

MOWCO: یک الگوریتم جدید در بهینه سازی چند هدفه مبتنی بر چرخه آب در طبیعت

سید مرتضی حسینی¹، مجید وفایی جهان²، جواد صدری³

¹ کارشناس ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد مشهد، گروه کامپیوتر نرم افزار Seyedmorteza.hosseiny@gmail.com

² استادیار، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد مشهد، گروه کامپیوتر نرم افزار VafaeiJahan@mshdiau.ac.ir

³ دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه بیرجند، javad.sadri@mail.mcgill.ca

چکیده

در سالهای اخیر، متدهای فراابتکاری زیادی برای حل مسائل چند هدفه توسعه داده شده‌اند که بسیاری از این متدها الهام گرفته از فرآیندهای طبیعی می باشند. در این مقاله سعی شده است یک الگوریتم بهینه سازی چند هدفه جدید مبتنی بر چرخه آب در طبیعت ارائه شود. در این الگوریتم همانند چرخه آب در طبیعت، با الگو برداری از تبخیر آب از اقیانوس، تشکیل ابرها، تشکیل رودخانه‌ها و همچنین الگو برداری از سرریز آب از گودال‌ها در طبیعت الگوریتم جدیدی ارائه شده است که قابلیت بالایی در فرار از بهینه محلی و همچنین سرعت زیادی در رسیدن به جبهه پرتو دارد. طرح ارائه شده با چندین الگوریتم بهینه سازی چندهدفه در دستیابی به جبهه پرتو حقیقی مورد مقایسه قرار گرفته است و نتایج بدست آمده نشان دهنده کارایی بالای الگوریتم ارائه شده در حل مسائل بهینه سازی چندهدفه مختلف می باشد.

کلید واژه - الگوریتم‌های تکاملی، بهینه‌سازی چند هدفه، چرخه آب در طبیعت.

1- مقدمه

بسیاری از مسائل بهینه سازی در دنیای واقعی نیاز به بهینه شدن در بیش از یک تابع هدف دارند. این مسائل، مسائل بهینه سازی چند هدفه نامیده می شوند. در این گونه مسائل برای هر دسته از متغیرهای ورودی، چندین تابع هدف وجود دارد. پیدا کردن جواب بهینه در چنین فضایی برای روش‌هایی بر پایه گرادیان کاری دشوار است. یکی از روش‌هایی که کارایی خود را در حل بسیاری از مسائل چند هدفه نشان داده است و در بسیاری از الگوریتم‌های چند هدفه مورد استفاده قرار گرفته است، روش مبتنی بر پرتو می باشد [1]. یک مفهوم مهم در روش‌های بهینه سازی مبتنی بر پرتو مفهوم "غالب بودن" است. جواب i بر جواب j غالب می باشد اگر دو شرط زیر برقرار باشد: 1- جواب i از دید هیچ یک از توابع هدف از جواب j بدتر نباشد. 2- جواب i حداقل در یکی از توابع هدف از جواب j بهتر باشد. مجموعه همه جواب‌هایی که دو شرط بالا را داشته باشند "جبهه پرتو" نامیده می شود. الگوریتم‌هایی مانند NSGA [2]، NSGA-II [3]، SPEA [4]، MOPSO [5] بر پایه مفهوم پرتو استوار شده‌اند. در طرح ارائه شده سعی شده است که با بهره‌گیری و الهام از چرخه آب در طبیعت یک الگوریتم تکاملی چند هدفه جدید معرفی شود. هدف الگوبرداری از چرخه آب در طرح ارائه شده، طراحی یک الگوریتم جدید می باشد که

همانند ریزش باران، جمعیت هر نسل هم دارای تنوع و پراکندگی مناسبی باشد و همچنین با شبیه سازی فرآیند حرکت آب‌های ریزشی به سمت رودخانه‌ها، الگوریتم سرعت همگرایی بالایی برای رسیدن به جبهه پرتو داشته باشد. علاوه بر این با الگوبرداری از اشباع شدن گودال‌ها در حین بارندگی فرار از بهینه محلی طراحی شده است که این امر موجب می‌شود که الگوریتم ارائه شده جستجوی مناسبی را در فضای مسئله داشته باشد.

