تحقیقات منابع آب ایران
Iran-Water Resources Research

سال سیزدهم، شماره ۱، بهار ۱۳۹۶
Volume 13, No. 1, Spring 2017 (IR-WRR)
۳۸-۵۲

توسعه رویکرد چندهدفه تلفیقی جهت بازتخصیص بهینه آب کشاورزی

محمد ابراهیم بنی حبیب[۱*]، محمود محمد رضاپور طبری[۲] و محسن محمد رضاپور طبری[۳]

چکیده

افزایش جمعیت منجر به افزایش نیازهای آبی در بخش‌های مختلف شده است. این شرایط نیازمند اعمال راهکارهایی جهت مدیریت بهینه آب می‌باشد. در این تحقیق، مدل سه هدفه‌ایی جهت حداکثر نمودن سود اقتصادی، حداکثرسازی تأمین مطمئن نیازها آبی و حداقل‌سازی برداشت از آبخوان پنج بازه مطالعاتی حوضه زرینه‌رود تدوین گردید. در مدل پیشنهادی، آبخوان‌های تکاب، سقز، میاندوآب و صائین‌قلعه و مخزن سد زرینه‌رود به عنوان مؤلفه‌های سیستم منابع آب لحاظ گردید. بر مبنای آب تخصیصی، نیاز آبی و حداکثر عملکرد محصولات، تابع تولید تعریف و با توجه به سطح زیرکشت، منافع اقتصادی پنج بازه محاسبه شد. با استفاده از الگوریتم NSGA-II، منحنی تبادل بهینه بین اهداف که بیانگر سناریوهای مختلف کشت و تخصیص منابع آب می‌باشند، استخراج شد. از آنجا که نقاط واقع بر منحنی تبادل نمی‌تواند به طور همزمان هر سه هدف مورد اشاره را ارضا نماید، نقطه بهینه با استفاده از روش گزینش اجتماعی بردا و ترکیب روش‌های تصمیم‌گیری انتخاب گردید. مقایسه نتایج بین وضعیت تخصیص تحت شرایط موجود و بهینه نشان می‌دهد که می‌توان با اعمال مدل پیشنهادی، بطور متوسط به میزان ۴۲/۵ درصد در برداشت از منابع آب صرفه‌جویی نمود. همچنین مقایسه منافع اقتصادی حاصل از شرایط بهینه و موجود نشان می‌دهد که با اجرای سناریوی پیشنهادی می‌توان با افزایش ۱۳ درصدی، منفعت کشاورزی را از ۱۱۳۷۷۳۰ به ۱۲۸۵۹۷۱ میلیارد ریال بهبود داد. نتایج این تحقیق می‌تواند در سایر حوضه‌های آبریز، جهت کاهش مصرف آب کشاورزی از منابع آب و افزایش در آمد کشاورزان از طریق بهینه‌سازی الگوی کشت مورد استفاده قرار گیرد.

کلمات کلیدی: الگوی کشت بهینه، مدل چندهدفه، منافع اقتصادی، تخصیص بهینه، زرینه‌رود.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۵/۵/۲۵
تاریخ پذیرش مقاله: ۹۵/۷/۲۲

۱-دانشیار گروه مهندسی آبیاری زهکشی، دانشگاه تهران، پردیس ابوریحان.
۲-دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی، دانشگاه شهرکرد.
۳-دانشجوی کارشناسی ارشد منابع آب، دانشگاه تهران.
*- نویسنده مسئول

بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان تابستان ۱۳۹۶ امکانپذیر است.

Development of Integrated Multi-Objective Strategy for Reallocation of Agricultural Water

M.E. Banihabib [1], M. Mohammad Rezapour Tabari[2] and M. Mohammad Rezapour Tabari[3]*

Abstract

Population growth causes an increase in the use of water in different sectors. This increase demands for new strategies for optimal water resources management. In this research, a tri-objective model was developed to maximize the economic benefit, maximize the reliable water supply, and minimize the water withdraw from aquifers. In the proposed model, four aquifers and Zarinehroud dam reservoir were considered as elements of the water resources system. Based on the allocated water, water requirements, and maximum yield of each product the production function were defined and the economic benefits of the regions in the study area were determined. Using NSGA-II algorithm, Pareto trade-off curves for objective were derived presenting various scenarios of cropping and economic benefit functions in Zarinehroud basin. Since the points on trade-off curve cannot simultaneously satisfy the three objectives, optimal point was selected using Borda aggregation method and integration of five multicriteria decision models' results. Comparing the current and optimal allocation results demonstrated that we gained 42.5% water save by applying proposed model. In addition, comparison of current and optimal economic benefit showed that the benefit was increased from 1,137,730 billion IRR to 1,285,971 billion IRR (13% increase). The result of this research can be used in other basins to decrease the agricultural water use while increasing farmers' income by optimal cropping pattern.

Keywords: Optimal cropping pattern, multi-objective model, economic benefit, optimal allocation, Zarinehroud.

Received: August 15, 2016
Accepted: October 13, 2016

1- Associate Professor, Department of Irrigation and Drainage Engineering, College of Aburaihan, University of Tehran, Tehran, Iran. Email: banihabib@ut.ac.ir
2- Associate Professor of Civil Engineering, Deptartment of Engineering, Shahrkord University, Shahrkord, Iran.
3- M.Sc. Student in Water Resource Engineering, Department of Irrigation and Drainage Engineering, College of Aburaihan, University of Tehran, Tehran, Iran
*- Corresponding Author

۱- مقدمه

کمبود آب در بخش‌های زیادی از کره زمین، مشکلات قابل توجه‌ایی را برای تأمین آب شرب سالم، تولید محصولات کشاورزی و در کل روند عمومی زندگی انسان‌ها به وجود آورده است، به طوری که پیش‌بینی می‌شود تا سال ۲۰۲۵ میلادی، ۵۰ تا ۶۰ درصد مردم جهان با تنش آبی و مشکلات ناشی از کم آبی مواجه شوند. کشور ایران هم که جزو کشورهای نیمه خشک می‌باشد، از این قاعده مستثنی نیست. بنابراین مدیریت بهینه تخصیص منابع آب به عنوان یکی از راهکارهای توصیه شده در این خصوص می‌باشد که در جلوگیری از بروز بحران کمبود آب کمک می‌نماید. پژوهش‌های مربوط به بهینه‌سازی منابع‌آب در نیمه دهه ۱۹۵۰ آغاز شد و در دهه ۱۹۶۰ به سرعت توسعه یافت. روش‌های بهینه‌سازی متعدی برای استفاده بهینه از منابع در دسترس جهت حداکثرسازی منافع خالص کشاورزی و حداقل‌سازی منابع آب مورد استفاده قرار گرفت. محققانی همچون Matanga and Marino (1979)، Maji and Heady (1996) ، Vedula and Roger (1981)، Panda et al. از روش برنامه‌ریزی خطی جهت تعیین الگوی کشت بهینه استفاده نمودند. Raji and Kumar (2004) ، تحقیقی در مورد استفاده از الگوریتم ژنتیک در برنامه‌ریزی آبیاری و توسعه الگوی کشت مؤثر و بهینه و در جهت افزایش سود یک پروژه آبیاری انجام دادند. محدودیت‌های در نظر گرفته شده در این مدل بهینه‌سازی، معادله پیوستگی، نیاز آب، تنوع محصول و محدودیت ذخیره بوده است. نتایج بدست آمده از الگوریتم ژنتیک با حل برنامه‌ریزی خطی مقایسه و بسیار نزدیک مشاهده شد به طوری که می‌توان از الگوریتم ژنتیک به عنوان یک مدل بهینه‌سازی مؤثر برای برنامه‌ریزی هر سیستم آبیاری استفاده نمود. Alinejad et al. (2015) مطالعه‌ای جهت تعیین الگوی کشت مناسب محصولات زراعی در شهرستان بابل در سال ۱۳۹۲- ۱۳۹۱ با استفاده از روش برنامه ریزی خطی با هدف حداکثر سازی سود و دستیابی به خودکفایی با نرم افزار Lingo10 انجام دادند. نتایج نشان داد که در مقایسه با الگوهای موجود و سطح درآمدها، بکارگیری الگوی کشت بهینه، ۱۱ درصد بازده خالص کل را افزایش می‌دهد. Mohammadi et al. (2016) از الگوهای برنامه‌ریزی ریاضی جهت ارائه الگوی کشت با اهداف مختلف حداکثرسازی منافع خصوصی و اجتماعی به تفکیک در سطح شهرستان مرودشت استفاده نمودند. نتایج حاصل از تعیین الگوی کشت بهینه با هدف حداکثر نمودن منافع اجتماعی نشان داد که مجموع سطح زیرکشت در این حالت نسبت به کل سطح زیرکشت فعلی در سطح شهرستان مرودشت تغییر نکرده است. اما در این الگو، محصولاتی مانند گندم آبی، گندم دیم، ذرت دانه ای، هندوانه، خیار، پیاز، عدس آبی و لوبیا از برنامه حذف شده و محصولات جو دیم، خربزه و پیاز وارد الگوی کشت گردیده‌اند. Sarker and Ray (2009) برنامه‌ریزی زراعی را بر اساس یک الگویتم بهینه‌سازی چند هدفه فرموله کرده و با استفاده از سه رهیافت بهینه‌سازی مختلف شامل روش مقید به شانس، الگوریتم NSGA-II[1] وMCA[2] به حل آن مبادرت نمودند. نتایج نشان داد که الگوریتم NSGA-II در ۶۹ درصد موارد دارای تخمین بهتری نسبت به روش مقید به شانس می‌باشد، امّا در مجموع، مقایسه روش MCA با دو روش دیگر و تجزیه و تحلیل آن نشان داد که روش MCA دارای راه‌حل‌های قابل قبول‌تری در بهینه‌سازی الگوی کشت نسبت به دو روش دیگر است. Yousefdost (2015) مطالعه‌ای با هدف بهینه‌سازی الگوی کشت، تخصیص آب آبیاری و حداکثرسازی سود حاصل از کشت بخشی از مزارع دشت قزوین که آب مورد نیاز خود را از طریق سد طالقان تأمین می‌کنند در شرایط آب و هوایی مختلف با کمک الگوریتم ژنتیک و فاخته انجام دادند. نتایج نشان داد که در شرایط آب و هوایی نرمال، مرطوب، خشک و گرم و خشک سطح زیر کشت و سود حاصل از الگوی کشت جدید ارائه شده توسط دو الگوریتم نسبت به الگوی کشت فعلی افزایش چشمگیری داشته و پیروی از الگوی کشت جدید تا حدود زیادی باعث کاهش مصرف آب این بخش می‌شود. Karamouz et al. (2010) یک مدل الگوریتم ژنتیک جهت بهینه‌سازی الگوی کشت اراضی کشاورزی با در نظر گرفتن اولویت‌های تخصیص آب و محدودیت‌های منابع آب توسعه دادند. تابع هدف در نظر گرفته شده در این مدل بهینه‌سازی، حداکثر کردن سود حاصل از تولیدات کشاورزی با توجه به تغییرات مجاز سطح ایستابی، هزینه‌های پمپاژ و همچنین اثرات کم‌آبیاری در تولید محصولات بوده است. این مدل به نحوی تدوین گردید که الگوی کشت و تخصیص آب از منابع سطحی و زیرزمینی، به طور همزمان بهینه شوند. نتایج نشان داد که تغییرات انجام شده در الگوی کشت و سیاست‌های تخصیص آب سطحی و زیرزمینی، منجر به کاهش افت سطح آب زیرزمینی به میزان ۱۰ متر در یک دوره ۱۱ ساله نسبت به وضع موجود بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی شده است. Mohammad Rezapour Tabari and Soltani (2013) مدل بهینه‌سازی چندهدفه به منظور مدیریت بهره‌برداری تلفیقی با استفاده از الگوریتم NSGA-II و SSGA ارائه نمودند. در این مطالعه مدل‌سازی به گونه‌ای صورت می‌گیرد که حداقل اطمینان‌پذیری سیستم، حداکثر و هزینه‌های ناشی از عدم تأمین نیاز، احیای آبخوان، تخطّی از ظرفیت مخزن در حال بهره‌برداری حداقل گردد. نتایج مدل تدوین شده نشان می‌دهد که مدل NSGA-II در

