Amirkabir Journal of Civil Engineering

Amirkabir J. Civil Eng., 53(10) (2022) 967-968
DOI: 10.22060/ceej.2020.18345.6841

Optimal water utilization policy with sustainable aquifer approach with simulation and decentralized optimization

A. Khajeem Moghadam[1], B. Saghafian[2*], M. Najarchi1, M. Delavar[2]

[1] Department of Civil Engineering, Islamic Azad University Arak Branch, Arak, Iran.
[2] Civil Department, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.
[3] Department of Water Resources Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

ABSTRACT: Nowadays, providing optimum solutions to water resources exploitation problems has become one of the major concerns of decision-makers. In this study, a multi-objective model was developed for coupled surface and groundwater resources allocation, considering different interactive scenarios between stakeholders and the ecosystem. The general algorithm for water resources allocation was based on an optimization model coupled with the environmental-agricultural model. The optimization approach reduced the irrigation water allocation to 78%. While the 7% reduction was allocated to meet the aquifer and agricultural demands of the study area, the cultivation cost was raised by only ~1.3%.

Review History:
Received: May,02, 2020
Revised: Aug. 17, 2020
Accepted: Aug. 18, 2020
Available Online: Sep. 09,2020

Keywords:
Groundwater,
Stakeholders,
Ecosystem,
Optimization

1. INTRODUCTION

Nowadays, due to the severe environmental consequences of water demands, optimum approaches incorporating coupled quantitative and qualitative aspects of water resources must be adopted. (Chandio et al. 2012). Conjunctive surface and groundwater models for the proper allocation of water resources are becoming popular. Previous studies on water resource exploitation generally fall into nine categories: optimization for conjunctive exploitation planning, groundwater management, seawater penetration management, irrigation management, optimal cropping pattern, reservoir operation, resource management in arid and semiarid regions, solid waste management and other uses such as hydropower generation and the sugar industry (Singh, 2014). Therefore, there is a lack of large-scale conjunctive-use optimization models contemplating economic details and parameters. Furthermore, there are a limited number of studies on groundwater resource exploitation in aquifers with severe negative water balance. Chen et al. (2016) studied groundwater in Yinchuan Plain, China, where groundwater is a vital resource for agriculture, industry, economic, and social development.

Marques et al. (2018) developed a four-objective optimization model to design flexible water distribution networks. Economic studies are often carried out in parallel with those of hydrological studies, while socio-economic aspects have not been taken into account in an integrated way (Grémont et al. 2015). Cooperative research between economists and hydrologists to improve the economic value of water while maintaining social values contributes to establishing a sustainable environmental system (Ossa-Moreno et al. 2018).

In this study, an optimization approach was adopted to determine the optimal policy associated with the existing water exploitation scenario while ensuring the future sustainability of the aquifer (environmental objective), supplying drinking and industrial water demands (social objective) and maximizing agricultural benefits (economic objective). The case study region is a part of the Tehran-Karaj aquifer located in central Iran. Numerous studies have been conducted on groundwater allocation modeling and optimization. However, there has not been sufficient attention paid to economic and environmental allocation aspects.

2. METHODOLOGY

In this study, three objective functions were contemplated involving supply of drinking and industrial water, improving agricultural economy and aquifer status. The first objective function (Z1) was to minimize the difference between the demand and the allocation of drinking and industrial water. The second objective function (Z2) was developed to improve the agricultural economy for the stakeholders. The third objective function (Z3) maintained aquifer status in such a way that it may be exploited in the long term by all stakeholders. Furthermore, the return flow from drinking,

*Corresponding author's email: b.saghafian@gmail.com

Copyrights for this article are retained by the author(s) with publishing rights granted to Amirkabir University Press. The content of this article is subject to the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY-NC 4.0) License. For more information, please visit https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode.

industrial and agricultural uses was incorporated in this objective function. The objective functions are as follows:

$$Z_1 = min(\sum_{i=1}^{n}(Et_i * A_i) - Xs_{u,d}) \quad (1)$$

$$Z_2 = max(A * \sum_{i=1}^{n} a_i \times y_i \times B_i) \quad (2)$$

$$Z_3 = min(V_{g85} - 0.8\sum_{i=1}^{n}(b_i \times ET_i \times S_y \times A_i) - 0.2Xs_{u,d}) \quad (3)$$

In the second function, the performance is calculated according to the water distribution efficiency in the field while crop sensitivity coefficient (K_i) is determined as follows (Ayers and Westcot, 1985):

$$y_i = y_{imax} * (1 - \sum_{i=1}^{n} k_i \times (1 - \frac{W_i}{ET_i}) \quad (4)$$

In this study, water allocation priority from higher to lower was assigned to, drinking, industrial and agricultural, respectively.

3. RESULTS AND DISCUSSION

Given the results, the conjunctive exploitation policies and guidelines for each sector may be developed. Finally, after comparative evaluation and determining the minimum distance between the function values, the first scenario was selected as the best scenario. In this scenario, 99.69% of drinking water was met while at the same time, by changing the cropping pattern, about 3.03 MCM per year could be allocated to the aquifer. In other words, not only did this scenario reduce water withdrawal from the aquifer, but also it could almost entirely satisfy the drinking and industrial water demands.

As previously stated, the selected scenario resulted in water saving of 8% of the total water demand in the study area and added this volume to the groundwater resources. Since water supply in the study area is mainly dependent on groundwater, this long-term saving can gradually bring about stability in the aquifer. Moreover, while 85% of the water is currently allocated to agricultural demand, the optimization model reduced this value to 79% and allocated the remaining 6% to the aquifer for restoration purposes. The results of the optimization model based on the weights of objective functions determined different sets of water allocation to the stakeholders. Using these results, stakeholders would understand the advantages/disadvantages associated with different objective function weights and hence effectively negotiate with other stakeholders.

4. CONCLUSION

In this study, a multi-purpose water allocation model was proposed using three objective functions. The results demonstrated that stakeholders might be divided into two categories with respect to the weights: sensitive and non-sensitive stakeholders. Agricultural and horticultural users are not significantly dependent on the weights of objective functions, while drinking water and the aquifer are considerably sensitive to the weights. Thus, decision-makers do not necessarily require the weights of objective functions to make decisions on non-sensitive stakeholders. A set of objective function weights was selected by comparing water allocation values. As such, the average allocated water to stakeholders was determined as 15, 79, and 7%, respectively, for drinking, agricultural and aquifer demands. However, the current values in the region are equal to 15, 85 and zero percent, respectively. Similar water resource allocation exists in many parts of the world so that the developed methodology may be adopted as an effective tool to determine the optimum solution to allocate water to aquifer reclamation while meeting the other demands.

REFERENCES

[1] Ayers, R. and Westcot, D. (1985). "Water Quality for Agriculture." FAO Irrigation and Drainage Paper 29, rev. 1. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome. 174 p.

[2] Chandio, A., Lee, T.S., Mirjat, M. (2012). "The extent of waterlogging in the lower Indus Basin (Pakistan)–A modeling study of groundwater levels." Journal of hydrology 426: 103-111.

[3] Chen, J.,Wu, H., Qian, H., Li, X. (2016). "Challenges and prospects of sustainable groundwater management in an agricultural plain along the Silk Road Economic Belt, north-west China." International Journal of Water Resources Development 34(3): 354–368.

[4] Grémont, M., Girard, C., Gauthey, J., Augeard, B. (2015). "Contribution of hydro-economic models to water management in France. Onema." Knowledge for action.

[5] Marques, J. Gunha, M. Savic, D. (2018). Many-objective optimization model for the flexible design of water distribution networks. Journal of Environmental Management 226 (2018) 308–319.

[6] Ossa-Moreno, J., McIntyre, N., A., S., Smart, J., Rivera, D., Lall, U., Keir, G. (2018). "The Hydro-economics of Mining." Ecological Economics 145: 368-379.

[7] Singh, A. (2014) "Simulation–optimization modeling for conjunctive water use management." Agricultural Water Management 141: 23-29.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

A. Khajeem Moghadam, B. Saghafian, M. Najarchi, M. Delavar, Optimal water utilization policy with sustainable aquifer approach with simulation and decentralized optimization, Amirkabir J. Civil Eng., 53(10) (2022) 967-968.

DOI: 10.22060/ceej.2020.18345.6841

نشریه مهندسی عمران امیرکبیر

نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، دوره ۵۳ شماره ۱۰، سال ۱۴۰۰، صفحات ۴۳۹۷ تا ۴۴۱۲
DOI: 10.22060/ceej.2020.18345.6841

تعیین سیاست بهره‌برداری بهینه از منابع آب با رویکرد پایداری آبخوان با شبیه‌سازی و بهینه‌سازی بروش الگوریتم ژنتیک چند هدفه

آتنا خواجه‌ایم مقدم[۱]، بهرام ثقفیان[۱*]، محسن نجارچی[۱]، مجید دلاور[۲]

۱- گروه عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد اراک، اراک، ایران
۲- دانشکده مهندسی منابع آب، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

خلاصه: در حال حاضر رشد جمعیت در جهان منجر به نیاز فزاینده به مصارف آب در زمینه‌های کشاورزی، صنعتی و شهری شده است و لزوم برنامه‌ریزی برای استفاده بهینه و پایدار از منابع آب محدود در دسترس، لازم و ضروری به نظر می‌رسد. در این مقاله تامین نیازهای آبی همراه با کنترل تغییرات سطح متوسط آب‌های زیرزمینی خصوصا در اراضی کشاورزی توامان با حداکثرسازی سود اقتصادی این بخش، به صورت اهداف تحقیق در مدل‌سازی منابع آب دشت کرج به صورت شبیه‌سازی عددی و بهینه‌سازی غیر خطی چند هدفه تعریف شدند. در مدل فوق‌الذکر، استفاده ترکیبی از تکنیک‌های بهینه‌سازی و شبیه‌سازی به عنوان روشی مفید و قدرتمند در تعیین استراتژی‌های مدیریتی بهره‌برداری بهینه از منابع آب در دسترس، به کار گرفته شد. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد پس از انجام بهینه‌سازی، میزان آب تخصیصی به بخش کشاورزی به میزان نه درصد کاهش یافته و این میزان صرفه‌جویی در مصرف آب، تنها یک درصد افزایش هزینه‌های کشت را به دنبال داشته است. این میزان کاهش آب مصرفی منجر به پایداری محیط زیست و تقویت آبخوان به میزان ۳/۰۳ میلیون متر مکعب آب در سال می‌شود و این امر در حالی محقق شد که ضمن حفظ منافع و سود اقتصادی کشاورزان، تامین آب مورد نیاز شرب و صنعت در منطقه، به طور کامل انجام پذیرفته است.

