

مقاله پژوهشی

## مقایسه مدل برنامه‌ریزی خطی و الگوریتم ازدحام ذرات در بهینه‌سازی منحنی فرمان مخازن با اعمال سیاست جیره‌بندی (مطالعه موردی سد وشمگیر استان گلستان)

ام‌البنی محمدرضاپور<sup>۱</sup>، زهره موسوی رستگار<sup>۲</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۳/۳۱ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۱/۱۸

- ۱- دانشیار - گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان
  - ۲- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی منابع آب، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل
- \* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: [omohammadrezapour@gmail.com](mailto:omohammadrezapour@gmail.com)

### چکیده

آب ذخیره‌شده در مخازن یکی از منابع مهم تأمین آب در مناطق کم آب به‌شمار می‌رود. بنابراین بهره‌برداری بهینه از آن خصوصاً در دوران خشکسالی از اهمیت زیادی برخوردار می‌باشد. در این تحقیق به بررسی بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخزن سد وشمگیر واقع در استان گلستان با اعمال سیاست جیره‌بندی پیوسته با استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات و برنامه‌ریزی خطی پرداخته شد. تابع هدف در این تحقیق کمینه‌سازی مقدار کمبود می‌باشد. به‌منظور بررسی اثر اعمال سیاست مدیریتی جیره‌بندی، دوره خشکی سه ساله از سال ۱۳۸۰ تا ۱۳۸۲ در نظر گرفته شد. برای ارزیابی نتایج شاخص‌های ارزیابی منابع آب همچون درصد تأمین، درصد اعتمادپذیری، آسیب‌پذیری، برگشت‌پذیری، پایداری مورد استفاده قرار گرفت. میزان تغییرات حجم آستانه مخزن در هر ماه از مدل استخراج شده و منحنی قاعده جیره‌بندی ارائه گردید. ارزیابی نتایج دو مدل نشان داد شاخص پایداری مدل برنامه‌ریزی خطی (با مقدار ۰/۷۸) از الگوریتم ازدحام ذرات (با مقدار ۶/۴۱۶) بسیار بالاتر بوده و نشان از کارایی بالاتر این مدل در بهینه‌سازی سیاست جیره‌بندی در سد وشمگیر می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: اعتماد پذیری، بهره‌برداری، بهینه‌سازی، سیاست جیره‌بندی، مخزن

## Comparison of Linear Programming Model and Particle Swarm Algorithm in Optimization of Reservoir Rule Curves Using Hedging Policy (Case Study: Voshmgir Reservoir, Golestan Province)

O Mohamad Reza Pour<sup>\*1</sup>, Z Mosavi Rasteger<sup>2</sup>

Received: 2016-06-20

Accepted: 2021-02-06

1-Associated. Prof. professor, Water Engineering Department, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources.

2- M.Sc student in Water Resource Engin. Faculty. Of Water and Soil, Univ. of Zabol, Iran

\*Corresponding Author, Email: omohammadrezapour@gmail.com

### Abstract

Stored water in reservoirs is one of the main source of water supply in arid regions, so its optimal operation is of great significance, especially during water- stress periods. In this study, the optimal operation of Voshmgir Dam in Golestan province located in the north of Iran, was investigated through applying continuous hedging policy using linear programming (LP) and Particle Swarm Optimization (PSO) algorithms. The objective function was minimization of the shortage index. To assess the effects of using the hedging management policy, a 3- year drought period (2001-2004) was considered. Also, to evaluate the results, some assessment indices of water supplies such as percentages of supply, reliability, vulnerability, reversibility, and stability indicators were used. The threshold volume changes per month were extracted from each model to present the rationing yield curve. Evaluating the results of both models showed the stability index of the linear programming model (41.78) was significantly higher than that of the Particle Swarm Algorithm (6.416) indicating the higher performance of this model in optimizing the hedging policy in the Voshmgir reservoir.

**Keyword:** Hedging Policy Operation, Optimization, , Reliability, , Reservoir

### مقدمه

را از لحاظ اقتصادی، اجتماعی و فرهنگی با خود به همراه دارند از اولویت های برنامه ریزی و مدیریت منابع آب می باشد. سیاست بهره برداری شامل مجموعه ای از قوانین است که در شرایط مختلف بهره برداری، مقدار آبی را که بایستی ذخیره یا رهاسازی گردد، تعیین می نماید بلوری یزدلی (۲۰۰۸). مطالعات جامعی از روش های بهینه سازی قواعد بهره برداری از مخازن توسط لوکاس و همکاران (۱۹۸۱) ارائه شده که این مطالعات در سه دسته برنامه ریزی خطی، غیرخطی و پویا تقسیم بندی

تحلیل سامانه ها به عنوان پایه مطالعات برنامه ریزی منابع آب عبارت است از علم انتخاب بهترین مجموعه از سیاست های اجرایی و بهره برداری به طوری که اهداف کلی یک سامانه تصمیم گیری را در برگرد (حسینی و همکاران ۲۰۱۳). با توجه به نقش حیاتی آب در حیات انسان ها، بهره برداری بهینه، صرفه جویی و اصلاح الگوی مصرف امری مهم و ضروری است. حال آنکه نقش مخازن در ذخیره سازی و تأمین آب در دوره های کم آبی و خشکی نیز بسیار برجسته و شاخص می باشد. بهره برداری بهینه از مخازن بدین جهت که مقاصد چندگانه ای

استفاده کردند. نتایج نشان داد که با در نظر گرفتن قیود زنجیره‌ای تمامی اجزای برنامه به جواب شدنی شده ولی بدون در نظر گرفتن قیود زنجیره‌ای در مواردی الگوریتم قادر به یافتن جواب شدنی نبود. همچنین الگوریتم ژنتیک در یافتن جواب‌های شدنی بهینه عملکرد بهتری نسبت به دو الگوریتم دیگر داشت.

