Journal of Interdisciplinary Studies in the Humanities, 9(4), 1-21, Autumn 2017

Azizi, Gh., Nazif, S., & Abbasi, F. (2017). An assessment of the influence of climate change on Urmia lake's water level reduction. *Journal of Interdisciplinary Studies in the humanities*, 9(4), 1-21. doi: 10.22631/isih.2017.2482.2901

Doi: https://www.doi.org/10.22631/isih.2017.2482.2901 URL: http://www.isih.ir/article_264.html

2008-4641 / © The Authors. This is an open access article under the CC BY 4.0 license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0).

An Assessment of the Contribution of Climate Change to Urmia Lake's Water Level Reduction

Ghasem Azizi*[1], Sara Nazif[2], Faezeh Abbasi[3]

Received: Nov. 19, 2016; Accepted: Dec. 26, 2016

Extended Abstract

This study examined the drop in water level, significant decrease in the lake's surface area, and increase in salinity of the Urmia Lake, which is one of the most valuable water habitats in Iran. Therefore, to reach a better understanding of the processes that affect the lake's water level fluctuations and assessing the contributions of every responsible parameter, System water consumption designed in The Lake Basin in the Vensim and the effects of each variable on the water level of the lake were evaluated using a set of different scenarios. The findings suggest that in comparison with other variables, the operation of dams (26%) as well as the increase in water requirement (16%) by variables have played a role in reducing the input to the lake. Climate variables had a role of up to 16% within the time span of 1999-2014. Although hydrograph indicates aquifer deterioration in some of them, the entrance to the lake water budget is negligible.

Keywords: Climate change, System dynamism, Urmia Lake, Water resource management, Vensim Model

1. Associate Professor of Climatology, Department of Physical Geography, University of Tehran, Tehran, Iran (Corresponding Author).
✉ ghazizi@ut.ac.ir

2. Assistant Professor of Civil Engineering, School of Civil Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.
✉ snazif@ut.ac.ir

3. PhD Candidate of Climatology, Department of Physical Geography, University of Tehran, Tehran, Iran.
✉ Abbasi87@u.ac.ir

Introduction

The rapid changing phenomena of the earth's surface have made it necessary to explore and identify natural and human processes. In this regard, studying the fluctuations in the lake's water level fluctuations is of particular importance both as a natural heritage and as one of the challenges facing human societies in achieving sustainable water resources. In recent years, the status of the lake drainage and its gradual drying process has created important economic, environmental, and social problems at the regional and national levels. The creation of salt hazards, desertification and its spread to agriculture and residential areas, and the subsequent destruction of agricultural lands and gardens, as well as the increase in the migration from the adjacent areas of the lake, should be considered as the most important hazards. The process of drying of the lake has begun since 20 years ago, and it has reduced by more than 8 meters during this time.

Purpose

The main aim of this study is to identify and determine the impact of each natural and human factor on the water level fluctuations of the lake.

Methodology

The dynamic model of the changes of lake water balance was studied using the dynamics of systems as an appropriate analysis tool. Based on this view, various components of the Urmia basin system and the relationship between its subsystems were defined (Figure.1). The economic, social, and environmental cumulative impacts of development plans at basin, as well as climate change, were estimated. Software tools like Vensim, which is designed to understand the dynamics of the system and is one of the most powerful tools for studying water resource systems, were used. Accordingly, we divided the lake's water resources system into three subsystems: climate variables, groundwater, and surface runoff. Some factors were also identified in each subsystem, including the effects of the growth of irrigated lands and changing pattern of water requirement. It should be noted that the necessary data were provided and introduced into the model after quality control within the time span of 1999-2014.

Data and Results

Calibration of the simulated pattern behavior showed that the provided pattern represents the actual system, and the model represents the real system and can be a valid example of the behavior of observed level. The pattern changes of the lake level were investigated by designing a set of different scenarios. The indicators for assessing scenarios include changing climatic conditions, dams operations, water requirement pattern, and the interaction of the lake with the adjacent aquifers. Moreover, the current trend of precipitation and evapotranspiration stations around the lake was compared with the trend of these two variables within the time span of ۱۹۸۲-۱۹۹۷. The results of this scenario showed that the maximum impact of declining rainfall and increasing evaporation on reducing the water level of the lake is 16%. However, the reasons for transformation in the amount of rainfall and evaporation in the local or regional scale needs further research in this field. The examination of the other variables such as surface flow, which has the most portion of the input flow to the lake, showed that the development of agriculture in the catchment accompanied with the

Interdisciplinary Studies in the Humanities
Vol. 9
No. 4
Autumn 2017

triple growth of irrigated lands led to the increase in the annual water consumptions. Thus, these variables should be mentioned as the main factors affecting the fluctuations in the lake level. This scenario indicates that these factors have contributed to 42% of the lake level changes. The groundwater flow is the third subsystem. Our examinations showed that the interaction of the lake with the adjacent aquifers is as the drainage flow to the surface along negligible value. Gradually, the excessive exploitation of aquifers and the disruption of the underground water flows to rivers led to supplant the interphase threshold and the progress of the saltwater to the aquifer.

Innovation, Limitations and Implications

The innovations of this research are as follows:

- Operation of dams cannot be considered as the only main reason for the decline in the lake's water level. The changes in cropping patterns that consequently change the pattern of water demand in the basin also have significant impacts on the reducing water level of the lake.
- Natural factors contribute only 16% to the decline in the lake's water level. These factors only slow down the rate of decline of the lake levels. In other words, the current trend of declining lake water levels is substantially independent of climatic variables.
- One of the main constraints of this research should be expressed to access to long-term data.

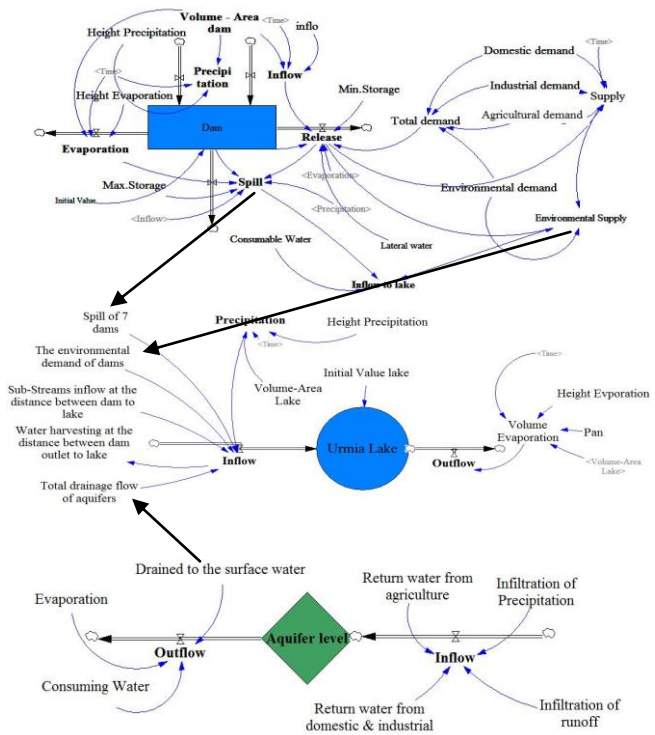


Figure1: Conceptual Pattern of Water Resources in Urmia Lake Basin in Vensim

Bibliography

Ahadnejad, M., & Maruyama, Y. (2010). Study of Uremia Lake level fluctuations and predict probable changes using multi-temporal satellite images and ground truth data period (1976-2010). In: *New Challenge about Climate Change or Human Impact.* Map Asia 2010 & ISG 2010 Conference, Kuala Lumpur, Malaysia.

Ahmadzadeh, T., Ahmadzadeh, B., Moradi, Sh., & Baghvand, A. (2010). Mo'ādelāt-e parametrhā-ye asargozār dar navasānāt-e sath-e Daryāče-ye Urmia [Equation parameters affecting the fluctuation of the Lake]. *4th Hamāyeš-e Taxassosi-ye Mohandesi-ye Mohit-e Zist* [The Fourth Environmental Engineering Conference], Tehran, Iran.

Alami, M. T., Farzin, S., Ahmadi, M. H., & Aghabalaee, B**.** (2014). Modelsāzi-ye puyā-ye sistem-e sad va ābhā-ye zirzamini be manzur-e modiriyat-e behine-ye āb (Motāle'e-ye mowredi: Sad-e Golak [System dynamics modeling of dam and groundwater for optimal water management (Case study: Golak Dam)]. *Journal of Mohandesi-ye Omrān va Mohit-e Zist/Civil and Environmental Engineering*, 44(1), 1-12.

Azizi, Gh. (2004). *Taghyir-e eqlim* [Climate change]. Tehran, Iran: Ghoomes publications.

Bayazidi, Sh., Mooraki Ali Abadi, H., & Salvitabar, A. (2012). Barresi-ye āškārsāzi-ye taghyir-e eqlim bar howze-ye Daryāče-ye Urmia [Check the detection of climate change on the basin of Lake Urmia]. *9th Kongre-ye Beynolmelali-ye Mohandesi-ye Omrān* [The Ninth International Congress of Civil Engineering], Tehran, Iran. https://www.tpbin.com/article/24389

Charbgo, T., & Charbgho, A. (2010). Peyāmadhā-ye manfi-ye sadsāzi dar howze-ye ābriz-e Daryāče-ye Urmia va ta'sir-e ān dar xoškšodan-e Daryāče-ye Urmia [The negative consequences of dam lake's basin and its impact on the drying of Lake Urmia]. *5th Hamāyeš-e Melli-ye Zaminšenāsi va Mohit-e Zist* [Fifth National Conference of Geology and Environment], Tehran, Iran.

Delju, A. H., Ceylan, A., Piguet, E., & Rebetez, M. (2013). Observed climate variability and change in Urmia Lake basin, Iran. *Theoretical and Applied Climatology*, 111(1), 285-296. doi: 10.1007/s00704-012-0651-9

Fartookzadeh, H. (1992). Negāhi be puyāyi-ye sistemhā [Look at the dynamics of the system]. *Journal of Dāneš-e Modiriyat/Knowledge Management*, 17, 29-34.

Fathian, F., Morid, S., & Arshad, S. (2013). Arzyābi-ye ravand-e taghyirāt-e kārbari-ye arāzi bā estefāde az fanāvari-ye sanješ az dur va ertebāt-e ān bā ravand-e jaryān-e rudxānehā (Motāle'e-ye mowredi: Zirhowzehā-ye Šarq-e Daryāče-ye Urmia) [Assessment of land use changes using remote sensing technology and its relationship with the flow of rivers (Case study: East sub-basin of Lake Urmia)]. *Journal of Āb va Xāk/Soil and Water*, 27(3), 642-655. doi: 10.22067jsw.v0i0.26091

Gholabian, H. (2010). Tarh-e ehyā' va tasbit-e Daryāče-ye Urmia be komak-e āb-e Daryā-ye Xazar [Plan of stabling Urmia Lake with the help of the Caspian Sea]. *Journal of Mohandesin-e Mošāver/Consulting Engineers*, 47, 70-82.

Interdisciplinary Studies in the Humanities

Vol. 9
No. 4
Autumn 2017

Gholian, S., Abrishamchi, A., & Tajrishi, M. (2007). Tahlil-e siyāsathā-ye bahrebardāri az manābe'-e āb dar howze-ye ābriz bā raveš-e puyāyi-ye system [A system dynamics - based analysis of operation policies for water resources at river basin scale]. *Journal of Āb-o-Fazelāb/Water and Wastewater Journal*, 18(3), 70-80.