تاریخچه داوری:
دریافت: ۱۳۹۹/۰۲/۱۳
بازنگری: ۱۳۹۹/۰۵/۲۷
پذیرش: ۱۳۹۹/۰۵/۲۸
ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۰۶/۱۹

کلمات کلیدی:
آبخوان
شبیه‌سازی
بهینه‌سازی
کشاورزی
بهره‌برداری

۱-مقدمه

امروزه مدیریت منابع آب همراه با تحلیل همزمان زیرسیستم‌های آن، اعم از منابع سطحی و زیرزمینی و بررسی اثر متقابل آن‌ها بر یکدیگر، به عنوان روشی مناسب، کارآمد و مدیریتی در برنامه‌ریزی هیدروسیستم‌ها مطرح شده است. برنامه‌ریزی جهت بهره‌برداری به صورت ناهماهنگ و مستقل و بدون در نظر گرفتن مولفه‌های اقتصادی و محیط زیستی از سیستم‌های منابع آب، می‌تواند به بروز مشکلات متعددی همچون کمبود آب در مواقع خشکسالی، ناپایداری در تولید محصول، افت تراز سطح ایستابی و نهایتا افزایش هزینه‌ها در نتیجه برداشت‌های بی‌رویه منجر شود [۱]. خصوصا با در نظر گرفتن این واقعیت که بخش کشاورزی با صرف حدود ۹۰٪ از آب‌های کشور، بزرگ‌ترین مصرف کننده منابع آب و آسیب‌پذیرترین بخش در شرایط خشکسالی شناخته می‌شود و مدیریت بهینه در عرضه و تقاضای آب، از جمله کارسازترین راهکارها به منظور کاهش آسیب‌های وارده به این بخش می‌باشد. بدین منظور توسعه ابزارهایی که بتواند مدیران را در اتخاذ تصمیمی کارا و بهینه برای بهره‌برداری صحیح از منابع آب سطحی و زیرزمینی و تعادل بین عرضه و تقاضای آب یاری دهد، ضروری می‌باشد [۲]. در این راستا طیف گسترده‌ای از راهکارها می‌توانند برای مدیریت پایدار منابع آب در نظر گرفته شوند که دربرگیرنده جنبه‌های کمی و کیفی منابع آب باشند، اما تأثیر همه راه‌حل‌ها و ترکیبات آن‌ها نمی‌تواند با آزمایش‌های میدانی تأیید شود، بنابراین استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی اغلب تنها راه‌حل عملی برای فراهم کردن ورودی‌های لازم تصمیمات مدیریتی و بررسی

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: b.saghafian@gmail.com

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode دیدن فرمائید.

اثرات استراتژی‌های مختلف مدیریت منابع آب می‌باشد. لذا بهترین روش دستیابی به برنامه مناسب بهره‌برداری از منابع آب، استفاده از مدل‌سازی‌های عددی برای منابع آب سطحی و زیرزمینی می‌باشد [۳]. در همین راستا نارولا و گوسین[1] (۲۰۱۳) از شبیه‌سازی برای پیش‌بینی وضعیت کمی و کیفی اجزای مختلف رواناب استفاده کردند و سپس برای نتیجه‌گیری، این مدل با مدل جریان[2] و مدل انتقال[3] ادغام نمودند [۴].

بر اساس این رویکرد، مدل‌های شبیه‌سازی توانایی پیش‌بینی پاسخ‌های سیستم به استراتژی‌های مدیریتی را دارند و مدل‌های بهینه‌سازی، استراتژی‌های مدیریتی بهینه را از مجموعه‌هایی از استراتژی‌های جایگزین امکان‌پذیر، تعیین می‌کنند. به وسیله این رویکرد، می‌توان از مدل‌های شبیه‌سازی به صورت ترکیب با مدل مدیریتی، یا با استفاده از معادلات حاکم به صورت قیود اجباری در مدل بهینه‌سازی یا با استفاده از ماتریس پاسخ[4] یا مدل شبیه‌سازی خارجی استفاده نمود [۵].

برای مقایسه عملکرد الگوریتم‌های بهینه‌سازی، اکبرپور و همکاران (۱۳۹۸) دو تابع هدف متضاد برای حل مسئله بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخازن چاه نیمه‌های سیستان مورد استفاده قرار دادند. نتایج حاصل از بررسی الگوریتم‌های فرا ابتکاری در این تحقیق نشان داد که از بین الگوریتم‌های MOPSO، MOGOA و MOALO، الگوریتم‌های MOALO و MOGOA از کارایی بالاتری نسبت به الگوریتم MOPSO برخوردار بودند. اما بر اساس معیارهای عملکرد زمان اجرای الگوریتم و معیار پراکندگی الگوریتم MOPSO کارایی بالایی را از خود نشان داد و بر اساس معیارهای فاصله، همگرایی و فاصله نسلی الگوریتم MOGOA کارایی بالایی را از خود نشان داد. بنابراین یافته‌ها به نظر می‌رسد هیچ یک از معیارهای مذکور نمی‌تواند به تنهایی ملاک برتری یک الگوریتم نسبت به دیگر الگوریتم‌ها در حل یک مسئله بهینه‌سازی باشد و بسته به نوع مطالعه موردی، به کارگیری هر یک باید برنامه‌ریزی شود [۶].

تکنیک درونگذاری[5] و روش ماتریس پاسخ، دو روشی هستند که معمولا برای ترکیب مدل‌های شبیه‌سازی و بهینه‌سازی استفاده می‌شوند. ولی‌زادگان و یزدان‌پناه (۱۳۹۷) یک مدل مدیریتی بر مبنای تکنیک‌های موثر بهینه‌سازی و شبیه‌سازی برای حل مسائل موجود در دشت مهاباد را توسعه دادند. بر اساس نتایج به دست آمده از تحقیق و اجرای مدل کمی بهره‌برداری تلفیقی بهینه، سهم تقریبی آب تأمینی از منابع آب، به ترتیب ۱۳/۵ درصد مربوط به آب‌های سطحی و ۸۶/۵ درصد مربوط به آب‌های زیرزمینی است. بنابراین نیاز آبی منطقه باید بر اساس این درصدها تأمین گردد، تا منابع آب در حالت تعادل قرار گیرد [۷].

اما نکته مهم در اینجا آن است که ادغام مدل شبیه‌سازی غیرخطی در یک مدل مدیریتی، پیچیده و دشوار است و ممکن است زمان محاسباتی برای دستیابی به هر راه‌حل بهینه طولانی باشد. زمان محاسباتی برای رسیدن به یک حل بهینه می‌تواند با استفاده از بعضی تقریب‌ها از مدل شبیه‌سازی یا با استفاده از مدل‌های جایگزین یا متا مدل[6] به عنوان جایگزین برای مدل‌های عددی پیچیده کاهش یابد. مدل‌های جایگزین رایج عبارتند از: توابع رگرسیون[7]، مدل‌های کریجینگ[8] ، ماشین بردار پشتیبان[9] ، شبکه عصبی مصنوعی[10] و برنامه‌ریزی ژنتیک[11] [۸].

اعتبارسنجی شبکه عصبی مصنوعی آموزش دیده، نشان دهنده کارائی خوب مدل در پیش‌بینی مقدار جریان بازگشتی و غلظت‌های شوری است. صفوی و اسمی‌خانی (۱۳۹۲) بهره‌برداری تلفیقی از منابع آب سطحی و زیرزمینی را با استفاده ماشین‌های بردار پشتیبان و الگوریتم ژنتیک، در دشت کوهپایه از حوضه زاینده‌رود را بررسی کردند [۹]. برای حل مسائل بهینه‌سازی چند هدفه، روش‌های مختلفی وجود دارد که از آن جمله می‌توان به روش وزن‌دهی[12]، روش محدودیت[13]، روش آرمانی[14] و الگوریتم‌های تکاملی چند هدفه[15] اشاره نمود [۱۰]. در همین راستا موسوی و کابلی (۱۳۹۸) در مطالعه‌ای تأثیر بهره‌وری آب به عنوان راهکار سازگاری با تغییر اقلیم آتی در بهره‌برداری بهینه از مخزن سد جرّه مورد بررسی قرار دادند. بر پایه سناریوهای تدوین شده، میزان رواناب ورودی به مخزن و نیاز آبی

1 Narula, Gosain
2 MODFLOW
3 MT3DMS
4 Response matrix
5 Embedding technique

6 Meta-model
7 regression functions
8 Kriging models
9 Support Vector Machines
10 Artificial Neural Networks (ANN)
11 Genetic Programming
12 Weighted sum method
13 Epsilon– constraint method
14 Goal attainment method
15 Multi-objective Evolutionary Algorithms(MOEAs)

پایین دست برای هر دوره مدل‌سازی شد و نتایج نشان داد پس از مدل‌سازی، میزان جریان ورودی به مخزن کاهش و میزان تقاضای آب افزایش پیدا می‌کند [۱۱].

استفاده پایدار از منابع آب سطحی و زیرزمینی یکی از اهداف مهم برنامه‌ریزان و متولیان اداره امور مرتبط با آب در کشور است [۱۲]. این مفهوم که به نوعی بهره‌برداری مداوم و پایدار از منابع آب را به ذهن متبادر می‌کند، در صورتی ارزشمند است که منطقه مورد مطالعه از لحاظ مسائل محیط زیستی نیز بررسی شده و هرگونه آسیب وارد به محیط زیست در هر منطقه‌ای، قابل قبول نمی‌باشد. به منظور ارزیابی یکپارچه کمیت به همراه پایداری محیط زیست در منابع آب بخصوص آبخوان محدوده مطالعه، یکی از سه تابع هدف مطالعه به این مهم اختصاص یافت که در مبحث روش شناسی این تحقیق به طور مبسوط شرح داده شده است.

اما نکته لازم به ذکر در اینجا آن است که متاسفانه مطالعات اقتصادی، اغلب به صورت موازی با مطالعات هیدرولوژیکی انجام شده و عملکرد هیدرولوژیکی حوضه و فرایندهای اجتماعی-اقتصادی به روش یکپارچه مورد تجزیه و تحلیل قرار نمی‌گیرند [۱۳]. انجام تحقیقات مشترک بین اقتصاددانان و هیدرولوژیست‌ها به منظور بهینه‌سازی ارزش اقتصادی آب، ضمن حفظ ارزش‌های اجتماعی، به ایجاد سیستم پایدار در محیط زیست نیز کمک شایانی می‌نماید [۱۴].

