

Calibration of a Water Resource Planning Model Using Many-Objective Optimization

M. Mostafazade¹ and H. Alizadeh^{2*}

Abstract

Water resource planning models traditionally incorporate hydrologic, water allocation and economic modules whose parameters should be properly estimated. This paper focuses on calibration of a water resource planning model. Our methodology includes three main parts: 1) development of a water resource planning model using WEAP software for Zarineh and Simineh River Basins located in Urmia Lake Basin in Iran, 2) application of VARS algorithm for sensitivity analysis of parameters of the developed model, and 3) usage of Many Objective Particle Swarm Optimization (MaOPSO) algorithm for model calibration and parameter estimation. It is worth mentioning that many objective optimization algorithms are utilized for problems with more than 3 objectives and here in this study we intend calibration of 7 objective functions defined based on Nash-Sutcliffe efficiency indices calculated in terms of residuals of time series of simulated and observed values of river discharge at stream gauges' locations, dam reservoir's storage volume, and aquifers' storage volume. Furthermore the model's parameters includes allocation priority, consumption rate, maximum withdrawal, and parameters of elevation-volume curves of aquifers. Sensitivity analysis using VARS algorithm shows that there are 17 influential parameters from total 27 parameters which are considered in calibration phase. To evaluate performance of MaOPSO, its results are compared to results derived using multi-objective PSO, which shows that MaOPSO has better performance dealing with such a complex problem.

Keywords: Many Objective Optimization, WEAP, VARS, MaOPSO, Urmia Lake Basin.

Received: January 8, 2019

Accepted: October 27, 2019

واسنجی مدل برنامه‌ریزی منابع آب با استفاده از بهینه‌سازی توابع هدف متعدد

مصطفی مصطفی‌زاده^۱ و حسین علیزاده^{۲*}

چکیده

مدل‌های برنامه‌ریزی منابع آب معمولاً شامل اجزاء هیدرولوژیکی، تخصیص و اقتصادی‌اند بطوری‌که لازم است مقادیر پارامترهای مختص به هر جزء بدرستی برآورد شود. تمرکز اصلی این مقاله بر موضوع واسنجی مدل‌های برنامه‌ریزی منابع آب خواهد بود. روش‌شناسی این تحقیق شامل سه بخش اصلی است: ۱- توسعه یک مدل برنامه‌ریزی منابع آب در محیط نرم‌افزار WEAP برای سیستم رودخانه‌های زرینه‌رود و سیمینه‌رود واقع در حوضه آبریز دریاچه ارومیه، ۲- استفاده از الگوریتم VARS برای تحلیل حساسیت پارامترهای مدل توسعه یافته، و ۳- بکارگیری الگوریتم بهینه‌سازی دسته ذرات با توابع هدف متعدد (MaOPSO) برای واسنجی مدل و تخمین پارامترهای آن. شایان ذکر است که الگوریتم‌های بهینه‌سازی با توابع هدف متعدد برای مسائل با بیش از ۳ هدف بکار می‌روند و در این تحقیق نیز واسنجی ۷ تابع هدف تعریف شده مبتنی بر معیارهای خطای سری‌های زمانی شبیه‌سازی نسبت به مشاهدات برای آینده در محل ایستگاه‌های هیدرومتری، حجم مخازن سدها و حجم آبخوان‌های حوضه مورد نظر است. همچنین پارامترهای واسنجی شامل مقادیر اولویت تقاضا، نرخ مصرف آب سایت‌های کشاورزی، بیشینه حجم برداشت سالانه از آبخوان‌ها و پارامترهای رابطه تراز-حجم آبخوان‌ها در نظر گرفته می‌شود. تحلیل حساسیت پارامترها نشان می‌دهد که از بین کل ۲۷ پارامتر، تنها ۱۷ پارامتر بر شاخص‌های خطای شبیه‌سازی مؤثرند. همچنین نتایج مقایسه عملکرد الگوریتم MaOPSO با نتایج الگوریتم بهینه‌سازی دسته ذرات چندهدفه (MOPSO) مبتنی بر دو معیار گستردگی جبهه پارتو و همگرایی جواب، حاکی از عملکرد بهتر الگوریتم MaOPSO در مواجهه با مسأله واسنجی مدل برنامه‌ریزی منابع آب با اهداف متعدد است.

کلمات کلیدی: بهینه‌سازی دسته ذرات، بهینه‌سازی توابع هدف متعدد، WEAP، الگوریتم VARS، حوضه آبریز دریاچه ارومیه.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۷/۱۰/۱۸

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۸/۸/۵

1- M.Sc. Graduate of Water Resources Management Engineering, Department of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

2- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran. Email: alizadeh@iust.ac.ir

*- Corresponding Author

۱- دانش‌آموخته کارشناسی‌ارشد، مهندسی و مدیریت منابع آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.

۲- استادیار گروه مهندسی و مدیریت منابع آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.

*- نویسنده مسئول

بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان بهار ۱۳۹۹ امکانپذیر است.

می‌باشند که به این مجموعه راه‌حل‌های بهینه پرتو^۳ می‌گویند. نسخه چندهدفه الگوریتم PSO و سایر الگوریتم‌های توسعه‌یافته چندهدفه توانایی بالایی برای یافتن راه‌حل‌های غیر مغلوب با همگرایی^۴ مناسب و گستردگی^۵ مناسب برای بهینه‌سازی مسائل با دو یا سه تابع هدف دارند (Chand and Wagner, 2015). با وجود توانایی این الگوریتم‌ها، در بسیاری از مسائل دنیای واقعی محققین با توابع هدف بیشتر از ۳ مواجهند که تحت چنین شرایطی روش‌های متداول بهینه‌سازی چند هدفه دارای محدودیت‌های قابل توجه از جهت همگرایی و تنوع جوابها می‌باشند. از این رو الگوریتم‌هایی که برای حل مسائل با بیش از ۳ تابع هدف توسعه یافته‌اند، تحت عنوان بهینه‌سازی با توابع هدف متعدد (MaOP^۶) نام‌گذاری می‌شوند. با این توجه در سالهای اخیر، رویکردهای مختلفی برای حل محدودیت‌های این الگوریتم‌ها برای حل مسائل بهینه‌سازی با اهداف متعدد طراحی شده است (Figueiredo et al., 2016).

Deb and Jain (2013) یک روش اصلاحی برای الگوریتم ژنتیک چندهدفه با استفاده از این رویکرد برای حل مسائل با توابع هدف متعدد ارائه کردند که آن را NSGA-III نامیدند؛ در این الگوریتم از یک مجموعه مرجع با توزیع مناسب به جهت هدایت جمعیت استفاده شده و به جهت نشان‌دادن برتری راه‌حل‌ها از عملگرهای خوشه‌بندی هم بهره گرفته شده است. در همین زمینه الگوریتم MaOPSO مبتنی بر قوانین کلی بهینه‌سازی ذرات (PSO) و ضمن بهره‌گیری از مجموعه مرجع توسط Figueiredo et al. (2016) ارائه شد. این الگوریتم ترکیبی از رویکردهای مختلف حل مسائل با توابع هدف متعدد شامل مجموعه مرجع، رویکرد تجمعی با استفاده از تابع‌های خوشه‌بندی و اطلاعات ترجیحی با به‌کارگیری تنظیمات مجازی (نقاط مرجع) در فضای هدف جهت راهنمایی ذرات حول این ترجیحات را به کار می‌گیرد (Figueiredo et al., 2016). برخی از کاربردهای این الگوریتم‌ها در مسائل منابع آب عبارت‌اند از: بهینه‌سازی زمان‌بندی تولید برق از چند مخزن (Zhang et al., 2011)، نمایش تغییرات بلندمدت تراز آب زیرزمینی (Reed and Kollat, 2012)، مدیریت بهره‌برداری از مخازن (Giuliani et al., 2014)، ارزیابی مدیریت آب (Reed et al., 2013)، مدیریت عرضه آب شهری (Matrosova et al., 2015)، مدیریت خشکسالی (Trindade et al., 2017)، واسنجی متغیر زمانی مدل ذوب برف (Xie et al., 2018)، مدیریت کمی-کیفی مخازن سدها (Haghighat et al., 2019) و انتقال آب بین حوضه‌ای (Zamanipour et al., 2019).

با توجه به مرور پیشینه مشخص است که روشهای بهینه‌سازی با اهداف متعدد، علیرغم ماهیت با اهداف متعدد مسائل واسنجی، برای

برنامه‌ریزی، طراحی و مدیریت سیستم‌های مدیریت منابع آب در حال حاضر به طور اجتناب‌ناپذیری به پیش‌بینی وقایع نیازمند است که این امکان با مدل‌سازی فراهم می‌شود. در گذر زمان اهمیت مدل‌سازی در مدیریت و برنامه‌ریزی منابع آب را به جهت ایجاد امکان آزمودن تصمیم فعلی (شبیه‌سازی) و یا انتخاب بهترین تصمیم (بهینه‌سازی) برای بهبود عملکردهای مدیریتی را دو چندان شده است. مدل‌های شبیه‌سازی و بهینه‌سازی ریاضی امروزه ابزارهای معمول در دسترس مدیران و برنامه‌ریزان است تا با استفاده از آن عملکرد اجزاء سیستم‌های منابع آب را تحت شرایط اتخاذ تصمیمات یا سیاست‌های مدیریتی را قبل از اجرا پیش‌بینی نمایند (Loucks et al., 2005). اکثر مدل‌های ساخته شده از دنیای واقعی و به صورت خاص مدل‌های مدیریت منابع آب در صورتی قابل استفاده بوده و مفیدند که پس از ساخته شدن با استفاده از روابط ریاضی حاکم بر هیدرولوژی، کشاورزی و سایر بخش‌های مدل شده، با استفاده از داده‌ها و اطلاعات در دسترس دنیای واقعی واسنجی یا اصطلاحاً کالیبره شوند. منظور از واسنجی این است که مقادیر پارامترهای مدل، توسط مدل‌ساز طوری تخمین زده شود که نتایج مدل‌سازی به واقعیت (مشاهدات) نزدیک شود (Gupta and Sorooshian, 1998). در سالیان گذشته و قبل از پیدایش کامپیوترهای با قابلیت محاسبات سریع مدل‌سازان می‌بایست به صورت دستی مدل مورد نظر خود را واسنجی می‌کردند. به دلیل زمان‌بر بودن و دشواری‌های واسنجی دستی محققان در دهه ۱۹۶۰ و ۱۹۷۰ میلادی اقدام به ارائه روش‌هایی کردند که با استفاده از آن بتوان سرعت پردازش را افزایش داده و به صورت خودکار تعداد زیادی از پارامترها را واسنجی نمود. با توسعه قابلیت‌های ابزارهای محاسباتی این موضوع در بیست سال اخیر به شدت مورد توجه محققین منابع آب بوده و روشهای زیادی در این زمینه توسعه یافته که سبب پیشرفت‌های قابل توجه در زمینه مدل‌سازی منابع آب شده است. یکی از الگوریتم‌ها و روش‌های مورد استفاده برای واسنجی مدل‌ها استفاده از الگوریتم‌های فراکاوشی^۱ می‌باشد که به دفعات در مدل‌های حوزه آب مورد استفاده قرار گرفته است. استفاده از این الگوریتم‌ها در شاخه‌های مختلف علمی به راحتی میسر بوده و می‌توان مسائل مختلف را با استفاده از آنها حل کرد (Olofintoye et al., 2013) و بدین جهت در ۲۰ سال گذشته بخش زیادی از تحقیقات در حوزه مدیریت منابع آب با استفاده از آنها انجام شده است (Reed et al., 2013).