2- استراتژی بهینه‌سازی چند هدفه مبتنی بر چرخه آب در طبیعت

به طور خلاصه، این الگوریتم، شامل یک مجموعه‌ای از مقادیر اولیه برای هر پارامتر از مسئله می‌باشد. در هر دور از اجرای این الگوریتم، برای هر پارامتر از مسئله با یک اولویت‌مقادیری انتخاب می‌شوند و تشکیل چندین (برابر با اندازه جبهه پرتو) مجموعه کوچکتر را می‌دهند. سپس با در نظر گرفتن شایستگی مقادیر، با ترکیب مقادیر مربوط به هر پارامتر، چندین جواب برای مسئله تولید می‌شود. سپس هر جواب از مسئله با استفاده از الگوریتم جستجوی محلی، در بهینه محلی خود قرار می‌گیرد. هر بهینه محلی با توجه به میزان برزندگی خود، یک مقدار گنجایش دریافت می‌کند که میزان ماندگاری آن جواب در تعداد اجراهای متوالی و همچنین احتمال کاندید شدن برای

وابسته به متغیر اول مساله و یک ریزقطره از نوع دوم وابسته به متغیر دوم مساله و الی آخر خواهد بود. هر ریزقطره فقط با یک ریزقطره هم نوع دیگر تعامل خواهد داشت.

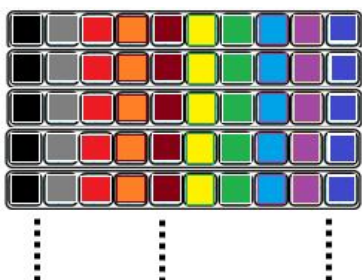
• **قطره**: هر عضو از جمعیت یا راه حل یک قطره نام دارد که با یک موقعیت و سرعت اولیه در فضای جستجوی مساله برای یافتن راه حل بهینه حرکت می کند. همچنین یک قطره دنباله ای از n ریزقطره می باشد که هر ریزقطره از یک نوع خاص می باشد. شکل 1 نشان دهنده یک قطره متشکل از 10 ریزقطره از 10 نوع می باشد.



شکل 1: نمایی از یک قطره که متشکل از 10 ریزقطره از 10 نوع می باشد

• **اقیانوس**: یک انباره بزرگ از ریزقطرات می باشد. در اقیانوس برای هر نوع ریز قطره، به تعداد K (به تعداد مساوی) ریزقطره وجود خواهد داشت. اندازه یک اقیانوس برابر تعداد ریزقطرات موجود در آن تقسیم بر n (تعداد متغیرهای مسئله) می باشد. به طور مثال اگر اندازه اقیانوس برابر a باشد، تعداد $(a \times n)$ ریزقطره در اقیانوس وجود خواهد داشت.

• **ابر**: همانند اقیانوس ولی در مقیاس کوچکتر می باشد. در ابر ریز قطرات تبخیر شده از اقیانوس که شایستگی بیشتری برای انتخاب دارند قرار خواهند گرفت. شکل 2 نشان دهنده یک ابر و همچنین یک اقیانوس (با ابعاد بزرگتر) می باشد.



شکل 2: نمایی از یک ابر (و یا اقیانوس) که از 10 نوع ریزقطره تشکیل شده است.

• **گودال**: یک قطره پس از شکل گیری در ابر، توسط الگوریتم تپه نوردی در نزدیک ترین بهینه محلی به خود قرار خواهد گرفت. این بهینه محلی یک گودال نامیده می شود. هر گودال با توجه به عمق (fitness) خود دارای یک گنجایش قرارگیری قطرات می باشد که در حین اجرای الگوریتم با توجه به ظرفیت خود، قطرات را در خود جای می دهد. این نکته باید مورد توجه قرار گیرد که یک قطره پس از قرارگیری در بهینه

حرکت دیگر جوابها به سمت خود را بیان می کند. در هر دور از اجرا، جوابهایی از مسئله که باید از مسئله حذف شوند به سمت یک عضو از جبهه پرتو (متناظر با مجموعه ای که جواب از آن تولید شده است) و در طول مسیر اگر به شایستگی بهتری برخورد نکردند، به بهینه محلی انتخاب شده خود می رسند. در هر دور مجموعه جواب های غیر غالب مسئله ثابت می ماند و در پایان هر دور مقادیر هر پارامتر از این جواب های مسئله وارد مجموعه مقادیر اولیه می شوند. بعد از پایان n دور از الگوریتم، بهترین جواب های دور n م جواب بهینه (پرتو) مسئله می باشد. لازم به ذکر است که در این الگوریتم، برای حفظ تنوع در جواب های جبهه پرتو، هرگاه تعداد جواب های غیر غالب از اندازه جبهه پرتو بیشتر شد، همانند الگوریتم NSGA-II [3]، از معیار فاصله تراکمی¹ برای حذف برخی از جوابها اقدام می شود.