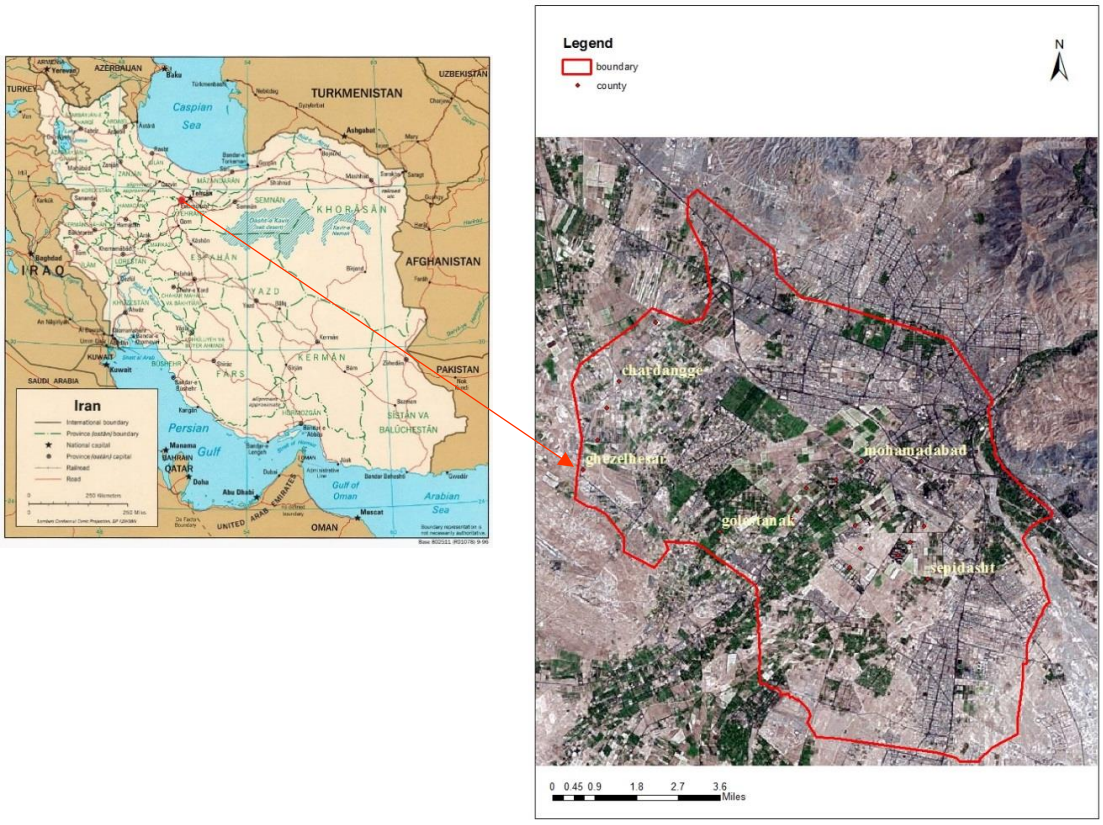
مطالعات بهره‌برداری از منابع آب با در نظر گرفتن مولفه‌های اقتصادی، محیط‌زیستی، نیازها و مصارف بخش‌های مختلف، به منظور رسیدن به توسعه پایدار، در حوضه آبریز تهران-کرج که با بحران تامین آب و محیط‌زیست تضعیف شده همراه است، تاکنون مورد توجه قرار نگرفته است. لذا در این پژوهش، به صورتی نوآورانه، از رویکرد بهینه‌سازی به منظور تعیین سیاست بهینه بهره‌برداری از منابع آب موجود، با اولویت تامین پایداری زیست‌محیطی، تامین نیاز شرب و صنعت و حداکثرسازی سود بخش کشاورزی، مورد تحلیل قرار گرفته است. به بیان دیگر با انجام این تحقیق، ایجاد پایداری آبخوان همراه با تامین حداکثری منابع آب ذی‌نفعان شرب و صنعت مورد نظر قرار گرفته و ضمن در نظر گرفتن سود بخش کشاورزی، به ارائه چارچوبی جهت دستیابی به وضعیت بهینه کشت پرداخته شده است. همان‌گونه که پیشتر نیز بیان شد، در مدل‌سازی آب‌های زیرزمینی کمتر به جنبه‌های اقتصادی و محیط زیستی تخصیص‌ها توجه می‌شود و نوآوری این تحقیق در لحاظ نمودن جزئیات و پارامترهای اقتصادی و زیست محیطی برای برنامه‌ریزان و مدیران منابع آب و همچنین دقت در تدوین و ارائه الگویی عملی برای دستگاه‌های اجرایی کشور است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

محدوده مورد پژوهش شامل بخشی از منطقه دشت کرج واقع در حوضه آبریز دریاچه نمک است که از غرب به دشت هشتگرد، از شرق به دشت تهران-کرج، از جنوب به دشت تهران- شهریار و از شمال به ارتفاعات البرز محدود می‌شود. شهرستان کرج در فاصله ۴۸ کیلومتری شمال غربی تهران یکی از متراکم‌ترین مراکز جمعیتی کشور به شمار می آید که حدود ۹۰ درصد منبع تامین کننده آب شرب آن از منابع آب زیرزمینی تامین می گردد. آبخوان ناحیه مورد مطالعه از نوع آزاد و دارای شرایط تقریباً یکنواخت داشته و یک واحد هیدرولوژیکی را تشکیل می دهد. کرج پس از تهران بزرگ‌ترین شهر مهاجر پذیر ایران است و پس از شهرهای تهران، مشهد، اصفهان و تبریز به عنوان پنجمین شهر پرجمعیت ایران به شمار می‌رود. گذشت زمان، سرازیر شدن جمعیت به شهر تهران و اهمیت یافتن موضوع تامین آب پایتخت به موازات مهاجرپذیری شهر کرج و شکل‌گیری» کلان شهرکرج» موجب شد که هم اینک قسمت عمده آب شرب و مصارف خانگی کرج (بیش از ۹۵ درصد) و بخش اعظم مصارف شهری و فضاهای سبز این شهر از منابع آب زیرزمینی تامین شود. علاوه بر این موارد کیفیت آب زیرزمینی این شهر نیز نامناسب بوده و از نظر سختی یکی از آب‌های با کیفیت پائین در کشور به شمار می‌رود [۱۵].

منطقه تمرکز مطالعه حاضر، با وسعت ۱۸۴/۷۹ کیلومتر مربع، ۳/۵ درصد از محدوده مطالعاتی دشت تهران- کرج را به خود اختصاص داده است. مهم ترین رودخانه موجود در این منطقه، رودخانه کرج با آورد ۴۸۸/۲ میلیون متر مکعب در سال است که از طریق سد امیرکبیر برای مصارف شرب تخصیص می‌یابد. همچنین جریانی حدود ۲۵۰ لیتر در ثانیه از محدوده خارج و وارد محدوده مطالعاتی دریاچه نمک می شود. حجم جریان ورودی سطحی به محدوده مطالعاتی تهران-کرج حدود ۱۳۷۵/۴۱ میلیون متر مکعب در سال بوده که با



شکل ۱. موقعیت محدوده مدل‌سازی در تصویر ماهواره‌ای از منطقه

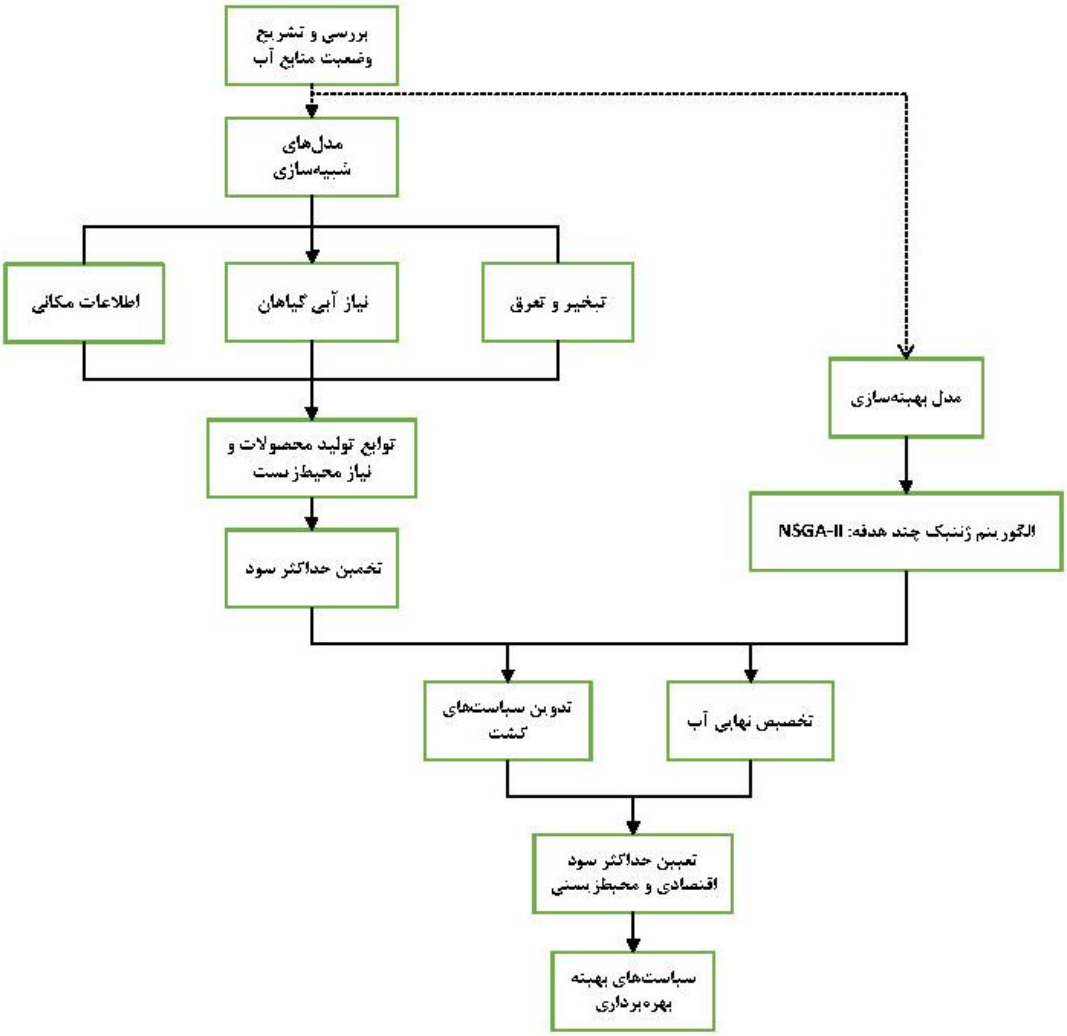
Fig. 1. Location of study area in satellite images

احتساب ۱۸۱۷/۸۷ میلیون متر مکعب آب برگشتی ناشی از مصارف مختلف، کل حجم ورودی به میزان ۳۱۹۳ میلیون متر مکعب می‌رسد. در همین محدوده مجموع مصارف و خروجی‌ها ۳۳۴۵/۵۳ میلیون متر مکعب می‌باشد که در مقایسه با کل آب موجود در محدوده (با احتساب آب برگشتی از مصارف) ۱۵۲/۲۵ میلیون متر مکعب بیشتر می‌باشد که این حجم از ذخیره ثابت آبخوان آبرفتی دشت تهران-کرج برداشت می‌گردد [۱۶].

در حال حاضر میانگین تقاضای سالانه آب کشاورزی در محدوده مطالعه این تحقیق ۱۵۶ MCM و میزان تقاضای آب شهری و صنایع در این محدوده ۳۰ MCM است. بر طبق تصاویر ماهواره ای لندست مربوط به سال ۲۰۱۷ از محدوده مورد مطالعه، ۳۷ درصد از اراضی اختصاص به سکونت‌گاه‌های انسانی، ۳۶ درصد به اراضی کشاورزی و باغات، پنج درصد اراضی به صنایع و مابقی مربوط به اراضی بایر می‌باشد. شکل ۱ موقعیت منطقه مورد مطالعه و کاربری اراضی را نشان می دهد. میزان بالای مصارف آب در این محدوده به خصوص در برداشت بی رویه از منابع آب زیرزمینی، سبب کاهش ذخایر منابع آب و بیلان منفی منابع در این محدوده شده که منجر به افت سطح آب زیرزمینی (با متوسط سالانه ۷۰ سانتی‌متر)، کاهش محسوس کیفیت فیزیکی منابع آب زیرزمینی (شور و گچی شدن آب) در اثر تغییر شیب هیدرولیکی ناشی از افت سطح منابع آب زیرزمینی، فرونشست زمین در دشت‌ها (مهرشهر حدود شش و فردیس حدود هشت سانتی‌متر در سال) و تشدید پدیده بیابان‌زایی را به همراه داشته است [۱۷]. بر اساس تصاویر ماهواره‌ای، مناطق بالادست منطقه مورد پژوهش بیشتر شامل سکونت‌گاه‌های شهری و مناطق پایین دست غالباً به اراضی کشاورزی اختصاص دارد.