مسائل بهینه‌سازی با دو یا سه تابع هدف با عنوان روش‌های بهینه‌سازی چندهدفه (MOP^۲) شناخته می‌شوند که به جای پیدا کردن یک راه‌حل بهینه به دنبال یافتن مجموعه‌ای از راه‌حل‌های بهینه

واسنجی کمتر بکار رفته‌اند. با این توجه، در این مقاله، واسنجی یک مدل برنامه‌ریزی منابع آب توسعه‌یافته در محیط نرم‌افزار WEAP با استفاده از الگوریتم MaOPSO مورد توجه خواهد بود.

۲- روش‌شناسی

در شکل ۱ ساختار کلی پژوهش ارائه شده است. از نرم‌افزار WEAP برای توسعه مدل برنامه‌ریزی منابع آب (منابع-مصارف) حوضه رودخانه‌های زربینه‌رود و سیمینه‌رود استفاده می‌شود. سپس با استفاده از الگوریتم VARS پارامترهای مدل مورد تحلیل حساسیت قرار گرفته و پارامترهای مؤثر انتخاب می‌شود. در نهایت با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ذرات با توابع هدف متعدد پارامترهای مدل برنامه‌ریزی منابع آب واسنجی می‌شود. در ادامه هر یک از بخش‌های روش‌شناسی پژوهش با جزئیات بیشتر تشریح می‌گردد.

۲-۱- مطالعه موردی

رودخانه زربینه‌رود، یکی از مهم‌ترین و طولانی‌ترین رودخانه‌های حوضه آبریز دریاچه ارومیه می‌باشد. این رودخانه از بهم پیوستن رودخانه‌های سقز، ساروق، چم‌خورخوره و قوری‌چای تشکیل می‌شود و عمدتاً در استان‌های کردستان، آذربایجان غربی و بخشی از آن (سرشاخه‌های

قوری‌چای) در استان آذربایجان شرقی جریان دارد. پتانسیل منابع آب تجدیدپذیر این رودخانه معادل با ۱۸۴۳ میلیون متر مکعب می‌باشد و ۴۱ درصد آب ورودی دریاچه ارومیه از طریق این رودخانه تأمین می‌شود. رودخانه سیمینه‌رود یکی دیگر از رودخانه‌های مهم و اصلی دریاچه ارومیه بوده که در استان آذربایجان غربی جریان دارد و بخشی از سرشاخه‌های آن در استان کردستان وجود دارد. این رودخانه از تلاقی دو شاخه عمده آن به نام‌های تاتانو و زاوه کوه تشکیل می‌گردد. ۱۱ درصد آورد دریاچه ارومیه از طریق این رودخانه تأمین شده و پتانسیل منابع آب تجدیدپذیر آن معادل ۹۱۸ میلیون مترمکعب در سال برآورد می‌شود.

در این پژوهش مدل برنامه‌ریزی منابع آب این دو رودخانه در حوضه آبریز دریاچه ارومیه توسعه یافته و واسنجی شده است. بدلیل به هم تنیدگی سیستمی این دو رودخانه بواسطه وجود برخی طرح‌های انتقال آب مابین آنها و همچنین سایت‌های برداشت متعدد و تأثیر بهره‌برداری مخزن سطحی سد بوکان، امکان واسنجی متوالی حوضه‌های آبریز این دو رودخانه وجود ندارد و بنابراین لازم است که مدل‌های برنامه‌ریزی این دو رودخانه به صورت تلفیقی ساخته شده و بطور یکجا واسنجی گردد، که این موضوع سبب پیچیده‌تر شدن مسأله واسنجی این مدل می‌شود.

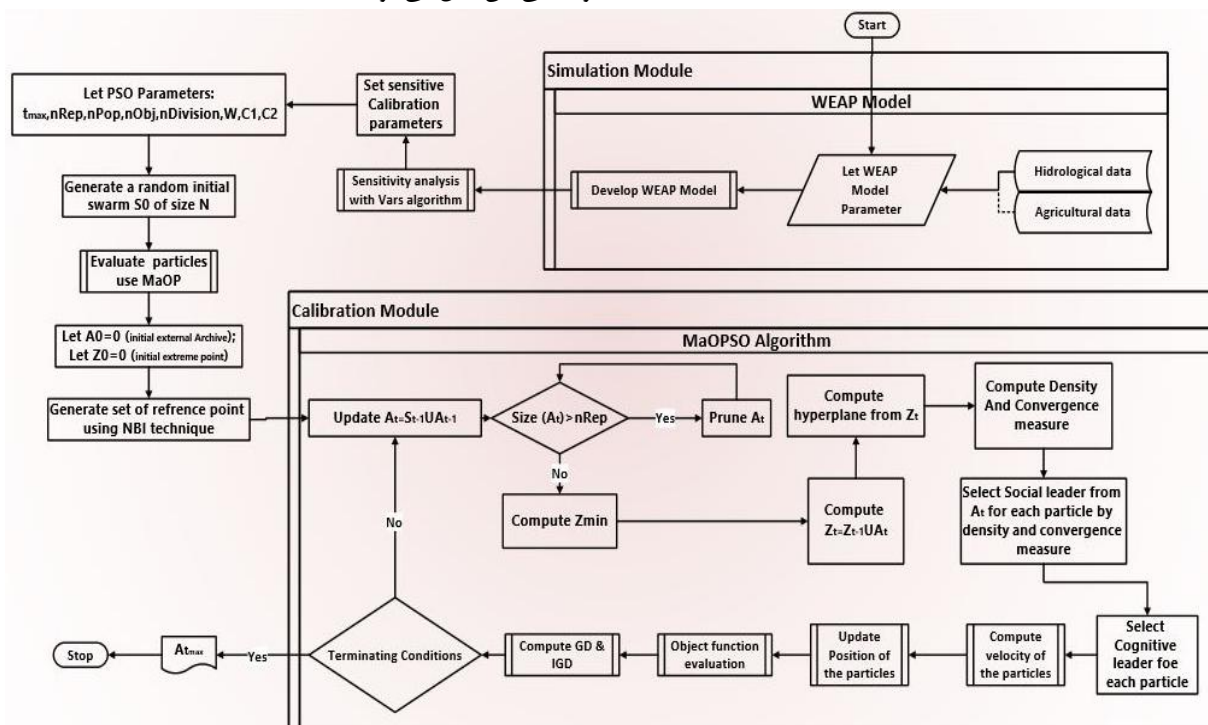


Fig. 1- The overall structure of the research; Model developed in WEAP, sensitivity analysis is done using VARS algorithm, and calibration is carried out by means of MaOPSO

شکل ۱- ساختار کلی پژوهش؛ توسعه مدل در WEAP، تحلیل حساسیت با VARS و واسنجی با MaOPSO

۲-۲- جمع‌آوری داده‌ها

آب (منابع - مصارف) برای شرایط سالهای اخیر، که حوضه آبریز به جهت سطح زیرکشت و نیاز آبی و همچنین برداشتها از منابع آب شرایط گذار را تجربه کرده است، واسنجی می‌شود و بر این اساس جهت نظر گرفتن روند، سطح زیرکشت آبی با استفاده از داده‌های کاربری اراضی بدست آمده از تصاویر ماهواره‌ای برای دوره سالهای آبی ۷۸-۷۷ الی ۹۰-۸۹ در مدل‌سازی لحاظ شده است.

۲-۳- مدل‌سازی برنامه‌ریزی منابع آب در نرم‌افزار WEAP

نرم‌افزار WEAP یک چارچوب منطقی، جامع و با شرایط کاربری مناسب را به جهت انجام تحلیل‌ها و برنامه‌ریزی پروژه‌ها و سیاست‌های منابع آب فراهم کرده به طوری که در آن امکان مدل‌سازی هیدرولوژیکی، زراعی و اقتصادی سیستم‌های منابع آب در سطح حوضه آبریز وجود دارد. به جهت پایگاه داده، نرم‌افزار WEAP امکان ذخیره اطلاعات عرضه و تقاضا را فراهم می‌کند و به جهت ابزارهای پیش‌بینی می‌توان در این مدل عرضه، تقاضا، جریان و ذخیره‌سازی آب همچنین تولید، نوع روش تصفیه و تخلیه آلودگی را شبیه‌سازی کرد. در این تحقیق، پس از وارد کردن داده‌های آبدی رودخانه‌ها در محیط WEAP، مبتنی بر پیکره‌بندی منابع-مصارف حوضه، محل قرارگیری و برداشت نقاط تقاضای کشاورزی حوضه به محیط WEAP وارد شده است (شکل ۲). برای این موضوع و مرتبط با هر نقطه تقاضا لازم است مقدار سطح زیرکشت سالانه، مقدار مصرف در واحد سطح، مقدار درصد ماهانه مصارف کشاورزی، اولویت تقاضا و درصد مصرف در نرم‌افزار وارد شود که این اطلاعات از طرح جامع منابع آب حوضه استخراج شده است.