مدت زمان بسیار کمتری قادر به ارائه مقادیر بهینه تخصیص می‌باشد.

Banihabib et al. (2016b) در مطالعه‌ای تحت عنوان بهینه‌سازی باز تخصیص آب در مناطق خشک دارای ابرشهر، روشی را برای مدیریت تخصیص آب ارائه نمودند. تابع هدف افزایش سود خالص در بخش صنعت و خدمات و یک تابع سود مرکب برای حالت کم‌آبیاری تعریف گردید که برای حل آن از روش برنامه‌ریزی غیرخطی استفاده شد. نتایج حاصل از بهینه‌سازی نشان داد که این مدل می‌تواند به طور قابل توجهی سبب افزایش بهره‌وری اقتصادی آب، کاهش نارضایتی در تقاضا و حفظ محصولات کشاورزی شود.

Banihabib et al. (2016a) در مطالعه‌ای تحت عنوان تدوین مدل برنامه‌ریزی غیرخطی تخصیص آب و الگوی کشت در شرایط کم‌آبیاری، رویکردی را جهت مدیریت تقاضای آب ارائه نمودند. تابع هدف افزایش سود خالص و حداقل نمودن آب مصرفی فرض گردید که برای حل آن از روش برنامه‌ریزی غیرخطی استفاده شد. نتایج حاصل از بهینه‌سازی نشان داد که با تغییر در سطح زیرکشت و استفاده از روش کم‌آبیاری، در بهینه‌ترین حالت، می‌توان سود اقتصادی بخش کشاورزی را ۳۶ درصد در مقایسه با شرایط فعلی بهبود بخشید.

Davijani et al. (2016) به ارزیابی مدل‌های بهینه‌سازی الگوریتم هوش جمعی و الگوریتم ژنتیک در مدیریت تخصیص منابع آب پرداختند. نتایج نشان داد که استفاده از مدل‌های بهینه‌سازی هوش جمعی و ژنتیک می‌تواند در بهینه‌سازی الگوی کشت مفید واقع گردد و همچنین در افزایش سود اقتصادی در مناطق خشک نظیر حوضه کویر مرکزی مفید واقع شود. در نهایت با توجه به مقادیر بهینه اقتصادی می‌توان نتیجه گرفت که جواب‌های بدست آمده از الگوریتم هوش جمعی دارای دقت و تخمین بهتری نسبت به الگوریتم ژنتیک می‌باشد

Ghasemi et al.(2016) مدل بهینه‌سازی الگوی کشت را به صورت ترکیبی از اطلاعات کشاورزان در سطح مزرعه توسعه دادند و با استفاده از الگوریتم ژنتیک گسسته (PWGA)[۳] به حل آن مبادرت نمودند. در این مدل، ساختار کروموزوم‌ها مجدد سازماندهی و اصلاح گردید. نتایج بدست آمده نشان داد که استفاده از مدل ارائه شده سبب افزایش منافع خالص کشاورزی در منطقه خواهد شد و در صورت تغییر در تصمیم‌گیری توسط کشاورزان، قابلیت انعطاف در تخصیص منابع آبی و سطح کشت را خواهد داشت.

توسعه بخش کشاورزی به عنوان بخشی زیربنایی و مهم در ساختار اقتصادی و استقلال هر کشور، نقش بسیار مهمی را ایفا می‌کند و ارتباط آن با آب به گونه‌ای است که بیشترین مصرف آب همواره مربوط به بخش کشاورزی بوده است. از مسائل مهم بخش کشاورزی، افزایش سود کشاورزان می‌باشد. با توجه به اینکه کشاورزی در کشور به صورت خصوصی است و دولت تنها بر میزان آبی که در اختیار کشاورز قرار می‌دهد دخالت دارد، یافتن راهی برای متمایل نمودن کشاورزان به کشت محصولاتی خاص با درصدی مشخص، جهت رسیدن همزمان به اهدافی همچون افزایش درآمد حاصل از کشت محصولات کشاورزی، تأمین نیازها، مصرف بهینه از منابع آب موجود و توجه به پایداری سیستم‌های آبی، می‌تواند بسیار راه‌گشا باشد. بر این اساس ارائه رویکردی با هدف دستیابی به حداکثر منافع اقتصادی سیستم، پایداری منابع آب و تأمین نیازهای آبی زیربخش‌های آن ضروری بوده و در این مطالعه نیز به عنوان اهداف اصلی مورد توجه قرار گرفته است. بررسی سوابق مطالعاتی صورت گرفته در مورد تخصیص بهینه منابع آب در بخش کشاورزی نشان می‌دهد که عمده مطالعات صورت گرفته به صورت تک‌هدفه بوده و در برخی از موارد به صورت دوهدفه اقدام به تعیین مقادیر بهینه تخصیص منابع آب نموده‌اند. همچنین بکارگیری الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه NSGA-II که به طور همزمان اقدام به تعیین مقدار بهینه تخصیص، الگوی کشت بهینه محصولات و بهره‌برداری پایدار از آب زیرزمینی می‌نماید، قبلاً در سوابق مطالعاتی گزارش نشده و به عنوان یکی از رویکردهای بارز این تحقیق به شمار می‌آید. در این تحقیق یک مدل تخصیص آب ارائه می‌شود که در چارچوب مدیریت حوضه‌ایی منابع آب سطحی و زیرزمینی، تعامل عرضه و تقاضای آب را با توجه به عوامل اقتصادی و رعایت حقابه زیست محیطی در نظر می‌گیرد. در فرآیند تخصیص آب، عرضه‌کننده آب تحت تأثیر محدودیت دسترسی به منابع آب و بیشینه‌سازی درآمد حاصل از تأمین آب، برای متقاضیان مختلف جهت تخصیص آب تصمیم می‌گیرد. بنابراین ساخت مدلی که بتواند تأثیر این عوامل را به صورت توأمان در تخصیص منابع آب لحاظ کند، برای ارزیابی اثر سیاست‌های مختلف بر تخصیص آب و منافع ذی‌نفعان در سطح حوضه از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز رودخانه زرینه‌رود با گستره‌ای بالغ بر ۱۲۰۰۰ کیلومتر مربع در شمال غربی ایران و در موقعیت جنوب شرقی دریاچه ارومیه واقع شده است. از نظر تقسیمات کشوری این زیرحوضه در محدوده استان‌های آذربایجان غربی، آذربایجان شرقی و کردستان قرار گرفته، ولی بیشترین سهم این زیرحوضه متعلق به استان آذربایجان غربی

می‌باشد (شکل ۱). طول رودخانه زرینه رود ۳۰۰ کیلومتر بوده و از کوه‌های چهل چشمه کردستان سرچشمه می‌گیرد و از گوشه جنوب‌شرقی به دریاچه ارومیه می‌ریزد. میانگین آبدهی این رودخانه ماهانه ۱۳۹/۵ میلیون متر مکعب برآورد می‌شود. بر روی رودخانه زرینه‌رود سد مخزنی شهید کاظمی در سال ۱۳۵۰ ساخته شده است که به نام سد زرینه‌رود یا بوکان نیز شناخته می‌شود. این سد در استان آذربایجان غربی و در فاصله ۳۵ کیلومتری جنوب شرقی شهرستان بوکان قرار گرفته و بند انحرافی نوروزلو در ۷۰ کیلومتری پایین‌دست سد مخزن ساخته شده است و آب مورد نیاز کشاورزی جلگه میاندوآب و بخشی از دشت‌های بناب و ملکان را تأمین می‌کند. حوضه آبریز رودخانه زرینه‌رود در بالادست سد زرینه‌رود از چهار زیر حوضه اصلی تشکیل می‌گردد. حوضه آبریز رودخانه زرینه‌رود از شمال و شرق به سرشاخه‌های حوضه آبریز رودخانه قزل اوزن بنام‌های قرنقوچای، آیدوغموش و انگوران چای، از جنوب به سرشاخه‌های رودخانه قشلاق و از غرب به حوضه آبریز سیمینه‌رود محدود می‌گردد. رودخانه زرینه‌رود نیز همانند اکثر رودخانه‌های ایران در ماه‌های اسفند و فروردین سیلابی و پرآب بوده و طغیان آن سبب وارد آمدن خسارات فراوانی به مناطق اطراف مسیر رودخانه می‌گردد و در سایر مواقع آب آن کم می‌شود. به لحاظ وسعت زیاد حوضه آبریز زرینه‌رود، پراکنش موقعیت اراضی کشاورزی در گستره حوضه آبریز، تفاوت قابل توجه شرایط اقلیمی و توپوگرافی که منجر به ایجاد محدودیت‌های برداشت از آبخوان و سرشاخه‌های رودخانه زرینه‌رود یک محدوده مطالعاتی جهت تخصیص به محدوده مطالعاتی دیگر این حوضه آبریز می‌شود، لزوم تقسیم محدوده حوضه آبریز زرینه‌رود به بازه‌های مطالعاتی را لازم و ضروری می سازد. در این راستا حوضه آبریز زرینه‌رود بر اساس موقعیت سد مخزنی زرینه‌رود، ایستگاه‌های هیدرومتری، رودخانه‌های موجود و آبخوان‌های واقع در محدوده‌های مطالعاتی تکاب، سقز، صائین‌قلعه و میاندوآب، به پنج بازه مطالعاتی تقسیم شده است که در این تحقیق این بازه‌ها به عنوان بازه‌های پیکربندی حوضه آبریز نامیده می‌شوند (شکل ۲). مناطق مطالعاتی اول و دوم از سرشاخه‌های رودخانه زرینه‌رود و آبخوان‌های به ترتیب سقز و تکاب جهت تخصیص به نیازهای شرب و کشاورزی بهره‌مند می‌شوند. همچنین مناطق مطالعاتی سوم و چهارم نیز از سرشاخه‌های واقع در پایین‌دست سد زرینه‌رود و سفره‌های زیرزمینی به ترتیب صائین‌قلعه و میان‌دوآب برای استفاده در بخش‌های شرب و کشاورزی استفاده می‌نمایند. با توجه به اینکه ۵۶/۴ درصد (معادل ۴۱۹۷۷ هکتار) از اراضی منطقه مطالعاتی چهارم به طور مستقیم اقدام به آبگیری از رودخانه زرینه‌رود برای مصارف کشاورزی می‌نمایند، لذا بخشی از منطقه مطالعاتی چهار که تنها از آب سطحی به تخصیص نیاز کشاورزی می‌پردازد، به عنوان منطقه مطالعاتی پنجم در نظر گرفته شد. مؤلفه‌های در نظر گرفته شده جهت تدوین مدل مدیریت منابع و مصارف آب عبارتند از: رودخانه، سد، آبخوان، اراضی کشاورزی و مصرف آب در بخش شرب. میزان سطح زیرکشت و عملکرد محصولات با استفاده از سالنامه آماری استان‌های آذربایجان غربی، آذربایجان شرقی و کردستان در سال ۱۳۸۸ تهیه شد.

