

Optimization of Water Delivery Schedule in Reduced Allocation Scenarios of Zarineroad Irrigation Network Using PSO Algorithm

SAIFOLLAH KHODADADI¹, MEHDI YASI^{2*}, MOHAMMAD JAVAD MONEM³

1. Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran.

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

3. Department of Hydraulic Structures, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

(Received: Jan. 12, 2021- Revised: Apr. 16, 2021- Accepted: Apr. 24, 2021)

ABSTRACT

Optimization of operational performance in irrigation networks is essential for increasing water consumption efficiency in Urmia Lake Basin and its restoration. Various optimization algorithms have been developed. In this research, PSO algorithm with the ability of swarm intelligence and convergence speed was used to optimize the water delivery schedule of Zarineroad left bank Irrigation Network in two reduced water allocation scenarios. The first scenario follows the Urmia Lake Restoration Plan (ULRP) based on the reduction of agricultural water consumption by 40%; and the second scenario focuses on the delivery of 70% to 90% of network water demand. Suitable values of model parameters have been determined by sensitivity analysis, and used in the modeling of two scenarios. Results of the first scenario indicated that, with supplement of 66% of water demand, the feasibility of 9% increase in water efficiency, 30% and 38% increase in the stability and adequacy indices can be achieved, respectively. In the second scenario, with 82% supply of water demand; the efficiency, stability and adequacy indices could be increased by 25%, 32% and 42%, respectively. The second scenario is recommended due to the gradually reduction of water allocation and greater values of the performance indices, while preserving the dependability and trust of water-users in the Zarineroad irrigation network.

Keywords: Water Delivery Schedule, Particle Swarm Optimization (PSO) Algorithm, Zarineroad Irrigation Network, Urmia Lake.

بهینه‌سازی الگوی تحویل آب در سناریوهای کاهش تخصیص آب شبکه آبیاری زرينه‌رود با استفاده از الگوریتم PSO

سیف‌الله خدادادی^۱، مهدی یاسی^{۲*}، محمدجواد منعم^۲

۱. گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران.

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

۳. گروه سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۰/۲۳ - تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۱/۲۷ - تاریخ تصویب: ۱۴۰۰/۲/۴)

چکیده

بهینه‌سازی عملکرد بهره‌برداری شبکه‌های آبیاری سطحی از ملزومات اساسی افزایش بهره‌وری مصرف آب در حوضه دریاچه ارومیه برای احیاء آن است. الگوریتم‌های متعددی برای بهینه‌سازی توسعه یافته‌اند که در این تحقیق، الگوریتم فراکوشی رفتار جمعی ذرات با قابلیت هوش جمعی، حافظه ذرات و نیز سرعت بالای همگرایی، برای بهینه‌سازی الگوی تحویل آب انشعابات ساحل چپ شبکه زرينه‌رود طی دو سناریوی کمبود آب، بکار گرفته شد. در سناریوی اول امکان بهبود زمانی و مکانی الگوی تحویل آب برای اجرایی نمودن مصوبه کاهش ۴۰ درصدی مصارف آب کشاورزی ستاد احیاء دریاچه ارومیه؛ و در سناریوی دوم شرایط تأمین کمینه ۷۰ و بیشینه ۹۰ درصد نیاز آبی شبکه مدل شده است. مقادیر مناسب پارامترهای مدل با تحلیل حساسیت تعیین گردید، و در مدل‌سازی دو سناریو استفاده شد. نتایج بدست آمده از سناریوی اول بیانگر تأمین ۶۶ درصد نیاز آبی، ارتقاء ۹ درصدی شاخص راندمان، و افزایش ۳۰ و ۳۸ درصدی شاخص‌های پایداری و عدالت توزیع است. در سناریوی دوم، ۸۲ درصد نیاز آبی تأمین شده و شاخص‌های راندمان، پایداری و عدالت توزیع به ترتیب تا ۲۵، ۳۳ و ۴۲ درصد افزایش یافتند. سناریوی دوم بدلائل کاهش تدریجی آب تحویلی و بهبود مقادیر شاخص‌های عملکرد، با حفظ آستانه اعتمادپذیری و اطمینان بیشتر بهره‌برداران شبکه، گزینه برتر این تحقیق می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: الگوی تحویل آب، الگوریتم رفتار جمعی ذرات (PSO)، شبکه آبیاری زرينه‌رود، دریاچه ارومیه.

مقدمه

مستلزم بهبود این شاخص‌ها از طریق بهینه‌سازی الگوی تحویل آب می‌باشد (Sargazi and Ghavidel, 2017). تاکنون روش‌ها و الگوریتم‌های مختلفی برای بهینه‌سازی مسائل حوزه آب مورد استفاده قرار گرفته است. از جمله در پژوهش Hosseini et al. (2020) که برای مدیریت توامان منابع آب سطحی و زیرزمینی و افزایش تاب‌آوری کشاورزان در مقابل کم‌آبی با پیش‌بینی قیمت محصولات کشاورزی شبکه آبیاری و زهکشی دشت قزوین انجام گرفته، از الگوریتم ژنتیک^۱ (GA) برای بهینه‌سازی الگوی توزیع آب و الگوی کشت و قیمت محصولات استفاده شده است و نتایج آن بیانگر افزایش ۱۶۰ درصدی درآمد شبکه نسبت به وضعیت کنونی بوده است.

از دیگر روش‌های بهینه‌سازی، الگوریتم فراکوشی رفتار جمعی ذرات (PSO^۲) است که اساس آن بر تکرار کاوش جمعیتی از ذرات تصادفی هوشمند است (Kennedy and Eberhart, 1995). این الگوریتم اساساً برای حل مسائل بهینه‌سازی یک و

بخش قابل توجهی از آب کشاورزی بصورت ثقلی در شبکه کانال - های آبیاری توزیع می‌شود. وجود عوامل متعددی از جمله نقص در طراحی، ضعف در اجرای فیزیک شبکه (مثل ظرفیت کانال‌ها، نوع سازه‌های تنظیم و کنترل جریان)، نظام بهره‌برداری یا الگوی نامناسب تحویل و توزیع آب، سبب تلفات آب بصورت ماندابی در بالادست شبکه و عدم تأمین مطمئن آب پایین‌دست شبکه می‌شود. تطابق نداشتن الگوی تحویل آب با نیاز آبی هر بخش آبیاری، سبب کاهش رضایت و مشارکت بهره‌برداران، توزیع ناعادلانه آب و در نتیجه ضعف عملکرد بهره‌برداری شبکه می‌شود (Monem & Noori., 2010; Khoshnavaz 2019). از دیدگاه بهره‌برداری، عملکرد شبکه با شاخص‌های ارزیابی عملکرد بهره‌برداری شامل: کفایت، راندمان، عدالت و پایداری و گاه‌آ ترکیبی از این شاخص‌ها ارزیابی می‌شود (Molden and Gates, 1990). ارتقا عملکرد شبکه

با صفر قرار دادن قطر لوله‌های اضافی طی فرایند جستجو، آرایش بهینه‌ای از شبکه و قطر لوله‌ها را ارائه می‌دهد. کاربرد الگوریتم PSO در کانال amx شبکه آبیاری سطحی ورامین، با هدف توزیع بهینه آب، ظرفیت کانال اصلی را $1/64$ مترمکعب در ثانیه بدست داده است. این نتایج در مقایسه با روش SA، بیانگر امکان کاهش ظرفیت کانال به میزان 320 لیتر در ثانیه (از $1/96$ به $1/64$ مترمکعب در ثانیه) و سرعت همگرایی بالای روش PSO بوده است (Monem and Nouri, 2010). همچنین عملکرد الگوریتم PSO در ارائه برنامه بهینه تحویل آب کانال اردیبهشت شبکه درودزن استان فارس با اهداف حداکثر دبی کانال اصلی، حداکثر زمان تکمیل برنامه آبیاری و تعداد تنظیمات دریچه سراب، نسبت به روش GA بهتر بوده است (Ghaderi and Goruhi, 2016). تحقیق پیش‌رو نیز با عنایت به وضعیت بحرانی دریاچه ارومیه و نقش موثر رودخانه زربینه‌رود در تأمین 42 درصدی آورد آب سطحی دریاچه و نیز وسعت قابل توجه دشت زربینه رود به بهینه‌سازی الگوی تحویل آب شبکه مزبور می‌پردازد. خصوصاً اینکه نتیجه ارزیابی عملکرد بهره‌برداری این شبکه در پژوهش (Khodadadi et al, 2017)، نشان‌دهنده ضعف عملکرد بوده، این ضرورت دوچندان است. بدین منظور الگوریتم PSO برای بهبود زمانی و مکانی الگوی تحویل در دو سناریو بکار گرفته شد. سناریوی اول شرایط تأمین 60 درصد تیاژ آبی شبکه (کاهش تخصیص برای اجرایی نمودن مصوبه کاهش 40 درصدی مصارف آب کشاورزی ستاد احیاء دریاچه ارومیه) و سناریوی دوم شرایط تأمین کمینه 70 و بیشینه 90 درصد نیاز آبی انشعابات شبکه را مدل‌سازی می‌کند.

ارزیابی و بهینه‌سازی عملکرد یک شبکه آبیاری از دیدگاه‌های مختلف در سطوح و مقیاس‌های متفاوت، قابل انجام است. این تحقیق برخلاف مسائل بهینه‌سازی متداول در علوم مهندسی آب که به بیشینه‌سازی سود و تولید محصول یا کمینه‌سازی هزینه می‌پردازند؛ با در نظرگیری نقش محوری تشکل‌های آب‌بران به عنوان حلقه واسط در مدیریت توزیع و تعریف شاخص‌های عملکرد از دیدگاه یاد شده، در قالب توابع هدف از یک طرف و اعمال محدودیت‌های شرایط تخصیص آب از طرف دیگر راهکاری برای رفع تعارض و تعادل منافع دو بخش مصرف‌کننده و تأمین‌کننده آب در شبکه‌های آبیاری ارائه می‌دهد که در آن ترکیبی از اهداف بیشینه‌سازی می‌شود. وجه تمایز دیگر این تحقیق، مدل‌سازی الگوی تحویل بهینه در دو سناریوی کاهش تخصیص آب می‌باشد.

