



دانشگاه گیلان، دانشکده مهندسی عمران

نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک  
جلد بیست و ششم، شماره پنجم، ۱۳۹۸  
۱۶۵-۱۷۹

<http://jwsc.gau.ac.ir>

DOI: 10.22069/jwsc.2020.16276.3162

## ارزیابی الگوریتم‌های ژنتیک و ازدحام ذرات با تکیه بر رویکرد مرتب‌سازی نامغلوب برای بهینه‌سازی چندهدفه بهره‌برداری از مخازن

آیدا شبانی بهلولی<sup>۱</sup> و \* مهدی دستورانی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند، آستادیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند  
تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۱/۱۷؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۷/۰۲

### چکیده

**سابقه و هدف:** مسائل بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخازن سدها از جمله مسائل مهم در علوم آب می‌باشد که تاکنون با انواع روش‌های بهینه‌سازی مورد بررسی قرار گرفته است. در سال‌های اخیر تعداد زیادی از الگوریتم‌های تکاملی چندهدفه معرفی شده است. از جمله این الگوریتم‌ها می‌توان به نسخه دوم الگوریتم ژنتیک چندهدفه با مرتب‌سازی نامغلوب اشاره نمود که در سال ۲۰۰۲ توسط دب و همکاران معرفی شد.

**مواد و روش‌ها:** در این پژوهش نوآوری و هدف استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات با رویکرد مرتب‌سازی نامغلوب و بررسی کارایی این الگوریتم در بحث بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخزن سد است. در نهایت نتایج حاصل از آن با الگوریتم NSGA-II مقایسه گردد تا در نهایت به یک سیاست مدیریتی پایدار در سیستم‌های منابع آب و به‌ویژه بهره‌برداری از مخزن سد رسید. در این پژوهش نسخه چندهدفه الگوریتم ژنتیک و ازدحام ذرات با به‌کارگیری مفاهیمی هم‌چون غلبه و فاصله ازدحامی مورد بررسی قرار گرفتند و برای حل مسأله بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخزن سد ملاصدرا واقع در استان فارس به‌کار برده شدند. مسأله بهینه‌سازی با دو هدف تعریف گردید. یکی از آنها کمینه‌سازی اختلاف نیاز کشاورزی از رهاسازی بوده است و تابع هدف دوم بیشینه‌سازی حجم ذخیره سیلاب تعریف گردید. دو الگوریتم با توجه معیارهایی مانند زمان اجرا، تعداد راه‌حل‌هایی که در جبهه پارتو قرار می‌گیرند، معیار فاصله و معیار عملکرد مقایسه شدند.

**یافته‌ها:** نتایج پژوهش نشان داد که هر دو الگوریتم توانایی حل این مسأله بهینه‌سازی را دارا می‌باشند. هم‌چنین نتایج نشان داد که هر یک از الگوریتم‌ها در برخی از معیارها، عملکرد مناسب‌تری نسبت به دیگر داشته است. نتایج بررسی زمان اجرای هر یک از الگوریتم‌ها نشان داد که سرعت اجرای الگوریتم چندهدفه ازدحام ذرات (NSPSO-II) به مراتب بیشتر از الگوریتم چندهدفه ژنتیک (NSGA-II) است به‌طوری‌که میانگین زمان اجرای الگوریتم NSGA-II در تعداد جمعیت ۵۰ با مقدار ۲۱/۳۸ ثانیه تقریباً سه برابر میانگین زمان اجرا در الگوریتم NSPSO-II با مقدار ۶/۳۱

\* مسئول مکاتبه: [mdastourani@birjand.ac.ir](mailto:mdastourani@birjand.ac.ir)

ثانیه است. با توجه به معیار عملکرد نیز الگوریتم NSPSO-II عملکرد مناسب‌تری نسبت به الگوریتم NSGA-II داشته است؛ اما از سوی دیگر با توجه به معیار تعداد راه‌حل‌های واقع در جبهه پارتو الگوریتم NSGA-II تعداد راه‌حل‌های بسیار بیش‌تری را در جبهه پارتو یافته است و به همین دلیل فاصله در الگوریتم NSGA-II کم‌تر از NSPSO-II بوده است.

**نتیجه‌گیری:** الگوریتم NSGA-II تعداد راه‌حل‌های بسیار بیش‌تری را در جبهه بهینه پارتو یافته است و راه‌حل‌های واقع در جبهه بهینه پارتو به‌طور مناسبی جبهه پارتو را برخلاف الگوریتم NSPSO پوشش دادند. هم‌چنین مقایسه راه‌حل‌های واقع در جبهه بهینه پارتو نشان داد که الگوریتم NSPSO-II در راستای بیشینه‌سازی تابع هدف دوم گام برداشته درحالی‌که الگوریتم NSGA-II در راستای کمینه‌سازی تابع هدف اول حرکت کرده است.

**واژه‌های کلیدی:** الگوریتم فراابتکاری، سد ملامصدرا، کنترل سیلاب، معیار عملکرد

### مقدمه

در سال‌های اخیر تعداد زیادی از الگوریتم‌های تکاملی چندهدفه معرفی شده است. از جمله این الگوریتم‌ها می‌توان به نسخه دوم الگوریتم ژنتیک چندهدفه با رتبه‌بندی نامغلوب اشاره نمود که در سال ۲۰۰۲ توسط دب و همکاران معرفی شد (۱). در الگوریتم NSGA-II ایرادهای الگوریتم‌های کلاسیک تکاملی چندهدفه که از طبقه‌بندی غیرپست و پارامتر تسهیم استفاده می‌کنند، برطرف شده است. ایرادهای آن‌ها عبارت‌اند از: ۱- پیچیدگی محاسباتی آن‌ها که از درجه  $mN^3$  است که در آن  $m$  تعداد اهداف و  $N$  اندازه جمعیت است. به‌عبارت‌دیگر با افزایش جمعیت و انجام مرتب‌سازی برای هر نسل، هزینه محاسباتی الگوریتم‌های کلاسیک تکاملی به‌شدت افزایش خواهد یافت. ۲- در رسیدن به جواب، از روش نخبه‌گرایی استفاده نمی‌شود. روش نخبه‌گرایی بیانگر حفظ افراد خوب نسل قبل هنگام ایجاد نسل جدید پس از اعمال عملگرهای الگوریتم ژنتیک است و امکان همگرایی به پاسخ بهینه را سریع‌تر نموده و کارایی جست‌وجو را ارتقا می‌بخشد. با توجه به کارایی الگوریتم NSGA-II از این الگوریتم در حل مسأله بهینه‌سازی

سیستم‌های منابع آب نیز بسیار استفاده شده است که در ادامه به برخی از پژوهش‌ها انجام‌گرفته در این زمینه اشاره می‌گردد.