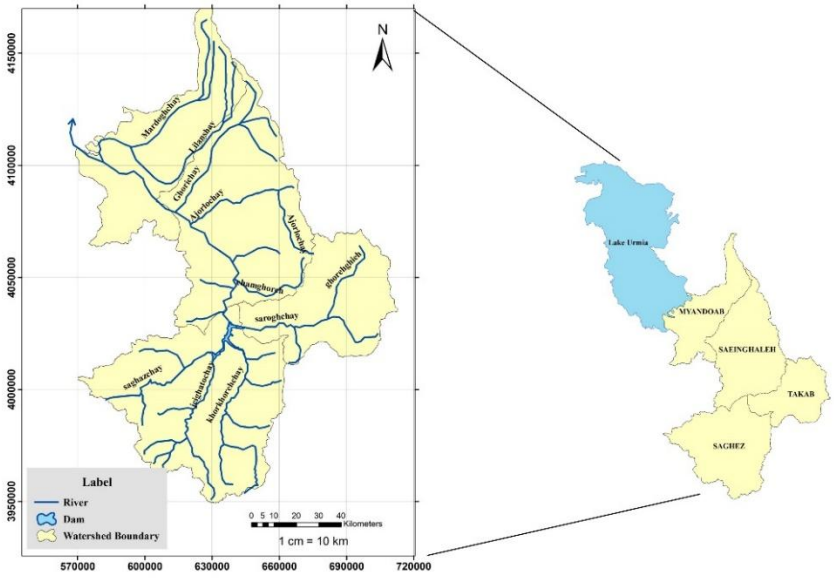

Fig. 1. Zarinehroud basin location

شکل ۱- موقعیت حوضه زرینه‌رود

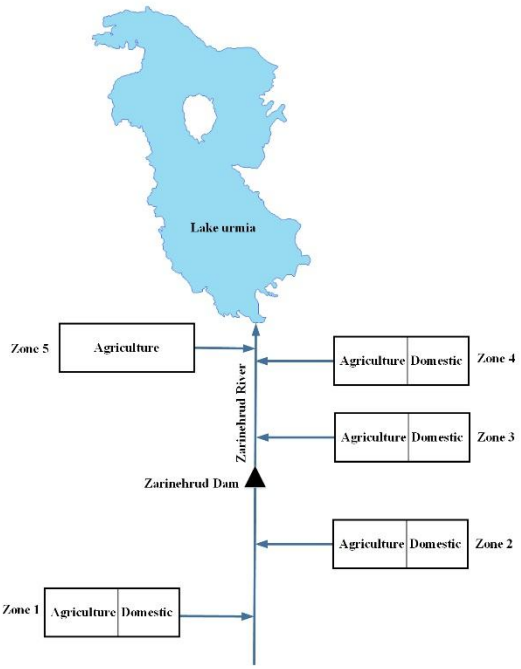

Fig. 2. Schematic of case study for applying proposed structure

شکل ۲- شماتیک محدوده مطالعه جهت استفاده در ساختار پیشنهادی

بر این اساس، محصولات گندم، یونجه، لوبیا، آفتابگردان، سیب‌زمینی، گوجه فرنگی، ذرت علوفه‌ای، ذرت دانه‌ای، نخود، بادام، پیاز و هندوانه از بین محصولات زراعی و محصولات زردآلو، هلو، انگور، سیب، خیار گردو و گیلاس در بین محصولات باغی به دلیل سطح کشت بیشترشان جهت تعیین سطح زیرکشت بهینه انتخاب گردید.

۲-۲- ساختار مدل پیشنهادی

با توجه به اینکه بیشترین سهم مصرف‌کننده منابع آب در بخش کشاورزی می‌باشد، این بخش از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است و به همین دلیل در این مطالعه بخش کشاورزی به قسمت‌های جزئی تری تقسیم می‌گردد و در هر یک از محصولات آن به تنوع الگوی کشت، شرایط اقلیمی و ... در جهت بهبود وضع اقتصادی و تخصیص بهینه منابع آب پرداخته خواهد شد. در این تحقیق، مدلی جهت بهینه‌سازی تخصیص آب بین بخش کشاورزی و شرب در جهت حداکثر نمودن سود اقتصادی، حداقل‌سازی مصرف منابع آب و پایداری سیستم منابع آب زیرزمینی تدوین گردید. برای این منظور سه تابع هدف جهت دستیابی به حداکثر منافع حاصل از کشت محصولات در ۵ منطقه مطالعاتی واقع در حوضه آبریز زرینه‌رود، ایجاد پایداری در وضعیت سفره‌های زیرزمینی با حداقل‌سازی برداشت آب از آبخوان‌ها و حداکثر نمودن اطمینان‌پذیری تأمین نیازهای آبی به صورت زیر در نظر گرفته شد.

تابع هدف اول: حداکثر نمودن منافع اقتصادی حاصل از کشت محصولات

$$\max\ Z_1 = \sum_{i=1}^{nz}\sum_{j=1}^{nc}\left[\propto_{ij} A_i\left(Y_{ij}B_{ij} - C_{ij}\right)\right] - PF_t \qquad (۱)$$

$$PF_t = K \times \left(\max(1 - S_{t+1}/S_{min}\ , 0) + \max(1 - S_{T+1}/S_1\ , 0)\right) \qquad (۲)$$

$$Y_{ij} = Y_j^{max} \times \prod_{t=1}^{12}\left[1 - K_{jt}\left(1 - \frac{TAWA_{ijt}}{AD_{ijt}}\right)\right] \qquad (۳)$$

در این رابطه متغییرها عبارتند از: i : شمارنده تعداد مناطق مورد مطالعه، j : شمارنده تعداد محصول، nz : تعداد کل مناطق مورد بررسی، nc : تعداد کل محصولات مورد بررسی، $\propto_{ij}$: درصد تحت پوشش محصول j در منطقه i (درصد)، A_i : سطح کل قابل کشت در منطقه i (ha)، B_{ij} : قیمت فروش محصول j در منطقه i ($\frac{IRR}{Kg}$)، C_{ij} : هزینه کل (کاشت، داشت و برداشت) محصول j در منطقه i ($\frac{IRR}{ha}$)، Y_{ij} : میزان عملکرد محصول j در منطقه i ($\frac{Kg}{ha}$)،)، PF_t: تابع جریمه مرتبط با مخزن سد است که در صورت عدم رعایت محدودیت‌های مرتبط با روابط ۱۶ و ۱۷ به توابع هدف حداقل‌سازی، اضافه و از توابع هدف حداکثرسازی، کم می‌شود. همچنین K: ثابت مرتبط با تابع جریمه است که در این مطالعه برابر با 10^{20} (یک عدد بزرگ) در نظر گرفته شده است. Y_j^{max} : حداکثر عملکرد محصول j اُم ($\frac{Kg}{ha}$)، K_{jt} : ضریب حساسیت محصول jاُم در ماه t اُم، $TAWA_{ijt}$: کل آب تخصیص داده شده به محصول j اُم در منطقه i اُم و در ماه t اُم (میلیمتر)، AD_{ijt} : نیاز آبی محصول j اُم در ماه t اُم (میلیمتر). نکته اینکه جهت محاسبه مقدار تولید محصول، تابع تولید توسعه داده شده توسط Doorenbos and Kassam (1979) که در سال ۲۰۰۴ توسط Ghahraman and Sepaskhah گسترش داده شد، مورد استفاده قرار گرفت. همانطور که Ghahraman and Sepaskhah (2004) در مطالعه خود اشاره نمودند، در تابع تولید، آب تخصیص داده شده و نیاز آبی هر محصول می‌تواند به جای تبخیر و تعرق واقعی و پتانسیل مورد استفاده قرار گیرند. این نحوه محاسبه مقدار تولید در مطالعه Karamouz et al. (2010) نیز بکارگرفته شده و لذا در این مطالعه نیز مورد توجه قرار گرفته است. متغیرهای تصمیم در تابع هدف اول شامل درصد سطح تحت پوشش محصول j در منطقه i (درصد) و کل آب تخصیص داده شده به محصول j اُم در منطقه i اُم و در ماه t اُم (میلیمتر) می‌باشد.