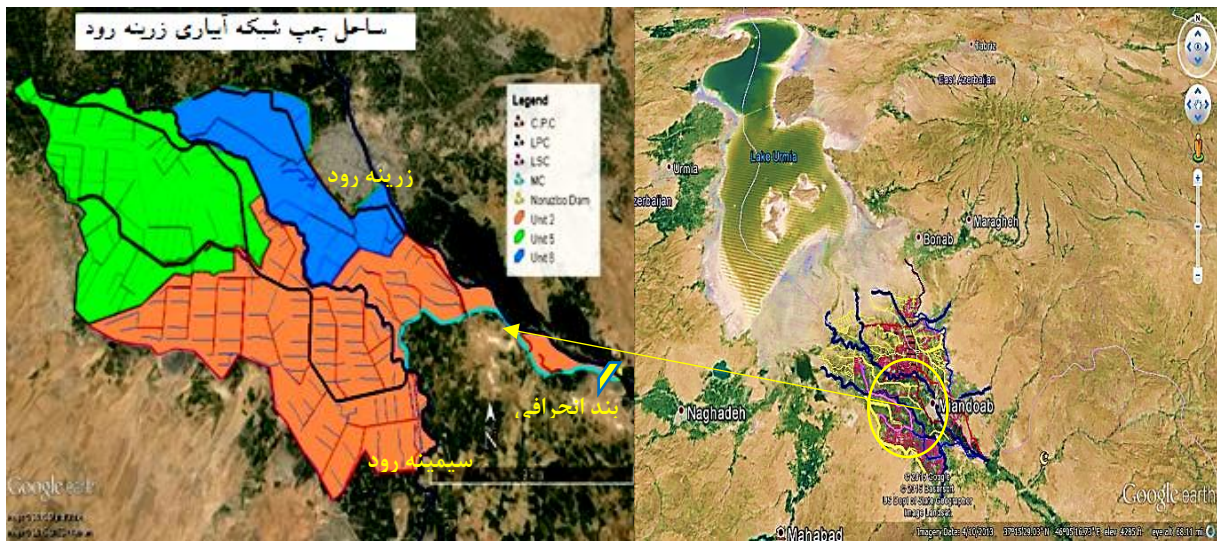
چندهدفه با متغیرهای پیوسته استفاده شده است. در تحقیق Rezaie et al., (2020) که برای تحلیل دومتغیره ریسک خشکسالی در منطقه غرب و شمالغرب ایران انجام گرفته، از الگوریتم PSO به عنوان نوآوری برای تعیین بهینه ضرایب شاخص‌های خشکسالی استفاده شده است. قابلیت‌های به دام نیافتادن در بهینه‌های محلی و سرعت همگرایی به بهینه سراسری، به اضافه ارائه مجموعه‌ای از جواب‌ها بجای تنها یک جواب در حالت چندهدفه، از جمله مزایای این الگوریتم است (Dolatshahizand and Mehdiipur and Fallah, 2012; Damghani, 2015) و بر خلاف روش الگوریتم ژنتیک به جمعیت اولیه جستجو حساس نیست (Moghaddasi et al., 2008). در علوم مهندسی آب، الگوریتم رفتار جمعی ذرات به تنهایی یا در تلفیق با مدل‌های مختلف شبیه‌سازی و بهینه‌سازی با یک هدف (PSO) و یا چندهدفه (MOPSO) مورد استفاده قرار گرفته است. از جمله تحقیقات، بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخازن سدهای چندمنظوره (Baltar and Fontane, 2004; Azadnia and Zahraie, 2010) بهره‌برداری از ایستگاه‌های پمپاژ آب (Rajabpur and Afshar, 2008)، سیستم‌های کنترل سیلاب (Roobahani et al., 2008) و تخصیص بهینه منابع آب (Meraji et al., 2015; Zoltay, 2010; Khodaverdi et al., 2019) برای طراحی بهینه شبکه پایش آب زیرزمینی دشت نیشابور، مدل چندهدفه الگوریتم PSO را با هدف کاهش تعداد چاه‌های اندازه‌گیری بدون کاهش دقت اطلاعات استفاده کرده‌اند. در این راستا توابع هدف بصورت کمینه‌سازی همزمان ریشه میانگین مربعات خطا و تعداد چاه‌های پایش تعریف شد که نتیجه آن ارائه دامنه‌ای از جواب‌ها با ترکیبی از خطا و تعداد چاه‌های اندازه‌گیری بود. مطابق نتایج در نقطه بهینه برای دشت نیشابور، امکان کاهش 58 درصدی تعداد چاه‌ها با حداقل افزایش خطا حاصل شده است.

بهبود قابلیت جستجو و سرعت همگرایی این الگوریتم در مقایسه با الگوریتم‌های بهینه‌ساز دیگر مثل الگوریتم ژنتیک (GA)، روش تبرید SA^2 و الگوریتم مورچگان ACO^3 در تحقیقات (Azarafza (2012) و Rezaie et al. (2017) گزارش و تأیید شده است. در شبکه‌های آبیاری، (Kashkoul (2009) برای بهینه‌سازی همزمان آرایش و قطر لوله‌ها در شبکه‌های آبیاری تحت فشار، از الگوریتم بهینه‌ساز فراکوشی PSO و ACO با رویکرد حذفی استفاده کرده است بدین منظور بخش هیدرولیکی مدل EPANET در محیط MATLAB با الگوریتم PSO تلفیق و

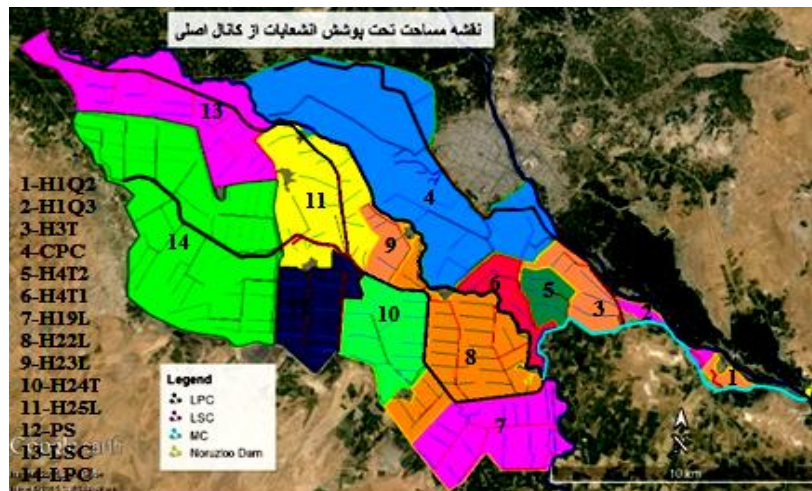
منطقه مطالعاتی

محدوده مطالعاتی تحقیق، واحدهای عمرانی ۲، ۵ و ۶ در ساحل چپ شبکه آبیاری و زهکشی زربینه رود بوده که در موقعیت جغرافیایی ۳۶°۵۰ تا ۳۷°۱۰' طول شرقی و ۴۵°۵۴' تا ۴۶°۱۵' عرض شمالی به مساحت حدود ۱۶۳۱۳ هکتار قرار دارد (شکل ۱). آب شبکه از طریق کانال اصلی به ظرفیت ۳۵ مترمکعب در ثانیه از ابتدای سد تنظیمی- انحرافی نورزولو (در ۱۵ کیلومتری

میاندوآب) تأمین و در انشعابات درجه دو توزیع می‌شود. موقعیت و وضعیت اجرایی شبکه کانال‌ها و انشعابات با پیمایش صحرائی و تطابق با نقشه‌های طراحی موجود، تدقیق و نقشه آن در نرم-افزارهای Google Earth و Arc GIS تهیه شد. با تعیین محل دریاچه‌های انشعاب درجه دو و شبکه کانال‌های فرعی، محدوده تحت پوشش هر انشعاب (مجموعاً ۱۴ انشعاب اصلی) مشخص شد که در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل ۱- موقعیت شبکه آبیاری و زهکشی زربینه رود و دریاچه ارومیه (Khodadadi et al., 2017)



شکل ۲- محدوده‌های تحت پوشش انشعابات درجه دو از ساحل چپ کانال اصلی (Khodadadi et al., 2017)

کسر گردید. الگوی خالص آب مورد نیاز بصورت حجم ماهانه مطابق جدول (۱) می‌باشد (Khodadadi et al., 2017).

الگوی آب تحویلی به شبکه

بدلیل اینکه نیاز آبی هر سال با توجه به الگوی محصولات کشت شده آن سال متفاوت است و همچنین میزان ذخیره مخزنی آب سطحی نزولات در هر سال متفاوت است با عنایت به تهیه نقشه

در این تحقیق برای برآورد الگوی آب مورد نیاز، ابتدا سطح و الگوی کشت محصولات در محدوده هر یک از انشعابات طی عملیات آماربرداری تعیین و عمق تبخیر تعرق منطقه مطالعاتی از سند ملی استخراج شد. سپس الگوی نیاز آب خالص با اعمال باران مؤثر و راندمان‌های انتقال و توزیع آب شبکه محاسبه شده و حجم برداشت سالانه آب زیرزمینی از چاه‌های مجاز هر محدوده

شبکه زرينه‌رود، براساس تحویل مدیریت امور منابع آب میاندوآب در سال ۱۳۹۴، از آرشيو فنی شرکت آب منطقه‌ای استان مطابق جدول (۲) استخراج شد.

کاداستر و الگوی کشت در زمان انجام این پژوهش (سال ۹۴)، برنامه ابلاغی سازمان آب منطقه‌ای برای رهاسازی آب سد در سال ۹۴ نیز بعنوان مبنای ارزیابی عملکرد توزیع و بهره‌برداری انتخاب شد. لذا برنامه توزیع سهمیه آب کانال‌های آبیاری ساحل چپ

جدول ۱- حجم ماهانه نیاز خالص آب (m³) در هر انشعاب از کانال اصلی ساحل چپ شبکه (Khodadadi et al., 2017)