Guo, H., Hu, Q., & Jiang, T. (2008). Annual and seasonal streamflow responses to climate and land-cover changes in the Poyang Lake basin, China. *Journal of Hydrology*, 355(1-4), 106-122. doi: 10.1016/j.jhydrol.2008.03.020

Hasani Mahmouei, B., Darvish, M., Fathollahzadeh, H., & Mosayebi, M. (2011). Naqš-e taghyirāt-e āb-o-havāyi va eqlimi dar kāheš-e tarāz-e sath-e āb-e Daryāče-ye Urmia [The role of climate change in reducing the water level of Lake Urmia]. *Hamāyeš-e Melli-ye Taghyir-e Eqlim va Ta'sir-e ān bar Kešāvarzi va Mohit-e Zist* [National Conference on Climate Change and Its Impact on Agriculture and the Environment] (pp 727-734), Urmia, Iran.

Hasanzadeh, E. (2010). *Ta'in-e sahm-e sāxt-e sāzehā-ye hydraulici bar kāheš-e tarāz-e āb-e Daryāče-ye Urmia* [Determining the effect of constructing hydraulic structures on declining the Urmia Lake level] (M.A. Thesis). Department of Water Engineering, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz.

Jalili, S., Kirchner, I., Livingstone, D. M., & Morid, S. (2012). The influence of large-scale atmospheric circulation weather types on variations in the water level of Lake Urmia, Iran. *International Journal of Climatology*, 32(13), 1990-1996. doi: 10.1002/joc.2422

Kabiri, K., Pradhan, B., Sharifi, A., Ghobadi, Y., & Pirasteh, S. (2012). Manifestation of remotely sensed data coupled with field measured meteorological data for an assessment of degradation of Urmia Lake, Iran (Vol. 6). In: *Asia Pacific Conference on Environmental Science and Technology,* APEST, Kuala Lumpur, Malaysia.

Kebede, S., Travi, Y., Alemayehu, T., & Marc, V. (2006). Water balance of Lake Tana and its sensitivity to fluctuations in rainfall, Blue Nile basin, Ethiopia. *Journal of Hydrology*, 316(1-4), 233-247. doi: 10.1016/j.jhydrol.2005.05.011

Luna, E. J. R. (2011). *Water level fluctuations of Lake Enriquillo and Lake Saumatre in response to environmental changes* (Unpublished doctoral dissertation). Cornell University.

Mortsch, L., Alden, M., & Scheraga, J. D. (2003). Climate change and water quality in the great lakes region. *Climate Change and Water Quality in the Great Lakes Basin.* Report of the Great Lakes Water Quality Board to the International Joint Commission. Available from the International Joint Commission (commission@ ottawa. ijc. org).

Ostrovsky, I., Rimmer, A., Yacobi, Y. Z., Nishri, A., Sukenik, A., Hadas, O., & Zohary, T. (2013). Long-term changes in the Lake Kinneret ecosystem: The effects of climate change and anthropogenic factors. *Climatic Change and Global Warming of Inland Waters: Impacts and Mitigation for Ecosystems and Societies* (pp. 271-293).

Pourfallah, H., & Moshtagh, R. (2013). Modiriyat-e manābe'-e āb be komak-e raveš-e puyāyi-

ye system bā estefāde az model-e Venism [Water resources management using system dynamic model]. *1st Hamāyeš-e Melli-ye Bohrān-e Āb* [The First National Conference on the Water Crisis], Islamic Azad University, Isfahan, Iran.

Rasouli, A. A., Abbasian, Sh., & Jahanbakhsh, S. (2008). Pāyeš-e navasānhā-ye sath-e āb-e Daryāče-ye Urmia bā pardāzeš-e tasāvir-e māhvārei-ye čandsanjandei va čandzamānei [Monitoring lake water level fluctuations with multi-sensor and multi temporal satellite image processing]. *Journal of Modarres-e Olum-e Ensāni/Human Sciences*, 12(2), 54-71.

Sellinger, C. E., Stow, C. A., Lamon, E. C., & Qian, S. S. (2008). Recent water level declines in the Lake Michigan - Huron system. *Environmental Science & Technology*, 42(2), 367-373. doi: 10.1021/es070664

Shelton, M. L. (2011). *Hydroclimatology* [Hydroclimatology: Perspectives and applications] (H. Zolfaghari, Trans.). Kermanshah: University of Razi.

Studies and Water Resources Research Institute (2013). *Barresi-ye taghyir-e šarāyet-e mohiti dar howze-ye ābriz-e Daryāče-ye Urmia (vaz'iyat-e ābhā-ye zirzamini)* [Evaluation of changes in environmental conditions in the Lake Urmia basin (state of underground water)]. Research Project West Azerbaijan Regional Water Company Regional & Studies and Water Resources Research Institute.

Wang, X., Gong, P., Zhao, Y., Xu, Y., Cheng, X., Niu, Z., & Li, X. (2013). Water-level changes in China's large lakes determined from ICESat/GLAS data. *Remote Sensing of Environment*, 132, 131-144. doi: 10.1016/j.rse.2013.01.005

Zamani Akbari, A., & Maleki, S. (2011). Arzyābi-ye taghyirāt-e xat-e sāheli-ye Daryāče-ye Urmia teye doreye 1989-2005 bā estefāde az dadehay-e GIS & RS [Shoreline change analysis of Urmia Lake during the period of 1989-2005 using GIS & RS]. *8th National Conference on Geomatics* (pp. 1-11).

.

فصلنامه مطالعات میان‌رشته‌ای در علوم انسانی، ۹(۴)، ۲۱-۱، پاییز ۱۳۹۶

عزیزی، قاسم؛ نظیف، سارا؛ و عباسی، فائزه (۱۳۹۶). ارزیابی سهم تغییر اقلیم در کاهش تراز آب دریاچه ارومیه. فصلنامه مطالعات میان‌رشته‌ای در علوم انسانی، ۹(۴)، ۲۱-۱. doi: 10.22631/isih.2017.2482.2901

شاپا: ۴۶۴۱-۲۰۰۸ URL: http://www.isih.ir/article_264.html Doi: https://www.doi.org/10.22631/isih.2017.2482.2901

© نویسندگان / دسترسی به متن کامل مقاله براساس قوانین کریتیو کامانز CC BY 4.0 آزاد است. (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0)

ارزیابی سهم تغییر اقلیم در کاهش تراز آب دریاچه ارومیه

قاسم عزیزی*[۱]، سارا نظیف[۲]، فائزه عباسی[۳]

دریافت: ۱۳۹۵/۰۸/۲۹؛ پذیرش: ۱۳۹۵/۱۰/۰۶

چکیده

دریاچه ارومیه یکی از مهم‌ترین و ارزشمندترین زیست‌بوم‌های آبی ایران است که در حال حاضر در شرایط بحرانی قرار گرفته و تغییرات زیادی در ویژگی‌ها و عملکردهای آن به‌وجود آمده که افت تراز آب، کاهش بسیار شدید مساحت دریاچه و افزایش شوری آب، ازجمله این موارد است. هدف این مقاله، شناخت بهتر فرایندهای مؤثر بر نوسانات تراز آب دریاچه و ارزیابی سهم هریک از مؤلفه‌های تأثیرگذار است؛ ازاین‌رو، سیستم منابع و مصارف آب در محدوده حوضه آبریز دریاچه در قالب الگوی ون‌سیم طراحی شد. در طراحی الگو، اندرکنش و روابط متقابل مؤلفه‌های اثرگذار، شامل سدهای حوضه، برداشت از آبخوان‌ها، و متغیرهای اقلیمی، بر سطح دریاچه در مقیاس ماهانه در بازه زمانی ۱۳۹۳-۱۳۷۸ درنظر گرفته شد. پس از واسنجی الگو، روند تأثیرگذاری هریک از متغیرها بر تراز آب دریاچه با طراحی سناریوهای مختلف ارزیابی شد. یافته‌ها حاکی از این است که بهره‌برداری از سدهای حوضه (۲۶ درصد) به‌همراه افزایش نیاز آبی (۱۶ درصد) به‌ویژه در بخش کشاورزی، درمجموع سبب کاهش ۴۲ درصدیِ جریان سطحی ورودی به دریاچه شده‌اند. متغیرهای اقلیمی نیز سهمی معادل ۱۶ درصد داشته‌اند. در مورد نقش آبخوان‌های ساحلی دریاچه نیز، هرچند آب‌نگاری معرف آبخوان‌ها، روند افت تراز آبخوان‌ها و پیشروی جبهه آب شور را در برخی از آن‌ها نشان می‌دهد، بااین‌حال تراز آب زیرزمینی ورودی به دریاچه، مقدارِ ناچیزی به‌دست آمد. گفتنی است میزان آب زهکشی‌شده از دریاچه به آبخوان‌های مجاور هم‌زمان با افت شدید سطح آبخوان‌ها، به‌دلیل دردسترس نبودن داده‌های موردنیاز، محاسبه نشد.

کلیدواژه‌ها: تغییر اقلیم، پویایی سیستم، دریاچه ارومیه، مدیریت منابع آب، الگوی ون‌سیم

---

۱. دانشیار آب‌وهواشناسی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران (نویسنده مسئول).
ghazizi@ut.ac.ir ✉

۲. استادیار مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران، تهران، ایران.
snazif@ut.ac.ir ✉

۳. دانشجوی دکترای آب‌وهواشناسی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران.
abbasi87@ut.ac.ir ✉

مقدمه

شکل‌ها و پدیده‌های سطح زمین به‌سرعت تغییر می‌کنند و این تغییرات در طول زندگی انسان بسیار چشمگیر است. نکتهٔ مهم این است که بتوان چنین تغییراتی را به‌دقت بررسی و فرایندهای طبیعی و انسانی به‌وجودآورنده را به‌خوبی شناسایی کرد (رسولی و همکاران، ۱۳۸۷، ۵۴). در این راستا، مطالعهٔ نوسان‌های تراز آب دریاچه‌ها، به‌منظور حفاظت از آن‌ها، به‌دلیل اهمیت، ماهیت و موقعیت این مجموعه‌های آبی به‌عنوان میراث‌های طبیعی، در سال‌های اخیر در بین کشورها در سطح ملی و منطقه‌ای جایگاه ویژه‌ای پیدا کرده است. درواقع، چشم‌انداز تغییرات اقلیمی و چالش‌های پیش روی جوامع انسانی برای دستیابی به منابع پایدار آب، سبب شده است که مطالعه روابط بین این عوامل و منابع آب، مورد توجه مجامع علمی قرار گیرد (شلتن، ۱۳۹۱، ۱۹). یکی از مهم‌ترین عواملی که مطالعه و بررسی آن با توجه به رشد روزافزون جمعیت، توسعه صنعتی و اقتصادی، تغییر کاربری زمین‌ها و به‌تبع آن تغییر الگوی نیاز آبی در بخش کشاورزی، اهمیت بسیاری یافته است، تأثیر عوامل انسانی است.