معین الدینی و همکاران (۲۰۱۸) به منظور کاهش هزینه‌های احداث شبکه لوله‌های آب جایگزین به کمک الگوریتم رقابت استعماری و سپس شبیه‌سازی شبکه با استفاده از نرم افزار و اتر جیمز پرداختند. بررسی نتایج مدل بهینه‌سازی نشان می‌دهد که الگوریتم رقابت استعماری به میزان قابل توجهی توانسته است تابع هزینه را نسبت به حالت قبل از بهینه‌سازی شبکه کاهش دهد. روزگاری و همکاران (۲۰۱۸) از دو مدل بهره‌برداری بهینه با استفاده از روشهای برنامه‌ریزی غیرخطی (حلال مینوس/گمز) و الگوریتم بهینه‌سازی حرارتی برای ارائه سیاست بهینه بهره‌برداری مخزن سد مهاباد استفاده کردند. مقادیر حاصل شده برای تابع هدف در هر دو مدل بهینه‌سازی و همچنین نتایج شاخص‌های عملکرد مخزن سد نشان داد، روش فراابتکاری شبیه‌سازی حرارتی در مقایسه با روش برنامه ریزی غیرخطی نتایج نسبتاً بهینه‌تری ارائه داده است.

کومار و ردی (۲۰۰۷) برای حل مسئله چند هدفه بهره‌برداری از مخزن روش EM-MOPSO را پیشنهاد کردند این نوع از PSO برای یافتن راه حل مناسب از یک آرشیو خارجی با اندازه متغیر استفاده می‌کند. بالتز و فونتان (۲۰۰۸) از مدل MOPSO برای حل مسائل چند هدفه استفاده نمودند و کاربرد آن را در سه جنبه بررسی کردند: ۱- حل توابع نمونه برای مقایسه بانسخه‌های دیگر MOPSO و نیز الگوریتم‌های دیگر، ۲- مسئله بهره‌برداری از مخزن چند منظوره با چهار تابع هدف و ۳- بهره‌برداری از مخزن سد با سه تابع هدف. الگوریتم

شده است. در زمینه بهره‌برداری بهینه از مخازن تحقیقات زیادی صورت گرفته که در ادامه به آنها اشاره می‌گردد. آذرافزا و همکاران (۲۰۱۲) به بهینه‌سازی مخزن رودخانه شهرچای با هدف تأمین نیاز پایین دست از جمله نیاز شرب، کشاورزی و محیط زیست با الگوریتم‌های آنیلینگ، ژنتیک (GA) و ازدحام ذرات (PSO) پرداختند. که نتایج آنها نشان داد الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات به صورت مؤثرتری نسبت به سایر روش‌ها عمل نموده است. حجتی و همکاران (۲۰۱۳) مدل بهره‌برداری مخزن با رویه جیره‌بندی و کاربرد آن را در تهیه منحنی فرمان برای سد دوستی بررسی کردند. رزاقی و همکاران (۲۰۱۳) اثر اعمال سیاست جیره‌بندی بر وضعیت تأمین مصارف سد نمود در منطقه گرمسار را بررسی و تلاش کردند به کمک برنامه‌نویسی در محیط Custom Run نرم‌افزار شبیه‌ساز MODSIM، سیاست جیره‌بندی بر مصارف مربوط به سد، در بیشترین حالت از چهار ماه قبل از بروز تنش اعمال شود. حسینی و همکاران (۲۰۱۳) تحقیقی بر روی بهره‌برداری بهینه مخزن با رویه شرایط واقعی، مطلوب و جیره‌بندی و کاربرد آن در تهیه منحنی فرمان مخازن سدهای لتیان و ماملو انجام دادند. آشفته و بزرگ حداد (۲۰۱۴) تحقیقی جهت استفاده از توابع شرطی در حوضه مدیریت مخزن در شرایط تغییر اقلیم انجام دادند. در این تحقیق، از برنامه‌ریزی ژنتیک منطقی با ادغام توابع شرطی، برای استخراج قاعده جیره‌بندی مخزن در بازه‌های بهره‌برداری در شرایط پایه و تغییر اقلیم استفاده شد. کرمی و برهانی داریانی (۲۰۱۴) تحقیقی جهت بررسی و مطالعه کاربرد روش‌های مختلف جیره‌بندی و بررسی کارایی استفاده از الگوریتم‌های فراکاوشی جستجوی هارمونی برای حل مسئله کمبود شدید تأمین آب شرب تهران انجام دادند. زینلی و همکاران (۲۰۱۵) از الگوریتم‌های ازدحام ذرات، ژنتیک و سیستم مورچگان پیوسته جهت بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخزن سد درودزن

مربوطه با یک آرشیو خارجی، جواب‌های غیر پست را ذخیره و براساس جبهه پارتو مقایسه می‌کند. یان (۲۰۰۸) دو روش  $TSP^2$  و  $WSE^3$  را با یکدیگر مقایسه کرد. در روش اول اولویت مصارف شرب و صنعت و غیره بالاتر از نیاز زیست محیطی می‌باشد. با مقایسه‌های انجام شده مشخص شد که این دو روش اثر زیادی بر قواعد جیره‌بندی ندارند. داریان (۲۰۰۳) بر روی سد مخزنی کرج با استفاده از مدل اصلاح شده‌ی جیره‌بندی عمومی شی و رول در سال ۱۹۹۴ به صورت مدل جیره‌بندی دو مرحله‌ای گسسته و با مقایسه‌ی روش آبدهی و روش بهره‌برداری استاندارد انجام شد، مشخص گردید برای دوره‌های خشک یک الی سه ساله با افزایش دوره خشکسالی در مدل، معیارهای ارزیابی همچون اعتمادپذیری و آسیب‌پذیری کاهش یافته و برگشت‌پذیری افزایش می‌باید و مدل جیره‌بندی برتری محسوسی در کاهش خسارات ناشی از خشکسالی نشان داد. لیو (۲۰۰۹) با استفاده از ترکیب عملگرهای مختلف به کار رفته در NSGA-II (مرتب کردن براساس غیرپستی، مرتب کردن براساس فاصله ازدحام و نخبه گرایی) و همچنین یک عمگر جهش در PSO، یک مدل بارش-رواناب را بهینه‌سازی کرده است. مدل بارش-روانابی که وی به کاربرد مدل NAM است که MIKE11 نیز از آن استفاده می‌کند. تابع هدف مورد استفاده در مدل وی، مجموع مربعات اختلاف دبی اوج مشاهداتی و دبی‌های پیک شبیه‌سازی شده می‌باشد که باید کمینه گردد. فلاح مهدی پور (۲۰۱۱) از MOPSO در زمینه بهره‌برداری از سامانه چند مخزنه به صورت چند هدفه به کاربردن و نتایج نشان داد که الگوریتم ارائه شده در یافتن جواب‌های پارتو بسیار موفق عمل نموده است. مارتون (۲۰۱۴) تحقیقی بر روی سد ویر در جمهوری چک بر اساس سیاست جیره‌بندی انجام دادند نتایج نشان داد که سیاست جیره‌بندی از ضریب اعتمادپذیری بالا و ضریب