مقادیر سطح زیرکشت اراضی آبی حوضه با استفاده از لایه کاربری اراضی بدست آمده از تصاویر ماهواره‌ای Landsat مربوط به سالهای آبی ابتدا (۷۸-۷۷) و انتهای (۹۰-۸۹) دوره شبیه‌سازی و ایجاد یک ارتباط ساده خطی مابین دو نقطه زمانی مذکور بدست آمده است (جدول ۱). شایان ذکر است، در سطر افقی اول این جدول، نام سایت‌های تقاضای کشاورزی بر مبنای پیکره‌بندی منابع و مصارف طرح جامع منابع آب حوضه آبریز دریاچه ارومیه ارائه شده است. آبدی رودخانه‌ها از مقادیر ثبت‌شده در ایستگاه‌های هیدرومتری در بالادست رودخانه‌ها و همچنین مقادیر بدست آمده از جریان‌های میانی در مدل مورد استفاده قرار گرفته است. سایر داده‌های مورد نیاز مدل‌سازی شامل مقدار مصرف آب در واحد سطح اراضی، مشخصات طرح‌های سدسازی (سد شهید کاظمی بوکان)، مقادیر تغذیه آبخوان‌های زیرحوضه و مقدار مصارف شرب از مقادیر موجود در طرح جامع منابع آب حوضه آبریز دریاچه ارومیه استخراج شده است (Mahab Ghodss, 2013). به جهت انجام واسنجی مقادیر تراز آبخوان‌های حوضه، میانگین تراز چاه‌های پیزومتریک موجود در هر آبخوان محاسبه گردید. همچنین، حجم مخزن سد شهید کاظمی بوکان از مقادیر ثبت شده حجم این سد در سیستم بهره‌برداری سدهای مخزنی در دست بهره‌برداری وزارت نیرو برداشت شده است.

لازم به ذکر است در مقابل رویکرد حذف روند از داده‌های هیدرولوژیکی آبدی، رویکرد این تحقیق برای برخورد با این موضوع متفاوت می‌باشد. در این پژوهش شبیه‌سازی مدل برنامه‌ریزی منابع

Table 1- Crop area of agricultural demand sites (ha)
جدول ۱- سطح زیر کشت نقاط تقاضای کشاورزی (هکتار)

Demand Sites Year	Qorichay	Zarrinerud	Siminerud	os37	od16	os38	od17	odw1	Zarrine end	Takab	Sum
1998-99	7287	13585	38947	678	503	610	1647	19376	21645	11778	116056
1999-00	7383	13764	39461	687	510	618	1669	19632	21930	11933	117587
2000-01	7479	13943	39975	696	516	626	1691	19888	22216	12088	119118
2001-02	7575	14123	40488	705	523	634	1713	20143	22501	12244	120649
2002-03	7671	14302	41002	714	530	642	1734	20399	22787	12399	122180
2003-04	7767	14481	41516	723	536	650	1756	20654	23072	12554	123709
2004-05	7863	14660	42030	732	543	658	1778	20910	23358	12710	125242
2005-06	7960	14840	42544	741	550	667	1800	21166	23644	12865	126777
2006-07	8056	15019	43057	749	556	675	1821	21421	23929	13020	128303
2007-08	8152	15198	43571	758	536	683	1843	21677	24215	13176	129809
2008-09	8248	15377	44085	767	569	691	1865	21932	24500	13331	131365
2009-10	8344	15556	44599	776	576	699	1886	22188	24786	13487	132897
2010-11	8440	15736	45112	785	583	707	1908	22444	25071	13642	134428

وجود اندرکنش بین پارامترهای مهم تأثیرگذار در مسأله واسنجی وجود خواهد داشت. به علاوه مجهول بودن نحوه تخصیص واقعی آب بین کاربران و همچنین نحوه بهره‌برداری واقعی منابع آب در یک دوره تاریخی موجب می‌شود برای شبیه‌سازی تخصیص و بهره‌برداری واقعی با استفاده از مدل‌های برنامه‌ریزی منابع آب در شرایط فقدان داده‌های مناسب برداشت آب، پارامترهای تخصیص (اولویت‌ها و ترجیحات) و یا پارامترهای قواعد بهره‌برداری در نظر گرفته شود. از این منظر است که برآورد پارامترهای تخصیص آب (اولویتها) با توجه به شرایط تاریخی سیستم منابع-مصارف برای واسنجی یک مدل برنامه‌ریزی منابع آب همچون WEAP ضروری به نظر می‌آید.

۲-۴- تحلیل حساسیت با استفاده از الگوریتم VARS

تحلیل حساسیت عمومی (GSA) یک رویکرد تحلیل سیستم‌ها است که به وسیله آن می‌توان حساسیت یک یا چند مدل را نسبت به پارامترها مشخص کرد. الگوریتم VARS مخفف تحلیل واریوگرامی سطوح پاسخ^۷ بوده و در واقع یک چارچوب کلی برای تحلیل حساسیت عمومی است که از توابع Variogram و Covariogram استفاده می‌کند تا طیف کامل اطلاعات مربوط به تحلیل حساسیت را مشخص کند.

تخصیص منابع آب در نرم‌افزار WEAP بر مبنای مقدار مشخص شده برای اولویت تقاضا صورت می‌گیرد و در این پژوهش اولویت به ترتیب مصارف شرب، مصارف کشاورزی بالادست سد، ذخیره مخزن سد، مصارف کشاورزی پایین دست سد لحاظ شده است. پس از آن لازم است محل آبخوان‌های حوضه به مدل اضافه شود. در صورت وجود برداشت از منابع آب زیرزمینی، ارتباط مابین نقطه تقاضا و آبخوان ایجاد شده و مقادیر به دست آمده به عنوان تغذیه آبخوان در مدل وارد شده و بیشینه مقدار برداشت از آبخوان به عنوان پارامتر واسنجی در نظر گرفته شود. پس از این مرحله لازم است به جهت مدل‌سازی سد با توجه به موقعیت واقعی آن به مدل اضافه و اطلاعات مورد نیاز شامل رابطه حجم-سطح-ارتفاع، تبخیر، بیشینه حجم مخزن سد، حجم مرده و مقدار اولویت تقاضا به مدل اضافه شود. در نهایت، برداشت‌های شرب در محل قرارگیری شهرهای زیرحوضه در مدل وارد گردد.

لازم به ذکر است شبیه‌سازی تخصیص آب در هر صورت مبتنی بر اولویت‌های تقاضا و ترجیحات عرضه است و پارامترهای مهم و تأثیرگذار در جانب عرضه شامل عمدتاً پارامترهای هیدرولوژیکی آبهای سطحی و زیرزمینی و در جانب تقاضا شامل پارامترهای زراعی و اقتصادی وجود دارند. وقتی موضوع شبیه‌سازی برای یک دوره تاریخی با هدف واسنجی هر مدل منابع آب و محیط زیست مطرح باشد، چالش

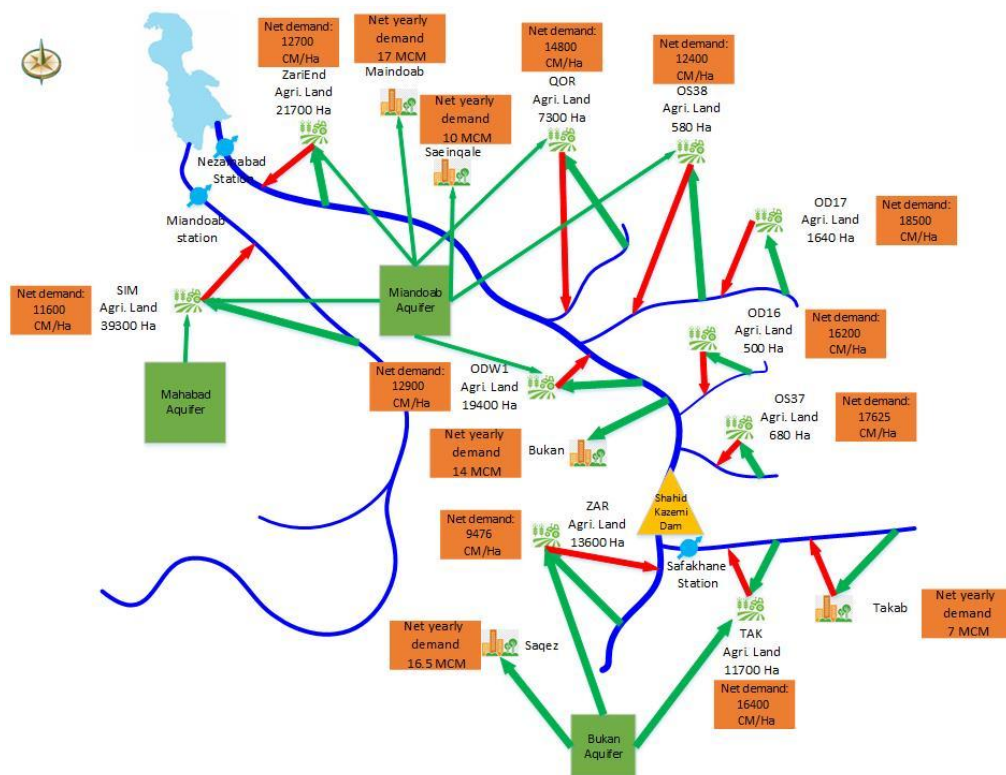


Fig. 2- Schematic view water demand-supply system of Zarineh-Rood and Simineh-Rood

شکل ۲- پیکره‌بندی منابع-مصارف رودخانه‌های زرینه‌رود و سیمینه‌رود

به عبارت بهتر یک مجموعه گسترده از تحلیل حساسیت عمومی با هزینه محاسباتی کم به وسیله الگوریتم VARS فراهم می‌شود (Razavi, 2016). برای اجرای این الگوریتم دو روش داخلی و خارجی توسط توسعه‌دهندگان آن ارائه شده که در این پژوهش از محیط MATLAB و از روش داخلی استفاده شده است. الگوریتم VARS مبتنی بر محاسبه واریوگرام دارای رابطه خوبی با روش‌های تحلیل حساسیت نظیر Sobol بوده و به لحاظ آماری انعطاف‌پذیر و به لحاظ محاسباتی کارآمد می‌باشد که با این توجه در این پژوهش معیار IVARS50 ملاک تحلیل حساسیت قرار گرفته است (Razavi and Gupta, 2016). واریوگرام به لحاظ مفهومی عبارت است از واریانس تغییرات در پاسخ مدل که تابعی از اختلال در یک جهت خاص در فضای پارامترها می‌باشد و مقدار IVARS یا انتگرال واریوگرام در مقابل یک محدوده مقیاس عبارت از انتگرال واریوگرام مستقیم بر روی یک محدوده مقیاس است.

۲-۵- الگوریتم بهینه‌سازی ذرات با توابع هدف متعدد (MaOPSO)

تابع هدف در یک مسأله بهینه‌سازی با اهداف متعدد به صورت رابطه ۱ تعریف می‌شود:

$$\min F(x) = (f_1(x), f_2(x), \dots, f_m(x)) \quad (1)$$

در این رابطه $f_i(x)$ مقدار تابع هدف i -ام بوده و در حالت توابع هدف متعدد مقدار m بزرگتر و یا مساوی ۳ خواهد بود. لازم به ذکر است که در مدل مدیریت منابع آب این پژوهش توابع هدف مبتنی بر معیار نش-ساتکلیف^۸ (NSE) تعریف شده‌اند. به این معنا که توابع هدف، میزان معیار NSE ناشی از مقدار بدست آمده از مدل و مقدار مشاهداتی می‌باشد و نزدیک شدن این میزان به یک به معنای عملکرد مناسب الگوریتم است. برای بررسی برتری یک تابع هدف نسبت به تابع هدف دیگر زمانی که تعداد توابع هدف از یک بیشتر می‌شود، به دلیل عدم کاربرد عملگرهای ریاضیاتی بزرگ‌تر یا کوچک‌تر، از مفهوم غلبه پرتو استفاده می‌شود.