اهمیت این موضوع سبب شده که در طول سال‌های اخیر، پژوهش‌های فراوانی دربارهٔ نوسانات آب شناسی در حوضه‌های آبریز انجام شود؛ پژوهش‌هایی که بیشتر بر نقش تغییر شرایط آب‌وهوایی و نیز تأثیر فعالیت‌های انسانی تأکید دارند و نوسانات به‌وجودآمده در تراز دریاچه‌ها از طریق این عوامل را تجزیه‌وتحلیل می‌کنند. آستروسکی[1] و همکاران (۲۰۱۳)، در بررسی دلایل نوسانات دریاچه کینرت[2]، افزایش نیاز آبی به حوضه آبریز این دریاچه و روند کاهشی بارش را از دلایل تغییر رژیم شوری، حرارتی و هیدرولوژیکی در این دریاچه عنوان کرده‌اند. وانگ[3] و همکاران (۲۰۱۳) نیز با استفاده از روش‌های دورسنجی، تراز آب دریاچه‌های بزرگ چین را مطالعه کرده‌اند. نتایج پژوهش‌های آن‌ها نشان می‌دهد که دریاچه‌های واقع در شرق و شمال شرق چین با کاهش تراز روبه‌رو هستند که دلیل اصلی آن، برداشت‌های انجام‌شده برای مصرف در بخش کشاورزی از رودخانه‌های مهم این حوضه (مانند یانگ‌تسه) است، درحالی‌که ۳۸ دریاچه دیگر، روند افزایشی را نشان می‌دهند که این تغییرات را ناشی از ذوب یخچال‌های واقع در منطقه می‌دانند. لونا[4] (۲۰۱۱)، دلایل نوسانات کنونی تراز آب دو دریاچه انریکیلو و ساماتره[5] در

1. Ostrovsky
2. Kinneret
3. Wang
4. E. Luna
5. Enriquillo and Saumatre

جمهوری دومینیکن را با بررسی تغییرات کاربری زمین‌ها و تغییر شرایط اقلیمی منطقه مطالعه کرده‌اند. نتایج به‌دست‌آمده در این پژوهش، نشان می‌دهد که تراز دریاچه نسبت به بارش و تبخیر، حساسیت بالایی دارد؛ به‌گونه‌ای که روند صعودی تراز را می‌توان با افزایش بارش و کاهش تبخیر در حوضه توجیه کرد.

یوآ[1] و همکاران (۲۰۰۸)، با استفاده از الگوی ارزیابی آب‌وخاک[2]، سهم تغییرات آب‌وهوایی و همچنین تغییر کاربری زمین‌ها در حوضه آبریز دریاچه پو یانگ چین را بررسی کرده‌اند. نتایج این پژوهش، تأثیر سهم بالای تغییر شرایط اقلیمی منطقه را در نوسانات تراز دریاچه تأیید می‌کنند. کبدی[3] و همکاران (۲۰۰۶)، حساسیتِ نوسانات تراز دریاچه تانا در اتیوپی را نسبت به تغییر اقلیم مطالعه کرده‌اند. این مطالعه که با الگوسازی معادلات تراز آبی دریاچه و بررسی تغییرات بارش، تبخیر و تراز دریاچه انجام شده است، نشان می‌دهد که در شرایط هیدرولوژیکی کنونی، تراز دریاچه در برابر متغیرهای اقلیمی، حساسیت کمتری دارد و این تغییرات، بیشتر متأثر از افزایش بهره‌برداری از منابع آب در حوضه آبریز رودخانه تانا است که برای تأمین آب بخش کشاورزی و نیروگاه برق‌آبی، اقدام به ساخت سد در پایاب رودخانه کرده‌اند. مورتش[4] و همکاران (۲۰۰۳) نیز در بررسی اثر تغییر اقلیم بر تراز آب دریاچه‌های پنج‌گانه امریکا، کاهش ۴۰ میلی‌متری بارش، افزایش ۰/۷ سانتی‌گرادی دما و افزایش ۵۰ درصدی تبخیر را از دلایل تغییرات تراز آب دریاچه‌ها عنوان کرده‌اند.

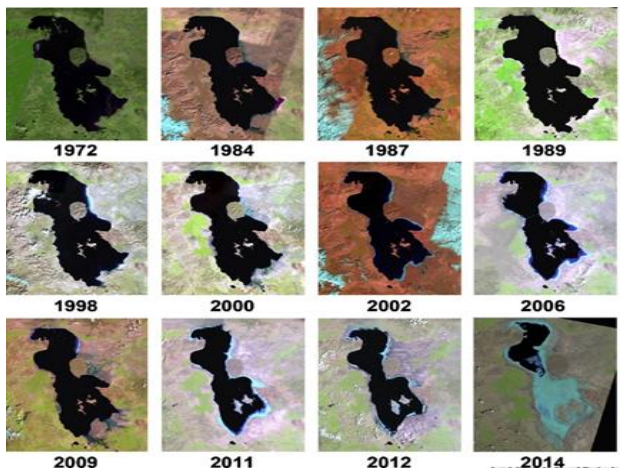
در پژوهشی دیگر در مورد این منطقه، سالینجر[5] و همکاران (۲۰۰۸)، تنها به مطالعهٔ تغییرات تراز دو دریاچه میشیگان و هوران پرداخته‌اند. در این پژوهش، نوسانات فصلی و سالانه تراز آب هر دو دریاچه در بازه زمانی ۲۰۰۶-۱۸۶۰با استفاده از دو الگوی ارزیابی روند فصلی[6] و الگوی خطی دینامیکی[7] بررسی شده است. از نظر نوسانات فصلی، در ماه‌های نوامبر تا فوریه که انتظار افزایش ورودی به دریاچه وجود داشت، جریان ورودی، کاهش یافته و در مورد نوسانات سالانه دریاچه نیز کاهش تراز، بیشتر ناشی از افزایش قابل‌توجه مقدار تبخیر از دریاچه است، این درحالی است که نوسانات تراز، رابطهٔ معناداری را با بارش نشان نداد.

1. Guo
2. soil and water assessment tool (SWAT)
3. Kebede
4. Mortsch
5. C.E. Sellinger
6. seasonal trend decomposition using loess (STL)
7. dynamic linear models (DLM)

در ایران نیز پژوهش‌هایی درباره تأثیر تغییر اقلیم و عوامل انسانی بر مؤلفه‌های هیدرولوژیکی حوضه‌های آبریز کشور، به‌ویژه حوضه آبریز دریاچه ارومیه، انجام شده است که بخش عمده آن‌ها، به ارائهٔ دو دیدگاه متضاد انجامیده است. دیدگاه نخست، دلیل اصلی کاهش تراز دریاچه را کاهش بارندگی در سال‌های اخیر می‌داند. دلجو و همکاران (۲۰۱۳)، با بررسی آماری متغیرهای دما، بارش، و تعداد روزهای برفی و بارانی، نشان داده‌اند که در بازه زمانی ۲۰۰۵-۱۹۶۴ در سطح حوضه، کاهش ۹/۲ درصدی بارش و افزایش ۰/۸ درصدی دما رخ داده است. نتایج پژوهش بایزیدی و همکاران (۱۳۹۱) با بررسی نقش تغییر اقلیم بر حوضه دریاچه ارومیه در سال‌های ۲۰۰۷-۱۹۵۱، روند افزایشی برابر ۱ درجه سیلیسیوسی دما را در تمام ایستگاه‌های سینوپتیک حوضه، تأیید می‌کند. احمدزاده و همکاران (۱۳۸۹)، نیز مؤلفه‌های اقلیمی بزرگ مقیاس را به‌عنوان مهم‌ترین عامل اثرگذار بر کاهش تراز دریاچه در دوره آماری ۱۳۸۴-۱۳۷۰ معرفی کرده‌اند. این درحالی است که نتایج پژوهش حسنی مهمویی و همکاران (۱۳۹۰)، نشان می‌دهد که هرچند کاهش میزان بارش در طول دوره آماری ۲۰۰۵-۱۹۵۱ به میزان ۶۸/۵ میلی‌متر و روند افزایشی دما نیز به‌طور متوسط در هر دهه به میزان ۰/۱ درجه سانتی‌گراد است، بااین‌حال، تنها می‌توان ۱۵ درصد تغییرات تراز دریاچه را متأثر از تغییر شرایط آب‌وهوایی دریاچه دانست. جلیلی و همکاران (۲۰۱۲)، با بررسی الگوهای گردش عمومی جو در منطقه، نشان داده‌اند که تنها می‌توان نوسانات فصلی دریاچه را مربوط به این الگوها دانست. فتحیان و همکاران (۱۳۹۲)، روند تغییرات کاربری زمین‌های زیر حوضه شرق دریاچه و ارتباط آن با دبی رودخانه‌های ورودی به دریاچه را با استفاده از روش‌های آماری ناپارامتری، ارزیابی کرده‌اند. نتایج پژوهش آن‌ها، روند معنادار افزایش دما و کاهش دبی را برای ایستگاه‌های پایین‌دست نشان داد، ولی در مورد بارش، روند معناداری مشاهده نشد. درواقع، در دیدگاه دوم، روند فعلی کاهش تراز دریاچه ارومیه را مستقل از تغییرات آب‌وهوایی عنوان می‌کنند. براساس نتایج پژوهش کبیری و همکاران (۲۰۱۲)، عامل اصلی افت تراز دریاچه ارومیه به‌ویژه پس از سال ۲۰۰۰، عامل انسانی بوده است. پژوهش‌های زمانی اکبری و ملکی (۱۳۸۹)، و احدنژاد و همکاران (۲۰۱۰) نیز عوامل انسانی را به‌عنوان مهم‌ترین عامل اثرگذار معرفی کرده‌اند.

وضعیت افت تراز آب دریاچه و فرایند تدریجی خشک شدن آن در سال‌های اخیر، مشکلات مهم اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی‌ای برای منطقه و از سوی دیگر، نگرانی‌های ملی و منطقه‌ای را در پی داشته است؛ به‌گونه‌ای که کارشناسان محیط زیست از این پدیده، به‌عنوان بزرگ‌ترین رخداد بیابان‌زایی قرن یاد می‌کنند. پیش‌بینی شده است که با خشک شدن دریاچه،

نمک آن به‌صورت یک بمب نمکی بزرگ، فعال شود و با وزش باد، غبار آن می‌تواند منطقه بزرگی در پیرامون خود (شامل بخش‌های بزرگی از شمال‌غرب ایران، شرق ترکیه و جنوب قفقاز) را آلوده و به شوره‌زار تبدیل کند (گلابیان، ۱۳۸۹). ایجاد ریزگردهای نمکی، بیابان‌زایی و توسعه آن به محدوده‌های کشاورزی و مسکونی و به‌تبع آن از بین رفتن زمین‌ها و باغ‌های کشاورزی، مراتع و جنگل‌های منطقه و افزایش مهاجرت از مناطق مجاور دریاچه را باید از مهم‌ترین تهدیدهای ناشی از تداوم این وضعیت برشمرد. روند خشکی دریاچه ارومیه از ۲۰ سال گذشته شروع شده و در این مدت، بیش از ۸ متر کاهش داشته است. پس از ثبت بالاترین تراز برای دریاچه در سال ۱۳۷۴، با رقم ۱۲۷۸/۴۸ در طول دو دهه، سالانه به‌طور متوسط، تراز دریاچه ۴۰ سانتیمتر کاهش داشته است. تراز دریاچه در تیر ۱۳۹۴ برابر ۱۲۷۰/۳۰ متر بالاتر از سطح دریای آزاد بوده که نسبت به تراز اکولوژیک آن (ترازی که در آن ویژگی‌های زیستی و غیرزیستی دریاچه تأمین شده و غلظت نمک آن به‌ویژه برای موجودات حوضه آبریز قابل‌تحمل باشد) ۳۸۰ سانتی‌متر افت داشته است. روند تغییرات تراز دریاچه در شکل شماره (۱) مشخص شده است.