محمدرضاپور (۲۰۱۶) الگوریتم‌های رقابت استعماری و جامعه مورچگان را در بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخزن سد درودزن مقایسه نموده و در این پژوهش از رویکرد اعمال قیود زنجیره‌ای استفاده نمود. نتایج این پژوهش نشان داد که اعمال قیود زنجیره‌ای برای تعیین موقعیت اولیه کشورها به نحو مؤثری کارایی الگوریتم را بالا می‌برد و باعث می‌شود حتی عملکرد آن به‌مراتب بهتر از الگوریتم جامعه مورچگان شود (۷). محمدرضاپور (۲۰۱۶) به بهینه‌سازی قطر لوله‌های شبکه آب‌رسانی شهری پرداخته و در پژوهش خود از الگوریتم ژنتیک سریع آشفته و کرم شب‌تاب در مدل Relopt استفاده نمود. نتایج این پژوهش نشان داد که الگوریتم‌های بهینه‌سازی مورد استفاده در این مطالعه توانسته‌اند به کاهش چشمگیر هزینه‌های پروژه دست یابند (۸). نوذری و وفایی (۲۰۱۸) به بررسی دقت روش پویایی سیستم در شبیه‌سازی و بهینه‌سازی منحنی فرمان مخزن سد پرداختند و نتایج این پژوهش نشان داد مدل پویایی سیستم نسبت به الگوریتم PSO

استفاده گردید. نتایج پژوهش نشان داد که سیاست پیشنهادی برای حل مسأله بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخزن سد به‌ویژه در دوره‌های خشک از عملکرد مناسبی برخوردار است (۳). سرینی‌واسان و کومار (۲۰۱۸) یک چارچوب شبیه‌سازی-بهینه‌سازی با دو هدف متضاد یعنی کمینه‌سازی نرخ کمبود و کمینه‌سازی حداکثر کمبود را ارائه نمودند. در این پژوهش از الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب استفاده گردید و نتایج نشان داده در نظر گرفتن یک شرایط اولیه برای جست‌وجوی تصادفی در ابتدای امر موجب بهبود عملکرد الگوریتم در دست‌یابی به راه‌حل‌های بهینه پارتو می‌شود (۱۲).

با توجه به بررسی پژوهش‌های صورت گرفته، هدف از این پژوهش استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات با رویکرد مرتب‌سازی نامغلوب است و در آن از مفاهیمی هم‌چون مرتب‌سازی نامغلوب و فاصله ازدحامی استفاده می‌شود و در نهایت کارایی این الگوریتم در بحث بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخزن سد مورد بررسی قرار خواهد گرفت. در نهایت نتایج حاصل از آن با الگوریتم NSGA-II و با توجه برخی معیارهای عملکرد مقایسه گردد.

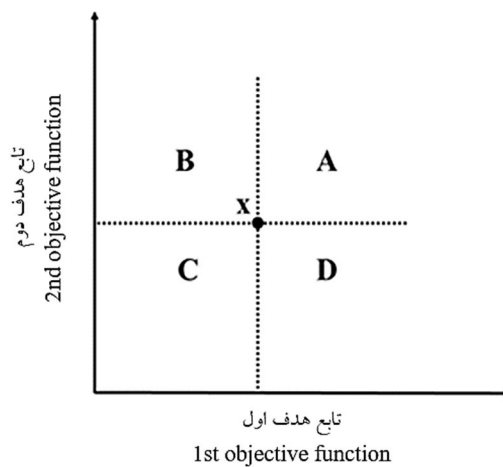
### مواد و روش‌ها

در بسیاری از مقالات در خصوص ویژگی‌ها، پارامترها و نحوه کارکرد الگوریتم ازدحام ذرات و ژنتیک بحث شده و بنابراین برای بررسی نحوه به‌کارگیری این الگوریتم‌ها در حل مسأله بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخزن سد، می‌توان به پژوهش‌های زینلی و همکاران (۲۰۱۵) و محمدرضاپور و زینلی (۲۰۱۸) مراجعه نمود (۹ و ۱۳). برای تبیین نسخه چندهدفه این دو الگوریتم نیز از مفاهیم غلبه و فاصله ازدحامی، مرتب‌سازی نامغلوب و نحوه مرتب‌سازی اعضا استفاده می‌گردد.

از دقت بیشتری در بهینه‌سازی منحنی فرمان سد برخوردار است (۱۰). فرحناکیان و همکاران (۲۰۱۸) به بهره‌برداری بهینه از سیستم تک‌مخزن سد دز با استفاده از الگوریتم جست‌وجوی ذرات باردار را مورد بررسی قرار دادند و نتایج پژوهش بیانگر کارایی بالای الگوریتم در حل مسائل حوزه مهندسی آب بود (۲). مازندرانی‌زاده و همکاران (۲۰۱۹) به ارزیابی الگوریتم‌های بهینه‌سازی GA و PSO در بهره‌برداری از سیستم‌های چندمخزن حوضه گرگان‌رود پرداختند (۵). مازندرانی‌زاده و همکاران (۲۰۱۹) مسئله بهینه‌سازی چندهدفه بهره‌برداری از مخازن سد برق‌آبی بر اساس الگوی بازارهای پرداخت بر اساس پیشنهاد پرداخته و از روش شبکه عصبی مصنوعی برای پیش‌بینی قیمت روزانه انرژی در ساعت‌های اوج استفاده شده و نتایج حاصل از آن برای بهینه‌سازی چندهدفه بهره‌برداری از مخزن سد کارون ۵ به‌کار گرفته شده است. هدف‌های در نظر گرفته‌شده شامل دو هدف بیشینه‌سازی درآمد سالانه و بیشینه‌سازی حداقل انرژی تولیدی روزانه بوده است (۶). لی (۲۰۰۳) نسخه چندهدفه الگوریتم ازدحام ذرات بر مبنای مرتب‌سازی نامغلوب ذرات را ارائه دادند. در این پژوهش به‌جای استفاده از یک مقایسه ساده بین بهترین جایی که یک ذره تاکنون یافته است و بهترین جایی که کل جمعیت یافته‌اند. از یک ثابت فشار استفاده می‌شود که ذرات را به سمت جبهه بهینه پارتو حرکت می‌دهد. با اتخاذ این روش و اعمال آن بر روی توابع آزمون شناخته‌شده (سری ZDT) نتایج نشان داد که الگوریتم حاضر توانایی رقابت با الگوریتم NSGA-II را دارا است (۴). گائو و همکاران (۲۰۱۳) از الگوریتم NSPSO-II در حل مسأله بهینه‌سازی بهره‌برداری از یک سیستم چندمخزنی استفاده نمودند. در این پژوهش به‌منظور حفظ تنوع راه‌حل‌های غالب از مکانیسم چند جمعیتی

تابع هدف اول بهتر از  $x$  هستند اما از نظر تابع هدف دوم از  $x$  بدترند. همین توجه را می‌توان برای مجموعه نقاط ناحیه  $D$  نیز به کار برد. بنابراین مفهوم غلبه را می‌توان به این صورت بیان نمود که اعضای ناحیه  $A$  نقاطی هستند که حداقل از یک نظر بدتر از  $x$  هستند و از هیچ نظری بهتر از  $x$  نیستند. همچنین  $x$  از هیچ نظر از اعضای  $C$  بهتر نبوده و حداقل از یک نظر از اعضای ناحیه  $C$  بدتر است؛ بنابراین غلبه نقطه  $x$  بر نقطه مفروض  $y$  (که می‌تواند در هر یک از نواحی  $A, B, C$  و  $D$  قرار داشته باشد) بدین معنی است که باید  $y$  از هیچ نظر بهتر از  $x$  نباشد (یعنی  $\forall i : x_i \leq y_i$ ) و  $x$  حداقل از یک نظر اکیداً بهتر از  $y$  باشد (یعنی،  $\exists i_0 : x_{i_0} < y_{i_0}$ ).

