

## Evaluation of solutions to supply part of the environmental requirements of Lake Urmia using MODSIM and Analytic Hierarchy Process (AHP)

Seyed Morteza Mousavi<sup>1</sup> , Hossein Babazadeh<sup>2\*</sup> , Mahdi Sarai-Tabrizi<sup>3</sup> , Amir Khosrojerdi<sup>3</sup> 

<sup>1</sup> Ph.D. Student, Department of Water Science and Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

<sup>2</sup> Professor, Department of Water Science and Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

<sup>3</sup> Assistant Professor, Department of Water Science and Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

### Abstract

#### Introduction

As a result of droughts and human interventions, the Urmia Lake basin has faced increasing unallowable withdrawal of water resources and environmental requirements share. Over the past two decades, a series of natural and human factors have gradually changed the water balance of Lake Urmia. In addition, decreases in precipitation have been the main reason for the gap between water resources and increasing water consumption in the basin, especially in the agricultural sector. In order to deal with the Urmia Lake catastrophe, a working group was formed for the Urmia Lake restoration. The working group planned and proposed solutions to reach the ecological level of the lake in three stages within 10 years through in-basin water supply and inter-basin water transfer programs. The present research, while investigating the solutions for providing the environmental water requirement of Lake Urmia using the Analytic Hierarchy Process (AHP) method, changes in the water volume of Lake Urmia in the scenarios of water transfer from the surface flow of each entering river in the lake in the years of high intensity severe to mild drought, the implementation of the approvals of the national working group to restore Urmia Lake, including a 40% reduction in agricultural consumption from the sources of dams and other rivers without dams, releasing water from dams in non-agricultural seasons, transferring water from urban wastewater and finally transferring water between the Zab basin has quantitatively been evaluated using the MODSIM simulation model. This research will help to predict the amount of transferable water in drought, normal, and drought conditions and to plan the water accounting of the Urmia catchment.

#### Materials and Methods

The watershed of Lake Urmia, located in the northwest of Iran, with an area of 51,876 square kilometers, is one of the six main watersheds of the country, which is located between the provinces of West Azerbaijan, East Azerbaijan, and Kurdistan. In terms of its territorial location, the catchment area of the Zab Kochak river is in the western part of the international border with Iraq and in the catchment area of the Western Border River basin. A significant part of the Zab watershed (source of water transfer) is located outside the country and in Iraq. The route of water transfer between the basins of the Zab basin is from the place of two dams, Silweh and Kaniseeb, which after entering the Godarchai river will eventually enter the Urmia lake water body. The different solutions from the working group's approval have been selected for developing six scenarios. Then, the Scenarios have been evaluated by the MODSIM model and AHP analysis method. The scenarios are including reducing agricultural expenses from dams in operation, saving by reducing agricultural expenses from other rivers, transferring water between basins, transferring effluent to Lake Urmia, releasing water from dams in operation to Lake Urmia. A hierarchical structure was developed with the aim of evaluating solutions to save Lake Urmia through internal sources and transfer water sources. In this structure, there are four criteria of climate, consumption, economic-social, and environmental status. Sub-criteria of drought, surface water extraction from rivers, extraction from dam sources, extraction from groundwater resources, development of agricultural lands, and ensuring the sustainability of river flow. and providing solutions for inter-basin water transfer, a 40% reduction of agricultural water consumption from surface water sources of rivers and dams,

wastewater transfer, and a 40% reduction of agricultural water consumption from underground water sources in Expert Choice software, were analyzed.

### Results and Discussion

In order to evaluate the effectiveness of the defined scenarios, the simulation model was implemented for future conditions during the next 10 or 15 water years for different scenarios. The results show that the implementation of scenarios 4 and 6, will bring the largest increase in the volume of lake water, of course, with the occurrence of precipitation and proper input. Regarding the results of scenario 1 and the sameness of its results in two periods of 10 and 15 years, it can be stated because in the definition of the scenario, it is a dry year and the amount of evaporation of the lake water is more than the amount of input into the lake. There has been no increase in the lake's water volume for several consecutive years. Also, the results show that in wet and dry years, if the maximum transfer flow scenario is implemented, we will not have a flow from the Zab river to the downstream side, and it will not be accepted from the hydrodiplomacy point of view for the neighboring country in terms of influencing the use of the Dukan dam. Therefore, water diplomacy solutions are needed to reduce environmental threats. Therefore, the issue of transferring water from the Zab basin to Lake Urmia cannot be considered guaranteed in the long term due to the impossibility of reducing the outflow of water from the country to zero.

### Conclusion

In conclusion, in order to evaluate all scenarios to satisfy the environmental needs of Lake Urmia shows that the protection of the lake requires correcting the mistakes of the path traveled in the current and past years, and preferably with a 40% reduction in agricultural consumption from dams and other rivers, groundwater in the basin is the main supplier of Urmia Lake. Inter-basin water transfer is the next priority because the source catchment is able to transfer water in the face of droughts due to the reduction of runoff and related challenges as well as its negative economic and social effects. It will not be as much as predicted and included in the program (600 million cubic meters per year). In addition to that, water diplomacy is necessary in terms of impacting downstream transboundary uses and reducing environmental threats. The results of this research and the high costs of water supply requirements, in parallel with the investigation of controversial options and costs of inter-basin water transfer projects, macro-management of water resources towards demand and consumption management and water saving programs and the modification of water consumption patterns and the legality of the behavior of water users from within the catchment area of Lake Urmia should be low-cost, sustainable and reliable solutions.

**Keywords:** Evaluation, Hierarchical method, Restoration strategies, Simulation, Urmia Lake

**Article Type:** Research Article

\*Corresponding Author, E-mail: h\_babazadeh@srbiau.ac.ir

**Citation:** Mousavi, S.M., Babazadeh, H., Sarai-Tabrizi, M., & Khosrojerdi, A. (2023). Evaluation of solutions to supply part of the environmental requirements of Lake Urmia using MODSIM and hierarchical analysis (AHP). *Water and Soil Management and Modeling*, 3(3), 120-134.

DOI: 10.22098/mmws.2022.11521.1143

DOR: 20.1001.1.27832546.1402.3.3.8.0

Received: 24 September 2022, Received in revised form: 20 October 2022, Accepted: 20 October 2022, Published online: 23 October 2022

*Water and Soil Management and Modeling*, Year 2023, Vol. 3, No. 3, pp. 120-134

Publisher: University of Mohaghegh Ardabili

© Author(s)





## ارزیابی راهکارهای تأمین نیاز محیط زیستی دریاچه ارومیه با استفاده از مدل شبیه سازی MODSIM و روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP)

سید مرتضی موسوی<sup>۱</sup>، حسین بابازاده<sup>۲\*</sup>، مهدی سرائی تبریزی<sup>۳</sup>، امیر خسرو جردی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری، گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران

<sup>۲</sup> استاد، گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران

<sup>۳</sup> استادیار، گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران

### چکیده

حوضه آبریز دریاچه ارومیه در اثر وقوع خشکسالی‌ها و نیز مداخلات انسانی با سیر صعودی برداشت‌های غیرمجاز و اضافه برداشت از حبابه محیط زیستی دریاچه مواجه شده است. چالش‌های اجتماعی ناشی از کاهش مصارف آب کشاورزی باعث شد تا تأمین بخشی از نیاز محیط زیستی دریاچه، از طریق انتقال آب بین حوضه‌ای از حوضه آبریز زاب به اجرا گذاشته شود. بر همین اساس، هدف از این مطالعه ارزیابی راهکارهای تأمین نیاز محیط زیستی دریاچه ارومیه است. در این راستا، منابع آب درون حوضه آبریز (شامل انتقال پساب، کاهش ۴۰ درصدی مصرف از محل منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی) با راهکار انتقال آب بین حوضه‌ای از رودخانه زاب با استفاده از روش سلسله مراتبی (AHP) در هر یک از دوره‌های خشکسالی (با شدت ضعیف، متوسط و شدید) با تعریف شش سناریو با مدل MODSIM شبیه‌سازی شد. پرسش‌نامه و مقایسه‌های زوجی بر اساس معیارهای انتخاب‌شده، با راهکار انتقال آب بین حوضه‌ای از رودخانه زاب از میان سایر راهکارها مورد تحلیل قرار گرفت. نتایج بررسی مقدار آب قابل انتقال از حوضه آبریز زاب در دوره‌های خشکسالی، نرمال، ترسالی و برتری کاهش ۴۰ درصدی مصارف آب کشاورزی از سدها و سایر منابع آب سطحی و زیرزمینی درون حوضه دریاچه ارومیه را نشان می‌دهد و راهکار اجرای انتقال پساب در اولویت‌های بعدی قرار می‌گیرند. نتایج کلی اثربخشی افزایش تراز و حجم دریاچه نشان داد که دامنه اثربخشی سناریوهای شش‌گانه مورد بررسی طی ۱۰ سال آینده بین ۳/۵۷ تا ۹/۳۸ میلیارد مترمکعب و طی ۱۵ سال آینده بین ۳/۵۷ تا ۱۰/۷ میلیارد مترمکعب خواهد بود و در دوره‌های مواجهه با خشکسالی شدید حوضه آبریز مبدأ، به دلیل کاهش رواناب، چالش‌های پایین‌دست و فرامیزی انتقال آب بین حوضه‌ای به مقدار پیش‌بینی و گنجانده شده در برنامه (۶۰۰ میلیون مترمکعب در هر سال) امکان‌پذیر نخواهد بود.

**واژه‌های کلیدی:** ارزیابی، دریاچه ارومیه، راهکارهای احیاء، روش سلسله مراتبی، شبیه‌سازی

### نوع مقاله: پژوهشی

\*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: h\_babazadeh@srbiau.ac.ir

استناد: موسوی، سیدمرتضی، بابازاده، حسین، سرائی تبریزی، مهدی، و خسرو جردی، امیر (۱۴۰۲). ارزیابی راهکارهای تأمین نیاز محیط زیستی دریاچه ارومیه با استفاده از مدل شبیه‌سازی MODSIM و روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP). *مدل سازی و مدیریت آب و خاک*، ۳(۳)، ۱۲۰-۱۳۴.