۳- روش‌شناسی

این مطالعه با هدف کاهش کمبود آب در میان ذی‌نفعان ضمن بیشینه‌سازی سود کشاورزان انجام گرفته است که مراحل اجرایی به صورت فلوچارت شکل ۲ ارائه می شود.



شکل ۲. فلوچارت روش کار

Fig. 2. Flowchart of the study procedure

۳-۱- مدل شبیه‌سازی محدوده مطالعه

در هر تحلیلی که روی یک سامانه آبی صورت می‌گیرد برای بررسی و مدل‌سازی نتایج حاصل از تحلیل‌ها، باید یک مدل شبیه‌ساز حوضه نیز وجود داشته باشد. پس از شناسایی منطقه مورد مطالعه و جمع‌آوری اطلاعات و داده‌های مورد نیاز، مدل شبیه‌سازی حوضه آبریز به منظور مدل‌سازی تمامی منابع آب موجود در منطقه تدوین می‌شود تا توانایی پیش‌بینی وضعیت منابع آب موجود در طول دوره شبیه‌سازی را داشته باشد. یکی از مدل‌های پرکاربرد شبیه‌سازی آبخوان مدل MODFLOW است که بر پایه‌ی معادله حرکت آب در محیط متخلخل توسعه یافته توسعه یافته است. در پژوهش حاضر به منظور تهیه‌ی مدل ریاضی کمی و کیفی آبخوان دشت کرج از بسته نرم‌افزار GMS 7.1 استفاده شده است. در ابتدا آمار و اطلاعات مورد نیاز جهت تهیه مدل مفهومی این دشت از جمله آمار و اطلاعات هواشناسی، هیدرولوژی و هیدروژئولوژی جمع‌آوری و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته، سپس با استفاده از بسته‌ی MODFLOW موجود در این نرم‌افزار، عملیات مدل‌سازی آبخوان انجام گرفته است.

۳-۲- مدل بهینه‌سازی: الگوریتم ژنتیک چندهدفه NSGA-II -

با توجه به رویکرد این پژوهش در انجام بهینه‌سازی چند هدفه، سه تابع هدف که در ارتباط با تامین آب شرب و صنعت، بهبود اقتصاد کشاورزی و بهبود وضعیت آبخوان است، در مدل‌سازی مورد استفاده قرار گرفتند. اولین تابع هدف (Z1) مربوط کمینه‌سازی اختلاف بین

میزان نیاز و تخصیص آب شرب و صنعت می‌باشد. در حقیقت این تابع وظیفه تامین آب شرب و صنعت را بر عهده دارد. تابع هدف دوم (Z2) در ارتباط با بهبود وضعیت اقتصادی کشاورزی برای بهره برداران این بخش تدوین شده است. بخشی از جمعیت حوضه به خصوص اکثر ساکنین بخش جنوبی منطقه مطالعاتی مشغول فعالیت‌های کشاورزی هستند و تامین سود برای آن‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است. لذا تابع هدف دوم به بیشینه‌سازی سود کشاورزان می‌پردازد. تابع هدف سوم (Z3) با هدف تامین پایداری سیستم به بهبود وضعیت محیط زیست و آبخوان می‌پردازد. این تابع هدف تلاش دارد تا وضعیت آبخوان به گونه‌ای حفظ شود تا امکان بهره‌برداری از آن در درازمدت و برای تمامی ذی‌نفعان فراهم باشد. توابع هدف بدین صورت می‌باشد:

$$Z_1 = \min(D_{u,d} - Xs_{u,d}) \quad (۱)$$

$$Z_2 = \max(A * \sum_{i=1}^{n} \alpha_i \times y_i \times B_i) \quad (۲)$$

$$Z_3 = \min(V_{g85} - 0.8\sum_{i=1}^{n}(\beta_i \times ET_i \times S_y \times A_i) - 0.2Xs_{u,d}) \quad (۳)$$

در تابع هدف دوم میزان عملکرد با توجه به راندمان توزیع آب در مزرعه و ضریب حساسیت گیاهی (K_i) به صورت رابطه ۴ محاسبه می‌شود [۱۸]:

$$y_i = y_{i\max} * (1 - \sum_{i=1}^{n} k_i \times (1 - \frac{W_i}{ET_i}) \quad (۴)$$

مشخصات مدل ریاضی تدوین شده برای مسئله مانند اندیس‌ها، ازین قرار است:

a : اندیس مرتبط با واحد کشاورزی، u : اندیس مرتبط با واحد شهری، i : اندیس مرتبط با نوع محصول کشاورزی، s : اندیس مرتبط با میزان تخصیص آب،D : پارامتر مرتبط با نیاز آبی، $Xs_{u,d}$: متغیر تصمیم تخصیص آب شهر و صنعت، α_i : متغیر تصمیم درصد کشت هر محصول، β_i : متغیر تصمیم تخصیص آب هر محصول، $D_{u,d}$: میزان نیاز شرب و صنعت با واحد مترمکعب در ماه، D_a: میزان نیاز کشاورزی با واحد مترمکعب در ماه، V_{g85}: حجم آبخوان در فروردین ۸۵ با واحد متر مکعب، Ai : سطح زیر کشت هرمحصول، A : مجموع سطح زیر کشت محصولات کشاورزی و باغی، Bi : میزان سود هر محصول، y_i : عملکرد هر محصول، y_{imax} : عملکرد حداکثری هر محصول، k_i : ضریب حساسیت گیاه برای هر محصول، ET_i : نیاز آبی هر محصول با استفاده از مدل گیاهی *Cropwat*، s_y : ضریب آبدهی ویژه آبخوان.

باید تاکید شود که رابطه بین سود حاصل از آب مصرفی و میزان تخصیص آب همواره به صورت خطی نیست. به عبارت دیگر برای تمامی دامنه تخصیص آب، میزان سود آب عدد ثابتی نمی‌باشد و بر اساس نوع گیاه و مراحل رشد و نمو آن متفاوت خواهد بود. در دوره‌هایی که گیاهان دچار تنش‌های آبی هستند و کمیت و کیفیت محصول تحت تاثیر آن قرار می‌گیرد، کشاورزان حاضر به پرداخت آب بهای بالاتری نسبت به دیگر مواقع می‌باشند لذا سود آب به بیشترین مقدار خود می‌رسد لذا در این مطالعه با توجه به تقاضای بالای آب بین کاربران شهری، صنعتی و زراعی، سعی بر آن است که تخصیص آب به صورت بهینه انجام پذیرد. محدودیت‌ها و دامنه متغیرهای موجود در در مدل تدوین شده به صورت زیر می‌باشند:

نیاز و تخصیص:

$$Xs_{u,d} \le D_{u,d} \quad Xs_{u,d} \ge 0$$

درصد کشت:

$$0.9\sigma_i \le \alpha_i \le 1.1\sigma_i \text{ ----- } for_i = 1,...,4$$
$$\partial i \le \alpha_i \le 1.2\partial_i \text{ ----- } for_i = 5,6 \quad \sum_{i=1}^{n}\alpha_i = 1$$
$$A = \sum_{i=1}^{n} Ai$$

میزان مصرف:

$$\varphi_i \le \beta_i \le y_{imax}$$

∂_i : درصد کشت فعلی هر محصول زراعی، σ_i : درصد کشت هر محصول باغی و φ_i : متغیر تصمیم برای تخصیص آب فعلی هر محصول می‌باشد. محدودیت تعریف شده در رابطه ۱ به جهت برقراری تعادل بین میزان تخصیص و نیاز آبی در کاربری‌های شهری و صنعتی است. رابطه ۲ تعیین محدوده درصد کشت محصولات باغی و

کشاورزی در کاربری زراعی را نشان داده و رابطه ۳ نیز محدوده مجاز تخصیص آب در کاربری‌های گوناگون را نشان می‌دهد.

نتایج اجرای مدل بهینه سازی بهره برداری در منطقه مورد مطالعه، تحت عنوان ۷ سناریوی برتر تدوین شد. نتایج تخصیص آب مدل بهینه‌سازی مدل اجرا شده برای حالت کمترین میزان آب تخصیصی MWS[1] به همراه بیشترین سود بخش کشاورزی MBP[2] برای منطقه مورد مطالعه تحلیل شد. در نهایت از طریق نتایج مدل منتخب به کار گرفته شده، به مقادیر بهینه تخصیص دست یافته شد. با توجه به این مقادیر، سیاست‌ها و دستورالعمل‌های بهره‌برداری برای هر بخش قابل تدوین است.

۳-۳- مدل‌سازی

همانطور که در قبل نیز گفته شد، به منظور ساخت مدلی جامع برای یافتن راهکارهای مناسب تخصیص بهینه منابع آب موجود در هر منطقه، باید مدلی برای شبیه‌سازی منابع آب موجود تهیه شود. شهرستان کرج یکی از متراکم‌ترین مراکز جمعیتی کشور به شمار می‌آید که بیشتر منبع تأمین کننده آب شرب آن (حدود ۹۰٪) از منابع آب زیرزمینی تأمین می‌گردد. با توجه به اینکه تنها منبع آب سطحی محدوده مطالعه بخش کوچک انتهایی رودخانه کرج می‌باشد و این قسمت از رودخانه که درون محدوده مطالعه قرار گرفته است، به طور معمول در تمام طول سال تقریباً خشک می‌باشد و اینکه از طرف دیگر آب زیرزمینی یک منبع آب پنهان بوده و کنترل کمی و کیفی آن مشکل و تأثیرپذیری آن در مقابل آلودگی معمولاً سریع و آشکار نیست، جهت بررسی وضع موجود منابع آب منطقه و تغییرات آن در سال‌های آتی، از شبیه‌سازی آبخوان استفاده گردیده است.

مدل شبیه‌سازی غیرماندگار کمی و کیفی، برای یک دوره ۶ ساله (۱۳۸۵ الی ۱۳۹۰) اجرا و عملیات واسنجی و صحت سنجی بر روی آن انجام گرفته است. با توجه به اینکه سال آبی ۸۹-۹۰ دقیق‌ترین و کامل‌ترین داده‌های پیزومتری را دارا بوده است، به عنوان سال مبنا برای مدل‌سازی شرایط ماندگار و کالیبراسیون آن در نظر گرفته شده است. برای مدل‌سازی شرایط غیرماندگار نیز از دوره ۶ ساله ۹۰-۱۳۸۵ استفاده گردیده است. شبکه سلولی مورد استفاده برای مدل‌سازی نیز به صورت شبکه‌ای متشکل از ۱۰۰×۱۰۰ سلول در نظر گرفته شده که شامل ۱۰۰۰۰ سلول محاسباتی می‌باشد. از این میان، تعداد سلول‌های فعال در مدل‌سازی برابر ۵۰۵۶ و تعداد سلول‌های غیر فعال برابر ۴۹۴۴ سلول می‌باشد. شبکه‌بندی استفاده شده برای مدل‌سازی آبخوان دارای سلول‌هائی با ابعاد ۲۲۲/۷ در ۱۸۵ متر می‌باشد. همچنین کالیبراسیون پارامتر تغذیه از سطح نیز با استفاده از کد رایانه‌ای PEST به صورت همزمان با هدایت هیدرولیکی انجام شد. برای این کار، ناحیه‌های تغذیه از سطح بر اساس نتایج کالیبراسیون دستی مقدار دهی اولیه شده و سپس با استفاده از این کد رایانه‌ای مقادیر بهینه این پارامتر برای کالیبره نمودن مدل عددی مشخص شد.