تابع هدف دوم: حداقل نمودن برداشت از آبخوان

$$\min Z_2 = \left(\frac{\sum_{t=1}^{12}\sum_{i=1}^{nz}\left[TGAW_{it}-Per_i\times\left(\sum_{j=1}^{nc}\left((1-efd_i)\times TAWA_{ijt}\right)+PW_i\times TAWD_{it}\right)\right]}{\sum_{t=1}^{12}\sum_{i=1}^{nz}Per_i\times\left(\sum_{j=1}^{nc}\left((1-efd_i)\times TAWA_{ijt}\right)+PW_i\times TAWD_{it}\right)}\right)^2 + PF_t \quad (۴)$$

در این رابطه متغییرها عبارتند از: $TGAW_{it}$: کل آب زیرزمینی تخصیص داده شده به منطقه i اُم و در ماه t اُم (MCM)، $TAWD_{it}$: کل آب تخصیص داده شده به بخش شرب منطقه i اُم و در ماه t اُم (MCM)، efd_i : راندمان کاربرد آب در منطقه i اُم، Per_i : درصد نفوذ عمقی آب به آب زیرزمینی در منطقه i اُم، PW_i : درصد تبدیل آب به پساب در منطقه i اُم. متغیرهای تصمیم در تابع هدف دوم شامل کل آب تخصیص داده شده به بخش شرب منطقه i اُم و در ماه t اُم (MCM) می‌باشد. نکته حائز اهمیت در تابع هدف دوم این است که میزان آب تخصیص داده شده به محصول j اُم در منطقه i اُم و در ماه t اُم که در تابع هدف اول مورد محاسبه قرار گرفت، به عنوان ورودی در تابع هدف دوم مورد استفاده قرار می‌گیرد.

تابع هدف سوم: حداقل نمودن میزان عدم تأمین نیازها

$$\min\ Z_3 = \sum_{i=1}^{nz}\left[\sum_{j=1}^{nc}\left(\frac{\left(TAWA_{ijt}-AD_{ijt}\right)}{AD_{ijt}}\right)^2 + \left(\frac{\left(TAWD_{it}-DD_{it}\right)}{DD_{it}}\right)^2\right] + PF_t \quad (۵)$$

در این رابطه، DD_{it}، میزان نیاز آبی بخش شرب منطقه i اُم و در ماه t اُم (MCM) می‌باشد. متغیرهای تصمیم در تابع هدف سوم شامل کل آب تخصیص داده شده به بخش شرب و کشاورزی (MCM) می‌باشد. با توجه به محدود بودن منابع آب سطحی، زیرزمینی و سطح زیرکشت اراضی در مناطق مورد بررسی، محدودیت‌های زیر در مدل بهینه‌سازی تدوین شده مورد توجه قرار گرفت:

الف) محدودیت‌های نیاز

$$TAWD_{it} \le DD_{it} \quad (۶)$$

$$TAWA_{ijt} \le AD_{ijt} \quad (۷)$$

$$\sum_{j=1}^{nc}\propto_{ij} = 1 \quad , \quad i = 1,2,\dots.,nz \quad (۸)$$

ب) محدودیت‌های برداشت از منابع آب

$$TAW_{it} = TAWA_{it} + TAWD_{it} \quad (۹)$$

$$TSAW_{it} = \min(TAW_{it}, SW_{it}^{max}) \quad (۱۰)$$

$$TGAW_{it} = \max(TAW_{it} - SW_{it}^{max}, 0) \quad (۱۱)$$

ج) محدودیت‌های مرتبط با مخزن سد زرینه‌رود

$$S_{t+1} = S_t + \sum_{i=1}^{2} I_{it} - Env_t - \sum_{i=1}^{2,5} TSAW_{it} - Ev_t \times \overline{A}_t \quad (۱۲)$$

$$\overline{A}_t = \frac{A_t + A_{t+1}}{2} \quad (۱۳)$$

$$A_t = 5\times10^{-8}S_t^3 - 0.0001S_t^2 + 0.1168S_t + 2.443 \quad (۱۴)$$

$$SP_t = \max(S_{t+1} - S_{max}, 0) \quad (۱۵)$$

$$S_{min} \le S_t \le S_{max} \quad (۱۶)$$

$$S_1 \le S_{T+1} \quad (۱۷)$$

متغیرهای روابط فوق به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$TSAW_{it}$: کل آب سطحی تخصیص داده شده به منطقه i اُم و در ماه t اُم (MCM)، SW_{it}^{max} : حداکثر آب سطحی قابل تخصیص در منطقه i اُم و در ماه t اُم (MCM)، I_{it}: میزان آورد سطحی به منطقه i اُم و در ماه t اُم (MCM)، Env_t: نیاز زیست‌محیطی رودخانه زرینه‌رود در ماه t اُم (MCM)، Ev_t: میزان تبخیر از سطح آزاد مخزن سد در ماه t اُم (متر)، A_t , A_{t+1}: سطح مخزن در ابتدا و انتهای ماه t (کیلومتر مربع)، $\overline{A}_t$: متوسط سطح مخزن در طی ماه t (کیلومتر مربع)، S_t: حجم مخزن در ماه t اُم (MCM)، S_{min} , S_{max}: حداقل و حداکثر حجم مخزن (MCM)، SP_t: مقدار حجم آب سرریز شده از مخزن در ماه t اُم (MCM). با توجه به اهداف مطالعه و اطلاعات جمع‌آوری شده در این مطالعه و همچنین جهت کاهش تعداد متغییرهای تصمیم مسأله، کل آب تخصیص داده شده به مصارف شرب و کشاورزی در هر ماه به عنوان مجهولات (متغییرهای تصمیم) در نظر گرفته شد. بر این اساس تعداد متغییرهای تصمیم مسأله چندهدفه تدوین شده در صورت لحاظ نمودن ۱۸ محصول، دو نوع نیاز (شرب و کشاورزی) و ۵ منطقه مورد مطالعه برابر با ۱۲۳۰=(۵×(۱۸×۱۲+(۱۸+۱))) خواهد شد. از این تعداد متغییر تصمیم حاصل شده، ۱۸ متغییر مرتبط با آب تخصیص داده شده به ۱۸ محصول واقع در هر منطقه، ۱ متغییر مرتبط با آب تخصیص داده شده به بخش شرب می‌باشد. لازم به ذکر است با توجه به ناچیز بودن نیازهای آبی بخش صنعت، در این مطالعه این بخش مورد توجه قرار نگرفته است. بر این اساس به ترتیب عدد ۱۸، تعداد کل محصولات کشت شده در هر منطقه، عدد ۱ مرتبط با تخصیص به مصرف شرب، عدد ۱۲ تعداد ماه‌های مورد مطالعه، عدد ۱۸، درصد زیرکشت مرتبط با ۱۸ محصول مورد بررسی و عدد ۵ مرتبط با تعداد

کل مناطق مورد بررسی می‌باشد. از آنجا که اولویت تخصیص در این مطالعه با منابع آب سطحی است و در صورت کمبود از منابع آب زیرزمینی استفاده می‌شود. لذا مطابق رابطه ۱۰، در صورتی که آب تخصیص داده شده کمتر از کل آب سطحی در دسترس باشد، کل آب تخصیصی توسط منابع آب سطحی تأمین می‌گردد. زمانی که کل آب تخصیصی بیشتر از آورد سطحی هر یک از مناطق مورد بررسی باشد، مقدار مازاد آن توسط منابع آب زیرزمینی (رابطه ۱۱) تأمین می‌شود. همچنین جهت بهره‌برداری بهینه از آب ذخیره شده در مخزن سد بوکان، از رابطه پیوستگی (رابطه ۱۲)، که در آن سطح مخزن تابعی از حجم آب ذخیره شده در سد است، استفاده گردید. لازم به ذکر است که جهت تعیین مقدار دقیق سطح مخزن، مقدار متوسط سطح بر مبنای منحنی سطح–حجم–ارتفاع مخزن در ابتدا و انتهای ماه و مطابق رابطه ۱۳ محاسبه گردید. جهت اعمال جریمه به جواب‌های غیرموجه‌ایی که در فرآیند جستجوی جواب بهینه کلی توسط الگوریتم فراکاوشی یافت می‌شود، رابطه ۲ مورد توجه قرار گرفت. مطابق این رابطه در صورتی که در جوابی، حجم مخزن از مقادیر حداقل و حداکثر تعیین شده برای آن تخطی نماید، جریمه‌ایی به هر یک از توابع هدف اعمال می‌گردد که منجر به عدم انتخاب مجدد آن جواب در فرآیند دستیابی به مقدار بهینه کلی می‌شود. لازم به ذکر است که داده‌های مرتبط با میزان جریان ورودی رودخانه‌های واقع در محدوده مورد مطالعه، نیاز زیست‌محیطی رودخانه زرینه‌رود در شرایط موجود، منحنی سطحی–حجم–ارتفاع سد بوکان، نیازهای شرب و نیازهای آبی محصولات کشاورزی از آخرین گزارش بهنگام سازی طرح جامع آب، دفتر برنامه‌ریزی کلان آب و آبفا و همچنین با استعلام از سازمان آب منطقه‌ای و جهاد کشاورزی کشور جمع‌آوری و جهت اعمال در ساختار مدل پیشنهادی مورد استفاده قرار گرفت.

۲-۳- ابزارهای بهینه‌سازی و تصمیم‌گیری

با توجه به پیچیدگی ساختار تدوین شده، ابعاد بالای متغیرهای تصمیم و در جهت افزایش سرعت دستیابی به جواب بهینه کلی، در این مطالعه از الگوریتم فراکاوشی چندهدفه NSGA-II که توسط Deb et al. (2000) جهت حل مسائل و مشکلات مدل الگوریتم ژنتیک کلاسیک، پیشنهاد گردید، استفاده شد. مراحل اجرای این مدل بهینه‌سازی چندهدفه به صورت زیر می‌باشد:

۱–تولید نسل والد تصادفی (P_0) به تعداد N

۲–مرتب نمودن نسل اولیه والد بر اساس جواب‌های غیرپست[۴]

۳–برای هر جواب غیرپست رتبه‌ایی متناسب با تراز غیرپست آن در نظر گرفته می‌شود (۱ برای بهترین تراز، ۲ برای بهترین تراز بعد از ۱ و ...)

