

Environmental Reverse Engineering in Simulation of Dynamic Systems Case study: Reconstructing the Ancient Environment of Lake Jazmourian

Mousa Kordavani¹, Mohamadhosein Ramesht^{2✉}, Saeed Jahanyan³, Alireza Karimi⁴

1. Ph.D Student of Physical Geography, Faculty of Geographical Sciences and Planning, University of Isfahan, Isfahan, Iran
E-mail: M.kordavani@geo.ui.ac.ir
2. Professor of Physical Geography, Faculty of Geographical Sciences and Planning, University of Isfahan, Isfahan, Iran
✉ E-mail: M.h.Ramesht@geo.ui.ac.ir
3. Associate Professor of Management, Faculty of Administrative Sciences and Economics, University of Isfahan, Isfahan, Iran
E-mail: s.jahanyan@ase.ui.ac.ir
4. Professor of Soil Science, Agriculture Faculty Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
E-mail: karimi-a@um.ac.ir



How to Cite: Kordavani, M; Ramesht, M. H; Jahanyan, S; & Karimi, A. (2024). Environmental Reverse Engineering in Simulation of Dynamic Systems (Case study: Reconstructing the Ancient Environment of Lake Jazmourian). *Geography and Development*, 22 (74), 1-24.

DOI: <http://dx.doi.org/10.22111/GDIJ.2023.46023.3541>

Received:

28 June 2023

Received in revised form:

7 October 2023

Accepted:

12 November 2023

Published online:

20 January 2024

Keywords:

Environmental reverse engineering,
Ancient environment,
Jazmourian,
System dynamics,
Vensim simulator.

ABSTRACT

Environmental reverse engineering is a new approach that can be used to obtain a visual representation of the ancient environment. This method can convey the message to researchers about the conditions under which it is possible to revive past environments. Dynamic systems that rely on current environmental data can be classified based on variable classification and Chaos Theory in Vensim software. This allows for the dynamic algorithm of the relationships between variables and their dependencies to be modeled using "Dynamic Systems" modeling, without facing the limitations of static systems. In this study, using Dem10m data, analysis of written documents, and field data, an initiative was taken to reconstruct the past environment of Jazmourian Lake. The results of the study show that: i) the water level of Jazmourian Lake has a significant role in controlling environmental factors. ii) If the lake restoration scenario is implemented according to the 390-meter terrace as the most effective policy for controlling dust, it can reduce the annual average DSI (Dust Storm Index) by 1. iii) By restoring the lake, the negative effects of dust will be neutralized to a significant extent through increased relative humidity, increased vegetation cover percentage, and surface soil moisture.



© the Author(s).

Publisher: University of Sistan and Baluchestan

Extended Abstract

1. Introduction

Reconstructing ancient environments has always been an interesting topic for geomorphology researchers, providing insight into trend analysis and the mechanisms of environmental systems. In recent years, a method called reverse engineering has been used in simulating natural environments.

Reverse engineering is one of the methods for recognizing the structures and components of a system and reconstructing it (Gameros et al, 2015). The efficiency of reverse engineering has led to an increase in the application of this method (Sokovic and Kopac, 2006). Reverse engineering can be used for various purposes, and in some cases, its goal is

to re-document old systems (Chikofsky, 1990). In environmental reverse engineering, the past conditions are reconstructed, and based on that, the system's performance can be understood. There are various methods used to achieve reverse engineering. When dealing with natural environments, we are faced with complex systems where their constituent elements interact with each other, and if one of them changes, unlike other static systems, the elements do not remain fixed, and each of them changes in the direction of a new balance and adaptation. In other words, systems have dynamic feedback and continuously evaluate and adapt their dependent elements to the new conditions as a set of related components. Therefore, we need a method to recognize environmental systems that can show us the dynamics of the system's mechanism and algorithm of operation.

System dynamics is a methodology based on feedback systems that has been incorporated into control theory, and can easily manage the nonlinearities, time delays, and multiloop structures of dynamic and complex systems (Bala et al, 2017). Its capabilities in quantitative simulation have made it an ideal tool for decision support (Xi and Leng Poh, 2013). Brooks can be mentioned as the first geomorphologist who attempted to reconstruct ice age and interglacial periods on a planetary scale using reverse engineering (Brooks, 1950). Lake Jazmourian has undergone seasonal drying due to climate change and is now an important source of wind-blown sediment and dust storms in southeastern Iran (Mohammadi, 2010; Saieedi Far et al, 2021). On the other hand, according to studies by Hooke and Monod, ostrich-like birds from the *Struthionidae* family used to live around Lake Jazmourian during the Quaternary period when the water level was at its highest, and their eggshells have been found by these researchers, indicating a rich vegetation cover in the area at that time (Huckride, 1971; Monod, 1971; Ghorbani, 2017). Given the problem of dust particles, understanding the potential response of DSI to the revival of Lake Jazmourian could help us solve environmental problems in the region. This study aims to develop

a dynamic model to assess the restoration of Lake Jazmourian in three main areas:

A) Restoration of environmental conditions in Lake Jazmourian to understand the potential response of DSI.

B) Simulation of environmental conditions in Lake Jazmourian during the period in which it has experienced different water levels.

C) Evaluation of past scenarios and identification of the most effective system state against changes in the lake level.

In other words, the relationship between fluctuations in the lake level, evaporation, relative humidity, vegetation cover, and dust storm index is evaluated and the relationship between these components in a dynamic system is modeled.

2. Methods and Material

Several stages are defined to achieve the research objectives.

1. In the first stage, the highest encountered water level in Lake Jazmourian is determined based on geomorphological evidence (lacustrine terraces), the remains of old settlements and their analysis, and field evidence (analyzing the sediment samples). Accordingly, the lake's area and volume were used as the main variables to formulate the conceptual model of the system dynamics. Further, the environmental variables, including the lake level (LL), the lake's dried surface (LdS), relative humidity of the air (RH), vegetation (Vg), surfaces prone to dust production (SDP), dust storm index (DSI), evapotranspiration (EVT), desertification coefficient (D&G), precipitation (P), wind speed (U), temperature (T), and surface soil moisture (SM) were determined.

2. In the second stage, the direction of relationships between the variables was determined, primary variables were identified, and cause and effect loops (cause loop diagrams (CLD)) were developed, drawing upon the relationships between the above variables and elements.

3. In the third stage, the Vensim analysis system was applied to classify the variables into 'stock,' 'flow,' and 'auxiliary' variables. Moreover, the

quantitative relationships between all the variables of the problem were defined based on experimental data and written scientific documents, and the variables' relationship was coded in a symbolic algorithm.

4. In the fourth stage, the system dynamics performance was evaluated considering the symbolic algorithm of its overall structure and cause-effect loops; and their validity was verified by applying conditions changes.

3. Results and Discussion

One of the problems and issues in eastern Iran is the phenomenon of dust-storm. Drought and the construction of several dams along the rivers leading to Jazmourian Lake have made the dry bed of this lake one of the most active sources of dust production. The question here is, given the existing background of the lake, how will be the extent and severity of the dust phenomenon in terms of lake regeneration. Therefore, we have tried to reconstruct the past conditions with environmental reverse engineering and achieve the results of the past environmental conditions. The results of this research, which was based on the reverse engineering method of the environment and the use of the dynamic system, show that:

i) The restoration of the lake at the level of 405 meters and its stability has a very important role in controlling and reducing dust so that the dust index is reduced from the current 2.58 to 0.7.

ii) If scenario 2 is used, i.e., the stability of the 390-meter sea level as the most efficient possible policy in the direction of dust control, it is able to reduce the annual average DSI to 1, and this means that the amount of dust will be reduced by 75%.