1-2- مروری بر چرخه آب در طبیعت

چرخه آب، وجود و حرکت آب را در رو و زیر زمین و بالای سطح زمین نشان می دهد. آب در زمین همیشه در حال حرکت است و همیشه در حال تغییر شکل می باشد، از مایع به بخار، به یخ و دوباره بازگشت به حالت اول. توده های هوا، ابرها را در اطراف زمین به حرکت درمی آورند. قطعات ابر با یکدیگر برخورد کرده، رشد می کنند و به شکل بارش (باران و برف) به سمت پایین می آیند. قسمتی از بارشها بر روی سطح اقیانوسها ریخته می شوند و قسمت دیگری از آن نیز بر روی زمین می بارند که در اثر جاذبه روی سطح زمین جاری شده و تبدیل به رواناب سطحی می شوند. رواناب های سطحی وارد رودخانه ها شده و در نهایت به سمت اقیانوسها حرکت می کنند. در طول زمان، این حجم آب در حال حرکت است و سرانجام به اقیانوسها ختم می یابند که همان نقطه شروع است، و باز مجدداً این مسیر طی می شود [6].

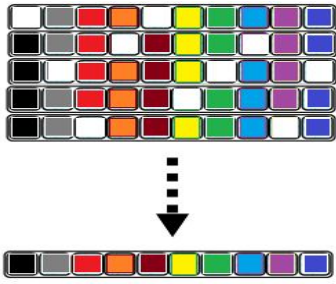
2-2- الگوریتم پیشنهادی مبتنی بر چرخه آب برای

مسائل چند هدفه

در ابتدا مفاهیم زیر تعریف می شوند:

• **ریزقطره**: یک مقدار از یک متغیر مسئله می باشد. هر متغیر مسئله یک پارامتر تاثیرگذار و مجهول از مسئله می باشد که مجموع n متغیر (در یک مسئله با n متغیر)، یک جواب از مسئله می باشد. هر ریزقطره یک نوع دارد که نوع آن وابسته به متغیر مسئله می باشد. به طور مثال، یک ریزقطره از نوع اول

¹ crowding distance



شکل 3: تشکیل یک قطره از طریق الحاق 10 ریزقطره در یک ابر که شامل 10 نوع ریزقطره می‌باشد.

تعداد قطره تولید شده در ابر برابر با مجموع $\frac{1}{3}$ از اندازه ابر و یک عدد تصادفی از $\frac{1}{3}$ از اندازه ابر می‌باشد که بصورت زیر می‌باشد:

$$n2 = \frac{C}{3} + \text{Rand}\left(\frac{C}{3}\right) \quad (1)$$

K برابر تعداد قطره انتخابی و C برابر با اندازه ابرها می‌باشد. لازم به ذکر می‌باشد که علت انتخاب معادله (1) برای تعداد قطره انتخابی در ابرها، کاملاً تجربی می‌باشد و پس از آزمایشات زیاد بر روی توابع آزمون مختلف بدست آمده است.

4- جستجوی محلی: قطرات تشکیل شده در ابرها، پس از ریزش باید در بهینه محلی خود جای بگیرند. برای این منظور برای هر قطره ریزشی یک بردار سرعت در نظر گرفته می‌شود که مقدار اولیه آن، برابر با طول قدم اولیه‌ای می‌باشد که از ورودی دریافت می‌شود. در هر تکرار بردار جابجایی یک قطره با بردار سرعت آن جمع می‌شود و سپس به مقدار بردار سرعت آن اضافه می‌شود. معادله حرکت یک قطره بصورت معادله حرکت ذرات در الگوریتم پرندگان [7] می‌باشد. این مراحل به تعداد β بار تکرار می‌شود که β از ورودی دریافت می‌شود.