آسیب‌پذیری پایینی برخوردار است. آدلویه و همکاران (۲۰۱۵) تحقیقی جهت بررسی عملکرد مخزن پونگ در هند با سیاست جیره‌بندی تحت سناریوی تغییرات آب و هوایی انجام دادند از الگوریتم ژنتیک برای بهره‌برداری بهینه از مخزن استفاده کردند. و استخراج منحنی رهاسازی برای شرایط فعلی و شرایط تغییر اقلیم (خشکسالی) برای مخزن پونگ در هند بدست آوردند. نتایج نشان داد که روش سیاست جیره‌بندی اثرات کمبود نیاز پایین دست ناشی از تغییرات آب و هوایی را تا حد ممکن از بین می‌برد. گودرزی (۲۰۱۵) تحقیقی بر روی بهره‌برداری بهینه از مخزن درودزن شیراز توسط روش‌های بهینه‌سازی و شبیه‌سازی تصادفی انجام دادند. از مدل بهینه‌سازی بر اساس سیاست جیره‌بندی توسط نرم افزار LINGO و تولید جریان مصنوعی با استفاده از روش شبیه‌سازی مونت کارلو، میزان رهاسازی بهینه را بدست آوردند. نتایج نشان داد که بهره‌برداری بهینه با سیاست جیره‌بندی یک روش کارآمد و موثر می‌باشد. اقتصاد استان گلستان به بخش کشاورزی وابستگی زیادی دارد و وقوع دوره‌های خشکسالی، تولید محصولات کشاورزی را کاهش می‌دهد و به تبع آن اقتصاد منطقه دچار بحران می‌گردد. با توجه به این که منبع اصلی تأمین آب در استان گلستان رودخانه‌ها و مخازن می‌باشند، با کاهش حجم سد و شمشگیر به علت به اتمام رسیدن عمر مفید مخزن و خشکسالی‌های اخیر نیاز به بهره‌برداری بهینه از مخزن بر اساس سیاست جیره‌بندی می‌باشد تا خسارات ناشی از کمبودهای شدید آب جهت تأمین آب مورد نیاز کشاورزی به کمینه برسد. لذا هدف از انجام این پژوهش بهره‌برداری بهینه سد و شمشگیر با سیاست جیره بندی توسط الگوریتم ازدحام ذرات یکی از روش‌های بهینه-سازی غیر خطی و برنامه‌ریزی خطی در دوران

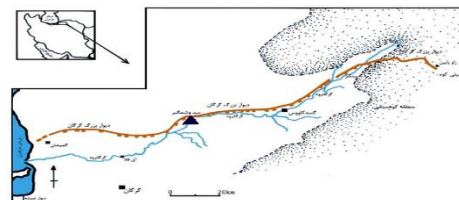
بیشینه یا کمینه بیانگر یک جمله امری قاطع می باشد. یکی از رایج ترین روشهای بهینه سازی، برنامه ریزی غیرخطی می باشد که با تبدیل مسئله به شکل تابع هدف یا قیودات غیر خطی به جستجوی جواب می پردازد. این روش در اکثر مسائل امکان دسترسی به نقطه بهینه را دارا بوده و به وسیله آن می توان به کمینه سازی توابع محدب و یا بیشینه سازی توابع مقعر پرداخت. اما گاه در مسائل پیچیده، کارایی این روش کمتر می گردد، به این دلیل از الگوریتم های فراکوشی استفاده می گردد. الگوریتم فراابتکاری ازدحام ذرات PSO<sup>۴</sup> الگوریتم ازدحام ذرات یکی از الگوریتم های بهینه سازی مبتنی بر هوش جمعی می باشد. تفاوت اساسی این روش با سایر روش های بهینه سازی در این است که هر ذره دارای یک بردار سرعت می باشد که به وسیله تغییرات آن به جستجوی پیوسته فضای تصمیم می پردازد. این بردار دارای دو جز است که شامل حرکت ذره به سمت بهترین موقعیتی که تاکنون ملاقات کرده  $P_{best}$  و همچنین بهترین موقعیتی که یک ذره در کل جمعیت به آن رسیده است،  $G_{best}$  می باشد. همانند الگوریتم ژنتیک این الگوریتم نیز ابتدا یک جمعیت تصادفی از دسته جواب های ممکن را در نظر می گیرد، سپس با ارتقا نسل، سعی در یافتن بهینه ترین جواب دارد، با این تفاوت که PSO هیچ تابع ارزیابی ای ندارد. در واقع در این الگوریتم بهترین نتایج بر اساس تجربه ی هر جز از الگوریتم و انتخاب پر تعدادترین تجربه تکرار شده، به عنوان بهترین جواب ارزیابی صورت می گیرد. از دیگر مزیت های این الگوریتم استفاده ی راحت و ساده، جستجوی سریع و عملکرد موثر این الگوریتم نسبت به GA است. مشکلی که این الگوریتم را ممکن است به چالش بکشد، همگرایی زودتر از موعد می باشد که در آن الگوریتم حتی در اولین مراحل به یک جواب همگرا می شود و در ادامه با تغییر فضای جستجو، الگوریتم توان پاسخگویی مناسب را نخواهد داشت. این مشکل به

خشکسالی بوده تا بهینه ترین شکل رهاسازی برای نیاز کشاورزی در زمان خشکسالی بدست آید.