4. Conclusion

According to the simulated results, in case of dewatering and Revitalization of the lake, the current dry area will be covered and will increase evaporation and as a result more moisture will be injected into the air, followed by increased vegetation and soil surface moisture. This chain of factors will lead to a significant reduction of dust in the region. According to the obtained results, it can be said that by injecting about 100 billion cubic meters of water into the lake and maintaining and maintaining the water level at 390 meters with an area of 7 thousand square kilometers of the lake, it is possible to reduce the dust in the area by up to 75%. In other words, based on Chaos Theory and dynamic systems model, among dozens of factors and environmental variables, the control thresholds of fine dust in the region will be possible only by controlling the volume of one hundred billion cubic meters of the lake with a surface equivalent to 7000 square kilometers.

Keywords: Environmental reverse engineering, Ancient environment, Jazmourian, System dynamics, Vensim simulator.

5. References

- Ahmadi, H., Esmailpour, Y., Moradi, A. and Gholami, H (2019). Assessment of land Sensitivity to Desertification Hazard Using System Dynamics Approach in the Jazmurian Watershed. hmadi, H., Esmailpour, Y., Moradi, A. and Gholami, H, (20).
<https://dx.doi.org/10.22069/jwsc.2019.15565.3076>
- Alizade, Sh., Mohammadi, H. and Kardavani, P (2017). Dispersion modeling drought caused by climate change in Iran using system dynamics. *Town & Country Planning* (2008-7047). Spring/Summer, Vol. 9 Issue 1, 169-188. 20p.
<https://dx.doi.org/10.22059/jtcp.2017.61408>
- Alnaser, W.E. and Barakat, A (2000). Use of condensed water vapour from the atmosphere for irrigation in Bahrain. *Hazard Using System Dynamics Appro.*
[https://doi.org/10.1016/S0306-2619\(99\)00054-9](https://doi.org/10.1016/S0306-2619(99)00054-9)
- Bala, B.K., Arshad, F.M. and Noh, K.M (2017). System dynamics.pour from the atmosphere for irrigation in.
[https://doi.org/10.1016/S0306-2619\(99\)00054-9](https://doi.org/10.1016/S0306-2619(99)00054-9)

- Bastan, M., Abdollahi, F. and Shokoufi, K (2013). Analysis of Iran from the atmosphere for irrigation in Bahrain. Hazard Using System Dynamics Approach in the Jazmurian Watershed. hstan, M.f Wa.
https://www.researchgate.net/publication/277957712_Analysis_of_Iran's_dust_emission_with_system_dynamics_methodology...
- Brooks, C.E.P (1950). Climate in everyday life (p. 26). London: Benn.
<https://journalhosting.ucalgary.ca/index.php/arctic/article/download/67073/50986/188785>
- Campbell, G. S., J. M. Norman (1997). An Introduction to Environmental Biophysics, 2nd ed., 286 pp., Springer, New York.
<https://doi.org/10.1007/978-1-4612-1626-1>
- Chikofsky, E.J. and Cross, J.H (1990). Reverse engineering and design recovery: A taxonomy. IEEE software, 7(1), 13-17.
<https://doi.org/10.1109/52.43044>
- Clifford Holmes, J.K., Slinger, J.H., Musango, J.K., Brent, A.C. and Palmer, C.G (2014). Using system dynamics to explore the water supply and demand dilemmas of a small South African municipality. Inlinger, J.H., Musango, J.K., Brent, A.C. and Palmer, C.G, (2014). Using system dynamics to explore the water supply and demand dilemmas of a small
<http://resolver.tudelft.nl/uuid:c5a645f5-d5f4-4d7d-bd74-7a3329930472>
- Ebrahim Ghazvini, Z., Ahmadvand, A,M (2019). Dynamic modeling of the degree of sustainability of urban green space cover, a case study of botanical garden. National conference of applied researches in management and industrial engineering, Tehran.
<https://civilica.com/doc/903545>
- Ewers, M (2005). July. Combining hydrology and economics in a system dynamics approach: modeling water resources for the San Juan Basin. In of applied researches in management and industrial engineering, Tehran., Musango, J.K.
https://www.researchgate.net/publication/255636110_Combining_Hydrology_and_Economics_in_a_Systems_Dynamics_Approach_Modeling_Water_Resources_for_the_San_Juan_Basin.
- Ford, D.N (1999). A behavioral approach to feedback loop dominance analysis.s approach: modeling water resources for the San Juan Basin. In of applied researches
[https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1727\(199921\)15:1%3C3::AID-SDR159%3E3.0.CO;2-P](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1727(199921)15:1%3C3::AID-SDR159%3E3.0.CO;2-P)
- Forrester, JW (1961). [2013 reprint]. *Industrial Dynamics*. Mansfield Centre, CN: Martino Fine Books.
- Forrester, J.W (1969). *Urban Dynamics*. Cambridge, Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology Press.
- Forrester JW (1971). *World Dynamics*. (2nd edn 1973). Pegasus Communications: Waltham, MA.
https://monoskop.org/images/d/dc/Forrester_Jay_W_World_Dynamics_2nd_ed_1973.pdf
- Gameros, A., De Chiffre, L., Siller, H.R., Hiller, J. and Genta, G (2015). A reverse engineering methodology for nickel alloy turbine blades with internal features. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 9, 116-124.
<https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2014.12.001>
- Guo, H.C., Liu, L., Huang, G.H., Fuller, G.A., Zou, R. and Yin, Y.Y (2001). A system dynamics approach for regional environmental planning and management: a study for the Lake Erhai Basin. Journal of environmental management, 61(1), .93-111.
<https://doi.org/10.1006/jema.2000.0400>
- Harrison, J.V (1943). The Jazmurian depression, Persian Baluchistan.2015). A reverse engineering methodology for nick.
<https://doi.org/10.2307/1789627>