انشعاب/ ماه	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور	مهر	آبان	جمع
H1Q2	۴۴۵۲۵	۸۵۸۲۹	۱۸۷۷۳۹	۲۵۶۳۶۸	۲۴۲۸۴۳	۱۹۰۸۶۹	۴۴۵۵۹	۹۳۸۱	۱۰۶۲۱۲۳
H1Q3	۴۴۷۸۸	۱۱۰۸۹۱	۲۱۵۶۰۱	۲۵۱۳۰۶	۲۳۴۶۳۴	۱۸۰۳۰۲	۵۴۵۸۲	۱۷۱۹۶	۱۱۰۹۳۰۰
H3T	۱۴۰۸۳۹	۴۱۵۰۲۸	۸۰۶۸۸۴	۹۹۰۳۴۷	۹۰۶۴۶۶	۶۶۳۸۱۰	۱۳۱۵۳۲	۶۰۱۳۰	۴۱۱۵۰۳۶
CPC	۷۸۸۲۷۰	۳۰۹۸۶۷۰	۷۷۸۸۱۱۳	۱۰۲۵۵۰۸۴	۹۵۳۰۳۲۰	۶۶۹۶۷۸۱	۱۸۴۶۵۷۶	۳۱۵۶۹۷	۴۰۳۱۹۵۱۱
H4T2	۱۰۶۱۶۷	۲۱۱۶۶۶	۴۶۳۷۲۷	۶۸۶۶۴۶	۶۳۶۴۶۸	۴۵۴۰۶۲	۱۹۲۶۰۶	۶۵۶۸۳	۲۸۱۷۰۲۵
H4T1	۱۸۴۱۱۰	۴۰۵۰۰۹	۸۹۹۹۰۶	۱۱۹۱۶۷۶	۱۱۲۲۷۷۱	۸۲۸۹۱۹	۳۳۰۵۱۸	۹۰۱۰۲	۵۰۵۳۰۱۱
H19L	۴۲۹۲۶۳	۱۳۸۴۶۷۹	۲۸۰۶۳۴۶	۳۰۳۵۹۶۳	۲۷۹۸۴۸۱	۲۱۲۸۴۹۶	۷۶۰۱۶۹	۳۱۰۹۷۳	۱۳۶۵۴۳۷۰
H22L	۵۸۴۱۴۱	۱۷۱۶۱۸۴	۳۴۷۶۲۷۶	۳۸۸۲۱۳۸	۳۵۵۰۱۶۳	۲۶۵۰۴۰۹	۹۸۱۸۳۲	۴۳۰۱۶۳	۱۷۲۷۱۳۰۶
H23L	۲۴۴۷۸۲	۹۲۷۴۵۶	۱۶۵۹۵۶۳	۱۶۰۸۷۳۴	۱۴۲۲۵۴۷	۱۰۵۸۰۷۱	۴۲۸۷۶۰	۲۸۹۰۸۵	۷۶۳۸۹۹۸
H24T	۱۰۶۶۸۰	۲۸۷۳۱۸	۶۹۷۱۸۷	۸۸۰۳۱۸	۸۳۳۲۶۰	۶۰۴۹۸۸	۲۱۸۴۵۳	۴۶۷۶۱	۳۶۶۴۹۶۵
H25L	۳۲۰۰۴۴	۱۰۴۳۷۴۸	۱۹۴۱۷۸۱	۲۰۲۳۷۰۹	۱۸۲۶۷۲۳	۱۳۵۹۲۹۵	۵۴۸۴۹۹	۳۰۴۸۳۷	۹۳۶۸۶۳۶
PS	۴۶۴۹۶۳	۱۴۹۵۹۹۵	۳۴۱۳۱۹۸	۴۰۹۱۸۷۱	۳۸۳۰۰۹۶	۲۹۰۳۵۵۷	۱۰۶۹۰۹۶	۲۷۲۵۷۷	۱۷۵۴۱۳۵۳
LSC	۵۱۸۵۴۴	۱۳۲۷۹۷۱	۲۶۲۶۰۹۷	۳۱۷۴۵۸۵	۲۹۶۰۷۲۷	۲۲۶۹۷۷۶	۹۱۲۰۷۷	۳۲۵۸۵۱	۱۴۱۱۵۶۲۸
LPC	۶۱۹۲۷۹	۲۱۳۵۸۵۱	۴۹۰۷۹۲۹	۵۷۱۷۳۴۹	۵۳۴۳۲۵۵	۴۰۲۵۵۹۶	۱۴۵۱۹۹۱	۳۹۳۱۷۸	۲۴۵۹۴۴۲۸
جمع	۴۵۹۶۴۰۵	۱۴۶۴۶۲۹۵	۳۱۸۹۰۳۴۷	۳۸۰۴۶۰۹۴	۳۵۲۲۸۷۵۴	۲۶۰۱۴۹۳۱	۸۹۷۱۲۵۰	۲۹۳۱۶۱۴	۱۶۸۳۲۵۶۹۰

جدول ۲- الگوی آب تحویلی (m³) به انشعابات محدوده مطالعاتی در سال ۱۳۹۴

انشعاب/ ماه	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور	جمع
H1Q2	۶۴۴۳۸	۸۹۵۲۲	۱۳۳۳۱۱	۱۴۸۱۳۴	۱۶۰۳۳۰	۵۹۵۷۳۵
H1Q3	۱۷۲۸۰۰	۲۱۶۰۰۰	۱۹۴۴۰۰	۱۹۴۴۰۰	۱۴۰۴۰۰	۹۱۸۰۰۰
H3T	۲۰۷۳۶۰	۲۵۹۲۰۰	۲۳۳۲۸۰	۲۳۳۲۸۰	۱۶۸۴۸۰	۱۱۰۱۶۰۰
CPC	۶۹۱۲۰۰۰	۸۶۴۰۰۰۰	۷۷۷۶۰۰۰	۷۷۷۶۰۰۰	۵۶۱۶۰۰۰	۳۶۷۲۰۰۰۰
H4T2	۱۵۲۰۶۴	۱۹۰۰۸۰	۱۷۱۰۷۲	۱۷۱۰۷۲	۱۲۳۵۵۲	۸۰۷۸۴۰
H4T1	۵۱۸۴۰۰	۶۴۸۰۰۰	۵۸۳۲۰۰	۵۸۳۲۰۰	۴۲۱۲۰۰	۲۷۵۴۰۰۰
H19L	۶۹۱۲۰۰	۸۶۴۰۰۰	۷۷۷۶۰۰	۷۷۷۶۰۰	۵۶۱۶۰۰	۳۶۷۲۰۰۰
H22L	۱۵۵۸۶۵۶	۱۹۴۸۳۲۰	۱۷۵۳۴۸۸	۱۷۵۳۴۸۸	۱۲۶۶۴۰۸	۸۲۸۰۳۶۰
H23L	۷۹۱۴۲۴	۹۸۹۲۸۰	۸۹۰۳۵۲	۸۹۰۳۵۲	۶۴۳۰۳۲	۴۲۰۴۴۴۰
H24T	۲۲۸۰۹۶	۲۸۵۱۲۰	۲۵۶۶۰۸	۲۵۶۶۰۸	۱۸۵۳۲۸	۱۲۱۱۷۶۰
H25L	۵۱۸۴۰۰	۶۴۸۰۰۰	۵۸۳۲۰۰	۵۸۳۲۰۰	۴۲۱۲۰۰	۲۷۵۴۰۰۰
PS	۱۱۴۰۴۸۰	۱۴۲۵۶۰۰	۱۲۸۳۰۴۰	۱۲۸۳۰۴۰	۹۲۶۶۴۰	۶۰۵۸۸۰۰
LSC	۲۷۰۹۵۰۴	۲۸۰۸۰۰۰	۳۰۴۸۱۹۲	۳۰۴۸۱۹۲	۲۲۰۱۴۷۲	۱۳۸۱۵۳۶۰
LPC	۱۸۰۱۸۰۲	۲۳۴۳۲۷۸	۱۹۶۶۲۰۹	۱۹۶۶۲۰۹	۱۳۵۵۹۹۰	۹۳۱۸۶۶۵
جمع	۱۷۴۶۶۶۲۴	۲۱۲۵۴۴۰۰	۱۹۶۴۹۹۵۲	۱۹۶۴۹۹۵۲	۱۴۱۹۱۶۳۲	۹۲۲۱۲۵۶۰

CPC و LSC به ترتیب ۳۹/۸ و ۱۴/۹ درصد و در مجموع بیش از نصف آب تحویلی سال را دریافت کرده‌اند در حالی که به ترتیب ۲۴/۸ و ۸/۷ درصد و در مجموع حدود یک‌سوم نیاز خالص آب را لازم داشته‌اند. لذا الگوی زمانی و حجمی تحویل با نیاز آبی تطابق خوبی نداشته و نشان‌دهنده ضعف عملکرد شبکه می‌باشد. عملکرد

عملکرد وضع موجود شبکه بررسی اجمالی عملکرد شبکه نشان می‌دهد اختلاف حجم نیاز خالص با حجم آب تحویلی شبکه به ۷۶/۱ میلیون مترمکعب می‌رسد؛ علیرغم اینکه در هیچ یک از انشعابات برای نیازهای فروردین، مهر و آبان‌ماه رهاسازی صورت نگرفته است، انشعابات

$$V_{id}^{t+1} = X \left(w \cdot V_{id}^t + c_1 r_1 (P_{bestid}^t - x_{id}^t) + c_2 r_2 (G_{bestid}^t - x_{id}^t) \right) \quad (\text{رابطه ۶})$$

$x_{id}^{t+1} = x_{id}^t + V_{id}^{t+1} \times \Delta t$ $V_{\min} \leq V_{id}^{t+1} \leq V_{\max}$
 که در آن V_{id} و X_{tid} به ترتیب موقعیت و سرعت ذره i ام در تکرار t ام؛ و X_{t+1id} و V_{t+1id} ، موقعیت و سرعت جدید در فضای d بعدی است. ضرایب بدون بعد r_1 و r_2 اعداد تصادفی با توزیع یکنواخت در محدوده (۰ و ۱) هستند. w پارامتر وزن اینرسی و عامل تعادل در همگرایی به بهینه موضعی و سراسری است. مقدار آن بین (۰ و ۱) می‌باشد. ضرایب C_1 و C_2 به ترتیب پارامتر ادراکی و پارامتر اجتماعی بوده، و دو مقدار ثابت مثبت در بازه $(0, 4)$ با شرط $C_1 + C_2 \leq 4$ می‌باشند Kennedy and Eberhart, 1995).

مقدار پارامتر وزن اینرسی (w)، تعیین‌کننده میزان تاثیر سرعت‌های پیشین بر سرعت جاری و عامل تعادل بین تنوع و تمرکز طی فرایند جستجو است. در مقادیر بزرگتر وزن اینرسی، دامنه جستجو وسیع‌تر لکن خطا هم بدلیل عدم تمرکز کافی بیشتر است. در مقادیر کوچکتر، سرعت همگرایی سریعتر لکن احتمال به دام افتادن در بهینه‌های محلی زیاد است. ابتدا برای پارامتر w یک مقدار ثابت در نظر گرفته می‌شد لکن برای موازنه بین جستجوهای محلی و سراسری لازم است وزن اینرسی بطور یکنواخت کاهش یابد. مطالعات (Shi and Eberhart, 1999) در این زمینه، منجر به تغییر شگرفی در الگوریتم PSO شد. آنها این پارامتر را به صورت خطی از مقدار بیشینه $w_{start}=0.9$ تا مقدار حداقل $w_{end}=0.4$ مطابق رابطه (۱۲) تغییر دادند که در آن مقدار t نشان دهنده تعداد تکرارهایی است که تاکنون صورت پذیرفته است و مقدار T نیز برابر تعداد کل تکرارها است.

$$w(t) = w_{end} - \frac{w_{start} - w_{end}}{T} \times t \quad (\text{رابطه ۷})$$

در تحقیق Fourie and Groenwold (2002) کاهش دینامیکی مقادیر w به صورت تصاعد هندسی (غیرخطی) با قدر نسبت k_t مطابق رابطه (۱۳) پیشنهاد شده است. مقدار مناسب قدر نسبت، در تحقیق (Moghadam et al., 2014)، پس از تحلیل حساسیت برابر 0.98 و پژوهش Perez and Behdinin (2007) برابر 0.975 بوده است.

$$w(t+1) = k_t \cdot w_t \quad (\text{رابطه ۸})$$

و رابطه (۱۴) برای ضریب اینرسی را Montalvo et al. (2010) توصیه کردند که در تحقیق Kashkoul (2009) نیز استفاده شد.