5- جریان آب در سطح: همانطور که بیان شد هر گودال دارای یک گنجایش می‌باشد که هر چه عمق یک گودال بیشتر باشد (دارای $fitness$ بهتری باشد) دارای گنجایش بیشتری خواهد بود. گنجایش یک گودال برای یک تابع چند هدفه بصورت زیر می‌باشد:

$$C_i = \sum_{j=1}^m \frac{(f_{i,j} - f_{Min,j}) \times Const}{(f_{Min,j} - f_{Max,j})} \quad (2)$$

که در آن $f_{i,j}$ $Fitness$ گودال i ام در تابع هدف j ام می‌باشد و $f_{Max,j}$ ، اندازه بزرگترین $Fitness$ بین گودال‌ها در تابع هدف j ام و $f_{Min,j}$ ، اندازه کوچک‌ترین $Fitness$ بین گودال‌ها در تابع هدف j ام می‌باشد. m برابر تعداد تابع هدف می‌باشد و $Const$ یک عدد ثابت می‌باشد که نشان دهنده حداکثر ظرفیت یک گودال برای یک تابع هدف می‌باشد. C_i گنجایش گودال i ام می‌باشد. در هر دور از اجرا به یک مقدار تصادفی از میزان میانگین گنجایش گودال‌ها، به میزان قطرات موجود در هر

محلی خود و شناسایی گودال، نماینده آن گودال می‌باشد. به عبارت دیگر آن گودال نیز همانند یک قطره دارای n ریزقطره و همچنین دارای یک ارزش ($fitness$) می‌باشد.

• **رودخانه:** رودخانه، یک گودال غیر غالب در هر دور اجرا می‌باشد. در پایان هر دور از اجرا ریز قطرات تبخیر شده از اقیانوس توسط ریز قطرات موجود در رودخانه‌ها جایگزین می‌شوند.

الگوریتم ارائه شده مبتنی بر چرخه آب در طبیعت شامل 6 بخش اصلی زیر می‌باشد: 1- مقداردهی اولیه، 2- تبخیر، 3- میعان و شکل گیری باران، 4- جستجوی محلی، 5- جریان سطحی آب، 6- ورود آب رودخانه به اقیانوس.

1- مقداردهی اولیه: همانند بسیاری از الگوریتم‌های تکاملی چند هدفه، این الگوریتم نیز با مجموعه‌ای از مقادیر اولیه تصادفی آغاز می‌شود. در اجرای اول از الگوریتم، اقیانوس توسط مقادیر اولیه تصادفی مقداردهی می‌شود.

2- تبخیر: در تبخیر، در دور اول از اجرا، ابرها (تعداد ابرها برابر با تعداد اعضای جبهه پرتو می‌باشد) با استفاده از ریز قطرات موجود در اقیانوس بصورت تصادفی مقداردهی می‌شوند. در دورهای بعدی از اجرا، ریز قطرات انتخاب شده از اقیانوس برای تبخیر بر اساس یک اولویت انتخاب می‌شوند. این اولویت به این صورت می‌باشد که هر چه مقدار یک ریزقطره (از یک نوع) به مقدار ریزقطره موجود در یک عضو از جبهه پرتو (از همان نوع) که متناظر با ابری است که ریز قطره در آن قرار می‌گیرد (ابر با شماره i متناظر با عضو i ام جبهه پرتو می‌باشد)، نزدیک‌تر باشد، احتمال انتخاب آن بیشتر خواهد بود. روشی که در این طرح برای اولویت دهی استفاده شده است، انتخاب یک تعداد تصادفی ریزقطره از هر نوع، از اقیانوس و سپس انتخاب ریزقطره‌ای از بین آن‌ها که به ریزقطره موجود در آن عضو جبهه پرتو نزدیک‌تر باشد، می‌باشد.

3- میعان و شکل گیری باران: بعد از تبخیر و تشکیل ابرها، با به هم پیوستن n نوع از ریز قطرات، $n2$ (در هر دور بصورت تعداد تصادفی از اندازه ابر انتخاب می‌شود) قطره تولید می‌شود. احتمال انتخاب ریز قطرات در این قسمت نیز همانند قسمت تبخیر می‌باشد. شکل 3 نشان دهنده تشکیل یک قطره از ریز قطرات موجود در ابر می‌باشد که خانه‌های سفید نشان دهنده ریزقطره‌های انتخابی می‌باشد.