DOI: 10.22098/mmws.2022.11521.1143

DOR: 20.1001.1.27832546.1402.3.3.8.0

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۷/۰۲، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۰۷/۲۸، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۷/۲۸، تاریخ انتشار: ۱۴۰۱/۰۸/۰۱

*مدل سازی و مدیریت آب و خاک*، سال ۱۴۰۲، دوره ۳، شماره ۳، شماره صفحه ۱۲۰ تا ۱۳۴

© نویسندگان

ناشر: دانشگاه محقق اردبیلی



## ۱- مقدمه

در سطح منطقه‌ای، ملی و بین‌المللی، محیط زیستی (حفاظت) محیط زیستی، تغییرات آب و هوا، تنوع زیستی، افزایش غلظت آلودگی و گردشگری) و هیدرولوژیکی (کاهش کمیت و کیفیت آب قابل دسترس در مبدأ و بررسی توان خودپالایی رودخانه) تأکید شده است (Alemohammad et al., 2014).

Psomas et al. (2016) به‌منظور دستیابی به مدیریت جامع و دقیق آب شرب در حوضه رودخانه‌ای در کشور یونان از دو مدل SWAT و WEAP استفاده کردند. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده به‌منظور جبران کمبود آب کشاورزی در دوره اوج مصرف، راهکارهای کم‌آب‌باری و بهبود شبکه کشاورزی می‌توانند هر کدام به‌ترتیب ۲۳ و ۷ درصد کاهش مصرف آب را به همراه داشته باشند. Yasi (2017) در پژوهشی با عنوان مدیریت رودخانه‌ها و سد‌ها در تأمین و هدایت آب به دریاچه ارومیه، طرح‌های توسعه منابع آب و گسترش زمین‌های فاریاب کشاورزی را باعث تخلیه آب‌های زیرزمینی دشت‌ها و کاهش جریان‌های سطحی و زیرسطحی به سمت دریاچه ارومیه معرفی و نتیجه‌گیری نمود. راه‌حل اصلی نجات دریاچه ارومیه، تأمین آب از درون حوضه آبریز با کاهش مصارف آن است. (Bui Tien et al., 2020) در پژوهشی اثرات انتقال آب از رودخانه زاب به حوضه رودخانه گدار را بررسی کردند و پیش‌بینی کردند انتقال آب به رودخانه گدار سبب افزایش حجم عبوری به میزان سه برابر خواهد شد و ارتفاع آب در سطح مقطع فعلی نیز به میزان یک متر افزایش خواهد یافت. آن‌ها همچنین اثرات آن بر حوضه مبدأ را در تطابق با معیارهای سه و پنج یونسکو در انتقال آب بین‌حوضه‌ای مخرب ارزیابی نمودند. علاوه بر این، Zhou et al. (2017) ارزیابی تأثیر نظام‌مند در پروژه‌های انتقال آب بین‌حوضه‌ای از حوضه رودخانه هان‌جیانگ در چین را مورد ارزیابی قرار دادند. در این پژوهش ابتدا تقاضای آب برای هدف تخصیص آب تجزیه و تحلیل شد. سپس، راهکارهای‌های تخصیص آب بهینه را برای به حداکثر رساندن تأمین آب به بخش‌های متقاضی آب با کاهش تأثیرات منفی با استفاده از الگوریتم‌های ژنتیک استاندارد و تطبیقی مورد ارزیابی قرار گرفت. در آخر، شاخص‌های عملکرد سیستم آبرسانی تحت سناریوهای مختلف پروژه‌های انتقال آب بین‌حوضه‌ای ارزیابی شدند. نتایج نشان داد که طرح‌های تخصیص هوشمند آب پیشنهادی به‌طور قابل‌توجهی می‌توانند با انعطاف‌پذیری، آسیب‌پذیری و تأثیرات منفی پروژه‌های انتقال آب بین‌حوضه‌ای و تأمین آب را با قابلیت اطمینان، به بخش‌های متقاضی در حوضه‌های آبرسانی کاهش دهند. بدون شک استفاده از تجربیات بین‌المللی به‌دست‌آمده از موفقیت‌ها و شکست‌ها در طرح‌های نجات دریاچه‌های مشابه برای متخصصین و تصمیم‌گیران مؤثر است.

احیای دریاچه ارومیه فرآیند پیچیده‌ای است که نیازمند در نظر گرفتن تمامی ابعاد مسائل محیط زیستی، اجتماعی و اقتصادی است (Mousavi et al., 2021). در دو دهه گذشته به‌تدریج مجموعه‌ای از عوامل طبیعی و انسانی موجب به هم خوردن تعادل آبی دریاچه ارومیه شده‌اند. علاوه بر کاهش نزولات جوی، عمده‌ترین عامل رشد شکاف بین منابع و مصارف آب در حوضه به‌ویژه در بخش کشاورزی بوده است. مسائل و چالش‌های حکمرانی، اصلی‌ترین عامل پیچیده شدن مسأله و اجرا نشدن کامل برنامه‌ها و راهبردهای کارگروه نجات دریاچه ارومیه است (Center For Strategic Studies, 2019). کارگروه ملی نجات دریاچه ارومیه در بهمن سال ۱۳۹۲ به تصویب دولت رسید و کارگروه در تیر ۱۳۹۳، ۲۶ راهکار جهت احیای دریاچه ارومیه پیشنهاد شد (Ejazi et al., 2020). در آن راهکارها تلاش برای رسیدن به سطح بوم‌شناختی در سه مرحله طی ۱۰ سال از طریق برنامه‌های تأمین درون‌حوضه‌ای و انتقال آب بین‌حوضه‌ای برنامه‌ریزی شد. در این راستا، سناریوهایی برای تأمین بخشی از نیاز محیط زیستی دریاچه از طریق انتقال آب بین‌حوضه‌ای شامل انتقال آب از دریاچه خزر، انتقال آب از رودخانه ارس و انتقال آب از ترکیه (دریاچه اوان) و انتقال آب از زاب پیشنهاد و با توجه به سیاست‌های کلان کشور در نهایت طرح انتقال آب مازاد حوضه کلاس (رودخانه زاب) به دریاچه ارومیه، از سال ۱۳۹۳ به‌عنوان یکی از ابرپروژه‌های در دست اقدام برای احیای دریاچه ارومیه مصوب و در حال اجرا است (Urmia Lake Rehabilitation Center, 2014). انتقال آب از یک حوضه آبریز با آب مازاد (حوضه آبریز مبدأ) به یک حوضه آبریز دیگر (حوضه آبریز مقصد یا گیرنده) که از کمبود آب رنج می‌برد، تحت‌عنوان انتقال آب بین‌حوضه‌ای (IBWT) تعریف شده است (Zhang et al., 2018).

بررسی طرح‌های انتقال آب نشان می‌دهد که اکثر طرح‌های انتقال آب بین‌حوضه‌ای انجام‌شده به‌منظور تأمین نیازهای شرب، کشاورزی و تولید انرژی، محیط زیستی و چندمنظوره بوده‌اند (Sadeghi et al., 2016). در مطالعات انجام‌شده اغلب به مشکلات و اثرات به‌وجودآمده فنی، تعارضات اجتماعی و محیط زیستی ناشی از آن پرداخته‌اند و بر انجام مطالعات علمی دقیقی به‌منظور ملاحظات اجرایی اقتصادی (هزینه‌های سنگین ساخت، بهره‌برداری، نگهداری، تغییر الگوی کاربری اراضی و عواید حاصله)، اجتماعی-سیاسی (اعتراضات، مناقشات و منازعات اجتماعی و قومی ناشی از خسارت به حقایق‌ها

<sup>1</sup> Inter Basin Water Transfer

و در فصول کم باران به جریان زیاد در هنگام انتقال آب معکوس می‌شود. مطالعه نشان می‌دهد که شیب جریان می‌تواند به وضوح آب رودخانه و تعامل آب زیرزمینی را تحت تأثیر قرار دهد و یا تأثیر آب رودخانه بر آب زیرزمینی را محدود کند.

Salimpour et al. (2021) در پژوهشی به مدل‌سازی اثرات انتقال آب بین حوضه‌ای رودخانه بهشت‌آباد بر سطح و حجم آبخوان شلمزار (حوضه مبدأ انتقال) با استفاده از نرم‌افزار WEAP پرداختند. بر مبنای نتایج گزارش شده، انتقال آب بین حوضه‌ای بر سطح و حجم آبخوان در منطقه مبدأ انتقال تأثیر منفی دارد و کاهش حجم آبخوان مطالعاتی در شرایط انتقال آب از حوضه آبریز و در صورت اجرای طرح‌های توسعه منابع آب در طول مدت ۳۰ سال حدود پنج برابر پیش‌بینی شده است.

Micklin et al. (2020) با این شعار که پنبه، طلای سفید است اراضی زیر کشت پنبه را از  $\frac{3}{5}$  به  $\frac{7}{5}$  میلیون هکتار افزایش دادند. از سال ۱۹۶۰، دریاچه آرال به‌طور پیوسته کوچک شده و کم‌عمق‌تر شده است. دلیل قهقاری خشک شدن آرال بدون شک فعالیت اقتصادی انسان بود؛ زیرا شرایط آب و هوایی و بارش حوضه آبریز دریاچه آرال در آسیای مرکزی به‌طور معنادار کاهش قابل‌توجهی نداشته است. جمهوری ازبکستان در سال ۲۰۱۸ متعهد شد که تقریباً ۳۰ درصد از مساحت آبی خود را به فناوری‌های مدرن صرفه‌جویی در مصرف آب در طول پنج سال ارتقا دهد. قسمت شمالی آرال را با خاکریزی از قسمت جنوبی جدا کردند که منجر به افزایش سطح و کاهش شوری می‌شود. این اقدام منجر به بازگشت ماهی‌های بومی از رودخانه‌ها و احیای صنعت ماهی‌گیری شده است. احیای حوضه جنوب‌غربی دریای آرال ممکن است امکان‌پذیر باشد، اما این طرح‌ها نیاز زیادی دارد. هم‌چنین کاشت هدفمند درخت در کف دریای آرال را برای رفع حرکت شن‌ها و کاهش طوفان‌های گرد و غبار نمکی که بر بهره‌وری و سلامتی انسان تأثیر می‌گذارد تکمیل خواهند نمود.