۴–تولید نسل فرزندان (Q_0) به تعداد N با استفاده از عملگرهای انتخاب، تزویج و جهش

۵– با توجه به نسل اول تولید شده فوق که شامل کروموزم‌های والد و فرزندان می‌باشند، نسل جدید به صورت زیر تولید می‌شود:

- ✓ ترکیب کروموزم‌های والد (P_t) و فرزندان (Q_t) و تولید نسلی (R_t) به تعداد $2N$
- ✓ مرتب نمودن نسل (R_t) بر اساس روش دسته‌بندی غیرپست و شناسایی جبهه‌های غیرپست[۵] $(F_1, F_2, \ldots, F_l)$
- ✓ تولید نسل والد برای تکرار بعد (P_{t+1}) با استفاده از جبهه‌های غیرپست تولید شده به تعداد N : در این مرحله با توجه به تعداد کروموزم‌های مورد نیاز برای نسل والد (N)، ابتدا تعداد کروموزم‌های اولین جبهه برای نسل والد انتخاب می‌شود و در صورتی که این تعداد جوابگوی تعداد کل مورد نیاز نسل والد نباشد به ترتیب از جبهه‌های ۲، ۳ و ... برداشت می‌شود تا به میزان کل (N) دست یابد.
- ✓ اعمال عملگرهای تزویج، جهش برای روی نسل والد جدید تولید شده (P_{t+1}) و تولید نسل فرزندان (Q_{t+1}) به تعداد N

۶– تکرار مرحله ۵ تا دستیابی به تعداد کل تکرارهای مورد نظر

جهت آشنایی با جزئیات مراحل اجرای این الگوریتم می‌توان به مقاله Deb et al. (2002) مراجعه نمود. در این مطالعه کد الگوریتم NSGA-II در محیط MATLAB R2011b جهت اعمال توابع هدف و محدودیت‌های ارائه شده، تهیه و مورد اجرا قرار گرفت. در منحنی تبادل بهینه بدست آمده با استفاده از الگوریتم NSGA-II، هر نقطه به عنوان یک سناریوی بهره‌برداری و تخصیص از منابع مطرح می‌باشد و تصمیم‌گیر می‌توان بر اساس سه هدف تعیین شده، یکی از سناریوها را انتخاب و بر مبنای آن اقدام به استخراج مقادیر بهینه تخصیص به نیازها و درصدهای بهینه سطح زیرکشت نماید. با توجه به اینکه نقاط واقع بر منحنی تبادل نمی‌تواند به طور همزمان هر سه هدف را ارضا نماید، لذا انتخاب نقطه مناسب با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره (MCDM)[۶] می‌تواند تا حد زیادی در انتخاب سناریوهای مورد اختلاف راهگشا باشد (Ahmadisharaf et al., 2015 ،Bolouri-Yazdeli et al., 2014، Bozorg-Haddad et al. 2016 , Bozdağ, 2015). از آنجا که روش‌های MCDM بسیار متنوع بوده و استفاده از آن می‌توان منجر به تولید نتایج متفاوت گردد، لذا در این مطالعه اقدام به ارائه رویکردی با استفاده از روش گزینش اجتماعی بردا (BAM)[۷] جهت تجمیع نتایج چند روش تصمیم‌گیری چند معیاره گردید. برای این

منظور از پنج روش MCDM به نام‌های برنامه‌ریزی تطبیقی (CP)[8]، ارزیابی تناسب پیچیدگی (COPRAS)[9]، روش رتبه‌بندی شبیه به حل ایده‌ال (TOPSIS)[10]، روش رتبه‌بندی شبیه به حل ایده‌ال اصلاح شده (M-TOPSIS)[11] و روش ارزیابی حاصلضرب مجموع توده وزن‌دار شده (WASPAS)[12] استفاده گردید. سپس نتایج این پنج روش رتبه‌بندی جواب‌های غیرپست تولید شده توسط الگوریتم NSGA-II، با استفاده از روش گزینش اجتماعی بردا تجمیع شده و رتبه‌بندی نهایی هر یک از نقاط واقع بر منحنی تبادل بهینه تعیین می‌گردد. در این بخش توضیحات مرتبط با هر یک از روش‌های تصمیم‌گیری مورد استفاده در این مطالعه تشریح می‌گردد. جهت ارائه روابط حاکم بر هر روش ابتدا ماتریس $X = [x_{ij}]$، به عنوان ماتریس حاوی جمعیت بهینه در نظر گرفته شود که در آن x_{ij}، مقدار بهینه متغییر تصمیم jام مرتبط با کروموزم iام می‌باشد. با توجه به سه تابع هدف و ۱۴۴ جواب غیرپست تولیده شده، بعد ماتریس برابر با ۱۴۴ ردیف و ۳ ستون می‌باشد. جهت استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری مورد اشاره فوق، لازم است ابتدا مقادیر ارائه شده در ماتریس تصمیم به صورت نرمال شده درآیند. برای این منظور در این مطالعه از روابط ۱۸ و ۱۹ جهت نرمال نمودن ماتریس تصمیم (جمعیت بهینه شده) استفاده گردید:

الف) برای معیارهای ارزیابی مثبت (توابع هدف حداکثرسازی):

(۱۸)

$$\tilde{x}_{ij} = \frac{\left(x_{ij} - x_j^-\right)}{\left(x_j^+ - x_j^-\right)} \quad , \quad i = 1,2,...,n \quad , \quad j = 1,2,...,m$$

ب) برای معیارهای ارزیابی منفی (توابع هدف حداقل‌سازی):

(۱۹)

$$\tilde{x}_{ij} = \frac{\left(x_j^- - x_{ij}\right)}{\left(x_j^- - x_j^+\right)} \quad , \quad i = 1,2,...,n \quad , \quad j = 1,2,...,m$$

در این رابطه m و n به ترتیب تعداد معیارها (توابع هدف) و تعداد گزینه‌ها (تعداد کروموزم‌ها)، $\tilde{x}_j^-$ و $\tilde{x}_j^+$ به ترتیب کمترین و بیشترین مقدار تابع هدف j ام (بر مبنای بهترین نسل بدست آمده از الگوریتم NSGA-II، که شامل ۱۴۴ کروموزم می‌باشد، بهترین و بدترین مقدار اهداف مورد بررسی، با توجه به نوع تابع هدف، ماکزیموم‌سازی و یا مینیموم‌سازی، از بین این کروموزم‌های استخراج می‌گردد.) و $\tilde{x}_{ij}$ مقدار نرمال شده تابع هدف j ام مرتبط با کروموزم iام است.

۲-۳-۱- روش برنامه‌ریزی تطبیقی (CP)

بر مبنای این روش بهترین جواب از بین جواب‌های موجود جوابی است که کمترین فاصله از نقطه ایده‌ال را داشته باشد. لازم به ذکر است که نقطه ایده‌ال، نقطه‌ای که به طور نسبی مورد رضایت تمامی اهداف مورد بررسی باشد. فاصله هر جواب از جواب ایده‌ال را می‌توان بر اساس رابطه زیر تعیین نمود (Zeleny 1973):

$$L_{CP} = \left[\sum_{j=1}^{m} \left(\frac{\tilde{x}_j^+ - \tilde{x}_{ij}}{\tilde{x}_j^+ - \tilde{x}_j^-} \right)^p \right]^{1/p} \qquad (۲۰)$$

در این رابطه $\tilde{x}_j^+$ و $\tilde{x}_j^-$ به ترتیب بهترین و بدترین جواب تولید با توجه به معیارهای ارزیابی (توابع هدف) می‌باشند. بر این اساس مقدار $\tilde{x}_j^+$ در توابع هدف حداکثرسازی برابر با بیشترین مقدار آن تابع هدف و در توابع هدف حداقل‌سازی برابر با کمترین مقدار آن تابع هدف در نظر گرفته می‌شود. به همین ترتیب مقدار $\tilde{x}_j^-$ در توابع هدف (به عنوان معیار ارزیابی) حداکثرسازی برابر با کمترین مقدار آن تابع هدف و در توابع هدف حداقل‌سازی برابر با بیشترین مقدار آن تابع هدف لحاظ می‌گردد. در این روش به طور معمول سه مقدار ۱، ۲ و ∞ برای پارامتر p مدنظر قرار می‌گیرد که به ترتیب به عنوان فاصله بلوکی، فاصله اقلیدسی و فاصله چیبشف نامیده می‌شوند (Bozorg-Haddad et al. 2016). در صورتی که مقدار p برابر با ∞ باشد، برای هر گزینه بزرگترین مقدار $\left(\tilde{x}_j^+ - \tilde{x}_{ij}\right) / \left(\tilde{x}_j^+ - \tilde{x}_j^-\right)$ محاسبه شده برای هر تابع هدف به عنوان L_{CP} در نظر گرفته می‌شود.

۲-۳-۲- ارزیابی تناسب پیچیدگی (COPRAS)

روش COPRAS اولین بار توسط Zavadskas and Kaklauskas در سال ۱۹۹۴ ارائه گردید. جهت ارزیابی جواب‌های تولیدی بر مبنای این روش، لازم است محاسباتی بر اساس معیارهای ارزیابی مرتبط با توابع هدف به صورت جداگانه صورت گیرد. جهت تعیین رتبه هر یک از گزینه‌ها (جواب‌ها) با استفاده از این روش لازم است پارامترهایی در طی چهار مرحله زیر مورد محاسبه قرار گیرند (Ustinovichius et al., 2007; Viteikiene and Zavadskas, 2007): مرحله اول) نرمال نمودن ماتریس تصمیم مورد بررسی: در این مرحله بر اساس روابط ۱۸ و ۱۹، ماتریس تصمیم که همان جمعیت بهینه تولید شده توسط الگوریتم NSGA-II می‌باشد، نرمال

می‌گردد. هدف از این کار با توجه به داشتن ابعاد مختلف توابع هدف، بی‌بعد نمودن مقادیر ماتریس جهت مقایسه بهتر مؤلفه‌های آن می‌باشد. مرحله دوم) محاسبه مجموع وزنی معیارهای ارزیابی (توابع هدف) برای هر گزینه (کروموزم): برای این منظور لازم است برای هر گزینه، مجموع توابع هدف حداکثرسازی و مجموع توابع هدف حداقل‌سازی به صورت جداگانه و در قالب متغییرهای S_{+i} و S_{-i} محاسبه گردد. جهت ساده‌سازی در محاسبات، بهتر است در ستون‌های ماتریس تصمیم ابتدا مقادیر مرتبط با توابع حداکثرسازی و سپس مقادیر توابع حداقل‌سازی قرار داده شوند.

$$S_{+i} = \sum_{j=1}^{k} \left(\tilde{x}_{ij} \times q_j\right) \quad (۲۱)$$

$$S_{-i} = \sum_{j=k+1}^{m} \left(\tilde{x}_{ij} \times q_j\right) \quad (۲۲)$$

در این رابطه k، تعداد توابع حداکثرسازی و q_j، وزن تابع هدف j ام می‌باشد. مرحله سوم) محاسبه وزن نسبی هر گزینه با استفاده از رابطه ۲۳:

$$Q_i = S_{+i} + \frac{\sum_{i=1}^{n} S_{-i}}{S_{-i} \sum_{i=1}^{n} \left(\frac{1}{S_{-i}}\right)} \quad (۲۳)$$

در این رابطه n، تعداد کل گزینه‌های مورد بررسی است. مرحله چهارم) تعیین رتبه هر گزینه: با استفاده از رابطه ۲۴ رتبه هر گزینه که دارای مقداری بین صفر و ۱۰۰ می‌باشد و به ترتیب نشان‌دهنده بدترین و بهترین گزینه است، تعیین می‌گردد:

$$N_i = \frac{Q_i}{\max(Q_i)} \times 100 \quad (۲۴)$$

۲-۳-۳- روش رتبه‌بندی شبیه به حل ایده‌ال (TOPSIS)

اولویت‌بندی با استفاده از روش TOPSIS بر مبنای میزان نزدیکی هر جواب از جواب ایده‌ال مثبت (D_i^+) و دوری از جواب‌های ایده‌ال منفی (D_i^-) پایه‌ریزی شده است (Hwang and Yoon, 1981). روابط حاکم بر این روش در قالب روابط ۲۵ تا ۲۷ ارائه شده است:

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^{m} \left(x_{ij} - x_j^+\right)^2} \quad (۲۵)$$

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^{m} \left(x_{ij} - x_j^-\right)^2} \quad (۲۶)$$

$$C_i = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-} \quad (۲۷)$$

با مرتب نمودن نزولی مقادیر C_i می‌توان رتبه هر گزینه را تعیین نمود. بدین ترتیب گزینه‌ایی که دارای C_i بیشتری است، از رتبه بالاتری برخوردار می‌باشد.