شکل شماره (۱). روند تغییرات تراز آب دریاچه ارومیه

این وضعیت، شناخت و تعیین میزان اثرگذاری هریک از عوامل طبیعی و انسان‌ساخته را ضروری کرده است. ازآنجاکه مجموعه جریان‌های سطحی و زیرزمینی حوضه به دریاچه ختم می‌شود، تغییرات تراز سطح آب این دریاچه را باید، مانند سایر دریاچه‌ها و مخزن‌های بسته، با توجه به نوسانات بیلان آب‌های سطحی، زیرزمینی و متغیرهای اقلیمی مؤثر بر تغییرات تراز دریاچه بررسی

کرد. برای اینکه بتوان مجموعه این عوامل را در کنار یکدیگر قرار داد و بین آن‌ها ارتباط برقرار کرد، باید از روش‌هایی استفاده شود که علاوه‌بر تحلیل سیستم به‌وجودآورنده، بتوانند آن را شبیه‌سازی کنند و یک گزارش تقریبی از آنچه در طبیعت رخ داده و یا روی خواهد داد، ارائه دهند. رویکرد پویایی سیستم[1] این امکان را فراهم کرده است (پورفلاح و مشتاق، ۱۳۹۲). این رویکرد بر آن است که ابزارهای لازم برای کشف قانونمندی‌های دنیای واقعی را دراختیار تحلیل‌گر قرار دهد و براساس آن، مسیر تحولات را به مسیر مطلوب سوق دهد (اعلمی و همکاران، ۱۳۹۳)؛ ازاین‌رو، الگوی پویایی تغییرات تراز آب دریاچه ارومیه با بهره‌گیری از این رویکرد، به‌عنوان ابزار تحلیلی مناسب، ایجاد شده است. برمبنای این نگرش، اجزای مختلف سیستم حوضه آبریز دریاچه ارومیه و ارتباط زیرسیستم‌های آن‌ها تعریف شد تا از این طریق، اثرات تجمعی اقتصادی، اجتماعی، و زیست‌محیطی طرح‌های توسعه در سطح حوضه و همچنین تغییرات شرایط اقلیمی را برآورد کنیم.

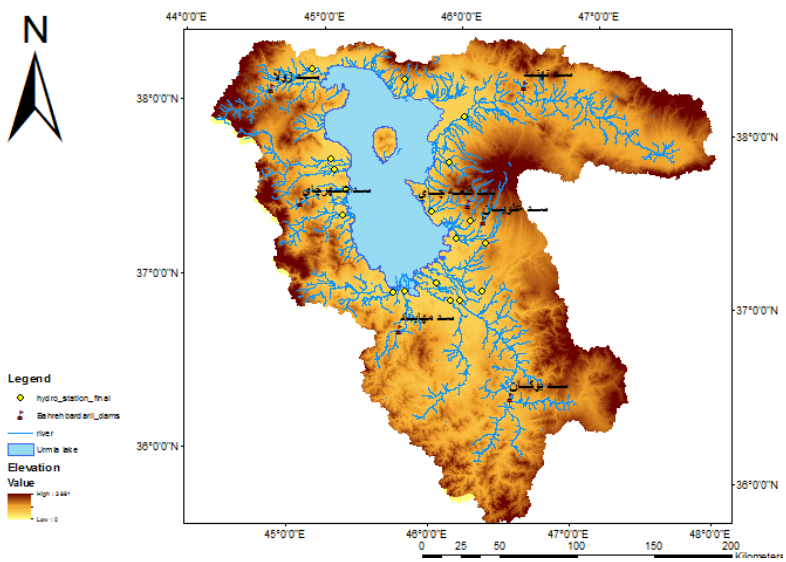
۱. منطقه موردمطالعه

دریاچه ارومیه در شمال غرب ایران، یکی از بزرگ‌ترین دریاچه‌های شور جهان و ازنظر وسعت، بیستمین دریاچه جهان است که دارای ویژگی‌های شیمیایی، ریخت‌شناسی، رسوب‌شناسی و زیست‌محیطی خاصی است. از دیدگاه علم زمین ریخت شناسی، دریاچه ارومیه یک ناحیه فرونشسته زمین‌ساختی است که در اثر عملکرد گسل تبریز در شرق و گسل ارومیه در غرب به‌وجود آمده است. تمام سیستم زهکشی و جریان‌های آب سطحی و زیرزمینی، وارد این دریاچه می‌شوند و از این منظر، دریاچه، عامل اصلی شبکه هیدروگرافی و ریخت‌شناسی حوضه آبریز به‌شمار می‌آید. مختصات جغرافیایی دریاچه بین "۱۵ ′۰۶ °۳۷ و "۱۵ ′۱۵ °۳۸ عرض شمالی و "۱۳ ′۰۰ °۴۵ و "۲۰ ′۵۵ °۴۵ طول شرقی است. این دریاچه ناحیه‌ای به مساحت حدود ۵۰۰۰ کیلومترمربع را می‌پوشاند و بیشترین درازا و پهنای آن به‌ترتیب، ۱۴۰ و ۵۰ کیلومتر است. مساحت آن در زمان‌های کم‌آبی و پرآبی متفاوت بوده و از ۴۷۵۰ تا ۶۱۰۰ کیلومترمربع، متغیر است. عمق متوسط این دریاچه، ۶ تا ۱۲ متر است؛ به‌گونه‌ای که در قسمت‌های شمالی، حدود ۶ متر و در قسمت‌های جنوبی از ۱۲ تا ۱۶ متر متغیر است. اکوسیستم فعال آن، شامل دریاچه و حوضه آبریز آن است.

حوضه آبریز دریاچه نیز یک حوضه داخلی بسته، با مساحت ۵۱۷۸۶ کیلومترمربع، مناطقی از سه استان آذربایجان شرقی، آذربایجان غربی و کردستان را دربر گرفته است که تمام رواناب‌های ناشی از بارندگی به‌سمت آن جاری می‌شوند. با درنظر گرفتن عرض جغرافیایی و ارتفاع حوضهٔ

1. system dynamics approach

آبریز، اقلیم عمومی آن مشابه اقلیم سرزمین‌هایی با عرض جغرافیایی میانه و ارتفاع متوسط با زمستان‌های سرد و تابستان‌های نسبتاً معتدل است. بررسی‌های انجام‌شده نشان می‌دهد که در محدودهٔ حوضه، رژیم بارندگی ماهانه از رژیم مدیترانه پیروی می‌کند. حداکثر بارندگی در فصل بهار رخ می‌دهد و میزان بارندگی در فصل تابستان کم است. متوسط بارندگی سالانه حدود ۲۰۰ تا بیش از ۸۵۰ میلی‌متر، متغیر است. بیشترین بارندگی سالانه مربوط به نواحی غربی و شمال غربی منطقه و همچنین ارتفاعات جنوبی و کمترین مقدار بارش، مربوط به نواحی شمال شرقی حوضه است. مقدار بارش در نواحی اطراف دریاچه بین ۲۵۰ تا ۳۰۰ میلی‌متر است و مناطق واقع در محدوده استان آذربایجان شرقی از میزان بارش کمتری نسبت به سایر استان‌ها برخوردار هستند. متوسط سالانه دمای هوای ثبت‌شده در آن بین ۶/۴ تا ۱۳/۲ درجه سانتی‌گراد تغییر می‌کند. هیدرولوژی حوضه، هم ازنظر کیفی و هم به‌لحاظ کمی، پیچیده‌ترین ویژگی فیزیکی در مدیریت دریاچه ارومیه و تالاب‌های اقماری آن به‌شمار می‌رود و این پیچیدگی از وجود منابع گوناگون آب‌های سطحی و زیرزمینی و پراکندگی آن‌ها در سه استان با سیاست‌ها و راهبردهای مدیریت متفاوت، ناشی می‌شود. حوضه از ۱۱ زیرحوضه اصلی تشکیل شده است که شامل ۱۷ رودخانه دائمی، ۱۲ رودخانه فصلی و ۳۹ مسیل است و بیشتر آب‌های سطحی در استان آذربایجان غربی و در بخش‌های غربی و جنوبی حوضه جریان دارد.



شکل شماره (۲). موقعیت سدها و ایستگاه‌های هیدرومتری در حوضه آبریز دریاچه ارومیه

۲. روش پژوهش

در این پژوهش، رفتارسنجی پویایی حوضه آبریز دریاچه ارومیه با استفاده از رویکرد پویایی سیستم، بررسی شده و رفتار هریک از فراسنج‌های اثرگذار در حوضه و همچنین تأثیر متقابل آن‌ها بر یکدیگر، الگوسازی شده است تا از این راه بتوان تغییرات ایجادشده را تحلیل و سیاست‌های لازم را طرح‌ریزی کرد. در بخش شبیه‌سازی سیستم از نرم‌افزار ون‌سیم[1] استفاده شد که به‌منظور درک فرایندهای پویایی سیستم، طراحی شده است و ازجمله ابزارهای قدرتمند در مطالعه سیستم‌های منابع آب است. این الگو دارای محیط گرافیکی شیءگرا است و معادله‌ها با یک‌سری زوج معادلات دیفرانسیلی مرتبه اول (اغلب غیرخطی) که با روش اولر یا رانگ‌کوتا حل می‌شوند، ساخته شده است. روش الگوسازی در این نرم‌افزار به‌گونه‌ای است که پیشرفت از کلیات به جزئیات انجام می‌شود؛ به‌طوری‌که توابع و اجزای متصل‌شده به‌صورت تدریجی، بیشتر می‌شوند تا درنهایت، یک الگو کامل و برای اجرا آماده شود. مراحل الگوسازی با رویکرد پویایی سیستم عبارتند از:

الف‌ـ تعریف مسئله: با اینکه برای یک الگوسازی موفق هیچ‌گونه دستورالعملی وجود ندارد، ولی تعریف مشخص و شفاف مسئله ما را در توسعه کارآمد الگو، یاری می‌کند (گلیان و همکاران، ۱۳۸۶). روند کاهشی تراز آب دریاچه به‌گونه‌ای است که از حد اکولوژیک خود پایین‌تر رفته و باید به بهبود آن توجه شود؛ بنابراین، مسئله این پژوهش، بررسی تأثیر مجموعهٔ زیرسیستم‌های موردبررسی بر تغییرات تراز است.

ب‌ـ تعیین مرز سیستم: این مرحله شامل معرفی متغیرهای مؤثر بر رفتار متغیر مرجع است. در این مسئله، متغیر مرجع، تغییرات تراز دریاچه است و زیرسیستم‌های جریانات آب سطحی، آب زیرزمینی و متغیرهای اقلیمی به‌عنوان متغیرهای فرعی اثرگذار بر تراز دریاچه درنظر گرفته شده‌اند؛ بنابراین، می‌توان گفت، مرز سیستم شامل مجموعه عوامل تعریف‌شده در الگوی مفهومی (شکل شماره ۳) است که بر هر زیرسیستمی تأثیر می‌گذارند و یا از آن‌ها تأثیر می‌پذیرند.