بهره‌برداری با شاخص‌های کمی مولدن و گیتس مطابق روابط (۱) تا (۴) ارزیابی می‌شود.

$$P_{A=\frac{1}{T}\sum[\frac{1}{R}\sum(P_a)]} \begin{cases} \text{if: } Q_d < Q_r \\ P_a = \frac{Q_d}{Q_r} \end{cases} \begin{cases} \text{if: } Q_r < Q_d \\ P_a = 1 \end{cases} \quad (\text{رابطه ۱})$$

$$P_{F=\frac{1}{T}\sum[\frac{1}{R}\sum(P_f)]} \begin{cases} \text{if: } Q_d > Q_r \\ P_f = \frac{Q_r}{Q_d} \end{cases} \begin{cases} \text{if: } Q_d < Q_r \\ P_a = 1 \end{cases} \quad (\text{رابطه ۲})$$

$$P_D = \frac{1}{R} \sum CV_T(Q_d/Q_r) \quad (\text{رابطه ۳})$$

$$P_E = \frac{1}{T} \sum CV_R(Q_d/Q_r) \quad (\text{رابطه ۴})$$

در این روابط P_A شاخص کفایت و بیانگر توانایی روش بهره‌برداری در تحویل آب به قدر تأمین نیاز؛ P_F راندمان و بیانگر میزان آب مازاد تحویلی در اثر عملکرد نامناسب؛ P_D شاخص پایداری یا اعتمادپذیری تحویل آب در طول دوره بهره‌برداری (T) و P_E شاخص عدالت توزیع است که بیانگر میزان تناسب مقادیر آب تحویلی و مورد نیاز در آبگیرهای مختلف می‌باشد. Q_r به مورد تقاضا (m^3/hr)؛ Q_d بده تحویلی واقعی در یک دوره تحویل (m^3/hr) است. CV_T و CV_R به ترتیب ضریب تغییرات مکانی و زمانی می‌باشند (Molden and Gates, 1990).

برای بهبود الگوی تحویل و توزیع آب از طریق ارتقا شاخص‌های مذکور، الگوریتم بهینه‌ساز رفتار جمعی ذرات بکار گرفته شد. مدل بصورت بهینه‌سازی همزمان سه تابع هدف کمینه‌سازی کمبود آب، بیشینه‌سازی ثبات الگوی توزیع و بیشینه عدالت توزیع در هر سناریو تعریف شده لکن بصورت تابع کلی چندجمله‌ای با ضرایب اهمیت اهداف، به مدل تک‌هدفه تبدیل شد.

الگوریتم بهینه‌سازی تجمع‌ذرات (PSO)

الگوریتم PSO با ایجاد جمعیت تصادفی از ذرات شروع می‌شود که هر ذره نماینده یک جواب ممکن در فضای مسئله است. مشخصات هر ذره با دو بردار موقعیت (X) و سرعت (V) بیان می‌شود که ابتدا به طور تصادفی، یک مقدار اولیه می‌گیرند. سپس به صورت تکرار شونده در فضای n بعدی مسئله حرکت کرده و با محاسبه مقدار بهینگی، گزینه‌های جدید بهتر را می‌یابند. هر یک از ذرات دارای حافظه بوده و بهترین موقعیت تجربه شده را به خاطر می‌سپارند. اصلاح موقعیت و سرعت هر ذره تحت تأثیر بهترین موقعیت تجربه شده هر ذره (P_{best}) و بهترین موقعیت کل ذرات (G_{best}) از ابتدای حرکت، طبق روابط (۵) و (۶) انجام می‌شود.

(رابطه ۵)

سناریوی اول

در سناریوی اول، امکان بهبود الگوی توزیع آب موجود بررسی شده و تأثیر آن روی شاخص‌های عملکرد مولدن و گیتس مطالعه شد. در این سناریو چون شرایط مصوبه ستاد احیاء دریاچه ارومیه مبنی بر کاهش ۴۰ درصدی مصارف آب کشاورزی مدل می‌شود بنابراین قید تأمین حداقل ۶۰ درصد نیاز انشعابات، مشابه شرایط مصوبه مذکور اعمال شد. ضرایب هریک از توابع اهداف در سناریوها در واقع اهمیت آن هدف می‌باشد در این سناریو چون هدف ثبات الگوی توزیع و برقراری عدالت حتی در مواقع کمبود آب مدل است؛ لذا فرض بر اهمیت مضاعف اهداف یاد شده نسبت به کمبود آب در نظر گرفته شده و بنابراین ضرایب به ترتیب ۰,۲، ۰,۴ و ۰,۴ بوده و تابع خطی مدل چندهدفه مطابق رابطه (۱۰) تعریف شد.

$$F = 0.2 \times f_1 + 0.4 \times f_2 + 0.4 \times f_3 \quad (\text{رابطه } 10)$$

سناریوی دوم

سناریوی دوم به نوعی اعمال توافق بین ارزیابی از دیدگاه مصرف کننده و تأمین کننده آب را در نظر گرفته و با فرض برابری اهمیت شاخص‌های توزیع عادلانه، حفظ ثبات الگوی توزیع و کمینه سازی کمبود آب آبیاری به مدلسازی الگوی توزیع آب در هر انشعاب می‌پردازد. بنابراین مقدار عددی اهمیت ۰,۳۳ برای هر تابع هدف منظور شده و تابع خطی مدل چندهدفه مطابق رابطه (۱۱) تعریف شد و مطابق (Murray-Rust et al., 2000)، شرایط متوسط نسبت عملکرد تحویل (تغییرات ۱۰ تا ۳۰ درصدی نسبت آب تحویلی به آب مورد نیاز) برای هر انشعاب مدل سازی شد.

$$F = 0.33 \times f_1 + 0.33 \times f_2 + 0.33 \times f_3 \quad (\text{رابطه } 11)$$

در هر دو سناریو مدل پس از اجراء الگوی تحویل بهینه را ارائه می‌دهد که برای الگوهای مذکور، شاخص‌های عملکرد محاسبه و بهبود عملکرد بهره‌برداری شبکه تحلیل شد.

نتایج و بحث**مقادیر شاخص‌های ارزیابی برای شرایط موجود**

در این تحقیق، ابتدا شاخص‌های ارزیابی عملکرد با مقایسه مقادیر جدول‌های (۱ و ۲)، تنها برای ماه‌های تحویل آب شبکه (۵ ماه اردیبهشت تا شهریور)، با استفاده از روابط (۱) تا (۴)، محاسبه شد که در جدول‌های (۳ و ۴) ارائه شده است (Khodadadi et al., 2017).

با توجه به نتایج، شاخص راندمان در انشعاب H3T با ۳۱

$$w(t) = 0.5 * \left(1 + \frac{1}{\log(t) + 1}\right) \quad (\text{رابطه } 9)$$

(Montalvo et al. (2010) نیز بهبود چشمگیر در عملکرد PSO را با کاهش نمایی ضریب اینرسی طبق رابطه (۱۵) طی تکرار الگوریتم عنوان کرده و از این رابطه برای ارزیابی اثر ضریب اینرسی در تحقیق خود استفاده کرده‌اند. در این رابطه t شماره تکرار می‌باشد.

$$w(t) = 0.5 + \frac{1}{2(\ln(t) + 1)} \quad (\text{رابطه } 10)$$

برای بهینه‌سازی الگوی تحویل آب، اهداف تحقیق شامل حداقل کمبود آبیاری و کمینه ضریب تغییرات مکانی و زمانی نسبت تحویل، به شکل ریاضی طبق روابط (۱۱) تا (۱۳) تعریف شد و با توجه به پیوسته بودن مسئله و کمینه بودن همه اهداف، به روش مجموع وزن دار به حالت یک هدفه تبدیل شد.

$$f_1 = \min \sum_{j=1}^m |V_{del} - V_{dem}| \quad (\text{رابطه } 11)$$

$$f_2 = \min \frac{1}{N} \sum_{j=1}^m C.V_r \left(\frac{V_{del}}{V_{dem}}\right) \quad (\text{رابطه } 12)$$

$$f_3 = \min \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m C.V_t \left(\frac{V_{del}}{V_{dem}}\right) \quad (\text{رابطه } 13)$$

در روابط فوق V_{del} و V_{dem} به ترتیب حجم تحویلی و مورد نیاز آب (m^3)، $C.V_r$ و $C.V_t$ به ترتیب ضریب تغییرات زمانی و مکانی تحویل، N تعداد دفعات آبیاری و m تعداد دریاچه یا انشعاب است. فرض مدل بر برقراری جریان دائمی در کانال اصلی است. متغیرهای مسئله؛ حجم ماهانه آب تحویلی به هر انشعاب، و محدودیت‌های مدل عبارت از مقادیر حدی هر تابع هدف، تأمین مقدار نیاز آبی هر انشعاب در بازه حداقل و حداکثر سناریوی مربوطه و کل حجم آب موجود مخزن بود. کد الگوریتم بصورت mfile به زبان MATLAB تهیه شد. الگوی آب خالص مورد نیاز انشعابات بعنوان ورودی مدل در قالب ماتریسی با ابعاد 14×5 به ترتیب بیانگر تعداد انشعابات و تعداد ماه‌های تحویل آب، تعریف گردید. سپس مقادیر پارامترهای الگوریتم با تحلیل حساسیت، تعیین شده؛ و مدل با تخصیص حجم آب به دریاچه‌های ماتریس در هر تکرار، تا رسیدن به حد مجاز خطا یا تعداد تکرار معین (شرط توقف مدل) برای دو سناریوی کاهش تخصیص آب شبکه اجرا شد. با توجه به اینکه تعداد مناسب جمعیت اولیه ذرات، برای شروع الگوریتم و بررسی اثر گروهی^۱ بسیار اهمیت دارد لذا هر ذره در مدل بصورت ماتریس 14×5 با ۷۰ متغیر می‌باشد. بدین منظور با استناد به تحقیق (Moghadam et al., 2014)، برای پارامترهای w و $C1$ و $C2$ مقادیر ثابت در محدوده مجاز به ترتیب برابر 0.6 ، 2 و 2 در نظر گرفته شد.