بر اساس نتایج، بیشترین مقدار تغذیه از سطح مربوط به مناطق رجایی شهر و کرج مرکزی در نواحی شهری می‌باشد. این نواحی مراکز پر جمعیت شهری را تشکیل داده‌اند و میزان تغذیه در آن به بیش از ۴/۵ میلی‌متر در روز می‌رسد. همچنین کمترین میزان تغذیه در منطقه مشکین آباد قرار دارد که میزان تغذیه در این محدوده حدود ۰/۳ میلی‌متر در روز است.

جهت تدوین مدل بهینه‌سازی، اولویت مصارف مناطق تحت بررسی از نظر تامین نیازهای آبی ضمن لحاظ محدودیت‌های حاکم بر برداشت منابع آب، به ترتیب برای تامین نیازهای شرب، صنعت و تامین سود کشاورزان در نظر گرفته شد. بر همین اساس توابع هدف با توجه به حداکثر تخصیص (۱۰۰ درصد) به بخش شرب و صنعت و حداکثر تخصیص ۸۰ درصد برای بخش کشاورزی تدوین گردید. اما باید این نکته را مد نظر داشت که هیچ یک از توابع هدف مستقیما به فرد مربوط نمی‌شود لیکن تامین رضایت و نیازهای ذی‌نفعان در چهار گروه کاربران شهری، صنعتی، کشاورزی و همچنین تامین پایداری آبخوان مورد نظر بوده است. به عنوان مثال حداقل‌سازی میزان کمبود آب آبخوان نشان می‌دهد باید میزان برداشت توسط دیگر ذی‌نفعان به گونه‌ای تنظیم شود که پایداری سیستم آب زیرزمینی منطقه تا حد قابل قبولی وجود داشته باشد. در این شرایط مدل به نحوی متمایل به کاهش برداشت‌ها می‌شود و در مقابل دیگر توابع هدف مدل را به سوی برداشت آب تا حد تامین نیازها و برآورده شدن سود اقتصادی پیش می‌برند.

حل مجموعه توابع هدف در کنار هم سیاست برداشت بهینه را مشخص خواهد نمود. برای این منظور مدل بهینه‌سازی چند هدفه

1 Minimum Water Supply
2 Maximum Basin Profit

جدول ۱. مقدار توابع بهینهسازی در سناریوهای هفتگانه

Table 1. Values of objective functions in ۷ scenarios

کد سناریو	Z1 (مترمکعب در ماه)	Z2 (ریال)	Z3 (مترمکعب)
۱	۱،۷۹۴	-۲۰۰،۳۳۱،۶۴۶	۲۱۵،۲۱۹،۷۳۲
۲	۱،۰۴۶	-۲۲۸،۶۶۴،۰۴۴	۲۱۵،۲۱۹،۷۳۸
۳	۶۲،۴۱۰	-۳۷۴،۲۱۷،۱۷۹	۲۱۵،۲۱۹،۷۳۹
۴	۳۴،۸۴۱	-۳۳۲،۳۴۰،۰۰۶	۲۱۵،۲۱۹،۷۴۰
۵	۳۹۳,۱۵۰	-۴۲۶،۳۲۷،۹۶۴	۲۱۵،۲۱۹،۸۰۶
۶	۷۴,۵۸۴	-۴۱۳،۴۴۳،۸۸۷	۲۱۵،۲۱۹،۷۴۱
۷	۳۰,۳۷۳	-۲۷۶،۲۶۳،۷۵۰	۲۱۵،۲۱۹،۷۳۷

جدول ۲. نتایج اجرای مدل بهینهسازی و میزان سود کشاورزی در سناریوهای هفتگانه

Table 2. Optimization model results & Agricultural profit in 7 scenarios

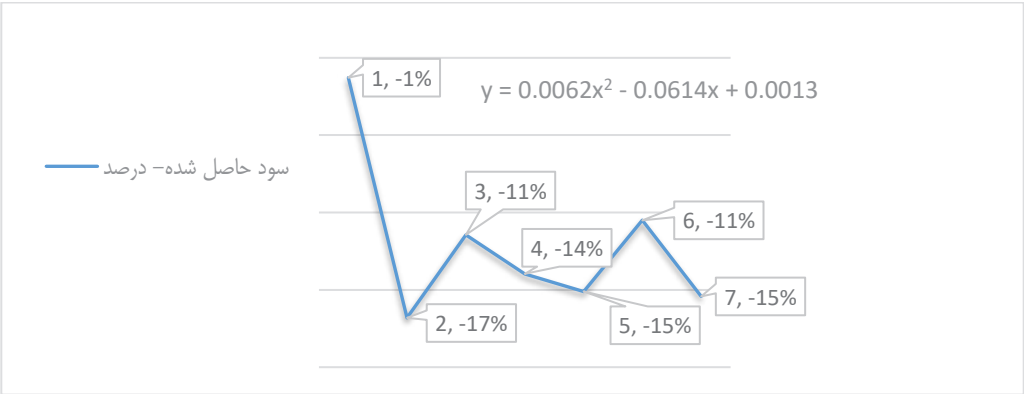
شماره سناریو	آب تخصیصی کشاورزی	آب تخصیصی شرب و صنعت	آب تخصیصی آبخوان	صرفهجویی در مصرف آب	سود کشاورزی
۱	٪۷۹	٪۱۵	٪۷	٪۰/۷	٪-۱
۲	٪۶۹	٪۲۵	٪۵	٪۶/۱	٪-۱۷
۳	٪۷۱	٪۲۳	٪۶	٪۵/۴	٪-۱۱
۴	٪۷۰	٪۲۴	٪۶	٪۶/۰	٪-۱۴
۵	٪۷۲	٪۸	٪۲۰	٪۳/۲	٪-۱۵
۶	٪۷۲	٪۲۲	٪۶	٪۴/۸	٪-۱۱
۷	٪۶۹	٪۲۴	٪۷	٪۷/۴	٪-۱۵

توسعه داده میشود. نتایج اجرای مدل در حالتهای مختلف برداشت از منابع آب در دسترس، سناریوهای بهبود را نشان میدهد. به کارگیری این نوع مدلسازی برای حل مسائل تلفیق منابع آب تجربیات موفقی داشته است. به عنوان مثال برای مدیریت آب شهری [۲۱-۱۹]، تخصیص منابع آب [۲۲] ، تعیین سیاستهای بهینه برداشت مخزن [۲۳] و مدیریت منابع آب [۲۴] به کار گرفته شده است.

این روش راهحلهایی نزدیک به راهحل ایدهال را مشخص میکند. راهحل ایدهال، راهحلی است که برای هر یک از اهداف مشخص شده، یک ارزش ایدهال را تامین میکند که در نگاه اول برای یک مدل چند هدفه ناممکن به نظر میرسد. در فضای توابع هدف راهحلی که با کمترین فاصله نسبت به راه حل ایدهال وجود داشته باشد انتخاب میشود. زمانی که توابع هدف با واحدهای مختلف اندازهگیری شده باشند، از یکی از توابع برای مقیاسبندی استفاده میشود [۱۹]. در این مطالعه از روش برنامه ریزی فاصله ای برای مقیاس بندی پارامترهای بهینه سازی به صورت رابطه ۵ استفاده شده است.

$$Minimize\ D_p(x)=\left[\sum_{b=1}^{n_b} w_b^p\left(\frac{z_b^*-z_b(x)}{z_b^*-z_b^{**}}\right)^p\right]^{1/p} \qquad (۵)$$

در این رابطه b یک شاخص برای تابع هدف است؛ n_b تعداد توابع هدف است، D فاصله تا نقطه ایدهآل است؛ P مقدار فاصله است که میتواند برابر با ۱، ۲ و ∞ باشد. W وزن یک تابع هدف خاص است ؛ Zb^* بهترین ارزش برای تابع هدف b است، Zb^{**} بدترین



شکل ۳. میزان سود حاصل از بهینه سازی در سناریوهای هفت‌گانه

Fig. 3. Percentage of profit obtained by optimization model in 7 scenarios

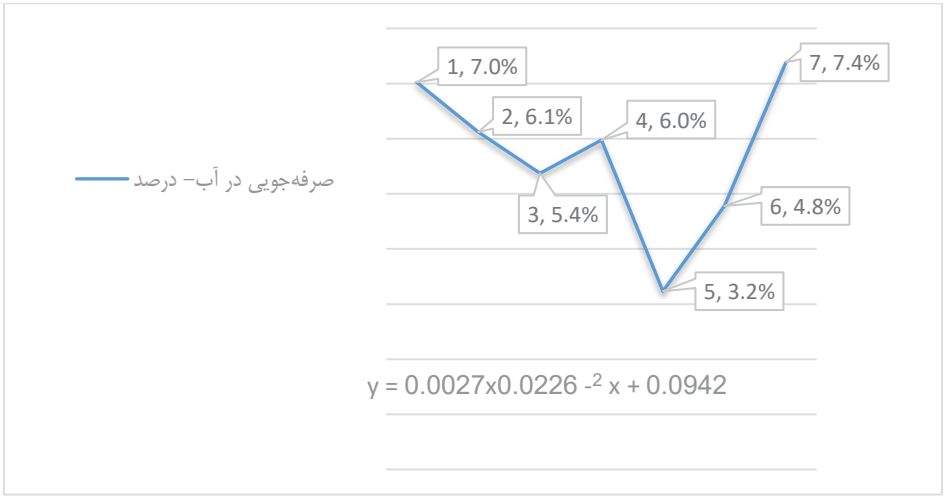
مقدار برای تابع هدف b است؛ و Zb (x) ارزش تابع هدف b برای راه حل x است. باید در نظر گرفته شود که مقادیر wpb (وزن تابع هدف b) نشان دهنده‌ی ترجیح تصمیم گیرندگان در مورد اهمیت معیارها می‌باشد. همچنین پارامتر p اهمیت بیشترین انحرافات را از مقدار بهینه (نقطه ایده آل) نشان می‌دهد. میزان بالای دامنه تغییرات پارامتر p به محققین این اجازه را می‌دهد که در فرآیند تصمیم‌سازی، میزان انحراف را به حداقل نزدیک کنند.

۴- نتایج و بحث

نتایج اجرای مدل بهینه سازی بهره برداری در منطقه مورد مطالعه، تحت عنوان ۷ سناریوی برتر در این قسمت آورده شده است. با توجه به این مقادیر، سیاست‌ها و دستورالعمل‌های بهره‌برداری برای هر بخش تدوین گردید. جدول ۱ نتایج اجرای مدل برای هر یک از سناریوها بر اساس توابع هدف را نشان می‌دهد.

