

## استخراج قوانین جیره‌بندی تلفیقی برای مدیریت بهره‌برداری از منابع آب سطحی و زیرزمینی

سید مهدی سجادی<sup>۱</sup>، حمیدرضا صفوی<sup>۱\*</sup> و امید بزرگ حداد<sup>۲</sup>

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۹/۲۰؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۱۰/۱۹)

### چکیده

در این پژوهش از مدل WEAP به‌عنوان شبیه‌ساز و از الگوریتم جستجوی گرانشی (GSA)، به‌عنوان بهینه‌ساز استفاده شده است و با توجه به لزوم اجرای شبیه‌سازی‌های متعدد در فرایند بهینه‌سازی جهت رسیدن به پاسخ بهینه، اتصال برنامه‌های مذکور در محیط نرم‌افزار Matlab انجام شده است. به‌منظور بررسی عملکرد، سیاست‌های جیره‌بندی به‌دست آمده در دوره پایه، برای دوره آینده تحت تأثیر تغییرات اقلیمی بررسی شده است. نتایج نشان‌دهنده وضعیت نامناسب سفره‌های آب زیرزمینی در حوضه تحت سناریوی روند است و در صورت ادامه روند مدیریت کنونی منابع آب، حوضه آبریز زاینده‌رود در این زمینه دچار مشکلات قابل توجهی خواهد شد. مدیریت منابع آب با استفاده از سیاست‌های جیره‌بندی تلفیقی توانسته است، این شرایط را بهبود ببخشد. نتایج حاصل از اعمال سیاست جیره‌بندی تلفیقی نشان‌دهنده افزایش شاخص پایداری گروهی در تأمین نیازها، به‌میزان ۱۱ درصد نسبت به سیاست روند است، همچنین براساس شاخص پایداری گروهی در بخش منابع استفاده از سیاست جیره‌بندی تلفیقی پایداری منابع آب سطحی و زیرزمینی را به‌ترتیب به‌میزان ۵/۲ و ۶ درصد نسبت به سناریوی روند افزایش می‌دهد و این نشان‌دهنده عملکرد مناسب این سیاست، در مقایسه با سیاست بهره‌برداری روند است.

واژه‌های کلیدی: مدیریت منابع آب، تغییر اقلیم، سیاست جیره‌بندی تلفیقی، الگوریتم جستجوی گرانشی، حوضه آبریز زاینده‌رود

۱. دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان

۲. گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج

\*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: hasafavi@cc.iut.ac.ir

## مقدمه

بهره‌برداری از منابع آب یک فرایند تصمیم‌گیری برای تعیین مقادیر آب رها شده جهت تأمین نیازها و یا آب ذخیره شده برای مصرف در دوره‌های آبی است. در طی دهه‌های گذشته حل این مسئله به چالش مهمی برای مدیران و برنامه‌ریزان منابع آب تبدیل شده است. برای این منظور سیاست بهره‌برداری استاندارد (SOP) به‌عنوان یک قانون ساده و پرکاربرد در بهره‌برداری از مخازن آب و با هدف تأمین نیازهای از پیش تعیین شده به‌کار می‌رفته است (۱۱ و ۲۲).

بهره‌برداری از مخازن آب، نقش مهمی را در مدیریت و برنامه‌ریزی منابع آب ایفا می‌کند. با توجه به اینکه سیاست بهره‌برداری استاندارد سبب کاهش کمبودهای آبی دوره حاضر می‌شود و کمبودهای آبی محتمل و شدت آنها را در دوره‌های آبی در نظر نمی‌گیرد، در طی دوره‌های خشکسالی که مقادیر ورودی به مخزن کم است، امکان تأمین نیازهای برنامه‌ریزی شده وجود ندارد و کمبود آبی رخ می‌دهد. استفاده از قوانین جیره‌بندی در بهره‌برداری از مخازن تحت شرایط کم‌آبی می‌تواند موجب ایجاد تعادل میان کمبود منابع آب در حال حاضر و ذخیره آب آینده شود تا از این طریق از وقوع خشکسالی‌های شدید در آینده جلوگیری کند. به‌طور کلی قوانین جیره‌بندی باید در مرحله برنامه‌ریزی برای مخزن یا در نخستین مراحل بهره‌برداری از مخزن مشخص شوند تا بتوانند بهره‌برداری را بهبود ببخشند. بنابراین، این قوانین توسط مدیران منابع آب به‌منظور کاهش اثرات کم‌آبی ناشی از خشکسالی‌های محتمل آینده، مورد استفاده قرار گرفتند. در مطالعه‌ای که بازیت و اونال در سال ۱۹۹۰ بر روی مخزنی با ظرفیت ۴۰ میلیون مترمکعب و برای یک دوره ۲۰ ساله انجام دادند، سیاست جیره‌بندی دو نقطه‌ای برای بهره‌برداری از مخازن سدها را معرفی کرده و مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان‌دهنده این موضوع بود که اگر قانون جیره‌بندی زمانی که حجم آب مخزن کم است، اعمال شود، خطر کمبودهای شدید آینده کاهش می‌یابد، اگرچه میانگین کمبود افزایش می‌یابد (۵). قانون

جیره‌بندی یک نقطه‌ای توسط شیبه و رول (۱۹) ارائه شد. این قانون در واقع حالت خاصی از قانون جیره‌بندی دو نقطه‌ای بود که نقطه شروع آن بر روی مبدأ قرار می‌گرفت و با توجه به اینکه شیب خط در SOP تا زمانی که آب موجود کمتر از نیاز است، برابر ۴۵ درجه است در این مورد شیب خط در ناحیه مذکور کمتر از ۴۵ درجه است. در مطالعه‌ای که اسرینیواسان و فیلیپوز در سال ۱۹۹۶ بر روی مخزن هیماواتی که در مسیر رودخانه هیماواتی در جنوب هند قرار گرفته است، انجام دادند اثرات مقدار آب اولیه (SWA) و مقدار آب نهایی (EWA) و پارامتر سومی با عنوان ضریب جیره‌بندی (HF) که در تحقیق مذکور معرفی شده است، را بر روی عملکرد مخزن، ارزیابی کردند (۲۱). شکل رایج قانون جیره‌بندی سه نقطه‌ای که از دو قسمت خطی با شیب‌های متفاوت در محدوده‌ای که آب موجود از نیاز کمتر است (با توجه به منحنی SOP)، تشکیل شده است، توسط دراپر و لوند (۸) در سال ۲۰۰۴ ارائه شد. در این مطالعه اثرات قوانین جیره‌بندی و مقادیر آب رها شده یا ذخیره شده را از نقطه نظر اقتصادی بررسی کردند و ثابت کردند که سیاست جیره‌بندی بهینه برای بهره‌برداری از مخازن آب به تعادل اقتصادی میان مقادیر رهاسازی شده که سودآور هستند و مقادیر ذخیره برای آینده بستگی دارد. در مواقعی که استفاده از قوانین جیره‌بندی مطلوب است، یک سیاست جیره‌بندی دو نقطه‌ای در محدوده وسیعی از شرایط تأثیرگذار، پاسخی نزدیک به پاسخ بهینه را می‌دهد. چارچوب مفهومی ارائه شده در این تحقیق بعدها توسط برخی محققین به‌منظور به‌دست آوردن قوانین جیره‌بندی با استفاده از حل تحلیلی ادامه داده شده است (۱۷) و (۲۶). شیایو و لی در سال ۲۰۰۵، در تحقیقی قوانین جیره‌بندی بهینه را به‌منظور کمینه کردن کمبود آب کوتاه‌مدت و درازمدت، برای یک مخزن تأمین آب در تایوان به‌دست آوردند. در این مطالعه کمبودهای بزرگ در دوره‌های کوتاه به کمبودهای کوچک‌تر و در بازه زمانی بزرگ‌تری تبدیل شده است و برای این منظور حداکثر کمبود ماهیانه و همچنین نسبت کمبود (نسبت کل کمبودها به کل نیازها) را به‌عنوان هدف در نظر