## مواد و روش ها

### منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه رودخانه گرگان رود در استان گلستان قرار دارد. این رودخانه با طول حدود ۳۰۰ کیلومتر دارای حوضه آبریز ۱۰۲۵۰ کیلومتر مربع، ارتفاعات این حوضه از حدود ۲۹۷۷ متر واقع در زیر حوضه قره چای تا ۲۶- متر از سطح دریا متغیر می باشد. ۳ سد بوستان، گلستان و شمگیر بر روی رودخانه گرگان رود قرار گرفته است. شکل ۱ موقعیت جغرافیایی سد و شمگیر را نشان می دهد. سد و شمگیر در طول جغرافیای ۵۴ درجه و ۴۶ دقیقه شرقی و عرض ۳۷ درجه و ۱۳ دقیقه شمالی در شمال شرقی شهر آق قلا و در فاصله ۴۲ کیلومتری این شهر و در محلی به نام سنگر سوار بر روی رودخانه گرگان رود احداث گردیده است.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه و

### سد و شمگیر

برنامه ریزی خطی اغلب مدل های برنامه ریزی منابع آب دارای یک تابع هدف غیر خطی و قیدهای خطی می باشند. در صورتیکه اگر تابع هدف هم مانند قیدها، خطی باشد، آنگاه یک روش حل بسیار کارآمد برای حل این مسائل بهینه سازی خطی مفید وجود دارد که برنامه ریزی خطی می باشد. مدل کلاسیک برنامه ریزی خطی را می توان به صورت رابطه ۱ نوشت:

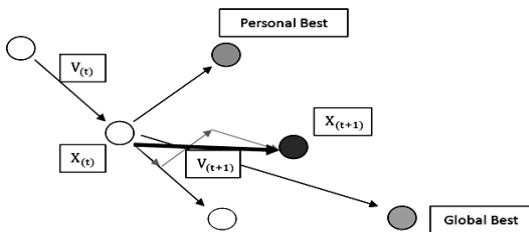
[ ۱ ]

$$\max f(x) = C^T x \quad x \geq 0 \quad \text{to} \quad AX \leq b$$

در این مدل ضرایب a,b,c اعداد قطعی هستند، علائم =, >, <, نشانگر تساوی یا نامساوی قطعی می باشند و

4-Particle swarm optimization

حرکت گروه حاصل تلاش همه اعضا می باشد که سعی مینمایند در هنگام حرکت فاصله بهینه را با همسایگان خود حفظ نمایند (کندی و ابراهات ۱۹۹۵) (شکل ۲).



شکل ۲- نحوه حرکت یک ذره از نقطه‌ای به نقطه دیگر در الگوریتم ازدحام ذرات (کندی و ابراهات ۱۹۹۵).

دلیل رکود و ایستایی مجموعه جواب‌ها و ذرات در فضای جستجو جدید و در هر تکرار ایجاد می‌شود. برای حل این مشکل یک استراتژی برای حذف ذرات تنبل و دستیابی به جواب بهتر به کار گرفتند که در آن اگر سرعت یک ذره از مقدار مشخصی کمتر می‌شد یک بردار سرعت دیگر برای آن ذره در نظر گرفته می‌شد. شاید به صورت بهتر بتوان گفت که اساس کار الگوریتم ازدحام ذرات بر این اصل استوار است که هر لحظه هر جزء مکان خود را در فضای جست و جو با توجه به بهترین مکانی که تاکنون قرار گرفته است و بهترین مکانی که در کل همسایگی‌اش وجود دارد، تنظیم می‌کند. می‌توان گفت که توصیف مدل بهره‌برداری از مخزن به روش جیره‌بندی تابع هدف و قیودات برای استفاده از یک مدل بهینه‌سازی در حل یک مسئله خاص، باید متغیر تصمیم، تابع هدف و قیود را برای مسئله مورد نظر تعریف کرد. در مسئله بهره‌برداری از مخزن سد، متغیر تصمیم ممکن است حجم ذخیره مخزن در هر دوره زمانی،  $S_t$ ، یا میزان رهاسازی از مخزن در هر دوره زمانی،  $R_t$ ، باشد (معینی و افشار ۱۳۸۷). در این تحقیق برای حل مسئله بهره‌برداری میزان رهاسازی از این مخزن به عنوان متغیر تصمیم در نظر گرفته شده است. تابع هدف کمینه‌سازی میزان اختلاف تقاضا (نیاز کشاورزی پایین‌دست) و رهاسازی یا کمبود می‌باشد. بهره‌برداری از مخزن به روش جیره‌بندی روش جیره بندی بهره برداری مخزن در زمان خشکسالی از کارایی بالایی برخوردار است. خشکی تعریفهای مختلفی دارد که یکی از آنها خشکی براساس میانگین چند ساله جریان رودخانه می باشد. این خشکی زمانی به انتها می‌رسد که میانگین چند ساله جریان رودخانه‌ای بالاتر از یک حد آستانه تعریف شده، قرارگیرد (رابطه ۲) (کمالی و همکاران ۲۰۰۰).

[۲]

سال خیلی خشک  $\frac{i-1}{S} < -1$   
سال خشک  $-1 < \frac{i-1}{S} < -0.5$

سال طبیعی  $-0.5 < \frac{i-1}{S} < 0.5$

سال تر  $0.5 < \frac{i-1}{S} < 1$

سال خیلی تر  $\frac{i-1}{S} < 1$  که

$I$  میانگین جریان سالانه دراز مدت و  $\bar{I}$  میانگین جریان هر سال و  $S$  نیز انحراف سالانه دراز مدت آبدهی می‌باشد. جهت شروع سیاست جیره‌بندی نیاز به یک حجم آستانه می‌باشد و تعیین حجم آستانه با استفاده از مجموع ذخیره و جریان ورودی به مخزن در بازه زمانی جاری می‌باشد. براساس این سیاست، در زمان اعمال کاهش نیاز، نیاز و به تبع آن خروجی مخزن تابعی از حجم ذخیره مخزن در ابتدای دوره جاری بعلاوه ورودی پیش‌بینی شده در طول دوره جاری می‌باشد. مقادیر حجم آستانه برای هر ماه از رابطه ۳ بدست می‌آید.

$$V_t = K_p \times D_t \quad [۳]$$

$V_t$  حجم آستانه،  $D_t$  نیاز کشاورزی پایین دست مخزن در ماه جاری تعریف می‌شود. و مقادیر  $K_p$  یک متغیر تصمیم‌گیری است. معادله تابع هدف در رابطه ۴ نشان داده شد.

