722 .
13. Nair, S. J., & Sasikumar, K., (2019). Fuzzy reliability-based optimization of a hydropower reservoir. *Journal of Hydroinformatics* 21(2): 308-317 .