ج‌ـ تبیین فرضیه‌های پویایی: تغییرات یا واکنش‌های به‌وجودآمده در هریک از زیرسامانه‌ها، فرایندهایی را ایجاد می‌کنند که به سازوکارهای بازخوردی معروف هستند. بازخوردها در هر سیستم، به‌طور خاص، سامانه اقلیم را به‌حدی پیچیده می‌کنند که نیروی اصلی وارد بر سامانه، به‌طور قابل‌توجهی با حلقه‌های بازخورد، جایگزین می‌شود (عزیزی، ۱۳۸۳)؛ ازاین‌رو، پس از تعیین مرز سیستم و متغیرهای تأثیرگذار بر متغیر مرجع، باید نحوهٔ تأثیرگذاری این متغیرها را با تعدادی حلقه‌های بازخوردی بیان کرد که نشان‌دهندهٔ تأثیر متقابل این اجزا بر یکدیگر هستند، زیرا تداوم

1. ventana simulation environment (VENSIM)

پویایی سیستم مستلزم وجود حلقه‌های علت و معلولی است (فرتوک‌زاده، بی‌تا). بـه ایـن منظـور، از چهار ابزار ذخیره، جریان، رابط‌ها و تبدیل‌کننده‌ها اسـتفاده شـده اسـت کـه به‌وسـیله آن‌هـا، ذهنیـت الگوساز، به نمودارهای علت‌ومعلولی و درنهایت بـه نمودارهـای ذخیـره و جریـان تبـدیل می‌شـود و الگوی مفهومی مطابق شکل شماره (۳) توسعه داده شده است. در طراحـی الگـوی پویـایی دریاچـه ارومیه، ابتدا پویایی‌های حاکم و عوامل مؤثر بر تغییرات تراز آب دریاچه شناسایی شـدند. همان‌گونـه که اشاره شد، منابع ورودی به دریاچه عمدتاً از سه منبـع، آب سـطحی، آب زیرزمینـی، و متغیرهـای اقلیمی اثرگذار بر تراز دریاچه تأمین می‌شود، ازاین‌رو سه زیرسیستم طراحی شد و در هـر زیرسیسـتم نیز پویایی‌ها و عواملی تعیین شدند که از آن‌جمله می‌تـوان بـه مـواردی ماننـد تغییـر شـرایط اقلیمـی (تغییرات بارشی و تبخیر)، اثرات رشد فزایندهٔ سـطوح اراضـی در حوضـه و تغییـر الگـوی نیـاز آبـی محصولات اشاره کرد که درمجموع، رواناب ورودی به دریاچه را متأثر می‌کنند؛ درنهایت نیـز روابـط و معادلات میان متغیرها در هر زیرسیستم مشخص شد. گفتنی اسـت کـه اطلاعـات موردنیـاز بـرای اجرای الگو، پس از گردآوری، رفع کاستی‌ها، و تولید سری‌های زمانی با گام‌های ماهانـه به‌مـدت ۱۵ سال آبی (۱۳۷۹-۱۳۷۸ تا ۱۳۹۳-۱۳۹۲) به الگو معرفی شد.

در الگوسازی زیرسیسـتم آب سـطحی ورودی بـه دریاچـه، ۷ سـد مـوردبهره‌برداری (بوکـان، مهاباد، علویان، قلعه‌چای، شهرچای، زولا و نهند) که بر روی رودخانـه‌های اصـلی قـرار دارنـد و دارای بیشترین سهم در تنظیم آب حوضه هستند، انتخاب شده‌اند. متغیرهای مؤثر بر معادلـه تـراز آبی سدها عبارتند از: دبی و بارش ورودی به مخازن سد، تبخیر از مخزن سد، میـزان آب تنظیمـی سدها برای نیازهای خانگی، صنعت، کشاورزی و زیست‌محیطی، میزان سـرریز از سـدها، حجـم اولیه و مقدارهای بیشینه و کمینه حجم مخزن‌ها، حجم، و ارتفاع و سطح مخـزن سـدها. علاوه‌بـر این، میزان آب ورودی از سایر زیرحوضه‌ها (نازلوچـای، روضـه‌چای، باراندوزچای، لیلان‌چـای، جوان‌چـای، آذرشـهرچای، و سـیمینه‌رود) نیـز در الگـو مشـخص شـده اسـت. هـدف نهـایی از الگوسازی این زیرسیستم، تعیین تراز آبی و سری زمانی دبی خروجی از سدهای واقع در هریک از زیرحوضه‌ها و همچنین دبی ورودی از سایر زیرحوضه‌ها به دریاچـه اسـت؛ ازایـن‌رو، مقـدارهای سرریز از سدها و جریان زیست‌محیطی ـ پس از کسرِ میزان برداشت‌های انجام‌شده توسط نهرهـا، موتورپمپ‌های ثابت و متحرک و آب‌بندهای موجود که در پایین‌دسـت سـدها ــ بـه‌عنوان جریـان ورودی به دریاچه در الگو تعریف شدند.

معادله نهایی مخازن سدها:

$$\frac{d(dam\ storage)}{dt} = (inflow + precipitation - evaporation - relarese - spill)$$

در رابطه بالا، inflow، مجموع متغیرهای ورودی به مخزن سد، outflow، مجموع متغیرهای خروجی از مخزن سد، spill، میزان سرریز از مخزن سد، release، میزان آب تنظیمی سدها، precipitation، میزان بارش بر مخزن سد و evaporation، میزان تبخیر از مخزن سد است.

در الگوسازی زیرسیستم منابع آب زیرزمینی، ۱۱ آبخوان مجاور دریاچه که دارای مبادله‌های آبی مستقیمی با دریاچه بوده‌اند، بررسی شدند. آبخوان‌های مورد مطالعه عبارتند از: ارومیه، سلماس، مهاباد، تبریز، آذرشهر، نقده، میاندوآب، تسوج، صوفیان‌شبستر، مراغه و عجب‌شیر. متغیرهای مؤثربر تراز آبی آبخوان‌ها عبارتند از: بارندگی، نفوذ از رواناب، آب برگشتی از مصرف‌های کشاورزی، شرب و صنعت، زهکشی به رودخانه‌ها و حجم بهره‌برداری در بخش‌های کشاورزی، شرب و صنعت.

معادله بیلان آبخوان‌ها:

$$\frac{d(storage)}{dt} = \frac{(inflow - outflow)}{\frac{A}{S}}$$

در رابطه بالا، inflow، مجموع متغیرهای ورودی، outflow، مجموع متغیرهای خروجی، A مساحت آبخوان و S ضریب ذخیره جریان آبخوان است.

درنهایت، برای تعیین تراز و حجم آب موجود در دریاچه ارومیه، زیرسیستم نهایی طراحی شد. این سیستم، دربرگیرندهٔ همهٔ عوامل تأثیرگذار بر تراز دریاچه ارومیه است؛ به‌گونه‌ای که علاوه‌بر جریان ورودی از سدها و جریان زهکشی آبخوان‌ها به دریاچه، بارش بر سطح دریاچه و تبخیر از آن نیز به‌عنوان متغیرهای تأثیرگذار بر معادله بیلان آبی دریاچه مشخص شدند. برای محاسبه میزان بارش سطح دریاچه براساس روش پلی‌گون‌بندی تیسن در نرم‌افزار سیستم اطلاعات جغرافیایی[1]، ایستگاه‌های اطراف دریاچه، به نواحی مختلفی تقسیم و مساحت هر ناحیه به‌عنوان مساحت تحت پوشش هر ایستگاه درنظر گرفته شد. به‌این‌ترتیب، ارتفاع بارش محاسبه شد و با استفاده از منحنی حجم‌ـبارش دریاچه، حجم بارش دریاچه به‌دست آمد. برای محاسبه تبخیر سطح دریاچه نیز از روش تشت تبخیر استفاده شد. ابتدا میانگین حسابی ایستگاه‌های تبخیرسنجی اطراف دریاچه به‌عنوان شاخص توزیع زمانی تبخیر در سطح دریاچه درنظر گرفته شد و سپس با استفاده از روابط سطح‌ـحجم دریاچه و ضریب تشت تبخیر (براساس پژوهش‌های انجام‌شده، این ضریب برای دریاچه ارومیه ۰/۷۷ برآورد شده است)، معادله نهایی تبخیر دریاچه محاسبه شد. گفتنی است که داده‌های ورودی به الگو از شرکت مدیریت منابع آب ایران دریافت شده و متغیرهای مورداستفاده نیز در تمامی زیرسیستم‌ها به واحد میلیون مترمکعب است.

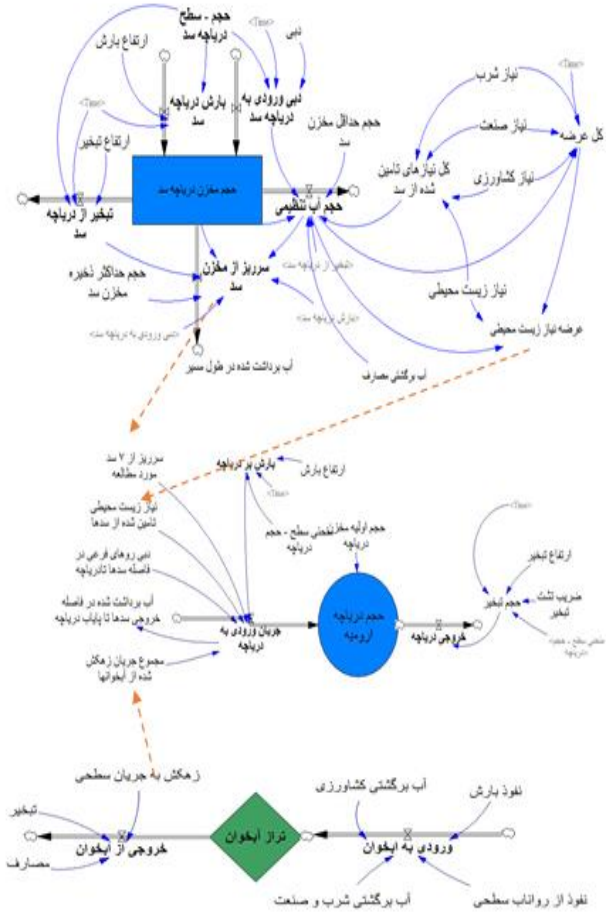
1. arcGIS

معادله بیلان آبی دریاچه:

$$Stock(t) = \int_{t}^{tn} [Inflow(t) - Outflow(t)dt + Stock(t0)$$

Inflow(t)= حجم مجموع جریان‌های ورودی به دریاچه؛ Outflow(t)= مجموع خروجی‌ها از دریاچه؛ Stock(t)= حجم نهایی آب دریاچه؛ Stock(t0)= حجم اولیه دریاچه.

د. اجرای الگو و تحلیل سناریوهای اتخاذشده: براساس مراحل الگوسازی که پیش‌تر اشاره گردید، الگوی مفهومی منابع آب در حوضه آبریز دریاچه ارومیه مطابق شکل شماره ۳ طراحی گردید تا در این بخش با طراحی سناریوهای مختلف در هر زیرسیستم، حساسیت تراز دریاچه نسبت به هر یک از آن‌ها ارزیابی گردد.



شکل شماره (۳). الگوی مفهومی منابع آبِ حوضه آبریز دریاچه ارومیه در ون‌سیم

۴. یافته‌ها

در مباحث مربوط به منابع آب، به‌دلیل اهمیت بیلان‌های زمانی و مکانی آب، الگویی که قادر باشد رفتار مرجع را بازسازی کند، بسیار مهم است؛ ازاین‌رو، برای واسنجی رفتار تراز آب دریاچه در الگوی ون‌سیم با تراز مرجع، از دو روش ضریب تعیین، و میانگین درصد خطای نسبی استفاده شده است. جدول شماره (۱) نتایج آزمون‌های آماری را نشان می‌دهد.

جدول شماره (۱). نتایج ارزیابی آماری تراز آب دریاچه مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده

R^2	RME
۰/۹۶	۰/۰۳

با توجه به مقدار به‌دست‌آمده از شاخص‌ها و نتایج حاصل از واسنجی الگو و مقایسه سری زمانی تراز ثبت‌شده دریاچه (شکل شماره ۴) مشاهده می‌شود که تطابق قابل‌قبول و مناسبی بین این دو مقدار دیده می‌شود؛ به‌گونه‌ای که علاوه‌بر ناچیز بودن اختلافی که بین مقدارها وجود دارد، روند تغییرات نیز مشابه است. از این نظر می‌توان نتیجه گرفت که الگوی تهیه‌شده، نمایشگر سیستم واقعی است و می‌تواند نمونه معتبری از رفتار تراز مشاهداتی باشد.