**مفهوم غلبه:** در بهینه‌سازی یک مسأله چندهدفه با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری، یک عضو از جمعیت به‌ازای هر تابع هدف مقداری را محاسبه می‌نماید. به‌طور مثال در یک مسأله دو هدفه مطابق شکل ۱ با عبور دو خط متعامد از نقطه  $x$  (که نشان‌دهنده محل تلاقی دو مقدار تابع هدف است) چهار ناحیه  $A, B, C, D$  به وجود می‌آید. حال با فرض کمینه شدن دو تابع هدف، ملاحظه می‌گردد که نقطه  $x$  نسبت به هر نقطه‌ای که در ناحیه  $A$  قرار گیرد بهتر است. یا به‌عبارت‌دیگر نقطه  $x$  بر تمام نقاط موجود در ناحیه  $A$  غلبه می‌کند و از طرف دیگر نقطه  $x$  به‌وسیله همه نقاط موجود در ناحیه  $C$  غلبه می‌شود؛ اما در خصوص دو ناحیه  $B$  و  $D$  نمی‌توان اظهارنظر نمود زیرا اعضای که در ناحیه  $B$  قرار دارند از نظر



شکل ۱- مفهوم غلبه.

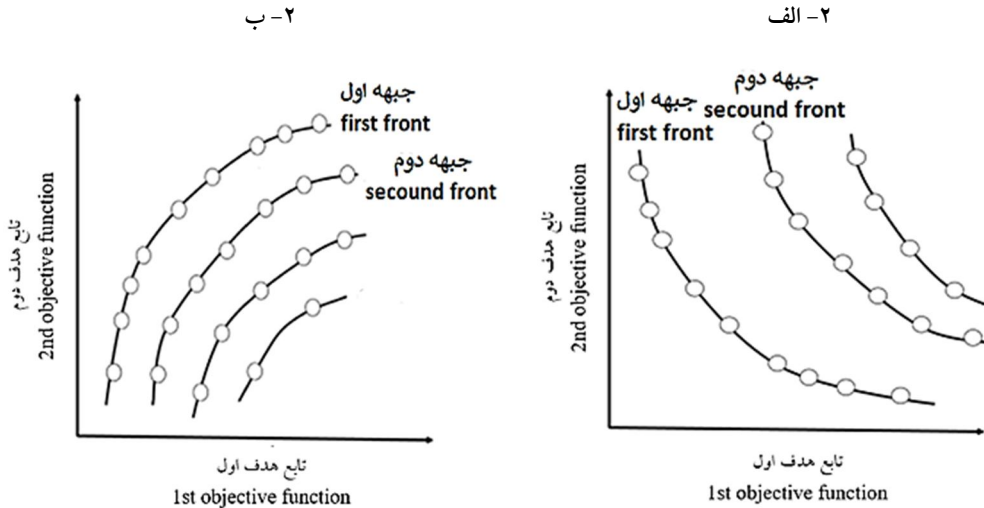
Figure 1. Concept of Dominance.

(۲-ب) نیز یک مسأله را نشان می‌دهد که تابع هدف اول آن (محور افقی) باید کمینه شده و تابع هدف دوم آن (محور عمودی) باید بیشینه شود. هر جبهه با حرف لاتین  $F$  نشان داده شده و اندیس مربوط به آن شماره جبهه را نشان می‌دهد. بدیهی است جواب‌هایی که در جبهه اول قرار دارند ( $F_1$ ) جواب‌های

**مرتب‌سازی نامغلوب:** مرتب‌سازی نامغلوب بدین معنی است که اعضای جمعیت با هم مقایسه می‌گردند و هر عضوی که بر اعضای دیگر جمعیت غلبه کرده باشد جزو بهترین اعضای جمعیت است. شکل (۲-الف) یک مسأله دو هدفه را نشان می‌دهد که در آن هر دو تابع هدف باید کمینه شوند و شکل

قرار می‌گیرند (اعضای  $F_1$ ) دارای این ویژگی هستند که اعضای دیگر جمعیت از هیچ نظر از اعضای  $F_1$  بهتر نبوده و اعضای  $F_1$  حداقل از یک نظر از اعضای دیگر جمعیت اکیداً بهترند.

مرغوب‌تری نسبت به جبهه دوم ( $F_2$ ) هستند و جواب‌هایی که در جبهه دوم ( $F_2$ ) قرار دارند از جواب‌هایی که در جبهه سوم ( $F_3$ ) قرار دارند بهترند و به همین ترتیب تا آخر. پس اعضای در جبهه اول



شکل ۲- جبهه‌ها در مسأله دوهدفه. الف) کمینه‌سازی هر دو تابع هدف. ب) کمینه‌سازی تابع هدف اول و بیشینه‌سازی تابع هدف دوم.  
 Figure 2. Fronts in two objective problems. a) Minimizing two objective functions. b) Minimizing the first objective function and maximizing the second objective function.

$$d_i = d_i^1 + d_i^2 \quad (1)$$

که در آن،  $d_i^1$  و  $d_i^2$  از رابطه‌های ۲ و ۳ قابل محاسبه است.

$$d_i^1 = \frac{|f_1^{i+1} - f_1^{i-1}|}{|f_1^{\max} - f_1^{\min}|} \quad (2)$$

$$d_i^2 = \frac{|f_2^{i+1} - f_2^{i-1}|}{|f_2^{\max} - f_2^{\min}|} \quad (3)$$

که در آن،  $f_1^{i+1}$  مقدار تابع هدف اول در نقطه  $i+1$  و  $f_1^{i-1}$  مقدار تابع هدف اول در نقطه  $i-1$  است. هم‌چنین  $f_1^{\max}$  بیش‌ترین مقدار برای تابع هدف اول و  $f_1^{\min}$  کم‌ترین مقدار برای تابع هدف اول است به همین ترتیب که در آن  $f_2^{i+1}$  مقدار تابع هدف دوم

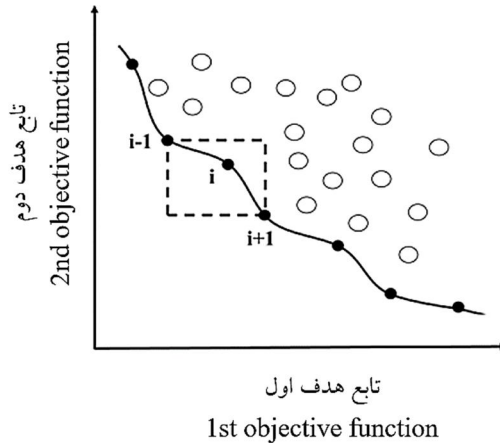
مفهوم فاصله ازدحامی: تمامی نقاطی که در یک جبهه واقع شده‌اند چون توسط هیچ نقطه دیگری مغلوب نشده‌اند بنابراین از این لحاظ همگی در یک رتبه قرار می‌گیرند؛ اما با وارد شدن مفهوم فاصله ازدحامی این نقاط نیز قابل رتبه‌بندی هستند. به این صورت که در یک جبهه نقاطی که در فاصله ازدحامی آن‌ها بیش‌تر است یعنی در محل خلوت‌تری قرار گرفته‌اند از اولویت بالاتری برخوردار هستند. برای بیان مفهوم فاصله ازدحامی شکل ۳ آورده شده است. همان‌طور که در این شکل ملاحظه می‌گردد محور افقی تابع هدف اول و محور عمودی تابع هدف دوم را نشان می‌دهد که هر دو باید کمینه شوند و منحنی ترسیم شده نیز جبهه اول ( $F_1$ ) را نشان می‌دهد. حال برای نقطه مفروض  $i$  در بین نقاط واقع در این جبهه با توجه به دو نقطه کناری آن ( $i-1$  و  $i+1$ ) فاصله ازدحامی از رابطه ۱ محاسبه می‌شود.

$$d_i = d_i^1 + d_i^2 + \dots + d_i^m = \sum_{j=1}^m d_i^j \quad (۴)$$

که در آن،

$$d_i^j = \frac{|f_j^{i+1} - f_j^{i-1}|}{|f_j^{\max} - f_j^{\min}|} \quad (۵)$$

در نقطه  $i+1$  و  $f_2^{i-1}$  مقدار تابع هدف دوم در نقطه  $i-1$  است. هم‌چنین بیش‌ترین مقدار برای تابع هدف دوم و  $f_2^{\min}$  کم‌ترین مقدار برای تابع هدف دوم است و به‌طورکلی فاصله ازدحامی را می‌توان به‌صورت رابطه ۴ نوشت.