با توجه به جدول ۱ برای دستیابی به تابع هدف اول ($Z1$) که به منظور حداقل سازی کمبود آب تخصیصی به بخش شرب بوده است، در سناریوی اول و دوم با اختلاف ناچیز، حداقل کمبود آب وجود داشته و در سناریوی پنج، حداکثر کمبود به وجود آمده است. در تابع هدف دوم ($Z2$) بیشینه‌سازی سود بخش کشاورزی مدنظر می‌باشد و طبق نتایج به دست آمده، سناریوی یک بیشترین سود و سناریوی پنج کمترین سود را نشان می‌دهد. تابع هدف سوم ($Z3$) نیز مربوط به بهبود وضعیت محیط زیست و آبخوان است. در این تابع هدف حداقل‌سازی کاهش حجم آبخوان مورد نظر است که نتایج سناریوها روند ثابتی را در میزان تخصیص‌های بهینه شده نشان می‌دهد. همچنین لازم به ذکر است نتایج به دست آمده از مدل‌سازی منجر به تعیین درصد و مقدار آب اختصاص یافته به انواع کشت، میزان آب تخصیصی به ذی‌نفعان و افزایش یا کاهش سود برای هر یک از اجراهای مدل شده است. جدول ۲، طرح‌های بهینه تخصیص آب مرتبط با برآورده شدن توابع هدف در هفت سناریو را نشان می‌دهد. همان گونه که مشخص است سناریوهای مختلف، میزان سود و تخصیص آب یکسانی را نشان نمی‌دهند. به عنوان مثال بالاترین سود حاصل از توابع هدف مربوط به سناریوی اول مدل‌سازی (۱/۲۸ درصد افزایش در هزینه‌ها) و کمترین سود به نتیجه دوم مدل (۱۶/۸۱ درصد) مربوط می‌باشد. اما نتایج مدل در موضوع آب تخصیصی نشان می‌دهد بیشترین میزان آب تخصیصی کشاورزی به سناریوی اول، شرب به سناریوهای اول و دوم، و تخصیص آب به محیط زیست، به همه سناریوها مربوط است. نکته لازم به ذکر آن است که سناریوی دوم با وجود بالاترین نرخ تخصیص آب به شرب، اما در تامین حاشیه مطمئن سود بخش کشاورزی که یکی از شروط اولیه مسئله بوده است، موفق عمل ننموده که این موضوع تبعات سنگین اجتماعی را در پی خواهد داشت. لذا این سناریو نمی‌تواند منتخب مدل‌سازی باشد.

نهایتا و پس از بررسی‌های مقایسه‌ای به عمل آمده و همچنین اجرای روش حداقل فاصله میان مقدار توابع، بهترین حالت سناریوی اول می‌باشد که در آن تحقق ۹۹/۶۹٪ آب شرب وجود دارد و در عین



شکل ۴. میزان صرفه‌جویی در آب تخصیص یافته در محدوده مورد مطالعه در سناریوهای هفت‌گانه

Fig. 4. Percentage of water allocation savings in the study area in 7 scenarios

جدول ۳. الگوی کشت و مقادیر تخصیص آب پیشنهادی توسط مدل بهینه‌سازی

Table 3. Proposed cropping pattern and water allocation obtained by optimization model

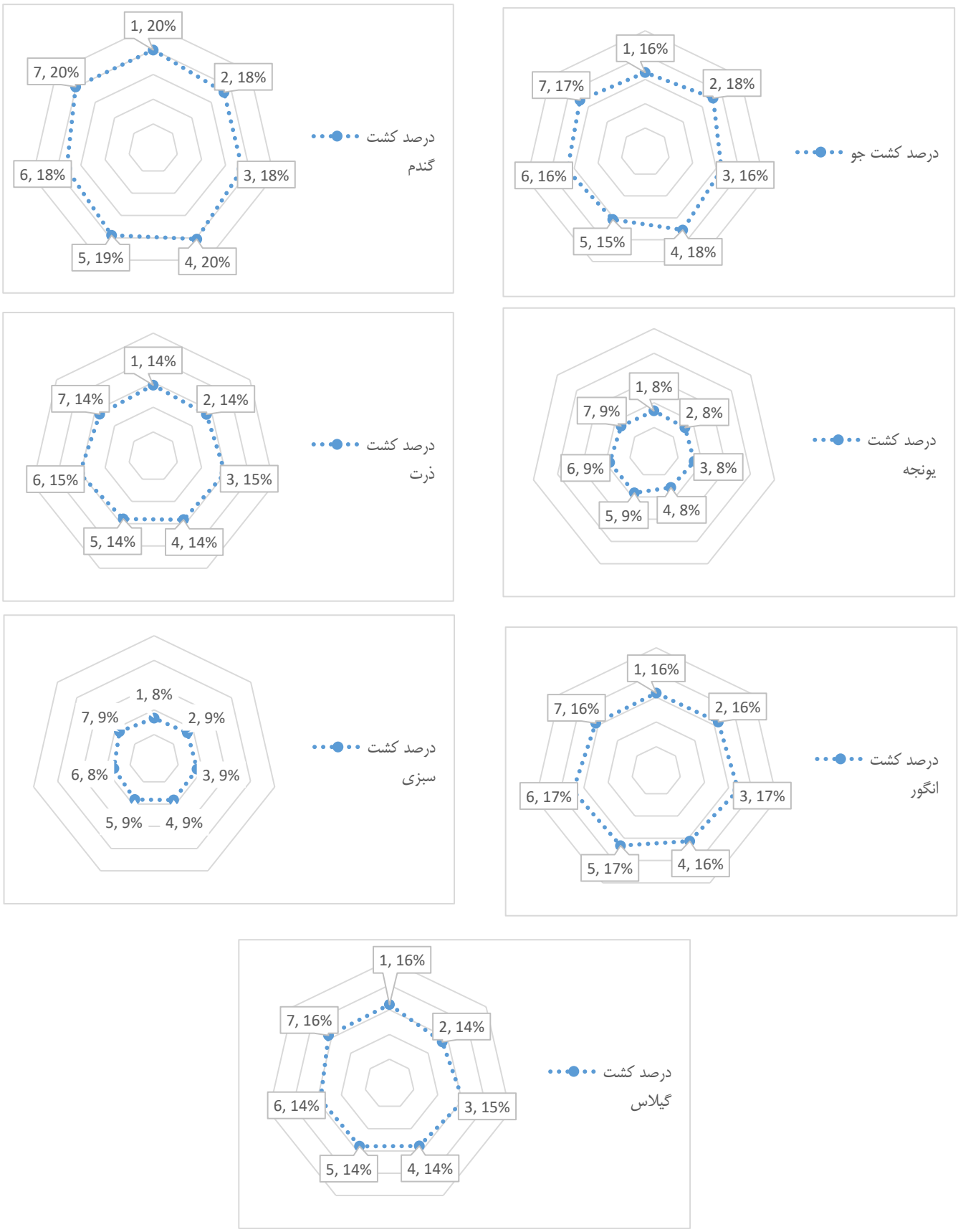
ردیف	تخصیص آب گیلاس	تخصیص آب انگور	تخصیص آب سبزی	تخصیص آب ذرت	تخصیص آب یونجه	تخصیص آب جو	تخصیص آب گندم	درصد کشت گیلاس	درصد کشت انگور	درصد کشت سبزی	درصد کشت ذرت	درصد کشت یونجه	درصد کشت جو	درصد کشت گندم
۱	۹۸٪	۹۶٪	۹۲٪	۸۸٪	۹۷٪	۸۹٪	۸۱٪	۱۶٪	۱۶٪	۸٪	۱۴٪	۸٪	۱۶٪	۲۰٪
۲	۹۹٪	۹۴٪	۸۷٪	۹۱٪	۱۰۰٪	۸۱٪	۹۳٪	۱۴٪	۱۶٪	۹٪	۱۴٪	۸٪	۱۸٪	۱۸٪
۳	۹۵٪	۹۳٪	۸۴٪	۹۹٪	۹۶٪	۹۷٪	۹۹٪	۱۵٪	۱۷٪	۹٪	۱۵٪	۸٪	۱۶٪	۱۸٪
۴	۹۴٪	۹۵٪	۹۹٪	۹۰٪	۹۲٪	۹۷٪	۹۵٪	۱۴٪	۱۶٪	۹٪	۱۴٪	۸٪	۱۸٪	۲۰٪
۵	۹۸٪	۹۷٪	۹۶٪	۹۴٪	۹۸٪	۹۹٪	۹۴٪	۱۴٪	۱۷٪	۹٪	۱۴٪	۹٪	۱۵٪	۱۹٪
۶	۹۸٪	۹۶٪	۹۷٪	۹۸٪	۸۸٪	۹۷٪	۹۹٪	۱۴٪	۱۷٪	۸٪	۱۵٪	۹٪	۱۶٪	۱۸٪
۷	۹۲٪	۸۸٪	۹۵٪	۹۱٪	۹۳٪	۹۹٪	۹۲٪	۱۶٪	۱۶٪	۹٪	۱۴٪	۹٪	۱۷٪	۲۰٪

حال با تغییر ایجاد شده در الگوی کشت، به میزان ۳/۰۳ میلیون متر مکعب آب به صورت سالانه به آبخوان اختصاص می‌یابد. به عبارت دیگر این نتیجه ضمن اینکه برداشت آب از آبخوان را کاهش داده است، بیشترین میزان تامین آب شرب و صنعت در میان سایر اجراهای مدل را داراست.

