

## شبیه‌سازی - بهینه‌سازی منابع آب، با هدف حداقل‌سازی عدم تأمین نیازها و حداقل‌سازی برداشت از منابع آب‌های زیرزمینی (مطالعه موردی: حوضه زاهدان)

محمد عرفانیان ظروفی<sup>۱</sup>، سید آرمان هاشمی منفرد<sup>۲\*</sup>، عبدالرضا صمیمی<sup>۳</sup>، بهاره پیرزاده<sup>۴</sup>

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی و مدیریت منابع آب، دانشگاه سیستان و بلوچستان

۲. دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه سیستان و بلوچستان

۳. استاد گروه مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی، دانشگاه سیستان و بلوچستان

۴. استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه سیستان و بلوچستان

(تاریخ دریافت ۱۳۹۷/۰۸/۲۹؛ تاریخ تصویب ۱۳۹۸/۰۱/۲۹)

### چکیده

هدف از انجام پژوهش حاضر، شبیه‌سازی و بهینه‌سازی بهره‌برداری از منابع آبی شهرستان زاهدان طی ۲۰ سال آینده تحت سناریوهای مختلف مدیریتی است. برای رسیدن به شرایط بهینه قطعی در این مسئله، حداقل‌سازی عدم تأمین نیازها و حداقل‌سازی برداشت از منابع آب زیرزمینی در قالب یک هدف و با استفاده از الگوریتم تک‌هدفه PSO بررسی شد. پس از ورود اطلاعات و صحت‌سنجی مدل شبیه‌ساز، پنج سناریو تعریف شده و نتایج به دست آمده از اجرای این سناریوها با یکدیگر مقایسه شد. نتایج تحقیق حاضر نشان داد در سناریوی مرجع با افزایش جمعیت، در سال‌های پایانی دوره شبیه‌سازی با تنش آبی مواجه خواهیم بود. سناریوی دوم، با تخصیص پساب تصفیه‌شده به مصارف صنعتی و فضای سبز، این نیازها به طور کامل تأمین شد. در سناریوی سوم با فرض بهره‌برداری از خط دوم انتقال آب از چاه نیمه، نیازهای شرب، صنعت و محیط زیست به طور کامل تأمین خواهند شد. در سناریوی بهینه متوسط تأمین نیازهای شرب در ماه‌های مرداد، تیر، خرداد و شهریور به ترتیب به میزان ۴/۱۹، ۳/۳۹، ۳/۲۱ و ۱/۲۰ درصد افزایش یافت. نتایج نشان داد این الگوریتم بهینه‌سازی به خوبی توانسته است شکست‌ها را کاهش دهد. در نهایت، سناریوی ایده‌آل با ترکیب سناریوهای دوم و سوم و بر اساس مقادیر بهینه برداشت از منبع آب زیرزمینی تعریف شد. در این سناریو نیازهای شرب، صنعت و فضای سبز به صورت کامل و نیاز کشاورزی بیش از ۹۵ درصد تأمین می‌شود. همچنین، میزان برداشت از منابع آب زیرزمینی در سناریوی بهینه و ایده‌آل به ترتیب ۴/۹۵ و ۱۷ درصد نسبت به سناریوی مرجع کاهش یافت.

**کلیدواژه‌گان:** الگوریتم PSO، بهره‌برداری تلفیقی، بهینه‌سازی، شبیه‌سازی، منابع آب، WEAP.

## مقدمه

آب از مهم‌ترین منابع در توسعه کشورها و منبعی حیاتی برای هر پدیده زیستی و انسانی است. امروزه، جوامع بین‌المللی از نقش و اهمیت آب برای رشد و توسعه پایدار آگاه شده‌اند. افزایش نیازهای آبی به واسطه رشد روزافزون جمعیت منطقه و همچنین محدودیت شدید منابع آبی به دلیل کمبود بارش، خشک‌سالی‌های متوالی، نبود آب‌های سطحی و برداشت بیش از حد از منابع آب زیرزمینی سبب افت شدید و کلی سطح آب زیرزمینی و شوری آن شده است. آبخوان دشت زاهدان از نظر بهره‌برداری وضعیت بحرانی دارد و افت سالانه آب در قسمت‌هایی که چاه‌های تأمین آب شرب شهر زاهدان واقع شده‌اند (جنوب غربی دشت) به بیش از یک متر می‌رسد و نه تنها امکان توسعه بهره‌برداری وجود ندارد، بلکه مقدار آب بهره‌برداری شده فعلی نیز باید کاهش یابد [۱]. به دلیل کمبود منابع بهره‌برداری آب برای تأمین نیاز آب شرب شهری، در سال ۱۳۸۲ طرح انتقال آب از چاه نیمه‌های شهرستان زهک اجرا شد. با وجود بهره‌برداری آب از دو منبع آب زیرزمینی و خط آب انتقالی از چاه نیمه‌ها باز هم در فصل تابستان و پیک مصرف، شاهد کمبود و قطعی موضعی آب در سطح شهر زاهدان هستیم. با توجه به وجود دو منبع قابل بهره‌برداری آب، بهینه‌سازی منابع موجود اهمیت زیادی در مدیریت منابع آبی و کاهش کمبود آب، به خصوص آب شرب مصرفی در ماه‌های گرم سال، دارد [۲]. در سال‌های اخیر استفاده از مدل‌های برنامه‌ریزی منابع آبی به‌طور گسترده‌ای توسعه یافته است و مورد استفاده بهره‌برداران قرار می‌گیرد. به طور کلی، این مدل‌ها به سه دسته مدل‌های شبیه‌سازی، بهینه‌سازی و ترکیب این دو تقسیم می‌شوند. هدف از اجرای مدل‌های شبیه‌سازی، پیش‌بینی رفتار سیستم و بهبود سیاست‌های بهره‌برداری است. مدل‌های شبیه‌سازی مشخص می‌کنند که اگر از یک سیاست خاص استفاده شود، طی زمان چه آثاری بر جا خواهد گذاشت و در نتیجه می‌توان آن سیاست را آزمود و آثار آن را ارزیابی کرد. بهینه‌سازی بهره‌برداری از منابع آبی، در درازمدت مورد توجه بوده و سیاستی مورد قبول است. به طور کلی، مسائل بهینه‌سازی پیچیده هستند و نمی‌توان آنها را با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی کلاسیک حل کرد. پیچیدگی‌های مسئله و همچنین توانایی‌های یافتن جواب‌های بهتر در فضای گسسته، سبب استفاده از الگوریتم‌های فراکاوشی شده است [۳ و ۴].

مطالعات بسیاری در زمینه استفاده هم‌زمان از مدل‌های شبیه‌ساز- بهینه‌ساز صورت گرفته است که به‌اختصار می‌توان به چند مورد اشاره کرد: نبی‌نژاد و موسوی‌الگوریتم بهینه‌سازی PSO و مدل تخصیص منابع آب MODSIM، رویکرد شبیه‌سازی- بهینه‌سازی برای مدل‌سازی مسئله تخصیص منابع آب حوضه‌ای را توسعه دادند. مدل پیشنهادی آنها برای رودخانه اترک واسنجی شد. نتایج پژوهش آنها نشان داد مدل یادشده قابلیت ارائه جواب‌های بهینه با در نظر گرفتن معیارهای کارایی و عدالت در تخصیص آب را دارد [۵]. تقیان و همکارانش برای رسیدن به بهره‌برداری بهینه از سیستم چندمنظوره در جنوب ایران، از یک مدل ترکیبی شامل الگوریتم ژنتیک ساده و یک برنامه شبیه‌سازی استفاده کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد مدل عملکرد خوبی در استخراج مطلوب برای عملیات مخزن در شرایط نرمال و خشک‌سالی دارد [۶]. وانگ<sup>۱</sup> و همکارانش برای بهره‌برداری بهینه از مخزن سدی در کشور چین طی دوره ۲۰۱۱-۲۰۱۴ از ترکیب مدل شبیه‌ساز WEAP<sup>۲</sup> و الگوریتم طبیعی NSGA-II استفاده کردند. تابع هدف در تحقیق وانگ و همکارانش حداقل‌سازی کمبود و حداکثرسازی تولید برق در سد یادشده بود. نتایج پژوهش آنها نشان داد با بهینه‌سازی می‌توان تا حدود زیادی اهداف مد نظر را تأمین کرد [۷]. فائو<sup>۳</sup> و همکارانش با استفاده ترکیبی از الگوریتم ژنتیک و مدل شبیه‌ساز WEAP اقدام به بهینه‌سازی بهره‌برداری مخزن سد بورا در کشور غنا کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد نیاز بخش کشاورزی به طور مناسبی تأمین می‌شود. همچنین، فائو و همکارانش حداقل و حداکثر ذخیره مخزن را برای فصل‌های مختلف به دست آوردند [۸]. برای استخراج سیاست‌های بهینه بهره‌برداری از سیستم‌های چندمخزنه، اعمال اهداف چندگانه متضاد به‌صورت هم‌زمان، اهمیت بسیار زیادی دارد. احمدیان‌فر و همکارانش به این منظور، نوعی مدل بهینه‌سازی چندهدفه شامل اهداف کشاورزی و زیست‌محیطی در یک سیستم سه‌سدهی منابع آب ارائه کرده‌اند. به این منظور، برای کاهش شاخص کمبود آب و تأمین اهداف مد نظر طی دوره آماری ۴۸ ساله آینده، از تلفیق مدل شبیه‌ساز سیاست

1. Vonk

2. Water Evaluation and planning

3. Fowe

پژوهش آنها نشان داد الگوریتم NSGA-II بهینه‌سازی مخازن را بهبود می‌بخشد و نسبت به الگوریتم MOPSO پوشش بهتری دارد [۱۵]. شنوا و شوریان از مدل شبیه‌سازی - بهینه‌سازی با هدف کنترل سیلاب و همچنین افزایش رهاسازی برای مصارف پایین‌دست سد گتوند در جنوب غربی ایران استفاده کردند. آنها به این منظور از اتصال مدل شبیه‌ساز MODSIM به الگوریتم رقابت استعماری استفاده کردند. متغیر تصمیم در این مسئله میزان آب ذخیره‌شده در مخزن سد گتوند به صورت روزانه بود. نتایج پژوهش آنها نشان داد با استفاده از این مدل و برنامه‌ریزی مناسب می‌توان آسیب‌های سیل را کاهش داد و در عین حال مطمئن شد که رهاسازی برای تقاضای آب پایین‌دست رضایت‌بخش باشد [۱۶]. افت سطح آب‌های زیرزمینی به دلیل افزایش جمعیت، گسترش صنایع و تغییرات اقلیمی به مشکلی جهانی تبدیل شده است. بالاولیکار<sup>۲</sup> و همکارانش با استفاده از الگوریتم ANN و مقایسه آن با مدل ترکیبی ANN-PSO برای استفاده بهینه از منابع آبی و پیش‌بینی سطح تراز آب زیرزمینی در آینده استفاده کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد مدل ترکیبی ANN-PSO دقت پیش‌بینی بیشتری دارد [۱۷].