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^{n}(Pi-P)(Oi-O)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}((Pi-P)^2+(\sum_{i=1}^{n}(Oi-O)^2}}\right)^2$$

$$RE = \frac{|Oi-Pi|}{Oi} * 100$$

$$RME = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} REi$$

R^2: ضریب تعیین؛

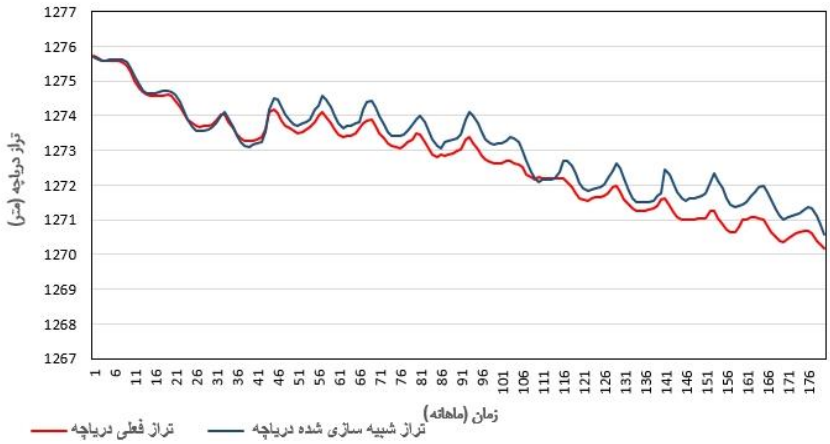
RME: میانگین درصد خطای نسبی؛

RE_i: درصد خطای نسبی هر برآورد؛

P_i: مقدار برآوردشده؛

Oi: مقدار مشاهده‌شده؛

n: تعداد داده‌ها.



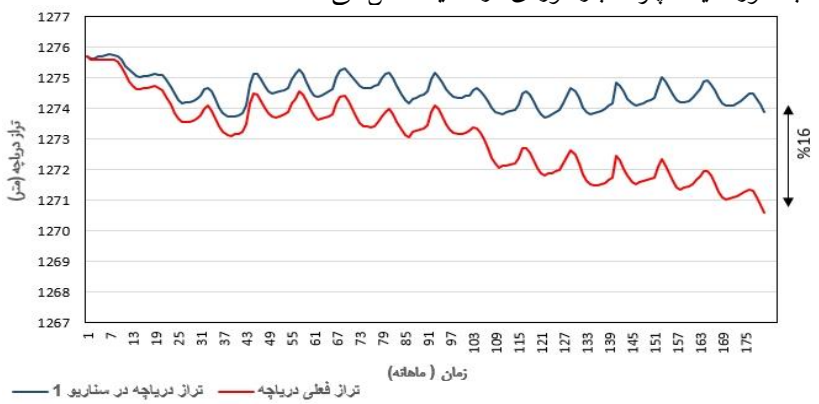
شکل شماره (۴). داده‌های مشاهده‌ای و الگوی تراز آب دریاچه ارومیه

پس از توسعه الگو و راستی‌آزمایی آن، در راستای اهداف پژوهش، با طراحی سناریوهای گوناگونی، هریک از زیرسیستم‌ها ارزیابی، و نتایج به‌دست‌آمده از اجرای آن‌ها در نوسانات تراز دریاچه ارومیه، بررسی شد. شاخص‌هایی که در ارزیابی سناریوها استفاده شدند عبارتند از: تغییر شرایط اقلیمی حوضه، سدهای مورد بهره‌برداری، الگوی نیاز آبی حوضه و تبادلات آبی دریاچه با آبخوان‌های مجاور.

۱-۴. ارزیابی سهم تغییر شرایط اقلیمی حوضه بر کاهش تراز آب دریاچه

تجربهٔ دوره‌های پرآبی و کم‌آبی دریاچه‌های مختلف به‌نوعی تأییدکنندهٔ این مطلب است که خصوصیات آبی و ویژگی‌های حیاتی‌ـشیمیایی دریاچه‌ها همواره تابعی است از تحولات اقلیمی و هیدرولوژیکی در گسترهٔ جغرافیایی بزرگ‌تری که آن را احاطه کرده است (گلابیان، ۱۳۸۹)؛ ازاین‌رو به‌منظور بررسی سهم شرایط اقلیمی حوضه بر کاهش تراز آب دریاچه، روند متغیرهای بارش و تبخیر دریاچه در سال‌های اخیر با روند این دو متغیر در سال‌های ۱۳۷۶-۱۳۶۱ مقایسه شد. به‌این‌ترتیب، الگو در دو حالت به اجرا گذاشته شد. در حالت نخست، داده‌های بارش و تبخیر در دوره موردمطالعه (۱۳۹۳-۱۳۷۸) به الگو معرفی شدند و در حالت دوم، این‌گونه فرض شد که حتی درصورت بهره‌برداری از منابع آب سطحی و زیرزمینی، روند بارش بر دریاچه و تبخیر از آن، روندی مشابه پیش از خشکسالی‌های حوضه باشد. اجرای این سناریو در قالب شکل شماره (۵) نشانگر این است که بیشترین تأثیر کاهش بارش و افزایش تبخیر بر دریاچه در سال‌های اخیر، افت ۱۶درصدی تراز آب دریاچه بوده است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که درجه حرارت ــ که

اثر آن به‌شکل افزایش تبخیر دیده می‌شود ــ و همچنین بارش، در چند سال اخیر با تغییراتی همراه بوده است؛ به‌گونه‌ای که مقدار متوسط سالانه تبخیر پیش از شروع خشکسالی‌ها ۱۰۶/۵ میلی‌متر بوده که با تفاوت ۱۷/۶۳ درصدی مقدار این متغیر در طول ۱۵ سال اخیر، به ۱۲۵/۳ میلی‌متر رسیده است. مقدار متوسط سالانه بارش نیز پیش از شروع خشکسالی‌ها، ۳۱۷ میلی‌متر بوده است که این مقدار در ۱۵ سال اخیر به رقم ۲۶۸/۴ میلی‌متر رسیده و با تغییر ۱۶درصدی همراه است. بررسی علت اینکه آیا تغییر در میزان بارش و تبخیر در دریاچه در مقیاس محلی رخ داده یا منطقه‌ای، نیازمند پژوهش بیشتری در این زمینه است، اما شاید بتوان این فرض را پذیرفت که با توجه به اینکه دریاچه و تالاب‌های پیرامون آن به‌عنوان عوامل تعدیل‌کننده اقلیم عمل می‌کنند، به‌موازات کاهش وسعت دریاچه و تالاب‌ها و درنتیجه، کاهش خروج گرما از محیط به‌صورت گرمای نهان، بر دمای محیط افزوده می‌شود. در این شرایط، به‌موازات گرمای تخلیه‌شده در محیط، مقدار تبخیر افزایش یافته و تبخیر بیشتر نیز بر کاهش وسعت دریاچه اثر گذاشته و این اثرات به‌صورت یک چرخه بازخوردی در محیط عمل می‌کنند.



شکل شماره (۵). تراز آب شبیه‌سازی‌شده دریاچه ارومیه در سناریوی نخست

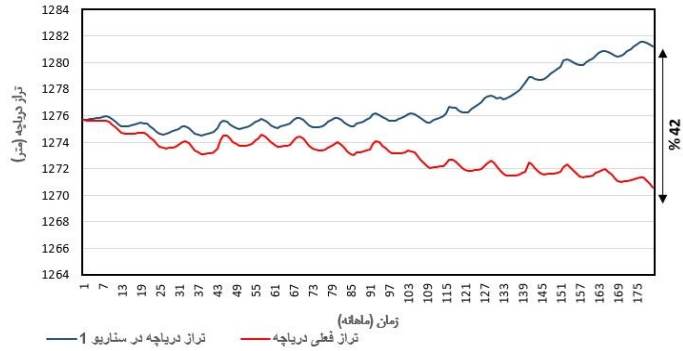
۲-۴. ارزیابی سهم جریان‌های سطحی بر کاهش تراز آب دریاچه

بخش عمدهٔ آب دریاچه از طریق رودخانه‌های ورودی به دریاچه تأمین می‌شود؛ به‌گونه‌ای که رودخانه‌های حوضه با دبی متوسط ۴/۵ میلیارد مترمکعب در سال، مهم‌ترین و حیاتی‌ترین منبع آب این دریاچه به‌شمار می‌آیند (چرب‌گو، ۱۳۸۹، ۳). طبیعی است که هرگونه دخالت در نحوهٔ رفتار رودها، باعث تغییرات گسترده در دریاچه می‌شود. توزیع طبیعی سالانه جریان‌های سطحی این حوضه به‌صورتی است که بیش از ۷۰ درصد در ۴ ماه اسفند، فروردین، اردیبهشت و خرداد

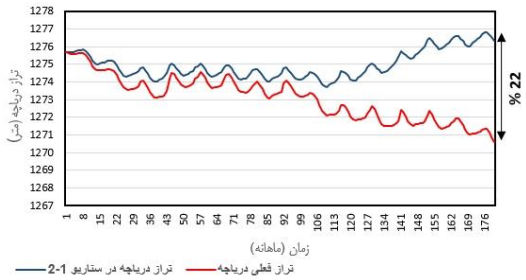
فصلنامه علمی ـ پژوهشی

دوره نهم
شماره ۴
پاییز ۱۳۹۶

جریان می‌یابد و ۸ ماه دیگر، کمتر از ۳۰ درصد آب را به خود اختصاص می‌دهد. این ویژگی به‌تنهایی لزوم ساخت سدهای مخزنی را برای کنترل و تنظیم جریان توجیه می‌کند (حسن‌زاده، ۱۳۸۹، ۲۰)؛ به‌گونه‌ای که در حال حاضر، بیش از ۳۶ سد مخزنی بزرگ و کوچک، ۴۱ سد انحرافی، ۱۵ ایستگاه پمپاژ و همچنین تعداد فراوانی آب‌بندهای فصلی کوچک در حوضه آبریز ارومیه ساخته شده است. در این سناریو برای بررسی سهم سدها در کاهش جریان ورودی به دریاچه، از آزمون تحلیل حساسیت استفاده شد. به این‌صورت که حجم حداکثر ذخیره هریک از ۷ سد موردمطالعه به صفر تغییر داده شد تا از این طریق، حضور سدها حذف شده و مقدار آب تنظیمی از هریک از سدها وارد دریاچه شود. همان‌گونه که شکل شماره (۶) نشان می‌دهد، سدهای حوضه، ۴۲ درصد از تغییرات تراز آب دریاچه را به خود اختصاص داده‌اند؛ به‌گونه‌ای که میزان رواناب ورودی به دریاچه از ۲۶۳/۶۸ به ۹۷/۷ میلیون مترمکعب تغییر کرده است. در میان سدهای موردبررسی، سد بوکان با بیشینه ظرفیت آب تنظیمی، بالاترین سهم (۲۲ درصد) را در مقایسه با دیگر سدها داشته و ۷ سد دیگر درمجموع، سهمی معادل ۲۰ درصد را در نوسانات تراز دریاچه ایفا می‌کنند؛ به‌گونه‌ای که حتی با بهره‌برداری از این ۷ سد، تراز دریاچه همچنان روند نزولی خود را نشان می‌دهد. دلیل دیگر این میزان تأثیرگذاری سد بوکان، توزیع ناهمگون منابع آب در حوضه است؛ به‌گونه‌ای که حدود ۵۱ درصد جریان‌های سطحی، متعلق به دو رودخانهٔ زرینه‌رود و سیمینه‌رود است که هر دو در جنوب حوضه قرار دارند و درمجموع کمتر از ۳۴ درصد مساحت کل حوضه را تشکیل می‌دهند. در یک جمع‌بندی می‌توان سهم جریان‌های سطحی را در نوسانات تراز دریاچه ۷۹ درصد دانست که ۴۲ درصد آن، سهم زیرحوضه‌هایی است که سدهای اصلی در آن‌ها به بهره‌برداری می‌رسند و بقیه، سهم ۷ زیرحوضه دیگر است. لازم به ذکر است که تأثیر واقعی سدهای درحال بهره‌برداری در حوضه با اجرای سناریوی سوم مشخص شد.