[۴]

$$\text{Min TSD} = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^{nt} \left( \frac{R_t - D_t}{D_{\max}} \right)^2 + \text{penalty} \quad t = 1 \dots nt$$

$$\text{if } S_t < S_{\min} \quad \text{penalty} = \sum_{t=1}^T \left( \frac{S_{\min} - S_t}{S_{\max} - S_{\min}} \right)^2 + 10$$

$$\text{If } R_t < 0 \quad \text{penalty} = \sum_{t=1}^T \left( \frac{R_t}{D_t} \right)^1 + 10$$

$$\text{if } D_t < R_t \quad \text{penalty} = \sum_{t=1}^T \left( \frac{R_t - D_t}{D_t} \right)^2 + 10$$

$$Sp(t) = \begin{cases} S(t) + Q(t) - S_{max} & \text{if } S(t) + Q(t) > S_{max} \\ 0 & \text{if } S(t) + Q(t) < S_{max} \end{cases}$$

$SP_t$  حجم سرریز در ماه مورد نظر و  $S_{max}$  حجم بیشینه مخزن می‌باشد. لذا زمانی جیره‌بندی آغاز خواهد شد که حجم ذخیره به علاوه مقدار جریان ورودی (حجم آب قابل دسترس  $(AW=S+Q)$ ) کوچکتر از مقدار حجم آستانه آن ماه باشد.  $(V_t < (S_t + Q_t))$ . در غیر اینصورت کل مقدار نیاز پایین دست از مخزن تأمین خواهد شد. میزان رهاسازی در

اطمینان از صحت داده‌های خروجی، ارزیابی نتایج حاصل از اجرای الگوریتم با استفاده از شاخص‌های اعتمادپذیری، برگشت‌پذیری، آسیب‌پذیری، درصد تأمین نیاز و انعطاف‌پذیری صورت گرفته است. جهت اعمال سیاست جیره‌بندی ابتدا شاخص خشکی براساس میانگین چند ساله رودخانه برای یک دوره ۱۵ ساله محاسبه شده و سالهای خشکسالی که در آن وجود دارد بدست آمد. سه سال خشکی متوالی از سال ۱۳۸۰ تا ۱۳۸۲ به عنوان دوره مورد مطالعه انتخاب شد. ابتدا محاسبه ضرایب  $K_p$  برای هر ماه سال از طریق سعی و خطا و با توجه به حجم بیشینه و کمینه مخزن توسط الگوریتم ازدحام ذرات محاسبه شد و مقادیر حجم آستانه هر ماه از سال بر اساس حاصل ضرب ضریب  $K_p$  در نیاز کشاورزی آن ماه بدست آمد. در جدول ۱ مقادیر  $K_p$  و LP و PSO از مدل بهینه‌سازی الگوریتم حاصل از مدل‌های بهینه‌سازی در ماه‌های مختلف برای سیاست جیره‌بندی نشان داده شده است.

که در آن TSD مقدار کمبود نیاز کشاورزی،  $D(t)$  نیاز کشاورزی،  $D_{max}$  بالاترین نیاز ماهانه در طول دوره مورد نظر،  $R_t$  خروجی از مخزن در طول دوره  $t$ ،  $S_t$  حجم ذخیره در ابتدای ماه و  $S_{min}$  حجم کمینه مخزن می‌باشد. penalty میزان جریمه‌ای است که در صورت ارضا نشدن قیود، در تابع هدف اعمال می‌شود. قید مورد استفاده برای اعمال محدودیت‌های مقادیر رهاسازی در هر ماه نیز به صورت رابطه ۵ می‌باشد. [۵]

زمان جیره بندی با توجه به رابطه ۶ بدست می‌آید.

$$\text{if } V_t < (S_t + Q_t) \\ \text{Then } R_t = \frac{1}{K_p}(S_t + Q_t) \quad [6]$$

بر این اساس ضرایب جیره‌بندی  $K_p$  بهینه بر پایه حداقل-سازی شاخص کمبود نیاز بدست می‌آید. که این ضریب همان شیب خط بهره‌برداری می‌باشد.

### نتایج و بحث

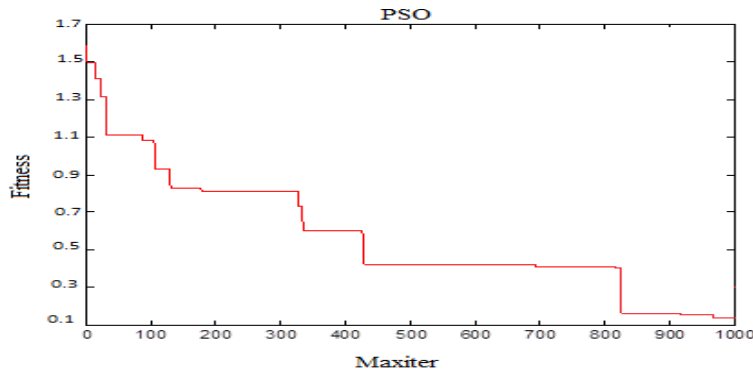
ابتدا داده‌های ۱۵ ساله مورد نیاز از منطقه مورد مطالعه و سد و شمشگیر جمع‌آوری شده‌است که داده‌های ورودی به برنامه شامل تأمین‌کننده‌های آب مورد نیاز و مصرف‌کننده‌ها می‌باشند. تأمین‌کننده‌های آب مورد نیاز شامل جریان رودخانه و حجم آب ذخیره شده در مخازن می‌باشد. جریان رودخانه و حجم ذخیره شده آب در مخازن در بخش کشاورزی، آبی‌پروری، صنعت، محیط‌زیست و تبخیر از سطح مخازن مصرف می‌شود. و سپس برنامه نویسی الگوریتم‌ها در نرم‌افزار متلب با توجه به تابع هدف که در واقع کمینه کردن میزان کمبود در نیاز کشاورزی می‌باشد صورت گرفته‌است. پس از

جدول ۱- مقادیر  $K_p$  با اعمال سیاست جیره‌بندی در الگوریتم ازدحام ذرات و برنامه‌ریزی خطی.