وان<sup>۳</sup> و همکارانش بهینه‌سازی بهره‌برداری از پروژه انتقال آب در کشور چین، که شامل سه مسیر انتقال و هشت مخزن ذخیره‌سازی می‌شد را بررسی کردند. با توجه به پیچیدگی‌های طرح، ساختار پیچیده انتقال آب بین حوضه‌ای و محدودیت‌های زیاد طرح برای به دست آوردن راه‌حل این مدل بهینه‌سازی با ابعاد بزرگ، یک مدل بهینه‌سازی پیشرفته یعنی بهینه‌سازی الگوریتم ذرات پیشرفته (PRA-PSO)، بر اساس ماهیت الگوریتم بهینه‌ساز پیش‌رونده (POA) و پارامتر ذرات استاندارد PSO ارزیابی شد. نتایج پژوهش یادشده نشان داد الگوریتم PRA-PSO در مقایسه با سایر تکنیک‌های بهینه‌سازی نتایج بسیار مثبتی ارائه می‌دهد و می‌تواند به‌طور مؤثری احتمال بروز نقطه‌های بهینه محلی و در نتیجه، جست‌وجوی راه‌حل‌های بهتر را افزایش دهد [۱۸]. موسوی و همکارانش طی پژوهشی مدل شبیه‌ساز WEAP را با استفاده از برنامه‌نویسی سریع و یکپارچه خطی به الگوریتم بهینه‌سازی MOPSO متصل کردند. توابع هدف در پژوهش یادشده، به حداقل رساندن زیرساخت‌های پروژه و به حداکثر

بهره‌برداری جیره‌بندی گسسته و مدل بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک چندهدفه با رویکرد مرتب‌سازی نامغلوب، استفاده شد. نتایج بیان‌کننده کارایی مؤثر این مدل در به دست آوردن جواب مطلوب بود [۹]. افشار و همکارانش از الگوریتم بهینه‌سازی جامعه مورچگان به منظور بهینه‌سازی بهره‌برداری از سد دز استفاده کردند. تابع هدف در پژوهش یادشده، حداکثرسازی تأمین آب مورد نیاز و نیز حداکثرسازی بهره‌برداری برق آبی از مخزن بود. نتایج پژوهش آنها نشان داد این الگوریتم برای بهره‌برداری بهینه از سد دز مناسب است [۱۰]. لی<sup>۱</sup> و همکارانش برای بهینه‌سازی یک سیستم چندمخزنه با نیازهای متعدد مانند نیازهای زیست‌محیطی، کشاورزی و برق آبی را در حوضه رودخانه‌ای واقع در چین با استفاده از نوعی روش جدید به نام الگوریتم چندهدفه بهینه‌سازی به کار بردند. الگوریتم پیشنهادی شامل خواص مؤثر الگوریتم ژنتیک و دو مکانیزم کارآمد دیگر به نام‌های یادگیری مبتنی بر مخالفت و انتخاب مبتنی بر شاخص می‌شد که به منظور افزایش سرعت همگرایی و حفظ تنوع به الگوریتم ژنتیک اضافه شده‌اند. نتایج پژوهش یادشده نشان داد الگوریتم پیشنهادی می‌تواند جواب‌های مناسب را با سرعت زیادی به دست آورد [۱۱].

آزادانیا و زهرایی با استفاده از الگوریتم PSO بهره‌برداری از مخزن سد سفیدرود را بررسی کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد با استفاده از الگوریتم PSO، دو هدف تأمین نیاز آب پایین‌دست و تخلیه رسوب نتایج به‌خوبی برآورده می‌شود [۱۲]. معراجی و همکارانش با استفاده از الگوریتم PSO به بهینه‌سازی ابعاد سیستم انحراف سدها بر اساس شاخص ریسک پرداختند و یک مدل ریاضی براساس شاخص ریسک، هزینه‌های ساخت و شکست سد ارائه دادند و با به‌کارگیری آن، ابعاد بهینه سیستم را تعیین کردند [۱۳]. خاشعی و همکارانش با استفاده از الگوریتم PSO الگوی کشت بهینه‌ای برای جلوگیری از افت تراز سفره آب زیرزمینی ارائه دادند و بیشترین برداشت از این منبع را برای سال نرمال مشخص کردند [۱۴]. علی‌حجتی و همکارانش با هدف حداکثرسازی درآمد حاصل از تولید برق، بهره‌برداری بهینه از دو مخزن ساخته‌شده در رودخانه اوزان را با استفاده از دو الگوریتم NSGA-II و MOPSO بررسی کردند. نتایج به‌دست‌آمده از

2. Balavalikar  
3. Wan

1. Li

استفاده از الگوریتم تک‌هدفه PSO بررسی می‌شود. همچنین، از آب‌های نامتعارف برای استفاده در بخش‌های صنعت، محیط زیست و تغذیه مصنوعی به آبخوان استفاده خواهد شد.

### روش تحقیق

در تحقیق حاضر نوعی الگوریتم تلفیقی برای استفاده بهینه از منابع آب‌های زیرزمینی و انتقالی ارائه شده است که یک مدل شبیه‌ساز و یک الگوریتم بهینه‌سازی دارد. در این بخش ابتدا مشخصات محدوده مطالعه شده، مشخصات و چگونگی کارکرد مدل شبیه‌ساز WEAP و اطلاعات ورودی‌های مورد نیاز برای شبیه‌سازی در این مدل بیان می‌شود. در ادامه به ساختار، چگونگی کارکرد، تابع هدف و قیود الگوریتم بهینه‌ساز PSO پرداخته خواهد شد و سناریوهای اعمال شده در تحقیق حاضر بیان می‌شوند.

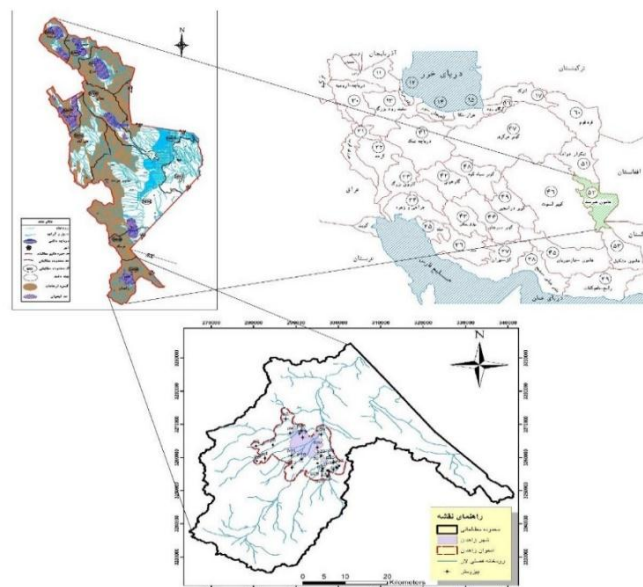
### معرفی منطقه مطالعاتی

شهرستان زاهدان یکی از کلان‌شهرهای ایران و مرکز استان سیستان و بلوچستان است. محدوده مطالعاتی زاهدان در حوضه آبریز هامون هیرمند و در جنوب آن واقع شده است. این محدوده ۲۲۶۱ کیلومترمربع وسعت دارد که ۲۰۲۷ کیلومترمربع آن ارتفاعات است و ۲۳۲ کیلومترمربع آن را دشت زاهدان تشکیل می‌دهد (شکل ۱).

رساندن قابلیت اطمینان تأمین آب بخش کشاورزی دشت چرام و کوه‌دشت در استان کهگیلویه و بویراحمد بود. نتایج پژوهش آنها نشان داد مدل ترکیبی MOPSO-WEAP می‌تواند در سطح اعتمادپذیری بالایی نیاز کشاورزی این دو دشت را تأمین کند [۱۵].

روش‌های مختلفی برای تخصیص بهینه منابع آبی معرفی شده‌اند که در این میان رویکرد شبیه‌سازی-محققان قرار گرفته است و راه‌حلی کارآمد برای بهره‌برداری بهینه از منابع آبی است. با توجه به تحقیقات گذشته در بهینه‌سازی تخصیص منابع آب، استفاده از الگوریتم فراکوشی ازدحام ذرات (PSO) به دلیل ساختار ساده، پیاده‌سازی آسان، سرعت همگرایی بسیار زیاد و انعطاف‌پذیری مناسب، راه‌کاری مطلوب برای بهینه‌سازی تخصیص منابع آب و کاهش شکست‌ها (کمبود زیاد در ماه‌های گرم و تأمین کامل در ماه‌های سرد) به‌خصوص در مناطق خشک و کم‌آب است.

در تحقیقات گذشته دو هدف متضاد با دو تابع هدف بهینه‌سازی می‌شد و در نهایت مجموعه جواب‌های پارتو با عدم قطعیت‌های زیاد به عنوان جواب مسئله معرفی می‌شدند. در پژوهش حاضر برای رسیدن به نقطه بهینه قطعی، حداقل‌سازی عدم تأمین نیازها و حداقل‌سازی برداشت از منابع آب زیرزمینی در قالب یک هدف و با



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی محدوده مطالعه شده

### معرفی مدل شبیه‌ساز WEAP

مدل مدیریت و ارزیابی آبی (WEAP) یک مدل جامع، کاربرپسند و انعطاف‌پذیر است که برای برنامه‌ریزی منابع آب توسعه داده شده است. مزیت اصلی WEAP، در رویکرد یکپارچه در شبیه‌سازی سیستم‌های آبی و ارزیابی تأثیر سیاست‌های مختلف است. این مدل در معادلات خود، مسائل مربوط به نیازها مانند الگوی مصرف آب، راندمان تجهیزات، استفاده مجدد، هزینه‌ها و غیره را هم‌زمان با مسائل مربوط به منابع آب شامل منابع سطحی، آب‌های زیرزمینی، مخازن و انتقال‌های آب در نظر می‌گیرد. WEAP تقاضاها، مقادیر عرضه، جریان‌ها، مقادیر ذخیره، تولید آلودگی احتمالی را شبیه‌سازی و سیاست‌های گوناگون و گزینه‌های مدیریتی را ارزیابی می‌کند [۲۰].