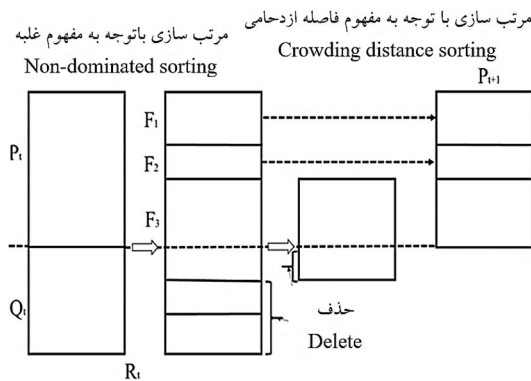


شکل ۳- فاصله ازدحامی در جبهه اول.

Figure 3. Crowding distance in first front.

نسل بعد همه اعضای جبهه سوم نمی‌توانند حضور داشته باشند بنابراین باید اعضایی که در یک جبهه قرار می‌گیرند نیز مرتب شده و پس از آن به اندازه‌ای که جمعیت تکرار بعد را تکمیل می‌کند از آن برداشت. این مرتب‌سازی در خصوص اعضایی که در یک جبهه قرار دارند با توجه به فاصله ازدحامی صورت می‌گیرد.

نحوه مرتب‌سازی اعضا: همان‌طور که گفته شد اعضای جمعیتی که در جبهه اول قرار دارند مطمئناً از اعضای جبهه دوم بهترند و اعضای جبهه دوم از اعضای جبهه سوم بهترند و به همین ترتیب تا آخر؛ اما با توجه به شکل ۴ ملاحظه می‌گردد که اعضای جبهه اول و دوم برای نسل بعد انتخاب شده‌اند اما برای انتخاب بقیه

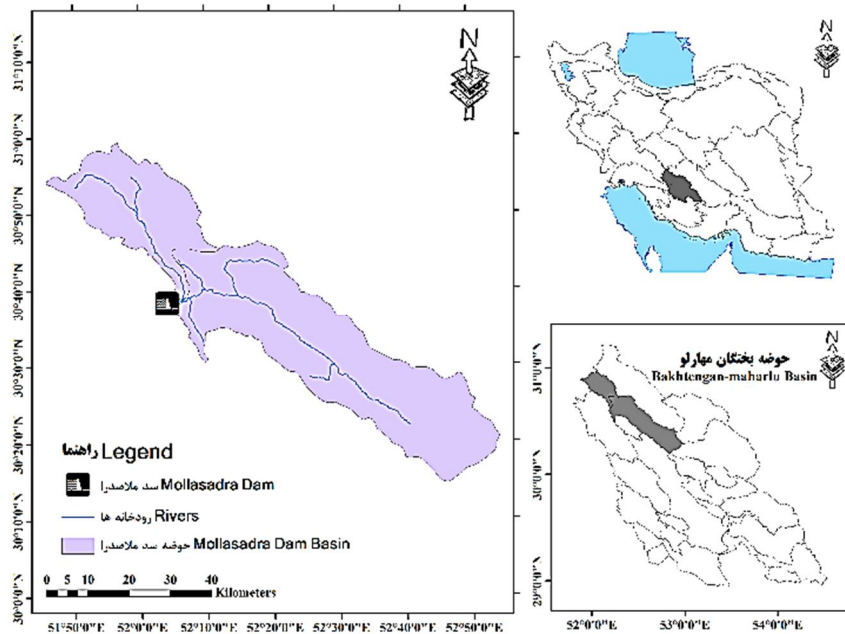


شکل ۴- انتخاب اعضا برای ایجاد نسل بعدی.

Figure 4. Choose members to create next generation.

کیلومتر به دریاچه بختگان می‌ریزد. سد ملاصدرا با مختصات طول جغرافیایی مختصات  $52^{\circ} 5' 18''$  شرقی و عرض جغرافیایی  $30^{\circ} 38' 34''$  شمالی بر روی رودخانه کر و در حدود ۶۰ کیلومتری بالادست سد دروزن احداث شده است. متوسط آورد رودخانه کر به این سد ۳۹۰ میلیون مترمکعب در سال است (شکل ۵).

منطقه مورد مطالعه: حوضه سد ملاصدرا جزئی از حوضه فرعی طشک بختگان مهارلو بوده و مساحت آن حدود ۲۲۵۰ کیلومترمربع است. رودخانه کر از رودهای مهم و پرآب استان فارس به حساب می‌آید. این رودخانه از به هم پیوستن رودخانه تنگ براق و شورشیرین در بالادست روستای آب ماهی تشکیل می‌شود و پس از طی مسیر طولانی قریب به ۲۰۰



شکل ۵- موقعیت سد ملاصدرا و رودخانه کر.

Figure 5. The location mollasadra dam and Kor River.

تابع هدف دوم نیز بیشینه‌سازی حجم ذخیره سیلاب است به صورت رابطه ۷ بیان می‌شود.

$$\text{Maximize } f = \sum_{t=1}^n C_t * (S_n - S_t) \quad (7)$$

که در آن،  $S_t$  حجم مخزن در ابتدای ماه  $t$ ،  $S_n$  حجم مخزن در تراز نرمال است.  $C_t$  نیز ضریب ثابت سیلاب در ماه  $t$  که در ماه‌های سیلابی برابر یک و در سایر ماه‌ها برابر صفر است.

قیود مسأله، قیود مربوط به بیلان آب در مخزن که مهم‌ترین آن‌ها رابطه پیوستگی است که بر اساس رابطه ۸ استوار است:

تابع هدف و قیود: در این مسأله که یک دوره ۵ ساله بهره‌برداری از مخزن سد ملاصدرا را مورد بررسی قرار می‌دهد دو تابع هدف وجود دارد که یکی از آن آن‌ها باید کمینه گردد و دیگری باید بیشینه شود. تابع هدف اول، مطابق با رابطه ۶ به صورت مجموع توان دوم اختلاف نیاز کشاورزی ( $De_t$ ) از رهاسازی ( $x_t$ ) تعریف می‌شود و برای نرمال‌سازی مقادیر تابع بر حداکثر تقاضا ( $De_{Max}$ ) تقسیم شده است.

$$\text{Minimize } f = \sum_{t=1}^n \left( \frac{De_t - x_t}{De_{Max}} \right)^2 \quad (6)$$

کارایی و سنجش الگوریتم‌ها چندین معیار وجود دارد که در ادامه به آن‌ها اشاره می‌گردد. در الگوریتم‌های چندهدفه مشخصاتی مانند مجاورت مناسب مجموعه جواب‌ها با مجموعه جواب اصلی، توزیع مناسب آن‌ها و تعداد اعضای مجموعه جواب‌ها، از جمله مواردی هستند که تعیین مجموعه جواب برتر با توجه به آن‌ها امکان‌پذیر می‌گردد.