- Huckride, R (1971). The forth geological period and the Late Mesolithic Age in Kerman Province (Persian translation by Kardavani, P.). *Geographical Reports*, 7: 126-134. (In Persian)
- Karamouz, M., Nazif, S. and Falahi, M (2012). Od and the Late Mesolithic Age in Kerman Province (Persian translation b).
<https://doi.org/10.1201/b13771>
- Karimi, A.; Ong, M.; Saad al-Din, A.; Tahmasbipour, N.; Rezaei, H (2015). Introduction of system dynamics approach in participatory modeling of comprehensive management of water and soil resources for watershed scale use, 11th Iran National Watershed Science and Engineering Conference, participatory development in watershed management, Yasouj University, 54-62.
<https://sid.ir/paper/885761/fa>
- Karlsson, R., Nasir, J and Dandekar, P. P (2000). "Sustainable Business Development," in the 18th International Conference of the System of the System Dynamics Society, Bergen, Norway.
- Koushali, H.P., Moshtagh, R. and Mastoori, R (2015). Water resources modelling using system dynamic in Vensim. Conference of the System of the System Dynamics.
<http://dx.doi.org/10.5963/JWRHE0403006>
- Luo, Y., Khan, S., Cui, Y. and Peng, S (2009). Application of system dynamics approach for time varying water balance in aerobic paddy fields. *Paddy and Water Environment*, 7(1), 1-9.
<https://doi.org/10.1007/s10333-008-0146-6>
- Mahmoudi, F (1988). The evolution of Iran's unevenness in the Quaternary. *Journal of Geographical Research*, 23, 5-43.
- McTainsh, G.H., Tews, E.K (2007). Soil erosion by wind- Dust Storm Index (DSI): National Monitoring and Evaluation Framework. Australian Government National Land and Water Resources Audit, pp. 28.
https://www.researchgate.net/profile/Errol-Tews/publication/237356114_National_Monitoring_and_Evaluation_Framework/links/00b4952d78eb686062000000/National-Monitoring-and-Evaluation-Framework.pdf
- Meadows, D. H., Meadows, D. L., & Randers, J. WWB III (1972). The limits to growth: a report for the Club of Rome's project on the predicament of mankind.
- Mohamadi, A (2010). Sedimentology and sedimentary geochemistry of Jazmurian playa. *Arid Biom Scientific and Research Journal*, Vol. 1 No. 1, 68-78.
<https://dorl.net/dor/20.1001.1.2008790.1389.1.1.7.1>
- Monod, Th (1971). A brief survey of the physical features of the Lut. (Persian translation by Mahmudi, F.). *Geographical Reports*, 7: 54-100. (In Persian)
- Monteith, J. L., Unsworth, M. H (1990). Radiation environment. Principles of environmental physics, 2nd ed., Edward Arnold, London, 36-57.
<http://booksite.elsevier.com/9780123869104>
- Muscolino, G (1996). Dynamically modified linear structures: deterministic and stochastic response. *Journal of engineering mechanics*, 122(11), 1044-1051.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(1996\)122:11\(1044\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(1996)122:11(1044))
- Newton.P (1999). An Introduction to System Dynamics, Presented Paper in Sustainable Green Bay Conference.
- Ramesht, M. H (2006). Symbols and Images in Geomorphology. 7th ed. Iran:Tehran. The Organization for Researching and Composing University Textbooks in the Humanities (SAMT). 200.

- Rashki, A., M. Arjmand, and D. G. Kaskaoutis (2017). Assessment of dust activity and dust-plume pathways over Jazmurian Basin, southeast Iran. *Aeolian Research* 24:145d Wat.
https://ui.adsabs.harvard.edu/link_gateway/2017AeoRe..24..145R/doi:10.1016/j.aeolia.2017.01.002
- Ravi, S., D'Odorico, P., Over, T.M. and Zobeck, T.M (2004). On the effect of air humidity on soil susceptibility to wind erosion: The case of air-dry soils. *Geophysical Research Letters*, 31(9).
<https://doi.org/10.1029/2004GL019485>
- Richardson, G.P (1981). *Pugh III: Introduction to system dynamics modeling*. Productivity, Cambridge.
<https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2600961>
- Roberts, E.B (1981). *Managerial applications of system dynamics*. Cambridge, Massachusetts: Productivity Press. (No. 04; HD31, R6.).
<https://lccn.loc.gov/77026952>
- Rong, L (2004). "Using System Dynamics in Decision Support for Sustainable Waste Management," Master of Engineering, Department of Civil Engineering, National University of Singapore, Singapore.
<https://core.ac.uk/download/pdf/48629742.pdf>
- Saieedifar, Z., Rahimi, M., Khosroshahi, M. and Yazdani, M (2021). Identification of areas susceptible to high dust concentrations and their relationship with synoptic factors in Jazmourian basin..ience and Technology, 9, pp.11eange Protection Research, 18(2), 254-273.
<https://dx.doi.org/10.22092/ijfrpr.2020.341749.1413>
- Shabani eraghi A, Yamani M, Goorabi A, Lak R (2021). Recovery of sequences and extent of ancient lake in Jazmourian Playa based on lake terraces in Quaternary. *E.E.R.* 2021; 11 (2) :27-46.
<http://dorl.net/dor/20.1001.1.22517812.1400.11.2.8.8>
- Shaw, E.M., Beven, K.J., Chappell, N.A., Lamb, R (2010). *Hydrology in practice*, CRC press: London, ISBN 0203030230.
<https://doi.org/10.1201/9781315274904>.
- Simonovic, S. P., & Rajasekaram, V (2004). *Integrated analyses of Canada's water resources: a system dynamics approach.ncentrations and their relationship with synoptic factors in Jazmourian basin..ience and Tec.*
<https://doi.org/10.4296/cwrj223>
- Sokovic, M. and Kopac, J (2006). RE (reverse engineering) as necessary phase by rapid product development.cs approach.ncentrations and their relationship with synoptic facto
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.04.047>
- Sterman, J (2002). *System Dynamics: systems thinking and modeling for a complex world*.
<http://hdl.handle.net/1721.1/102741>
- Wang, Y.C., Lin, Y.P., Huang, C.W., Chiang, L.C., Chu, H.J. and Ou, W.S (2012). A system dynamic model and sensitivity analysis for simulating domestic pollution removal in a free-water surface constructed wetland.ogy,er, Air, & Soil Pollution, 223(5), 2719-2742.
<https://doi.org/10.1007/s11270-011-1062-8>
- Winz, I., Brierley, G. and Trowsdale, S (2009). The use of system dynamics simulation in water resources management.ty analysis for simulating domestic pollution remo
<https://doi.org/10.1007/s11269-008-9328-7>
- Xi, X. and Poh, K.L (2013). Using system dynamics for sustainable water resources management in Singapore.anagement.ty analysis for simulating domestic
<https://doi.org/10.1016/j.procs.2013.01.017>



مهندسی معکوس محیطی در شبیه‌سازی سامانه‌های دینامیک

نمونه موردی: بازسازی محیط دیرینه دریاچه جازموریان

موسی کردوانی^۱، دکتر محمدحسین رامشت^{۲*}، دکتر سعید جهانیان^۳

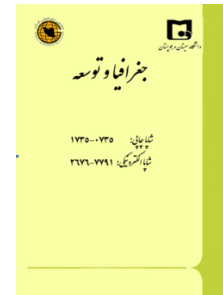
دکتر علیرضا کریمی^۴

مقاله پژوهشی

چکیده

مهندسی معکوس محیطی از روش‌های جدید است که می‌توان به اتکای آن تصویری از دیرینه محیط به دست آورد. این روش می‌تواند این پیام را برای محققان داشته باشد که با چه شرایطی امکان تجدید حیات محیط‌های گذشته وجود دارد. سیستم‌های دینامیک که متکی به داده‌های محیطی زمان حال است با طبقه‌بندی متغیرها و براساس نظریه «کیاس»^۵ در نرم‌افزار Vensim این امکان را فراهم می‌آورد تا الگوریتم دینامیک روابط بین متغیرها و نحوه وابستگی آن‌ها با استفاده از مدل‌سازی «سیستم‌های پویا» امکان‌پذیر و با محدودیت‌های سیستم‌های استاتیک مواجه نباشد. در این پژوهش با استفاده از داده‌های Dem ۱۰ متری، تحلیل اسناد مکتوب و داده‌های میدانی، به بازسازی فضای محیط گذشته چاله جازموریان مبادرت شد. نتایج نشان داد: ۱- سطح دریاچه جازموریان، در کنترل عوامل محیطی نقش مؤثری دارد؛ ۲- در صورت به‌کارگیری سناریوی احیای دریاچه مطابق با تراس ۳۹۰ متری به‌عنوان کارآمدترین سیاست در راستای کنترل گرد و غبارها می‌تواند متوسط سالیانه DSI را به یک کاهش دهد؛ ۳- با احیای دریاچه، اثر منفی گرد و غبار از طریق افزایش رطوبت نسبی هوا، افزایش درصد پوشش گیاهی و رطوبت سطحی خاک تا ۷۵ درصد خنثی خواهد شد.