مدل WEAP براساس اصول ابتدایی موازنه آب عمل می‌کند و قادر به شبیه‌سازی تعداد زیادی از مؤلفه‌های سیستم حوضه‌ای مانند دبی پایه، رواناب، تغذیه آب‌های زیرزمینی، تحلیل نیازها و اولویت‌های تخصیص، انرژی برق آبی، نیازهای اکوسیستم و روندیابی پخش آلودگی و کیفیت منابع است. با توجه به نیازها و اهداف موجود، می‌توان داده‌های مد نظر و جزئیات را به سیستم معرفی کرد و نیازی به وارد کردن همه جزئیات نخواهد داشت. WEAP همچنین می‌تواند نیاز آبی، جریان‌های ورودی و خروجی، طرح‌های انتقال آب بین حوضه‌ای و غیره را شبیه‌سازی کند و از جامعیت قابل قبولی برخوردار است. WEAP مانند آزمایشگاهی عمل می‌کند و می‌توان از آن برای ارزیابی استراتژی‌های مختلف توسعه و تصمیم‌های مدیریتی استفاده کرد [۲۰ و ۲۱].

رابطه بیلان آبی اساسی‌ترین رابطه‌ای است که WEAP در محاسبات ماهانه در نظر گرفته است و با استفاده از برنامه‌ریزی خطی سعی در حداکثر کردن تأمین نیازها و حداقل جریان تعریف‌شده سطحی با توجه به منابع موجود، رابطه بیلان آبی و سایر قیود (آب انتقالی، حداکثر میزان برداشت زیرزمینی و...) دارد. مدل‌سازی شامل گام‌هایی می‌شود که عبارت‌اند از:

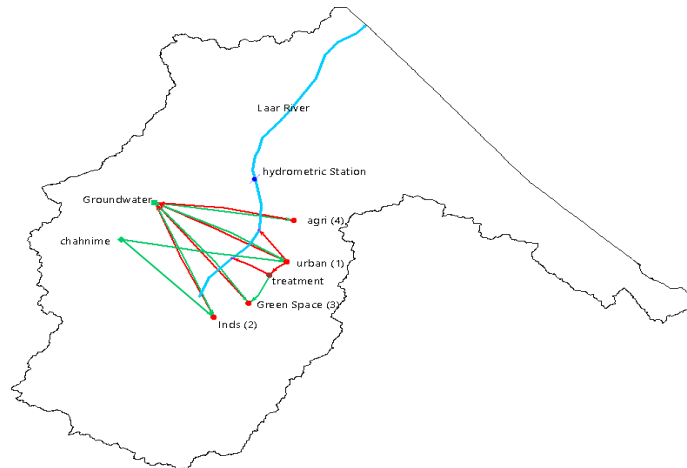
۱. ابتدا چارچوب‌های زمانی، مکانی و مؤلفه‌های اساسی سیستم ایجاد و مدل پیکربندی می‌شوند.
۲. در گام بعدی منابع، نیازها، کمبودها و آلودگی‌ها در وضعیت حال حاضر مدل‌سازی می‌شود.

۳. در گام سوم سناریوها و طرح‌های قابل اجرا و محتمل در آینده که سیستم را تحت تأثیر قرار می‌دهند، تعریف می‌شوند.

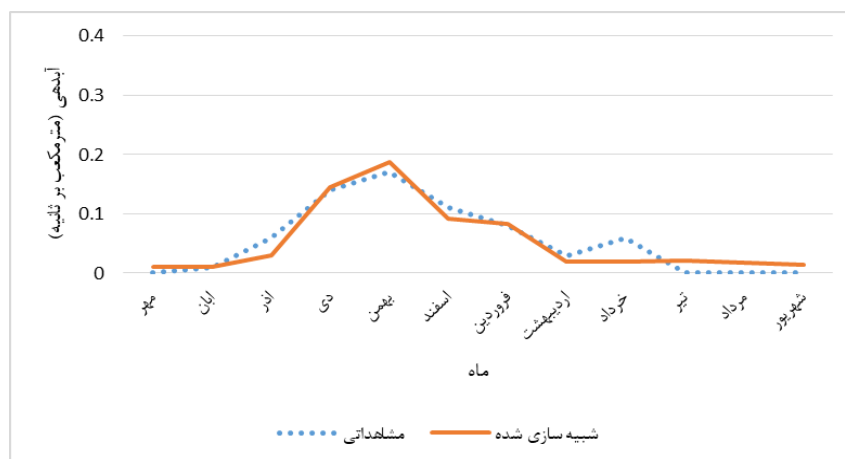
۴. در گام آخر سناریوهای مختلف نسبت به تأمین نیازها، هزینه‌ها، سازگاری با اهداف و... ارزیابی می‌شوند [۲۰].

### ایجاد نقشه‌های پایه، ورود اطلاعات و صحت‌سنجی در مدل WEAP

در تحقیق حاضر برای شبیه‌سازی و مدیریت یکپارچه منابع آبی از مدل WEAP استفاده شد. برای تهیه چارچوب اصلی مدل در نرم‌افزار WEAP در گام نخست نقشه اولیه حوضه شامل مرزهای حوضه مطالعه‌شده و مسیرهای رودخانه‌ای موجود توسط GIS تهیه شده و به مدل فراخوانی شدند تا به صورت نقشه پیش‌زمینه استفاده شوند. سپس، به کمک ابزارهای نرم‌افزار WEAP در بخش شماتیک، مسیر رودخانه اصلی، محل ایستگاه‌های هیدرومتری، نیازهای شرب، صنعت، کشاورزی و خطوط برگشت مربوط به هر نیاز به صورت شماتیک به معدل معرفی شدند. داده‌های اقلیمی و هواشناسی نیز شامل میزان بارندگی، متوسط تبخیر پتانسیل از سازمان آب منطقه‌ای گرفته شده و در مدل وارد شد. با توجه به تحقیقات مشابه و به منظور بررسی تأثیر سناریوهای مختلف در بلندمدت، طول دوره شبیه‌سازی را ۲۰ سال در نظر می‌گیریم. گام زمانی ماهانه در نظر گرفته می‌شود و با توجه به اینکه ماه‌های پیش‌فرض مدل میلادی هستند، ژانویه به‌عنوان نخستین ماه سال آبی (مهرماه) به مدل معرفی می‌شود. با توجه به وضعیت کویری منطقه، بارندگی و توزیع زمانی و مکانی آن بسیار متغیر و نامنظم است. به همین دلیل، در پژوهش حاضر از داده‌های اقلیمی دوره ۳۰ ساله (۱۳۶۶-۱۳۹۶) برای شبیه‌سازی استفاده شد. همچنین، با توجه به دسترسی به اطلاعات مورد نیاز شامل جمعیت، سرانه شرب شهری، سرانه فضای سبز، الگوی کشت، سطح زیر کشت، تعداد واحدهای صنعتی و منابع آبی قابل استفاده در سال ۱۳۹۴، این سال به‌عنوان سال پایه برای مدل در نظر گرفته شد. همچنین منابع، نیازها و مصارف برای این سال به‌عنوان شرایط موجود به مدل معرفی شدند. رودخانه، ایستگاه هیدرومتری، منابع، مصارف و خطوط برگشت آب در این مدل به صورت شماتیک در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲. شماتیک مدل WEAP در سناریوی مرجع



شکل ۳. مقادیر مشاهداتی و شبیه سازی شده در محل ایستگاه هیدرومتری لار پایین

به نظر می رسد علت اختلاف مقادیر مشاهده شده با مقادیر شبیه سازی شده، رهاسازی مقداری از فاضلاب شهری زاهدان در رودخانه لار، عدم قطعیت ها در ثبت داده های هیدرومتری ایستگاه مربوطه و همچنین عدم قطعیت های مربوط به عوامل مؤثر در شبیه سازی است. به منظور بررسی آماری، مقادیر به دست آمده از شاخص بدون بعد نش<sup>۱</sup> مطابق رابطه ۱ استفاده می شود.

$$NASH = 1 - \frac{\sum_{t=1}^n (H_t - \hat{H}_t)^2}{\sum_{t=1}^n (H_t - \bar{H}_t)^2} \quad (1)$$

در رابطه یاد شده:  $H_t$ ، مقادیر مشاهداتی؛  $\hat{H}_t$ ، مقادیر شبیه سازی شده؛  $\bar{H}_t$ ، میانگین مقادیر مشاهداتی و  $n$ ، تعداد مشاهدات است.

### صحت سنجی مدل

برای صحت سنجی مدل با توجه به کمبود اطلاعات از متوسط ماهانه آمار بلندمدت مشاهداتی ایستگاه هیدرومتری رودخانه لار و مقایسه آن با داده های به دست آمده از مدل شبیه ساز استفاده شده است. با توجه به مشخص نبودن حجم ورود فاضلاب شهری به این رودخانه و همچنین رهاسازی پساب به وجود آمده از شیرین سازی آب زیرزمینی به این رودخانه، مقادیر به دست آمده مقداری خطا دارد. شایان یادآوری است، با توجه به نبود تأسیسات ذخیره آب سطحی در منطقه به دلیل تبخیر بسیار زیاد و بارش کم، تأمین نیاز آبی در منطقه از طریق آب های انتقالی و آب های زیرزمینی صورت می گیرد. بنابراین، این مقادیر خطا در مدل سازی نیازها و مصارف خللی ایجاد نمی کند. مقادیر مشاهداتی و نیز مقادیر شبیه سازی شده در شکل ۳ نمایش داده شده اند.

1. Nash

تغرق مرجع توصیه شده است [۲۳ و ۲۴]. با توجه به نوع آبیاری در منطقه مطالعه شده (استفاده از روش‌های آبیاری قطره‌ای و کرتی) میزان آبیاری ۵۰ درصد در نظر گرفته شد و مجموع نیاز سالانه در بخش کشاورزی ۶۹/۷۱ میلیون مترمکعب برآورد شد.