3-1- مقایسه بین الگوریتم چرخه آب با الگوریتم‌های

چندهدفه دیگر بر حسب شاخص عملکرد فاصله نسل‌ها شاخص فاصله نسل‌ها $(GD)^2$ [8] فاصله بین جبهه پرتو حقیقی و جبهه پرتو بدست آمده توسط یک الگوریتم را محاسبه می‌کند. فرمول محاسبه این فاصله به قرار زیر می‌باشد.

$$GD = \frac{1}{n_{PF}} \sqrt{\sum_{i=1}^{n_{PF}} d_i^2} \quad (4)$$

که در آن n_{PF} تعداد آبجکت‌ها در جبهه پرتو بدست آمده، d_i نزدیک‌ترین فاصله اقلیدسی بین آبجکت نام از جبهه پرتو بدست آمده و جبهه پرتو حقیقی می‌باشد. هرچه مقدار شاخص GD کمتر باشد مطلوب‌تر خواهد بود. جدول 1 نشان دهنده مقادیر بدست آمده الگوریتم‌های چندهدفه به ازاء هر تابع آزمون می‌باشند.

جدول 1: مقایسه بین الگوریتم چرخه آب و الگوریتم‌های چندهدفه به ازاء هر تابع آزمون GD دیگر بر حسب شاخص عملکرد

نام الگوریتم	نام تابع آزمون				
	ZDT1	ZDT2	ZDT3	ZDT4	ZDT6
NSGA-II	0.0191 7 ✓	0.003486 ✓	2.4783E-3 3 ✓	0.006390 02 ✓	7.5818E-2 2 ✓
SPEA-II [12]	3.8175 E-3 ✓	8.6104E-3 3 ✓	9.7165E-3 3 ✓	0.007692 78 ✓	1.9309E-2 2 ✓
MOPSO	1.8564 E-1 ✓	5.2428E-1 1 ✓	4.3418E-1 1 ✓		5.2135E-2 2 ✓
SPEA	0.0017 99	0.001339	0.047517 ✓	7.340299 ✓	0.221138 ✓
PAES[11]	0.0820 85 ✓	0.126276 ✓	0.023872 ✓	0.854816 ✓	0.085469 ✓
WATER CYCLE	0.0026 62	0.004287	0.001453	0.002662 5	0.004287 2

✓ مقادیری که بیشتر از مقادیر بدست آمده از الگوریتم چرخه آب هستند.

همانطور که در جدول 1 مشاهده می‌شود الگوریتم چرخه آب در مقایسه با الگوریتم‌های دیگر بر حسب شاخص عملکرد GD توانسته است نتیجه مطلوبی را ارائه دهد.

3-2- مقایسه بین الگوریتم چرخه آب و الگوریتم‌های

چندهدفه دیگر بر حسب شاخص عملکرد MS شاخص دومی که در این قسمت مورد استفاده قرار می‌گیرد شاخص حداکثر گسترش $(MS)^3$ [9] می‌باشد. این شاخص مشخص می‌کند که چطور یک جبهه پرتو اصلی توسط یک جبهه

گودال اضافه می‌شود. اگر میزان قطرات موجود در یک گودال از گنجایش آن گودال بیشتر بود آن گودال از بین گودال‌ها حذف می‌شود و آب موجود در این گودال در سطح جاری می‌شود. جهت حرکت آب سرازیر شده به سمت عضوی از جبهه پرتو می‌باشد که متناظر با ابری می‌باشد که قطره از آن تولید شده است. اگر در طی حرکت، آب سرازیر شده به گودالی برخورد که غالب بر گودالی بود که آب از آن سرازیر شده است، به میزان آب سرازیر شده به مقدار آب آن گودال اضافه می‌شود و حرکت قطع خواهد شد، در غیر اینصورت آنقدر حرکت می‌کند که به رودخانه انتخاب شده (یک عضو از جبهه پرتو) برسد. اگر طی مسیر نیز به گودالی برخورد که غالب بر عضوی از جبهه پرتو بود، آن گودال با آن عضو از جبهه پرتو جایگزین می‌شود. در پایان حرکت گودال مبدا حذف خواهد شد. هر چه اندازه گنجایش یک گودال بیشتر باشد با احتمال بیشتری برای دفعات بیشتر در اجرای الگوریتم موثر خواهد بود (حذف نخواهد شد). رابطه 3 بیانگر سرعت و موقعیت حرکت قطرات در هنگام حرکت در سطح (سرریز آب از گودال) می‌باشد.