شکل شماره (۶). تراز آب شبیه‌سازی‌شده دریاچه ارومیه در سناریوی دوم



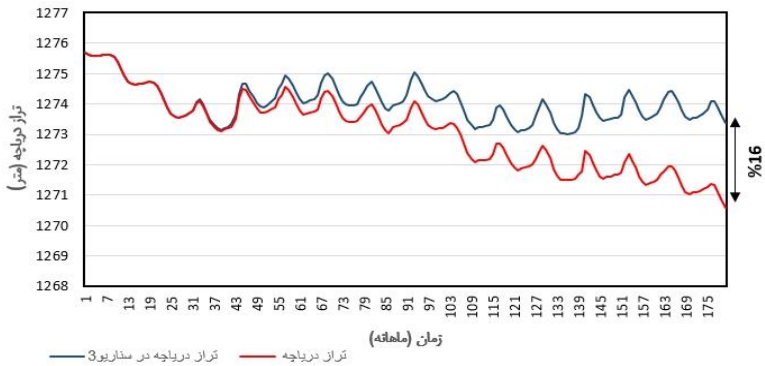
شکل شماره (۷). تأثیر سد بوکان بر تراز آب دریاچه ارومیه

۳-۴. ارزیابی سهم الگوی نیاز آبی حوضه بر کاهش تراز آب دریاچه

آنچه سبب شکل‌گیری سناریوی سوم شد، اثر سد بوکان بود. این سد در سال ۱۳۵۰ با ظرفیت آب تنظیمی ۶۵۰ میلیون مترمکعب به بهره‌برداری رسید، اما دست‌کم تا دو دهه پس از بهره‌برداری، تراز دریاچه با نوسانات چشمگیری روبه‌رو نبوده است. درحالی‌که از سال ۱۳۵۰ تا سه دهه بعد، ۱۵ سد با مجموع ظرفیت آب قابل‌تنظیم سالیانه ۳۵۲ میلیون مترمکعب بر روی رودخانه‌های مختلف حوضه به بهره‌برداری رسیده‌اند؛ بنابراین، بهره‌برداری از این سد به‌تنهایی نمی‌تواند نوسانات تراز دریاچه را توجیه کند. ازاین‌رو، سناریوی روند الگوی نیاز آبی حوضه بررسی شد. در این سناریو این‌گونه فرض شده است که درصورت بهره‌برداری از سدهای اصلی حوضه، ضمن باثابت ماندن الگوی نیاز آبی، تراز آب دریاچه با چه تغییراتی روبه‌رو خواهد شد. نیاز آبی سال ۱۳۷۸ به‌عنوان نیاز آبی پایه، به الگو معرفی شد. همان‌گونه که در شکل شماره (۸) مشاهده می‌شود، ۱۶ درصد از سهم سدها به‌ویژه سد بوکان را باید به افزایش نیاز آبی حوضه در ۱۵ سال اخیر نسبت داد؛ به‌گونه‌ای که حتی درصورت بهره‌برداری از سدها، تنها با حفظ الگوی متناسب با نیاز آبی حوضه، تراز آبی دریاچه در حد تراز اکولوژیکی دریاچه باقی می‌ماند.

درواقع، با اجرای این سناریو، تأثیر واقعی بهره‌برداری از سدهای حوضه (سناریوی دوم) مشخص شد. اجرای سناریوی سوم نشان داد که از ۴۲ درصدِ کاهش جریان سطحی ورودی به دریاچه، بهره‌برداری از سدهای حوضه، سهمی ۲۴درصدی داشته و ۱۶ درصد باقی‌مانده، ناشی از افزایش الگوی نیاز آبی حوضه بوده است. درباره علت این افزایش نیز پژوهش‌های انجام‌شده نشان می‌دهد، در طول نیم قرن اخیر، جمعیت حوضه ۱۰ برابر افزایش یافته که با تغییرات معیشتی-اقتصادی همراه بوده است. یکی از مهم‌ترین دلایل این تغییرات، شرایط مناسب حوضه به‌سبب داشتن دشت‌هایی مساعد برای فعالیت‌های کشاورزی و دامداری است. همین استعداد بالفعل منطقه در کشاورزی، سبب شده است که تلاش زیادی برای تبدیل مراتع و مناطق دیم به

زمین‌های آبی انجام شود. آمار موجود در مورد توسعه کشاورزی حوضه نشان از رشد ۳ برابری سطح زمین‌های آبی در طول سال‌های ۱۳۸۵-۱۳۵۸ دارد که به‌تبع آن، مصرف آب سطحی را از ۱/۸ به ۵/۵ میلیارد مترمکعب در سال افزایش داده است. این درحالی است که حداکثر راندمان آبیاری کشاورزی، ۳۴ درصد است و این به آن معنا است ۶۶ درصد آب مصرفی در بخش کشاورزی، هدر رفته و تبخیر می‌شود. تمام این عوامل، موجب شده‌اند که نیاز آبی حوضه در سال‌های اخیر، روند افزایشی داشته باشد و از میزان جریان ورودی به دریاچه کاسته شود.



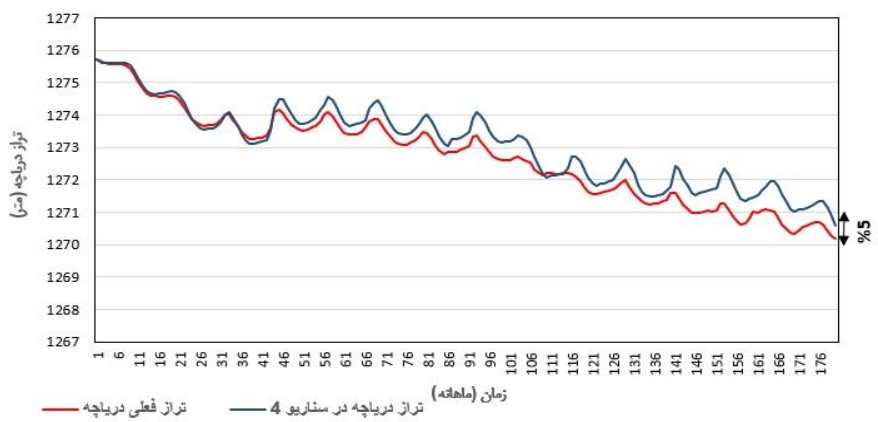
شکل شماره (۸). تراز آب شبیه‌سازی‌شده دریاچه ارومیه در سناریوی سوم

۴-۴. ارزیابی سهم تبادلات آبی آبخوان‌های مجاور در کاهش تراز دریاچه

تأثیر آبخوان‌های ساحلی بر دریاچه را باید در اندرکنش میان آب سطحی و زیرزمینی بررسی کرد؛ ازاین‌رو، در این سناریو، الگو در دو حالت، اجرا شد. در حالت نخست، جریان ورودی زهکش‌شده از آبخوان‌ها به جریان سطحی ورودی به دریاچه درنظر گرفته شد و در حالت دوم، این ارتباط حذف شد. نتایج اجرای این سناریو که در شکل شماره (۹) نشان داده شده است، حاکی از تأثیر ناچیز این متغیر بر تراز دریاچه است؛ به‌گونه‌ای که حتی با حذف مقدار زهکش آبخوان‌ها به جریان سطحی و شبیه‌سازی الگو، درعمل اختلاف ناچیزی در تراز آب دریاچه مشاهده می‌شود. درواقع، یافته‌های این بخش از پژوهش با نتایج پژوهش مؤسسه تحقیقات آب دربارهٔ محدود بودن بیلان ورودی آب زیرزمینی به دریاچه، همسو است. براساس پژوهش‌های این مؤسسه تحقیقاتی، متوسط سالانه جریان ورودی آب زیرزمینی از پایاب آبخوان‌های ساحلی به‌سمت دریاچه، حدود ۲۱۶ میلیون مترمکعب است که از این مقدار نیز حدود ۴۰ میلیون مترمکعب، میزان آب ورودی به دریاچه گزارش شده که این مقدار کمتر از ۰/۰۴ درصد کل ورودی‌ها به دریاچه است

(پژوهشکده مطالعات و تحقیقات منابع آب، ۱۳۹۲). البته در این مورد باید تأکید کرد کـه میـزان آب زهکشی‌شده از دریاچه به آبخوان‌های مجاور، هم‌زمان با افت شدید سطح آبخوان‌هـا، بـه‌دلیل دردسترس نبودن داده‌های موردنیاز، محاسبه نشده است.

این درحالی است که در پژوهش‌های مختلفی که در مـورد آبخوان‌هـای دریاچـه انجـام شـده است، برداشت بیش‌ازاندازه از آبخوان‌ها و شور شدن آب آن‌ها را ازجمله عوامـل کـاهش تـراز آب دریاچه دانسته‌اند. در حالت معمول، بین آب شور و شیرین، تعادل برقرار اسـت، امـا به‌تـدریج بـا افزایش بیش از حد بهره‌برداری از آبخوان‌ها، زهکشی جریان آب زیرزمینی به رودخانه‌ها قطع شده و بخشی از آب رودخانه نیز از بستر آن نفوذ کـرده اسـت و درنتیجـه از میـزان آبـدهی رودخانـه‌ها کاسته شده و حتی در پایان مسیر، پیش از رسیدن به دریاچه، رودخانه خشک شده است. این امـر سبب جابه‌جا شدن حد اینترفاز رودخانه و پیشروی آب شور به‌سمت آبخـوان شـده اسـت و تغییـر کیفیت آبخوان‌ها، تأثیری بر تراز دریاچه نگذاشـته اسـت. درواقـع، هرچنـد بـیلان آب زیرزمینـی ورودی به دریاچه ناچیز است (۵ درصد)، بااین‌حال، توسعه زمین‌های آبی حوضه کـه بـا افـزایش بهره‌برداری از آبخوان‌ها همراه بوده، سببِ افت تراز، تغییر در جهت جریـان، و پیشـروی آب شـور دریاچه به‌سمت آبخوان‌ها شده است که این تغییرات در این پژوهش بررسی نشده است.



شکل شماره (۹). تراز آب شبیه‌سازی‌شده دریاچه ارومیه در سناریوی چهارم

داده‌های جدول شماره (۲)، نتایج اجرای سناریوها و تعیین سـهم هریـک از عوامـل طبیعـی و انسانی در کاهش تراز آب دریاچه ارومیه را نشان می‌دهد.