سرانه فضای سبز برای منطقه مطالعه شده حدود یک مترمربع برای هر نفر است. همچنین، میزان حداکثر نیاز فضای سبز بر اساس استاندارد صنعت آب کشور، برای مناطق خشک بین ۸-۱۴ لیتر به ازای هر مترمربع است. در پژوهش حاضر این مقدار ۸ لیتر به ازای هر مترمربع در نظر گرفته شد. همچنین، با توجه به جمعیت شهر زاهدان در سال ۱۳۹۴، مقدار نیاز سالانه فضای سبز ۱/۸۷۳ میلیون مترمکعب در نظر گرفته شد.

تعداد واحدهای صنعتی در حال فعالیت در شهرستان زاهدان در مجموع ۳۱۹ واحد است. با توجه به نبود اطلاعات کافی از ترکیب واحدهای صنعتی در حال فعالیت از میانگین مقادیر واحدهای صنعتی مختلف استفاده می‌کنیم. این مقدار ۶/۱۷۵ مترمکعب در روز به ازای هر واحد صنعتی در نظر گرفته می‌شود [۲۵]. با در نظر گرفتن تلفات به مقدار ۲۲/۳ درصد میزان نیاز واحدهای صنعتی فعال ۰/۸۷ میلیون مترمکعب محاسبه می‌شود. با توجه به نبود اطلاعات کافی از میزان فضای سبز موجود در شهرک‌های صنعتی، مساحت تقریبی فضای سبز واقع در شهرک‌های صنعتی با توجه به نقشه‌های هوایی حدود پنج هکتار در نظر گرفته شده و بر اساس بخش قبل آب مورد نیاز سالانه آن ۰/۱۴ میلیون مترمکعب و مجموع آب مورد نیاز سالانه برای بخش صنعت ۱/۰۱ میلیون مترمکعب تخمین زده می‌شود.

#### بهینه‌سازی

الگوریتم بهینه‌سازی تجمعی ذرات<sup>۲</sup> که به اختصار PSO نامیده می‌شود، برای نخستین بار توسط ابرهات<sup>۳</sup> و کندی<sup>۴</sup> به عنوان نوعی روش جست‌وجوی غیر قطعی برای بهینه‌سازی تابعی مطرح شد. این الگوریتم از حرکت دسته‌جمعی پرندگان یا ماهی‌هایی که به دنبال غذا هستند، الهام گرفته شده است. در طبیعت گروهی از

مقدار شاخص NASH برای این مدل ۰/۸۸۷ به دست آمد که نشان‌دهنده تطابق نسبتاً مناسب مدل و داده‌های مشاهداتی است.

#### منابع آبی

منابع تأمین آب شهرستان زاهدان شامل دو منبع آب‌های زیرزمینی و آب انتقالی از چاه‌نیمه‌های زابل است. با توجه به اینکه هیچ‌گونه سد و بندی در منطقه وجود ندارد، حجم کل ذخیره آب‌های سطحی در این محدوده صفر است. حجم سالانه نزولات جوئی در سطح محدوده مطالعه شده ۲۳۲/۸۰۰ میلیون مترمکعب بوده و حجم سالانه برداشت از منابع آب زیرزمینی معادل ۳۰/۲۴۱ میلیون مترمکعب است [۱]. خط نخست انتقال آب از چاه‌نیمه‌های زابل به زاهدان در سال ۱۳۸۲ به طول ۱۹۲/۳ کیلومتر و با ظرفیت ۸۵۰ لیتر بر ثانیه به بهره‌برداری رسید. همچنین، با افزایش جمعیت در سال‌های اخیر، احداث خط دوم انتقال آب از چاه‌نیمه‌ها به شهرستان زاهدان با هدف رفع نیازهای آبی کنونی و تأمین نیازهای شرب شهری برای افق جمعیتی سال ۱۴۲۰، در سال ۱۳۹۰ و با دبی نهایی پمپاژ ۱۶۸۰ لیتر بر ثانیه آغاز شده و در دست احداث است.

#### نیازها

سرانه مصرف شهری در شهر زاهدان برای هر نفر ۱۰۰ لیتر در روز برآورد شده است. میزان تلفات واقعی در شبکه انتقال (نشت از شبکه) ۱۸/۵ درصد، تلفات ظاهری ۳/۸ درصد و مجموع تلفات ۲۲/۳ درصد برآورد شده است [۲۲]. بر اساس اطلاعات سازمان ثبت احوال جمعیت این شهر در سال ۱۳۹۴، ۶۴۸۵۵۷ نفر بوده است و با توجه به سرشماری‌های عمومی نفوس و مسکن، میزان رشد جمعیت برای این شهر ۳/۷۰۵ محاسبه شده است.

نیاز کشاورزی برای این شهر با توجه به الگوی کشت منطقه و نیاز آبی خالص گیاهان با استفاده از روش فائو- پنمن-مانتیث<sup>۱</sup> و اطلاعات اداره کل هواشناسی به دست آمد. در روش یادشده براساس تبخیر و تعرق گیاه مرجع، نیاز خالص آبیاری برای گیاه مد نظر به دست می‌آید. در حال حاضر، با توجه به نتیجه اجلاس کارشناسی سال ۱۹۹۰ میلادی فائو، روش فائو- پنمن-مانتیث به عنوان تنها روش استاندارد برای تعریف و محاسبه میزان تبخیر-

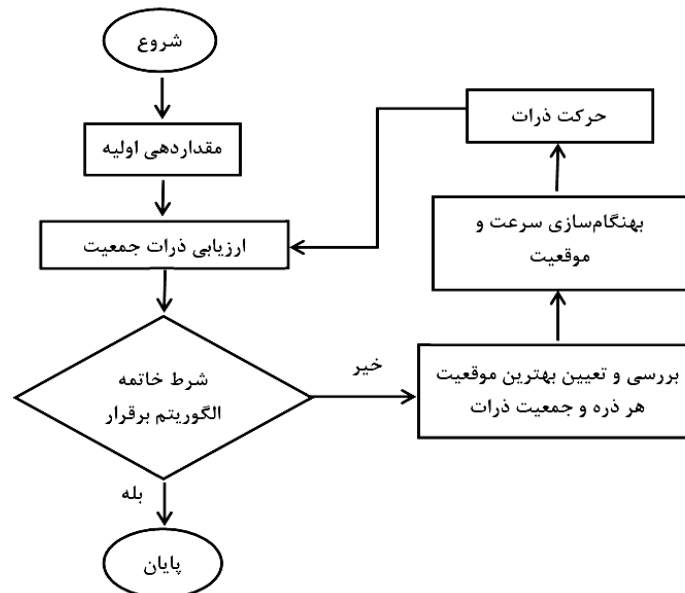
2. Particle Swarm Optimization  
3. Eberhart  
4. Kennedy

1. The FAO Penman-Monteith Method

این‌گونه است که در هر لحظه هر ذره مکان خود را در فضای جست و جو با توجه به بهترین مکانی که در کل همسایگی‌اش وجود دارد و بهترین مکانی که تا کنون در آن قرار گرفته است، مقایسه می‌کند [۲۶].

در این الگوریتم هر جواب به‌صورت یک ذره در نظر گرفته می‌شود که در محیط مسئله در حال جست‌وجو بوده و حرکت آن تحت تأثیر سه عامل زیر است:

۱. موقعیت کنونی ذره؛
  ۲. بهترین موقعیتی که ذره تا کنون تجربه کرده است؛
  ۳. بهترین موقعیتی که همه ذرات به آن رسیده‌اند [۲۶].
- فلوچارت این الگوریتم در شکل ۴ به تصویر درآمده است.



شکل ۴. فلوچارت الگوریتم PSO

و در هر تکرار نیز بهترین موقعیت قبلی خودش را در حافظه‌اش حفظ کرده که با بردار  $P$  نشان داده می‌شود (رابطه ۴):

$$P_i^t = (p_{i1}^t, p_{i2}^t, \dots, p_{iD}^t) \quad (4)$$

در هر تکرار جست و جو، هر ذره با در نظر داشتن دو مقدار بهترین به‌روزرسانی می‌شود. نخستین بهترین مربوط به بهترین راه‌حلی است که ذره تا کنون آن را تجربه کرده است و به اصطلاح  $P_{best}$  نامیده می‌شود. همچنین مقدار شایستگی این راه‌حل نیز ذخیره می‌شود. دومین بهترین که توسط PSO دنبال می‌شود، بهترین موقعیتی است که

پرنندگان یا ماهی‌ها که شناخت چندانی نسبت به محیط اطراف ندارند، حرکتشان را بر اساس حرکت گروه تنظیم می‌کنند تا بتوانند به هدف خود نائل شوند. در PSO ذرات در فضای جست‌وجو جاری می‌شوند و تغییر مکان ذرات در فضای جست‌وجو تحت تأثیر تجربه و دانش خودشان و همسایگانشان است، بنابراین موقعیت دیگر توده‌های ذرات روی چگونگی جست‌وجوی یک ذره تأثیر می‌گذارد. نتیجه مدل‌سازی این رفتار اجتماعی فرایند جست‌وجویی است که ذرات به سمت نواحی موفق میل می‌کنند. ذرات از یکدیگر می‌آموزند و بر مبنای دانش به‌دست‌آمده به سمت بهترین همسایگان خود می‌روند. اساس کار الگوریتم PSO

در PSO هر راه‌حل تنها یک پرنده در فضای جست‌وجو است و عضو یا ذره نامیده می‌شود. تمام پرنندگان یک مقدار شایستگی دارند که توسط تابع شایستگی که باید بهینه شود، ارزیابی می‌شود. علاوه بر این هر پرنده  $i$  دارای یک موقعیت در فضای  $n$  بعدی مسئله است که در تکرار  $t$  ام، با یک بردار به‌صورت رابطه ۲ نمایش داده می‌شود:

$$X_i^t = (x_{i1}^t, x_{i2}^t, \dots, x_{iD}^t) \quad (2)$$

همچنین، این پرنده سرعت مشخصی دارد و در تکرار  $t$  ام با بردار زیر نشان داده می‌شود (رابطه ۳):

$$V_i^t = (v_{i1}^t, v_{i2}^t, \dots, v_{iD}^t) \quad (3)$$



حداقل‌سازی برداشت از آب‌های زیرزمینی به‌صورت یک تابع بهینه‌سازی شد. تابع هدف به صورت رابطه ۸ تعریف شد:

$$F = \text{Minimize} \sum_{t=1}^n \sum_{d=1}^m (1 - \text{coverage}) + \text{Minimize} \sum_{t=1}^n (\text{Release from Groundwater}) = \quad (A)$$

$$\text{Minimize} \left( \sum_{t=1}^n \sum_{d=1}^m \left( 1 - \frac{RT_{td}}{D_{td}} \right) + \sum_{t=1}^n \left( \frac{RG_t}{RT_t} \right) \right)$$

در این رابطه:  $t$ ، دوره شبیه‌سازی؛  $d$ ، نوع نیاز؛  $RT_{td}$ ، حجم کل آب تخصیص داده‌شده برای نیاز  $d$ ، در دوره  $t$ ؛  $D_{td}$ ، حجم کل آب مورد نیاز برای نیاز  $d$ ، در دوره  $t$ ؛  $RG_t$ ، حجم کل آب تخصیص داده‌شده از منبع آب‌های زیرزمینی در دوره  $t$  و  $RT_t$ ، حجم کل آب تخصیص داده‌شده در دوره  $t$  است.