اسکات (۱۹۹۵) از معیار فاصله‌گذاری برای اندازه‌گیری فاصله بین نقاط مجموعه جواب به دست آمده استفاده کرد (۱۱). بدین ترتیب چنانچه جواب به دست آمده دارای N نقطه باشد، فاصله نقطه  $\bar{a}_m$  این مجموعه از سایر نقاط مجموعه با استفاده از رابطه ۱۲ به دست می‌آید:

$$d_i = \min_j \left( \sum_k^M |f_k^i(x) - f_k^j(x)| \right) \quad (12)$$

$$i = 1, 2, \dots, N \quad j = 1, 2, \dots, N - 1$$

که در آن،  $f_k^j(x)$  نشان دهنده هدف kام نقطه  $\bar{a}_m$  و M تعداد اهداف است. اندیس j شمارنده نقاط مجموعه به دست آمده است که فاصله آن‌ها از نقطه  $\bar{a}_m$  همین مجموعه محاسبه می‌شود. بدین ترتیب  $d_i$  برابر است با حداقل فاصله بین نقطه  $\bar{a}_m$  و سایر نقاط. سپس با استفاده از رابطه ۱۳ معیار S که در واقع فاصله است محاسبه می‌گردد:

$$S = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^P (\bar{d} - d_i)^2} \quad (13)$$

که در آن، P تعداد اعضای مجموعه به دست آمده (جبهه نامغلوب)،  $\bar{d}$  میانگین فواصلی که با استفاده از رابطه ۱۲ محاسبه شده است، هرچه معیار فاصله کم‌تر باشد توزیع جواب به دست آمده مناسب‌تر است.

$$S_t + \Delta S_t = S_{t+1} \quad (8)$$

که در آن،  $S_t$  حجم ابتدای دوره t و  $S_{t+1}$  حجم انتهایی دوره t است؛  $\Delta S_t$  نیز تغییرات حجم در طول دوره t بوده که به صورت رابطه ۹ در نظر گرفته می‌شود:

$$\Delta S_t = I_t + P_t - E_t - O_{1t} - O_{2t} \quad (9)$$

که در آن،  $I_t$  ورودی به مخزن در بازه زمانی t،  $P_t$  میزان بارش بر روی سطح دریاچه سد،  $E_t$  میزان تبخیر از سطح آب دریاچه مخزن است؛  $O_{1t}$  میزان خروجی زیست‌محیطی است و  $O_{2t}$  میزان خروجی کشاورزی از مخزن است. در این مسأله میزان نشت، سرریز ناچیز است.

قیود دیگری که در این مسأله بهینه‌سازی وجود دارد قیود مربوط به میزان رهاسازی از مخزن است که رهاسازی در هر دوره نباید از حدودی کم‌تر یا بیش‌تر باشد به عبارت دیگر همان‌طور که در رابطه‌های ۱۰ و ۱۱ مشخص است، باید رهاسازی در هر بازه  $(x_t)$  باید بین میزان رهاسازی مینیمم ( $x_{\min}$ ) و میزان رهاسازی ماکزیمم ( $x_{\max}$ ) باشد و از طرفی میزان حجم مخزن در هر دوره ( $S_t$ ) نیز باید بین حجم مینیمم ( $S_{\min}$ ) و حجم ماکزیمم مخزن ( $S_{\max}$ ) باشد.

$$x_{\min} \leq x_t \leq x_{\max} \quad (10)$$

$$S_{\min} \leq S_t \leq S_{\max} \quad (11)$$

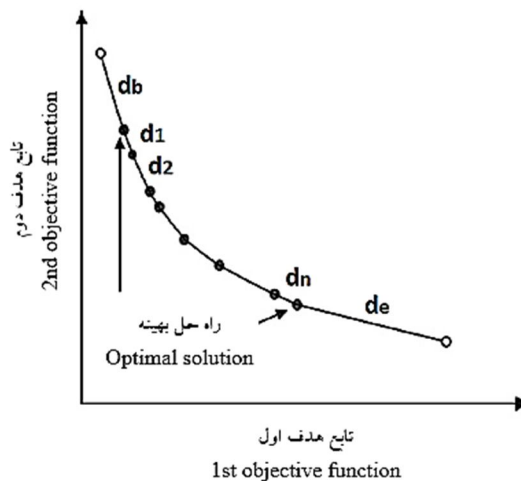
**معیارهای مقایسه مجموعه جواب‌ها:** در الگوریتم‌های تک‌هدفه بهینه‌سازی، مقایسه جواب‌ها از طریق تابع هدف صورت می‌گیرد، اما در الگوریتم‌های چندهدفه، چون تعداد جواب‌های ارائه شده بیش از یک عدد است استفاده از تابع هدف به‌عنوان معیار مقایسه منطقی نیست. بر این اساس برای بررسی



که در آن، پارامتر  $d_b$  و  $d_e$  فاصله بین نقاط ابتدایی و انتهایی نقاط جبهه پارتوهای نامغلوب باشند.  $n$  تعداد نقاط جبهه و  $\bar{d}$  متوسط فاصله بین نقاط است. یک توزیع مناسب، زمانی به دست می‌آید که  $d_i$  معادل با  $d_b=d_e=0$  باشد؛ بنابراین بهترین مقدار برای معیار تصمیم‌گیری با توجه به توضیحات داده شده معادل با صفر است. در شکل ۶ پارامترهای معیار تصمیم‌گیری نشان داده شده است.

معیار پراکندگی تعریف شده در واقع مقدار پخش شدن جواب‌های به دست آمده را بیان می‌کند، در اینجا هدف رسیدن به جبهه پارتویی است که تمام ناحیه بهینه پارتو را پوشش دهند. با محاسبه فاصله بین نقاط جبهه پارتو نامغلوب و اندازه‌گیری متوسط آن‌ها معیار تصمیم‌گیری از رابطه ۱۴ تعیین می‌گردد:

$$DM = \frac{d_b + d_e + \sum_{i=1}^{n-1} |d_i - \bar{d}|}{d_b + d_e + (n-1)\bar{d}} \quad (14)$$



شکل ۶- پارامترهای شاخص معیار تصمیم‌گیری.

Figure 6. Index parameter of decision making criteria.

و  $0/9$  است. پارامترهای  $C_1$  و  $C_2$  که پارامترهای شناختی و اجتماعی می‌باشند برابر با هم و برابر  $1/5$  در نظر گرفته شد. هم‌چنین پارامتر  $\beta$  که تعیین‌کننده میزان فشار انتخاب است برابر با  $1/5$  در نظر گرفته شد. با توجه به این مقادیر در نظر گرفته شده برای دو الگوریتم، نتایج بررسی زمان اجرای هر یک از الگوریتم‌ها نشان داد که سرعت اجرای الگوریتم چندهدفه ازدحام ذرات (NSPSO-II) به مراتب بیشتر از الگوریتم چندهدفه ژنتیک (NSGA-II) است به طوری که میانگین زمان اجرای الگوریتم NSGA-II در تعداد جمعیت  $50$  با مقدار  $21/3897$

### نتایج و بحث

در این پژوهش نسخه چندهدفه الگوریتم ژنتیک و ازدحام با به کارگیری مفاهیمی هم‌چون غلبه و فاصله ازدحامی مورد بررسی قرار گرفتند و برای حل مسأله بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخزن سد ملاصدرا واقع در استان فارس به کار برده شدند. در این پژوهش برای الگوریتم NSGA-II،  $70$  درصد اعضای جمعیت می‌توانند در نقش والدین ظاهر شوند و درصد جهش برابر با  $40$  درصد در نظر گرفته شد. هم‌چنین در الگوریتم NSPSO-II کمینه و بیشینه اینرسی وزنی (محدوده مقدار متغیر  $w$ ) به ترتیب  $0/1$

در جدول ۲ تعداد راه‌حلهایی که در جبهه بهینه پارتو قرار می‌گیرند آورده شده است. همان‌طور که در این جدول ملاحظه می‌گردد، در الگوریتم NSGA-II تعداد راه‌حلهایی که در جبهه پارتو قرار می‌گیرند به مراتب بیش‌تر از این تعداد در الگوریتم NSPSO-II است. همچنین با توجه به مقادیر موجود در این جدول ملاحظه می‌گردد که افزایش تعداد اعضای جمعیت تأثیری در تعداد راه‌حلهایی که در جبهه بهینه پارتو قرار می‌گیرند ندارد.