بهینه‌سازی چندهدفه با شبکه‌بندی فضای آرشیو، بهترین ذرات انتخاب می‌شود. به دلیل تعدد توابع هدف، در الگوریتم MaOPSO امکان استفاده از تکنیک شبکه‌بندی فضای آرشیو وجود ندارد. با این توجه، الگوریتم MaOPSO بر روی دو معیار گستردگی و همگرایی به صورت توأمان تمرکز داشته و مبتنی بر ساخت مجموعه نقاط مرجع است. مجموعه نقاط مرجع کمک می‌کند پاسخ‌ها علاوه بر اینکه به سمت پاسخ بهینه پرتو نزدیک شوند، از توزیع مناسبی برخوردار باشند. یکی از مهم‌ترین جنبه‌های الگوریتم‌های ارائه شده برای حل مسائل با توابع هدف متعدد حل مشکل تنوع پاسخ‌های به دست آمده است که در الگوریتم مورد استفاده در این پژوهش از عملگر چگالی برای تخمین گستردگی بر مبنای الگوریتم دسته‌بندی و به جهت غلبه بر معضل همگرایی پارامترها از عملگر همگرایی استفاده شده است.

در رابطه عمومی الگوریتم PSO، ۳ پارامتر وجود دارد که می‌بایست مقدار مناسب آنها تعیین گردد. پارامتر ثابت وزنی (w) به جهت تأمین رفتار همگرایی الگوریتم و برای کنترل تأثیر سرعت در تکرارهای قبلی روی سرعت حال حاضر تعبیه شده است و رابطه مابین جستجوی محلی و عمومی را تنظیم می‌کند. دو پارامتر ثابت اجتماعی ($c1$) و فردی ($c2$) هر چند که برای تأمین همگرایی الگوریتم ضروری نیستند اما برای حرکت بهتر و سریع‌تر در جهت همگرایی و کاهش احتمال محدود شدن به نقطه بهینه محلی، ضروری می‌باشد. بنا به پیشنهاد Figueiredo et al. (2016) مقدار ثابت وزنی 0.72 و مقادیر ثابت‌های اجتماعی و فردی $1/49$ مقادیر مناسبی هستند. علاوه بر پارامترهای عمومی الگوریتم PSO، در الگوریتم MaOPSO تنها بایستی تعداد تقسیم‌بندی هر محور به جهت محاسبه مجموعه نقاط مرجع نیز تعیین گردد. افزایش این پارامتر منجر به بهبود عملکرد گستردگی پاسخ‌ها شده که در این پژوهش مقدار این پارامتر برابر با ۵ در نظر گرفته شد. در بخش پیوست به تفصیل در رابطه با چگونگی عملکرد الگوریتم بهینه‌سازی ذرات با توابع هدف متعدد با استفاده از تولید نقاط مرجع و محاسبه عملگرهای همگرایی و چگالی توضیح داده شده است.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- نتایج تحلیل حساسیت با استفاده از الگوریتم VARS

الگوریتم VARS توانایی تحلیل حساسیت پارامترها برای تنها یک تابع هدف را دارد. به همین منظور الگوریتم به ازای هر تابع هدف به صورت جداگانه اجرا و در نهایت مبتنی بر نتایج آن‌ها پارامترها به صورت جداگانه رتبه‌بندی شدند. از مجموع ۲۷ پارامتر اولیه شامل ۳ پارامتر اولویت تقاضا، ۸ پارامتر برداشت ماهانه سایت‌های کشاورزی از آبخوان، ۱۰ پارامتر نرخ مصرف در سایت‌های کشاورزی و ۶ پارامتر

در این پژوهش از روش ارائه شده توسط Figueiredo et al. (2016) تحت عنوان مجموعه نقاط مرجع در قالب بهینه‌سازی ذرات با توابع هدف متعدد (MaOPSO) استفاده شده است. الگوریتم MaOPSO مبتنی بر مفاهیم بیان شده در الگوریتم دسته ذرات (PSO) است. همچنین تفاوت اصلی الگوریتم MaOPSO با نسخه چندهدفه الگوریتم بهینه‌سازی PSO در نحوه انتخاب بهترین ذره اجتماعی از میان ذرات نامغلوب ذخیره شده در مجموعه آرشیو می‌باشد. در الگوریتم

دو الگوریتم MOPSO و MaOPSO را مقایسه نمود. فاصله نسلی به کمک رابطه ۲ و فاصله نسلی معکوس با استفاده از رابطه ۳ محاسبه می‌شود:

$$GD(A) = \frac{1}{|A|} \sum_{i=1}^{|A|} \min_{z_j \in Z} d(a_i, z_j), d(a_i, z_j): \text{EuclideanDistance} \quad (2)$$

$$IGD(A) = \frac{1}{|Z|} \sum_{z_j \in Z} \min_{a_i \in A} d(a_i, z_j), d(a_i, z_j): \text{EuclideanDistance} \quad (3)$$

در این روابط Z مجموعه نقاط مرجع بوده و A جواب‌های موجود در مجموعه آرشیو است و به صورت طبیعی با حرکت ذرات در هر اجرای الگوریتم بهینه‌سازی می‌بایست مقدار این شاخص‌های ارزیابی، کاهش یابد. واسنجی مدل با هر دو الگوریتم MaOPSO و MOPSO انجام شده که مقادیر GD و IGD در هر تکرار برای هر دو الگوریتم در شکل ۳ ارائه شده است.

همان‌گونه که در نمودارهای فوق مشاهده می‌شود، روند کلی نتایج نشان می‌دهد در تمامی موارد مقدار GD و IGD مربوط به الگوریتم MaOPSO کمتر از مقادیر مربوط به الگوریتم MOPSO است. این موضوع نشان می‌دهد که چگالی مقادیر و نتایج به دست آمده اطراف نقاط مرجع در الگوریتم MaOPSO بهتر بوده و به مقادیر بهینه نسبت به MOPSO نزدیکتر شده است. به عبارت دیگر الگوریتم MOPSO برای حل مسائل با توابع هدف بیش از ۳ در مقایسه با الگوریتم MaOPSO توانایی کمتری دارد. شباهت روند هر دو معیار (ابتدای افزایش و به صورت همزمان کاهش) به صورت کاملاً اتفاقی به نظر می‌رسد. همچنین با توجه به مقادیر GD و IGD بدست آمده از الگوریتم بهینه‌سازی و مقدار تابع آن در ۱۰ اجرای پایانی مدل و در نظر گرفتن زمان طولانی اجرای الگوریتم، به ۵۰ اجرا در این پژوهش اکتفا شد.

رابطه تراز-حجم آبخوان، پس از انجام تحلیل حساسیت، ۳ پارامتر اولویت تقاضا (مربوط به سایت‌های تقاضای Zarrinerud_end, ODW1 و Bukan dam)، ۶ پارامتر حداکثر برداشت ماهانه از آبخوان (مربوط به سایت‌های تقاضای Zarrinerud from Maindoab, ODW1 from Maindoab, Siminerud from Maindoab, ODW1 from Maindoab, Siminerud from Mahabad و Takab from Bukan, Zarrinerud from Bukan) و ۲ پارامتر نرخ مصرف (مربوط به سایت‌های تقاضای Zarrinerud و ODW1) و هر ۶ پارامتر رابطه تراز-حجم آبخوان که مجموعاً ۱۷ پارامتر به عنوان پارامترهای مؤثر در مرحله واسنجی برای هفت تابع هدف واسنجی (مقدار نش-ساتکلیف مقدار مشاهداتی و مدل حجم آبخوان بوکان، حجم آبخوان میان‌آب، حجم آبخوان مه‌آباد، آبدهی ایستگاه‌های هیدرومتری صفاخانه، نظام‌آباد، میان‌آباد و حجم ذخیره سد شهید کاظمی بوکان) به مدل معرفی شدند. وجود ۳ پارامتر اولویت تقاضا، شامل اولویت تقاضای سد شهید کاظمی بوکان و دو سایت تقاضای کشاورزی پایین دست آن با توجه به تأثیر بالای آن‌ها در واسنجی حجم مخزن بوکان و همچنین آبخوان‌های دیگر قابل پیش‌بینی بود. برداشت‌های ماهانه سایت‌های تقاضای کشاورزی با میزان مصرف بالا از آبخوان‌های این زیرحوضه هم به دلیل تأثیر زیادی که در واسنجی حجم آبخوان‌ها داشتند، جزء پارامترهای واسنجی قرار گرفتند. دو سایت تقاضای انتهای رودخانه زرینه‌رود و پایین دست سد بوکان نیز با توجه به سطح زیر کشت بالا و در نتیجه مصرف آب زیاد و تأثیرپذیری زیاد آبدهی ایستگاه‌های هیدرومتری پایین دست آن‌ها و بالتبع واسنجی این توابع هدف، جزء پارامترهای مؤثر شناخته شده‌اند.