بیشتری داشت.

جدول ۳- مقادیر شاخص‌های ارزیابی عملکرد (راندمان، کفایت و پایداری) در شبکه زربنه‌رود (Khodadadi et al., 2017)

شاخص پایداری شبکه	شاخص کفایت (P _A)	شاخص راندمان (P _F)	انشعاب
۰/۲۴	۱/۰۰	۰/۶۴	H1Q2
۰/۳۲	۰/۹۳	۰/۸۷	H1Q3
۰/۳۳	۱/۰۰	۰/۳۱	H3T
۰/۵۳	۰/۸۷	۰/۸۸	CPC
۰/۵۰	۱/۰۰	۰/۳۸	H4T2
۰/۴۷	۰/۹۶	۰/۶۵	H4T1
۰/۳۱	۱/۰۰	۰/۳۲	H19L
۰/۳۲	۱/۰۰	۰/۵۸	H22L
۰/۱۸	۱/۰۰	۰/۶۴	H23L
۰/۵۰	۱/۰۰	۰/۴۲	H24T
۰/۲۴	۱/۰۰	۰/۳۵	H25L
۰/۴۴	۱/۰۰	۰/۴۳	PS
۰/۳۸	۰/۸۸	۰/۹۹	LSC
۰/۴۶	۱/۰۰	۰/۴۷	LPC
۰/۳۸	۰/۹۷	۰/۵۶	متوسط

جدول ۴- ارزیابی شاخص عدالت توزیع آب (PE) در شبکه زربنه‌رود

ماه تحویل آب	میانگین	انحراف معیار	ضریب تغییرات	متوسط شبکه
اردیبهشت	۱/۰۲	۰/۵۶	۰/۵۵	
خرداد	۰/۵۹	۰/۲۸	۰/۴۸	
تیر	۰/۴۶	۰/۲۳	۰/۴۹	۰/۵۰
مرداد	۰/۵۰	۰/۲۵	۰/۴۹	
شهریور	۰/۵۱	۰/۲۵	۰/۵۰	

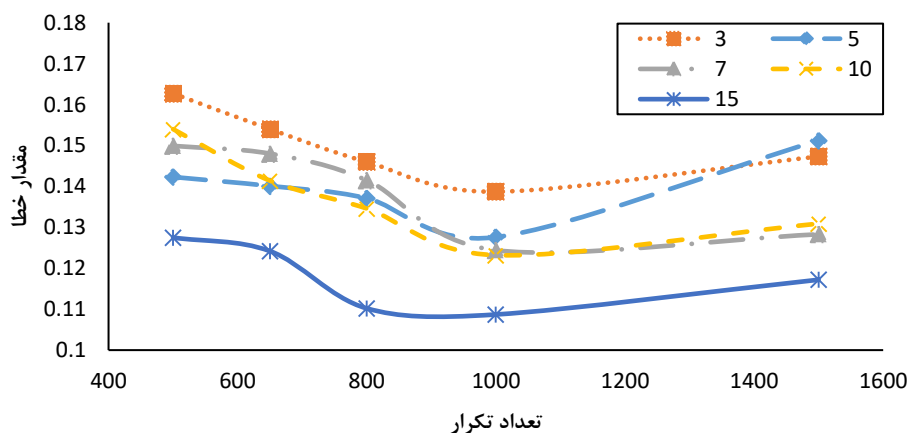
درصد کمترین مقدار؛ و در انشعاب LSC با ۹۹ درصد بیشترین مقدار را دارد. میزان متوسط کل این شاخص ۵۶ درصد است؛ که بغیر از انشعابات LSC و H1Q3، بقیه در کلاس ضعیف قرار می‌گیرند. شاخص کفایت آبیاری با حداقل مقدار ۸۷ درصد در CPC، و حداکثر ۱۰۰ درصد در غالب انشعابات، و متوسط ۹۷ درصد، در کلاس خوب قرار دارد. ولی از ثبات و پایداری خوبی برخوردار نیست. بطوری که شاخص پایداری بجز در انشعاب H23L با مقدار ۱۸ درصد (کلاس متوسط)، در سایر انشعابات با ضریب تغییرات بیشتر از ۲۰ درصد، و متوسط ۳۸ درصد، بیانگر اطمینان‌پذیری ضعیف به تأمین آب کانال‌ها در طول ماه‌های مختلف است.

منظور از شاخص عدالت، رعایت تناسب آب تحویلی به آب مورد نیاز در همه انشعابات بوده؛ و متوسط زمانی نوسان تناسب تحویل بصورت ضریب تغییرات مکانی تحویل در محل انشعابات، مصداق عدم عدالت توزیع قلمداد می‌شود. این شاخص با مقدار متوسط ۵۰ درصد نشان‌دهنده عدالت توزیع ضعیف است که سبب عدم تناسب الگوی تحویل با نیاز آب در کانال‌های شبکه می‌باشد.

تعیین مقادیر پارامترهای الگوریتم PSO

مقادیر پارامترهای الگوریتم PSO، برای دقت و سرعت همگرایی به جواب بهینه با تحلیل حساسیت به شرح زیر تعیین گردید:

برای تعیین تعداد مناسب ذرات، مدل برای تعداد جمعیت‌های ۳، ۵، ۷، ۱۰ و ۱۵ با تعداد تکرارهای ۵۰۰، ۶۵۰، ۸۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۵۰۰ اجرا شد. در هر بار اجرای برنامه، مقدار نهایی تابع هدف بعنوان خطا محاسبه شد که نتایج آن در شکل (۳) ارائه شده است. براساس این نتایج، تعداد ۱۵ ذره جستجوگر، کمترین خطا و حالت بهینه را دارد. مدل برای حالت جستجو با ۲۵ ذره هم اجرا شد که نسبت به ۱۵ ذره، همگرایی کمتر و خطای



شکل ۳- نمودار تعیین اندازه مناسب جمعیت ذرات

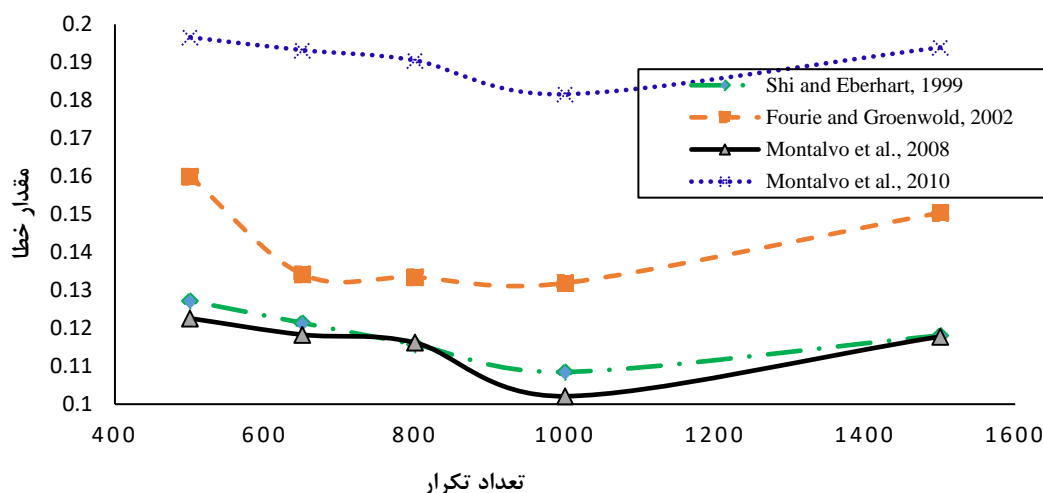
گرفتن مقدار ثابت ۲ برای ضرایب شناخت، مدل با تعداد ۱۵ ذره، برای روابط مذکور در تکرارهای مختلف اجرا شد که نمودار

وزن اینرسی

برای یافتن روند مناسب تغییرات پارامتر وزن اینرسی، با در نظر

نسبت به روابط دیگر عملکرد موفق‌تری در همگرایی به جواب بهینه بدست می‌دهد.

مربوطه در شکل (۴) ارائه شده است. نتایج اجرای مدل نشان می‌دهد کاهش وزن اینرسی مطابق رابطه (۱۴)، با کمترین خطا



شکل ۴- تعیین الگوی تغییرات پارامتر وزن اینرسی

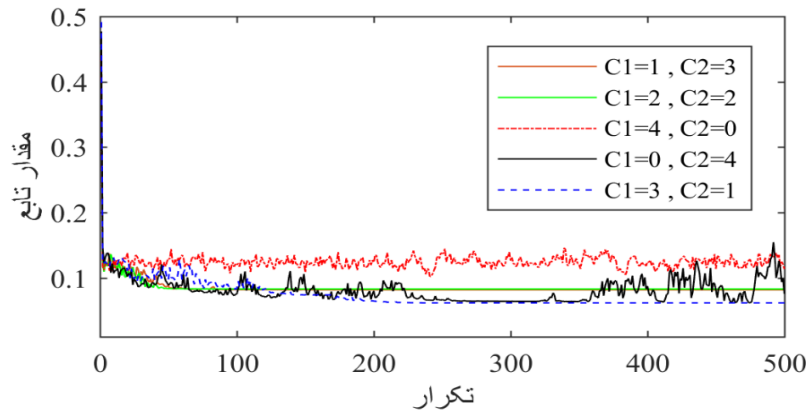
ضرایب اجرا شد که نتایج آن مطابق شکل (۵) ارائه شده و نشان می‌دهد انتخاب مقادیر مرزی (صفر برای یک ضریب و ۴ برای دیگری) منجر به عدم تبادل اطلاعات بین منابع ادراکی و اجتماعی شده و عدم بهبود تابع هدف در تکرارهای بعدی مبین به‌دام افتادن الگوریتم در بهینه محلی می‌باشد. همچنین وقتی تاکید بیشتر روی تبادل اجتماعی اطلاعات باشد ($C_1=1, C_2=3$), الگوریتم قابلیت همگرایی تدریجی به فضای مناسب از دامنه حل را دارد اما دوباره در صورت افتادن در نقاط اکسترمم موضعی، نمی‌تواند از آن خارج شود. برای این حالت مدل بعد از ۱۸۷۵ بار محاسبه مقدار تابع (۱۲۵ تکرار) همگرا می‌شود در حالیکه وقتی ذرات منفرد ضمن تبادل اجتماعی اطلاعات کسب شده، تمرکز بیشتری روی فضای جستجوی خود دارند ($C_1=3, C_2=1$), روند بهبود تا تکرار ۲۶۰ ادامه داشته و همگرایی بهتر با دقت بیشتر حاصل می‌شود. لذا مقادیر ۳ و ۱ به ترتیب برای C_1 و C_2 بهترین ترکیب می‌باشد.