جغرافیا و توسعه، شماره ۷۴، بهار ۱۴۰۳
تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۴/۰۷
تاریخ بازنگری داوری: ۱۴۰۲/۰۷/۱۵
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۸/۲۱
صفحات: ۱-۲۴



واژه‌های کلیدی:
مهندسی معکوس محیطی، دیرینه محیط، جازموریان، سیستم پویا، شبیه‌سازی Vensim.

مقدمه

طبیعی با سیستم‌های پیچیده‌ای روبه‌رو هستیم که عناصر تشکیل‌دهنده آن با همدیگر رابطه تعاملی دارند؛ به‌صورتی که اگر یکی از آن‌ها تغییر کند، برخلاف سیستم‌های استاتیک دیگر عناصر ثابت باقی نمی‌ماند و هر یک از آن‌ها در جهت تعادل و سازگاری جدید تغییر می‌کنند؛ به عبارت دیگر سیستم‌های دینامیک به‌صورت بازخوردی و مجموعه‌ای از اجزای مرتبط با هم، پیوسته تغییرات در عناصر وابسته به سیستم را ارزیابی و خود را با شرایط جدید سازگار می‌کنند؛ بنابراین برای بازشناسی سیستم‌های محیطی

همواره بازسازی محیط‌های دیرینه برای محققان ژئومورفولوژی جذاب و در تحلیل رونمایی‌ها و رویکرد مکانیسم سیستم‌های محیطی راهگشا بوده است. در شبیه‌سازی محیط‌های طبیعی در دهه‌های اخیر از روشی به نام مهندسی معکوس استفاده می‌شود. در مهندسی معکوس^۶ محیطی، شرایط گذشته بازسازی و براساس آن امکان نحوه عملکرد سیستم روشن می‌شود. برای دستیابی به مهندسی معکوس، روش‌های متعددی معمول است. در مواجهه با محیط

۱. دانشجوی دکتری گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم جغرافیایی و برنامه‌ریزی دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

۲. استاد گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم جغرافیایی و برنامه‌ریزی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران (نویسنده مسئول)

۳. دانشیار گروه مدیریت، دانشکده علوم اداری و اقتصاد، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

۴. استاد گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

5. Chaos theory

6. Reverse engineering

برای مطالعات جمعیتی (Meadows et al, 1972:196)، رشد اقتصادی (Roberts, 1981:38)، توسعه کسب و کار (Roberts, 1981: 38; Karlsson et al, 2000)، مدیریت آب و منابع طبیعی (Clifford et al, 2014; Winz & Brierley, 2009; Lou et al, 2009; Evers, 2005; Simonovic, 2004) و سیستم‌های زیست‌محیطی (Rong, 2004; Ford, 1999) و بررسی آلودگی‌های آب‌های سطحی و تالاب‌ها (Wang et al, 2012: 2719-2742) مورد استفاده قرار گرفته است. رابرتس (۱۹۷۸) و مورکرافت و استرمن (۱۹۹۴) نمونه‌هایی از کاربرد پویاشناسی سیستم‌ها در مسائل مهم از صنایع و موضوع‌های سیاست‌گذاری عمومی ارائه کرده‌اند. همچنین موسکایلد (۱۹۹۶) کاربردهایی را در فیزیک و زیست‌شناسی تشریح کرده است. در ایران نیز در سال‌های اخیر در زمینه‌هایی همچون: منابع آب و مصارف کشاورزی (Koushali et al, 2015:253)، مدیریت منابع آب و خاک (کریمی و همکاران، ۱۳۹۵: ۵۵)، پایداری پوشش فضای سبز شهری (قزوینی، ۱۳۹۸: ۲) نسبت به مدل‌سازی، شبیه‌سازی و فهم ساختار و رفتارهای پیچیده سیستم‌ها اقدام کردند. در زمینه سیستم‌های پویا در مسائل جغرافیایی می‌توان به پراکندگی خشکسالی و تغییر اقلیم (علیزاده و همکاران، ۱۳۹۶: ۱۸۸-۱۶۹؛ Ahmadi et al, 2019) و پدیده گرد و غبار (Bastan et al, 2013) اشاره کرد. همچنین از رویکرد سیستم‌های پویا برای انجام برنامه‌ریزی و مدیریت زیست‌محیطی منطقه‌ای در حوضه «دریاچه ایرهایی»^۴ در چین استفاده شده است (Guo et al, 2001: 93-111). می‌توان از بروکس به‌عنوان اولین ژئومورفولوژیستی نام برد که تلاش کرد امکان بازسازی دوره‌های یخبندان و بین یخبندان را در مقیاس سیاره‌ای با استفاده از مهندسی معکوس ایده‌پردازی کند (Brooks, 1950: 30).

روشی نیاز است که بتواند پویایی در مکانیزم و الگوریتم عملکردی سیستم را به ما نشان دهد. فارستر^۱ در مؤسسه فناوری ام.آی.تی روش پویایی‌شناسی سیستم را به‌منظور مطالعه سیستم‌های پیچیده ابداع کرد (Forrester, 1969: 427). پویاشناسی سیستم‌ها^۲ (SD)، رویکردی برای درک رفتار سیستم‌های پیچیده در طول زمان است (Forrester, 1969: 13). پویایی‌شناسی سیستم در دهه ۱۹۷۰ توسط باشگاه رم محبوبیت پیدا کرد (Meadows et al, 1972: 196). در برخی موارد هدف فرایند مهندسی معکوس می‌تواند مستندسازی مجدد سیستم‌های قدیمی باشد (Chikofsky, 1990: 14). کارایی مهندسی معکوس باعث افزایش کاربرد این روش شده است (Sokovic & Kopac, 2006: 1)؛ به گونه‌ای که مهندسی معکوس یکی از روش‌های بازشناخت ساختارها و مؤلفه‌های یک سیستم در احیای مجدد آن شناخته می‌شود (Gameros et al, 2015:2). رویکرد پویایی‌شناسی سیستم در نظریه دینامیک غیرخطی و کنترل بازخورد، توسعه یافته و در ریاضیات، فیزیک و مهندسی پایه‌گذاری شده است (Sterman, 2002:4). قابلیت‌های این روش در شبیه‌سازی کمی، آن را به ابزاری برای پشتیبانی تصمیم‌گیری ایده‌آل تبدیل ساخته است (Xi & Leng Poh, 2013:158).

پویاشناسی سیستم، روش‌شناسی‌ای است مبتنی بر سیستم‌های بازخوردی که از «نظریه کنترل»^۳ به عاریت گرفته شده و می‌تواند به سادگی غیرخطی بودن و تأخیر زمانی و ساختارهای چندحلقه‌ای سیستم‌های پویا و پیچیده را مدیریت کند (Bala et al, 2017: 5). روش پویایی‌شناسی سیستم در دهه اخیر با موفقیت

1. Jay W. Forrester

2. System dynamic

۳. نظریه کنترل (Control theory)، نوعی دخالت در رفتار پدیده است؛

به طوری که نتایج مطلوب حاصل شود. این عمل با دستکاری ورودی‌های

سیستم صورت می‌پذیرد.