۴-۱-سناریوی منتخب

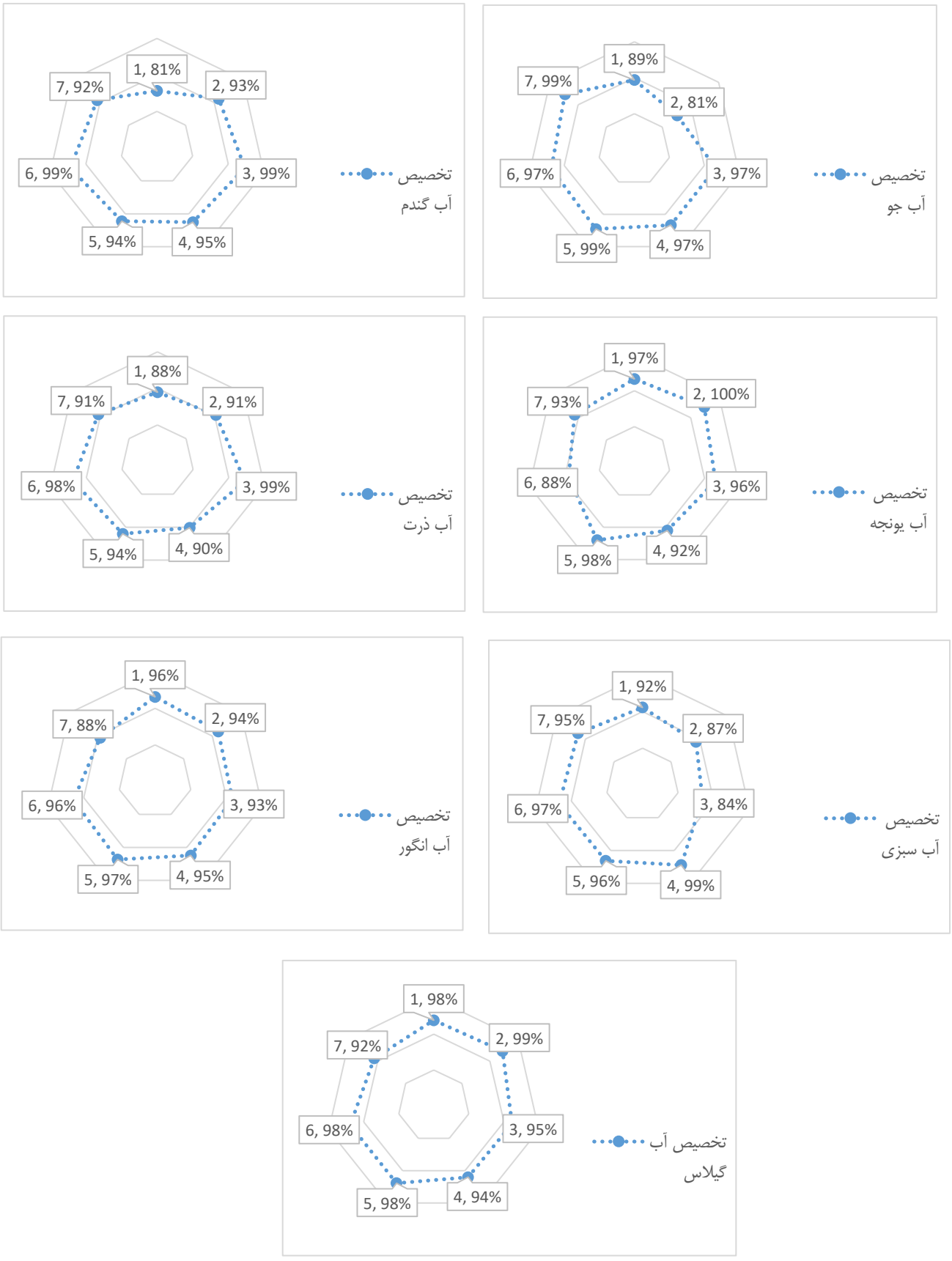
همانطور که در قبل نیز بیان شد، سناریوی منتخب (ردیف اول) به میزان ۷ درصد از کل نیازهای آبی در محدوده مطالعه را صرفه‌جویی نموده و بالطبع به همین میزان به ذخائر آب زیرزمینی می‌افزاید. با توجه به اینکه تحقق نیازهای آبی محدوده مطالعه به طور قابل توجهی متکی بر منابع آب زیرزمینی می‌باشد، این میزان صرفه‌جویی نه تنها از افت بیشتر در آبخوان جلوگیـــری می‌کند بلکه در مدت کمتر از ده سال باعث بهبود وضعیت آبخوان و نیل به سمت پایداری سیستم نیز خواهد شد. به عبارت دیگر در حالی که در وضعیت فعلی ۸۴٪ آب مصرفی در حوضه به کشاورزی و باغداری اختصاص می‌یابد، با اجرای نتایج مدل بهینه‌سازی، این میزان به ۷۹٪ تقلیل یافته و ۷٪ از این مقدار به آبخوان و احیای نیازهای محیط زیستی محدوده مطالعه اختصاص می‌یابد.

محاسبات میزان تامین آب محیط زیست که در سناریوهای مختلف به دست آمده است نیز در جدول ۲ قرار دارد. این نتایج نشان می‌دهد که دیگر سناریوهای مدل نمی‌توانند به طور مناسب نیازهای



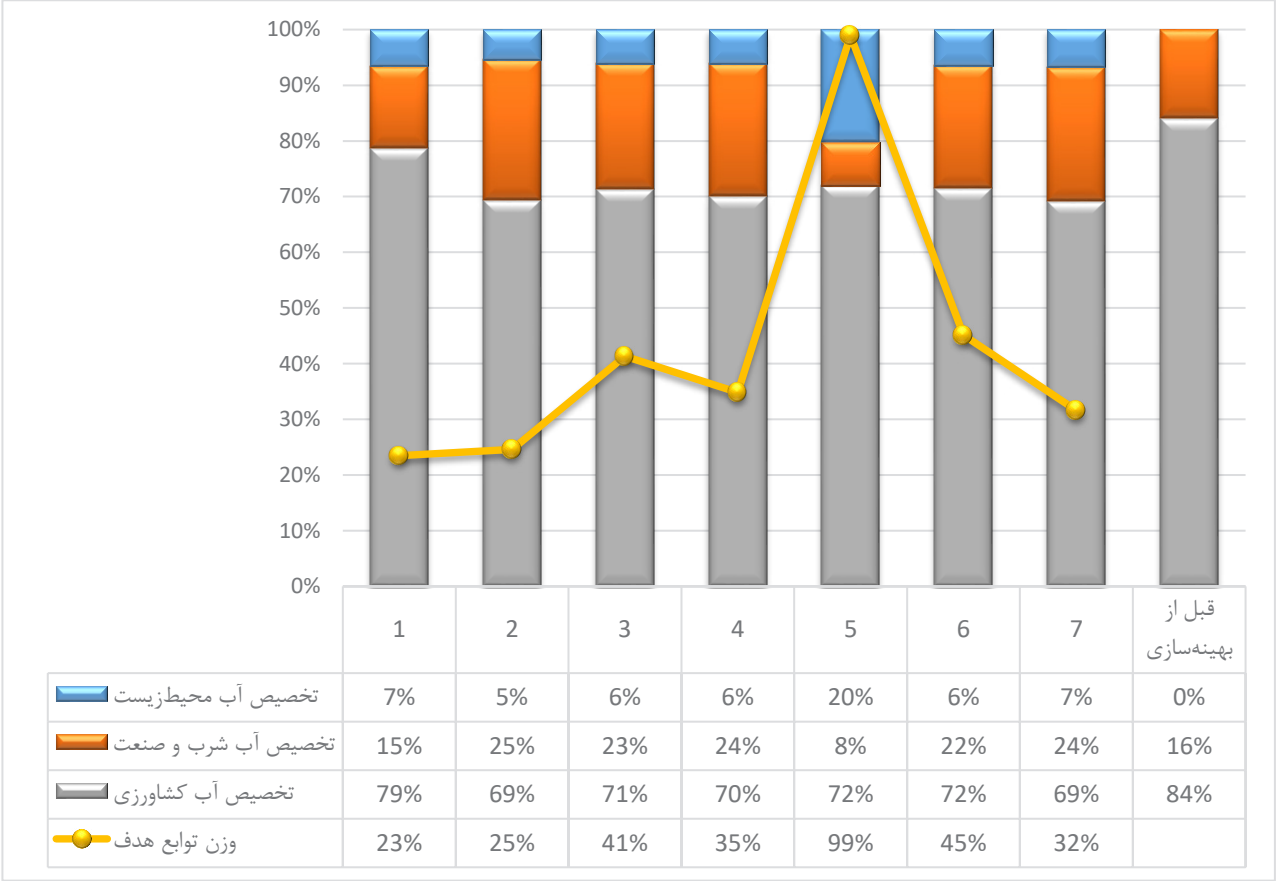
شکل ۵. درصد کشت محصولات در محدوده مطالعه

Fig. 5. Percentage of cultivated area in the study area



شکل ۶. مقادیر تخصیص آب در محدوده مطالعه

Fig. 6. Optimized water allocation in the study area



	1	2	3	4	5	6	7	قبل از بهینه‌سازی
تخصیص آب محیط‌زیست	7%	5%	6%	6%	20%	6%	7%	0%
تخصیص آب شرب و صنعت	15%	25%	23%	24%	8%	22%	24%	16%
تخصیص آب کشاورزی	79%	69%	71%	70%	72%	72%	69%	84%
وزن توابع هدف	23%	25%	41%	35%	99%	45%	32%	

شکل ۷. آب تخصیصی به ذی‌نفعان

Fig. 7. Allocation of water to stakeholders

محیط زیستی را در کنار تامین مناسبی برای نیاز آب شرب و صنعت و همچنین دستیابی به سود اقتصادی برآورده سازند و تنها سناریوی منتخب است که در کنار تامین ۹۹/۶۹ درصدی نیاز شرب منطقه، تامین آب برای منابع آب زیرزمینی را نیز دارا می‌باشد. مجموع این نکات بیانگر آن است که تحقق نیازهای آب زیرزمینی در این حالت با وضعیت موجود حوضه تفاوت زیادی پیدا خواهد کرد. در این اجرای از مدل، بیشترین میزان تامین آب برای مصارف شرب و صنعت در محدوده مطالعه وجود دارد و یک دلیل مهم برای منتخب شدن این سری از نتایج، همین خصوصیت موجود در این سناریو است.

شکل ۳ میزان سود حاصل از مدل‌سازی را به درصد نشان می‌دهد. در این شکل نتایج مدل‌سازی انجام شده به ترتیب نتایج مختلف جبهه پارتو[1] آمده است. تولید بهترین دسته جواب‌های ممکن یعنی نقاطی که توسط هیچکدام از دیگر جواب‌ها مغلوب نشده‌اند، با نام جبهه پارتو خوانده می‌شود که یکی از خصوصیات الگوریتم ژنتیک چند هدفه است.

در این مطالعه به منظور تعیین سناریوی منتخب، از دو رویکرد حداکثرسازی سود اقتصادی و صرفه جویی در برداشت از آب زیرزمینی برای مصارف تعریف شده در منطقه مورد مطالعه که منجر به بهبود وضعیت محیط زیست می‌شود، استفاده شد. بر این اساس مطابق شکل ۳، بیشترین سود اقتصادی مربوط به سناریوی شماره ۱ به میزان یک درصد تغییر در هزینه‌ها می باشد. همچنین بیشترین میزان صرفه جویی در برداشت از آب زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه مربوط به سناریوهای اول، دوم، چهارم و هفتم بوده و این سناریوها باعث تخصیص بیشتر آب به محیط زیست می‌شوند، اما همانطور که قبلا نیز عنوان گردید علاوه بر تامین آب برای مصارف

1 Pareto Front

شرب منطقه، بهبود محیط زیست در قالب تخصیص آب به آبخوان، تنها در سناریوی اول محقق می‌شود.