پس از تعیین مقادیر مناسب پارامترهای الگوریتم، مدل برای هر یک از سناریوهای تحقیق اجرا شد. در اجرای مدل، شرط اتمام محاسبات رسیدن به خطای کمتر از ۵ درصد یا تکرار ۱۰۰۰ بار برنامه تعیین شد. خروجی مدل ارائه الگوی بهینه آب تحویلی آب به انشعابات شبکه بود که برای هر سناریو، بهبود عملکرد شبکه از طریق محاسبه مجدد شاخص‌ها، مورد ارزیابی قرار گرفت.

ضرایب شتاب

پس از تعیین تعداد مناسب ذرات و نرخ مناسب کاهش وزن اینرسی، مقادیر ضرایب شتاب دهنده تعیین شد. شرط پایداری عددی مقادیر این ضرایب آن است که در بازه $[0-4]$ قرار داشته و مجموع دو ضریب، کمتر مساوی چهار باشد. در تحقیق Rajabpur and Afshar (2008) مقادیر این ضرایب برابر ۲ اختیار شده و (Meraji et al., 2008) مقادیر برابر ۰/۵ را برای ضرایب C_1 و C_2 ذکر کرده‌اند. (Azadnia and Zahraie, 2010) انتخاب مقدار بزرگتر برای پارامتر شناختی C_1 نسبت به پارامتر اجتماعی C_2 را مناسب‌تر بیان کرده‌اند. در حالت کلی C_1 و C_2 بسته به مورد و شرایط هر مسئله می‌توانند متفاوت انتخاب شوند و برای تعیین مقدار مناسب این ضرایب، لازم است با رعایت شرایط پایداری، تحلیل حساسیت انجام بگیرد به این صورت که با در نظر گرفتن یک مقدار ثابت برای ضریب اینرسی و مقادیر اولیه مشابه برای سرعت و موقعیت جمعیت ذرات، مقدار تابع هدف به ازای تعداد تکرارهای مختلف الگوریتم، در ترکیب‌های متفاوت ضرایب C_1 و C_2 تحلیل و مقادیر بهینه تعیین می‌شود. تحلیل حساسیت این ضرایب در پژوهش

(Perez and Behdinan 2007) مقادیر مناسب برای C_1 و C_2 را به ترتیب ۳ و ۱ بدست داده است. در این تحقیق نیز با استناد به تحقیق مذکور، مدل برای ترکیب مختلف مقادیر این



شکل ۵- تأثیر مقادیر مختلف ضرایب شتاب در همگرایی الگوریتم PSO

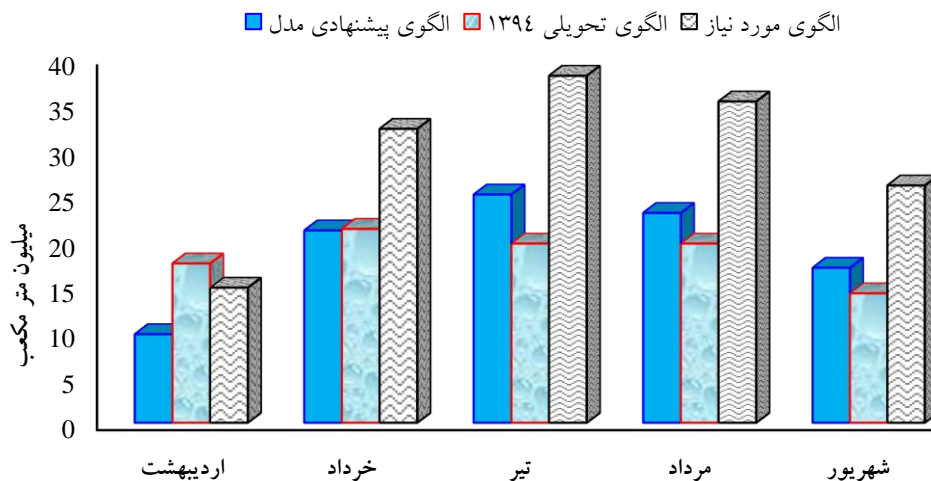
سناریو اول

برای سناریوی اول که امکان بهبود الگوی توزیع در شرایط موجود مدل می‌شود، برنامه تحویل بهینه با مجموع کل آب تحویلی فصل به میزان ۹۵/۸۱ میلیون مترمکعب (۳/۹ درصد بیش‌برآورد) مطابق جدول (۵) بدست آمد. این الگوی تحویل بطور متوسط ۶۶ درصد نیاز ماهانه را تأمین می‌کند و در مقایسه با الگوی تحویل ۱۳۹۴، حجم تخصیص اردیبهشت از ۱۸ درصد مازاد بر نیاز حدود ۶۰ درصد کاهش می‌یابد و برای ماه‌های تیر، مرداد و شهریور، مدل به ترتیب ۱۴، ۹ و ۱۰ درصد افزایش آب تحویلی را پیشنهاد می‌کند. شکل (۶) نمودار تغییرات ماهانه و شکل (۷) تغییرات حجم آب تحویلی انشعابات را نسبت به الگوی تحویل ۱۳۹۴ و الگوی مورد نیاز شبکه نشان می‌دهد. محاسبه شاخص‌های ارزیابی عملکرد برای الگوی تحویل

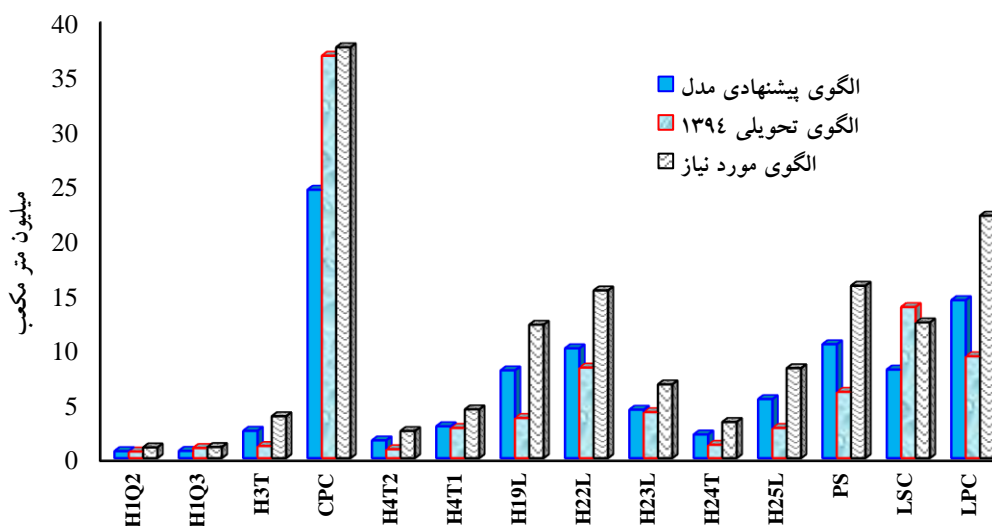
سناریوی اول نشان می‌دهد مقدار شاخص کفایت برابر ۱ (۱۰۰ درصد) و در کلاس خوب قرار دارد. شاخص راندمان با ۹ درصد افزایش به ۶۵ درصد ارتقاء یافته اما همچنان در کلاس ضعیف می‌باشد. شاخص پایداری با ۳۰ درصد بهبود در کاهش ضریب تغییرات، به مقدار متوسط ۸ درصد رسیده و در کلاس خوب قرار دارد که ثبات الگوی توزیع را نشان می‌دهد. شاخص عدالت توزیع نیز با تأمین حداقل ۶۰ درصد و متوسط ۶۵ درصد نیاز آبی، با ۱۲ درصد ضریب تغییرات، حدود ۳۸ درصد بهبود یافته و در کلاس متوسط قرار دارد. روشن است ارتقاء مقادیر شاخص‌های عملکرد شبکه طی الگوی تحویل پیشنهادی سناریوی اول می‌تواند هم تأکیدی بر ضعف الگوی جاری، در نتیجه پتانسیل بهبود آن و هم بیانگر توانایی الگوریتم رفتار جمعی ذرات در ارائه الگوی تحویل بهتر باشد.

جدول ۵- الگوی پیشنهادی مدل برای تحویل آب انشعابات در سناریو اول

انشعاب/ ماه	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور	جمع
H1Q2	۵۷۰۵۴	۱۲۳۵۴۱	۱۶۸۷۳۰	۱۵۸۸۴۳	۱۲۵۳۱۶	۶۳۳۴۸۴
H1Q3	۷۵۲۸۱	۱۴۳۷۵۴	۱۶۴۸۲۵	۱۵۴۶۱۹	۱۱۷۱۸۶	۶۵۵۶۶۵
H3T	۲۸۰۲۲۸	۵۴۳۶۳۲	۶۴۶۵۱۸	۵۸۹۸۳۷	۴۳۴۰۱۹	۲۴۹۴۲۳۴
CPC	۲۰۴۳۴۸۲	۵۰۹۶۹۸۷	۶۷۸۰۲۶۸	۶۲۲۵۳۳۴	۴۳۶۶۵۰۱	۲۴۵۱۲۵۷۲
H4T2	۱۴۳۴۶۵	۳۱۴۱۲۵	۴۴۴۴۵۷	۴۱۶۴۳۷	۲۹۷۴۱۶	۱۶۱۵۹۰۰
H4T1	۲۶۶۶۸۲	۵۹۵۶۶۷	۷۷۵۶۶۲	۷۲۸۱۷۹	۵۴۰۸۹۳	۲۹۰۷۰۸۳
H19L	۹۲۳۵۷۷	۱۸۶۵۰۱۱	۲۰۱۰۷۸۴	۱۸۲۴۴۴۳	۱۳۹۹۵۱۸	۸۰۲۳۳۳۳
H22L	۱۱۳۹۲۸۹	۲۲۹۹۷۵۷	۲۵۴۱۹۷۲	۲۳۱۴۲۰۰	۱۷۴۷۰۶۲	۱۰۰۴۲۲۸۰
H23L	۶۲۴۵۰۱	۱۱۱۵۳۶۱	۱۰۵۵۱۱۷	۹۳۶۰۷۵	۶۹۲۶۶۵	۴۴۲۳۷۱۹
H24T	۱۹۰۴۵۰	۴۵۷۱۹۳	۵۷۳۶۳۴	۵۳۹۹۸۵	۳۹۶۵۲۶	۲۱۵۷۷۷۸
H25L	۶۹۰۴۴۹	۱۲۸۰۵۷۳	۱۳۴۲۴۱۰	۱۲۰۲۶۲۴	۸۷۶۴۱۸	۵۳۹۲۴۷۴
PS	۹۹۳۸۹۲	۲۲۸۱۴۹۸	۲۷۰۷۸۰۱	۲۵۳۵۱۶۰	۱۸۹۴۵۹۷	۱۰۴۱۲۹۴۷
LSC	۸۸۰۳۴۶	۱۷۴۵۳۷۲	۲۰۸۷۷۶۵	۱۹۱۳۷۸۴	۱۴۷۲۵۰۶	۸۰۹۹۶۷۳
LPC	۱۴۰۰۲۲۹	۳۲۲۲۸۹۶	۳۷۳۴۸۸۳	۳۶۶۷۴۱۷	۲۶۲۹۲۳۵	۱۴۴۴۴۶۶۰
جمع	۹۷۰۸۸۲۴	۲۱۰۸۵۳۶۷	۲۵۰۲۴۸۱۷	۲۳۰۰۶۹۳۶	۱۶۹۸۹۸۵۹	۹۵۸۱۵۸۰۳