محدوده مورد مطالعه

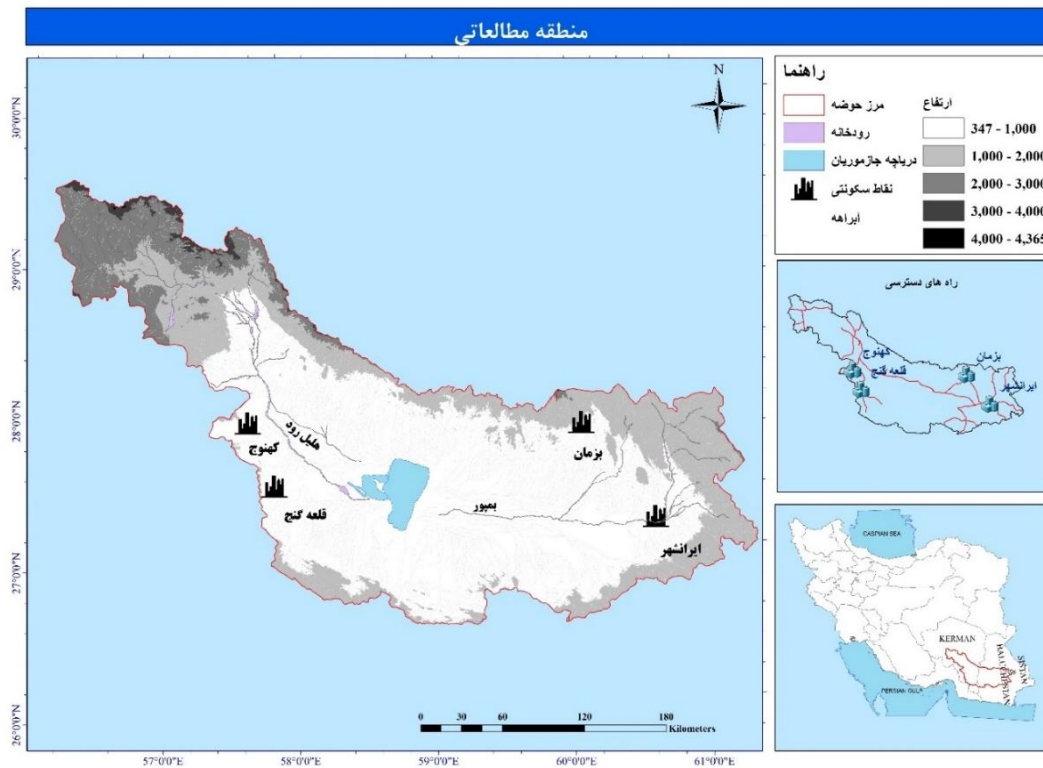
حوضه جازموریان فرورفتگی بزرگی در جنوب شرقی ایران است که نیمه غربی این حوضه در استان کرمان و نیمه شرقی آن در استان سیستان و بلوچستان واقع شده است. در مرکز جازموریان و در بخش‌های کم‌ارتفاع آن (ارتفاع سطح ۳۶۰ متر از دریاهای آزاد) پلایای فصلی وجود دارد که در فصول بارندگی و زمستان آب‌گیری و در تابستان خشک می‌شود (شکل ۱). دو رودخانه بمپور از شرق و رودخانه هلیل‌رود از غرب به حوضه جازموریان می‌ریزند. علاوه بر این دو رودخانه، مسیرهای سیلابی متعددی نیز وجود دارد که آب آن‌ها مستقیماً به دریاچه جازموریان می‌ریزد (Harrison, 1943: 211). رودخانه‌های کوچک به دلیل احداث سدها و مصارف کشاورزی قادر به تأمین آب این دریاچه نیستند. بیشترین میزان بارندگی سالانه در قسمت غربی حوضه (حدود ۲۰۰ میلی‌متر) و میانگین بارندگی سالانه منطقه کمتر از ۱۰۰ میلی‌متر است. در مقابل تبخیر بسیار زیاد است و به ۲۵۰۰ میلی‌متر در سال می‌رسد (Rashki et al, 2017:146). به‌طور کلی حوضه دریاچه جازموریان ۵۸°۴' تا ۵۹°۰۰' طول شرقی و ۲۷°۱۱' تا ۲۷°۴۱' عرض شمالی جغرافیایی را دربر می‌گیرد و وسعتی معادل ۶۹۶۰۰ کیلومترمربع را شامل می‌شود. در این پژوهش تمرکز بر روی دریاچه خشک‌شده‌ای است که در مرکز این حوضه قرار دارد و منبع اصلی انتشار گرد و غبار است. بررسی‌های رسوب‌شناسی چاله جازموریان نیز نشان می‌دهد که رسوبات آن عمدتاً از نظر اندازه در حد سیلت و رس است و می‌توانند توسط باد و توفان برای فواصل طولانی حمل شوند (محمدی، ۱۳۸۹: ۷۶).

دریاچه جازموریان به دلیل تغییرات اقلیمی، شرایط قبلی خود را ندارد و به پایایی فصلی بدل شده است؛ به‌همین دلیل منشأ مهم رسوبات بادی و توفان‌های گرد و غبار در جنوب شرقی ایران به‌شمار می‌آید (محمدی، ۱۳۸۹: ۶۸؛ Saieedi Far et al, 2021: 144). از سوی دیگر، مطابق با مطالعات هوکریده و مونود، پرنده‌گانی از خانواده شترمرغ‌ها در زمانی که سطح آب در بالاترین حد خود بوده (کوآترنری)، در اطراف دریاچه جازموریان زندگی می‌کردند و آثاری از پوسته تخم آن‌ها توسط این محققان پیدا شد (Huckride, 1971: 129; Monod, 1971: 90؛ محمدی، ۱۳۶۷: ۹) که نشان‌دهنده وجود پوشش گیاهی غنی این منطقه در آن زمان است. با توجه به معضل گرد و غبارها، درک واکنش احتمالی DSI به احیای دریاچه جازموریان می‌تواند ما را در حل مسائل محیط آن منطقه یاری کند. این مطالعه با توسعه یک مدل دینامیک برای ارزیابی بازسازی سامانه دریاچه جازموریان سه موضوع زیر را هدف اساسی خود قرار داده است.

الف) بازسازی شرایط محیطی دریاچه جازموریان برای درک واکنش احتمالی DSI^۱.

ب) شبیه‌سازی شرایط محیطی دریاچه جازموریان در دوره‌ای که سطوح مختلف آب را تجربه کرده است.

ج) ارزیابی سناریوهای شرایط گذشته و معرفی مؤثرترین حالت سیستم در برابر تغییر سطح دریاچه؛ به‌عبارت‌دیگر رابطه بین نوسانات سطح دریاچه در برابر تبخیر، رطوبت نسبی، پوشش گیاهی و شاخص توفان گرد و غبار، ارزیابی و روابط این مؤلفه‌ها در سیستمی پویا مدل می‌شود.