ثانیه تقریباً سه برابر میانگین زمان اجرا در الگوریتم NSPSO-II با مقدار ۶/۳۱۶۹ ثانیه است. بدین ترتیب می‌توان گفت الگوریتم NSPSO-II سریع‌تر از الگوریتم NSGA-II است که البته این مورد را می‌توان به دلیل تعداد کم راه‌حل‌های موجود در جبهه بهینه پارتو در الگوریتم NSPSO-II دانست. خلاصه نتایج مربوط زمان اجرای الگوریتم‌ها در چهار تکرار برای تعداد ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ عضو جمعیت و ۱۰۰ تکرار در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱- زمان اجرای الگوریتم‌های NSGA-II و NSPSO-II با تعداد مختلف از اعضای جمعیت (ثانیه).

**Table 1. The run time of NSGA-II and NSPSO-II with diferetnce number of population (Sec).**

تعداد اعضای جمعیت در الگوریتم NSPSO-II				تعداد اعضای جمعیت در الگوریتم NSGA-II				شماره اجرا Number of Run
Number of population in NSPSO-II algorithm				Number of population in NSGA-II algorithm				
200	150	100	50	200	150	100	50	
زمان اجرا Run time				زمان اجرا Run time				
93.3521	46.6938	22.0677	6.3929	322.0603	181.6397	83.0481	21.688	1
91.4334	47.7353	22.575	6.4082	327.6755	180.1956	81.516	21.4649	2
85.6597	55.3288	22.1393	6.1948	323.0256	180.958	80.7961	21.26	3
85.114	53.9283	22.2249	6.2518	317.3411	182.3481	81.2246	21.1459	4
88.8898	50.9215	22.1448	6.3169	322.7986	181.2853	81.6462	21.3897	میانگین Average

جدول ۲- تعداد راه‌حلهایی که در جبهه اول قرار می‌گیرند.

**Table 2. Number of solution that located in first parto front.**

تعداد اعضای جمعیت در الگوریتم NSPSO-II				تعداد اعضای جمعیت در الگوریتم NSGA-II				شماره اجرا Number of Run
Number of population in NSPSO-II algorithm				Number of population in NSGA-II algorithm				
200	150	100	50	200	150	100	50	
زمان اجرا Number of solution that located in first parto front				تعداد راه‌حلهایی که در جبهه اول Number of solution that located in first parto front				
4	7	6	5	63	48	51	40	1
7	5	5	5	38	50	57	50	2
4	4	4	5	61	35	43	50	3
5	5	6	7	71	81	61	49	4

شده است. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که فاصله در الگوریتم NSGA-II در همه اجراها و هر تعداد عضو جمعیت همواره کم‌تر از فاصله در الگوریتم

عملکرد الگوریتم‌های NSPSO-II و NSGA-II با توجه به معیارهای فاصله و معیار تصمیم‌گیری نیز مورد بررسی قرار گرفته که نتایج آن در جدول ۳ آورده

الگوریتم NSGA-II برخوردار بوده است. در اینجا نیز به‌طور کلی افزایش تعداد اعضای جمعیت تأثیری در بهبود عملکرد الگوریتم‌ها با توجه به معیار تصمیم‌گیری نداشته است و دلیل آن نیز عدم افزایش تعداد راه‌حل‌های موجود در جبهه بهینه پارتو است.

NSPSO-II است. با توجه به رابطه ۱۳ به دلیل تعداد بالای راه‌حل‌های موجود در جبهه بهینه پارتو و فاصله آن‌ها از هم و به‌طور کلی پراکندگی مناسب آن‌ها در جبهه بهینه پارتو، فاصله در الگوریتم NSGA-II کمتر بوده است؛ اما در خصوص معیار تصمیم‌گیری الگوریتم NSPSO-II از عملکرد بهتری نسبت به

جدول ۳- معیار فاصله و معیار تصمیم‌گیری در الگوریتم‌های NSGA-II و NSPSO-II.

Table 3. Distance criteria and Decision making criteria in NSGA-II and NSPSO-II algorithms.

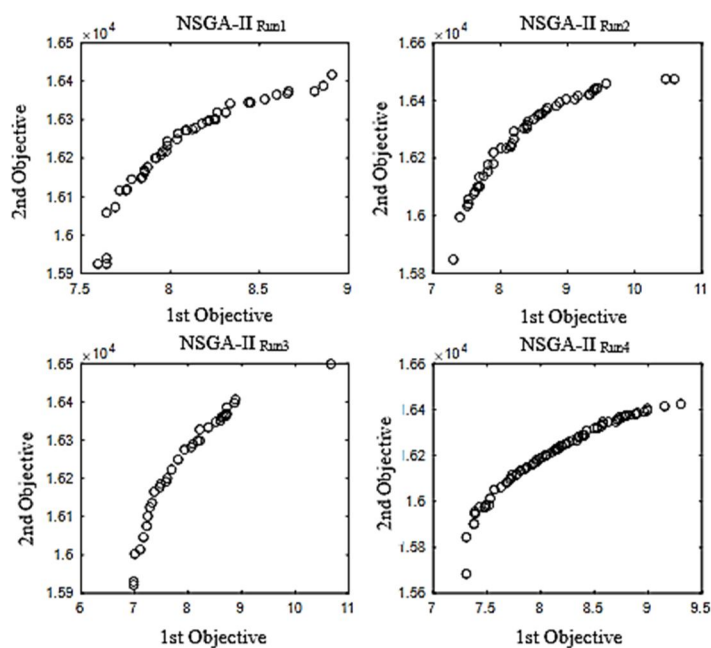
تعداد اعضای جمعیت در الگوریتم NSGA-II Number of population in NSGA-II algorithm								شماره اجرا Number of Run
200	150	100	50					
معیار فاصله و تصمیم‌گیری Distance and Decision Making criteria								
DM	S	DM	S	DM	S	DM	S	
1.0466	29.96	1.1936	34.33	1.0177	27.49	1.0381	23.97	1
1.0538	20.5	1.0507	42.28	1.0595	42.82	1.2261	58.96	2
1.099	27.84	0.8968	27.6	1.1331	38.78	1.0356	38.86	3
1.1278	53.43	1.111	35.04	1.2858	57.17	1.1135	32.28	4

تعداد اعضای جمعیت در الگوریتم NSPSO-II Number of population in NSPSO-II algorithm								شماره اجرا Number of Run
200	150	100	50					
معیار فاصله و تصمیم‌گیری Distance and Decision Making criteria								
DM	S	DM	S	DM	S	DM	S	
0.742	447.62	0.7902	360.56	1.0972	579.43	0.5798	393.98	1
0.7451	210.17	0.607	279.52	0.9395	331.63	0.9597	446.03	2
0.488	59.44	0.619	99.13	0.7549	598.59	0.7369	139.67	3
1.0319	185.25	0.6843	144.51	0.7008	119.22	0.8903	565.21	4