شکل ۶- نمودار تغییرات زمانی الگوی نیاز و تحویل آب شبکه (سناریو اول)



شکل ۷- مقایسه الگوی تحویل جاری، پیشنهادی مدل و مورد نیاز به انشعابات شبکه (سناریو اول)

سناریو دوم

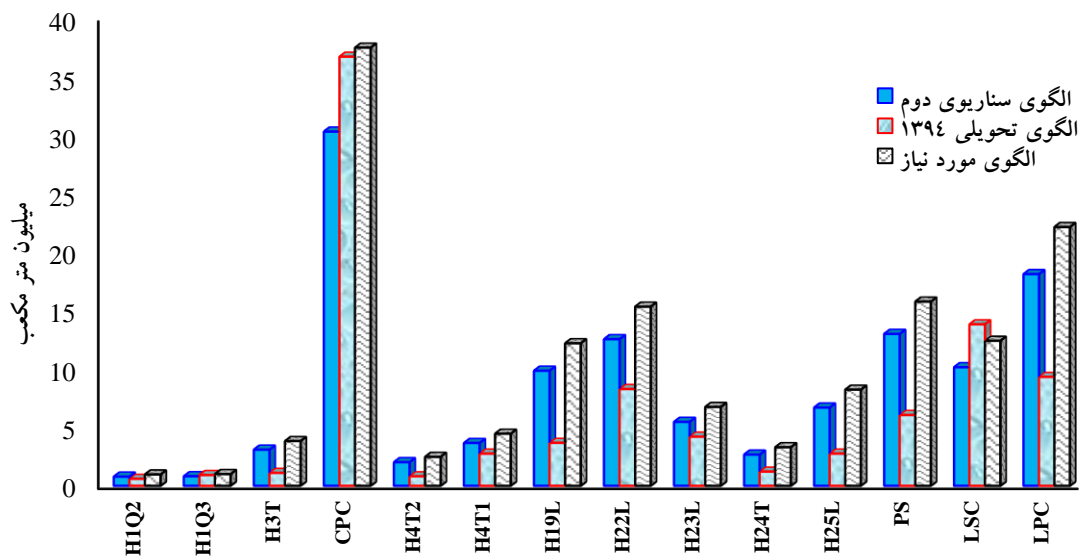
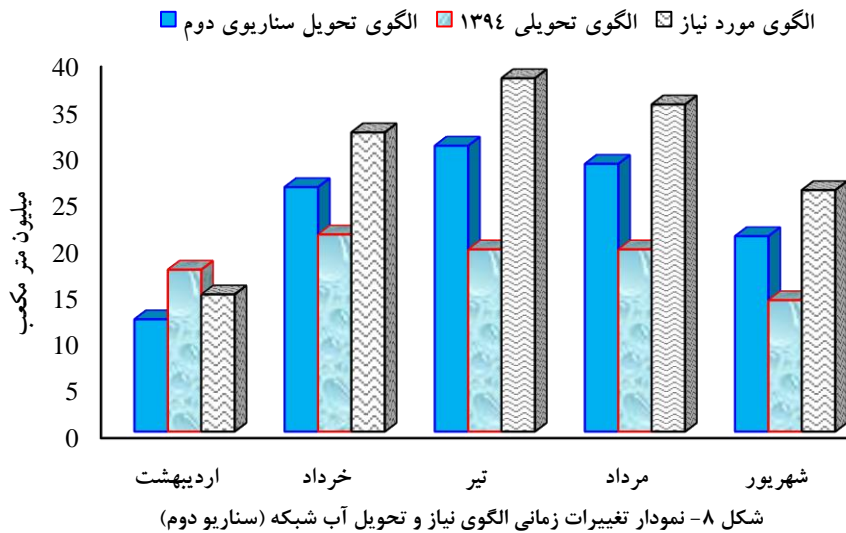
این سناریو شرایط برقراری نسبت عملکرد متوسط یعنی تامین حداقل ۷۰ درصد و حداکثر ۹۰ درصد نیاز آبی را مدل‌سازی می‌کند. مدل پس از اجرای الگوریتم، برنامه تحویل بهینه را با مجموع کل آب تحویلی به میزان ۱۱۹/۱۷ میلیون مترمکعب مطابق جدول (۶) ارائه می‌دهد. این الگوی تحویل بطور متوسط ۸۲ درصد نیاز ماهانه را تامین می‌کند و در مقایسه با الگوی تحویل ۱۳۹۴، حجم تخصیص اردیبهشت ماه ۳۰ درصد کاهش می‌یابد در خردادماه حجم رهاسازی افزایش ۲۴ درصدی داشته و حجم تخصیصی تیرماه، بیش از ۱/۵ برابر می‌شود. در ماههای مرداد و شهریور نیز حجم رهاسازی آب به ترتیب ۴۷ و ۵۰ درصد افزایش می‌یابد. شکل (۸) نمودار تغییرات ماهانه و شکل (۹) تغییرات حجم تخصیص در انشعابات را نسبت به الگوی تحویل

۱۳۹۴ و الگوی مورد نیاز نشان می‌دهد.

محاسبه شاخص‌های ارزیابی عملکرد برای الگوی تحویل سناریوی دوم نشان می‌دهد مقدار شاخص کفایت برابر ۱ (۱۰۰ درصد) و در کلاس خوب قرار دارد. شاخص راندمان با مقدار متوسط ۸۱ درصد بهبود یافته و در کلاس خوب قرار دارد. شاخص پایداری با ۳۳ درصد بهبود (کاهش ضریب تغییرات)، به مقدار متوسط ۵ درصد رسیده و در کلاس خوب قرار دارد که ثبات الگوی توزیع را نشان می‌دهد. شاخص عدالت توزیع نیز با تامین حداقل ۷۰ و متوسط ۸۲ درصد نیاز آب، با مقدار متوسط ۸ درصد ضریب تغییرات، ۴۲ درصد بهبود یافته و در کلاس خوب قرار می‌گیرد.

جدول ۶- الگوی پیشنهادی مدل برای تحویل آب انشعابات در سناریو دوم

انشعاب/ ماه	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور	جمع
H1Q2	۷۱۹۳۰	۱۵۳۲۹۹	۲۰۴۷۰۴	۱۹۷۶۸۲	۱۵۷۵۰۷	۷۸۵۱۲۲
H1Q3	۹۳۶۹۹	۱۷۹۴۵۵	۲۰۳۹۴۸	۱۹۳۴۶۶	۱۴۶۷۰۱	۸۱۷۲۷۰
H3T	۳۴۹۲۸۱	۶۸۰۵۶۷	۷۹۰۶۹۷	۷۳۵۸۳۰	۵۳۵۲۹۵	۳۰۹۱۶۶۹
CPC	۲۵۵۸۷۵۸	۶۴۳۲۴۹۹	۸۱۲۵۳۵۸	۷۸۲۴۵۸۵	۵۳۷۱۱۷۴	۳۰۳۱۲۳۷۳
H4T2	۱۸۰۲۲۹	۳۸۸۹۹۴	۵۶۱۵۹۷	۵۱۹۹۰۶	۳۶۸۷۶۰	۲۰۱۹۴۸۶
H4T1	۳۳۸۳۲۸	۷۳۰۰۴۸	۹۸۵۰۸۰	۹۳۱۵۰۱	۶۷۵۵۸۴	۳۶۶۰۵۴۲
H19L	۱۱۳۸۳۸۷	۲۲۸۸۵۲۷	۲۴۱۸۶۳۵	۲۲۹۳۴۳۳	۱۷۰۸۷۸۵	۹۸۴۷۷۶۷
H22L	۱۴۳۶۱۰۶	۲۸۸۹۰۷۸	۳۱۷۱۹۸۵	۲۹۰۵۳۸۲	۲۱۴۴۷۱۱	۱۲۵۴۷۲۶۱
H23L	۷۷۱۶۶۴	۱۳۶۳۴۴۲	۱۳۰۶۲۴۱	۱۱۷۲۰۶۲	۸۵۷۸۷۴	۵۴۷۱۲۸۴
H24T	۲۳۵۷۷۳	۵۶۵۷۶۴	۷۰۴۳۵۸	۶۶۴۸۹۴	۴۹۵۸۸۴	۲۶۶۶۶۷۴
H25L	۸۴۹۸۴۵	۱۵۹۳۸۳۲	۱۶۴۴۲۲۶	۱۵۱۲۶۴۵	۱۰۹۴۹۶۴	۶۶۹۵۵۱۲
PS	۱۳۴۳۱۴۹	۲۸۵۱۶۷۴	۳۳۵۴۱۲۲	۳۱۴۹۱۲۳	۲۴۰۱۲۹۱	۱۲۹۹۹۳۵۹
LSC	۱۰۸۸۵۶۷	۲۱۵۶۴۱۶	۲۶۱۹۷۳۰	۲۴۵۵۲۷۶	۱۸۲۵۹۵۰	۱۰۱۴۵۹۳۹
LPC	۱۷۷۲۲۹۷	۴۰۶۸۵۳۶	۴۷۰۲۱۷۷	۴۲۸۷۲۲۰	۳۲۸۵۲۷۲	۱۸۱۱۵۵۰۲
جمع	۱۲۱۲۸۰۱۲	۲۶۴۲۲۱۳۰	۳۰۷۹۲۸۵۸	۲۸۸۴۳۰۰۷	۲۱۰۶۹۷۵۲	۱۱۹۱۱۵۷۶۰