۲-۳- ارزیابی الگوریتم بهینه‌سازی توابع هدف متعدد با استفاده از مقادیر معیارهای سنجش

برای ارزیابی عملکرد الگوریتم از دو معیار فاصله نسلی (GD) و فاصله نسلی معکوس (IGD) استفاده می‌شود که به کمک آن می‌توان نتایج

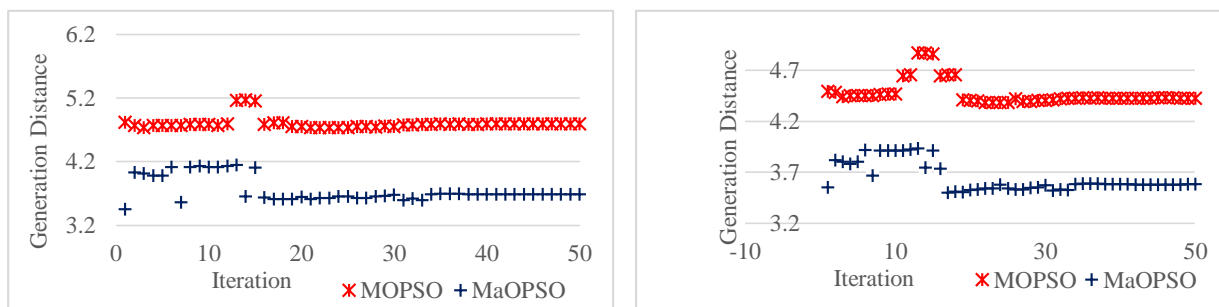


Fig. 3- Variations of GD (right side) and IGD (left side)
 شکل ۳- تغییرات GD (سمت راست) و تغییرات IGD (سمت چپ)

۳-۳- تحلیل نتایج واسنجی مدل برنامه‌ریزی منابع آب

در هر مرحله اجرای الگوریتم، ۲۰ عضو نامغلوب به دست آمده از مدل در مجموعه آرشیو ذخیره می‌شود. این بیست ذره هرکدام شامل ۱۷ بُعد است که هرکدام بیانگر یکی از پارامترهای واسنجی می‌باشد. در شکل ۴ نمودار جعبه‌ای دو پارامتر اولویت تقاضای سد بوکان و برداشت پایین دست سد بوکان از آبخوان میاندوآب در مجموعه جواب‌های نامغلوب اجرای ابتدایی، دهم، بیستم، سی‌ام، چهلم و انتهای ترسیم شده است. در صورتی عملکرد الگوریتم مناسب تشخیص داده می‌شود که پارامترهای اعضای مجموعه نامغلوب در طول اجراهای متمادی به سمت یک مقدار مشخص همگرا شوند که نشان‌دهنده عملکرد عملگر چگالی است. عملکرد عملگر تنوع در صورت عدم تمرکز پارامترها در بهینه‌های محلی و وجود تنوع جواب‌ها قابل قبول است. در شکل ۴ و به خصوص در نمودار A مربوط به پارامتر اولویت تقاضای سد بوکان، همگرایی پارامتر به وضوح مشخص بوده و از نمودار B با توجه به جابجایی مقدار پارامتر در گستره مناسبی از اعداد و در نهایت همگرایی به وجود آمده می‌توان برداشت کرد که تنوع پاسخ‌ها به خوبی تأمین شده است.

در شکل ۵ نمودار جعبه‌ای تغییرات مقدار توابع هدف (حجم آبخوان بوکان و حجم سد بوکان) و یا به عبارت بهتر همانگونه که پیش از این نیز بیان شد، مقدار رابطه نش-ساتکلیف داده‌های مشاهداتی و مقادیر بدست آمده از مدل در اجراهای ابتدایی، دهم، بیستم، سی‌ام، چهلم و پنجاهم رسم شده است. نزدیک شدن مقدار رابطه نش-ساتکلیف به عدد یک به معنای عملکرد مناسب الگوریتم است. به وضوح از دو نمودار شکل ۵ می‌توان برداشت کرد که مقدار تابع هدف ضمن

همگرایی و کم شدن دامنه تغییرات مقادیر، به سمت مقدار بهینه (یک) حرکت کرده و متمرکز شده‌اند.

در شکل ۶ نمودار پارامتر برداشت پایین دست سد بوکان از آبخوان میاندوآب در مقابل هرکدام از ۷ تابع هدف برای ۲۰ عضو مجموعه نامغلوب در اجرای ابتدایی و انتهای ترسیم شده است. انتظار می‌رود در این حالت مقادیر در راستای محور عمودی به سمت ۱، یعنی مقدار بهینه تابع هدف (رابطه نش-ساتکلیف) حرکت کنند. در این صورت باید نمودار اجرای انتهای در قسمت بالای نمودار اجرای ابتدایی در هر شکل قرار بگیرد که در هر ۷ شکل این موضوع قابل مشاهده است که در بعضی موارد نیز پایین تر قرار گرفته است. در راستای محور افقی نیز، به دلیل وقوع همگرایی در پارامترها، کوچک شدن محدوده تحت پوشش نمودار اجرای انتهای نسبت به اجرای ابتدایی در هر هفت شکل مشهود است.

بهترین روش برای ارزیابی عملکرد الگوریتم ترسیم جبهه پارتو در تکرار ابتدایی و انتهای است. با توجه به اینکه تعداد توابع هدف در این پژوهش ۷ می‌باشد و رسم جبهه پارتو امکان‌پذیر نیست، تصویر آن در فضای سه بعدی مورد بررسی قرار می‌گیرد. بر این اساس تعداد تصاویر بدست آمده ۳۵ مورد خواهد بود که در شکل ۷، ۱۰ مورد از آن نمایش داده شده است. در اکثریت نمودارهای رسم شده میل جبهه پارتو به سمت نقطه بهینه (۱- معادل منهای بهترین مقدار شاخص NSE برای هر سه محور) مشاهده می‌شود، اما در بعضی موارد نقاطی برای نقض آن وجود دارد که با توجه به اینکه تصویر جبهه پارتو در این شکل مورد استفاده قرار گرفته است، محل اشکال نمی‌باشد.

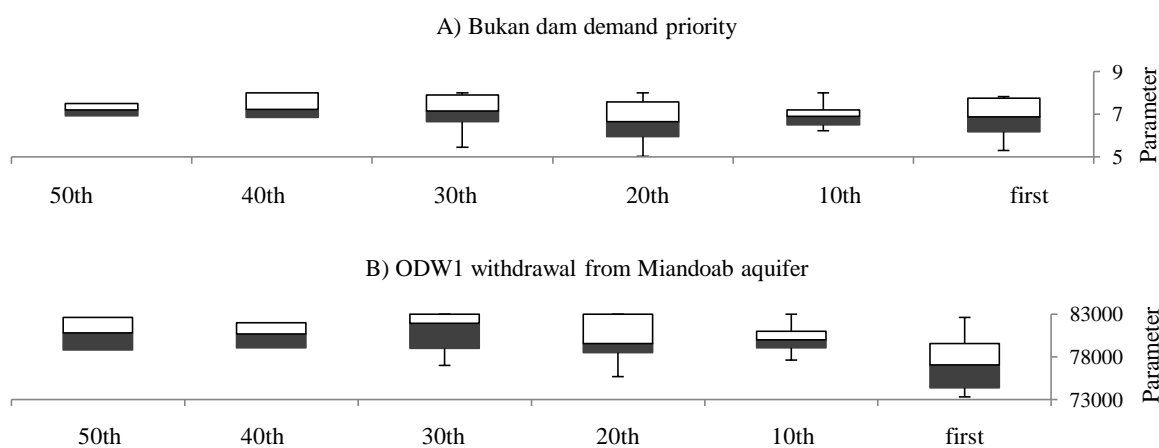


Fig. 4- Variations of parameters values for non-dominated solutions (minimum, the first quartile, median, the third quartile and maximum values)

شکل ۴- تغییرات پارامترها به ازای جواب‌های نامغلوب (مقادیر کمینه، چارک اول، میانه، چارک سوم و بیشینه)

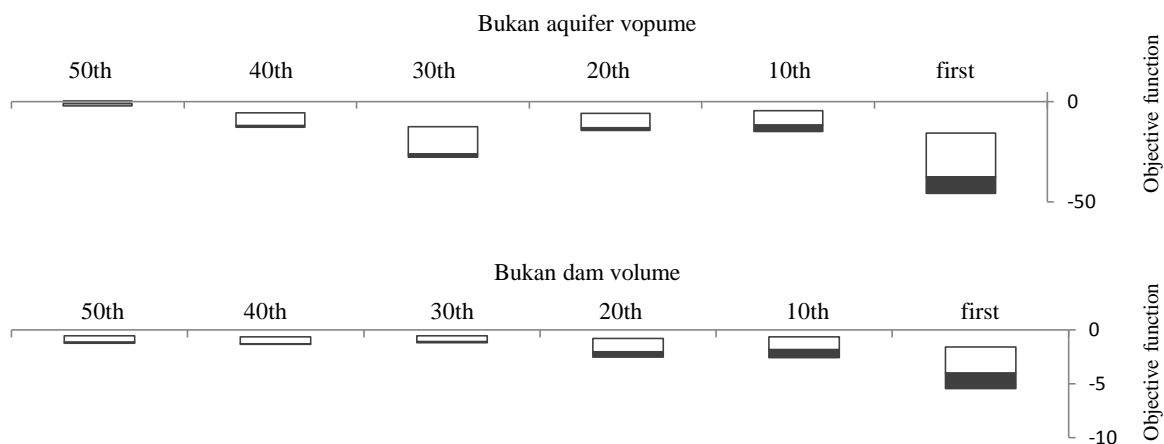


Fig. 5- Variations of the objective function value for non-dominated solutions (minimum, the first quartile, median, the third quartile and maximum values)

شکل ۵- تغییرات مقدار تابع هدف به ازای مجموعه جواب‌های نامغلوب (مقادیر کمینه، چارک اول، میانه، چارک سوم و بیشینه)