$$v_i(t+1) = v_i(t) + \text{Rand}(x_{\text{select}}(t) - x_i(t)) \quad \text{و} \quad (3)$$

$$x_i(t+1) = x_i(t) + v_i(t+1)$$

در این معادله، $V_i(t)$ بردار سرعت و $X_i(t)$ بردار موقعیت فعلی قطره هستند. $X_{\text{select}}(t)$ موقعیت فعلی گودالی با ظرفیت بیشتر نسبت به گودالی که آب از آن سرازیر شده است، می‌باشد. 6- ورود جریان آب رودخانه به اقیانوس: همانطور که بیان شد آب موجود در رودخانه‌ها در هر دور وارد اقیانوس می‌شود و به اینصورت ریز قطرات تبخیر شده از اقیانوس توسط ریز قطرات رودخانه‌ها مقاداردهی می‌شوند. برای این منظور یک رودخانه به صورت تصادفی انتخاب می‌شود و سپس به اندازه تعداد متغیرهای مسئله (اندازه یک قطره) ریز قطره از آن رودخانه وارد اقیانوس می‌شود. این مراحل آنقدر ادامه می‌یابد تا ریز قطرات تبخیر شده از اقیانوس مقداردهی شوند.

3- پیاده سازی طرح پیشنهادی و آنالیز نتایج

توابع آزمونی که مورد استفاده قرار گرفتند شامل توابع استاندارد ZDT1 تا ZDT6 [13] می‌باشند. برای تحلیل نیز از دو شاخص برای ارزیابی و مقایسه الگوریتم ارائه شده استفاده شده است که بیان خواهند شد.

² Generational Distance

³ Maximum Spread

پرتو بدست آمده پوشیده می‌شود. فرمول محاسبه این شاخص بصورت زیر می‌باشد .

$$MS = \sqrt{\frac{1}{r} \sum_{i=1}^r \left[\frac{\min(f_i^{\max}, F_i^{\max}) - \max(f_i^{\min}, F_i^{\min})}{F_i^{\max} - F_i^{\min}} \right]^2} \quad (5)$$

که f_i^{\min} و f_i^{\max} به ترتیب بیشترین و کمترین مقدار آبجکت m/z از پرتو بدست آمده هستند و F_i^{\min} و F_i^{\max} به ترتیب بیشترین و کمترین مقدار از جبهه پرتو حقیقی می‌باشند. هر چه شاخص MS بیشتر باشد مطلوب‌تر خواهد بود.

جدول 2: مقایسه بین الگوریتم چرخه آب و الگوریتم‌های چندهدفه دیگر بر حسب شاخص عملکرد MS به ازاء هر تابع آزمون

نام الگوریتم	توابع آزمون				
	ZDT1	ZDT2	ZDT3	ZDT4	ZDT6
NSGA-II	0.989 ✓	0.8943 ✓	0.9292 ✓	1	1 ✓
MOPSO	0.72532 ✓	0.6895 ✓	0.69520 ✓	3.43017 ✓	0.903402 ✓
PAES	0.90109 ✓	0.8932 ✓	0.5834 ✓	13.366 ✓	0.933755 ✓
GS-MOMA [10]	0.999 ✓	1	0.96 ✓	0.9823 ✓	1 ✓
S-MOMA-I [10]	0.999 ✓	0.98 ✓	0.92 ✓	0.84 ✓	1 ✓
WATER CYCLE	0.9995	1	1.3911	1	1.149086

✓ مقادیری که کمتر از مقادیر بدست آمده از الگوریتم چرخه آب هستند.

همانطور که بیان شده بود شاخص MS هر چه بیشتر باشد بهتر است. به این علت همانطور که در جدول 2 نشان داده شده است، الگوریتم چرخه آب دارای نتایج مناسبی در مقایسه با سایر الگوریتم‌ها می‌باشد.