Wurtsbaugh and Sima (2022) یک تحلیل مقایسه‌ای از خشک شدن دو دریاچه بزرگ نمک<sup>۱</sup> و ارومیه ارائه داده‌اند. دریاچه بزرگ نمک در غرب ایالات متحده به‌طور قابل‌توجهی از نظر اندازه، عمق و شوری شبیه دریاچه ارومیه ایران است. نرخ بالای رشد جمعیت در هر دو حوضه تقاضا برای آبیاری (کشاورزی) و سایر مصارف را افزایش داده‌اند. توسعه در حوضه آبریز دریاچه بزرگ نمک در اواخر دهه ۱۸۰۰ آغاز شد و هم‌چنان ادامه دارد. حجم دریاچه ۶۷ درصد کاهش یافته است. با ۷۵ درصد از تلفات ناشی از توسعه آب و ۲۵ درصد توسط یک خشکسالی هزار ساله که ممکن است نشانی از آغاز تأثیرات

دریاچه آونز که در انتهای رودخانه آونز، در شرق رشته‌کوه‌های سیرا نوادا در ایالت کالیفرنیا واقع شده، دریاچه‌ای شور است که در طول ۸۰۰ سال گذشته هرگز خشک نبوده است؛ لیکن از سال ۱۹۱۳ که آب رودخانه آونز به شهر لس‌آنجلس منتقل شد، در کم‌تر از چند سال این دریاچه شور را به یک استخر آب نمک کوچک که توسط پلایای خشک احاطه شده بود، تبدیل کرد. آژانس حفاظت از محیط زیست ایالات متحده از سال ۲۰۰۰ اقدام به اجرای پروژه‌هایی با هدف کنترل و کاهش غلظت گرد و غبار ناشی از وزش بادهای شدید در بستر خشک دریاچه کرده است. بر اساس اصول اقتصادی و اقتصاد محیط زیست و با استفاده از اطلاعات موجود در خصوص مصارف آب در بخش‌های کشاورزی، صنعت و محیط زیست، ارزش اقتصادی (ارزش تولیدی) آب در محیط زیست دریاچه ارومیه افزون‌تر از بخش کشاورزی ارزیابی شده است (Los Angeles Department of Water and Power, 2020).

Wu and Huang (2020) در پروژه انحراف آب رودخانه هانجیانگ با بررسی مخازن چند هدفه تجزیه و تحلیل آن‌ها نشان داد پروژه‌های انتقال آب بین حوضه‌ای به‌ویژه بر بوم‌سازگان رودخانه اثر می‌گذارد. داد و ستد بین مزایای اقتصادی و بوم‌شناختی به یک مشکل در بهره‌برداری زمان واقعی در مخازن چند هدفه تبدیل می‌شود. بنابراین، با هدف بررسی رابطه مدل بهره‌برداری بهینه از مخازن چندهدفه با توجه به اهداف اجتماعی و اقتصادی، تعادل محیط زیستی نیز باید مدنظر قرار گیرد. Sheng et al. (2020) در پژوهشی اثرات انتقال آب بین حوضه‌ای طرح انتقال آب از جنوب به شمال چین بر مصرف و آلودگی آب را بررسی نمودند. آن‌ها گزارش دادند که بیش‌تر مطالعات موجود قادر به بررسی تأثیرات انتقال آب بین حوضه‌ای از منظر مجموعه مصرف آب و آلودگی و درگیری بین فعالیت‌های انسانی و تغییرات محیطی نیستند. نتایج نشان می‌دهد که انتقال آب بین حوضه‌ای نه تنها باعث بهبود مصرف آب در شهرهای پذیرنده آب نمی‌شود، بلکه هم‌چنین به دلیل گرانی آب ناشی از آن، استفاده ساکنان را بیش‌تر محدود می‌کند. علاوه بر این، آن‌ها چنین نتیجه گرفته‌اند، پروژه‌های انتقال آب بین حوضه‌ای نمی‌تواند آلودگی منابع آب را کاهش دهد. سطح آلودگی آب در شهرهای پذیرنده آب بیش‌تر به سیاست‌های محیط زیستی بستگی دارد.

Yuan et al. (2020) در مطالعه انتقال آب رودخانه زرد چین دریافتند که اندرکنش بین رودخانه و آب زیرزمینی با انتقال آب کاملاً تغییر می‌کند و تأثیر انتقال آب روی آب زیرزمینی توسط شیب زیاد جریان آب محدود می‌شود. با انتقال آب، الگوی طبیعی سالانه جریان رودخانه که در فصول بارندگی زیاد بود به جریان کم

<sup>1</sup> Great Salt Lake

ورودی دریاچه ارومیه را تشکیل می‌دهند (Ministry of Energy, 2012). حوضه آبریز رودخانه زاب کوچک از نظر موقعیت سرزمینی در بخش غربی مرزهای بین‌المللی با کشور عراق و در حوضه آبریز رودخانه‌های مرزی غرب قرار دارد و از کوه‌های زاگرس در شهرستان پیرانشهر سرچشمه می‌گیرد. شامل دو رودخانه اصلی به نام‌های زاب کوچک و چومان است و رودخانه زاب در جهت شمالی به سمت جنوب جریان داشته و رودخانه چومان از جهت شرق به غرب جریان دارد. بخش قابل توجهی از حوضه آبریز زاب (مبدأ انتقال آب) در خارج از کشور و در عراق قرار دارد. مسیر انتقال آب بین حوضه‌ای از حوضه زاب از محل دو سد سیلوه (توسط سامانه کانال احداثی جلدیان و ورود به سد چپرآباد) و کانی‌سیب (توسط تونل احداثی ۳۵/۵ کیلومتری و کانال روباز ۱۱ کیلومتری) بوده که بعد از ورود به رودخانه گذارچای در نهایت وارد بستر دریاچه ارومیه خواهند شد (Regional Water Authority of West Azarbaijan, 2005).

#### ۲-۲- مدل شبیه‌سازی MODSIM

در سال‌های اخیر با گسترش فناوری‌های رایانه‌ای استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی در پژوهش‌های مربوط به مدیریت به هم پیوسته منابع آب مورد توجه زیادی قرار گرفته‌اند که در این میان مدل‌های WEAP و MODSIM در مقایسه با سایر مدل‌های شبیه‌سازی بیش‌تر مورد استفاده قرار گرفته‌اند (Arami et al., 2022). مدل MODSIM یک مدل شبیه‌سازی بهره‌بردار از سیستم منابع آب همراه با تخصیص منابع آب بین مصارف در مقیاس حوضه آبریز و تحت ابعاد و سیاست‌های تخصیص معلوم برای اجزاء مختلف ذخیره، انتقال و انحراف آب است. رفتار یک سیستم منابع آب در سطح حوضه آبریز را تحت سناریوهای مشخص و از پیش تعیین شده مطالعه و بررسی می‌کند.

این مدل از روش برنامه‌ریزی شبکه جریان<sup>۱</sup> NFP برای محاسبه مقادیر تخصیص آب بین گره‌های نیاز و ذخیره در هر گام زمانی استفاده می‌کند. در این مدل مسأله حداقل کردن هزینه شبکه جریان و به عبارتی تخصیص بهینه آب بین مصارف متعدد به صورت تکراری در هر گام زمانی حل می‌شود. فرمول‌بندی عمومی الگوریتم NFP که در هر گام زمانی استفاده می‌شود به شکل رابطه‌های ۱ و ۲ هستند (Mohsenizadeh and Shourian, 2017).

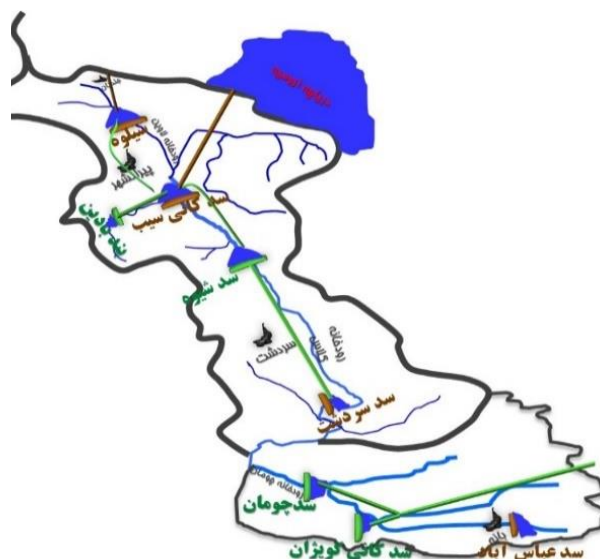
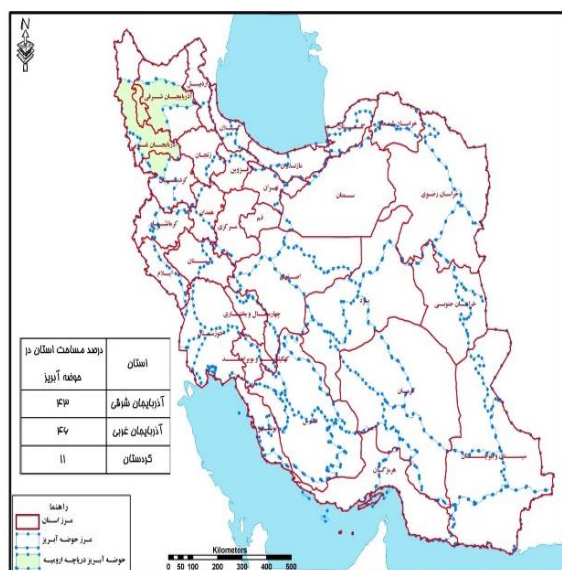
جهانی تغییرات آب و هوایی باشد. البته در حوضه آبریز دریاچه بزرگ نمک تنها یک درصد از مردم در بخش کشاورزی شاغل هستند؛ بنابراین، تقاضا برای توسعه آبیاری کاهش می‌یابد. تراکم جمعیت در حوضه آبریز ارومیه دو برابر حوضه آبریز دریاچه بزرگ نمک است و ۲۸ درصد افراد در حوزه کشاورزی شاغل هستند. این آمار جمعیتی و افزایش سریع ساخت و ساز مخازن، متعاقب آن از دست رفتن ۸۷ درصد از حجم دریاچه ارومیه شده است. برای نجات دادن این دریاچه‌ها و سایر دریاچه‌ها مواردی به این شرح پیشنهاد شده است: مشارکت شفاف و مشارکتی با منافع محلی گروه‌ها؛ از اقتصاد مبتنی بر کشاورزی به اقتصاد مبتنی بر تولید و خدمات؛ در نظر گرفتن خدمات بوم‌سازگان متنوع دریاچه‌ها از جمله استخراج مواد معدنی، تفریح‌گاه، زیستگاه پرندگان در تالاب‌های اطراف و کنترل گرد و غبار. پژوهش حاضر ضمن بررسی راهکارهای تأمین حقابه محیط زیستی دریاچه ارومیه با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP)، تغییرات حجم آب دریاچه ارومیه در سناریوهای انتقال آب از جریان سطحی هر یک از رودخانه‌های ورودی به دریاچه در سال‌های با شدت خشکسالی شدید تا ضعیف، اجرای مصوبات کارگروه ملی نجات دریاچه ارومیه شامل کاهش ۴۰ درصدی مصارف کشاورزی از منابع سدها و سایر رودخانه‌های فاقد سد، رهاسازی آب از سدها در فصول غیرزرعی، انتقال آب از پساب‌های شهری و در نهایت انتقال آب بین حوضه‌ای از حوضه زاب را به صورت کمی با استفاده از مدل شبیه‌سازی MODSIM بررسی می‌کند. این تحقیق کمک خواهد کرد تا مقدار آب قابل انتقال در شرایط ترسالی، نرمال و خشکسالی پیش‌بینی و در حسابداری آب حوضه آبریز ارومیه مورد برنامه‌ریزی قرار گیرد.