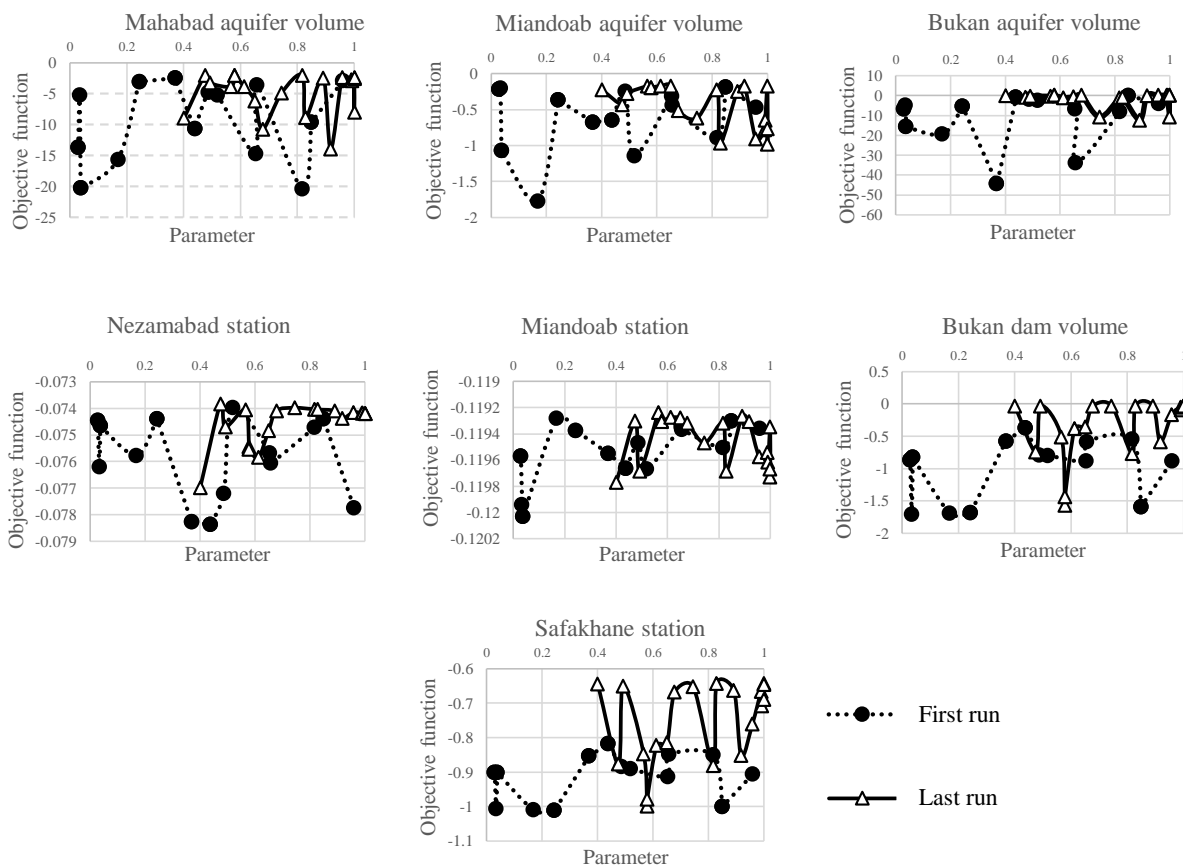


Fig. 6- Non-dominated solutions before and after implementing the algorithm; the parameter associated with water withdrawal from the Miandoab Aquifer by the site located downstream of Bukan Reservoir

شکل ۶- جواب‌های نامغلوب قبل و پس از اجرای الگوریتم؛ پارامتر برداشت پایین دست بوکان از آبخوان میاندوآب

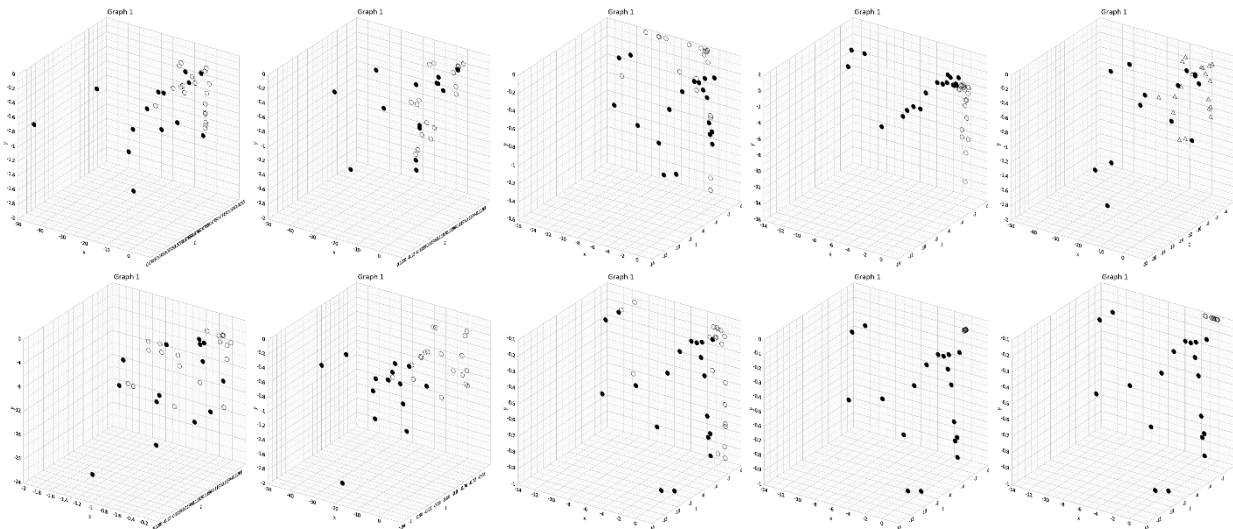


Fig. 7- 3D projections of the Pareto front associated with the first iteration (solid circles) and the end (hollow circles)

شکل ۷- تصویر جبهه پارتو در تکرار اول (دایره توپر) و انتهایی (دایره توخالی) در فضای سه بعدی

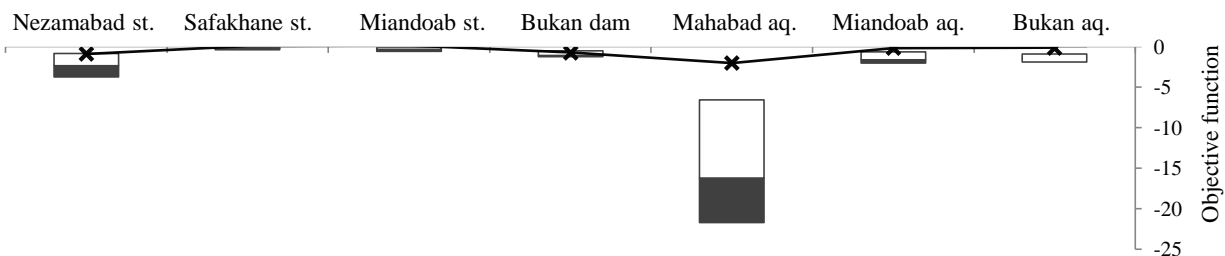


Fig. 8- Solutions associated with MaOPSO (box diagram) and single-objective-PSO (linear graph)

شکل ۸- جوابهای الگوریتم MaOPSO (نمودار جعبه‌ای) و الگوریتم PSO تک‌هدفه (نمودار خطی)

کسری بیلان آن را از سایر آبخوان‌ها یا منابع آب قابل تأمین، جبران می‌نماید. بر این اساس لزوم استفاده از الگوریتم‌های چندهدفه و در نظر گرفتن تمامی توابع هدف برای حل این معضل ضروری است.

به وضوح در تمامی نمودارهای این شکل جمع‌شدگی داده‌ها نمایان است که نشان از همگرایی جبهه پارتو است. در تعدادی از نمودارها همگرایی بیشتری مشاهده می‌شود که دلیل آن اندرکنش مستقیم سه تابع هدف مدنظر و تأثیر کم سایر توابع هدف در جبهه پارتو می‌باشد.

۴- جمع‌بندی

در تحقیق حاضر مدل برنامه‌ریزی منابع آب زیرحوضه رودخانه‌های زربینه‌رود و سیمینه‌رود در نرم‌افزار WEAP با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ذرات با توابع هدف متعدد واسنجی شد. تعداد پارامترهای واسنجی پس از تحلیل حساسیت با استفاده از الگوریتم VARS از ۲۷ پارامتر به ۱۷ پارامتر مؤثر کاهش یافت. توابع هدف به صورت مقدار رابطه نش-ساتکلیف اختلاف داده‌های مشاهداتی و مقادیر بدست آمده از مدل منابع-مصارف تعریف شده که در این پژوهش تعداد آنها برابر با هفت می‌باشد. واسنجی این مدل با استفاده از الگوریتم‌های تک‌هدفه به دلیل عدم در نظر گرفتن اندرکنش مقادیر امکانپذیر نبوده و بر همین اساس از الگوریتم توابع هدف متعدد استفاده می‌شود که در این پژوهش از الگوریتم MaOPSO استفاده شد. نکته دیگر در بیان عملکرد

در نهایت مقدار بهینه هرکدام از توابع هدف یکبار نیز با استفاده از الگوریتم PSO تک‌هدفه بدست آمد. به این معنا که مدل با استفاده از الگوریتم PSO تک‌هدفه به تعداد توابع هدف (هفت بار) اجرا شده و مقدار بهینه برای هرکدام بدست آمده است. در شکل ۸ نمودار جعبه‌ای توابع هدف یکی از جواب‌های نامغلوب اجرای انتهایی بدست آمده از الگوریتم توابع هدف متعدد و نمودار خطی بدست آمده از الگوریتم‌های PSO تک‌هدفه مقایسه شده است که نزدیک بودن مقادیر در این شکل واضح می‌باشد. اما دلیل عدم استفاده از الگوریتم تک‌هدفه اندرکنش بین پارامترهای مدل منابع-مصارف حوضه است. به عنوان مثال در حالت تک‌هدفه الگوریتم برای بهبود مقدار تابع هدف حجم آبخوان بوکان و یا به عبارت بهتر نزدیک شدن مقادیر به داده‌های مشاهداتی مقادیر برداشت از این آبخوان توسط نقاط برداشت را تغییر می‌دهد و

$$x_{id}^{n+1} = x_{id}^n + v_{id}^{n+1} \quad (7)$$

$$\forall i=1,2,\dots,N ; d=1,2,\dots,D$$

در ابتدا ذرات اولیه (S_0) به صورت تصادفی با اندازه N که همان تعداد پارامترهای واسنجی است، تولید می‌شود. در مرحله بعد می‌بایست این ذرات اولیه با استفاده از توابع هدف مورد ارزیابی قرار گیرد. در ادامه، مجموعه آرشیو (خارجی) اولیه (A_0) برابر با تهی و مجموعه نقاط حدی اولیه (Z_0) تشکیل می‌شود که لازم به ذکر است تعداد اعضای مجموعه آرشیو نباید بیش از یک مقدار مشخص، که در ابتدای الگوریتم مشخص می‌شود، باشد. در این مرحله ذرات اولیه ارزیابی شده و جوابهای نامغلوب به مجموعه آرشیو اضافه می‌شود. پس از آن می‌بایست مجموعه نقاط مرجع با گسترش مناسب و به وسیله تکنیک NBI¹ ساخته شود که در ادامه نحوه ایجاد آن توضیح داده خواهد شد. در ادامه یک سری مراحل تکراری انجام خواهد شد. این مراحل تکراری به شرح زیر می‌باشد:

- ۱- انتخاب بهترین موقعیت فردی و اجتماعی برای ذرات با استفاده از مجموعه آرشیو خارجی و حرکت ذرات در فضای پاسخ،
- ۲- انجام جهش توانی^{۱۱} به اندازه ۱۵٪ برای بهبود وضعیت تنوع جوابها و اجتناب از همگرایی زودرس،
- ۳- ارزیابی جوابهای جدید، اضافه کردن جوابهای نامغلوب به مجموعه آرشیو و هرس کردن آرشیو (حذف برخی از جوابهای نامغلوب).