۲-۳-۴- روش رتبه‌بندی شبیه به حل ایده‌ال اصلاح شده (M-TOPSIS)

جهت بهبود ارزیابی گزینه‌ها با استفاده از روش TOPSIS، Ren و همکاران در سال ۲۰۰۷، رابطه اصلاحی زیر را ارائه نمود (Ren et al. 2007):

$$R_i = \sqrt{\left(D_i^+ - \min\left(D_i^+\right)\right)^2 + \left(D_i^- - \max\left(D_i^-\right)\right)^2} \quad (۲۸)$$

بر این اساس گزینه‌ایی که مقدار پارامتر R_i آن بیشتر است از رتبه بالاتری برخوردار می‌باشد.

۲-۳-۵- روش ارزیابی حاصلضرب مجموع توده وزن‌دار شده (WASPAS)

این روش که توسط Zavadskas و همکاران در سال ۲۰۱۲ پیشنهاد گردید بر مبنای تجمیع مدل مجموع وزنی (WSM) و مدل حاصلضرب وزنی (WPM) استوار می‌باشد و در قالب رابطه زیر بیان می‌شود (Zavadskas et al. 2012):

$$A_i = \lambda \sum_{j=1}^{m} \left(x_{ij} \times q_j\right) + \left(1-\lambda\right) \prod_{j=1}^{m} \left(x_{ij} \times q_j\right) \quad (۲۹)$$

برای ضریب λ می‌توان مقادیر ۰، ۰/۱، ۰/۲ تا ۱ را در نظر گرفت. در اکثر مطالعات قبلی صورت گرفته مقدار ۰/۵ به عنوان مقدار مناسب پیشنهاد شده است (Bozorg-Haddad et al. 2016). در صورتی که مقدار این ضریب برابر با صفر باشد، این روش تبدیل به مدل WPM و در صورت اعمال مقدار ۱، روش تجمیع به مدل WSM تبدیل می‌گردد. همچنین ثابت شده که مدل ترکیبی فوق از دقت بالاتری نسبت به دو مدل منفرد WPM و WSM برخوردار می‌باشد (Zavadskas et al. 2014). با مرتب نمودن پارامتر A_i به صورت نزولی، گزینه‌ایی که دارای مقدار A_i بیشتری است از ارجحیت بالاتری برخوردار است.

۲-۳-۶- روش گزینش اجتماعی بردا (BAM)

روش گزینش اجتماعی بردا یکی از روش‌های انتخاب گزینه نهایی در یک مذاکره، با در نظر گرفتن رتبه‌بندی گزینه‌ها توسط رأی دهندگان

می‌باشد. در این روش، ابتدا هر گزینه تصمیم، متناظر با رتبه‌های اختصاص یافته به آن گزینه توسط رأی‌دهندگان در ماتریس رتبه‌بندی گزینه‌ها، امتیاز اولیه‌ای کسب می‌کند. در این مطالعه رتبه‌های اختصاص در ماتریس رتبه‌بندی همان رتبه‌بندی‌های صورت گرفته توسط پنج روش تصمیم‌گیری چندمعیاره فوق می‌باشد. این امتیاز اولیه برابر است با تفاضل تعداد کل گزینه‌ها (n) و رتبه‌ایی که یک رأی دهنده (نتایج یکی از پنج روش تصمیم‌گیری) به آن گزینه اختصاص داده است. بنابراین، در صورتی که n گزینه مدنظر باشد، بهترین گزینه یک تصمیم‌گیرنده امتیازی برابر با $n-1$، گزینه دوم امتیاز $n-2$ و به همین ترتیب گزینه آخر یعنی غیرمقبول‌ترین گزینه، امتیاز اولیه‌ای برابر با صفر خواهد گرفت. در نهایت، امتیاز بردای هر گزینه برابر با جمع امتیازات اولیه کسب شده توسط آن گزینه خواهد بود. گزینه‌ای به عنوان برنده بردا انتخاب می‌شود که امتیاز بردای آن از دیگر گزینه‌ها بیشتر باشد (Mahjouri and Byzhani Manzar, 2013).

۳- ارائه نتایج

جهت استخراج الگوی کشت بهینه محصولات واقع در مناطق مورد مطالعه و تعیین مقدار بهینه تخصیص از منابع آب سطحی و زیرزمینی به هر یک از نیازهای تعریف شده در ساختار پیشنهادی و همچنین جهت دستیابی به منحنی تبادل بهینه بین اهداف، الگوریتم فرکاوشی چندهدفه NSAGA-II مورد اجرا قرار گرفت. پارامترهای مرتبط با عملگرهای تزویج و جهش با استفاده از روش سعی و خطا تعیین گردید. همچنین از عملگر تورنمنت جهت انتخاب کروموزوم‌های والد استفاده شد. از آنجا که جمعیت اولیه نقش مهمی در زمان اجرای فرآیند بهینه‌سازی و توزیع جواب‌ها بر روی منحنی تبادل بهینه دارد، لذا در این مطالعه اقدام به تعیین مناسب‌ترین جمعیت اولیه گردید. با تعیین جمعیت اولیه مناسب، می‌توان ساختار تدوین شده را تا دستیابی به منحنی تبادل بهینه بین اهداف مورد اجرا قرار داد. لازم به ذکر است اجرای الگوریتم زمانی متوقف می‌شود که تغییرات قابل توجهی بین منحنی تبادل بین اهداف دو تکرار رخ ندهد. لازم به ذکر است که در این خصوص می‌توان از شاخص ارائه شده توسط Chen et al. (2007) استفاده نمود. نتایج تحلیل حساسیت صورت گرفته بر روی اندازه جمعیت کروموزم‌ها نشان می‌دهد که با افزایش اندازه جمعیت کروموزم‌ها از ۵۰ تا ۳۰۰ برای ۱۰۰۰ تکرار، تغییراتی در منحنی تبادل بین اهداف رخ می‌دهد به طوریکه این تغییرات در فواصل بین اندازه جمعیت ۵۰ و بالاتر از آن بیشتر می‌باشد و به ازای تعداد جمعیتی بیش از ۱۵۰ این منحنی تغییرات قابل توجهی را نسبت به حالت‌های ۲۰۰ و ۳۰۰ نشان نمی‌دهد. لذا در این مطالعه تعداد کروموزم‌های مورد استفاده جهت تعیین منحنی تبادل بهینه بین سه هدف مورد مطالعه برابر با ۱۵۰ انتخاب گردید. با توجه به اندازه جمعیت ۱۵۰ و مدل NSGA-II در تکرارهای مختلف مورد اجرا گرفت. مقایسه منحنی تبادل بهینه بین اهداف مورد بررسی در تکرارهای مختلف نشان می‌دهد که این منحنی از تکرار ۳۰۰۰ به بعد دارای تغییرات قابل توجهی نمی‌باشد و لذا اجرای مدل جهت اطمینان از یافتن منحنی نزدیک به بهینه کلی تا تکرار ۴۰۰ ادامه یافت و در این تکرار منحنی تبادل بهینه بین اهداف استخراج گردید. مطابق منحنی تبادل بهینه بدست آمده، حداقل و حداکثر مقدار منافع اقتصادی حاصل از کشت محصولات (Z_1) به ترتیب برابر با $۶/۰۸۴\times۱۰^{۱۲}$ و $۱/۳۶\times۱۰^{۱۵}$ ریال و همچنین حداقل و حداکثر مقدار شاخص پایداری سیستم طبیعی آبخوان (Z_2) به ترتیب برابر با ۰/۰۸۷۲ و ۱۴/۵ می‌باشد. همچنین مقادیر حداقل و حداکثر میزان مجموع عدم تأمین نیازها (Z_3) به ترتیب برابر با ۲/۳۶ و ۱۹۱/۵۲ برآورد شده است. این مقادیر حداقل و حداکثر ارائه شده جهت تعیین اولویت هر یک از جواب‌های واقع بر منحنی تبادل بهینه بین اهداف با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره مورد استفاده قرار می‌گیرند. لازم به ذکر است که هر یک از جواب‌های واقع بر منحنی تبادل بهینه بین اهداف به عنوان یک گزینه مطرح می‌باشند. مبنای شماره‌گذاری ارائه شده در جدول ۱، موقعیت کروموزم‌ها در آخرین نسل بهینه بدست آمده است که از این نسل، جواب‌های پست (مغلوب) از مجموعه جواب‌ها خارج شده و بقیه کروموزم‌های باقیمانده از ابتدا تا به انتها شماره‌گذاری شده و با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری تشریح شده، رتبه‌بندی می‌شوند. بر مبنای روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره تشریح شده فوق، به عنوان نمونه رتبه هر یک از جواب‌ها مطابق جدول ۱ تعیین گردید. مطابق جدول ۱ می‌توان دریافت که رتبه‌های تعیین شده برای جواب‌ها توسط روش‌های مختلف MCDM بسیار متفاوت بوده و امکان ارائه رتبه نهایی ممکن نمی‌باشد. جهت رفع این مشکل، در این مطالعه از روش گزینش اجتماعی بردا (Bozorg-Haddad et al., 2016) جهت انتخاب رتبه نهایی جواب‌ها استفاده گردید. با توجه به اینکه از بین ۱۵۰ جمعیت اولیه مورد استفاده، پس از اجرای الگوریتم NSGA-II، ۱۴۴ جواب به عنوان جواب غیرپست و ۶ جواب به عنوان جواب پست (جوابی که توسط سایر جواب‌ها مغلوب می‌گردد و عملاً قابلیت استفاده ندارد) مطرح می‌باشد لذا در صورتی که گزینه‌ایی (جوابی) دارای رتبه یک باشد، مطابق روش بردا از امتیاز ۱۴۳ واحدی برخوردار خواهد بود. به همین ترتیب این امتیاز برای سایر رتبه‌ها به آسانی قابل محاسبه است. با انجام این فرآیند برای هر روش MCDM و استخراج

مجموع امتیازات بدست آمده برای هر گزینه، امتیاز کل هر جواب (گزینه) تعیین می‌گردد. با مرتب نمودن نزولی امتیازات، می‌توان رتبه نهایی هر جواب را مشخص نمود. بر اساس این رتبه‌بندی صورت گرفته می‌توان دریافت که گزینه‌های شماره ۱۳۵، ۹ و ۲۱ به ترتیب در رتبه‌های اول تا سوم از نظر ارضای همزمان سه تابع هدف پیشنهادی قرار دارند.