شکل ۱: موقعیت منطقه مورد مطالعه (اقتباس از Dem ۹۰ متری

تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۴۰۲

داده‌ها و روش‌ها

برای دستیابی به اهداف تحقیق، چند مرحله تعریف شده است.

۱- در اولین مرحله براساس شواهد ژئومورفولوژی (تراس‌های دریاچه‌ای)، آثار سکونتگاه‌های قدیمی و تحلیل آن‌ها و همچنین شواهد میدانی (تحلیل نمونه‌های رسوبی) بالاترین سطح آب تجربه‌شده در دریاچه جازمورین تعیین شد و مساحت و حجم آن به‌عنوان متغیرهای اصلی در تدوین الگوریتم مفهومی سیستم دینامیک محیطی به‌کار گرفته شد؛ سپس نسبت‌به تعیین متغیرهای محیطی شامل سطح دریاچه (LL)، سطح خشک دریاچه (LdS)، رطوبت نسبی هوا (RH)، پوشش گیاهی (Vg)، سطوح مستعد تولید گرد و غبار (SDP)، شاخص گرد و غبار (DSI)،

تبخیر (EVT)، ضریب بیابان‌زایی (D&G)، بارش (P)، سرعت باد (U)، دما (T) و رطوبت سطحی خاک (SM) اقدام شد.

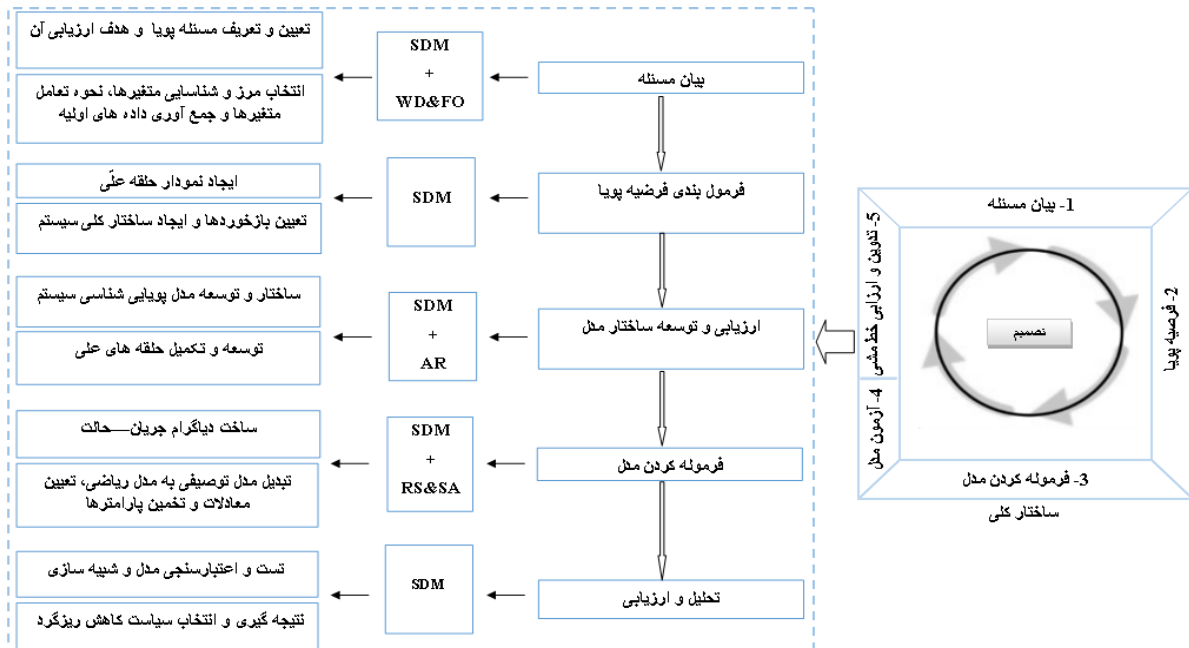
۲- در مرحله دوم به استناد روابط موجود بین عناصر و متغیرهای بالا به شناسایی درجهت رابطه متغیرها و شناسایی متغیرهای اصلی و توسعه حلقه‌های علی (CLD^۱) مبادرت شد.

۳- در مرحله سوم نسبت‌به دسته‌بندی متغیرها براساس سیستم تحلیلی «ونسیم^۲» به متغیرهای «حالت^۳»، «جریان^۴» و «کمکی^۵» اقدام و روابط کمی میان تمامی متغیرهای مسئله، براساس داده‌های تجربی و اسناد مکتوب علمی تعریف و به تدوین رابطه این متغیرها در یک الگوریتم نمادین مبادرت شد.

1. Causal Loop Diagrams
2. Vensim
3. Stock, State, Box, Level
4. Rate/Flow variable
5. Auxiliary/Constant

اعمال تغییرات شرطی، روایی آن‌ها راستی‌آزمایی شد. شکل (۲) چارچوب کلی فرایند تحقیق را نشان می‌دهد.

۴- در مرحله چهارم با توجه به حلقه‌های علت و معلولی و الگوریتم نمادین ساختار کلی سیستم دینامیک، به ارزیابی نحوه عملکرد آن مبادرت و با



جزئیات خاص برای مطالعه موردی در نظر گرفته شده

شکل ۲: ساختار مدل ارزیابی. SDM: مدل دینامیک سیستم، WD: اسناد مکتوب، OF: مشاهده میدانی،

AR: منابع موجود، RS: سنجش از دور، SA: تجزیه و تحلیل آماری

تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۴۰۲

(شعبانی و همکاران، ۱۴۰۰ : ۲۷) تراس‌های گذشته دریاچه کنترل و مشخص شد.

با توجه به بررسی‌های انجام‌شده، پایین‌ترین سطح دریاچه دیرینه در ارتفاع ۳۷۰ و بالاترین تراس تجربه‌شده آبی در ۷۴۰۵ متری مشخص شد (شکل ۳). برآورد تغییرات حجمی - ارتفاعی حوضه در نرم‌افزار سورفر^۸ نشان می‌دهد، دریاچه جازموریان زمانی که بالاترین حد آبی خود را تجربه می‌کرده است، مساحتی حدود ۱۰ هزار کیلومتر مربع و حجمی معادل ۲۴۳ کیلومتر مکعب داشته است.