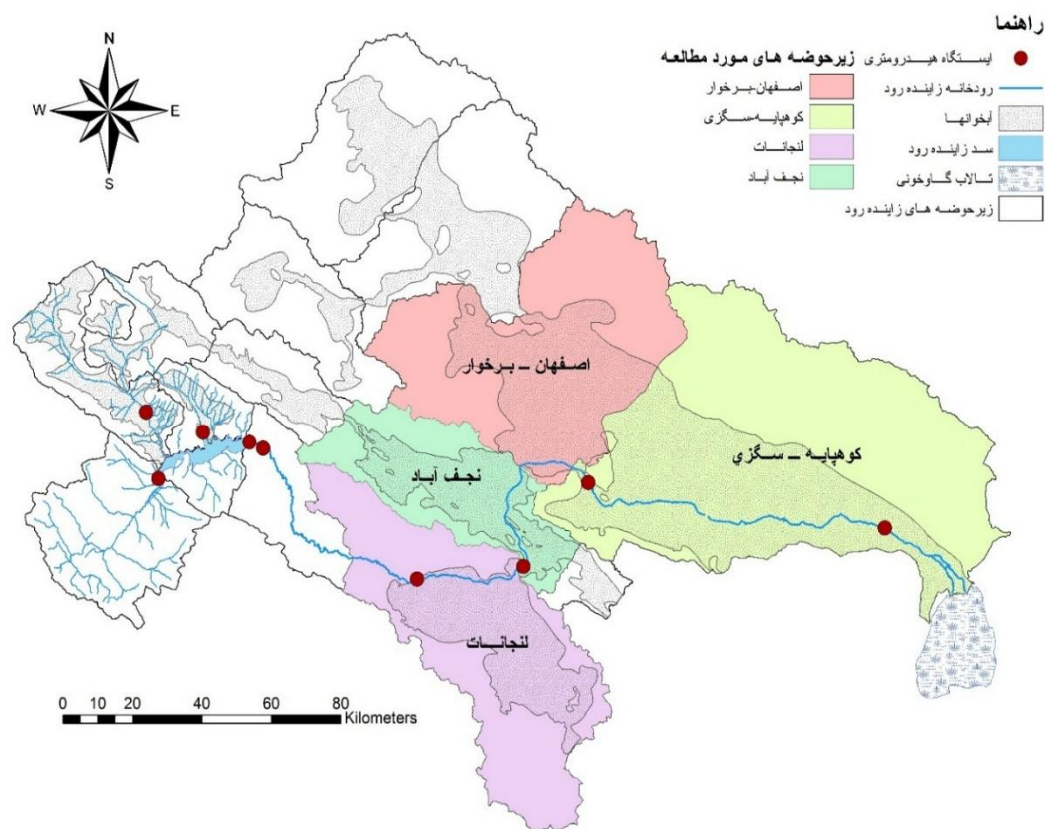
شاخص کمبودی که توسط مهندسین ارتش ایالات متحده آمریکا ارائه شده بود، معرفی شد. بالا بودن این شاخص، نشان‌دهنده توزیع نابرابر آب در دسترس و نیازهای آبی است و حداقل کردن آن می‌تواند موجب بهینه شدن توزیع آب در محدوده مورد مطالعه شود (۲۴).

## مواد و روش‌ها

### محدوده مورد مطالعه

حوضه آبریز زاینده‌رود با مساحت ۲۶۹۱۷ کیلومتر مربع، حدود ۶۳ درصد وسعت حوضه آبریز گاوخونی را شامل می‌شود. حوضه گاوخونی نیز خود بخشی از حوضه آبریز کویر مرکزی ایران است. این حوضه از شمال به حوضه آبریز دریاچه نمک، از شرق به حوضه‌های دق‌سرخ و کویر سیاه‌کوه، از جنوب به حوضه کویر ابرقو و از غرب و جنوب به حوضه آبریز کارون محدود می‌شود. رودخانه زاینده‌رود پرآب‌ترین رودخانه این حوضه است که از دامنه‌های شرقی کوه‌های زاگرس میانی سرچشمه گرفته و با طولی بالغ بر ۳۵۰ کیلومتر از جهت عمومی غرب به شرق جریان می‌یابد و پس از عبور از شهر اصفهان، در انتها به باتلاق گاوخونی می‌ریزد. این رودخانه مهم‌ترین و حیاتی‌ترین رودخانه منطقه به‌منظور توسعه کشاورزی، تأمین آب بخش شرب و صنعت و کلیه فعالیت‌های اقتصادی است. در طول مسیر رودخانه پس از سد مخزنی تعدادی سرریز و بندهای انحرافی احداث شده که از این طریق در مکان‌های متعدد شهری، صنعتی و کشاورزی آبرگیری صورت گیرد (۱). حوضه زاینده‌رود دارای ۱۶ زیرحوضه است که از بین آنها شش زیر حوضه، در بالادست سد زاینده‌رود و سایر زیرحوضه‌ها در پایین‌دست قرار گرفته‌اند که در میان آنها تنها زیرحوضه‌های لنجانان، نجف‌آباد، اصفهان برخوار و کوهپایه سگزی دارای اندرکنش با رودخانه زاینده‌رود هستند. در میان آبخوان‌های فعال در حوضه، چهار آبخوان مذکور به سه دلیل از اهمیت بالایی برخوردار هستند؛ این عوامل شامل الف) وجود عمده مصارف حوضه اعم از شرب و بهداشت، صنعت،

گرفته‌اند (۱۸). با توجه به عملکرد قوانین جیره‌بندی کمبودهای آب در دوره‌های حاضر اجتناب‌ناپذیر است که این مسئله با توجه به افزایش حجم ذخیره آب برای دوره‌های آتی قابل قبول است. یو وکای در سال ۲۰۰۸ با در نظر گرفتن اثرات آب موجود در ابتدا و انتها، محدوده جیره‌بندی که به نیازها وابسته است، عدم قطعیت‌های آورد مخزن و تبخیر در تابع مطلوبیت روش دراپرولوند را توسعه دادند (۲۶). در پژوهش حاضر برای نخستین بار از سیاست‌های جیره‌بندی به‌منظور مدیریت بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی استفاده شده است و با توجه به اندرکنش منابع آب سطحی و زیرزمینی در حوضه آبریز زاینده‌رود و اهمیت بهره‌برداری تلفیقی در این حوضه، قوانین جیره‌بندی که تاکنون صرفاً برای بهره‌برداری از منابع آب سطحی به‌کار رفته‌اند، برای چهار آبخوان لنجانان، نجف‌آباد، اصفهان برخوار و کوهپایه سگزی و همچنین مخزن سد زاینده‌رود جهت مدیریت توأمان این منابع، بهینه‌سازی و استخراج شده است. در این تحقیق به‌منظور به‌دست آوردن قوانین جیره‌بندی بهینه جهت بهره‌برداری از منابع آب سطحی و زیرزمینی، از الگوریتم جستجوی گرانشی استفاده شد که بر پایه قوانین گرانش و حرکت طراحی شده است. الگوریتم جستجوی گرانشی با وجود توانایی بالا در بهینه‌سازی (۹، ۱۲ و ۱۵) که موجب گستردگی کاربرد آن در زمینه‌های مختلف شده است، در مسائل مربوط به منابع آب کمتر استفاده شده است (۴)، البته این الگوریتم دارای مزایایی در عملکرد نسبت به برخی الگوریتم‌های تکاملی دیگر است که در مراجع آورده شده به آنها اشاره شده است. به‌علاوه در این الگوریتم از وضعیت موجود عامل‌ها در فرایند به‌روزرسانی استفاده می‌شود و حافظه‌ای برای استفاده از نتایج قبلی در نظر نمی‌گیرد که این موضوع می‌تواند سرعت جستجو را افزایش دهد (۱۲). در این مطالعه از شاخص کمبود اصلاح شده به‌عنوان تابع هدف بهینه‌سازی استفاده شده است که توسط محققین متعددی در زمینه بهره‌برداری از منابع آب سطحی استفاده شده است (۶، ۲۳ و ۲۴). این شاخص توسط هسو و چنگ (۱۰) با اصلاح



شکل ۱. موقعیت زیرحوضه های مطالعاتی در حوضه آبریز زاینده رود

۱۵-۱۰ درصد از بیشینه ظرفیت آبخوان اختصاص به آبخوان، آزاد دارد که قابل استفاده برای مصارف شرب یا کشاورزی است. در این مطالعه از به روزترین نقشه های مربوط به فیزیوگرافی و محدوده های مطالعاتی حوضه در قالب شیپ فایل استفاده شده است که در آنها مرزهای محدوده های مطالعاتی حوضه تدقیق شده است. فایل نقشه های موقعیت سد زاینده رود، رودخانه ها و انشعابات آنها، آبخوان ها و فایل رستر DEM ۹۰ متر، از جمله مهم ترین نقشه هایی است که در تحقیق حاضر مورد بررسی و استفاده قرار گرفته است، همچنین با استفاده از فایل رستر سنگ کف آبخوان، حجم و ضخامت آبخوان های حوضه آبریز زاینده رود محاسبه شده است. حجم متوسط آبخوان های مختلف برای دوره مطالعاتی به صورت ماهانه با استفاده از ایجاد یک مدل تکرار در نرم افزار ArcGIS و جعبه ابزار Model Builder در آن محاسبه شده است، همچنین با استفاده از این ابزار، ضخامت متوسط آبخوان ها

کشاورزی و محیط زیست در این محدوده ها، بهره برداری تلفیقی از منابع آب سطحی (رودخانه) و آب زیرزمینی در این نواحی و ج) اندرکنش بین رودخانه و آبخوان های این محدوده های مطالعاتی می شود. به این منظور زیرحوضه های مذکور برای مطالعات مدیریت بهره برداری تلفیقی در این پژوهش، انتخاب شدند. در شکل (۱) نمایی کلی از موقعیت حوضه به همراه موقعیت آبخوان های مورد مطالعه در حوضه، محدوده قرارگرفتن آبخوان ها در هر یک از زیرحوضه ها، ایستگاه های هیدرومتری رودخانه، دریاچه سد زاینده رود، تالاب گاوخونی و موقعیت آنها در حوضه نمایش داده شده است. اطلاعات تغییرات سطح آب زیرزمینی در حوضه با استفاده از ۳۹۹ چاه مشاهده ای ثبت می شود که پراکنش این چاه ها در دشت های آبخوان های مورد مطالعه متفاوت است. لازم به ذکر است عمده حجم آب در آبخوان کوهپایه - سگزی را آب های شور و غیر قابل بهره برداری تشکیل می دهد و در حدود