مدل	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند
الگوریتم ازدحام ذرات	۶	۷	۴	۷	۶	۸	۴	۶	۵	۷	۸	۵
برنامه ریزی خطی	۳	۳	۳	۵	۴	۸	۵	۳	۷	۸	۶	۳

کمترین مقدار خود دست یافته باشد و الگوریتم از عملکرد بهتری برخوردار باشد. شکل ۳ تابع همگرایی الگوریتم ازدحام ذرات را نشان می‌دهد.

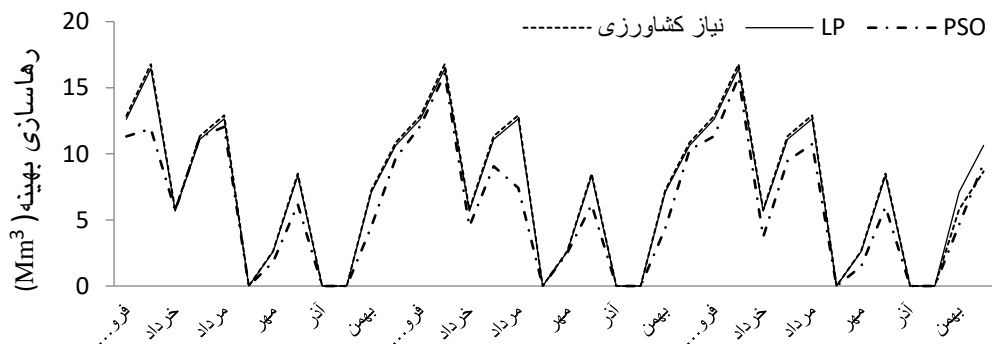
با توجه به اینکه هدف از اجرای این مدل کمینه کردن مقادیر کمبود نیاز پایین دست می‌باشد، بهینه‌ترین رهاسازی زمانی بدست می‌آید که مقدار تابع هدف به



شکل ۳- تابع همگرایی الگوریتم ازدحام ذرات.

نیاز کشاورزی پایین دست طی دوره خشکسالی برای الگوریتم ازدحام ذرات و برنامه ریزی خطی با توجه به اعمال سیاست جیره بندی نشان داده شده است.

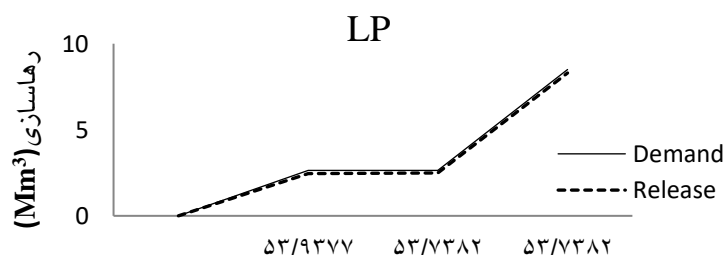
همانطور که از شکل مشخص است الگوریتم ازدحام ذرات در ۱۰۰۰ مرتبه به جواب بهینه دست پیدا کرده است. در شکل ۴ حجم آب رهاسازی از مخزن و



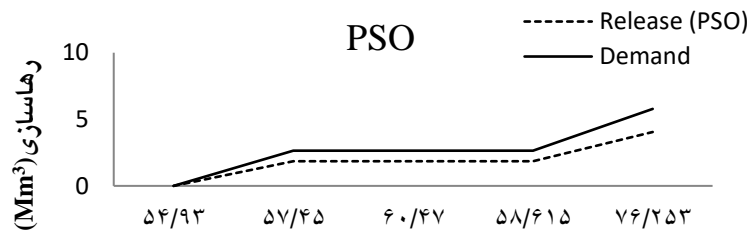
شکل ۴ حجم آب نیاز کشاورزی پایین دست و رهاسازی بهینه ارائه شده از مخزن توسط برنامه ریزی خطی و الگوریتم ازدحام ذرات.

شهریور، مهر و آبان سال ۱۳۸۱ توسط الگوریتم ازدحام ذرات و برنامه ریزی خطی ارائه گردیده است.

در شکل ۵ نتایج حاصل از استخراج قاعده جیره بندی در مقایسه با نیاز پایین دست برای ماه‌های



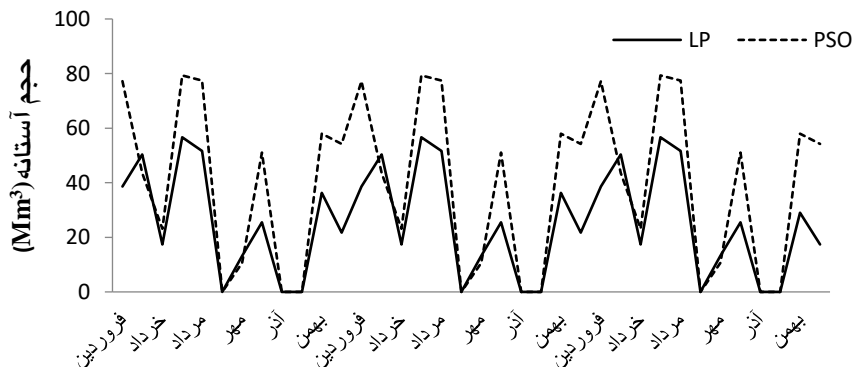




شکل ۵- نتایج استخراج قاعده جیره‌بندی توسط الگوریتم ازدحام ذرات و برنامه‌ریزی خطی.

الگوریتم ازدحام ذرات را نشان می‌دهد که نشان دهنده کمبود کمتر نسبت به الگوریتم ازدحام ذرات می‌باشد. شکل ۶ مقایسه قاعده حجم آستانه برنامه ریزی خطی و الگوریتم ازدحام ذرات را نشان می‌دهد.