در پژوهش حاضر سیاست‌های محتمل برای ۲۰ سال آینده در قالب پنج سناریو بررسی خواهند شد. سناریوی نخست با فرض افزایش جمعیت و ادامه سیاست‌های مدیریتی فعلی و منابع موجود تعریف شد. سناریوی دوم با فرض افزایش ۲۰ درصدی میزان آبیاری در بخش کشاورزی (با تغییر روش آبیاری به آبیاری قطره‌ای) و همچنین استفاده از پساب تصفیه‌شده توسط تصفیه‌خانه فاضلاب شهر زاهدان، برای تأمین نیازهای فضای سبز و صنعت و همچنین تغذیه مصنوعی به آبخوان تعریف شد. سناریوی سوم برای حالت بهره‌برداری از خط دوم انتقال آب از چاه‌نیمه با هدف تأمین نیازهای شرب منطقه و افزایش ۲۰ درصدی سرانه مصرف تعریف شد. سناریوی چهارم با هدف بهینه‌سازی رهاسازی‌ها در سناریوی مرجع تعریف شد. در نهایت، سناریوی پنجم که به‌عنوان سناریوی ایده‌آل تعریف شد، با هدف بهینه‌سازی رهاسازی‌ها با ترکیب سناریوهای دوم و سوم، با در نظر گرفتن بهره‌برداری از خط دوم انتقال آب و افزایش سرانه آب مصرفی و همچنین افزایش ۲۰ درصدی میزان آبیاری در بخش کشاورزی و استفاده از پساب تصفیه‌شده برای نیازهای صنعت و نیازهای فعلی و توسعه چهاربرابری سطح فضای سبز تعریف شد.

تا کنون در جمعیت به‌دست‌آمده است. این مقدار بهینه عمومی است و به اصطلاح  $G_{best}$  نامیده می‌شود. بعد از اینکه این دو مقدار پیدا شدند، موقعیت و سرعت هر ذره توسط روابط ۵ و ۶ به‌روزرسانی می‌شوند:

$$V_i(t+1) = wV_i(t) + c_1r_{1,i}(t)(P_i(t) - V_i(t)) + c_2r_{2,i}(t)(P_g(t) - V_i(t)) \quad (5)$$

$$X_i(t+1) = X_i(t) + V_i(t+1) \quad (6)$$

در روابط یادشده  $t$  بیان‌کننده شماره تکرار و متغیرهای  $c_1, c_2$  فاکتورهای یادگیری هستند. اغلب  $c_1 = c_2 = 2$  است که میزان جابه‌جایی یک پرنده را در یک‌بار تکرار کنترل می‌کند.  $r_1, r_2$  دو عدد تصادفی یکنواخت در محدوده یک و صفر هستند.  $w$  یک وزن اینرسی است که برای کنترل تأثیر سرعت‌های قبلی در همگرایی در محدوده یک و صفر مقداردهی اولیه می‌شود. هرچه این مقدار بیشتر باشد، جست‌وجوی کلی بیشتر خواهد شد و هرچه این مقدار کمتر باشد، جست‌وجوی محلی افزایش خواهد یافت. مقدار  $w$  در هر تکرار مطابق رابطه ۷ تعریف می‌شود.

در رابطه ۷  $w_{max}$  وزن اینرسی در شروع جست‌وجو،  $w_{min}$  وزن در انتهای جست‌وجو،  $n$  شماره تکرار و  $Iter_{max}$  تعداد کل تکرارها است. در الگوریتم PSO جمعیت به‌صورت تصادفی مقداردهی اولیه می‌شود و تا رسیدن به شرط خاتمه به‌صورت تکراری شایستگی جمعیت محاسبه‌شده و مقادیر  $P_{best}$  و  $G_{best}$  به دست می‌آیند. سرعت و موقعیت نیز در هر دور به‌روزرسانی می‌شوند. در آخر هم  $G_{best}$  و مقدار شایستگی‌اش به‌عنوان خروجی بیان می‌شوند. شرط خاتمه می‌تواند رسیدن به حداکثر تعداد نسل‌ها یا رسیدن به یک مقدار خاص شایستگی در  $G_{best}$  باشد [۲۷].

$$w = w_{max} - \frac{(w_{max} - w_{min}) \times n}{Iter_{max}} \quad (7)$$

در پروژه یادشده برای بهره‌برداری بهینه از منابع آب موجود در منطقه مطالعه شده از الگوریتم PSO یک‌هدفه استفاده شد. به این صورت که دو هدف مد نظر یعنی حداقل‌سازی عدم تأمین نیازهای مختلف و همچنین

نتایج و بحث

سناریوی مرجع

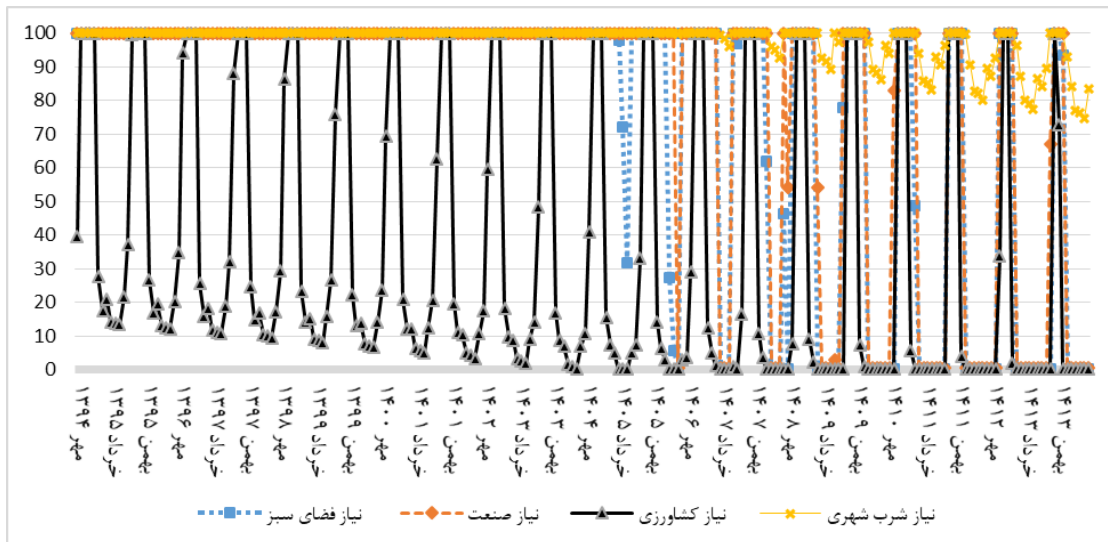
درصد تأمین نیازها به صورت متوسط ماهانه در شکل ۵ نشان داده شده است. بیشترین کمبود در تأمین نیازها در ماه‌های خرداد، تیر، مرداد و شهریور دیده می‌شود. نیاز کشاورزی به طور متوسط در بیشتر ماه‌ها کمتر از ۲۰ درصد تأمین می‌شود.

در اواخر دوره شبیه‌سازی با افزایش جمعیت، تأمین نیازها کاهش پیدا می‌کند و در تابستان سال‌های انتهایی

دوره شبیه‌سازی، آب کافی حتی برای تأمین مصارف شرب شهری با مشکل مواجه می‌شود، به طوری که در مردادماه آخرین سال دوره شبیه‌سازی فقط ۷۴ درصد آب شرب مورد نیاز تأمین می‌شود. با توجه به کمبود شدید منابع آبی و اولویت زیاد تأمین نیاز شرب شهری، تأمین نیازهای دیگر در سال‌های پایانی دوره شبیه‌سازی و در ماه‌های گرم به صفر می‌رسد. شکل ۶ مقدار درصد تأمین نیازها طی دوره شبیه‌سازی در سناریوی مرجع را نشان می‌دهد.