نتایج و بحث

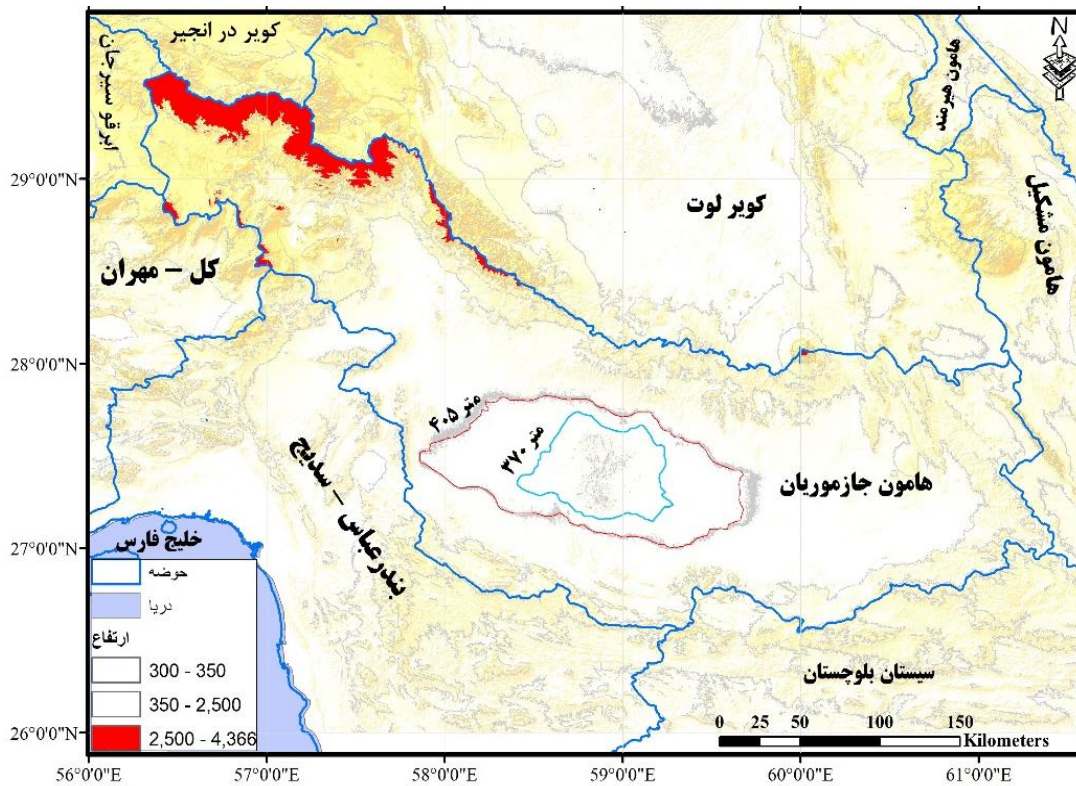
بازشناسی شرایط محیطی چاله جازموریان

با توجه به شواهد عینی میدانی و با بهره‌گیری از نقشه‌های ۱:۵۰۰۰۰ توپوگرافی سازمان جغرافیایی کشور و تلفیق آن با نقشه Dem ۱۰ متری براساس شاخص‌های ^۱T.P، ^۲F.W، ^۳S.H، ^۴N.W، ^۵C.W.D، ^۶H.L (رامشت، ۱۳۸۵: ۳۶) نسبت به تعیین بالاترین خط آب تجربه‌شده در چاله جازموریان اقدام شد. سپس با استناد به مطالعات رسوب‌شناسی منطقه

۷. این ارتفاع براساس نقشه Dem ۱۰ متری تعیین شده است و ممکن است در نقشه‌های توپوگرافی یا گوگل‌ارت اعداد دیگری را نشان دهد.

8. Surfer

1. Topographic points
2. Forked Waterway
3. Single hill
4. New waterway
5. Changing waterway Direction
6. Habitat line



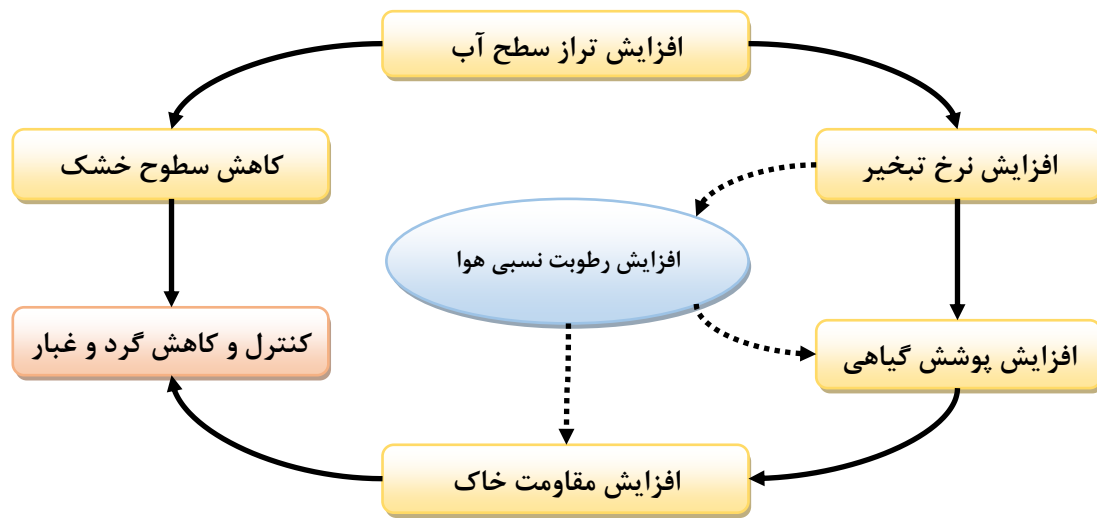
شکل ۳: سطح کنونی در خط ارتفاعی ۳۷۰ متری و بالاترین تراس دریاچه در گذشته در خط ارتفاعی ۴۰۵ متری مشخص شده است
تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۴۰۲

افزایش رطوبت نسبی هوا شده و این عامل نیز در نرخ رشد گیاهان و ایجاد پوشش گیاهی مؤثر است.
۲- افزایش رطوبت نسبی و پوشش گیاهی نیز چسبندگی و مقاومت خاک را به دنبال دارد؛ در نتیجه بالاترین سطح آب ممکن در دریاچه می‌تواند در کنترل پدیده گرد و غبارها تأثیرگذار باشد. با این پیش‌فرض‌ها، مدل مفهومی به دنبال تعریف حلقه‌های بازخورد مهمی است که رفتار سیستم را هدایت می‌کند (شکل ۴).

تدوین مدل مفهومی

برای تدوین مدل مفهومی از تئوری «فرضیه پویا»^۱ استفاده می‌شود. در این پژوهش اساس و بنیان مدل ذهنی، سطح دریاچه است. با توجه به شرایط محیطی گذشته حوضه جازموریان، در تدوین الگوریتم سیستم دینامیکی این حوضه، سطح دریاچه اصلی‌ترین عاملی است که می‌تواند در خروجی سیستم و عملکرد دیگر متغیرها مؤثر باشد. با توجه به رفتار کنونی سیستم و اطلاع از گذشته آن، مدل ذهنی از مسئله چنین تبیین می‌شود.

۱- افزایش تراز سطح آب دریاچه باعث افزایش نرخ تبخیر از سطح دریاچه می‌شود که این امر باعث

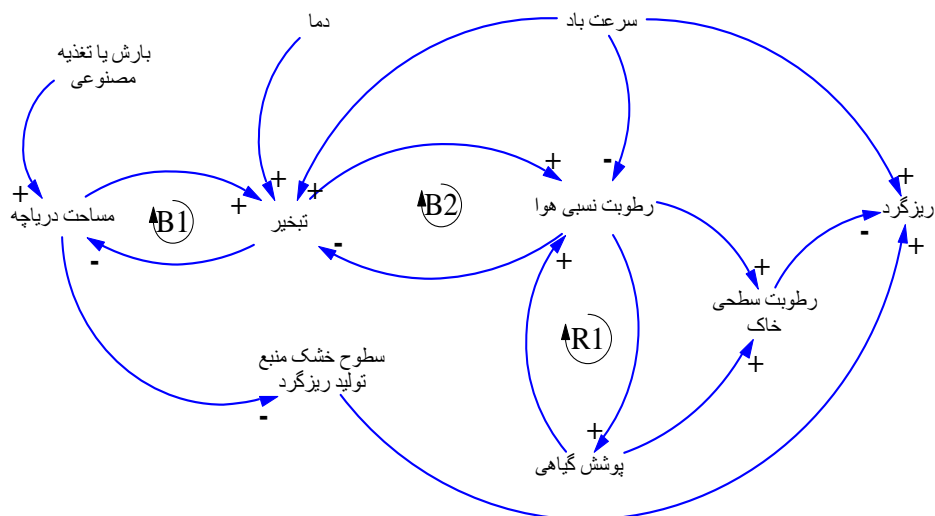


شکل ۴: مدل مفهومی تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۴۰۲

تبیین روابط علی (رفتار متغیرهای کلیدی)