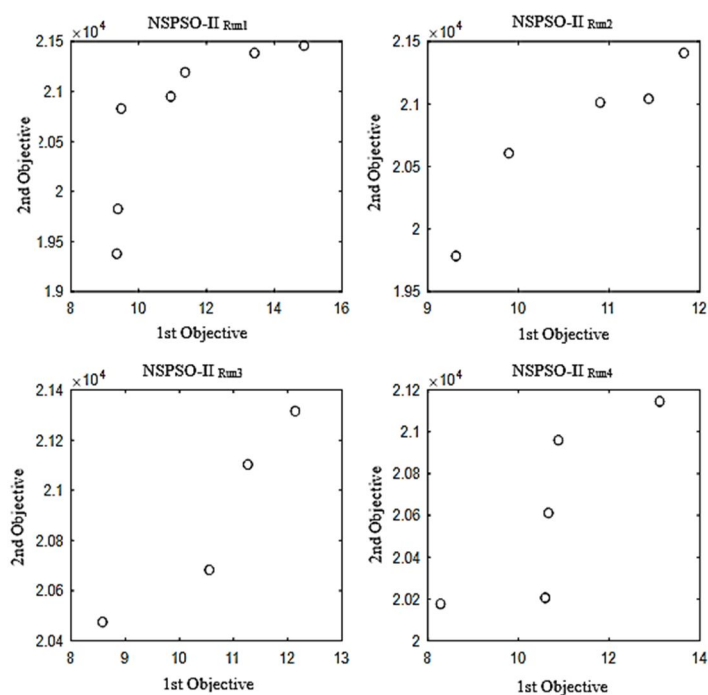
راه‌حل‌های واقع در جبهه بهینه پارتو در الگوریتم NSPSO-II برای چهار مرتبه اجرای این الگوریتم که با ۱۵۰ عضو جمعیت اجرا شده بود آورده شده است همان‌طور که در این شکل ملاحظه می‌گردد که با وجود پوشش جبهه بهینه پارتو توسط راه‌حل‌های واقع در جبهه بهینه پارتو اما تعداد راه‌حل‌ها کم بوده و فاصله بین آن‌ها بسیار زیاد است.

در شکل ۷ راه‌حل‌های واقع در جبهه بهینه پارتو در الگوریتم NSGA-II برای چهار مرتبه اجرای این الگوریتم که با ۱۵۰ عضو جمعیت اجرا شده بود آورده شده است. همان‌طور که در این شکل ملاحظه می‌گردد راه‌حل‌های واقع در جبهه بهینه پارتو به‌طور مناسبی جبهه پارتو را پوشش داده‌اند. در شکل ۸ نیز



شکل ۷- نتایج حاصل از چهار مرتبه اجرای الگوریتم NSGA-II با جمعیت ۱۵۰.

Figure 7. The results of four run of NSGA-II algorithms with 150 number of population.

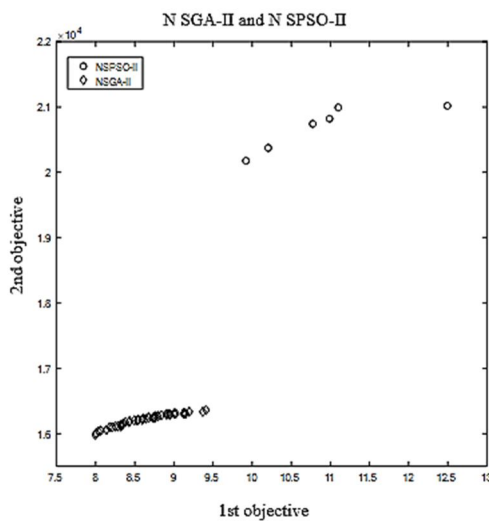


شکل ۸- نتایج حاصل از چهار مرتبه اجرای الگوریتم NSPSO-II با جمعیت ۱۵۰.

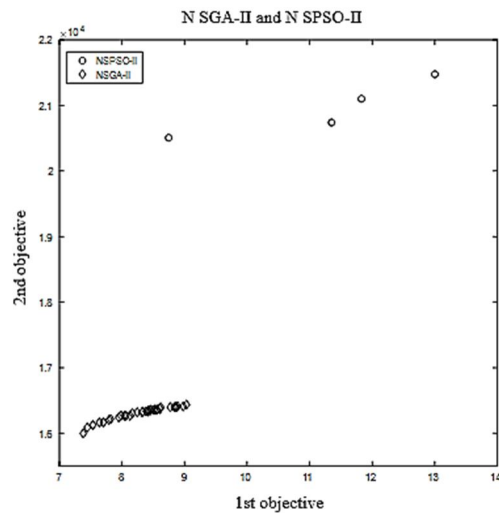
Figure 8. The results of four run of NSPSO-II algorithms with 150 number of population.

تابع هدف دوم بوده‌اند درحالی‌که در الگوریتم NSGA-II راه‌حل‌ها بیش‌تر به سمت کمینه‌سازی تابع هدف اول گام برداشته‌اند. بدین ترتیب می‌توان گفت هر دو الگوریتم جبهه‌هایی از راه‌حل‌های بهینه را ایجاد نموده‌اند که با توجه به سیاست بهره‌برداری از مخزن سد می‌توان هر یک از آن‌ها را انتخاب نمود.

با نشان دادن نتیجه اجرای دو الگوریتم در یک نمودار مانند شکل ۹- الف و شکل ۹- ب که به ترتیب برای ۱۰۰ و ۲۰۰ عضو جمعیت آورده شده است. نتایج بیانگر مقایسه جبهه‌های بهینه پارتو در دو الگوریتم نشان می‌دهد که الگوریتم NSPSO-II راه‌حل‌هایی را یافته است که در جهت بیشینه‌سازی



ب



الف

شکل ۹- نتایج حاصل از اجرای الگوریتم NSGA-II و NSPSO-II با تعداد جمعیت ۱۰۰ (الف)؛ با تعداد جمعیت ۲۰۰ (ب).

Figure 9. The results of NSGA-II and NSPSO-II algorithms with 100 number of population (a); with 200 number of population (b).

راه‌حل‌هایی که در جبهه بهینه پارتو قرار می‌گیرند، فاصله و معیار عملکرد مقایسه شدند. نتایج این پژوهش نشان داد که هر یک از الگوریتم‌ها در برخی از معیارها عملکرد مناسب‌تری نسبت به دیگر داشته است. با توجه به معیار زمان اجرای هر یک از الگوریتم‌ها، الگوریتم NSPSO-II در مقایسه با الگوریتم NSGA-II به مراتب زمان کم‌تری را در اجرا به خود اختصاص داد. با توجه به معیار عملکرد نیز الگوریتم NSPSO-II عملکرد مناسب‌تری نسبت به الگوریتم NSGA-II داشته است؛ اما از سوی دیگر با توجه به معیار تعداد راه‌حل‌های واقع در جبهه بهینه پارتو الگوریتم NSGA-II تعداد راه‌حل‌های بسیار

### نتیجه‌گیری کلی

در این پژوهش نسخه چندهدفه الگوریتم ژنتیک و ازدحام با به‌کارگیری مفاهیمی هم‌چون غلبه و فاصله ازدحامی مورد بررسی قرار گرفتند و برای حل مسأله بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخزن سد ملاصدرا واقع در استان فارس به‌کار برده شدند. مسأله بهینه‌سازی با دو هدف کمینه‌سازی مجموع توان دوم اختلاف نیاز کشاورزی از رهاسازی و بیشینه‌سازی حجم ذخیره سیلاب تعریف گردید و نتایج پژوهش نشان داد که هر دو الگوریتم توانایی حل این مسأله بهینه‌سازی را دارا می‌باشند. در این بین دو الگوریتم با توجه معیارهایی مانند زمان اجرای الگوریتم‌ها، تعداد

راه‌حل‌های واقع در جبهه بهینه پارتو نشان داد که الگوریتم NSPSO-II در راستای بیشینه‌سازی تابع هدف دوم گام برداشته درحالی‌که الگوریتم NSGA-II در راستای کمینه‌سازی تابع هدف اول حرکت کرده است.