3- نتیجه گیری

آنچه در این نوشتار مورد بررسی قرار گرفت ارائه یک الگوریتم بهینه‌سازی چند هدفه جدید بر مبنای مدلسازی ریاضی فرایند چرخه آب در طبیعت بود. در این الگوریتم، اقیانوس به عنوان یک استخر بزرگ از داده اولیه و ابرها به عنوان یک مجموعه کوچکتر هستند که متناسب با یک عضو از جبهه پرتو می‌باشد و داده‌هایی با شباهت بیشتر به این عضو از جبهه پرتو را در خود نگه می‌دارند. هر قطره یک جواب از مسئله می‌باشد که دارای یک برزندگی می‌باشد که میزان ماندگاری این قطره در طول اجرای تابع را نشان می‌دهد. در هر دور از اجرای الگوریتم، رودخانه‌ها (مجموعه جواب‌های نامغلوب حذف نشده) جواب مسئله چند هدفه (جبهه پرتو) می‌باشند. نتایج آزمایش روش پیشنهادی بر روی توابع آزمون چندهدفه مختلف نشان می‌دهد

که الگوریتم معرفی شده در یافتن جبهه پرتو تابع کاملاً موفق عمل می‌کند و در مقایسه با روش‌های رایج بهینه‌سازی چندهدفه دارای برتری نسبی می‌باشد. الگوریتم معرفی شده به عنوان نسخه اولیه یک الگوریتم مبتنی بر فرآیند چرخه آب می‌باشد. بنابراین مطمئناً می‌توان اصلاحاتی در آن نیز ایجاد نمود. الگوریتم معرفی شده در حال حاضر برای حل مسائل پیوسته بهینه‌سازی چندهدفه مناسب می‌باشد. همچنین این الگوریتم به خاطر بنا نهاده شدن بر پایه ریزقطرات و همچنین عملیات اولویت دار ادغام ریزقطرات و تشکیل قطره، از قابلیت بالایی برای حل مسائل گسسته برخوردار می‌باشد.

5- مراجع

- [1] M. Reyes-Sierra, C.A. Coello Coello, "Multi-Objective Particle Swarm Optimizers: A Survey of the State-of-the-Art".
- [2] N.Srinivas, K.Deb, "Multi-objective function optimization using non-dominated sorting genetic algorithms", Evolutionary Computation 2, 221-248, 1994.
- [3] K. Deb, S.Agarwal, A.Pratap, T.Meyarivan, "A fast and elitist multi-objective genetic algorithm: NSGA-II", IEEE Transactions on Evolutionary Computation 6, 182-197, 2002.
- [4] E.Zitzler, L.Thiele, "Multi-objective evolutionary algorithms: a comparative case study and the strength Pareto approach", IEEE Transactions on Evolutionary Computation 3, 257-271, 1999.
- [5] C.A.C.Coello, G.T.Pulido, M.S.Lechuga, "Handling multiple objectives with particle swarm optimization", IEEE Trans. on Evolutionary Computations 8, 256-279, 2004.
- [6] U.S. Department of the Interior, url: "ga.water.usgs.gov/edu/watercyclefarsi.html"
- [7] J. Kennedy, R.C. Eberhart, Particle swarm optimization, in: Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks, vol. 4, pp. 1942-1948, 1995.
- [8] D. A. Van Veldhuizen and G. B. Lamont, "Evolutionary computation and convergence to a Pareto front," Late Breaking Papers at the Genetic Programming, pp. 221-228, 1998.
- [9] E. Zitzler, "Evolutionary algorithms for multiobjective optimization: Methods and applications," Ph.D. dissertation, Swiss Federal Inst. Technol. (ETH), Zurich, Switzerland, TIK-Schriftenreihe Nr. 30, dissertation ETH No. 13398. Aachen, Germany: Shaker Verlag, 1999.
- [10] D. Lim, Y. Jin, Y. Ong, and B. Sendhoff, "Generalizing Surrogate-Assisted Evolutionary Computation", presented at IEEE Trans. Evolutionary Computation, pp.329-355, 2010.
- [11] J. D. Knowles and D. W. Corne, "The pareto archived evolution strategy: A new baseline algorithm for multiobjective optimization", in Congress on Evolutionary Computation (CEC'99). Washington D.C.: IEEE Service Center, July, pp. 98.105, 1999.
- [12] E. Zitzler, M. Laumanns, and L. Thiele, "SPEA2: Improving the strength pareto evolutionary algorithm for multiobjective optimization," in Evolutionary Methods for Design, Optimisation and Control with Application to Industrial Problems (EUROGEN 2001), edited by K. Giannakoglou et al., International Center for Numerical Methods in Engineering (CIMNE), pp. 95-100, 2002.
- [13] E. Zitzler, K. Deb, and L. Thiele, "Comparison of multiobjective evolutionary algorithms: Empirical results," Evol. Comput., vol. 8, no. 2, pp. 173-195, 2000.