بر این اساس مقادیر واقع بر گزینه شماره ۱۳۵ که حاوی مقادیر بهینه تخصیص به نیازها و سطح زیرکشت بهینه محصولات در مناطق مورد بررسی است به عنوان گزینه‌ایی که از مطلوبیت بالاتری نسبت به سایر گزینه‌های واقع بر منحنی تبادل بهینه برخودار می‌باشد، مورد ارزیابی قرار گرفت. در این بخش به عنوان نمونه میزان ماهانه بهینه برداشت از منابع آب سطحی و زیرزمینی به منطقه سقز در شکل ۳ و درصد سطح زیرکشت بهینه هر محصول مطابق شکل ۴ ارائه شده است.

با توجه به اینکه درصد تأمین نیازهای آبی در شرایط موجود به طور متوسط ۷۱ درصد می‌باشد، بررسی میزان تخصیص بهینه جهت تأمین نیازهای آبی مرتبط با بخش‌های شرب و کشاورزی برای یک دوره یکساله نشان می‌دهد که سناریوی منتخب برآمده از مدل پیشنهادی علی‌رغم کاهش ۴۲/۵ درصدی برداشت از منابع آب، توانسته بیش از ۷۷ درصد از نیازها را تأمین نماید.

Table 1. Ranking of points on optimal trade-off curve using MCDM methods
جدول ۱– رتبه‌بندی جواب‌های روی منحنی تبادل بهینه با استفاده از MCDM

Method Alternative (Solution)	$CP_{p=1}$	$CP_{p=2}$	$CP_{p=\infty}$	TOPSIS	M – TOPSIS	COPRAS	WASPAS
1	128	124	107	127	20	132	130
2	12	3	5	4	135	10	35
.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.
47	11	6	10	6	137	9	37
48	15	29	41	23	126	14	41
.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.
135	1	1	9	1	144	1	13
136	135	137	144	133	8	117	55
.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.
144	116	130	111	115	21	114	91

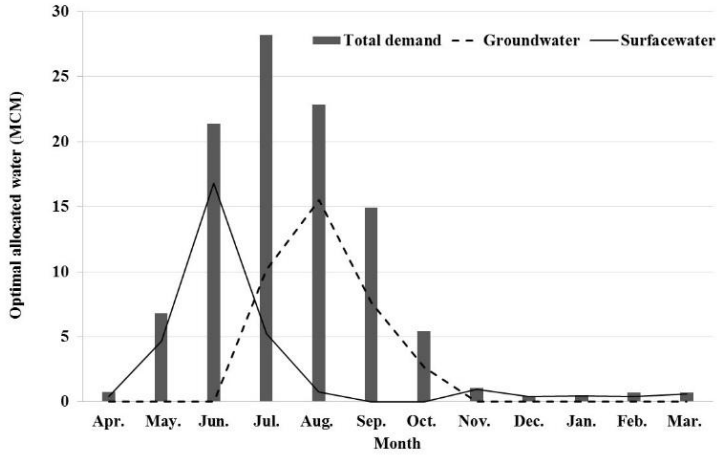

Fig. 3. Monthly optimal allocated surface and groundwater resources to Saghez area
شکل ۳– تخصیص بهینه ماهانه آب سطحی و زیرزمینی به منطقه سقز

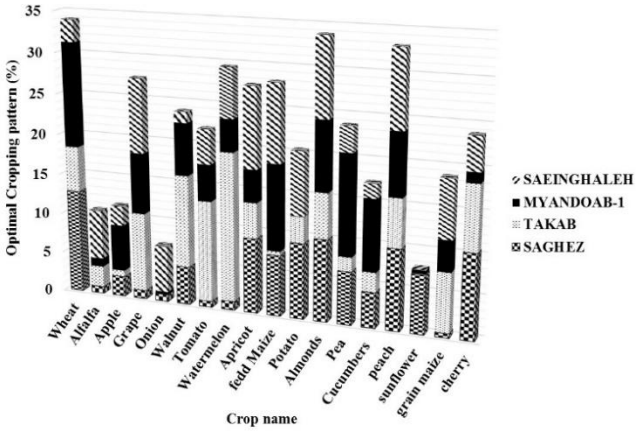

Fig. 4. Percentage of optimal cropping area in four regions studied

شکل ۴- درصد بهینه سطح کشت در چهار منطقه مورد مطالعه

بر مبنای شکل ۴ می‌توان دریافت که جهت دستیابی به اهداف تعریف شده در ساختار پیشنهادی لازم است در منطقه سقز از ۱۸ محصول رایج، ۹ محصول گندم، زردآلو، سیب‌زمینی، ذرت علوفه‌ایی، بادام، آفتابگردان، هلو و گیلاس در اولویت کشت قرار گیرند. همچنین در منطقه تکاب کشت محصولات انگور، گردو، گوجه فرنگی، هندوانه، ذرت دانه‌ای و گیلاس پیشنهاد می‌گردد. در محدوده مطالعاتی صائین‌قلعه، محصولاتی همانند انگور، زردآلو، ذرت علوفه‌ایی، سیب‌زمینی، بادام، هلو و ذرت دانه‌ایی از درصد سطح زیرکشت بهینه بالایی برخوردار می‌باشند. محصولاتی همچون گندم، انگور، ذرت علوفه‌ایی، بادان، نخود، خیار و هلو در بخشی از محدوده مطالعاتی میاندوآب به عنوان الگوی کشت بهینه توصیه می‌شود. در بخش دیگری از منطقه میاندوآب که از عمدتاً از رودخانه زرینه‌رود تأمین نیاز می‌گردد لازم است کشت محصول هلو مورد توجه خاص قرار گیرد.

بر مبنای الگوهای بهینه بدست آمده در مناطق مورد مطالعه می‌توان دریافت که جهت دستیابی به منافع اقتصادی سیستم مورد مطالعه و همچنین حفظ اکوسیستم منابع آبی موجود لازم است تنوعی از محصولات مختلف کشت شده تا بتوان بر مبنای آن برنامه‌ریزی صحیحی از منابع آبی موجود به عمل آورد. با توجه به اینکه تنها آمار مرتبط با سطح زیرکشت کل حوضه در دسترس می‌باشد، لذا سطح زیرکشت بهینه بدست آمده برای پنج منطقه مورد مطالعه با هم تلفیق شده و با سطح زیرکشت موجود در قالب جدول ۲ مقایسه گردید. مطابق این جدول، تغییرات رخداده در شرایط بهینه نسبت به شرایط موجود نسبتاً قابل توجه است. به طور کلی رویکرد الگوی بهینه کشت توجه به میزان مصرف آب، هزینه کشت و درآمد حاصل از آن است که این امر در شرایط موجود عمدتاً متمرکز بر کشت محصولات استراتژیک و محصولاتی که دارای قیمت تضمینی می‌باشند، استوار است.

Table 2. Comparison between the percentage of selected crops for optimal and current conditions in the study area

جدول ۲- مقایسه بین درصد زیرکشت محصولات منتخب تحت شرایط بهینه و وضع موجود در کل محدوده مورد بررسی

Crop	Wheat	Alfalfa	Apple	Grape	Onion	Walnut	Tomato	Watermelon	Apricot
Existing	35.4	30.87	10.55	6.11	3.35	2.28	1.64	1.58	1.32
Optimal	6.34	1.2	2.25	4.49	1.4	4.8	3.9	4.5	3.65
Crop	Fedd Maize	Potato	Almonds	Pea	Cucumbers	Peach	Sunflower	Grain maize	Cherry
Existing	1.26	1.1	1.05	0.87	0.83	0.81	0.37	0.36	0.29
Optimal	4.8	2.19	5.24	4.84	3.58	39.84	1.05	2.77	3.14

در واقع با اعمال الگوی کشت بهینه می‌تواند به نوعی از پایداری منابع آب و دستیابی به سود حداکثری اطمینان حاصل نمود. همچنین مقایسه‌ایی نیز بین وضعیت تخصیص تحت شرایط موجود و بهینه در جدول ۳ ارائه شده است. مطابق این جدول در صورت تخصیص بهینه به نیازهای منطقه می‌توان به میزان ۴۲ و ۴۳ درصد از منابع آب سطحی و زیرزمینی صرفه‌جویی به عمل آورد. در واقع با این میزان تخصیص کمتر که در نتیجه مدیریت صحیح از منابع آب زیرزمینی و بهره‌برداری مناسب از مخزن سد بوکان رخ می‌دهد، می‌توان به میزان ۲۴۴ میلیون متر مکعب آب سطحی را مازاد بر آنچه که تحت شرایط فعلی وارد دریاچه ارومیه می‌شود، به این تالاب بین‌المللی در حال خشک شدن وارد نمود. مقایسه منافع اقتصادی حاصل از شرایط گزینه منتخب (شرایط بهینه) و وضعیت موجود نشان می‌دهد که با اجرای سناریوی پیشنهادی می‌توان درآمد خالص کشاورزان را با افزایش ۱۳ درصدی از ۱۱۳۷۷۳۰ میلیارد ریال به ۱۲۸۵۹۷۱ میلیارد ریال ارتقاء داد. همچنین مطابق جدول ۳ می‌توان دریافت که نتایج مدلسازی، وضعیت بهینه مصرف آب در مناطق میاندوآب ۱ و ۲ را، که ۶۸/۴ درصد از نیازهای آبی حوضه را به خود اختصاص داده است، در قالب کاهش شدید منابع آب پیشنهاد می‌نماید و این در حالی می‌باشد که برای سایر مناطق کاهش‌های به مراتب بسیار کمتری در نظر گرفته شده است. لذا توجه و اهتمام به تخصیص بهینه آب به خصوص از منابع آب سطحی، کنترل برداشت‌ها از رودخانه زرینه‌رود و بهره‌برداری صحیح از سد بوکان ضروری بوده و از حساسیت بالای اجتماعی، اقتصادی و سیاسی برخوردار است.