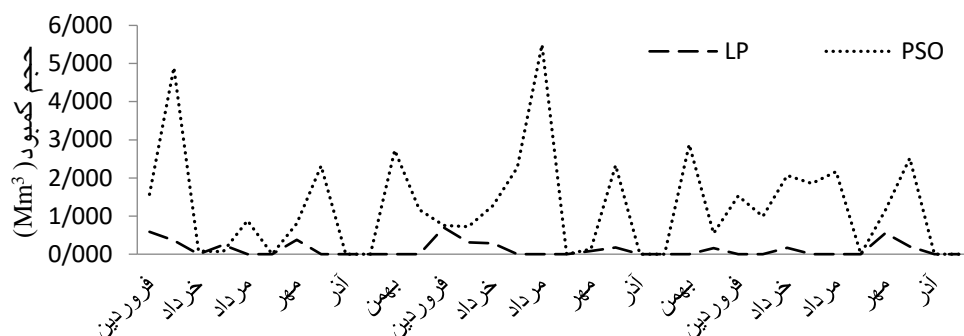
همانطور که مشاهده می‌شود شیب رهاسازی مدل برنامه‌ریزی خطی از شیب نمودار نیاز پایین دست کمتر است و اختلاف این دو نمودار نشان دهنده کمبود نیاز تأمین نشده توسط برنامه ریزی خطی می‌باشد. اما نمودار برنامه‌ریزی خطی دارای شیب بیشتری نسبت به



شکل ۶ - حجم آستانه تعیین شده توسط الگوریتم ازدحام ذرات و برنامه‌ریزی خطی.

شده است. شکل ۷ مقایسه حجم کمبود نیاز تأمین نشده توسط برنامه‌ریزی خطی و الگوریتم ازدحام ذرات با توجه به سیاست جیره‌بندی را نشان می‌دهد.

همانطور که از شکل ۶ مشخص است الگوریتم ازدحام ذرات نسبت به برنامه‌ریزی خطی مقادیر حجم آستانه بالاتری در نظر گرفته است و به همین دلیل است که مقادیر نیاز پایین دست توسط این الگوریتم کمتر تأمین



شکل ۷- مقایسه حجم کمبود نیاز تأمین نشده الگوریتم ازدحام ذرات و برنامه‌ریزی خطی.

ارزیابی مدل‌ها از شاخص‌های اعتمادپذیری، پایداری، آسیب‌پذیری، برگشت‌پذیری و درصد تأمین نیاز استفاده شده است که این مقادیر برای دو مدل در جدول ۲ مربوط به سیاست جیره‌بندی آورده شده است.

با توجه به شکل ۷ حجم آب تأمین نشده توسط الگوریتم ازدحام ذرات از برنامه‌ریزی خطی بیشتر می‌باشد. که این مساله به خاطر وجود حجم آستانه بالاتر در الگوریتم ازدحام ذرات دور از انتظار نبود. به منظور

جدول ۲- شاخص‌های ارزیابی مدل‌های مورد استفاده.

PSO	LP	شاخص ارزیابی
۰/۰۷۶۹	۰/۴	برگشت‌پذیری
۹۹/۲۷	۹۹/۸	اعتمادپذیری
۰/۸۴	۰/۹۶	درصد تأمین
۶/۴۱۶	۴۱/۷۸	پایداری
۰/۱۵۹	۰/۰۷۵	آسیب‌پذیری

شاخص آسیب‌پذیری، بیانگر شدت کمبود در طی دوره شکست می‌باشد. مقدار شاخص آسیب‌پذیری را به صورت میانگین کمبودهای بیشینه‌ای که در هر سری شکست پیوسته اتفاق افتاده است می‌گویند. هر چه این شاخص کمتر باشد سامانه کمتر دچار آسیب شده است. شاخص آسیب‌پذیری برنامه‌ریزی خطی با مقدار ۰/۰۷۵ خیلی کمتر از الگوریتم ازدحام ذرات با مقدار ۰/۱۵۹ می‌باشد. ترکیب سه شاخص اعتمادپذیری، آسیب‌پذیری و سرعت برگشت‌پذیری را پایداری می‌گویند که معیار مناسبی برای مقایسه گزینه‌های مختلف سیاست‌های بهره‌برداری سامانه‌های ذخیره در مرحله طراحی و برآورد الگوی بهره‌برداری بهینه سامانه‌های در حال بهره‌برداری می‌باشد. در مقایسه گزینه‌ها، گزینه‌ای که

شاخص اعتمادپذیری نشان‌دهنده میزان تأمین اهداف سیستم می‌باشد. در سامانه مورد بحث هدف، کمینه کردن کمبود در نیاز کشاورزی پایین دست می‌باشد. برنامه ریزی خطی به احتمال ۹۹/۸٪، سامانه توانایی تأمین مصارف پایین دست را دارد. شاخص درصد تأمین نیاز نیز هر چقدر بیشتر باشد الگوریتم از عملکرد بهتری برخوردار است و مصارف کمتر دچار تنش می‌شود. برای ارزیابی یک سامانه ذخیره در برگشت از حالت شکست به حالت بهره‌برداری نرمال، از شاخص سرعت برگشت‌پذیری استفاده می‌شود. هر چه این مقدار بیشتر باشد احتمال ماندن در شرایط شکست کمتر می‌باشد. مدل برنامه ریزی خطی احتمال ماندن در شرایط شکست کمتری نسبت به الگوریتم ازدحام ذرات دارد.

وقوع تنش‌های با شدت زیاد کاهش یافته و احتمال تامین مصارف در حد آستانه مورد نظر و بالاتر از این حد، افزایش یافته است. این بدان معناست که با اعمال سیاست جیره‌بندی در ماه‌های پر آب (فصل زمستان)، نه تنها حجمی از آب به منظور تعدیل تنش‌های موجود در ماه‌های دچار تنش و کم آب در همان سال ذخیره می‌گردد، بلکه اعمال جیره‌بندی در ماه‌های دچار تنش (فصل تابستان) باعث افزایش حجم مخزن در فصل پاییز سال بعد نیز می‌گردد. با توجه به نتایج ارائه شده در این تحقیق می‌توان اینگونه نتیجه‌گیری نمود که در بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخزن با سیاست جیره‌بندی الگوریتم ازدحام ذرات بخاطر ماهیت خود الگوریتم، مقادیر حجم آستانه بالاتری نسبت به برنامه‌ریزی خطی در نظر گرفته و باعث شده است که درصد تامین نیاز توسط این الگوریتم کاهش یابد.

بیشترین شاخص پایداری را داشته باشد به عنوان گزینه بهینه معرفی می‌شود. شاخص پایداری مدل برنامه ریزی خطی به مقدار  $41/78$  از الگوریتم ازدحام ذرات با مقدار  $6/416$  بیشتر است.