تفاوت اصلی الگوریتم بهینه‌سازی ذرات با توابع هدف متعدد با بهینه‌سازی چندهدفه در نحوه انتخاب بهترین ذره اجتماعی از میان ذرات نامغلوب ذخیره شده در مجموعه آرشیو می‌باشد. برای این منظور لازم است یک روش اندازه‌گیری و تناسب برای تمایز مابین اعضای آرشیو طراحی شود. با این توجه، الگوریتم MaOPSO بر روی دو معیار تنوع و همگرایی به صورت توأمان تمرکز دارد که مبتنی بر ساخت مجموعه نقاط مرجع است. مجموعه نقاط مرجع کمک می‌کند پاسخها علاوه بر اینکه به سمت پاسخ بهینه پرتو نزدیک شوند، از توزیع مناسبی برخوردار باشند. این نقاط به صورت یک مجموعه نقاط گسترده روی یک ابرصفحه^{۱۲} در فضای هدف تعیین می‌شوند. این ابرصفحه در ربع یک فضای مختصاتی قرار گرفته و نسبت به هر کدام از محورها دارای زاویه یکسان می‌باشد. در هر محور مابین 0 و 1، تعداد P نقطه تعیین شده و از تقاطع این نقاط روی ابرصفحه نقاط مرجع به دست می‌آید. تعداد نقاط مرجع به صورت انتخاب P عدد از $P+m-1$ عدد $(H = \binom{P+m-1}{P})$ بوده که m بیانگر تعداد محورها یا بعد فضای هدف است. به عنوان مثال در فضای سه‌بعدی، ابرصفحه یک صفحه است که از نقاط $(0,0,0)$ ، $(1,0,0)$ و $(0,1,0)$ عبور کرده و با در نظر

الگوریتم توانایی حل دو معضل مهم پارامترها یعنی همگرایی و تنوع در الگوریتم‌های بهینه‌سازی است. به همین منظور در ابتدا به جهت ارزیابی عملکرد الگوریتم با استفاده از محاسبه معیارهای GD و IGD در طول اجرای مدل و در مقایسه با الگوریتم MOPSO انجام شد که کمتر بودن این دو مقدار در الگوریتم این پژوهش نمایانگر ناتوانی الگوریتم MOPSO در تعیین پاسخها با همگرایی و تنوع مناسب این مسئله دارد. به علاوه و به جهت بررسی این همگرایی و تنوع پاسخها در الگوریتم MaOPSO، نمودار جعبه‌ای تغییرات دو پارامتر نمونه برای یکی از اعضای مجموعه نامغلوب الگوریتم ترسیم شد که همگرایی مقادیر پس از اجرای مدل و در برگرفتن محدوده مناسبی از پاسخها به معنای عملکرد مناسب تنوع مشاهده شد. رسم نمودار جعبه‌ای مقدار توابع هدف یکی از اعضای مجموعه نامغلوب نشان داد که مقدار تابع هدف در طول اجرا به سمت مقدار یک (مقدار بهینه رابطه نش-ساتکلیف) سوق داده شده است. با این توجه عملکرد الگوریتم MaOPSO این پژوهش در مقایسه با الگوریتم MOPSO و همچنین بررسی شهودی عملکرد همگرایی و تنوع پاسخها مطلوب ارزیابی شد.

۵- پیوست- الگوریتم بهینه‌سازی ذرات با توابع هدف متعدد (MaOPSO)

برای بررسی برتری یک تابع هدف نسبت به تابع هدف دیگر زمانی که تعداد توابع هدف از یک بیشتر می‌شود، به دلیل عدم کاربرد عملگرهای ریاضیاتی بزرگ‌تر یا کوچک‌تر، از مفهوم غلبه پرتو^{۱۳} استفاده می‌شود. بر اساس این مفهوم راه حل x بر راه حل y در صورتی غلبه می‌کند که:

$$\forall i \in 1,2,\dots,m, f_i(x) \leq f_i(y) \quad (4)$$

$$x \prec y \Leftrightarrow \exists j \in 1,2,\dots,m, f_j(x) < f_j(y)$$

با این تعریف بردار x^* از مجموعه فضای راه‌حل‌ها به عنوان بهینه پرتو و نامغلوب شناخته می‌شود اگر:

$$\nexists x: x \prec x^* \quad (5)$$

اگر فضای جستجو یک فضای D -بعدی در نظر گرفته شود، موقعیت i -امین ذره از مجموعه ذرات و سرعت آن در تکرار n -ام را می‌توان به ترتیب به صورت دو بردار D -بعدی $X_i^n = (x_{i1}^n, x_{i2}^n, \dots, x_{iD}^n)^T$ و $V_i^n = (v_{i1}^n, v_{i2}^n, \dots, v_{iD}^n)^T$ نمایش داد. بهترین موقعیت را که ذره i -ام که سابقاً آن را تجربه کرده است با $P_i^n = (p_{i1}^n, p_{i2}^n, \dots, p_{iD}^n)^T$ و بهترین موقعیت اجتماعی ذرات با $P_g^n = (p_{g1}^n, p_{g2}^n, \dots, p_{gD}^n)^T$ نمایش داده می‌شود. سرعت و موقعیت ذره در تکرار بعدی مطابق با رابطه‌های ۶ و ۷ به دست می‌آید:

$$v_{id}^{n+1} = wv_{id}^n + cr_1^n (p_{id}^n - x_{id}^n) + cr_2^n (p_{gd}^n - x_{id}^n) \quad (6)$$

گرفتن تعداد تقاطع ۴، تعداد نقاط مرجع برابر ۱۵ به دست می‌آید. نقاط مرجع به صورت $\Lambda = \{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_H\}$ نمایش داده می‌شود.

در ابتدا، نقطه ایده‌آل مسأله، $Z^* = (f_1^*, f_2^*, \dots, f_m^*)$ ، به صورت مقدار کمینه مقادیر هر کدام از توابع هدف، f_i^* ، تعریف می‌شود. اگر مقدار نقطه ایده‌آل مسأله Z^* شناخته شده باشد، به صورت مستقیم برآورد می‌شود. در غیر این صورت نیاز است تا مقدار آن از مجموعه آرشیو تخمین زده شود. مقدار تخمین نقطه ایده‌آل $f_j^{\min} = \min_{i \in A_t} f_j(x_i)$ به صورت $Z^{\min} = (f_1^{\min}, f_2^{\min}, \dots, f_m^{\min})$ به ازای هر کدام از مقادیر $j=1, \dots, m$ به دست می‌آید. پس از تعیین نقطه ایده‌آل، Z^* مقدار هر یک از جواب‌های فضای آرشیو (A_t) ترجمه شده و مقدار f_i^* از مقدار f_i کم می‌شود. بنابراین پس از انجام این عمل مقدار ایده‌آل در فضای آرشیو یک بردار صفر می‌شود. در نتیجه مقدار تابع هدف i -ام به صورت رابطه ۸ خواهد بود:

$$f'_i(x) = f_i(x) - f_{i_{\min}} \quad (8)$$

مجموعه Z_t متشکل از m جواب حدی از تمامی جواب‌هایی که تا مرحله t -ام در مجموعه آرشیو قرار گرفته‌اند، محاسبه می‌شود. جواب $i \in A_t \cup Z_{t-1}$ اگر مقدار تابع خوشه‌بندی (ASF) را کمینه کند، یک پاسخ حدی در راستای محور j خواهد بود. تابع خوشه‌بندی به شرح رابطه ۹ به دست می‌آید:

$$ASF(x_i, \lambda_j) = \max_{k=0}^m f'_k(x_i) / \lambda_{jk}, \quad (9)$$

$$\forall i \in A_t \cup Z_{t-1}$$

λ_j یک بردار یکتا است که با استفاده از رابطه ۱۰ به دست می‌آید:

$$\lambda_j = (\lambda_{j1}, \lambda_{j2}, \dots, \lambda_{jm}) \begin{cases} \lambda_{jk} = 0, j \neq k \\ \lambda_{jk} = 1, j = k \end{cases} \quad (10)$$

$$k \in \{1, 2, \dots, m\}$$

همچنین Z_{t-1} مجموعه مقادیر جواب‌های حدی در مرحله قبلی می‌باشد. با استفاده از این استراتژی همه جواب‌های موجود در مجموعه آرشیو برای بروزرسانی مقادیر جواب‌های حدی Z_t بکار گرفته می‌شود. با استفاده از m بردار موجود در مجموعه جواب‌های حدی Z_t ، ابر صفحه جدید در فضای هدف ساخته می‌شود. مقادیر H نقطه مرجع در ابر صفحه با استفاده از مقادیر واحد در محورهای مختصات و تصویر کردن آن‌ها روی ابر صفحه جدید محاسبه شده و این نقاط مرجع جدید به صورت $\Lambda' = \{\lambda'_1, \lambda'_2, \dots, \lambda'_H\}$ نمایش داده می‌شود که هر کدام از مقادیر λ'_j تصویر شده λ_j روی ابر صفحه جدید خواهد بود.

یکی از مهم‌ترین جنبه‌های الگوریتم‌های ارائه شده برای حل مسائل با توابع هدف متعدد، حل مشکل تنوع پاسخ‌های به دست آمده است. در این زمینه و در الگوریتم مورد استفاده در این پژوهش از عملگر چگالی برای تخمین تنوع بر مبنای الگوریتم دسته‌بندی استفاده شده است. در این راستا لازم است تمامی جواب‌های موجود در A_t روی ابر صفحه‌ای که اخیراً ساخته شد، تصویر شود و پس از آن هر کدام از جواب‌های تصویر شده به نزدیکترین نقطه مرجع نسبت داده شود. در نتیجه برای هر کدام از نقاط مرجع یک دسته از جواب‌ها وجود خواهد داشت. اگر $F(x_i)$ را به عنوان تصویر بردار تابع هدف $F(x_i)$ از جواب $i \in A_t$ روی ابر صفحه جدید در نظر گرفته شود، دسته Φ_j از نقطه مرجع j روی ابر صفحه به صورت رابطه ۱۱ تعریف می‌شود:

$$(11)$$

$$\Phi_j = \{i \in A_t \mid \|F'(x_i) - \lambda'_j\| \leq \|F'(x_i) - \lambda'_k\|, \forall \lambda'_k \in \Lambda'\}$$

از آنجایی که دسته هر کدام از نقاط مرجع به این طریق محاسبه می‌شود، می‌توان چگالی اطراف هر کدام از نقاط مرجع را با اندازه‌گیری تعداد جواب‌های موجود در آرشیو که به آن نسبت داده می‌شود، سنجید. بر این اساس مقدار چگالی μ_i از جواب $i \in A_t$ اندازه دسته نقطه مرجعی خواهد بود که این جواب در آن دسته قرار دارد ($i \in \Phi_k \Rightarrow \mu_i = |\Phi_k|$). مقدار عملگر همگرایی که برای اندازه‌گیری همگرایی استفاده شده است، که در ادامه نحوه محاسبه آن تشریح می‌شود. برای هر نقطه مرجع λ_j در Λ مقدار ASF هر جواب از مجموعه آرشیو (رابطه ۷) که به این نقطه مرجع نسبت داده می‌شود، محاسبه می‌شود. مقدار ASF هر جواب i در مجموعه آرشیو مقدار همگرایی آن خواهد بود که به صورت ρ_i نمایش داده می‌شود که به صورت ریاضیاتی در رابطه ۱۲ نمایش داده شده است.