۴- جمع‌بندی

در این مطالعه مدل سه‌هدفه‌ایی جهت استخراج الگوی کشت بهینه و ارائه مقادیر بهینه برداشت از منابع آب سطحی و زیرزمینی در محدوده‌های مطالعاتی واقع در حوضه آبریز زرینه‌رود تدوین گردید. در این مدل دستیابی به منافع حداکثر، تأمین نیازهای آبی شرب و کشاورزی و حفظ اکوسیستم طبیعی آبخوان مورد توجه قرار گرفت. با استفاده از الگوریتم بهینه‌ساز NSGA-II، که از توانایی بالایی در حل مسائل پیچیده منابع آب برخوردار می‌باشد، سناریوهای مرتبط با الگوی کشت بهینه و نحوه تخصیص ماهانه از هر منبع تعیین گردید. از آنجا که انتخاب سناریوی برتر بر مبنای اهداف تعریف شده می‌تواند راهگشای مدیران تأمین‌کننده آب باشد، در این تحقیق با استفاده از پنج روش تصمیم‌گیری، رتبه سناریوهای ارائه شده بر روی منحنی تبادل بهینه بدست آمده، مورد محاسبه قرار گرفت. جهت استفاده از مزایای هر یک از این روش‌های تصمیم‌گیری، نتایج رتبه‌های بدست آمده با استفاده از رویکرد گزینش اجتماعی بردا ترکیب شده و مقادیر بهینه مرتبط با سناریوی برتر استخراج گردید. با توجه به اینکه درصد تأمین نیازهای آبی در شرایط موجود به طور متوسط ۷۱ درصد می‌باشد، بررسی میزان تخصیص بهینه جهت تأمین نیازهای آبی مرتبط با بخش‌های شرب و کشاورزی برای یک دوره یکساله نشان می‌دهد که سناریوی منتخب برآمده از مدل پیشنهادی علی‌رغم کاهش ۴۲/۵ درصدی برداشت از منابع آب، توانسته بیش از ۷۷ درصد از نیازها را تأمین نماید. همچنین جهت دستیابی به منافع اقتصادی سیستم مورد مطالعه و همچنین حفظ اکوسیستم منابع آبی موجود لازم است تنوعی از محصولات مختلف کشت شود. مقایسه منافع اقتصادی حاصل از شرایط بهینه و وضعیت موجود نشان می‌دهد که با اجرای سناریوی پیشنهادی می‌توان با ارتقاء ۱۳ درصدی، منافع کشاورزان را از ۱۱۳۷۷۳۰ میلیارد ریال به ۱۲۸۵۹۷۱ میلیارد ریال افزایش داد. بر مبنای مدل پیشنهادی، اعمال سیاست‌های بـرداشت مرتبط با سناریوی برتر می‌تواند به میزان ۳۷۹

Table 3. Comparison between the optimal and current water to demands (MCM)
جدول ۳- مقایسه بین میزان تخصیص آب بهینه و شرایط موجود (MCM)

Zone	No. of zone	Allocated surfacewater		Allocated groundwater	
		(Current)	(Optimal)	(Current)	(Optima)
Saghez	1	7.2	30.7	74.23	36
Takab	2	59.97	18	2.22	40.5
Saeinghaleh	3	41.48	18.37	0.03	16.92
Myandoab-1	4	159.15	21.22	111.7	85.8
Myandoab-2	5	311	246.38	125.72	0

میلیون متر مکعب آب سطحی بیشتری را وارد دریاچه ارومیه نماید که این امر نشان از کارآیی ساختار تدوین شده در جهت مدیریت بهتر حوضه آبریز زرینه‌رود می‌باشد. لازم به ذکر است که با توجه به نظر مؤثران حاکم بر این محدوده مورد مطالعه می‌توان سیاست‌های تخصیصی و الگوی کشت محصولات را بر اساس گزینه‌های واقع بر منحنی تبادل بهینه بین اهداف انتخاب و به مرحله اجرا درآورد. رویکرد پیشنهادی این تحقیق می‌تواند برای سایر حوضه‌های آبریز، جهت کاهش مصرف آب کشاورزی و افزایش در آمد کشاورزان از طریق بهینه‌سازی الگوی کشت مورد استفاده قرار گیرد.

پی‌نوشت‌ها

1- Non-Dominated Sorting Genetics Algorithms
2- Multi-objective Constrained Algorithm
3- Piece-Wise Genetic Algorithm
4- Non-Dominated Solution
5- Non-Dominated Fronts
6- Multi-Criteria Decision Making
7- Borda Aggregation Method
8- Compromise Programming
9- COmplex PropoRtional Assessment
10- Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution
11- Modified-TOPSIS
12- Weighted Aggregates Sum Product ASsessment

۵- مراجع

Ahmadisharaf E, Kalyanapu AJ, Chung ES (2015) Evaluating the effects of inundation duration and velocity on selection of flood management alternatives using multi-criteria decision making. Water Resources Management 29(8):2543–2561

Alinejad M, Jolaei R, Shirani bidabadi F (2015) Determine the optimum cropping pattern of Babol city using linear programming, Second National Conference on Agriculture and Natural Resources Student scientific societies, University of Tehran, Karaj (In Persian)

Banihabib ME, Hosseinzade M, Olad Gharehgoz M (2016a) A nonlinear model development of water allocation and cropping pattern in deficit irrigation condition (Case study: Tehran and Alborz Provinces). Iranian Water Research Journal 19(4):159-163 (In Persian)

Banihabib ME, Hosseinzadeh M, Peralta RC (2016b) Optimization of inter-sectorial water reallocation for arid-zone megacity-dominated area. Urban Water Journal 13(8):852-860

Bolouri-Yazdeli Y, Bozorg-Haddad O, Fallah-Mehdipour E, Mari˜no MA (2014) Evaluation of real-time operation rules in reservoir systems operation. Water Resources Management 28(3):715–729

Bozdağ A (2015) Combining AHP with GIS for assessment of irrigation water quality in Cumra irrigation district (Konya), central Anatolia, Turkey. Environmental Earth Science 73(12):8217–8236

Bozorg-Haddad O, Azarnivand A, Hosseini-Moghari SM, Loáiciga HA (2016) Development of a comparative multiple criteria framework for ranking pareto optimal solutions of a multiobjective reservoir operation problem. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 142(7):04016019

Chávez-Morales J, Mariño MA, Holzapfel EA (1987) Planning model of irrigation district. Journal of Irrigation and Drainage Engineering ASCE 113: 549–564

Chen L, McPhee J, Yeh WW-G (2007) A diversified multiobjective GA for optimizing reservoir rule curve. Advances in Water Resources 30:1082–1093

Davijani MH, Banihabib ME, Nadjafzadeh Anvar A, Hashemi SR (2016) Multi-objective optimization model for the allocation of water resources in arid regions based on the maximization of socioeconomic efficiency. Water Resources Management 30(3):927-946

Deb K, Agrawal S, Pratap A, Meyarivan T (2002) A fast elitist non-dominated sorting genetic algorithm for multi-objective optimization: NSGA-II. IEEE Trans. Evol. Comput. 6(2):182–197

Doorenbos H, Kassam AH (1979) Yield response to water, irrigation and drainage Paper No. 33. FAO: Rome; 193 pp.

Ghahraman B, Sepaskhah AR (2004) Linear and non-linear optimization models for allocation of a limited water supply. Journal of Irrigation and Drainage Engineering 124(5):138–149

Ghasemi MM, Karamouz M, Shui LT (2016) Farm-based cropping pattern optimization and conjunctive use planning using piece-wise genetic algorithm (PWGA): a case study. Modeling Earth Systems and Environment 2:25, doi:10.1007/s40808-016-0076-z

Hwang CL, Yoon K (1981) Multiple attribute decision making: Methods and applications, a state of the art survey. Springer, NewYork.

Karamouz M, Zahraie B, Kerachian R, Eslami A (2010) Crop pattern and conjunctive use management: a case study. Irrigation and Drainage 59(2):161-173

Sarker R, Ray T, (2009) An improved evolutionary algorithm for solving multi-objective crop planning models. Computers and Electronics in Agriculture 68(2):199-191

Ustinovichius L, Zavadskas EK, Podvezko V (2007) Application of a quantitative multiple criteria decision making (MCDM-1) approach to the analysis of investments in construction. Control and Cybernetics 36(1):251–268

Vedula S, Roger P (1981) Multiobjective analysis of irrigation planning in river basin development. Water Resources Research 17:1304–1310

Viteikiene M, Zavadskas EK (2007) Evaluating the sustainability of Vilnius city residential areas. Journal of Civil Engineering and Management 13(2):149-155

Yousefdost E (2015) Optimization of Cropping Pattern and agricultural water allocation in Qazvin plain using fakhteh and genetic algorithm, Msc thesis, Zabol University, College of Agriculture and Natural Resources (In Persian)

Zavadskas EK, Antucheviciene J, Razavi Hajiagha SH, Hashemi SS (2014) Extension of weighted aggregated sum product assessment withinterval-valued intuitionistic fuzzy numbers (WASPAS-IVIF). Applied Soft Computing 24:1013–1021

Zavadskas EK, Turskis Z, Antucheviciene J, Zakarevicius A (2012) Optimization of weighted aggregated sum product assessment. Elektronika ir elektrotechnika 6(122):3–6

Zeleny M (1973) Compromise programming. Multiple criteria decision making, J. L. Cochrane and M. Zeleny, ed., University of South Carolina Press, Columbia, SC

Mahjouri N, Byzhani Manzar M (2013) Waste load allocation in Zarjoub rivers: Application of Borda aggregation method and Nash bargaining function. Iran-Water Resources Research 9(3):59-74 (In Persian)

Maji CC, Heady EO (1980) Optimal reservoir management and crop planning under deterministic and stochastic inflows. Water Resources Bulletin. 16:438–443

Matanga GB, Mariὄ MA (1979) Irrigation planning: 1. Cropping pattern. Water Resources Research 15:672–678

Mohammad Rezapour Tabari M, Soltani J (2013) Multi-objective optimal model for conjunctive use management using SGAs and NSGA-II models. Water Resources Management 27(1):37–53

Mohammadi H, Sargazi A, Dehbashi D, Poudineh M (2016) Optimization of cropping pattern with an emphasis on social benefits in the rational exploitation of water (A Case Study of Fars Province). Journal of Environmental Science and Technology 17(4):107-115 (In Persian)

Panda SN, Khepar SD, Kaushal MP (1996) Inter-seasonal irrigation system planning for waterlogged sodic soils. Journal of Irrigation and Drainage Engineering ASCE 122:135–144

Raju KS, Kumar DN (2004) Irrigation planning using genetic algorithms. Water Resources Management 18(2):163-176

Ren L, Zhang Y,Wang Y, Sun Z (2007) Comparative analysis of a novel M-TOPSIS method and TOPSIS. Applied Mathematics Research eXpress 1–10