شکل ۵. متوسط ماهانه درصد تأمین نیازهای مختلف در سناریوی مرجع

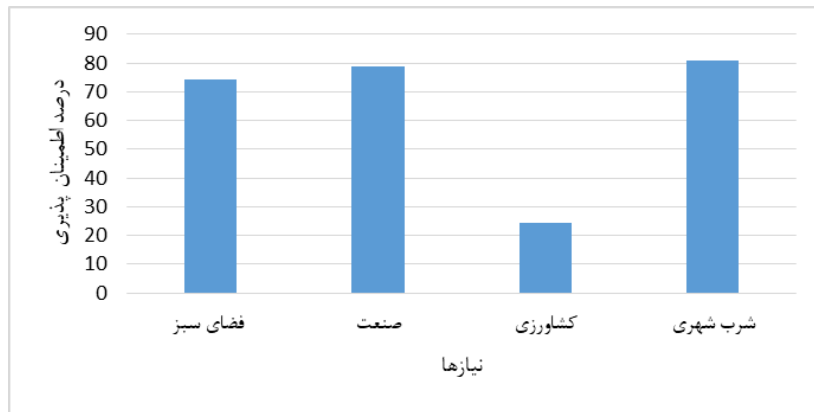


شکل ۶. درصد تأمین نیاز ماهانه برای نیازهای مختلف طی دوره شبیه‌سازی در سناریوی مرجع

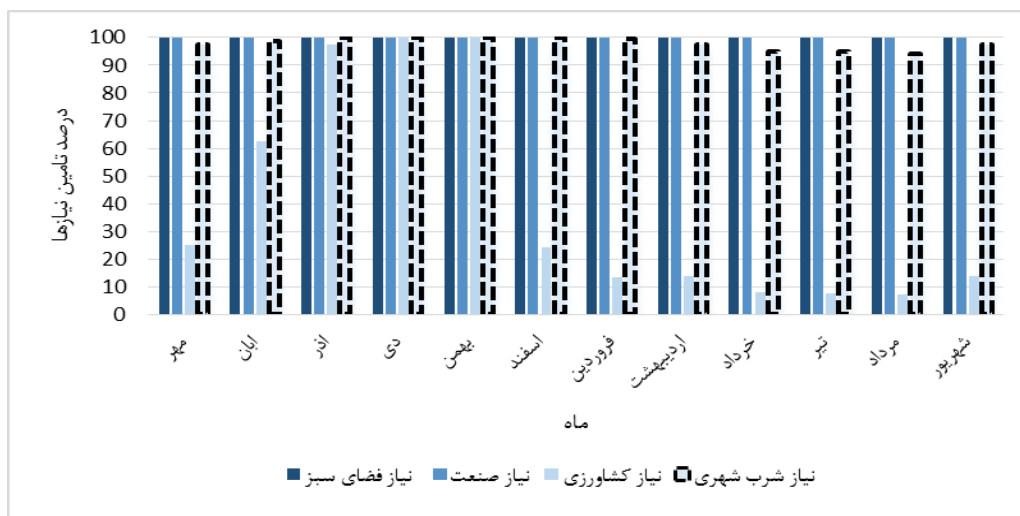
برای مصارف شرب تخصیص داده نشده است. از طرفی، با توجه به اولویت بیشتر برای تأمین نیاز شرب شهری نسبت به سایر نیازها، در همه سناریوها ابتدا نیاز شرب شهری تأمین خواهد شد. میزان تأمین برای نیازهای صنعت و فضای سبز به صورت ۱۰۰ درصد در نظر گرفته شده است، در حالی که با توجه به رشد جمعیت و افزایش چهاربرابری سرانه فضای سبز، سطح فضای سبز از ۶۴/۸۵ هکتار در سناریوی مرجع به ۵۱۷/۲ هکتار در سال پایانی دوره شبیه‌سازی رسیده است. میزان تأمین نیاز برای مصارف کشاورزی با توجه به افزایش ۲۰ درصدی مقدار آبیاری در این بخش به طور متوسط ۶ درصد افزایش پیدا کرده است. درصد تأمین نیازهای به صورت متوسط ماهانه در شکل ۸ نشان داده شده است.

درصد اعتمادپذیری تأمین نیاز برای نیاز شرب با توجه به اولویت بیشتر ۸۰/۸ درصد است، بنابراین در بیش از ۸۰ درصد ماه‌های دوره شبیه‌سازی این نیاز به صورت کامل تأمین خواهد شد. نیاز صنعت در منطقه مد نظر حدود ۷۸ درصد اوقات به طور کامل تأمین می‌شود و نیاز فضای سبز نیز حدود ۷۳ درصد اوقات تأمین خواهد شد. نیاز کشاورزی حدود ۲۴ درصد اوقات به طور کامل تأمین می‌شود که این تأمین نیاز در فصول سرد صورت می‌گیرد. شکل ۷ درصد اعتمادپذیری تأمین نیازها در این سناریو را نشان می‌دهد.

سناریوی افزایش مقدار و استفاده از پساب تصفیه‌شده در این سناریو تأمین نیاز آب شرب در مقایسه با سناریوی مرجع تغییر چندانی نکرده است، زیرا پساب تصفیه‌شده،



شکل ۷. درصد اعتمادپذیری تأمین نیازهای مختلف در سناریوی مرجع



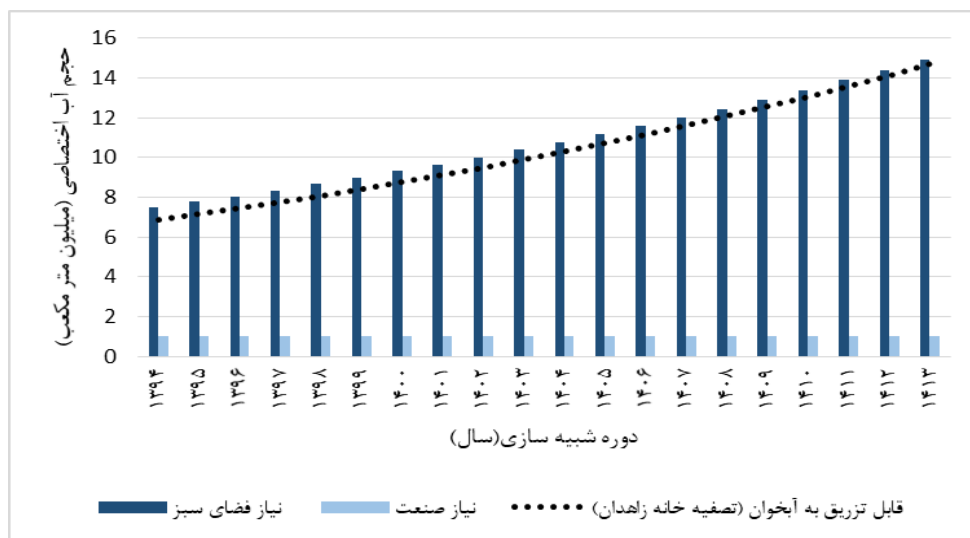
شکل ۸. متوسط ماهانه درصد تأمین نیازهای مختلف در سناریوی افزایش مقدار و استفاده از پساب تصفیه‌شده

درصدی سرانه مصرف برطرف خواهد شد و تأمین نیاز شرب برای همه ماهها به صورت کامل صورت می‌پذیرد. همچنین، در این سناریو نیاز صنعت و فضای سبز طی دوره شبیه‌سازی به صورت کامل تأمین خواهد شد. در این سناریو تأمین نیاز بخش کشاورزی همچنان به صورت کامل تأمین نخواهد شد، ولی نسبت به سناریوی مرجع ۳۵ درصد رشد را نشان می‌دهد. در این سناریو مجموع کل برداشت از منبع آب زیرزمینی طی دوره شبیه‌سازی شده حدود ۴۰۰ میلیون مترمکعب است. متوسط ماهانه درصد تأمین نیازها در این سناریو در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

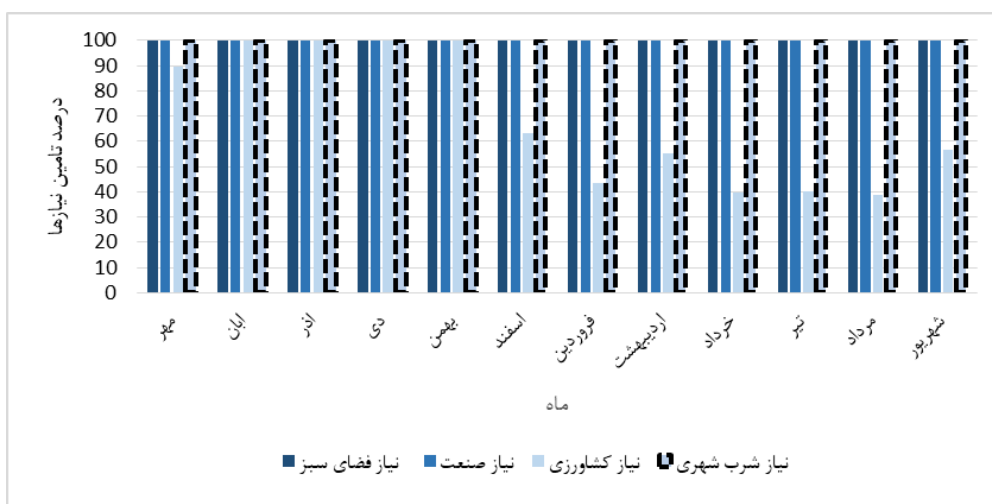
میزان برداشت از منبع آب‌های زیرزمینی در مجموع با حدود ۲ درصد کاهش نسبت به سناریوی مرجع طی دوره شبیه‌سازی به میزان ۵۲۰ میلیون مترمکعب رسیده است. چگونگی تخصیص پساب تصفیه‌شده در این سناریو در شکل ۹ نشان داده شده است.

### سناریوی بهره‌برداری از خط دوم انتقال آب از چاه نیمه و افزایش سرانه آب شرب مصرفی

با بهره‌برداری از خط دوم انتقال آب از چاه نیمه به شهر زاهدان، مشکل تأمین نیاز آب آشامیدنی با وجود افزایش ۲۰



شکل ۹. حجم آب اختصاص یافته برای مصارف صنعت و فضای سبز از پساب تصفیه‌شده



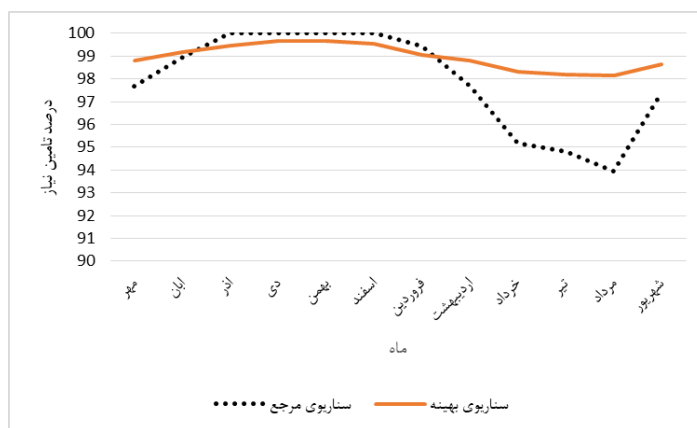
شکل ۱۰. متوسط ماهانه درصد تأمین نیازهای مختلف در سناریوی بهره‌برداری از خط دوم انتقال آب