### نتیجه‌گیری کلی

در این تحقیق به بهینه‌سازی رهاسازی نیاز کشاورزی از مخزن سد و شمشگیر با اعمال سیاست جیره‌بندی با الگوریتم ازدحام ذرات و برنامه‌ریزی خطی در یک دوره ۳ ساله خشکسالی متوالی پرداخته شده است. علت انتخاب نیاز بخش کشاورزی در میان تمام مصارف پایین‌دست سد و شمشگیر، حجم بالای نیاز این بخش در مقایسه با سایر مصارف این سد بوده است. با انتخاب این نیاز، می‌توان اثر تنش‌ها را در بحرانی‌ترین حالات بررسی نمود. در شرایط جیره‌بندی به دلیل آینده‌نگری موجود در ماهیت سیاست جیره‌بندی، احتمال

### سپاسگزاری

بدین وسیله نویسنده مسئول مقاله، از دانشگاه زابل که این پژوهش با حمایت مالی این دانشگاه با کد پژوهانه UOZ-GR-9618

18 صورت گرفته است کمال تشکر و سپاسگزاری را دارد.

### منابع مورد استفاده

- Ashofte PS and Bozorg Haddad O, 2015. Use of multi-conditional functions in the field of reservoir management and under climate change. Iranian Journal of Soil and Water Research 45 (4): 397-404. (In Persian)
- Azarafza H, Rezaei H, Behmanesh J and Besharat S, 2012. Results comparison of employing PSO, GA and SA algorithms in optimizing reservoir operation (Case Study: Shaharchai Dam, Urmia, Iran). Journal of Water and Soil 26(5):1101-1108. (In Persian)
- karami F, Dariane A, 2014. Comparison of hedging policies in reservoir management under drought condition. Journal of Water and Wastewater 25(3):76-85. (In Persian)
- Fallahmehdipour A, Blouri yazdli Y and Bozorghadad O, 2008. Dez dam command curve extraction with hedging policy. 4th National Congress of Civil Engineering. May 6. University of Tehran. P.8.
- Hogatti E, Faridhoseini e, Alizadeh A and Entezari M. 2013. Operation model of the reservoir with hedging policy and its application in preparing the rule curve of Dosti Dam. 7th National Congress of Civil Engineers, May 17-18. Faculty of Engineering, Sistan and Baluchestan University, Zahedan. Iran.
- Hoseini H, Nagafi jilani E and Zakeri Niri M. 2013. Optimal model of reservoir operation with real, optimal and hedging conditions and its application in steering curve of Latian and Mamlou dam reservoirs. The 5th Iranian Water Resources Management Conference, February 29-30. Iranian Association of Water Resources Science and Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran.
- Razaghi P, Babazadeh H, Shorian M, 2013. Development of a hedging policy from multi-purpose reservoir under water resources limitation condition using MODSIM 8.1. Journal of Water and Soil Resources Conservation 3(2): 12-22. (In Persian)

- Zeynali MJ, MohammadRezaPour O, Frooghi F, 2015. Evaluation of particle swarm, genetic and continuous ant colony algorithms in optimal operation of doroodzan dam reservoir. *Journal of Water and Soil Sciences - University of Tabriz* 25(3): 27-38. (In Persian)
- Kamali N and Borhani E, 2000. Model of Shahid Madani dam reservoir operation in drought conditions. First National Conference on Measures to Combat Drought and Drought. March 9 and 10. Hsahid Bahonar University of Kerman, Kerman.
- Moeini R and Afshar MH, 2008. Optimal Operation of the dam reservoir using the Max-Minimum Ant algorithm (MMAS). *Sharif Scientific Research Journal* 46:85 - 93. (In Persian)
- Adeloye AJ, Soundharajan BS, Ojha CSP and Remesan R, 2015. Effect of hedging-integrated rule curves on the performance of the pong reservoir (India) during scenario-neutral climate change Perturbations. *Water Resource Management* 29: 3387–3407.
- Baltar AM and Fontane DG, 2008. Use of multi-objective particle swarm optimization in water resources management. *Journal of Water Resources Planning and Management* 134(3): 265-275.
- Darlane AB, 2003. Reservoir operation during drought. *International Journal of Engineering* 16(3): 209-216.
- Fallah-Mehdipour E, Bozorg Haddad O and Mariño M A, 2011. MOPSO algorithm and its application in multipurpose multi-reservoir operations. *Journal of Hydro-informatics* 14(4): 794-811.
- Goodarzi E, Ziaei M and Hossinipour E, 2015. Optimization analysis in hydrosystem engineering, topics in safety, risk, reliability and quality. Springer International Publishing Switzerland.
- Kennedy J, Eberhart R, 1995 .Particle swarm optimization. Pp.1942- 1948. Proceeding of International Conference on Neural Networks .Perth ,Australia ,1995 IEEE, Piscataway.
- Kumar DN and Reddy J, 2007. Multipurpose reservoir operation using particle swarm optimization. *Journal of Water Resources Planning and Management* 133(3): 192-201.
- Liu Y, 2009. Automatic calibration of a rainfall-runoff model using a fast and elitist multi-objective particle swarm algorithm. *Expert Systems with Applications* 36(14): 9533-9538.
- Louks DP, Stedinger JR and Haith DA, 1981. *Water Resource Systems Planning and Analysis*. Prentice-Hall, New Jersey.Englewood Cliffs, N. J.
- Marion D, Kapelan Z, 2014. Risk and reliability analysis of open reservoir water shortages using optimization. *Procedia Engineering* 89: 1478-1485.
- Yan Sh.X, 2008. Firefly algorithm for multi-model optimization. *Stochastic Algorithms: Foundations and Applications*. Volume 5792 of the series Lecture Notes in Computer Science Pp. 169-178.
- Rouzegari NY, Hassanzadeh Y and Sattari MT, 2018. Optimization of reservoir operational policy using simulated annealing algorithm (Case Study: Mahabad reservoir). *Water and Soil Sciences – University of Tabriz*. 28(1): 173-185. (In Persian)
- Moinaldini1 E, Mohamad Reza Pour O and Zeynali MJ, 2018. Application of imperialist competitive algorithm in optimizations of pipe diameters for urban water network (Case study: Shahr-dari town, Kerman). *Water and Soil Sciences – University of Tabriz*. 28(2): 29-41. (In Persian)