حجمی از آبخوان مجاز است و با توجه به خصوصیات هریک از آبخوان‌ها و با مشورت متخصصین حوضه تعیین شده است که البته در صورت ضرورت، می‌توان مقادیر مفروض را تغییر داد.  $D$ : نیاز آبی متوسط ماهانه از آبخوان است که براساس اطلاعات حوضه در دوره (۹۰-۱۳۷۰) به دست می‌آید.  $SWA_t$ : حجم آب اولیه در زمان  $t$  است و می‌تواند مقادیری بین صفر و  $D$  داشته باشد.  $EWA_t$ : حجم آب نهایی در زمان  $t$  است و می‌تواند مقادیری بین  $D$  و  $D + \alpha \times GS_{max}$  داشته باشد که  $GS_{max}$  ظرفیت آبخوان یا حجم آب حداکثر آبخوان است که در این تحقیق با در نظر گرفتن تراز عمق ریشه (دو متر از سطح)، به عنوان حداکثر عمق آب و تراز سنگ بستر به عنوان کف آبخوان محاسبه شده است. در صورتی که  $SWA$  مقداری برابر با  $D$  داشته باشد یا  $EWA$  برابر  $D$  باشد، مکانیسم جیره‌بندی عمل نمی‌کند و قانون بهره‌برداری همان سیاست بهره‌برداری استاندارد (SOP) خواهد بود. این دو پارامتر به عنوان آستانه برای شروع و اتمام جیره‌بندی هستند و می‌توانند مقادیر مختلفی را در بازه ذکر شده اختیار کنند که با توجه به مقادیرشان، قوانین جیره‌بندی متفاوتی ایجاد می‌شود. در این تحقیق، این دو پارامتر به عنوان متغیر در نظر گرفته شده و با استفاده از بهینه‌سازی، مقادیر بهینه این پارامترها به دست می‌آید. تابع هدف در بهینه‌سازی، حداقل کردن شاخص کمبود اصلاح شده است که فرمول آن در رابطه (۵) آورده شده است:

$$MSI = \frac{100}{T} \sum_{t=1}^T \left( \frac{TS_t}{TD_t} \right)^2 \quad [5]$$

در این رابطه،  $T$ : تعداد کل دوره‌های زمانی است که در این تحقیق ماهانه است.  $TS_t$ : کلیه کمبودها در دوره  $t$  و  $TD_t$ : کلیه نیازها در دوره  $t$  هستند، همچنین برای جیره‌بندی سد زاینده‌رود از قوانین جیره‌بندی دو نقطه‌ای براساس مطالعات شیاو و لی (۱۸) استفاده شده است.

#### الگوریتم جستجوی گرانشی

الگوریتم جستجوی گرانشی (GSA) یک الگوریتم جستجوی

(سنگ کف تا سطح ایستابی) نیز به صورت ماهانه به دست آمده است.

#### سیاست جیره‌بندی آب‌های زیرزمینی

با توجه به اینکه این قانون برای مدیریت منابع آب سطحی و به طور دقیق‌تر مخازن سدها به کار رفته است، بنابراین به منظور استفاده از این قوانین جهت مدیریت بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی تغییراتی متناسب با محدودیت‌های آبخوان در آنها در نظر گرفته شده است. در جیره‌بندی آبهای زیرزمینی این منابع به صورت مخزن در نظر گرفته می‌شوند اما با توجه به ماهیت، این مخازن با مخازن سد متفاوت هستند زیرا در مخازن سد با رهاسازی حجم معینی آب می‌توان از روی منحنی‌های حجم-ارتفاع، تراز آب را به دست آورد اما در منابع آب زیرزمینی خصوصیت‌های خاک نیز در این موضوع دخیل بوده و کار را پیچیده‌تر می‌سازد. با توجه به اینکه این خصوصیات در لایه‌های مختلف خاک متفاوت است، در این مطالعه، از مقادیر متوسط حاصل از مطالعات صورت گرفته برای پارامترهای ضریب ذخیره استفاده شده است (۲). روابط قانون جیره‌بندی برای بهره‌برداری از آبخوان به شرح زیر است:

$$GE_t = \alpha \times GS_t + I_t \quad \text{if} \quad \alpha \times GS_t + I_t \leq SWA_t \quad [1]$$

$$GE_t = SWA_t + \frac{(\alpha \times GS_t + I_t - SWA_t)(D - SWA_t)}{(EWA_t - SWA_t)} \quad \text{if} \quad SWA_t \leq \alpha \times GS_t + I_t \leq EWA_t \quad [2]$$

$$GE_t = D \quad \text{if} \quad EWA_t \leq \alpha \times GS_t + I_t \leq D + \alpha \times GS_{max} \quad [3]$$

$$GE_t = \alpha \times GS_t + I_t - \alpha \times GS_{max} \quad \text{if} \quad \alpha \times GS_t + I_t \geq D + \alpha \times GS_{max} \quad [4]$$

در این روابط، در آن  $GE_t$ : حجم قابل برداشت از آبخوان در زمان  $t$ ،  $GS_t$ : حجم آبخوان در زمان  $t$ ،  $I_t$ : تغذیه آبخوان از بارش در زمان  $t$  و  $\alpha$ : ضریب برداشت مجاز است. ضریب  $\alpha$  با در نظر گرفتن این نکته که در بهره‌برداری از آبخوان برداشت

بیشترین اجرام هستند. با توجه به اینکه شتاب هر عامل دارای نسبت مستقیم با نیرو و نسبت معکوس با جرم است، شتاب عامل‌ها مطابق رابطه (۱۱) محاسبه می‌شود:

$$a_i^d(t) = \frac{F_i^d(t)}{M_{ii}(t)} \quad [11]$$

در این رابطه،  $M_{ii}(t)$ : جرم عامل  $i$  است. در گام بعد موقعیت و سرعت جدید عامل‌ها مطابق روابط (۱۲) و (۱۳) تعیین می‌شود:

$$v_i^d(t+1) = \text{rand}_i \times v_i^d(t) + a_i^d(t) \quad [12]$$

$$x_i^d(t+1) = x_i^d(t) + v_i^d(t+1) \quad [13]$$

در این الگوریتم جرم هر عامل توسط تابع ارزیابی بهینه‌سازی (رابطه ۵) محاسبه می‌شود و جرم بیشتر عامل، نشان‌دهنده مؤثر بودن و ارزش بیشتر آن عامل است. این عوامل دارای قدرت جذب بیشتری هستند و نسبت به سایر عامل‌ها آرام‌تر حرکت می‌کنند. جرم هر عامل به‌صورت زیر به‌روزرسانی می‌شود:

$$M_{ai} = M_{pi} = M_{ii} = M_i \quad i = 1, 2, \dots, N \quad [14]$$

$$m_i(t) = \frac{\text{fit}_i(t) - \text{worst}(t)}{\text{best}(t) - \text{worst}(t)} \quad [15]$$

$$M_i(t) = \frac{m_i(t)}{\sum_{j=1}^N m_j(t)} \quad [16]$$

در این روابط،  $\text{fit}_i(t)$ : نشان‌دهنده مقدار تابع ارزیابی برای عامل  $i$  در زمان  $t$ ،  $\text{best}(t)$  و  $\text{worst}(t)$ ، نماینده بهترین و بدترین عامل‌ها در جمعیت هستند و برای مسائل حداقل‌سازی تابع هدف به‌صورت روابط (۱۷) و (۱۸) تعریف می‌شوند:

$$\text{best}(t) = \min_{j \in \{1, \dots, m\}} \text{fit}_j(t) \quad [17]$$

$$\text{worst}(t) = \max_{j \in \{1, \dots, m\}} \text{fit}_j(t) \quad [18]$$

در صورت به‌کار بردن الگوریتم GSA برای مسائلی که نیاز به حداکثرسازی تابع هدف دارند، مقادیر  $\text{max}$  و  $\text{min}$  در روابط (۱۷) و (۱۸) جابه‌جا می‌شود. در شروع الگوریتم، هر عامل که خود نماینده‌ای از جواب مسئله است، در یک موقعیت اتفاقی از فضای جستجو قرار می‌گیرد و سپس موقعیت بعدی عامل‌ها با استفاده از معادلات (۱۲) و (۱۳) محاسبه می‌شود. در گام بعد پارامترهای

تصادفی است که عملکرد آن براساس قوانین گرانش و جاذبه اجرام است (۱۲). در قانون گرانش هر ذره‌ای، ذرات مجاور را با نیرویی متناسب با جرم آنها و با نسبت عکس نسبت به مجذور فاصله آنها جذب می‌کند. در این الگوریتم مجموعه‌ای از عامل‌ها که دارای اجرایی برابر با مقادیر تابع ارزیابی هستند، به‌منظور یافتن پاسخ بهینه براساس شبیه‌سازی قوانین جاذبه و حرکت استفاده می‌شوند. این عوامل یکدیگر را براساس نیروی گرانش جذب می‌کنند که این نیرو، منجر به جابه‌جایی عمومی این عوامل به سمت عامل‌ها با جرم بیشتر که نماینده پاسخ‌های بهینه‌تر هستند، می‌شود. برای سیستمی با تعداد  $N$  عامل، موقعیت هر عامل به‌عنوان نماینده‌ای از پاسخ‌ها به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$X_i = (x_i^1 \dots x_i^d \dots x_i^n), \quad i = 1, 2, \dots, N \quad [6]$$