بیش‌تری را در جبهه بهینه پارتو یافته است و راه‌حل‌های واقع در جبهه بهینه پارتو به‌طور مناسبی جبهه پارتو را برخلاف الگوریتم NSPSO پوشش دادند و به همین دلیل فاصله در الگوریتم NSGA-II کم‌تر از NSPSO-II بوده است. هم‌چنین مقایسه

## منابع

1. Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., and Meyarivan, T. 2002. A fast and elitist multi-objective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE Trans Evolutionary Computing*, Indian. 6: 2. 182-197.
2. Farahnakian, T., Moeini, R., and Mousavi, S. 2018. Optimal operation of single-reservoir system of Dez dam using charged system search algorithm. *J. Water Soil Cons.* 25: 1. 107-125. (In Persian)
3. Guo, X., Hu, T., Wu, C., Zhang, T., and Lv, Y. 2013. Multi-objective optimization of the proposed multi-reservoir operating policy using improved NSPSO-II. *Water resources management*, 27: 7. 2137-2153.
4. Li, X. 2003. July. A non-dominated sorting particle swarm optimizer for multiobjective optimization. In *Genetic and Evolutionary Computation Conference* (pp. 37-48). Springer, Berlin, Heidelberg. Optimization. In *Genetic and Evolutionary Computation Conference* (pp. 37-48). Springer, Berlin, Heidelberg.
5. Mazdaranizadeh, H., Piadeh Koohsar, J., and Sadr, S. 2019. Evaluation of GA and PSO optimization algorithms in operation of multi-reservoir systems Case study: Gorgan-Rood basin dams. *J. Water Soil Cons.* 26: 2. 239-250.
6. Mazdaranizadeh, H., and Parhizkari, M. 2019. Multi-objective optimization of hydropower multi-objective optimization of hydropower reservoirs operation based on the pattern of PAB markets. *Dam and Hydroelectric Powerplant.* 5: 19. 52-61.
7. Mohammad Rezapour, O. 2016. Comparison of imperialist competitive algorithm (ICA) and Ant colony algorithm (ACO) for optimizing exploitation of doroudzan reservoir with application chain constraints approach. *J. Water Soil Cons.* 22: 6. 231-243. (In Persian)
8. Mohammad Rezapour, O. 2016. Optimization of water network distribution using fast messy genetic and firefly algorithms in relopt model (Case study: Havanirouz Township, Kerman). *J. Water Soil Cons.* 23: 4. 45-64. (In Persian)
9. Mohammadrezapour, O., and Zeynali, M.J. 2013. Comparison of meta-heuristic algorithms in the optimal operation of multi – reservoir (a case study: Golestan and Voshmgir Dams). *JWSS.* 22: 1. 291-303. (In Persian)
10. Nozari, H., and Vafaei, M. 2018. Determining the accuracy of the dynamic system in simulating and optimizing the rule curves of the dam reservoir (Case Study: Choghakhor dam). *J. Water Soil Cons.* 25: 5. 89-107. (In Persian)
11. Schott, J.R. 1995. Fault tolerant design using single and multicriteria genetic algorithm optimization (No. AFIT/CI/CIA-95-039). AIR FORCE INST OF TECH WRIGHT-PATTERSON AFB OH.
12. Srinivasan, K., and Kumar, K. 2018. Multi-objective simulation-optimization model for long-term reservoir operation using piecewise linear hedging rule. *Water Resources Management*, 32: 5. 1901-1911.
13. Zeynali, M., Mohammad Reza Pour, O., and Frooghi, F. 2015. Evaluation of particle swarm, genetic and continuous ant colony algorithms in optimal operation of doroodzan dam reservoir. *Water and Soil Science*, 25: 3. 27-38. (In Persian)



Gorgan University of Agricultural  
Sciences and Natural Resources

*J. of Water and Soil Conservation, Vol. 26(5), 2020*  
*http://jwsc.gau.ac.ir*  
*DOI: 10.22069/jwsc.2020.16276.3162*

## Evaluation of Genetic and Particle Swarm Optimization Algorithms Based on Non-Dominating Sorting Approach for Multi Objective Optimization Operation of Reservoirs

A. Shabani Bohlooli<sup>1</sup> and \*M. Dastoorani<sup>2</sup>

<sup>1</sup>M.Sc. of Water Structures, Faculty of Agriculture, University of Birjand,

<sup>2</sup>Assistnt Prof., Dept. of Science and Water Engineering, University of Birjand

Received: 02.06.2019; Accepted: 09.24.2019

### Abstract

**Background and Objectives:** As a crucial issue in aqua sciences, optimizing dam reservoirs exploitation has been studied with a variety of optimization techniques. In recent years, a large number of multi-objective Meta-Heuristic algorithms have been introduced. One of these algorithms is the second version of the multi-objective genetic algorithm with non-dominated sorting, which was introduced in 2002 by Deb and et.al.

**Materials and Methods:** In this research, the innovation and aim are to use the particle swarm algorithm with non-dominated sorting approach and evaluate the efficiency of this algorithm in the optimization of operation of the reservoir performance. Finally, the results are compared with the NSGA-II algorithm, which ultimately leads to a sustainable management policy for water resource systems, and in particular the exploitation of the reservoir. In this research, the multi-objective version of the genetic algorithm and particle swarm optimization were investigated using concepts such as Non-dominated sorting and crowding distance and used to solve the optimization problem of the Mulla-Sadra reservoir in Fars province. The problem of optimization defined with two goals. One of them was minimizing difference between agriculture demand end releases. The second of objective function was maximizing flood storage volume. The two algorithms compared with criteria such as the run time, the number of solutions placed on the Pareto front, standard deviation and performance criteria (dispersion criteria).

**Results:** The results of the research indicated that both algorithms have the ability to solve this optimization problem. Also, the results indicated that the algorithms have somewhat more performance than some other criteria. The results of the investigation of the runtime of each of the algorithms showed that the performance of the multi-objective particle swarm algorithm (NSPSO-II) is far more than the NSGA-II algorithm, so that the average runtime of the NSGA-II algorithm in the population of 50 The value of 21.3879 seconds is approximately three times the average runtime in the NSPSO-II algorithm with a value of 6.3169 seconds. Regarding the performance criterion, the NSPSO-II algorithm has a better performance than the NSGA-II algorithm. On the other hand, according to the number of solutions on the Pareto front, the NSGA-II algorithm found a lot more solutions on the Pareto front, for this reason, the standard deviation in the NSGA-II algorithm was less than NSPSO-II.

**Conclusions:** The NSGA-II algorithm found a lot more solutions on the Pareto optimal front, and the solutions on the Pareto optimal fronted properly covered the Pareto front, unlike the NSPSO algorithm. Also, comparing the solutions in the Pareto optimal front showed that the NSPSO-II algorithm was stepped up to maximize the second target function, while the NSGA-II algorithm moved in the direction of minimizing the objective function.

**Keywords:** Flood Control, Malla-Sadra Dam, Meta-Heuristic Algorithms, Performance Criteria

---

\* Corresponding Author; Email: mdastourani@birjand.ac.ir

*Arch*