#### ۲- مواد و روش‌ها

##### ۲-۱- منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز دریاچه ارومیه واقع در شمال غرب ایران با مساحت ۵۱۸۷۶ کیلومتر مربع یکی از شش حوضه آبریز اصلی کشور است که بین استان‌های آذربایجان غربی، آذربایجان شرقی و کردستان قرار دارد. موقعیت حوضه دریاچه ارومیه در شکل ۱ نشان داده شده است. زیرحوضه‌های آن شامل زیرحوضه رودخانه‌های زرینه‌رود، لیلان‌چای، مردوق‌چای، صوفی‌چای، چوان‌چای، قلعه‌چای، شیرامین، آذرشهرچای، رودخانه‌های شمال دریاچه ارومیه هستند. در بخش شرقی، رودخانه‌های شمال دریاچه ارومیه واقع شده‌اند در بخش غربی، جزایر، زولاچای، خرخره‌چای، کهریز، نازلوچای، روضه‌چای، شهرچای، باراندوزچای، ناری چشمه‌دول، گذارچای، مه‌بادچای، سیمینه‌رود و دریاچه ارومیه قرار گرفته‌اند. رودخانه‌های دائمی، چندین رودخانه فصلی و حدود ۳۹ مسیل در مجموع منابع آب‌های سطحی

<sup>۱</sup> Network Flow Programming



شکل ۱- موقعیت حوضه دریاچه ارومیه در کشور و سامانه تأسیسات انتقال آب از رودخانه زاب به دریاچه ارومیه

Figure 1- The Location of Urmia Lake Basin in the country and the system of IBWT projects from Zab River to Urmia Lake

اقدامات شامل راهکارهایی که مستقیماً بر افزایش آب ورودی به دریاچه موثر هستند و راهکارهایی که به پشتیبانی مدیریت احیا و پایدارسازی فرآیندها کمک می‌نمایند قابل دسته‌بندی هستند (Urmia Lake Rehabilitation Center, 2014). راهکارهای کلی برای کاهش مصارف آب و افزایش جریان سطحی ورودی به دریاچه ارومیه در مقیاس سالانه و طرح نجات دریاچه ارومیه شامل شش گزینه صرفه‌جویی هستند (جدول ۱). کاهش مصارف کشاورزی از سدهای در حال بهره‌برداری (۳۷۷ میلیون مترمکعب)، صرفه‌جویی با کاهش مصارف کشاورزی از سایر رودخانه‌ها (۲۷۶ میلیون مترمکعب)، انتقال آب بین حوضه‌ای (۶۰۰ میلیون مترمکعب شامل ۴۴/۱۵ میلیون مترمکعب از سد سیلوه و ۵۵۶/۲۷ میلیون مترمکعب از سد کانی‌سیب)، انتقال پساب به دریاچه ارومیه (۲۰۷ میلیون مترمکعب)، رهاسازی آب از سدهای در حال بهره‌برداری به دریاچه ارومیه (۳۰۰ میلیون مترمکعب)، آورد سالانه جریان سطحی ۱۶ رودخانه اصلی منتهی به دریاچه بر اساس وضعیت‌های مختلف خشکسالی (شدید، متوسط و ضعیف) هستند که بر اساس آن‌ها شش سناریو تعریف شد که فهرست آن‌ها در جدول ۱ آورده شده‌اند. لازم به ذکر است که مقادیر ورودی جریان سطحی به دریاچه در سناریوها (۱۰۸۶، ۱۴۶۰ و ۱۸۶۲ میلیون مترمکعب) بر اساس رخدادهای سال‌های آبی گذشته تعریف شده‌اند.

$$\text{Minimize } \sum_{l \in A} c_l q_l \quad (1)$$

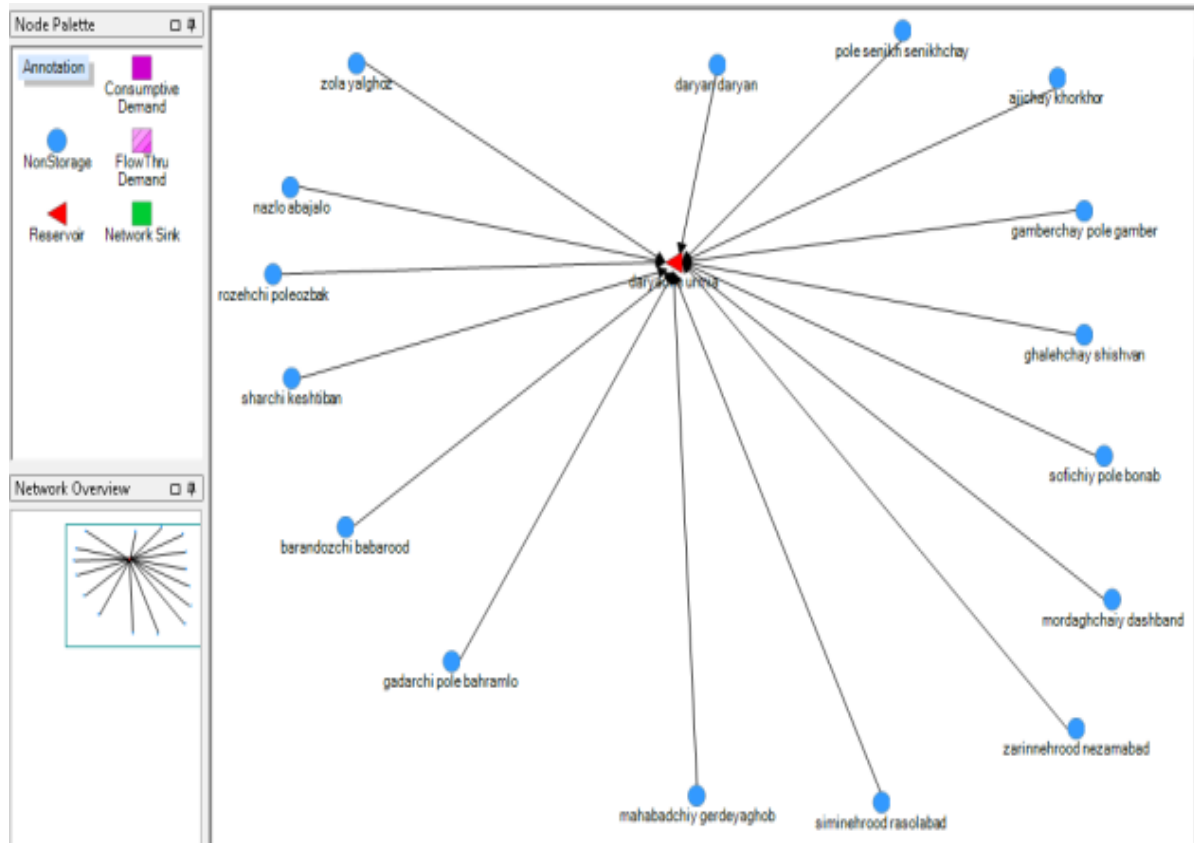
$$\sum_{j \in O_i} q_j - \sum_{k \in I_i} q_k = 0 ; \text{ for all } i \in N \quad (2)$$

$$l_l \leq q_l \leq u_l ; \text{ for all } l \in A \quad (3)$$

در روابط این مدل،  $A$  مجموعه مجاری جریان در شبکه،  $N$  مجموعه گره‌ها،  $O_i$  مجموعه کانال‌های آغازشونده از گره  $i$  (کانال‌های خروجی)،  $I_i$  مجموعه کانال‌های پایان‌یابنده در گره  $i$  (کانال‌های ورودی)،  $q_l$  دبی جریان در کانال ضریب هزینه جریان در کانال  $l$  (منفی ضرایب وزنی و یا سود واحد دبی در کانال  $l$  که بر اساس اولویت‌های تخصیص بین نیازها محاسبه می‌شود)،  $II$  کران پایین جریان در کانال  $l$  و  $I$  کران بالای جریان در کانال  $l$  است. در نبود مطالعات اقتصادی و به‌منظور تخصیص بهینه آب بین مصارف، ضرایب هزینه در تابع هدف NFP با استفاده از مقادیر اولویت‌های نسبی تأمین نیازها که توسط کاربر تعیین شده محاسبه می‌شود.

### ۳-۲- سناریوهای مورد بررسی

مصوبات ۲۹ گانه کارگروه ملی نجات دریاچه ارومیه در دو دسته



شکل ۲- شکل شماتیک از مدل MODSIM  
Figure 2- Schematic of MODSIM model

دریاچه ارومیه تحت سناریوهای تعریف شده از داده‌های دو ایستگاه هیدرومتری (الوت و چومان در پایاب) استفاده شد که نشان‌دهنده آب خروجی از مرز ایران است. در شرایط بدون انتقال آب از حوضه زاب به دریاچه ارومیه، مقدار جریان سطحی خروجی از حوضه آبریز زاب در شرایط ترسالی، نرمال و خشکسالی بر اساس داده‌های ایستگاهی استخراج شد.