که  $x_i^d$  موقعیت عامل  $i$ ام در جهت  $d$ ام است. عامل‌ها به‌صورت تصادفی در فضای جستجو قرار می‌گیرند و نیروی گرانش عامل  $i$  به عامل  $j$  در زمان  $t$ ، مطابق رابطه (۷) تعریف می‌شود (۱۲):

$$F_{ij}^d(t) = G(t) \frac{M_{pi}(t) \times M_{aj}(t)}{R_{ij}(t) + \epsilon} (x_j^d(t) - x_i^d(t)) \quad [7]$$

در این رابطه،  $M_{aj}(t)$ : جرم گرانشی فعال مربوط به عامل  $j$ ،  $M_{pi}(t)$ : جرم گرانشی غیرفعال برای عامل  $i$ ،  $G(t)$ : ثابت گرانش در زمان  $t$ ،  $\epsilon$ : یک مقدار ثابت کوچک و  $R_{ij}(t)$ : فاصله اقلیدسی میان عامل‌های  $i$  و  $j$  است. ثابت گرانش  $G$  تابعی از ثابت گرانش اولیه  $G_0$  است. فاصله اقلیدسی میان دو عامل  $i$  و  $j$  و نیروی کل که در جهت  $d$  بر عامل  $i$  اثر می‌کند، براساس روابط (۸)، (۹) و (۱۰) به‌دست می‌آیند:

$$G(t) = G_0 e^{-\alpha \frac{t}{T}} \quad [8]$$

$$R_{ij}(t) = \|X_i(t) - X_j(t)\|_r \quad [9]$$

$$F_i^d(t) = \sum_{j \in K_{\text{best}}, j \neq i}^N \text{rand}_j F_{ij}^d(t) \quad [10]$$

در این روابط،  $T$ : کل تکرارهای الگوریتم،  $\alpha$ : یک ثابت مثبت،  $\text{rand}_j$ : یک مقدار اتفاقی در بازه  $[0, 1]$ ،  $K_{\text{best}}$ : مجموعه‌ای از  $K$  عامل اولیه دارای بهترین مقادیر تابع ارزیابی و طبیعتاً

### اتصال مدل شبیه‌ساز به بهینه‌ساز

در این تحقیق شبیه‌سازی حوضه مبتنی بر مدل‌سازی منابع آب سطحی و زیرزمینی و نیازهای آبی کشاورزی، شرب، صنعت و محیط زیست (تالاب گاوخونی) و همچنین در نظر گرفتن اندرکنش منابع آب سطحی و زیرزمینی و انتقال آب بین حوضه‌ای، در نرم‌افزار WEAP انجام شده است. از طرفی به منظور بهینه‌سازی از الگوریتم جستجوی گرانشی که کد آن در نرم‌افزار MATLAB ارتقا داده شده، استفاده شده است، بنابراین با توجه به اینکه فرایند بهینه‌سازی، نیازمند تکرارهای زیاد و استفاده مکرر از برنامه شبیه‌ساز است، از طریق کدی که در محیط MATLAB نوشته شده است، دو برنامه به یکدیگر متصل شده‌اند. فلوچارت نحوه عملکرد الگوریتم بهینه‌سازی در اتصال مدل شبیه‌ساز - بهینه‌ساز در شکل (۲)، نمایش داده شده است. برای این منظور ابتدا برنامه بهینه‌ساز در محیط MATLAB اجرا می‌شود و در ادامه برنامه شبیه‌ساز که در این تحقیق نرم‌افزار WEAP است را فراخوانی می‌کند و پارامترهای قانون بهره‌برداری، به WEAP انتقال پیدا کرده و با استفاده از کدهایی که در محیط WEAP برای بهره‌برداری از سد و هر یک از آبخوان‌ها نوشته شده است، شبیه‌سازی انجام می‌گیرد، سپس نتایج و اطلاعات مورد نیاز حوضه جهت ارزیابی به برنامه بهینه‌ساز برمی‌گردد و این سیکل تا رسیدن به پاسخ بهینه ادامه پیدا می‌کند.

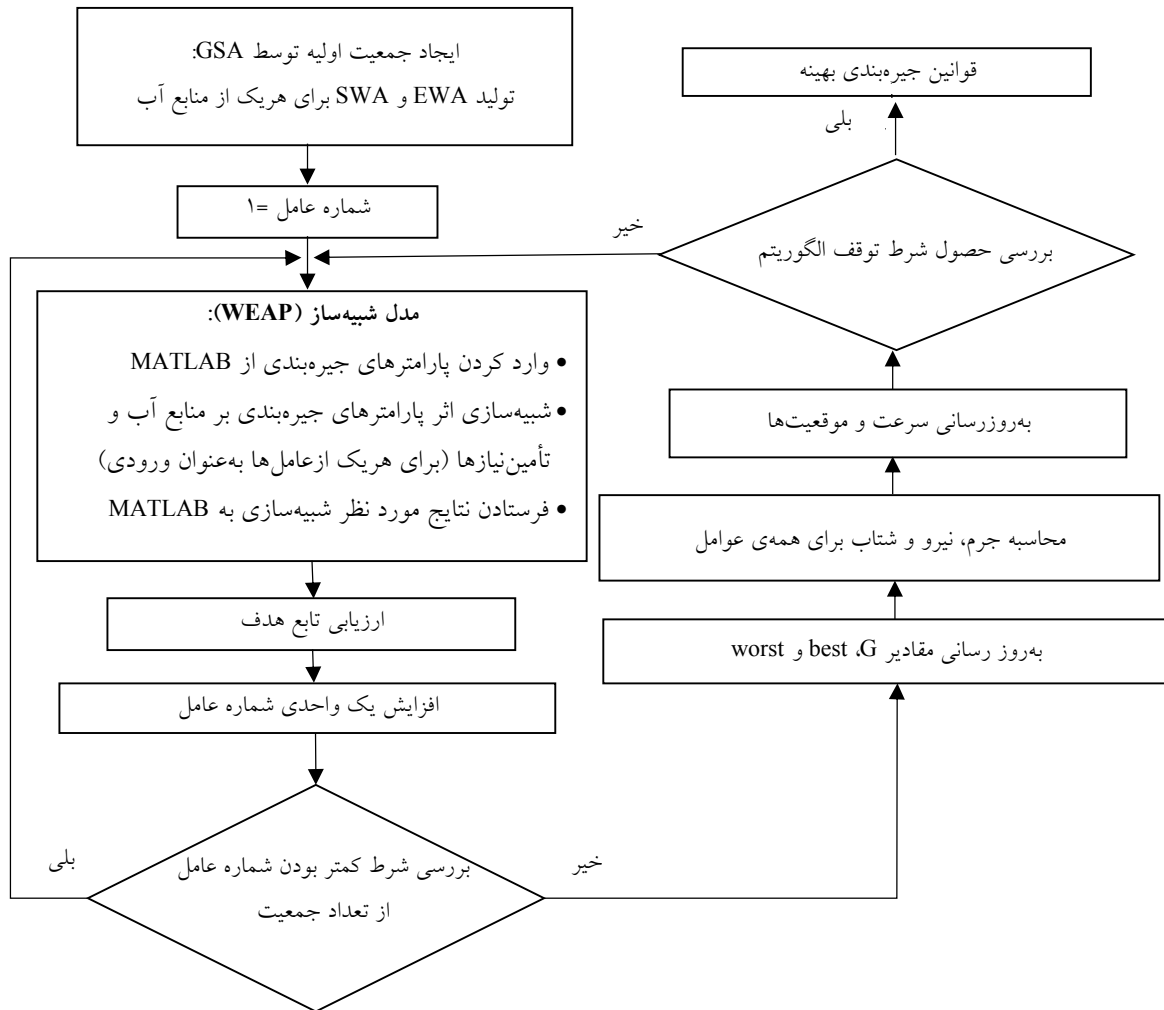
### تغییر اقلیم

با توجه به اینکه پیش‌بینی وضعیت اقلیم آینده تحت تأثیر پدیده تغییر اقلیم به صورت قطعی امکان‌پذیر نیست، برای این منظور از سناریوهای اقلیمی استفاده می‌شود که این سناریوها توسط مدل‌های اقلیمی تولید می‌شوند. مدل‌های اقلیمی ابزار برای مطالعه رفتار محلی، منطقه‌ای یا سراسری اقلیم و تغییرات آن در اثر تغییر شرایط بر روی زمین هستند. از میان مدل‌های اقلیمی، مدل‌های گردش عمومی بهترین ابزار موجود برای شبیه‌سازی وضعیت آب‌وهوایی در حال حاضر و آینده هستند. قدمت مدل‌های گردش عمومی ابتدایی به سال‌های ۱۹۷۰

دیگر الگوریتم از قبیل جرم‌ها، شتاب و ثابت گرانش براساس روابط قبلی در هرگام زمانی به‌روزرسانی می‌شود (۹ و ۱۲).