جدول شماره (۲). سهم عوامل طبیعی و انسانی در کاهش تراز آب دریاچه ارومیه

عوامل	سناریو		درصد تاثیرگذاری
طبیعی	تغییر شرایط اقلیمی حوضه	%۱۶	بهره‌برداری از سدها: ۲۶% الگوی نیاز آبی از سدها: ۱۶%
انسانی	جریان سطحی ورودی از هفت زیرحوضه اصلی	%۴۲	
	جریان ورودی از سایر زیرحوضه‌ها	%۳۷	
	تبادلات آبی با آبخوان‌های مجاور دریاچه	%۵	

بحث و نتیجه‌گیری

برای ارزیابی عملکرد سیستم منابع آب دریاچه ارومیه، با توجه به اندرکنش غیرخطی مؤلفه‌های مختلف، الگوی شبیه‌ساز در محیط نرم‌افزار ون‌سیم ــ که مبتنی‌بر روش پویایی سیستم است ــ ترسیم شد. این روش به‌دلیل اینکه امکان اعمال سیاست‌های مختلف را در یک الگوی واحد و به‌صورت سریع فراهم می‌کند، روش مناسبی برای شبیه‌سازی سیستم‌های منابع آب و بررسی نتایج احتمالی ناشی از اعمال سیاست‌های گوناگون در شرایط توسعه است. با توجه به اینکه هدف اصلی این پژوهش، واکاوی مؤلفه‌های تأثیرگذار بر نوسانات تراز آب دریاچه ارومیه است، تلاش شد، میان این مؤلفه‌ها و روند نزولی تراز دریاچه ارتباط منطقی برقرار شود؛ ازاین‌رو ابتدا سه زیرسیستم، طراحی و در قالب آن، الگوی شبیه‌سازی تراز دریاچه راستی‌آزمایی شد. سپس با درنظر گرفتن سناریوهای مختلف، سهم هریک از مؤلفه‌ها در نوسانات تراز دریاچه بررسی شد.

نتیجه اجرای سناریوهای مختلف نشان داد که ۷ سد اصلیِ مورد بهره‌برداری در حوضه، به‌همراه افزایش نیاز آبی، به‌ویژه در بخش کشاورزی، ۴۲ درصد از ۷۹ درصد کل جریان آب سطحی ورودی به دریاچه را به خود اختصاص داده‌اند. البته بهره‌برداری از سدهای اصلی را نمی‌توان به‌تنهایی دلیلی بر کاهش تراز آب دریاچه دانست، بلکه این میزان تأثیرگذاری به‌دلیل تغییر الگوی کشت و به‌تبع آن، تغییر الگوی نیاز آبی در حوضه است که تأثیر بسزایی بر کاهش تراز آب دریاچه داشته و درواقع، افزایش الگوی نیاز آبی حوضه را باید یک سناریوی اصلی و مدیریتی در بهبود و اثربخشی بر تراز آب دریاچه دانست. درحالی‌که سایر سناریوها ازجمله تأثیر عوامل طبیعی با سهم ۱۶ درصد، تنها می‌تواند سرعت روند نزولی تراز دریاچه را کاهش دهد و روند فعلی کاهش تراز آب دریاچه ارومیه به میزان قابل‌توجهی مستقل از متغیرهای اقلیمی است. درباره نقش آبخوان‌های ساحلی بر تراز دریاچه می‌توان گفت که هرچند هیدروگراف معرف در برخی از آبخوان‌های ساحلی، روند نزولی را نشان می‌دهد، اما بیلان آب زیرزمینی ورودی به دریاچه، مقدارِ ناچیزی بوده است.

منابع

احمدزاده، طاهر؛ احمدزاده، بهمن؛ مرادی، شهرام؛ و باغوند، اکبر (۱۳۸۹). معادلات پارامترهای اثرگذار در نوسانات سطح دریاچه ارومیه. چهارمین همایش تخصصی مهندسی محیط زیست، تهران، ایران.

اعلمی، محمدتقی؛ فرزین، سعید؛ احمدی، محمدحسین؛ آقابالایی، بهزاد (۱۳۹۳). مدل‌سازی پویای سیستم سد و آب‌های زیرزمینی به منظور مدیریت بهینه آب (مطالعه موردی: سد گلک). نشریه مهندسی عمران و محیط زیست، ۴۴(۱)، ۱۲-۱.

بایزیدی، شوبو؛ مورکی علی آبادی، هادی؛ و صلوی تبار، عبدالرحیم (۱۳۹۱). بررسی آشکارسازی تغییراقلیم بر حوضه دریاچه ارومیه. نهمین کنگره بین المللی مهندسی عمران، تهران، ایران.

پژوهشکده مطالعات و تحقیقات منابع آب (۱۳۹۲). بررسی تغییر شرایط محیطی در حوضه آبریز دریاچه ارومیه (وضعیت آب زیرزمینی).

پورفلاح، حسن؛ و مشتاق، رضا (۱۳۹۲). مدیریت منابع آب به کمک روش پویایی سیستم با استفاده از مدل Vensim. اولین همایش ملی بحران آب، دانشگاه آزاد اسلامی واحد خوراسگان، اصفهان، ایران.

چرب‌گو، توحید؛ و چرب‌گو، اکبر (۱۳۸۹). پیامدهای منفی سدسازی در حوضه آبریز دریاچه ارومیه و تاثیر آن در خشک شدن دریاچه ارومیه. پنجمین همایش ملی زمین شناسی و محیط زیست، تهران، ایران.

حسن‌زاده، المیرا (۱۳۸۹). تعیین سهم ساخت سازه‌های هیدرولیکی بر کاهش تراز آب دریاچه ارومیه (پایان‌نامه کارشناسی ارشد). گروه مهندسی آب، دانشکده عمران، دانشگاه تبریز.

حسنی مهمویی، بهروز؛ درویش، محمد؛ فتح ا...زاده، همایون؛ و مسیبی، مهرداد (۱۳۹۰). نقش تغییرات آب و هوایی و اقلیمی در کاهش تراز سطح آب دریاچه ارومیه. همایش ملی تغییر اقلیم و تاثیر آن بر کشاورزی و محیط زیست (صص ۷۳۴-۷۲۷)، ارومیه، ایران.

رسولی، علی اکبر؛ عباسیان، شیرزاد؛ و جهانبخش، سعید (۱۳۸۷). پایش نوسان‌های سطح آب دریاچه ارومیه با پردازش تصاویر ماهواره‌ای چندسنجنده‌ای و چندزمانه‌ای. فصلنامه مدرس علوم انسانی، ۱۲(۲)، ۷۱-۵۴.

زمانی اکبری،اصغر؛ ملکی، سعید (۱۳۸۹). ارزیابی تغییرات خط ساحلی دریاچه ارومیه طی دوره ۲۰۰۵-۱۹۸۹ با استفاده از داده‌های GIS & RS. هشتمین همایش ملی ژئوماتیک (صص ۱۱-۱)، تهران، ایران.

شلتن، مارلین (۱۳۹۰). هیدروکلیماتولوژی (مترجم: حسن ذوالفقاری). کرمانشاه: دانشگاه رازی.

عزیزی، قاسم (۱۳۸۳). تغییراقلیم. تهران: انتشارات قومس.

فتحیان، فرشاد؛ مرید، سعید؛ و ارشد، صالح (۱۳۹۲). ارزیابی روند تغییرات کاربری اراضی با استفاده از فن‌آوری سنجش از دور و ارتباط آن با روند جریان رودخانه‌ها (مطالعه موردی: زیرحوضه‌های شرق دریاچه ارومیه). نشریه آب و خاک، ۲۷(۳)، ۶۵۵-۶۴۲. doi: 10.22067jsw.v0i0.26091

فرتوک‌زاده، حمیدرضا (۱۳۷۱)، نگاهی به پویایی سیستم‌ها. دانش مدیریت،۱۷، ۳۴-۲۹.

گلابیان، حسین (۱۳۸۹). طرح احیاء و تثبیت دریاچه ارومیه به کمک آب دریای خزر. فصلنامه مهندسین مشاور، ۴۷، ۸۲-۷۰.

گلیان،سعید؛ ابریشمچی، احمد؛ و تجریشی، مسعود (۱۳۸۶). تحلیل سیاست‌های بهره‌برداری از منـابع آب در حوضـه آبریز با روش پویایی سیستم. نشریه آب‌وفاضلاب، ۱۸(۳)، ۸۰-۷۰.

Ahadnejad, M., & Maruyama, Y. (2010). Study of Uremia Lake level fluctuations and predict probable changes using multi-temporal satellite images and ground truth data period (1976-2010). In: *New Challenge about Climate Change or Human Impact.* Map Asia 2010 & ISG 2010 Conference, Kuala Lumpur, Malaysia.

Delju, A. H., Ceylan, A., Piguet, E., & Rebetez, M. (2013). Observed climate variability and change in Urmia Lake basin, Iran. *Theoretical and Applied Climatology*, 111(1), 285-296. doi: 10.1007/s00704-012-0651-9

Guo, H., Hu, Q., & Jiang, T. (2008). Annual and seasonal streamflow responses to climate and land-cover changes in the Poyang Lake basin, China. *Journal of Hydrology*, 355(1-4), 106-122. doi: 10.1016/j.jhydrol.2008.03.020

Jalili, S., Kirchner, I., Livingstone, D. M., & Morid, S. (2012). The influence of large-scale atmospheric circulation weather types on variations in the water level of Lake Urmia, Iran. *International Journal of Climatology*, 32(13), 1990-1996. doi: 10.1002/joc.2422

Kabiri, K., Pradhan, B., Sharifi, A., Ghobadi, Y., & Pirasteh, S. (2012). Manifestation of remotely sensed data coupled with field measured meteorological data for an assessment of degradation of Urmia Lake, Iran (Vol. 6). In: *Asia Pacific Conference on Environmental Science and Technology,* APEST, Kuala Lumpur, Malaysia.

Kebede, S., Travi, Y., Alemayehu, T., & Marc, V. (2006). Water balance of Lake Tana and its sensitivity to fluctuations in rainfall, Blue Nile basin, Ethiopia. *Journal of Hydrology*, 316(1-4), 233-247. doi: 10.1016/j.jhydrol.2005.05.011

Luna, E. J. R. (2011). *Water level fluctuations of Lake Enriquillo and Lake Saumatre in response to environmental changes* (Unpublished doctoral dissertation). Cornell University.

Mortsch, L., Alden, M., & Scheraga, J. D. (2003). Climate change and water quality in the great lakes region. *Climate Change and Water Quality in the Great Lakes Basin.* Report of the Great Lakes Water Quality Board to the International Joint Commission. Available from the International Joint Commission. Reterived from http://www.ijc.org/rel/pdf/climate_change_2003.pdf

Ostrovsky, I., Rimmer, A., Yacobi, Y. Z., Nishri, A., Sukenik, A., Hadas, O. and Zohary, T. (2012). Long-term changes in the lake Kinneret ecosystem: The effects of climate change and anthropogenic factors. In C. R. Goldman, M. Kumagai and R. D. Robarts (Eds.)., *Climatic Change and Global Warming of Inland Waters: Impacts and Mitigation for Ecosystems and Societies*, John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, UK. doi: 10.1002/9781118470596.ch16

Sellinger, C. E., Stow, C. A., Lamon, E. C., & Qian, S. S. (2008). Recent water level declines in the Lake Michigan - Huron system. *Environmental Science & Technology*, 42(2), 367-373. doi: 10.1021/es070664

Wang, X., Gong, P., Zhao, Y., Xu, Y., Cheng, X., Niu, Z., & Li, X. (2013). Water-level changes in China's large lakes determined from ICESat/GLAS data. *Remote Sensing of Environment*, 132, 131-144. doi: 10.1016/j.rse.2013.01.005