#### ۲-۵- روش تحلیل سلسله مراتبی

روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP) هنگامی که عمل تصمیم‌گیری با چند گزینه و معیار تصمیم‌گیری مواجه باشد می‌تواند استفاده شود. اساس این روش تصمیم‌گیری بر مقایسات زوجی نهفته است. تصمیم‌گیرنده با فراهم ساختن درخت سلسله مراتب تصمیم‌گیری کار تحلیل را شروع می‌کند. ساختار سلسله مراتبی شامل چهار سطح است که سطح اول را هدف و سطح دوم را معیارهای اصلی، سطح سوم را معیارهای فرعی و سطح چهارم را گزینه‌ها تشکیل داده‌اند. روش AHP برای تعیین اوزان معیارها و گزینه‌ها استفاده می‌شود و مقایسه زوجی بین هر کدام از سطوح معیارها انجام می‌گیرد و چنانچه نرخ ناسازگاری کمتر از ۰/۱ باشد مقایسه‌های زوجی انجام گرفته قابل قبول است.

#### ۲-۴- روش اجرا، واسنجی و پیش‌بینی با استفاده از مدل شبیه‌سازی MODSIM

مراحل کلی اجرای مدل شامل ترسیم گره‌ها و ارتباطات، تعریف دوره زمانی، ورود اطلاعات، واسنجی، تعریف سناریوها، اجرای مدل برای سال جاری و دوره اجرای سناریوها و استخراج نتایج و در نهایت تحلیل و نتیجه نهایی خواهد بود. در این مدل‌سازی دریاچه ارومیه در مرکز و لینک‌های ۱۶ رودخانه اصلی به این دریاچه و پنج ورودی در راستای افزایش تراز شامل اثربخشی مصوبات کاهش ۴۰ درصدی مصارف کشاورزی از سدها، کاهش ۴۰ درصدی مصارف کشاورزی از سایر رودخانه‌ها، رهاسازی آب از سدها در فصل‌های غیرزراعی، انتقال پساب از تصفیه‌خانه‌های فاضلاب از جمله تبریز و ارومیه (راهکارهای درون حوضه‌ای) و انتقال آب بین حوضه‌ای از حوضه آبریز زاب (طرح برون حوضه‌ای) هستند. داده‌های ورودی به دریاچه در دوره زمانی سال‌های آبی ۱۳۹۳-۹۴ تا ۱۴۰۰-۱۳۹۹ به صورت سالانه (هفت سال) برای ۱۶ ایستگاه هیدرومتری تکمیل و مدل بر اساس آن اجرا و واسنجی خواهد شد. در شرایط آینده مدل شبیه‌سازی برای دوره ۱۰ یا ۱۵ سال آبی آینده (۱۴۰۱-۱۴۰۰ تا ۱۴۱۵-۱۴۱۴)، با اعمال سناریوهایی تعریف شده اجرا و نتایج ارائه می‌شود. علاوه بر این برای تحلیل وضعیت حوضه مبدأ در سناریو انتقال آب به

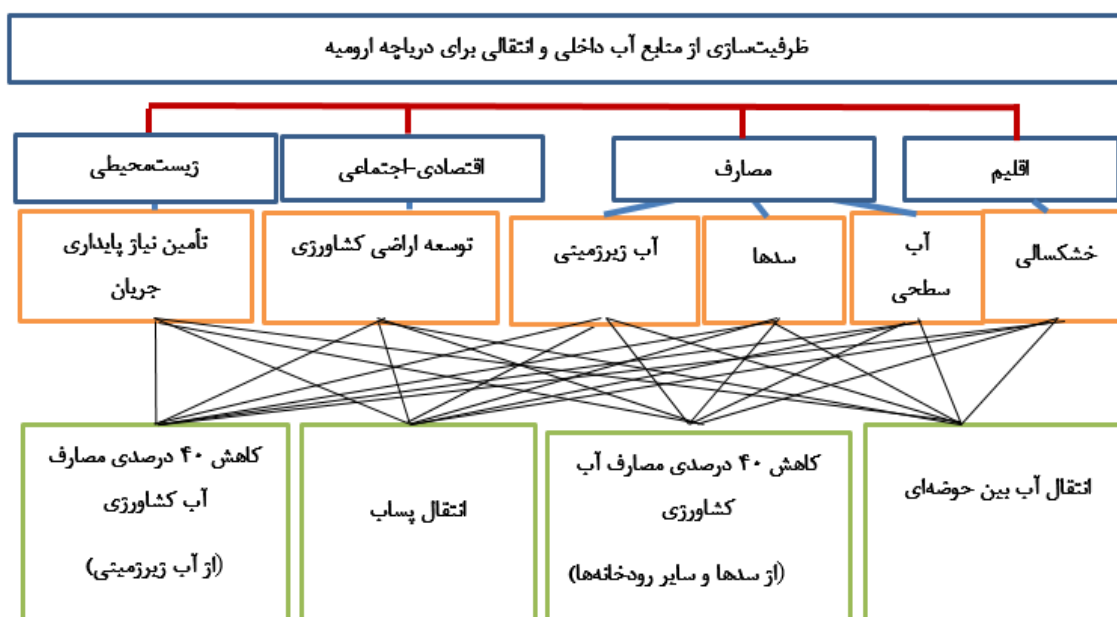


جدول ۱- گزینه‌های مورد بررسی  
Table 1- The list of scenarios examind

شماره	شرح سناریو
۱	صرفه‌جویی از محل سدهای در حال بهره‌برداری + صرفه‌جویی از سایر رودخانه‌ها + رهاسازی از سدهای در حال بهره‌برداری در ماه‌های غیرزراعی + انتقال پساب‌ها + ورودی رودخانه‌های منتهی به دریاچه سالانه به مقدار ۱۰۸۶ م.م.م در وضعیت خشکسالی شدید
۲	صرفه‌جویی از محل سدهای در حال بهره‌برداری + صرفه‌جویی از سایر رودخانه‌ها + رهاسازی از سدهای در حال بهره‌برداری در ماه‌های غیرزراعی + انتقال پساب‌ها + انتقال آب از حوضه زاب + ورودی رودخانه‌های منتهی به دریاچه سالانه به مقدار ۱۰۸۶ م.م.م در وضعیت خشکسالی شدید
۳	صرفه‌جویی از محل سدهای در حال بهره‌برداری + صرفه‌جویی از سایر رودخانه‌ها + رهاسازی از سدهای در حال بهره‌برداری در ماه‌های غیرزراعی + انتقال پساب‌ها + ورودی رودخانه‌های منتهی به دریاچه سالانه به مقدار ۱۴۶۰ م.م.م در وضعیت خشکسالی متوسط
۴	صرفه‌جویی از محل سدهای در حال بهره‌برداری + صرفه‌جویی از سایر رودخانه‌ها + رهاسازی از سدهای در حال بهره‌برداری در ماه‌های غیرزراعی + انتقال پساب‌ها + انتقال آب از حوضه زاب + ورودی رودخانه‌های منتهی به دریاچه سالانه به مقدار ۱۴۶۰ م.م.م در وضعیت خشکسالی متوسط
۵	صرفه‌جویی از محل سدهای در حال بهره‌برداری + صرفه‌جویی از سایر رودخانه‌ها + رهاسازی از سدهای در حال بهره‌برداری در ماه‌های غیرزراعی + انتقال پساب‌ها + ورودی رودخانه‌های منتهی به دریاچه سالانه به مقدار ۱۸۶۲ م.م.م در وضعیت خشکسالی ضعیف
۶	صرفه‌جویی از محل سدهای در حال بهره‌برداری + صرفه‌جویی از سایر رودخانه‌ها + رهاسازی از سدهای در حال بهره‌برداری در ماه‌های غیرزراعی + انتقال پساب‌ها + انتقال آب از حوضه زاب + ورودی رودخانه‌های منتهی به دریاچه سالانه به مقدار ۱۸۶۲ م.م.م در وضعیت خشکسالی ضعیف

برداشت از منابع آب زیرزمینی، توسعه اراضی کشاورزی، تأمین نیاز پایداری جریان رودخانه‌ها و ارائه راهکارهای انتقال آب بین حوضه‌ای، کاهش ۴۰ درصدی مصارف آب کشاورزی از منابع آب سطحی رودخانه‌ها و سدها، انتقال پساب و کاهش ۴۰ درصدی مصارف آب کشاورزی از منابع آب زیرزمینی در نرم‌افزار Expert Choice مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت.

ساختار سلسله مراتبی در نظر گرفته شده با هدف ارزیابی راهکارهای نجات دریاچه ارومیه از طریق منابع داخلی و منابع آب انتقالی در شکل ۳ آورده شده است. در شکل مذکور با هدف نجات دریاچه ارومیه چهار معیار اقلیم، مصارف، وضعیت اقتصادی-اجتماعی و محیط زیستی با زیرمعیارهای خشکسالی، برداشت آب سطحی از رودخانه‌ها، برداشت از منابع سدها،



شکل ۳- مدل مفهومی تأثیرات کاهش مصارف و انتقال بین‌حوضه‌ای آب با اهداف محیط زیستی به دریاچه ارومیه

Figure 3- Conceptual model of the effects of consumption reduction and IBWT with environmental goals to Urmia Lake

۱۳۹۹-۱۴۰۰) اجرا و نتایج مقادیر حجم مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده دریاچه ارومیه در شکل ۳ آورده شده است. لازم به ذکر است حجم اولیه در مدل در شروع سال آبی ۹۴-۱۳۹۳ از نمودار سطح، حجم، ارتفاع آخرین بسیمتری دریاچه استخراج شد که معادل ۱/۲۹ میلیارد مترمکعب به‌دست آمد. مطابق نتایج آن،