نتیجه‌گیری

در این تحقیق، با استفاده از الگوریتم رفتار جمعی ذرات (PSO)، به بهینه‌سازی الگوی تحویل و توزیع آب با اهداف کمینه‌سازی تلفات آب و کمینه‌سازی ضریب تغییرات زمانی و مکانی نسبت تحویل آب پرداخته شد. بدین منظور پس از تهیه مدل و تعریف اهداف، مقادیر پارامترهای آن با تحلیل حساسیت، تعیین شد سپس الگوی توزیع در شرایط کمبود آب طی دو سناریوی کاهش میزان تخصیص آب شبکه آبیاری بررسی شد. سناریوی اول، با فرض تأمین کمینه ۶۰ درصد نیاز الگوی کشت موجود (همسو با مصوبه کاهش ۴۰ درصدی مصارف بخش کشاورزی ستاد احیاء دریاچه ارومیه) بهینه‌سازی شد. بر این اساس، شاخص‌های عملکرد بهره‌برداری شامل راندمان و کفایت، بترتیب به مقادیر ۶۵ و ۱۰۰ درصد افزایش می‌یابد. شاخص‌های پایداری و عدالت توزیع نیز به ترتیب با ۳۰ و ۲۸ درصد بهبود (کاهش ضریب تغییرات)، به ۸ و ۱۲ می‌رسد. نتایج نشانگر امکان بهبود عملکرد شبکه حتی در شرایط موجود است که در این صورت نیاز آبی بطور متوسط ۶۶ درصد تأمین خواهد شد. در سناریوی دوم شرایط متوسط نسبت عملکرد تحویل یا عبارتی تغییرات ۱۰ تا ۳۰ درصدی نسبت آب تحویلی به آب مورد نیاز هر انشعاب که اعمال توافق بخش‌های مصرف‌کننده و توزیع‌کننده برای تأمین ۷۰ تا ۹۰ درصد نیاز آبی محصولات با فرض برابری اهمیت اهداف مدل‌سازی شد. در این سناریوی تخصیص، مقادیر شاخص‌های راندمان و کفایت بترتیب

برابر ۸۱ و ۱۰۰ درصد بدست آمد که مقایسه آن با مقادیر مشابه در سناریوی اول بیانگر افزایش ۱۶ درصدی راندمان بوده است. همچنین در سناریوی دوم ضریب تغییرات شاخص پایداری با ۳۳ درصد کاهش، به ۵ درصد بهبود یافته که نشان می‌دهد این الگو نسبت به سناریوی اول ۳ درصد ضریب تغییرات کمتر و در نتیجه پایداری بیشتری دارد. مضافاً اینکه در سناریوی دوم با تأمین متوسط ۸۲ درصد نیاز آبی (۱۶ درصد بیشتر نسبت به سناریوی اول)، شاخص عدالت توزیع با کاهش ۴۲ درصدی ضریب تغییرات به ۸ درصد ارتقا می‌یابد که نسبت به سناریوی اول ۴ درصد بهبود یافته است.

نتیجه‌گیری کلی بیانگر ثبات الگوی توزیع، توانمندی الگوریتم رفتار جمعی ذرات (PSO) در بهینه‌سازی الگوی تحویل آب شبکه آبیاری و پتانسیل بهبود شرایط موجود توزیع آب شبکه می‌باشد و سناریوی دوم بدلیل کاهش تدریجی آب تحویلی، حفظ آستانه اعتمادپذیری و اطمینان بهره‌برداران در قالب تشکل-های آب‌بران به شبکه، تأمین ۱۶ درصد نیاز آبی بیشتر و ارتقا در مقادیر شاخص‌های عملکرد نسبت به سناریوی اول، گزینه برتر این تحقیق می‌باشد. پیشنهاد می‌شود در تحقیقات مشابه، بهینه‌سازی با رویکرد اهداف چندگانه مدل از جمله سود مصرف-کنندگان با الگوهای کشت مختلف و سود ناشی از کاهش تخصیص آب لحاظ گردد.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

REFERENC

- Azadnia, A and Zahraie, B. (2010). Using PSO algorithm for optimization of multi-objective dam reservoirs operation. 5th national congress of civil engineering, Ferdosi University of Mashhad, Iran. (In Farsi).
- Azarafza H., Rezaei H. Behmanesh, J. and Besharat, S. (2012) Results Comparison of Employing PSO, GA and SA Algorithms in Optimizing Reservoir Operation (Case Study: Shaharchai Dam, Urmia, Iran). *Journal of Water and Soil* 26(5) 1101-1108. (In Farsi).
- Baltar, A. and Fontane, D. G. (2004). A multiobjective particle swarm optimization model for reservoir operations and planning. Dept. of Civil and Environmental Engineering, Colorado State University, USA.
- Dolatsahi-Zand, A. and Damghani, K. (2015). Design of SCADA water resource management control center by a bi-objective redundancy allocation problem and particle swarm optimization. *Reliability Engineering and System Safety* 133, (2015), 11-21.
- Ghaderi, k. and Goruhi, f. (2016). Performance assessment of PSO and ICA algorithms in optimization of irrigation canals water delivery schedule (case study: Ordibehesht canal of Dorudzan network). 15th Hydraulic Conference, Ghazvin (In Farsi).
- Hosseini, M. Mazandarani zadeh, H and Nazari, B. (2020). Simultaneously Management of Surface and Groundwater Resources and Increasing Farmers' Resilience to Water Scarcity by Predicting the Price of Agricultural Products (Case Study of Irrigation and Drainage Network of Qazvin Plain). *Journal of Iran soil and Water researches*. doi:10.22059/ijswr.2021.313809.668805.
- Kashkoul, B. (2009). Simultaneous layout and pipe size optimization of pressurized irrigation networks using Meta heuristic techniques. M.Sc Thesis in Water Structures Engineering, Tarbiat Modares University. (In Farsi).
- Kennedy, J. and Eberhart, R. (1995). Particle Swarm Optimization. Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks, Perth, Australia 1995, pp. 1942-1948.
- Khodadadi S, Yasi M and Monem M J (2017). Performance Evaluation and Optimization of Water Delivery Schedule in the Zarinehroud Irrigation Network. *Journal of Water and*

- Irrigation management*. No. 1(7), 105-119 (In Farsi).
- Khodaverdi, M. Hashemi, R. Khashei, A and Pourreza, M. (2019). Optimal Design of Groundwater-Quality Sampling Networks with MOPSO-GS (Case Study: Neyshabour Plain). *Journal of Water and Irrigation management*. No. 9(2), 199-210 (In Farsi).
- Khoshnavaz S. (2019). Uncertainty Analysis of Water Distribution Planning in Mian-Ab Irrigation Network in Shooshtar Plain: Application of Genetic Algorithm and Simulated Annealing. *Journal of Iran soil and Water researches*. No.51(1), 151-164 (In Farsi).
- Mehdipur, A. F. and Haddad, A. B. (2012). Optimization of operation from multi-purpose dams reservoir using particle swarm algorithm. *Journal of Water and Wastewater*. No.4, 97-105 (In Farsi).
- Meraji, H., Afshar, M. H. and Afshar, A. (2008). Optimal design of flood control systems using Particle Swarm Optimization algorithm. *Journal of Civil Engineering*, Iran University of Science & Technology 19(8), 41-53. (In Farsi).
- Moghadam, A., Alizadeh, A., Ziaie, A. N. Hoseini, A. F and Fallah, D. (2014). Effect of PSO algorithm parameters in optimal design of water distribution networks. 8th national congress of civil engineering. Babol University. (In Farsi).
- Moghaddasi, M., Morid, S. and Araghinejad, Sh. (2008). Optimization of water allocation in deficit condition using non-linear, PSO and GA algorithms (case study). *Journal of Iran Water Resource Research*, 3(4), 1-13. (In Farsi).
- Molden, D. J. and Gates, T. K. (1990). Performance Measures for Evaluation of Irrigation-Water Delivery System. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, *Journal of American Society of Civil Engineering*. 116(6), 804- 822.
- Monem, M. J. and Nouri, M. A. (2010). Using PSO algorithm in optimization of water delivery schedule in irrigation networks. *Journal of Iran Irrigation and drainage*. 1(4), 73-82. (In Farsi).
- Montalvo, A., Joaquín Izquierdo, A., Silvia Schwarze, B. and Pérez-García, R. (2010). Multi-objective particle swarm optimization applied to water distribution systems design: An approach with human interaction. *Journal of Mathematical and Computer Modelling*, 52. 1219–1227.
- Murray-Rust, D. H., Lashari, B. and Memon, Y. (2000). Extended Project on Farmer Managed Irrigated Agriculture under the National Drainage Program (NDP): Water Distribution Equity in Sindh Province, Pakistan. *International Water Management Institute (IWMI)*, (Vol. 9).
- Perez, R. E. and Behdinin, K. (2007). Particle swarm approach for structural design optimization. *Journal of Computers and Structures*, 85.1579–1588.
- Rajabpur R. and Afshar M. H. (2008). Optimized Operation of serial pump stations using the PSO algorithm. *Journal of Water and Wastewater*. No.36, 56-66. (In Farsi).
- Rezaie, F., Safavi, H. R., Mirchi, A. and Madani, K. (2017). F-MOPSO: An alternative multi-objective PSO algorithm for conjunctive water use management. *Hydro-environment Research* 14, 1–18.
- Rezaie, H. MirAbbasi, R and Khani, Z. (2020). Two-Variable analysis of drought risk in west and north-west of Iran using PSO algorithm and
- Roozbahani, R., Schreider, S. and Abbasi, B (2015). Optimal water allocation through a multi-objective compromise between environmental, social and economic preferences. *Journal of Environmental Modelling & Software* 64, 18-30.
- Sargazi, A and Gavidel, M. (2017). Planning and Optimal Allocation of Water Resources in the Agricultural Sector (Case study of Someh Sara City). *Journal of Iran-Water Resources Research* 13(2), 74-81. Summer 2017 (IR-WRR) (In Farsi).
- Shi, Y. and Eberhart, R. C. (1999). Empirical study of particle swarm optimization.” *Proc. IEEE, International Congress Evolutionary Computation*, Washington, D.C., USA, 1945 - 1950.
- Zoltay, V. I., Vogel, R. M., Kirshen, P. H., Westphal, K. S. (2010). Integrated watershed management modeling: generic optimization model applied to the Ipswich River Basin. *Journal of Water Resour. Plan. Manag.* 136 (5), 566-575.