### مدل شبیه‌ساز بهینه‌ساز

نرم‌افزار WEAP در سال ۱۹۸۸، به‌عنوان یک ابزار جامع و کاربردی در مدیریت یکپارچه منابع آب برای ارزیابی وضعیت عرضه - تقاضا و همچنین بررسی سناریوها در آینده ارائه شد (۲۰). در این تحقیق برای شبیه‌سازی حوضه آبریز زاینده‌رود از مدل پایه‌ای که توسط صفوی و همکاران (۱۳) در نرم‌افزار WEAP توسعه داده شد، بهره گرفته شده است. این مدل با استفاده از داده‌ها و اطلاعات حوضه در طول ۲۱ سال دوره مطالعاتی (از سال آبی ۱۳۷۰ تا ۱۳۹۰) در دو بخش آب سطحی و زیرزمینی توسعه داده شده است. جهت واسنجی مدل آب سطحی، روش IFS (۷) بین هر دو ایستگاه هیدرومتری محاسبه شد و به‌عنوان مجموعه واسنجی، استفاده شده‌اند. معیار واسنجی آب‌های سطحی عملکرد سد زاینده‌رود در مدل در مقایسه با دوره گذشته مشاهداتی در نظر گرفته شده است. روش مذکور در بخش واسنجی مدل آب زیرزمینی نیز به‌کار برده شده است. مدل آب زیرزمینی توده‌ای (Lumped Model) با توجه به برداشت‌های مختلف از آبخوان‌ها و تخصیص آنها به مصارف متعدد در حوضه توسعه داده شده و با استفاده از IFS‌های محاسبه شده برای هر آبخوان، واسنجی شد و همچنین اندرکنش بین رودخانه زاینده‌رود و آبخوان‌ها با تلفیق مدل‌های سطحی و زیرزمینی در نظر گرفته شده است. با توجه به اینکه مدل، برای انجام مطالعات برای آینده به‌کار گرفته می‌شود علاوه‌بر واسنجی مدل، اعتبارسنجی مدل نیز باید انجام شود. بدین مفهوم که بخشی از گذشته تاریخی به‌عنوان آینده نامعلوم برای مدل تعریف شده و سپس مدل واسنجی شده براساس پیش‌بینی‌ها و داده‌های مورد نیاز، برای آن مدت اجرا می‌شود. برای این منظور از کل ۲۱ سال دوره مطالعاتی، ۱۷ سال (از سال آبی ۱۳۷۰ تا ۱۳۸۶) جهت واسنجی و چهار سال (از سال آبی ۱۳۸۷ تا ۱۳۹۰)، برای اعتبارسنجی مدل در نظر گرفته شده است.



شکل ۲. فلوجارت نحوه عملکرد مدل بهینه‌سازی در اتصال با مدل شبیه‌سازی

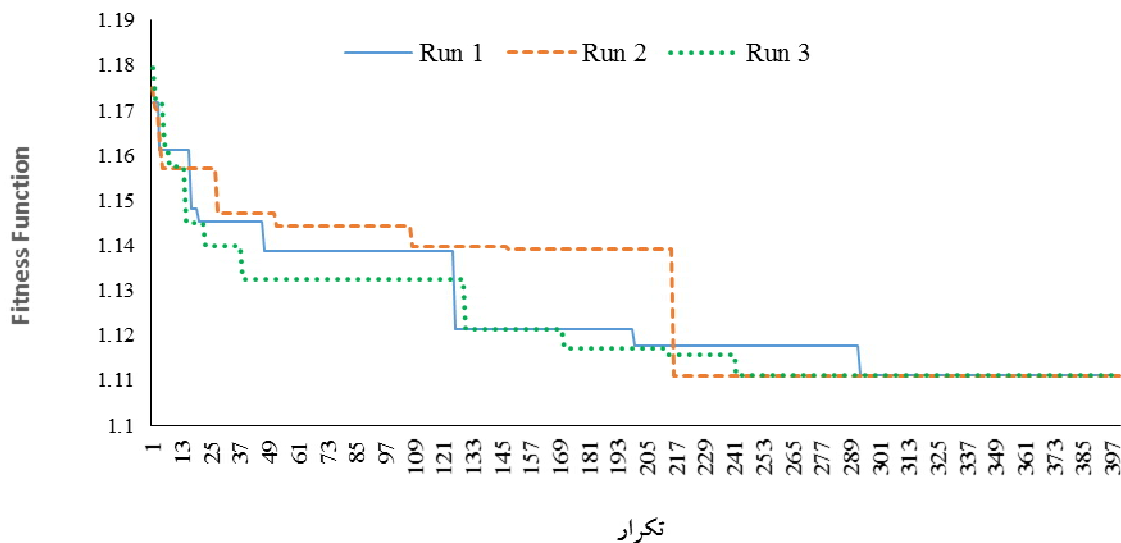
پارامترهای اقلیمی بارش و دما در حوضه زاینده‌رود برای دوره آینده نزدیک (۲۰۴۴-۲۰۱۵) استفاده شده است که در تحقیق حاضر از خروجی‌های بارش و دما برای پیش‌بینی رواناب و آورد سد زاینده‌رود در دوره آینده، بهره گرفته شده است.

### نتایج و بحث

در این تحقیق به‌منظور بررسی وضعیت حوضه در پنج سال آینده (از سال آبی ۱۳۹۵ تا ۱۳۹۹) فرضیات کلیدی به‌صورت زیر تعریف شده است: الف) نیاز صنایع و کشاورزی به اندازه پیشینه نیاز تأمین شده در گذشته که مربوط به سال آبی ۸۶-۱۳۸۵ است، در نظر گرفته شده است. ب) نیاز تالاب گاوخونی به اندازه حجم آب مورد نیاز تالاب جهت زنده ماندن پرندگان

برمی‌گردد که با مرور زمان دقیق‌تر شده‌اند. این مدل‌ها در محاسباتشان رفتار و اندرکنش سیستم‌های جریان در بیوسفر، هیدروسفر، کریوسفر، اتمسفر و ژئوسفر را در نظر می‌گیرند و در دهه‌های اخیر نه تنها وضوح مکانی این مدل‌ها افزایش یافته بلکه فرایندهای فیزیکی که در این مدل‌ها استفاده می‌شود نیز گسترش یافته و جزئیات بیشتری را در نظر می‌گیرد. در حال حاضر معتبرترین ابزار جهت تولید سناریوهای اقلیمی، مدل‌های سه بعدی جفت شده گردش عمومی جو-اقیانوس هستند که به اختصار AOGCM نامیده می‌شوند (۲۵). در این تحقیق، از نتایج مطالعات تغییر اقلیم صورت گرفته توسط صفوی و همکاران در سال ۲۰۱۶ (۱۴) استفاده شده است. در مطالعه مذکور از ۱۵ مدل گردش عمومی برای پیش‌بینی تغییرات





شکل ۳. روند همگرایی مدل بهینه‌سازی برای سه اجرای مستقل (سیاست جیره‌بندی تلفیقی)

پایین‌دست حوضه در طول دوره پایه (۹۰ - ۱۳۷۰) محاسبه شده و مقادیر آن به‌همراه ضریب مجاز بهره‌برداری و نتایج بهینه‌سازی در جدول (۱) ارائه شده است.

پس از استخراج قوانین جیره‌بندی بهینه براساس دوره پایه به‌منظور بررسی عملکرد آنها، قوانین مذکور برای بهره‌برداری از منابع آب در دوره آینده اعمال شد و نتایج حاصل با نتایج به‌دست آمده از اجرای سناریوی روند که ادامه شرایط بهره‌برداری مطابق دوره پایه برای دوره آینده است، مقایسه شده است. شکل (۴) روند تغییرات حجم آبخوان‌ها را برای هریک از سیاست‌ها، نمایش می‌دهد.