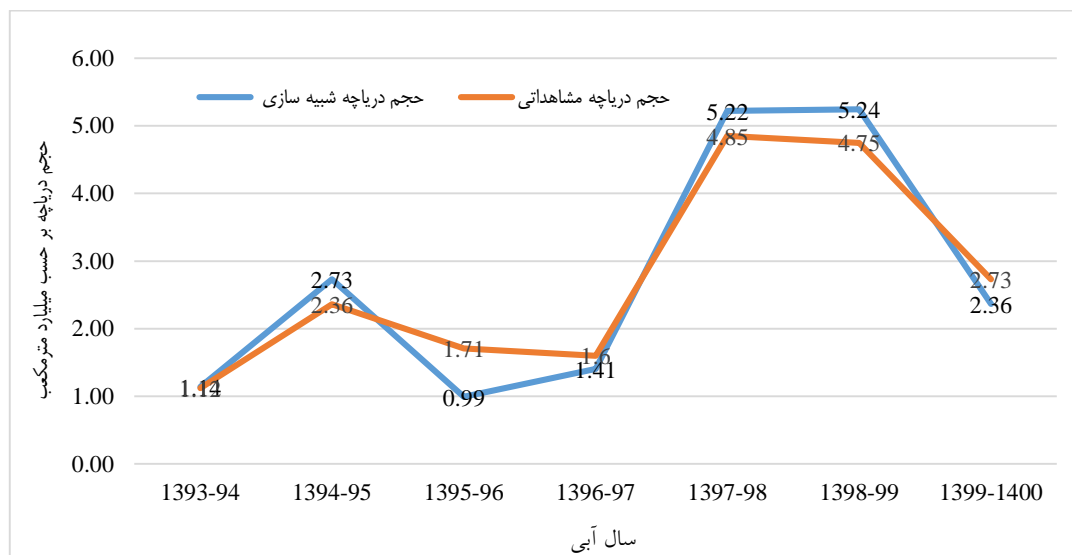
### ۳- نتایج و بحث

۳-۱- نتایج مدل MODSIM در شبیه‌سازی حجم دریاچه در وضع موجود

مطابق آنچه در بخش مواد و روش‌ها آورده شد مدل MODSIM در دوره موجود (سال‌های آبی ۱۳۹۴-۱۳۹۳ تا

مقدار  $R^2$  و NSE به یک نزدیک تر و ضریب RMSE به صفر نزدیک تر باشد نشان دهنده دقت بالای مدل سازی انجام شده است. ضرایب به دست آمده، نشان دهنده دقت بالای مدل در شبیه سازی وضع موجود است.

مقادیر حاصل از واسنجی مدل انطباق خوبی با داده های مشاهده ای دارند و می توان از صحت نتایج مدل، اطمینان قابل قبولی را بیان نمود. علاوه بر این مقدار ضریب تبیین ( $R^2$ )، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و ضریب نش-ساتکیلف (NSE) به ترتیب برابر ۰/۹۶، ۰/۴۲ و ۰/۹۱ به دست آمد که هرچه



شکل ۴- نتایج مشاهداتی و شبیه سازی حجم دریاچه (مدل MODSIM) سال های آبی ۱۳۹۳-۱۳۹۴ تا ۱۳۹۹-۱۴۰۰

Figure 4- Observation and simulation results of the lake volume (MODSIM Model) for the water years -2014-2015 to 2020-2021

۳-۳- نتایج بررسی وضعیت کمی جریان سطحی حوضه آبریز مبدأ در سناریو انتقال آب به دریاچه ارومیه  
مقدار انتقال آب از حوضه زاب به دریاچه ارومیه پس از اجرا و بهره برداری کامل طرح ها در سناریوهای مختلف در جدول ۳ آورده شده است. در جدول ۴ مقدار جریان خروجی ایران را پس از انتقال آب از حوضه زاب به دریاچه ارومیه پس از اجرا و بهره برداری طرح ها در سناریوهای مختلف آورده شده است. با ملاحظه جدول ۵ مشاهده می شود در سال آبی با وقوع خشکسالی، چنانچه سناریوی حداکثر جریان انتقال مورد اجرا قرار گیرد، از رودخانه زاب به سمت خروجی جریانی نخواهیم داشت و از نظر هیدروپلتیک برای کشور همسایه به لحاظ تأثیرگذاری در مصارف سد دوکان پذیرفته نخواهد شد. بنابراین، راهکارهای دیپلماسی آب برای کاهش تهدیدات محیط زیستی ضرورت می یابد. لذا مسأله انتقال آب از حوضه زاب به دریاچه ارومیه به دلیل عدم امکان به صفر رساندن جریان آب خروجی از کشور، نمی توان در درازمدت تضمین شده دانست.

### ۳-۲- نتایج ارزیابی اثر بخشی سناریوهای مورد بررسی افزایش حجم دریاچه

برای اجرای مدل و ارزیابی اثر بخشی سناریوهای تعریف شده، در ادامه مدل شبیه سازی شده برای شرایط آینده طی دوره های ۱۰ یا ۱۵ سال آبی آینده (۱۴۰۰-۰۱ تا ۱۴۱۴-۱۵)، با اعمال سناریوهای تعریف شده اجرا شد که نتایج اثر بخشی سناریوهای تعریف شده بر افزایش حجم دریاچه ارومیه طی افق های زمانی ۱۰ و ۱۵ ساله در جدول ۲ آورده شده است. بر اساس نتایج آن مقادیر حجم آب دریاچه در اثر اجرای سناریوهای چهار و شش بیشترین افزایش حجم آب دریاچه را البته با وقوع بارش و ورودی مناسب به همراه خواهند داشت. در خصوص نتایج سناریوی یک و یکسان بودن نتایج آن در دو دوره ۱۰ و ۱۵ ساله می توان بیان نمود از آنجا که در تعریف سناریوی یک سال خشک است و مقدار تبخیر آب دریاچه نسبت به میزان ورودی کم به دریاچه بیشتر است، از این رو در چندین سال متوالی افزایشی در حجم آب دریاچه رخ نمی دهد.

جدول ۳ مقدار خروجی جریان سطحی ایران از حوضه آبریز زاب بدون انتقال آب را نشان می دهد. ملاحظه می شود خروجی آب در دوره خشکسالی به حداقل ممکن می رسد و اثرگذار مقدار انتقال آب خواهد بود.

جدول ۲- نتایج اثربخشی سناریوهای تعریف‌شده در مدل شبیه‌سازی MODSIM بر افزایش حجم و تراز دریاچه

Table 2- Results of effectiveness of the scenarios defined in the MODSIM simulation model on increasing the volume of the Urmia Lake

سناریو	تراز دریاچه ارومیه (متر)	تأثیر روی حجم آب دریاچه در مدت ۱۰ سال (بیلیون مترمکعب)	تراز دریاچه ارومیه (متر)	تأثیر روی حجم آب دریاچه در مدت ۱۵ سال (بیلیون مترمکعب)
1	1270/92	3.57	1270.92	3.57
2	1271.27	4.77	1271.35	5.00
3	1271.24	4.65	1271.29	4.80
4	1272.03	7.40	1272.21	8.00
5	1271.63	5.97	1271.86	6.75
6	1272.59	9.38	1272.94	10.70

جدول ۳- مقدار خروجی جریان سطحی ایران از حوضه آبریز زاب بدون انتقال آب

Table 3- Iran's surface flow output from the Zab watershed without IBWT

شرایط	خروجی جریان سطحی از حوضه زاب (میلیون مترمکعب در سال)
نرمال	1748
دوره تر	4293
دوره خشکی	769

جدول ۴- مقدار انتقال آب از حوضه زاب به دریاچه ارومیه پس از اجرا و بهره‌برداری کامل طرح‌ها

Table 4- Amount of IBWT from Zab basin to Urmia Lake after the implementation and full exploitation of the projects

شرایط	انتقال آب بین حوضه‌های از حوضه زاب به دریاچه ارومیه (میلیون متر مکعب)
سناریوی IBWT از کانی سیب + سیلوه (کوتاه مدت)	600
سناریوی IBWT از کانی سیب + سیلوه (طولانی مدت)	528
سناریوی IBWT از کانی سیب + سیلوه (طولانی مدت)	743
سناریوی IBWT از کانی سیب + سیلوه (طولانی مدت)	834

جدول ۵- مقدار جریان خروجی ایران از حوضه زاب در سناریوهای مختلف (میلیون متر مکعب + درصد)

Table 5- Iran's outflow from the Zab basin in different scenarios (million cubic meters + percent)

سناریو	خروجی حوضه زاب (میلیون مترمکعب + درصد)				
	نرمال	درصد	دوره تر	درصد	دوره خشک
سناریوی IBWT از کانی سیب + سیلوه (کوتاه مدت)	1148	-34	3693	-14	169
سناریوی IBWT از کانی سیب+سیلوه (طولانی مدت)	1220	-30	3765	-12	241
سناریوی IBWT از کانی سیب+سیلوه (طولانی مدت)	1005	-42	3550	-17	26
سناریوی IBWT از کانی سیب+سیلوه (طولانی مدت)	914	-48	3459	-19	-65

## ۳-۴- نتایج روش تحلیل سلسه مراتبی

برای انجام مقایسات زوجی با تهیه پرسش‌نامه از ۱۰ نفر از خبرگان در سطح مدیریتی و کارشناسی شرکت مدیریت منابع آب ایران کمک گرفته شده است. برای تحلیل داده‌ها و استخراج نتایج حاصل از مقایسه‌های زوجی معیارها و گزینه‌ها استفاده شده است. با تنظیم ماتریس مقایسات، هر کدام از شاخص‌های اصلی و فرعی و همچنین هر کدام از گزینه‌ها، به صورت دو به دو (زوجی) در معرض قضاوت خبرگان این موضوع قرار گرفته است. بر اساس امتیازدهی به مقایسه بین چهار معیار اصلی (اقلیم،

مصارف آب، اقتصادی-اجتماعی و محیط زیستی) که عددی از ۱ تا ۹ اختیار می‌کند، ماتریس مقایسات زوجی معیارهای اصلی استخراج که نتایج آن در جدول (۶) آورده شده است. در جدول ۶ وزن معیارها به ترتیب اثرات اقتصادی-اجتماعی ۴۷/۹ درصد، اثرات اقلیمی ۲۵ درصد، اثرات مصارف آب کشاورزی ۱۵/۱ درصد و تأمین پایداری جریان ۱۲/۱ درصد به دست آمد. نهایی ارزیابی گزینه‌های طرح نجات دریاچه ارومیه شامل انتقال آب بین حوضه‌ای، کاهش ۴۰ درصدی مصارف آب کشاورزی از سدها و سایر رودخانه‌ها، کاهش ۴۰

آب سطحی (از سدها و برداشت‌های مستقیم) از داخل حوضه آبریز دریاچه ارومیه با وزن ۵۱/۹ درصد، در اولویت دوم کاهش ۴۰ درصدی مصارف کشاورزی در داخل حوضه آبریز از منابع آب زیرزمینی با وزن ۲۶/۱ درصد، در اولویت سوم انتقال آب از حوضه مجاور با وزن ۱۵/۵ درصد، در اولویت چهارم انتقال پساب با وزن ۶/۵ درصد پیشنهاد شده است.