تلفیق این دو رویکرد بخصوص در سناریوی پنجم نشان می دهد که میزان سود در حوضه با مقدار صرفه‌جویی در آب نسبت عکس دارد، به عبارت دیگر هر چه آب بیشتری به محیط زیست اختصاص یابد، سود مالی حاصله کمتر می‌شود و این امر که نیاز محیط زیستی در محدوده مطالعه با توجه به کمبود شدید آب زیرزمینی از اهمیت بسیار زیادی برخوردار بوده و برای توسعه پایدار منطقه نقش حیاتی را داراست، هر مقدار تخصیص آب به محیط زیست را توجیه نموده و چشم پوشی از مقادیر اندک را نیز ناممکن می‌نماید. شکل‌های ۵ و ۶ و جدول ۳، نتایج مدل‌سازی انجام شده را در خصوص الگوی کشت پیشنهادی و تخصیص آب به کاربران کشت و زرع را نشان می‌دهد. شکل ۷ سناریوهای منتج از مدل بهینه‌سازی را از لحاظ عرضه آب به ذی‌نفعان نشان می‌دهد. طبق این نمودار می‌توان ذی‌نفعان به دو دسته حساس و غیرحساس به توابع هدف، طبقه‌بندی نمود. در ذی‌نفعان غیرحساس (کشاورزی و باغداری) آب اختصاص داده شده با تغییر وزن توابع هدف، کمتر از ۱۰٪ نوسان می‌کند در حالی که نوسان بیش از ۱۰٪ برای ذی‌نفعان حساس دیده می‌شود (شرب، صنعت و آبخوان). نتیجه این مطلب آن است که درگیری‌های آب در حوضه عمدتا بین ذی‌نفعان حساس و غیر حساس روی می‌دهد. به این معنا که در این منطقه عمده اختلافات بر سر منابع آب بین کشاورزان و بهره‌برداران آب شرب روی می‌دهد. همچنین این نتایج نشان می‌دهد که حساسیت ذی‌نفعان بهره‌مند از آب شرب به وزن توابع هدف، بیشتر از سایر ذی‌نفعان است. همچنین همانطور که در جدول مندرج در ذیل شکل ۷ نشان داده شده است، تامین منابع آب زیرزمینی نقش مهمی در تامین آب شرب داشته است در حالی که برای سایر ذی‌نفعان این وابستگی به چشم نمی‌خورد.

نکته مهم در اینجا آن است که نتیجه مدل بهینه‌سازی بر اساس وزن‌های مختلف توابع هدف، باعث تعیین مجموعه‌های مختلفی از تخصیص آب برای ذی‌نفعان شده است و با استفاده از این نتایج، ذینفعان با توجه به وزن‌های مختلف توابع هدف، منافع یا مضرات مرتبط بر آن‌ها را متوجه خواهند شد و دسترسی به این مجموعه اطلاعات ایشان را در مذاکره موثر در مورد منافع خود با ذی‌نفعان دیگر کمک شایانی می‌نماید.

۵- نتیجه گیری

تدوین سیاست‌های کارآمد و پویای مدیریتی برای حل مسائل بهره برداری از منابع آب، یکی از معضلات برنامه‌ریزی در شرایط کمبود آب در ایران و جهان می‌باشد. در این راستا، این مقاله به تشریح مدل بهینه‌سازی تخصیص آب چند منظوره با سه تابع هدف پرداخت. توابع هدف عوامل اقتصادی، محیط زیستی و اجتماعی را مورد توجه قرار داد که برای دستیابی به یک برنامه‌ریزی تخصیص آب پایدار، بایستی در نظر گرفته شوند. مدل توسعه یافته در این تحقیق برای بخشی از حوضه آبریز تهران- کرج واقع در استان البرز در نظر گرفته شد که در این حوضه نه تنها تخصیص آب بین ذی‌نفعان مختلف دارای مناقشات زیادی است، بلکه به لحاظ محیط زیستی نیز این دشت صدمات بالایی را از بهره برداری نادرست از منابع آب تاکنون متحمل بوده است. این مشکل در تعداد زیادی از دشت‌های کشور به وجود آمده است و استفاده از متدولوژی به کار گرفته شده در این تحقیق می‌تواند در یافتن راه حل تخصیص آب به آبخوان در عین برآورده شدن نیاز شرب اهالی منطقه (خصوصا برای مناطق دارای جمعیت) کمک زیادی بنماید. مدل پیشنهادی حوضه آبریز دشت کرج برای تخصیص آب در این منطقه تدوین گردید و اهداف حداکثر رساندن سود حوضه، حداقل رساندن کمبود آب محیط زیست و تامین آب شرب منطقه، که بعضا با هم در تضاد نیز بودند، مورد بررسی قرار گرفتند.

برای حل این مسائل از روش برنامه‌سازی مقایسه‌ای استفاده شد و هفت مجموعه مختلف وزنی برای توابع هدف جهت تعیین میزان بهینه تخصیص آب مورد بررسی قرار گرفت. الگوهای تخصیص نتایج مدل برای تمامی وزن‌ها نشان داد که ذی‌نفعان می‌توانند به دو دسته و غیرحساس تقسیم شوند و در این میان کاربران کشت و زرع و باغداری به میزان قابل توجهی وابسته به وزن توابع هدف نبوده و کاربران شرب و محیط زیست وابستگی زیادی به وزن توابع هدف دارند. در نظر داشتن این نکات به دلیل اینکه تصمیم گیرندگان در ارتباط با ذی‌نفعان غیر حساس به دانستن وزن‌های توابع هدف نیازی ندارند، سودمند است. برای ارائه نتایج نهایی با توجه به مقایسه مقادیر تخصیص آب به ذی‌نفعان، یک دسته از وزن‌های توابع هدف انتخاب شد. متوسط آب تخصیص یافته به ذی‌نفعان با استفاده از این مجموعه وزن‌های توابع هدف به ترتیب ۱۵ و ۷۹ و ۷ درصد برای شرب،

کشاورزی و آب زیرزمینی می باشد. این مقادیر در قیاس با ۱۴ و ۸۶ و صفر درصد برای شرب، کشاورزی و آب زیرزمینی در وضعیت موجود منطقه مورد مطالعه قرار دارد. نکته قابل ذکر این است که این مقادیر در قیاس با ۱۴ و ۸۶ و صفر درصد برای شرب، کشاورزی و آب زیرزمینی در وضعیت موجود منطقه مورد مطالعه است و بدین طریق نه تنها به تامین آب شرب منطقه خللی وارد نمی‌شود، بلکه ضمن حفظ سود اقتصادی کشاورزان، کمبود آب محیط زیست و آبخوان نیز ظرف مدت کمتر از ده سال تامین می‌گردد. این نتایج برای دشت کرج که یکی از مهم‌ترین دشت‌های آسیب دیده کشور به لحاظ وضعیت آب‌های زیرزمینی است، بسیار قابل توجه می‌باشد.

مراجع

[1] Evans, W., Evans, R. and Holland, G. (2011). Conjunctive use and management of groundwater and surface water within existing irrigation commands: the need for a new focus on an old paradigm. A global framework for country action , GEF ID 3726.

[2] Heydari, F. Saghafian, B. Delavar, M. (2016). Coupled Quantity-Quality Simulation-Optimization Model for Conjunctive Surface-Groundwater Use. Water Resour Manage 30:4381–4397.

[3] Singh, A. (2014a). Groundwater resources management through the applications of simulation modeling: A review. Science of the Total Environment, In Press.

[4] Narula, K.K. and Gosain, A.K. (2013). Modeling hydrology, groundwater recharge and non-point nitrate loadings in the Himalayan Upper Yamuna basin. Science of the Total Environment, 468–469:102–116.

[5] Singh, A. (2014b). Simulation-optimization modelling for conjunctive water use management. Agricultural Water Management, 141:23-29.

[6] Akbarpour, A. Pourreza Bilondi, M. Zeynali, M. J. (2019). Compression of novel meta-heuristic algorithms for multi-objective optimization of water resources system (case study: Sistan's Chah Nimeh). Amirkabir Journal of Civil Engineering. DOI: 10.22060/CEEJ.2019.15818.6039. (In Persian)

[7] Valizadegan, E. Yazdanpanah, S. (2018). Quantitative Model of Optimal Conjunctive use of Mahabad Plain's Surface and Underground Water Resources. Amirkabir Journal of Civil Engineering. DOI: 10.22060/CEEJ.2017.12739.5266. (In Persian)

[8] Kourakos, G. Mantoglou, A. (2013). Development of a multi-objective optimization algorithm using surrogate models for coastal aquifer management. Journal of Hydrology, 479:13-23.

[9] Safavi, H.R. Esmikhani, M. (2013). Conjunctive use of surface water and groundwater: application of support vector machines (SVMs) and genetic algorithms. Water Resources Management, 27 (7):2623–2644.

[10] Perlata, R.C., Forghani, A. Fayad, H. (2014). Multiobjective genetice algorithm conjunctive use optimization for production, cost, and energy with dynamic return flow. Journal of Hydrology, 511:776-785.

[11] Mosavi, M. Seyed kaboli, H. (2019). Optimal operation of reservoirs with increasing water use efficiency: Climate change adaptation approach (case study: Jareh Dam). Amirkabir Journal of Civil Engineering. DOI: 10.22060/CEEJ.2019.16494.6252. (In Persian)

[12] Mahdavi, T. Hosseini, A. (2019). Aquifers Sustainability assessment by Integrated Groundwater Footprint Indicator Case Study: East Azerbaijan Province, Iran Water Resources Research, 15(4), 438-452.

[13] Grémont, M. Girard, C. Gauthey, J. Augeard, B. (2015). Contribution of hydro-economic models to water management in France. ONEMA. Knowledge for action series.20 Pages.

[14] Ossa-Moreno, J. McIntyre, N. Ali, S. Smart, J. Rivera. D. Lall, U. Keir, G. (2018). The Hydro-economics of Mining. Ecological Economics. Volume 145, Pages 368-379.

[15] Ziaei Jam, H. (2015). Modeling Groundwater Nitrate variation and its correlation with sewage system by GMS package- Case study: Karaj Aquifer. MSc. Thesis on civil Engineering, Faculty of water and environmental engineering, Shahid Beheshti University: 124 Pages. (In Persian)

[16] Regional Water Company of Tehran. (2013). "Studies on the updating water resources balance in Namake lake basin " Hydrology report II: 144 pages. (In Persian)

[17] Regional Water Company of Alborz. (2015). "Summary Report on Water Resources Status of Alborz Province." 12 pages. (In Persian)

[18] FAO, (2006). The new generation of watershed management programmes and projects, Rome, 137 pp.

[19] Abrishamchi, A., Ebrahimian, A., Tajrishi, M., Marino, M., (2005). Case study: application of multi-criteria decision making to urban water supply. J. Water Resour. Plan. Manag. 131 (4), 326e335.

[20] Zarghami, M., Abrishamchi, A., Ardakanian, R. (2008). Multi-criteria decision making for integrated urban water management. Water Resour. Manag. 22 (8), 1017e1029.

[21] Fattahi, P., Fayyaz, S.,)2010(. A compromise programming model to integrated urban water management. Water Resour. Manag. 24 (6), 1211e1227.

[22] Read, L., Madani, K., Inanloo, B., (2014). Optimality versus stability in water resource allocation. J. Environ. Manag. 133 (0), 343e354.

[23] Consoli, S., Matarazzo, B., Pappalardo, N.,)2008(. Operating rules of an irrigation purposes reservoir using multi-objective optimization. Water Resour. Manag. 22 (5), 551e564.

[24] Geng, G., Wardlaw, R., (2013). Application of multi-criterion decision making analysis to integrated water resources management. Water Resour. Manag. 27 (8), 3191e3207.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

A. Khajeem Moghadam, B. Saghafian, M. Najarchi, M. Delavar, Optimal water utilization policy with sustainable aquifer approach with simulation and decentralized optimization, Amirkabir J. Civil Eng., 53(10) (2022) 4397-4412.

DOI: 10.22060/ceej.2020.18345.6841