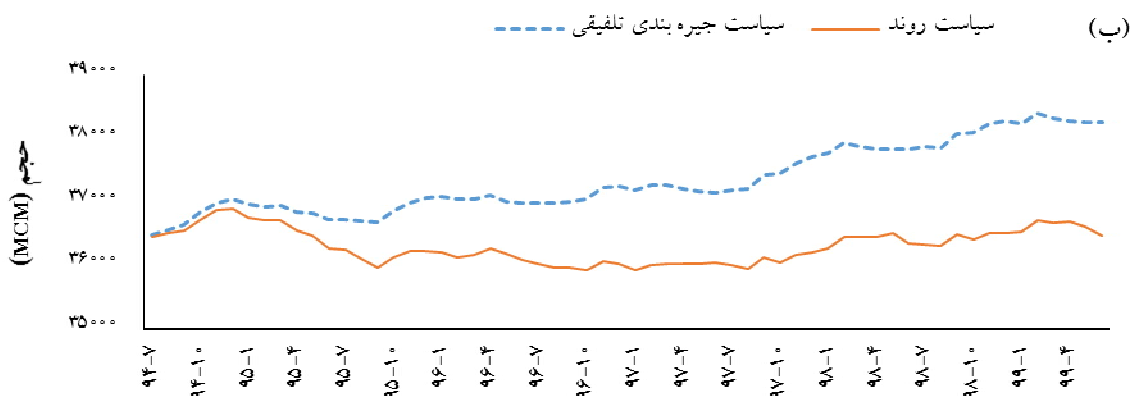
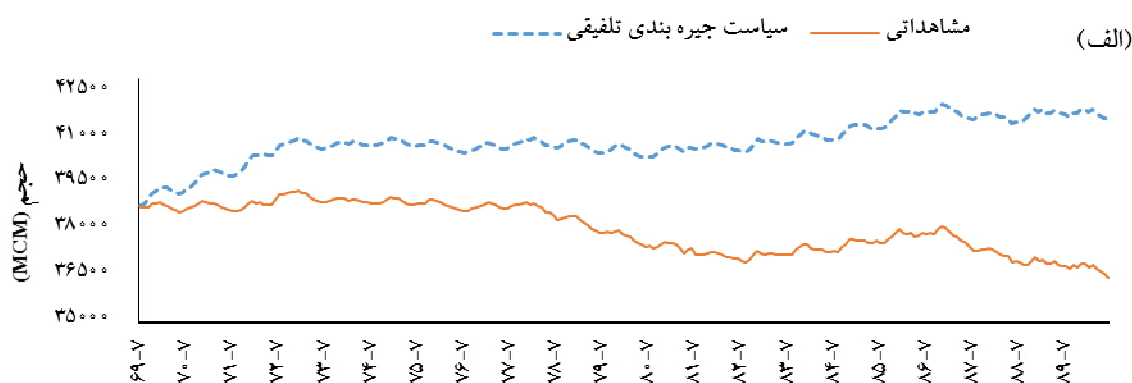
اختلاف حجم مجموع آبخوان‌ها براساس سیاست جیره‌بندی نسبت به روند مشاهداتی در دوره پایه از ابتدای دوره شبیه‌سازی شروع می‌شود و تا انتهای دوره با روند افزایشی ادامه می‌یابد و سیاست جیره‌بندی برای آب‌های زیرزمینی توانسته است با کنترل تأمین نیازها برخلاف روند تغییرات حجم آبخوان‌ها در دوره پایه و سناریوی روند، منجر به بهبود وضعیت منابع آب شود. با توجه به روند تغییرات حجم آب مخزن سد در شکل (۵) با وجود جیره‌بندی انجام شده، حجم آب در حد حجم دوره مشاهداتی باقی‌مانده است ولی در دوره آینده، عملکرد مطلوب‌تری داشته و حجم ذخیره آب، افزایش یافته است و این امر موجب بهبود

(حدود ۶۰ میلیون مترمکعب) در نظر گرفته شده است. (ج) نیاز شرب و بهداشت به اندازه بیشینه آب تأمین شده در گذشته که مربوط به سال آبی ۱۳۸۸ است، در نظر گرفته شده است. (د) اولویت تخصیص آب همچون گذشته در مدل با آب شرب بوده و بقیه نیازها با اولویت یکسان پس از آن قرار دارند. (ه) چنانچه حجم مخزن سد زاینده‌رود در یک گام زمانی، از ۲۵۰ میلیون مترمکعب کمتر شود، خروجی حداکثر مخزن سد به اندازه نیاز شرب آن گام زمانی خواهد بود. (و) با توجه به اینکه پایان دوره مطالعاتی سال آبی ۱۳۹۰ بوده و آغاز سناریوها از سال آبی ۱۳۹۵ است، حجم مخزن سد زاینده‌رود و حجم آبخوان‌ها در ابتدای سال آبی ۱۳۹۵، برابر با مقدار آنها در پایان سال آبی ۱۳۹۰ فرض شده است. روند همگرایی الگوریتم بهینه‌سازی برای سه اجرای مستقل در شکل (۳) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مدل در اجراهای دوم و سوم در تکرارهای ۲۱۶ و ۲۴۱ به جواب بهینه رسیده و در ۱۵۰ تکرار نهایی، تابع هدف بهبودی نداشته است که نشان‌دهنده همگرا شدن و روند مناسب عملکرد الگوریتم بهینه‌سازی جستجوی گرانشی است. مقدار شاخص کمبود اصلاح شده برای این حالت، برابر ۱/۱۱۱۱ به‌دست آمده است. مقادیر D برای هریک از منابع آب، براساس متوسط ماهانه نیاز آب در

جدول ۱. مقادیر پارامترهای جیره بندی و نتایج بهینه سازی

منبع آب تحت سیاست جیره بندی	ضریب برداشت مجاز ( $\alpha$ )	نیاز آبی متوسط ماهانه (D)	SWA (MCM)	EWA (MCM)	MSI	تعداد ارزیابی تابع هدف	زمان اجرا (روز)
آبخوان لنجانان	۰/۵	۳۶/۵	۲۵/۷	۲۲۶/۷			
آبخوان نجف آباد	۰/۵	۱۲۳/۵	۷۸/۱	۲۴۹/۵			
آبخوان اصفهان برخوار	۰/۵	۴۷/۱	۲۲/۲	۲۴۶۴/۴	۱/۱۱۱۱	۱۶۰۰۰	۹/۱
آبخوان کوهپایه سگری	۰/۱	۴۹/۲	۳۹/۲	۱۱۲۴/۲			
مخزن سد زاینده رود	---	۱۸۸/۶	۱۲۲/۳	۱۱۳۷/۳			

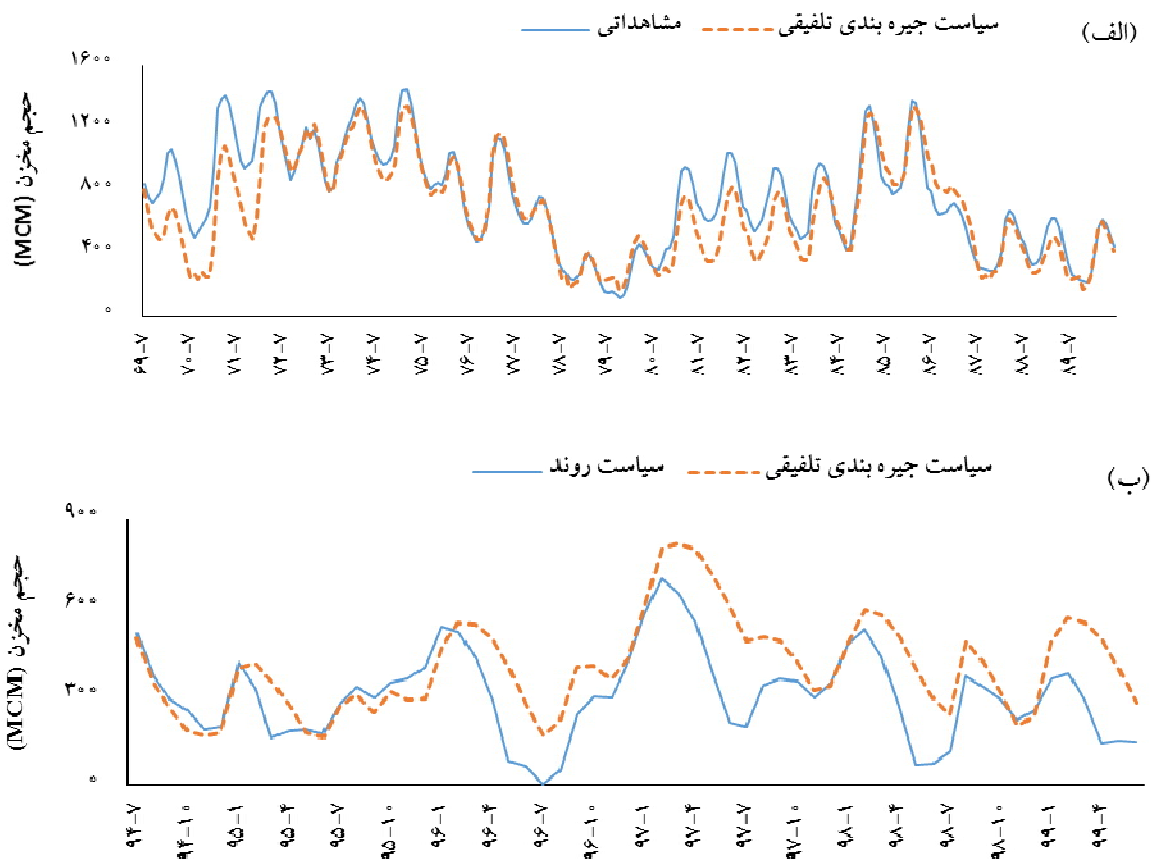
SWA: حجم آب اولیه، EWA: حجم آب نهایی



شکل ۴. روند تغییرات مجموع آبخوان‌های مورد مطالعه در دوره‌های الف) پایه و ب) آینده

۱۳) سال‌های ۷۴-۱۳۷۱ ترسالی، سال‌های ۱۳۸۵ و ۱۳۸۶ سال‌های نرمال و سال‌های ۱۳۷۹، ۱۳۸۰ و ۱۳۸۷-۹۰، خشکسالی ارزیابی شده است که این موضوع با توجه به تغییرات حجم آب در مخزن سد قابل مشاهده است. نیازهای آبی حوضه و مقادیر تأمین آنها به تفکیک چهار بخش شرب،