درصدی مصارف کشاورزی از محل آب زیرزمینی و انتقال پساب‌ها بر مبنای روش AHP با در نظر گرفتن تمامی معیارهای اصلی و زیرمعیارها در جدول ۷ آورده شده است. نرخ ناسازگاری کلی برابر ۰/۰۷ به دست آمد که نشان می‌دهد نتایج قابل اتکا است. بر مبنای نتایج جدول مذکور، در راستای نجات دریاچه ارومیه اولویت اول کاهش ۴۰ درصدی مصارف کشاورزی از منابع

جدول ۶- معیارهای اصلی به لحاظ ارجحیت  
Table 6- Main criteria in terms of priority

رتبه	معیار	مقدار وزن
1	شاخص اجتماعی - اقتصادی	0.479
2	شاخص اقلیمی	0.250
3	شاخص مصرف	0.151
4	شاخص محیطی	0.121

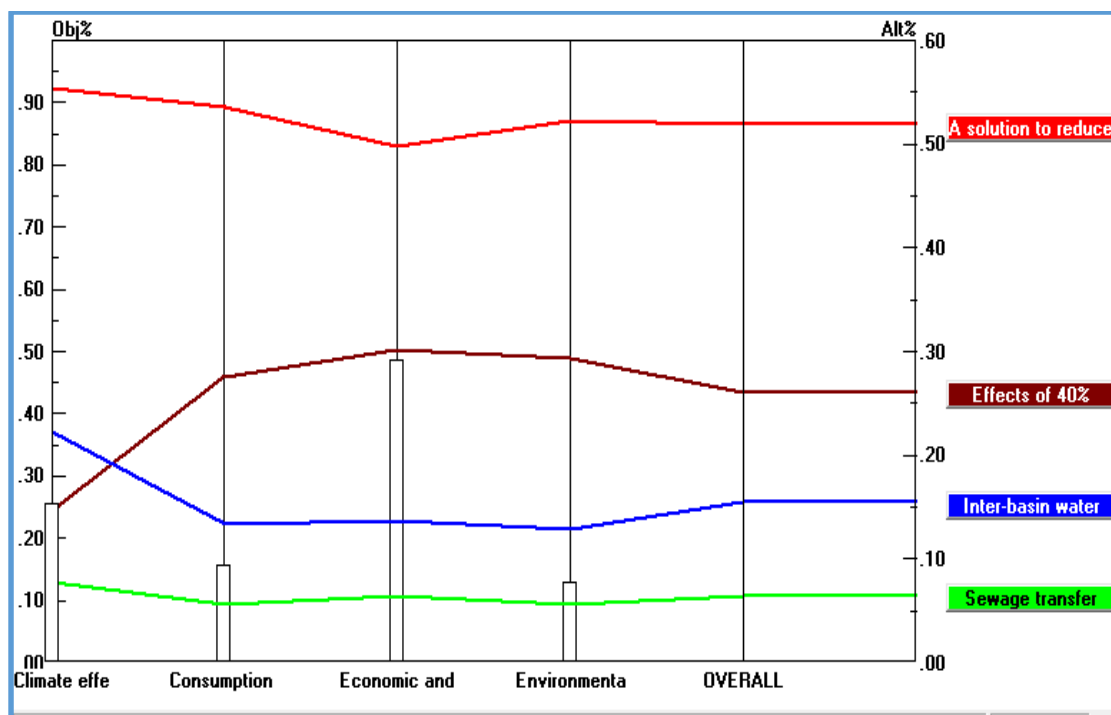
جدول ۷- ارزش وزنی گزینه‌ها و رتبه‌بندی آن‌ها  
Table 7- weighted value of options and their ranking

شماره	گزینه‌ها	مقدار وزنی	رتبه
1	انتقال آب بین حوضه‌ای	0.155	3
2	کاهش ۴۰ درصدی مصرف آب کشاورزی سدها و سایر آب‌های سطحی	0.519	1
3	انتقال فاضلاب	0.065	4
4	کاهش ۴۰ درصدی مصرف آب کشاورزی در آب‌های زیرزمینی	0.261	2

#### ۴- نتیجه‌گیری

تقریباً در سه دهه گذشته با دریافت ۳/۱ میلیارد مترمکعب پایداری دریاچه ارومیه متکی به سازگاری و تعادل بین منابع و مصارف درون حوضه آبریز خودش بوده است. لیکن عمدتاً افزایش مصارف و مداخلات انسانی، به تدریج موجب ناپایداری و خشک شدن دریاچه شد. به نظر می‌رسد دولت بنا به شرایط اضطراری برای تأمین حقایق دریاچه و اهمیت معیار اقتصادی-اجتماعی و فشارهای سیاسی، در کوتاه‌مدت قادر به کاهش مصارف آب و اصلاح مسیر حکمرانی گذشته با حفظ درآمد و معیشت جایگزین کشاورزان نبوده است و انتقال آب بین حوضه‌ای حداکثر به مقدار ۶۰۰ میلیون مترمکعب را از جنبه کمک و جبران کسری تأمین حقایق دریاچه از درون حوضه آبریز به اجرا گذاشته است. در این مطالعه شش سناریو (راهکارهای اجرایی برنامه‌ریزی شده) شامل انتقال آب بین حوضه‌ای، کاهش ۴۰ درصدی مصارف آب کشاورزی از سدها و سایر رودخانه‌ها، کاهش ۴۰ درصدی مصارف کشاورزی از محل آب زیرزمینی، انتقال پساب‌ها با مدل MODSIM شبیه‌سازی و جداگانه با روش سلسله مراتبی اولویت‌بندی شده‌اند. وزن معیارها به ترتیب اثرات اقتصادی-اجتماعی ۴۷/۹ درصد، اثرات اقلیمی ۲۵ درصد، اثرات مصارف آب کشاورزی ۱۵/۱ درصد و تأمین پایداری جریان ۱۲/۱ درصد ارزیابی شد.

نتایج حساسیت‌پذیری روش AHP در شکل ۵ آورده شده است که می‌توان با تغییر در شاخص‌ها، تغییرات گزینه‌ها را مشاهده نمود. در این شکل گزینه‌ها به صورت ستونی با اولویت از بالا به پایین نشان داده شده‌اند و حساسیت آن‌ها نسبت به معیارها نیز در محور افقی نمایش داده شده‌اند. به طور مثال، اولین اولویت گزینه‌ها با عنوان (مصارف آب سطحی از سد و رودخانه‌ها) نسبت به وضعیت اقتصادی و اجتماعی وزن حدود ۴۹/۷ درصد و نسبت به وضعیت اقلیمی وزن حدود ۵۳/۳ درصد را دارا است. وضعیت اقتصادی اجتماعی با بیش‌ترین وزن به همراه شرایط تغییرات اقلیمی (خشکسالی‌های مستمر) و متعاقب آن مصرف بیش از حد مجاز (مصارف آب سطحی و زیرزمینی) در حوضه آبریز و کاهش پایداری جریان رودخانه‌ها و استمرار این وضعیت موجب عدم پایداری تراز و حجم آب دریاچه شده است. در این خصوص با ارائه چهار گزینه (راه‌حل‌های پیشنهادی) اثربخشی آن‌ها به ترتیب اولویت در سمت راست نمودار (کاهش ۴۰ درصدی از مصارف کشاورزی از آب سطحی رودخانه‌ها توسط برداشت مستقیم و پایاب سدها، کاهش ۴۰ درصدی مصارف کشاورزی از آب زیرزمینی، انتقال آب بین حوضه‌ای و در نهایت انتقال پساب‌ها) نشان داده شده است.



شکل ۵- نتایج تحلیل حساسیت دینامیک گزینه‌ها به تغییر در شاخص‌ها در مدل AHP  
Figure 5- Results of the sensitivity analysis of the model compared to the dynamic method

۳/۵۷ تا ۱۰/۷ میلیارد مترمکعب است. نتایج حاصله از این پژوهش و هزینه‌های بالای تأمین آب ایجاب می‌کند به موازات بررسی گزینه‌های قابل‌مناقشه و هزینه‌بر طرح‌های انتقال آب بین‌حوضه‌ای، مدیریت کلان منابع آب به سمت مدیریت تقاضا و مصرف و برنامه‌های صرفه‌جویی آب و اصلاح الگوهای مصرف آب و قانونمندی رفتار مصرف‌کنندگان آب از درون حوضه آبریز دریاچه ارومیه به‌عنوان راه‌حل‌های کم‌هزینه، پایدار و قابل اعتماد باشد.

#### سپاسگزاری

بدین‌وسیله از همکاری و مساعدت آقای مهندس فانی‌حق، آقای دکتر قبائی و آقای مهندس سیدعلوی و سایر کارشناسان شرکت مدیریت منابع آب ایران و آقای مهندس حاجی‌مرادی از ستاد احیای دریاچه ارومیه در انجام مراحل مختلف پژوهش از جمله در اختیار قرار دادن داده، بازدیدهای میدانی، تکمیل پرسش‌نامه و غیره قدردانی می‌شود. همچنین تأمین مالی پژوهش مستقل از اشخاص حقیقی و حقوقی بوده است.