سناریوی بهینه

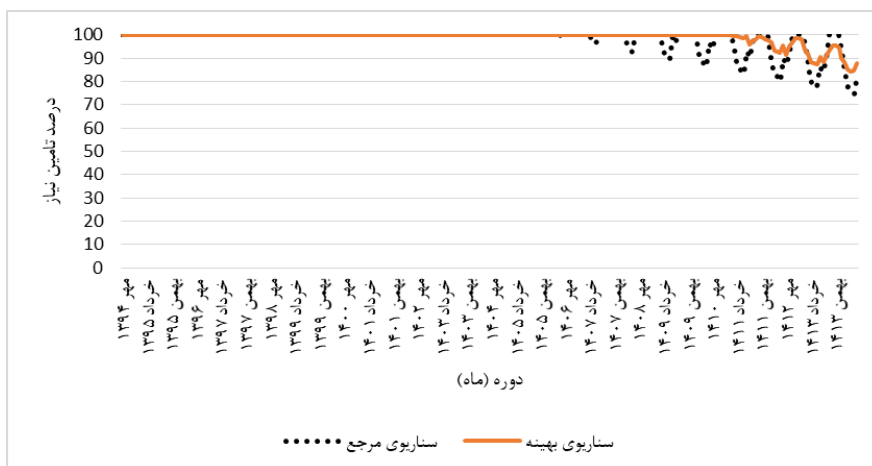
این سناریو بر پایه سناریوی مرجع (شرایط فعلی) تعریف شد و بهره‌برداری از خط دوم انتقال آب و تصفیه‌پساب در این سناریو اعمال نشده است. در این سناریو با توجه به اولویت زیاد تأمین نیاز شرب شهری، میزان متوسط تأمین نیاز در ماه‌های مختلف طی دوره شبیه‌سازی در همه ماه‌ها بیش از ۹۸ درصد است. متوسط میزان تأمین نیازهای فضای سبز طی دوره بهینه‌سازی بیش از ۷۶ درصد و برای نیاز صنعت با توجه به ثابت بودن آن طی سال، در همه ماه‌ها ۸۰ درصد است. با توجه به کمبود منابع آبی، برای تأمین نیاز کشاورزی در همه ماه‌ها مقدار زیادی کمبود وجود دارد. شکل ۱۱ متوسط تأمین نیاز شرب شهری برای سناریوی بهینه و سناریوی مرجع را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این نمودار نشان داده شده است با توجه

به تابع هدف، میزان تأمین نیاز شرب شهری در ماه‌های گرم سال نسبت به سناریوی مرجع افزایش و در فصل سرما کاهش یافته است، این مقادیر به‌خصوص در سال‌های پایانی محسوس و درخور توجه خواهد بود. شکل ۱۲ مقادیر تأمین نیاز شرب شهری طی دوره شبیه‌سازی برای دو سناریوی مرجع و بهینه را نشان می‌دهد.

در این سناریو اعتمادپذیری تأمین نیاز برای نیاز شرب با توجه به اولویت بیشتر ۸۲/۵ درصد است. در مجموع، بیش از ۸۲ درصد اوقات نیاز شرب شهری طی دوره شبیه‌سازی به‌صورت کامل برآورده خواهد شد. نیاز صنعت در منطقه مد نظر ۸۰ درصد اوقات به‌طور کامل تأمین می‌شود و نیاز فضای سبز نیز حدود ۷۵ درصد اوقات تأمین خواهد شد. نیاز کشاورزی در هیچ ماهی به‌صورت کامل تأمین نمی‌شود و فقط در دی‌ماه با توجه به نبود نیاز آبی ۱۰۰ درصد است.



شکل ۱۱. میزان متوسط تأمین نیاز شرب شهری برای سناریوی بهینه و سناریوی مرجع



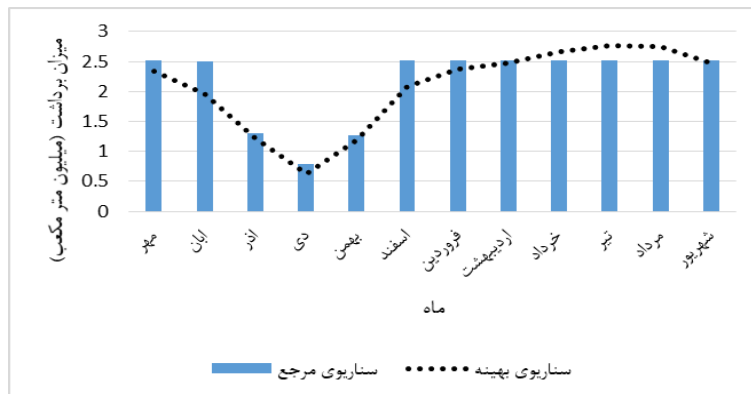
شکل ۱۲. تأمین نیاز شرب شهری طی دوره شبیه‌سازی برای دو سناریوی بهینه و سناریوی مرجع

شرب، نیاز شرب شهری در همه ماه‌های دوره شبیه‌سازی شده به صورت کامل تأمین می‌شود. همچنین، با توجه به استفاده از پساب تصفیه‌شده برای تأمین نیازهای بخش صنعت و فضای سبز، با وجود فرض افزایش چهار برابری سرانه فضای سبز، نیاز صنعت و فضای سبز نیز به صورت کامل تأمین می‌شود. شکل ۱۴ درصد تأمین نیازهای مختلف در این سناریو را به صورت متوسط ماهانه، نشان می‌دهد. نیازهای کشاورزی با توجه به فرض افزایش ۲۰ درصدی بهره‌برداری از خط دوم انتقال آب از چاه‌نیمه‌ها در فصل‌های پاییز و بهار که آب کمتری مورد نیاز است، به صورت کامل تأمین می‌شود. همچنین، این نیاز به‌طور متوسط در بیشتر ماه‌های بهار و تابستان که نیاز به آبیاری بیشتر است، بیش از ۹۰ درصد تأمین می‌شود. کمترین مقدار درصد تأمین نیازهای کشاورزی در فروردین‌ماه که نیاز آبیاری بیشتر است، اتفاق می‌افتد.

در این سناریو بیش از ۸۳ درصد برداشت از منبع آب‌های زیرزمینی طی دوره برای تأمین نیاز آب شرب شهری بوده است. شکل ۱۳ میزان متوسط برداشت ماهانه از آب زیرزمینی را طی دوره شبیه‌سازی برای دو سناریوی مرجع و بهینه نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۱۳ نشان داده شده است، در سناریوی بهینه برای ماه‌های سرد با کاهش برداشت از منابع آب زیرزمینی و ذخیره آن برای فصول گرم از شدت کمبود آب در ماه‌های گرم جلوگیری کرده است. مجموع کل برداشت از منبع آب زیرزمینی در طول دوره شبیه‌سازی شده ۵۰۴/۱ میلیون مترمکعب است که نسبت به سناریوی مرجع ۲۶ میلیون مترمکعب کاهش یافته است.

### سناریوی ایده‌آل (سازگاری)

در این سناریو با توجه به بهره‌برداری از خط دوم انتقال آب از چاه‌نیمه‌ها، با وجود افزایش ۲۰ درصدی سرانه



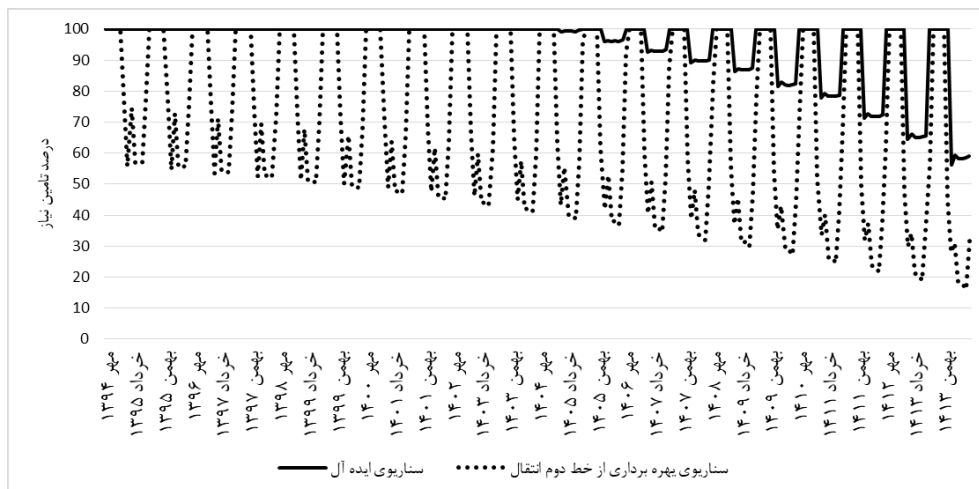
شکل ۱۳. مقدار متوسط مجموع برداشت ماهانه از منبع آب زیرزمینی برای سناریوی بهینه و مرجع



شکل ۱۴. متوسط ماهانه درصد تأمین نیازهای مختلف برای سناریوی ایده‌آل

در این سناریو میزان کل حجم آب برداشتی از منابع آب زیرزمینی حدود ۴۳۸ میلیون مترمکعب است که نسبت به سناریوی مرجع، حدود ۹۲ میلیون مترمکعب و نسبت به سناریوی بهینه، ۶۵ میلیون مترمکعب کاهش داشته است. شکل ۱۷ مجموع حجم برداشتی از منابع آب‌های زیرزمینی را برای سناریوهای مختلف نشان می‌دهد. مطابق شکل ۱۷، برداشت آب در سناریوهای بهینه و ایده‌آل در سال‌های ابتدایی کمتر از سناریو مرجع است و در سال‌های پایانی بیشتر از سناریو مرجع شده و به بیشترین میزان برداشت سالانه از منابع آب زیرزمینی خواهد رسید. همچنین، در سناریوی ایده‌آل با توجه به بهره‌برداری از خط دوم انتقال آب و اولویت تأمین آب از این منبع، در سال‌های ابتدایی حجم آب برداشتی از منابع آب زیرزمینی کم است و با افزایش جمعیت، این مقدار افزایش می‌یابد.