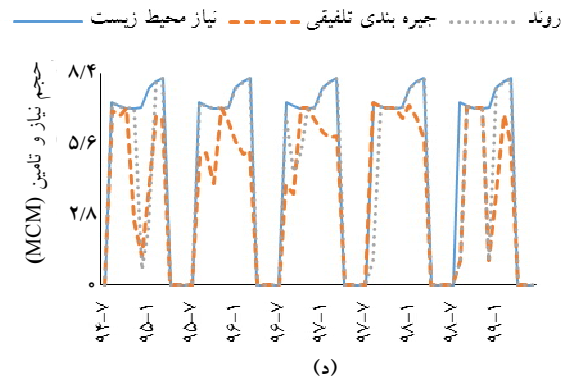
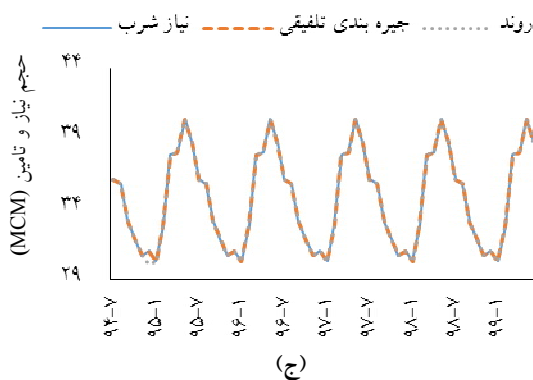
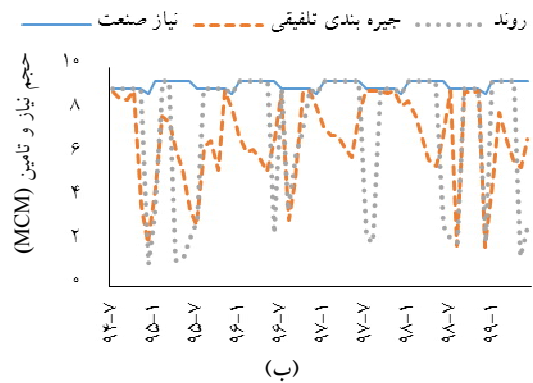
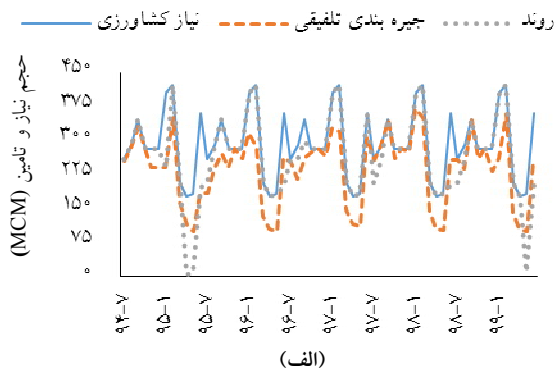
عملکرد مخزن سد در دوره آتی نسبت به سناریوی روند است. دلیل اینکه علیرغم جیره‌بندی در دوره پایه ذخیره سد افزایش نداشته است، کاهش برداشت از آبخوان‌ها و تأمین بیشتر نیازها از طریق آب سطحی بوده است. براساس مطالعات انجام شده بر روی حوضه زاینده‌رود (۳ و



شکل ۵. روند تغییرات حجم مخزن سد زاینده‌رود در دوره های الف) پایه ب) آینده

دهد، اگرچه برخی از ماه‌ها با کمبود جزئی تر مواجه شده است. جهت ارزیابی عملکرد سیستم از دو دیدگاه مصارف و منابع، از معیارهای عملکرد قابلیت اطمینان در زمان و حجم، برگشت پذیری، آسیب پذیری، حداکثر کمبود و شاخص‌های پایداری به صورت منفرد و گروهی (۱۶) در طول دوره مورد مطالعه، استفاده شده است. براساس نتایج ارائه شده در جدول (۲)، با توجه به اینکه سیاست جیره‌بندی به منظور افزایش حجم ذخیره برای دوره‌های خشکسالی محتمل آینده، تأمین نیازها را در برخی دوره‌ها کاهش می‌دهد، قابلیت اطمینان آن نسبت به سناریوی روند کمتر شده است، ولی به علت ماهیت عملکردی جیره‌بندی، آسیب پذیری سیستم در تأمین نیازها در بازه‌های مختلف تا حدی کاهش یافته است. همچنین به علت اعمال سیاست‌های جیره‌بندی، هرچند حداکثر کمبود سالانه در تأمین

صنعت، کشاورزی و محیط زیست در شکل (۶) برای دوره آینده نمایش داده شده است که قسمت عمده این نیازها مربوط به بخش کشاورزی است. براساس اطلاعات مربوط به دوره مطالعاتی ۲۱ ساله، به طور میانگین در حدود ۹۰ درصد مصارف آب مربوط به بخش کشاورزی، شش درصد مربوط به بخش شرب، ۱/۷ درصد مربوط به بخش صنعت و مابقی مربوط به محیط زیست (تالاب گاوخونی) است. البته در سال‌های اخیر سهم تالاب گاوخونی به حدود صفر رسیده و در بخش شرب و صنعت، به ترتیب حدود سه و یک درصد رشد نسبت به میانگین وجود دارد. این مقدار برای بخش کشاورزی در سال‌های آخر دوره پایه حدود دو درصد کاهش را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل (۶) مشاهده می‌شود، سیاست جیره‌بندی تلفیقی مطابق انتظار توانسته است به‌طور کلی کمبودهای با شدت بالا را کاهش



شکل ۶. نیاز آبی و تأمین نیاز در دو سناریوی جیره بندی تلفیقی و روند در دوره آینده به تفکیک برای نیازهای الف) کشاورزی، ب) صنعت، ج) شرب، د) محیط زیست (برحسب میلیون مترمکعب)

جدول ۲. معیارهای عملکرد و شاخص پایداری سیستم در تأمین نیازها

سناریوی روند				سناریوی جیره بندی تلفیقی				نیازها	معیارها	
مجموع	محیط زیست	صنعت	کشاورزی	شرب	مجموع	محیط زیست	صنعت			
۹۰/۱	۷۲/۶	۸۷/۲	۱۰۰	۷۷/۸	۶۰/۸	۷۱/۶	۱۰۰	قابلیت اطمینان در زمان (%)		
۸۸/۱	۷۸/۸	۹۰/۷	۹۹/۹	۷۵/۷	۷۳/۵	۸۱/۴	۹۹/۹	قابلیت اطمینان در حجم (%)		
۷۸/۴	۴۱/۷	۴۹/۵	۱۰۰	۵۱/۷	۳۳/۲	۳۲/۳	۷۲/۷	برگشت پذیری (%)		
۹۸/۸	۹۸/۶	۹۹/۰	۰/۰	۹۸/۵	۹۸/۰	۸۸/۱	۰/۰	آسیب پذیری (%)		
۲۰/۷	۳۳/۹	۱۹/۳	۰/۲	۳۳/۹	۳۱/۶۷	۲۳/۳	۰/۰	پیشینه کمبود (%)		
۳۷	۳۵/۶	۲۹/۰	۳۱/۰	۹۹/۹	۴۸	۳۱/۰	۲۸/۸	۴۴/۴	۹۳/۸	پایداری (%)

جدول (۳) در بخش منابع آب، نتایج مربوط به شاخص های عملکرد و شاخص پایداری منابع آب سطحی و زیرزمینی را در دو سناریوی جیره بندی تلفیقی و روند نشان می دهد.

نیازها در بخش های کشاورزی و محیط زیست تا حدودی افزایش داشته ولی شدت کمبودها در طول دوره مورد مطالعه با توجه به شاخص آسیب پذیری، کاهش یافته است.