نتایج تجزیه و تحلیل سناریوها، تحلیل سلسله مراتبی و آمار ایستگاه‌های هیدرومتری در سال‌های مورد نظر نشان می‌دهد، حفاظت از دریاچه مستلزم اصلاح اشتباهات مسیر پیموده‌شده در سنوات جاری و گذشته است و ارجحیت با کاهش ۴۰ درصدی مصارف کشاورزی از سدها و سایر رودخانه‌ها و منابع آب زیرزمینی درون حوضه آبریز به‌عنوان تأمین‌کننده اصلی حبابه دریاچه ارومیه است و مکانیزم کنترل آن وجود دارد. انتقال آب بین‌حوضه‌ای در اولویت بعدی قرار می‌گیرد چون حوضه آبریز مبدأ در مواجهه با خشکسالی‌ها به دلیل کاهش رواناب، چالش‌ها و اثرات منفی اقتصادی و اجتماعی قادر به انتقال آب به مقدار پیش‌بینی و گنجانده‌شده در برنامه (۶۰۰ میلیون مترمکعب در هر سال) نخواهد بود. علاوه بر آن از نظر هیدروپلتیک با کشور همسایه به لحاظ تأثیرگذاری در مصارف فرامرزی پایین‌دست و کاهش تهدیدات محیط زیستی راهکار دیپلماسی آب ضرورت می‌یابد. نتایج کلی اثربخشی افزایش تراز و حجم دریاچه در قالب سناریوهای مبتنی بر راهکارهای تعریف‌شده نیز نشان داد دامنه اثربخشی سناریوهای شش‌گانه مورد بررسی طی ۱۰ سال آینده بین ۳/۵۷ تا ۹/۳۸ میلیارد مترمکعب و طی ۱۵ سال آینده بین

#### منابع

دلفی. علوم و تکنولوژی محیط زیست، ۲۲(۱)، ۱۰۱-۱۰۸.  
doi:10.30495/jest.2019.22985.3204  
آرامی شام‌اسی، فرشته، کانونی، امین، و رانی نظامی، سعید (۱۴۰۰).  
تأثیر سناریوهای مختلف مدیریتی بر تغییرات کمی منابع آب

عجازی، علیرضا، شریعت، محمود، و فرشچی، پروین (۱۳۹۹). شناسایی و رتبه‌بندی علل بروز بحران دریاچه ارومیه با به‌کارگیری روش

محسنی‌زاده، احسان، و شوریان، مجتبی (۱۳۹۶). برنامه‌ریزی تخصیص بهینه منابع آب در سطح حوضه آبریز با استفاده از تلفیق مدل شبیه‌سازی MODSIM و الگوریتم بهینه‌سازی فاخته (COA). تحقیقات منابع آب ایران، ۱۳(۴)، ۱-۱۶.

مرکز بررسی‌های استراتژیک ریاست جمهوری، (۱۳۹۸). گزارش بررسی تجارب برنامه‌های احیای دریاچه ارومیه. کد گزارش: ۹۸-۲۱۶.

وزارت نیرو، (۱۳۹۱). مطالعات بهنگام‌سازی طرح جامع آب کشور. جلد چهارم، گزارش منابع آب سطحی (کمی و کیفی) حوضه آبریز ارومیه.

موسوی، سیدمرتضی، سرائی تبریزی، مهدی، و طلاچی لنگرودی، حسین (۱۴۰۰). بررسی ارزش اقتصادی آب در مصارف زیست‌محیطی، کشاورزی و صنعت (مطالعه موردی: حوضه آبریز دریاچه ارومیه). انسان و محیط زیست، ۵۸، ۷۹-۹۵.

یاسی، مهدی (۱۳۹۶). مدیریت رودخانه‌ها و سدها در تأمین و هدایت آب به دریاچه ارومیه. پژوهش‌های راهبردی در علوم کشاورزی و منابع طبیعی، ۱(۲)، ۱-۷۶.

حوزه بالخلی‌چای و آبخوان دشت اردبیل با استفاده از مدل MODSIM. مدیریت آب و آبیاری، ۱۱(۴)، ۹۳۳-۹۳۵. doi:10.22059/jwim.2022.332010.929

آل محمد، سیده، یآوری، احمدرضا، صالحی، اسماعیل، و زبردست، لعبت (۱۳۹۵). به‌کارگیری ارزیابی راهبردی محیط زیست به‌منظور تدوین سیاست‌های برنامه توسعه پایدار دریاچه ارومیه. محیط شناسی، ۴۰(۳)، ۶۴۵-۶۶۷. doi:10.22059/jes.2014.52211

سلیم‌پور ناغانی، شاهین، هاشمی منفرد، سیدآرمان، و اژدری مقدم، مهدی (۱۴۰۰). مدل‌سازی اثرات انتقال آب بین‌حوضه‌ای بر سطح و حجم آبخوان حوضه مبدأ انتقال با استفاده از نرم‌افزار WEAP (مطالعه موردی: اثر انتقال آب رودخانه بهشت‌آباد بر سطح و حجم آبخوان شلمزار). جغرافیا و توسعه، ۱۹(۶۲)، ۱۸۳-۲۰۸. doi:10.22111/gdij.2021.6027

شرکت سهامی آب منطقه‌ای آذربایجان غربی، (۱۳۸۴). مطالعات مدیریت جامع منابع و مصارف آب حوضه آبریز رودخانه‌های زاب و گدار. گزارش برنامه‌ریزی منابع آب.

صادقی، سیدحمیدرضا، کاظمی‌کیا، سمیه، خیرفام، حسین، و حزباوی، زینب (۱۳۹۵). تجارب و پیامدهای انتقال آب بین‌حوضه‌ای در جهان. تحقیقات منابع آب، ۱۲(۲)، ۱۲۰-۱۴۰.

## References

- Alemohammad, S., Yavari, A., Salehi, S., & Zebardast, L. (2014). Using the strategic environmental assessment for compilation polices of sustainable development plan in Lake Urmia. *Journal Environmental Studies*, 40(3), 645-667. doi: 10.22059/jes.2014.52211 [In Persian]
- Arami Shamasbi, F., Kanooni, A., & Rasinezami, S. (2022). The effect of different management scenarios on quantitative changes in water resources of Balekhlichai river watershed and Ardabil plain aquifer using MODSIM model. *Water and Irrigation Management*, 11(4), 923-935. doi: 10.22059/jwim.2022.332010.929 [In Persian]
- Bui Tien, D., Talebpour Asl, D., Ghanavati, E., Al-Ansari, N., Khezri, S., Chapi, K., Amini, A., & Thai Pham, B. (2020). Effects of inter-basin water transfer on water flow condition of destination basin. *Sustainability*, 12(1), 338. doi:10.3390/su12010338
- Center For Strategic Studies, (2019). Report on the experience of the lake revitalization program, report code 98-216. [In Persian]
- Ejazi, A.R., Shariat, M., & Farshchi, P. (2020). Recognition and ranking the causes of the outbreak crises in Uromieh Lake Using Delphi Technique. *Environmental Science and Technology*, 22(1), 101-108. doi:10.30495/jest.2019.22985.3204 [In Persian]
- Los Angeles Department of Water and Power, (2020). Effectiveness and Impacts of Dust Control Measures for Owens Lake. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine.
- Micklin, P., Aladin, N.V., Chida, T., Boroffka, N., Plotnikov, I.S., Krivonogov, S., & White, K. (2020). The Aral Sea: A Story of Devastation and partial recovery of a large lake. *Large Asian Lakes in a Changing World Natural State and Human Impact*, Springer Water. doi:10.1007/978-3-030-42254-7\_4
- Ministry of Energy, (2012). Studies on the modernization of the country's comprehensive water plan, the fourth volume. Report of surface water resources (quantitative and qualitative) of the Urmia watershed. [In Persian]
- Mohsenizadeh, E., & Shourian, M. (2017). Optimum water resources allocation planning at basin scale by integrating MODSIM and Cuckoo optimization algorithm. *Iran-Water Resources Research*, 13(4), 1-16. [In Persian]
- Mousavi, S.M., Sarai Tabrizi, M., & Talachi Langeroudi, H. (2021). Investigating the Economical Value of Water in Environmental, Agricultural and Industrial Use (Case Study: Urmia Lake Watershed). *Human and Environment*, 58, 79-95. [In Persian]
- Psomas, A., Panagopoulos, Y., Konsta, D., & Mimikou, M. (2016). Designing water efficiency measures in a catchment in Greece using WEAP and SWAT models. *Procedia Engineering*, 162, 269-276. doi:10.1016/j.proeng.2016.11.058

- Regional Water Authority of West Azarbaijan*, (2005). Comprehensive Management of Water Resources and Consumption of Zab and Godar Rivers Basin. Water Resources Planning Report. [In Persian]
- Sadeghi, S.H.R., Kazemi Kia, S., Kheirfam, H., & Hazbavi, Z. (2016). Experiences and consequences of inter-basin water transfer worldwide. *Iran Water Resources Research*, 12(2), 120-140. [In Persian]
- Salimpour, S., Hashemi Monfared, S.A., & Azhdary Moghaddam, M. (2021). Modeling the effects of inter-basin water transfer on the surface and volume of the aquifer of the origin catchment by using WEAP software (Case Study: Effect of Water transfer of Behesht Abad River on Surface and Volume of Shalamar Aquifer). *Geography and Development*, 19(62), 183-208. doi:10.22111/gdij.2021.6027 [In Persian]
- Sheng, J., Tang, W., & Webber, M. (2020). Can inter basin water transfer affect water consumption and pollution? Lessons from China's South–North water transfer project. *Environmental Policy and Governance*, 30(6), 345-358. doi:10.1002/eet.1891
- Urmia Lake Rehabilitation Center*, (2014). Review and macro evaluation reports of the water transfer plan from the Caspian Sea to Urmia Lake. ULRP-Rep Caspian and The latest status of Lake Urmia and the status of the progress of Urmia Lake rescue projects. [In Persian]
- Wu, L., & Huang, Q. (2020). Tradeoff analysis between economic and ecological benefits of the inter basin water transfer project under changing environment and its operation rules. *Journal of Cleaner Production*, 248, 119294. doi:10.1016/j.jclepro.2019.119294
- Wurtsbaugh, W.A., & Sima, S. (2022). Contrasting Management and Fates of Two Sister Lakes: Great Salt Lake (USA) and Lake Urmia (Iran). *Water*, 14(19), 3005.
- Yasi, M. (2017). Management of rivers and dams in supplying and delivering water to Urmia Lake. *Strategic Research Journal of Agricultural Sciences and Natural Resources*, 2(1), 59-76. [In Persian]
- Zhang, E., Xu, Z., & Yang, Z. (2018). Bottom-up quantification of inter-basin water transfer vulnerability to climate change. *Ecological Indicators*, 92, 195-206. doi:10.1016/j.ecolind.2017.04.019
- Zhou, Y., Guo, S., Hong, X., & Chang, F.J. (2017). Systematic impact assessment on inter-basin water transfer projects of the Hanjiang River Basin in China. *Journal of Hydrology*, 553, 584-595. doi:10.1016/j.jhydrol.2017.08.039