$$i \in \Phi_j, \rho_i = ASF(x_i, \lambda_j) \quad (12)$$

انتخاب بهترین موقعیت اجتماعی با استفاده از مجموعه آرشیو صورت گرفته و به دو روش امکان‌پذیر است. به همین منظور فضای دسته ذرات S_t به دو زیردسته ذرات \bar{S}_1^t و \bar{S}_2^t تقسیم می‌شود. برای زیردسته ذرات اول، \bar{S}_1^t ، رهبر انتخابی برای ذرات، جواب‌های حدی واقع در مجموعه آرشیو خواهند بود. هدف از این روند انتخاب رهبر، جستجوی جواب‌های حدی نزدیک به بهینه پرتو می‌باشد. بر این اساس ابر صفحه‌ای که در هر مرحله اجرا ساخته می‌شود، به سمت نزدیک شدن به بهینه پرتو خواهد رفت و موجب بهبود همگرایی خواهد شد. برای این منظور $e_1 \in A_t$ یک جواب در مجموعه آرشیو متناظر با جواب حدی در تابع هدف f_1 و $e_2 \in A_t$ جواب حدی تابع هدف f_2 و نظیر آن در نظر گرفته می‌شود. بر این اساس مجموعه $\Psi = \{e_1, e_2, \dots, e_m\}$ ($\Psi \in A_t$) از m جواب حدی برای هر کدام از تابع‌های هدف تشکیل شده است.

مجموعه آرشیو حذف می‌شود. سپس، در صورتی که اندازه مجموعه آرشیو از مقدار بیشینه اندازه تعیین شده تجاوز کند، در آن صورت باید هرس شود. برای این منظور از عملگر چگالی و همگرایی برای مقایسه جواب‌های موجود در مجموعه آرشیو همانند روش مورد استفاده در انتخاب بهترین موقعیت اجتماعی استفاده می‌شود. برای این کار، در ابتدا مقدار چگالی ذرات مقایسه شده و در صورتی که این مقدار برابر باشد، سپس با مقایسه عملگر همگرایی، جواب بدتر مشخص و حذف می‌شود. با توجه به اینکه مقدار عملگر همگرایی یک مقدار حقیقی است می‌توان بدترین ذره را شناسایی کرد. لازم است مقدار چگالی همه جواب‌های متعلق به دسته‌ای که جوابی از آن حذف شده است، به اندازه یک واحد کاهش یابد. کاهش تعداد جواب‌های مجموعه آرشیو تا آنجایی ادامه می‌یابد که اندازه مجموعه آرشیو با مقدار بیشینه مجاز برابر گردد.

پی‌نوشت‌ها

- 1- Metaheuristic Algorithm
- 2- Multi-Objective Optimization
- 3- Pareto-Optimal Solutions
- 4- Convergence
- 5- Diversity
- 6- Many Objective Optimization
- 7- Variogram Analysis of Responses Surface
- 8-Nash-Sutcliffe Efficiency
- 9- Pareto Dominance
- 10- Normal Boundary Intersection
- 11- Polynomial Mutation
- 12- Hyperplane
- 13- Achievement Scalarizing Function

۶- مراجع

- Chand S and Wagner M (2015) Evolutionary many-objective optimization: A quick-start guide. Surveys in Operations Research and Management Science. Elsevier Ltd 20(2):35-42
- Deb K and Jain H (2013) An evolutionary many-objective optimization algorithm using reference-point based non-dominated sorting approach, Part I: Solving Problems with Box Constraints. Ieeexplore.Ieee.Org 18(c):1-1
- Figueiredo EMN, Ludermir TB, and Bastos-Filho CJA (2016) Many objective particle swarm optimization. Information Sciences. Elsevier Inc. 374:115-134
- Giuliani M, Herman JD, Castelletti A, and Reed P (2014) Many-objective reservoir policy identification and refinement to reduce policy inertia and myopia in water management. Water Resources Research 50(4):3355-3377

هر کدام از جواب‌های حدی موجود در Ψ به یکی از ذرات موجود در دسته ذرات \bar{S}_1^t تعلق می‌گیرد که در این زمینه به صورت تقریبی به تعداد $\left\lfloor \frac{|\bar{S}_1^t|}{m} \right\rfloor$ ذره در \bar{S}_1^t دارای جواب حدی مجزا در Ψ به عنوان رهبر می‌باشند. نتیجه این کار، تقسیم دسته ذرات \bar{S}_1^t به m زیر دسته با تعداد ذرات تقریباً یکسان خواهد بود بطوری که به دنبال جواب حدی مجزا در Ψ اند. بنابراین هر کدام از زیردسته‌های m -تایی به صورت خاص در حال جستجوی جواب حدی نزدیک به بهینه پرتو خواهند بود. انگیزه انتخاب جواب‌های حدی به عنوان رهبر این است که به همگرایی فشار وارد شده و بهینه پرتو پوشش داده شود. در زیردسته ذرات دوم، \bar{S}_2^t ، از روش انتخاب رقابتی روی جواب‌های مجموعه آرشیو استفاده شده است که تعداد اعضای رقابت با تعداد توابع هدف برابرند. برای هر ذره $i \in \bar{S}_2^t$ روش انتخاب رقابتی اجرا می‌شود، به این صورت که یک جواب $j \in A_t$ در صورتی بهتر از جواب $k \in A_t$ خواهد بود که در مرحله اول مقدار چگالی کمتری داشته باشد ($\mu_j < \mu_k$). در صورتی که $\mu_j = \mu_k$ باشد، با استفاده از مقدار همگرایی، انتخاب جواب بهتر صورت می‌گیرد. بنابراین در صورت برقراری تساوی، در صورتی که $\rho_j < \rho_k$ ، جواب j و در غیر این صورت جواب k انتخاب می‌شود.

پس از انتخاب بهترین نقطه اجتماعی لازم است بهترین نقطه فردی هم برای هر ذره انتخاب شود. برای این مهم بهترین موقعیت فردی هر جواب در ابتدای اجرای الگوریتم، همان موقعیت ابتدایی هر ذره در فضای جستجو می‌باشد. پس از آن موقعیت فعلی هر ذره با بهترین موقعیت فردی مقایسه شده و در صورتی که موقعیت فعلی بر بهترین موقعیت فردی غلبه کند، موقعیت فعلی به عنوان بهترین موقعیت فردی انتخاب می‌شود. در صورتی که موقعیت فعلی و بهترین موقعیت فردی قابل مقایسه نباشند، فاصله آن‌ها تا نقطه ایده‌آل محاسبه شده و جوابی که دارای فاصله کمتری باشد به عنوان بهترین موقعیت فردی جدید انتخاب می‌گردد. این روش انتخاب بهترین موقعیت فردی موجب بهبود وضعیت همگرایی خواهد شد.

پس از اینکه بهترین موقعیت فردی و اجتماعی هر جواب از مجموعه آرشیو انتخاب شد، مدیریت مناسب مجموعه آرشیو مهم است و تأثیر قابل توجهی روی عملکرد الگوریتم دارد. برای این منظور، در ابتدای هر مرحله از اجراء، هر ذره نامغلوب از مجموعه ذرات S_t به مجموعه آرشیو اضافه می‌شود. اگر هر کدام از این جواب‌های نامغلوب توسط هر کدام از جواب‌های موجود در مجموعه آرشیو مغلوب شود، آن ذره از فضای آرشیو خارج خواهد شد و بالعکس اگر جوابی از فضای آرشیو توسط جواب‌های نامغلوب تازه اضافه شده مغلوب شود، آن جواب از

- Reed PM, Hadka D, Herman JD, Kasprzyk JR, and Kollat JB (2013) Evolutionary multiobjective optimization in water resources: The past, present, and future. *Advances in Water Resources* 51:438-456
- Reed PM and Kollat JB (2012) Save now, pay later? Multi-period many-objective groundwater monitoring design given systematic model errors and uncertainty. *Advances in Water Resources* 35:55-68
- Trindade BC, Reed PM, Herman JD, Zeff HB, and Characklis GW (2017) Reducing regional drought vulnerabilities and multi-city robustness conflicts using many-objective optimization under deep uncertainty. *Advances in Water Resources* 104:195-209
- Xie S, Du J, Zhou X, Zhang X, Feng X, Zheng W, Li Z, and Xu CY (2018) A progressive segmented optimization algorithm for calibrating time-variant parameters of the snowmelt runoff model (SRM). *Journal of Hydrology* 566:470-483
- Zamanipour M, Saadatpour M, and Zahabiyou B (2019) Simulation-optimization approach based on meta-model in optimal design of inter-basin water transfer system. *Iran-Water Resources Research* 15(1):381-384
- Zhang J, Wu Z, Cheng C, and Zhang S (2011) Improved particle swarm optimization algorithm for multi-reservoir system operation. *Water Science and Engineering*. Hohai University, Production and hosting by Elsevier B.V. 4(1):61-74
- Gupta VK and Soroosh S (1998) Toward improved calibration of hydrological models: Multiple and noncommensurable measures of information. *Water Resources Research* 34(4):751-763
- Haghighat M, Nikoo MR, Parvinnia M, and Taravat Roy N (2019) Multi-objective simulation-optimization for reservoir quality-quantity management with selective withdrawal and model Fusion. *Iran-Water Resources Research* 15(1):280-298 (In Persian)
- Loucks DP, van Beek E, Stedinger JR, Dijkman JPM, and Villars MT (2005) Water resources systems planning and management and applications: An Introduction to methods, models and applications. Water, Paris: UNESCO. doi: 92-3-103998-9
- Mahab Ghodss Consulting Engineering Co. (2013) Comprehensive Water Resource Scheme of Urmia Lake Basin (In Persian)
- Matrosov ES, Huskova I, Kasprzyk JR, Harou JJ, Lambert C and Reed PM (2015) Many-objective optimization and visual analytics reveal key trade-offs for London's water supply. *Journal of Hydrology* 531:1040-1053
- Olofintoye O, Adeyemo J, and Otieno F (2013) Evolutionary algorithms and water resources optimization. *Advances in Intelligent Systems and Computing* 175 ADVANC:491-504
- Razavi S (2016) VARS-Tool: A comprehensive, efficient, and robust toolbox for global sensitivity analysis. (June):1-10