جدول ۳. معیارهای عملکرد و شاخص پایداری سیستم در بخش منابع آب

معیارها	سناریوی جیره‌بندی تلفیقی					
	سناریوی روند			سناریوی آبخوان‌ها		
	مجموع	لنجانات	نجف‌آباد	کوهپایه سگری	اصفهان برخور	مخزن سد زاینده‌رود
قابلیت اطمینان در زمان (%)	۶۷/۹	۱۷/۷	۱۷/۷	۱۰۰	۱۰۰	۲۲/۳
قابلیت اطمینان در حجم (%)	۷۵/۹	۵۲/۱	۵۲/۱	۹۹/۸	۹۶/۶	۵۰/۴
برگشت‌پذیری (%)	۴/۴	۰/۵۸	۰/۵۸	۴۰/۰	۳۰/۹	۶/۵
آسیب‌پذیری (%)	۵۹/۶	۹۶/۴	۹۶/۴	۰/۰	۰/۱	۹۷/۸
بیشینه کمبود (%)	۳۰/۲	۶۰/۸	۶۰/۸	۰/۵	۴/۳	۶۴/۵
پایداری (%)	۵۳	۳۶/۴	۹/۴	۸۳/۱	۷۷/۸	۱۴/۱
مجموع	۵۹	۵۵/۲	۸/۹	۸۸/۴	۸۷/۵	۱۴/۱

کشاورزی از یک طرف و کاهش نزولات جوی از طرف دیگر نیاز به مدیریت صحیح منابع موجود را افزایش داده است و با توجه به این موضوع که در نواحی مرکزی و شرقی کشور منابع آب سطحی محدود است، استفاده از منابع آب زیرزمینی افزایش یافته است، بنابراین با توجه به محدودیت این منابع، شناسایی، مطالعه و مدیریت آن امری ضروری است. منابع آب زیرزمینی از منابع بسیار مهم و حیاتی در حوضه آبریز زاینده رود به شمار می آیند که از طریق چاه‌ها، قنات و چشمه‌ها بهره‌برداری می‌شوند و همان‌طور که در نتایج مشاهده می‌شود، ادامه روند کنونی با تأمین حداکثر نیاز بدون توجه به محدودیت منابع آبی می‌تواند منابع و به‌ویژه منابع آب زیرزمینی را با بحران چشمگیری مواجه کند. براساس نتایج ارائه شده، سیاست جیره‌بندی تلفیقی با قابلیت جیره‌بندی بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی، با کاهش برداشت از منابع آب در زمانی که آب موجود است و ذخیره آب برای بهبود تأمین نیازها در زمان کم‌آبی، راهکار مناسبی برای برون‌رفت از وضعیت حاضر در حوضه و بهبود وضعیت منابع آب است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، قابلیت اطمینان در زمان و حجم برای کلیه منابع آب سطحی و زیرزمینی در سیاست جیره‌بندی نسبت به سیاست روند، افزایش مطلوبی داشته است. کاهش آسیب‌پذیری و حداکثر کمبود در سناریوی جیره‌بندی تلفیقی در آبخوان‌ها (به‌جز آبخوان نجف‌آباد) بیانگر کاهش شدت نامطلوب بودن وضعیت منابع، در دوره‌های مختلف است، همچنین افزایش برگشت‌پذیری منابع آب نیز بیانگر بهبود وضعیت منابع آب در این سناریو است. از منظر پایداری سیاست جیره‌بندی منجر به افزایش پایداری منابع آب سطحی شده است و پایداری حدود ۱/۵ برابر، پایداری در سناریوی روند خواهد شد. در بخش منابع آب زیرزمینی نیز براساس شاخص پایداری گروهی، پایداری منابع آب زیرزمینی در سناریوی جیره‌بندی تلفیقی تقریباً شش در صد افزایش نسبت به سناریوی روند خواهد داشت.

## نتیجه‌گیری

در سال‌های اخیر، افزایش جمعیت و به‌تبع آن گسترش صنایع و

## منابع مورد استفاده

۱. شرکت مهندسین مشاور زاینده‌آب، ۱۳۸۷، گزارش منابع و مصارف حوضه زاینده‌رود.
۲. مهندسین مشاور آب و توسعه پایدار، ۱۳۸۹، مطالعات به‌هنگام‌سازی اطلس منابع آب محدوده‌های مطالعاتی حوضه آبریز گاوخونی، شرکت آب منطقه‌ای اصفهان.
3. Agrawala, S., M. Barlow and H. Cullen, B. Lyon. 2001. The Drought and Humanitarian Crisis in Central and Southwest Asia: A Climate Perspective, International Research Institute for Climate Prediction, Palisades, N.Y.
4. Ahmad, A., A. El-Shafie, S. F. M. Razali and Z. S. Mohamad. 2014. Reservoir optimization in water resources: a review. *Water Resources Management* 28: 3391–3405.
5. Bayazit, M. and N. E. Ünal. 1990. Effects of hedging on reservoir performance. *Water Resources Research* 26:713–719.
6. Chang, F. J., L. Chen and L. C. Chang. 2005. Optimizing the reservoir operating rule curves by genetic algorithms. *Hydrological Processes* 19:2277–2289.
7. Danner, C. L., D. C. McKinney, R. Teasley and S. Sandoval-Solis. 2006. Documentation and Testing of the WEAP Model for the Rio Grande/Bravo Basin. Texas University at Austin, TX.
8. Draper, A. J. and J. R. Lund. 2004. Optimal hedging and carryover storage value. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 130: 83–87.
9. Duman, S., U. Güvenç, Y. Sönmez, N. Yörükeren. 2012. Optimal power flow using gravitational search algorithm. *Energy Conversion and Management* 59: 86–95.
10. Hsu, N. S., K. W. Cheng. 2002. Network flow optimization model for basin-scale water supply planning. *Journal of Water Resources Planning and Management* 128: 102–112.
11. Loucks, D. P., J. R. Stedinger and H. Douglas. 1981. *Water Resource Systems Planning and Analysis*. Englewood

- Cliffs, N.J.: Prentice-Hall.
12. Rashedi, E., H. Nezamabadi-pour and S. Saryazdi. 2009. GSA: a gravitational search algorithm. *Information Sciences* 179: 2232–2248.
  13. Safavi, H. R., M. H. Golmohammadi and S. Sandoval-Solis. 2015. Expert knowledge based modeling for integrated water resources planning and management in the Zayandehrud River Basin. *Journal of Hydrology* 528: 773–789.
  14. Safavi, H. R., S. M. Sajjadi and V. Raghibi. 2017. Assessment of climate change impacts on climate variables using probabilistic ensemble modeling and trend analysis. *Theoretical and Applied Climatology* 130: 635–653.
  15. Saha, S. K., R. Kar, D. Mandal and S. P. Ghoshal. 2013. Design and simulation of FIR band pass and band stop filters using gravitational search algorithm. *Memetic Computing* 5: 311–321.
  16. Sandoval-Solis, S., D. C. McKinney and D. P. Loucks. 2011. Sustainability index for water resources planning and management. *Journal of Water Resources Planning and Management*. 137: 381–390.
  17. Shiau, J. T. 2011. Analytical optimal hedging with explicit incorporation of reservoir release and carryover storage targets. *Water Resources Research* 47(1).
  18. Shiau, J. T. and H. C. Lee. 2005. Derivation of optimal hedging rules for a water-supply reservoir through compromise programming. *Water Resources Management* 19:111–132.
  19. Shih, J., C. ReVelle. 1994. Water-supply operations during drought: continuous hedging rule. *Journal of Water Resources Planning and Management* 120: 613–629.
  20. Sieber, J. and D. Purkey. 2011. WEAP-Water Evaluation and Planning System User Guide. Stockholm Environment Institute, US Center.
  21. Srinivasan, K. and M. C. Philipose. 1996. Evaluation and selection of hedging policies using stochastic reservoir simulation. *Water Resources Management* 10: 163–188.
  22. Stedinger, J. R. 1984. The performance of LDR models for preliminary design and reservoir operation. *Water Resources Research* 20: 215–224.
  23. Taghian, M., D. Rosbjerg, A. Haghighi and H. Madsen. 2014. Optimization of conventional rule curves coupled with hedging rules for reservoir operation. *Journal of Water Resources Planning and Management* 140: 693–698.
  24. Tu, M. Y., N. S. Hsu, F. T. C. Tsai and W. W. G. Yeh. 2008. Optimization of hedging rules for reservoir operations. *Journal of Water Resources Planning and Management* 134:3–13.
  25. Wilby, R. L. and I. Harris. 2006. A framework for assessing uncertainties in climate change impacts: low-flow scenarios for the River Thames, UK. *Water Resources Research* 42(2).
  26. You, J. Y. and X. Cai. 2008. Hedging rule for reservoir operations: 1. a theoretical analysis. *Water Resources Research* 44(1).

## Extraction of Conjunctive Hedging Rules for the Operation Management of Surface and Groundwater Resources

S. M. Sajjadi<sup>1</sup>, H. R. Safavi<sup>1\*</sup> and O. B. Haddad<sup>2</sup>

(Received: December 10-2016 ; Accepted: January 8-2017)

### Abstract

In this study, the WEAP model was used for the simulation and the Gravitational Search Algorithm (GSA) was applied as the optimization model. Due to the necessity of multiple simulations in the optimization process to achieve the optimal solution, the linkage of simulation and optimization models was done in the MATLAB software environment. To evaluate the performance, hedging policies achieved in the base period were investigated for the near future period under climate change. The results showed the poor state of aquifers under the baseline scenario; also, the continuation of the current management caused the Zayandehrood river basin to experience significant problems. So management of water resources using conjunctive hedging policies could improve the situation. The use of conjunctive hedging rules showed 11 percent increase in the group sustainability index for demands, in comparison with the baseline scenario. Also, according to the group sustainability index for the resources, applying the conjunctive hedging policies could increase the sustainability of surface water and groundwater resources as much as 5.2 and 6 percent, respectively, relative to the baseline scenario. The results also indicated the better performance of conjunctive hedging policies in comparison to the baseline scenario policies.

**Keywords:** Water resources management, Climate change, Conjunctive hedging policy, GSA, Zayandehrud river basin

---

1. Department of Civil Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

2. Department of Irrigation and Reclamation Engineering, Faculty of Agricultural Engineering and Technology, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.

\*: Corresponding Author, Email: hasafavi@cc.iut.ac.ir