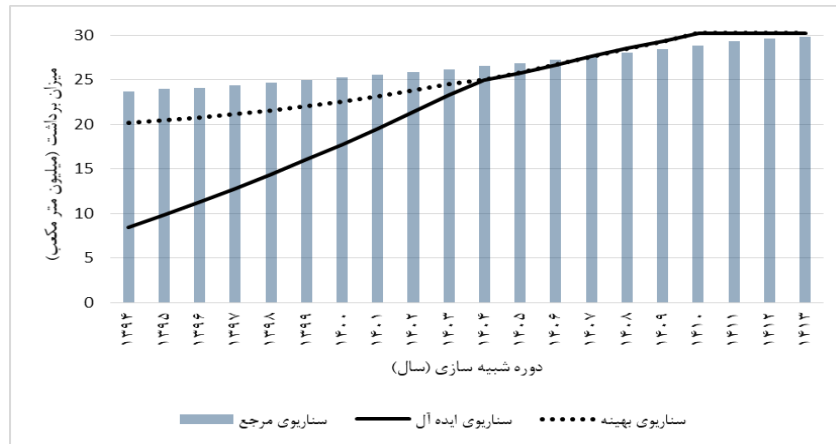
در سناریوی ایده‌آل و سناریوی سوم (بهره‌برداری از خط دوم انتقال آب از چاه‌نیمه) نیازهای شرب شهری، صنعت و فضای سبز به صورت کامل تأمین می‌شوند. با تخصیص بهینه و استفاده از پساب تصفیه‌شده برای مصارف صنعت و فضای سبز، نیازهای کشاورزی در این سناریو نسبت به سناریوی بهره‌برداری از خط دوم انتقال آب از چاه‌نیمه، به میزان درخور توجهی بهبود می‌یابد. شکل ۱۵ درصد تأمین نیازهای کشاورزی طی دوره شبیه‌سازی برای این دو سناریو را نشان می‌دهد. میزان اعتمادپذیری تأمین نیازهای شرب، صنعت و فضای سبز در این سناریو ۱۰۰ درصد است. به بیان دیگر، در همه ماه‌های دوره شبیه‌سازی این نیازها به صورت کامل تأمین خواهند شد. همچنین، میزان اعتمادپذیری برای نیاز کشاورزی ۷۵ درصد است. شکل ۱۶ میزان اعتمادپذیری تأمین نیازها در این سناریو را نشان می‌دهد.



شکل ۱۵. درصد تأمین نیاز کشاورزی طی دوره شبیه‌سازی برای دو سناریوی ایده‌آل و بهره‌برداری از خط دوم انتقال



شکل ۱۶. میزان اعتمادپذیری تأمین نیازهای مختلف در سناریوی مرجع



شکل ۱۷. میزان برداشت از منابع آب زیرزمینی در سناریوهای مرجع، بهینه و ایده آل

[2].Hashemi Monfared A, Azizyan Q, Shaghrouzaei M. Multi-objective Optimization of Utilization of Zahedan Water and Groundwater Resources and by Using Imperial Competition Algorithm. Master's Thesis, University of Sistan & Baluchestan, Zahedan, 2017. [Persian]

[3].Karamoz M, Kerachian R. Planning and Quality Management of Water Resources Systems. 5<sup>th</sup> ed. Tehran; Amirkabir University of Technology Press: 1390. [Persian]

[4].Bozorg Haddad O, Seifollahi-Aghmiuni S. An introduction to uncertainty analysis in water resources systems. 1<sup>st</sup> ed. Tehran; University of Tehran Press:1394. [Persian]

[5].Nabi nejad Sh, Mousavi S J. Simulation-optimization for Basin-wide Optimum Water Allocation Considering System's Performance and Equity Measures, J. of Water and Wastewater, 2013, 24(1): 70-79. [Persian]

[6].Taghian M, Rosbjerg D, Haghghi A, Madsen H. Optimization of Conventional Rule Curves Coupled with Hedging Rules for Reservoir Operation. Water Resources Planning and Management, 2014, 140(1): 693-698.

[7].Vonk E, Xu Y P, Boojj M J, Zhang X, Augustijn D C. Adapting multireservoir operation to shifting patterns of water supply and demand. Water resources management, 2014, 28(3): 625-643.

[8].Fowe T, Nouri I, Ibrahim B, Karambiri H, Paturel J E, OPTIWAM: an intelligent tool for optimizing irrigation water management in coupled reservoir-groundwater systems, Water Resources Management, 2015, 29(10): 3841-3861.

[9].Ahmadianfar I, Adib A, Taghian M, Haghghi A. Optimization Operation from Storage Dams Using Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm, J. of Irrigation Science and Engineering. 2015, 39(2): 89-100. [Persian]

### نتیجه گیری

در پژوهش حاضر بهره برداری تلفیقی بهینه از منابع آب های زیرزمینی و انتقالی بررسی شد. برای شبیه سازی منابع آب منطقه از مدل شبیه ساز WEAP استفاده شد. همچنین، از الگوریتم تک هدفه PSO برای بهینه سازی برداشت از منبع آب های زیرزمینی با هدف حداقل سازی برداشت از این منبع و نیز حداقل سازی عدم تأمین نیازها استفاده شد. نتایج پژوهش حاضر نشان داد در سال های انتهایی دوره شبیه سازی با بهینه سازی تخصیص منابع آب، کاهش برداشت از منابع آب های زیرزمینی و ذخیره سازی آن در ماه های سرد سال، می توان از بروز تنش آبی شدید برای تأمین نیازهای شرب در ماه های گرم سال جلوگیری کرد. همچنین، نتایج سناریوی سازگاری نشان داد با بهره برداری از خط دوم انتقال آب، استفاده از پساب تصفیه شده و تغییر روش آبیاری به قطره ای می توان با وجود افزایش چهاربرابری سرانه فضای سبز و افزایش ۲۰ درصدی سرانه آب شرب شهری، می توان نیازهای شرب شهری، صنعت و فضای سبز را به صورت کامل تأمین کرد. درصد تأمین نیاز در بخش کشاورزی نیز ۶۲/۱۵ درصد نسبت به سناریوی مرجع بهبود یافت و به مقدار ۹۵/۵۴ درصد رسید. میزان برداشت از منابع آب های زیرزمینی نیز ۱۷ درصد نسبت به سناریوی مرجع کاهش یافت.

### منابع

[1].Nahtani M, Sarhadi M. The effect of drought on quantity and quality of groundwater in Zahedan plain. Master's Thesis, University of Zabol, zabol, 2016. [Persian]



- [10]. Afshar M H, Rezaee Sangdehi S A, Moeini R. Ant Colony Optimization Algorithms for Optimal Operation of Reservoirs: A Comparative Study of Four Algorithms. *Ferdowsi Civil Engineering journal*. 2014, 25(2). [Persian]
- [11]. Li W K, Wang W L, Li L, Optimization of Water Resources Utilization by Multi-Objective Moth-Flame Algorithm. *Water Resources Management*. 2018, 32(10).
- [12]. Azadnia A, Zahraei B. PSO optimization algorithm in multi-objective optimization operation of reservoir. *Fifth National Congress of Civil Engineering*. 4-6may2010, Mashhad Ferdows University. [Persian]
- [13]. Me'raji H, Valipoor R, Meraji s. Diversion dams size optimization system based on risk using PSO algorithm. *Sharif Journal Civil Engineering*. 1385, 35(1). [Persian]
- [14]. Khashei- Siuki, A, Ghahraman B, Kochakzade, M. Determination of Optimal Crop Pattern to Prevent the Water Table Drawdown Using PSO Algorithm. *Iran Water Research Journal*, 2014, 8(14). [Persian]
- [15]. Hojjati A, Monad. M, Faridhosseini A, Mohammadi M. Application and comparison of NSGA-II and MOPSO in multi-objective optimization of water resources systems. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*. 2018, 66(3): 323-329.
- [16]. Shenava N, Shourian M. Optimal Reservoir Operation with Water Supply Enhancement and Flood Mitigation Objectives Using an Optimization-Simulation Approach. *Water resources management*. 2017, 32(13): 4393-4407.
- [17]. Balavalikar S, Nayak P, Shenoy N, Nayak K. Particle swarm optimization based artificial neural network model for forecasting groundwater level in Udupi district, *Conference Proceedings*, 2018, 1952(1).
- [18]. Wan W, Guo X, Lei X, Jiang Y, Wang H. A Novel Optimization Method for Multi-Reservoir Operation Policy Derivation in Complex Inter-Basin Water Transfer System. *Water Resources Management*. 2018, 32(1): 31-51.
- [19]. Mousavi S J, Anzab N R, Asl-Rousta B, Kim J H. Multi-objective optimization-simulation for reliability-based inter-basin water allocation. *Water Resources Management*. 2017, 31(11): 3445-3464.
- [20]. Höllermann B, Giertz S, Dieckkrüger B. Benin 2025-Balancing future water availability and demand using the WEAP Water Evaluation and Planning System. *Water resources management*. 2010, 24(13): 3591-3613.
- [21]. Mutiga J K, Mavengano S T, Zhongbo S, Woldai T, Becht R. Water allocation as a planning tool to minimise water use conflicts in the Upper Ewaso Ng'iro North Basin, Kenya. *Water resources management*. 2010, 24(14): 3939-3959.
- [22]. Azhdari Moghadam M, Abasi Q. Investigation on effects of entering Chahnime water into Zahedan plain. *Master's Thesis*, University of Sistan & Baluchestan, Zahedan, 2014. [Persian]
- [23]. Hargreaves, G.H. 1994. Defining and using reference evapotranspiration. *J. of Irrig. and Drain. Eng., ASCE*, 120(6): 1132-1139.
- [24]. Ehsani A, Arzani H, Farahpour M, Ahmadi H, Jafari M, Akbarzadeh M. Evapotranspiration Estimation Using Climatic Data, Plant Characteristics and Cropwat 8.0 Software (Case Study: Steppic Region of Markazi Province, Roodshore Station). *Iranian Journal of Range and Desert Reseach*. 2012, 19(1). [Persian]
- [25]. Aghakhani A, Sadani M, Faraji M, Boniadi Nejad Gh R. Comparison of methods to estimate the industrial water demand based on the number of industrial units, number of employees, total area and the infrastructure area. 2010, 6(2); 357-364. [Persian]
- [26]. Montalvo I, Izquierdo J, Pérez R, Tung M. Particle swarm optimization applied to the design of water supply systems. *Computers & Mathematics with Applications*. 2008, 56(3):769-776.
- [27]. Baltar A M, Fontane D G. Use of multiobjective particle swarm optimization in water resources management. *Journal of water resources planning and management*. 2008, 134(3): 257-265.