در ادامه با این پیش فرض که ساختار حلقه علی که رفتار مرجع سیستم را ایجاد می کند، تابع «فرضیه پویا» است، به ترسیم نمودار علت و معلولی مبادرت شد. نمودارهای علت و معلولی تصویری از متغیرها در یک سیستم است که به وسیله پیکانها به هم مرتبط شده اند و بیانگر روابط علت و معلولی میان آنها به منظور نشان دادن ساختار حلقه ای بازخوردی

سیستم است. یک حلقه بازخورد، توالی بسته ای از علتها و معلولهاست. نمودار حلقه علی به منظور تعاملات دینامیک مابین عناصر سیستم به کار گرفته شد و در آن تأثیرگذاری مثبت و منفی عناصر بر یکدیگر نشان داده می شود. ترسیم نمودار حلقه علی و آثار مثبت و منفی متغیرهای کلیدی در بازخوردها تعیین شد (شکل ۵).



شکل ۱: نمودار رفتار متغیرهای کلیدی براساس تعیین روابط علت-معلولی

تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۴۰۲

تجربی براساس کمبود فشار بخار ($e_s - e_d$) یا معادله دالتون استوار است. کمبود فشار بخار با در دست داشتن متوسط دما (T) و متوسط رطوبت نسبی (RH) از معادله ۲ قابل محاسبه است (Shaw et al. 2010: 59).

معادله ۲:

$$e_s - e_d = \left[\exp\left(\frac{16.78T - 116.9}{T + 237.3}\right) \right] (1 - RH/100)$$

در این معادله، T برحسب درجه سلسیوس، RH برحسب درصد و $e_s - e_d$ برحسب کیلوپاسکال است.

معادله ۳:

$$RH = \frac{e(T_a)}{e_s(T_a)} \times 100$$

در این رابطه، RH رطوبت نسبی به درصد، e_s فشار بخار اشباع به کیلوپاسکال، T_a دمای محیط به کلوین و e فشار بخار به کیلوپاسکال است (Monteith, & Unsworth. 1990: 41).

با توجه به معادله ۱ و ۲ می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش رطوبت نسبی، تبخیر به کندی صورت خواهد گرفت؛ بنابراین یکی از عوامل مؤثر بر تبخیر مقدار رطوبت نسبی هواست. از طرفی اگر لایه نازک هوای اشباع از بخار آب در جای خود ساکن باقی بماند، عمل تبخیر متوقف می‌شود. برای تداوم تبخیر لازم است لایه اشباع شده به خارج رانده شود که این عمل در طبیعت توسط باد انجام می‌شود؛ از این رو سرعت و تداوم باد، کاهش رطوبت نسبی هوا و نیاز به تبخیر را به دنبال خواهد داشت. در مناطق خشک تغییرات مهمی در رطوبت خاک به دلیل تغییرات رطوبت جو پدید می‌آید که نشان‌دهنده تغییرات در رطوبت سطح خاک همراه با تغییرات رطوبت هواست و به‌طور قابل توجهی روی حساسیت خاک و فرسایش باد تأثیر می‌گذارد (Ravi 2004: 4). رابطه بین

پتانسیل ماتریس خاک و رطوبت نسبی هوا (Campbell and Norman 1997: 184):

در این دیاگرام مشاهده می‌شود با افزایش سطح آب دریاچه، نرخ تبخیر از دریاچه نیز افزایش می‌یابد و به واسطه این افزایش، رطوبت نسبی هوا نیز افزوده می‌شود. در اینجا شاهد دو حلقه بازخوردی^۱ منفی (حلقه تعادلی^۲) هستیم. در حلقه اول $B1$ با ثابت فرض کردن ورودی سیستم، حلقه براساس نیاز محیط «رفتار هدف جو» را دنبال می‌کند. حلقه دوم $B2$ ارتباط رطوبت نسبی هوا و میزان تبخیر را نشان می‌دهد. این حلقه نیز را در ارتباط با میزان تغییر بخار آب رفتاری تعادلی نشان می‌دهد. با افزایش رطوبت نسبی هوا، پوشش گیاهی افزایش می‌یابد که خود موجب افزایش رطوبت نسبی در محیط و به دنبال آن باعث کاهش نرخ تبخیر از دریاچه می‌شود.

حلقه تقویت‌کننده^۳ ($R1$) باعث گسترش پوشش گیاهی و حیات نباتی خواهد شد. از سوی دیگر گرد و غبار با سرعت باد و سطوح خشک منبع تولید گرد و غبار رابطه مستقیم و با رطوبت سطحی و چسبندگی خاک رابطه معکوس دارد. روابط علت و معلولی عناصر به استناد پژوهش‌هایی که قبلاً در این زمینه صورت گرفته بود، تعیین شد؛ برای مثال برای محاسبه میزان تبخیر در دریاچه از معادله تجربی انتقال مواد (معادله ۱) استفاده شده است (Karamouz et al. 2012: 125).

معادله ۱:

$$E = 0.291(A^{-0.05})(U_2)(e_s - e_d)$$

در این رابطه، E تبخیر از سطح آب (میلی‌متر در روز)، A مساحت سطح دریاچه (مترمربع)، U_2 سرعت باد در ارتفاع ۲ متری از سطح زمین (متر در ثانیه)، e_s فشار بخار اشباع در دوره موردنظر (میلی‌بار)، e_d فشار واقعی بخار آب در دوره موردنظر (میلی‌بار) است. این معادله

1. Feedback loop
2. Balancing loop
3. Targeted behavior
4. Reinforcing loop

معادله ۴:

$$\varphi_m = (RT/M) \log_e r$$

در این معادله r رطوبت نسبی، R ثابت گاز، M جرم مولکولی آب و T دمای مطلق است. به طور کلی این رابطه نشان می‌دهد که در صورت خشکی بیشتر هوا رابطه خاک و گیاه با اتمسفر پتانسیل بیشتری پیدا می‌کند؛ در غیر این صورت میزان تبخیر و تعرق از گیاه و خاک کمتر خواهد شد.

شبیه‌سازی و فرموله‌کردن فرضیه دینامیکی (تبیین روابط و مقادیر)

بعد از تدوین دیاگرام علی لازم است نسبت به مدله‌کردن روابط اقدام شود؛ بنابراین مدل «حالت- جریان»^۱ تهیه شد. در این مرحله برای تدوین دیاگرام حالت- جریان^۲ به احصای عناصر و متغیرهای محیطی مبادرت شد که با توجه به اهداف این تحقیق تعداد ۲۱ متغیر تعریف شد. این متغیرها دارای مقادیر و مقیاس خاصی هستند که در سه نوع:

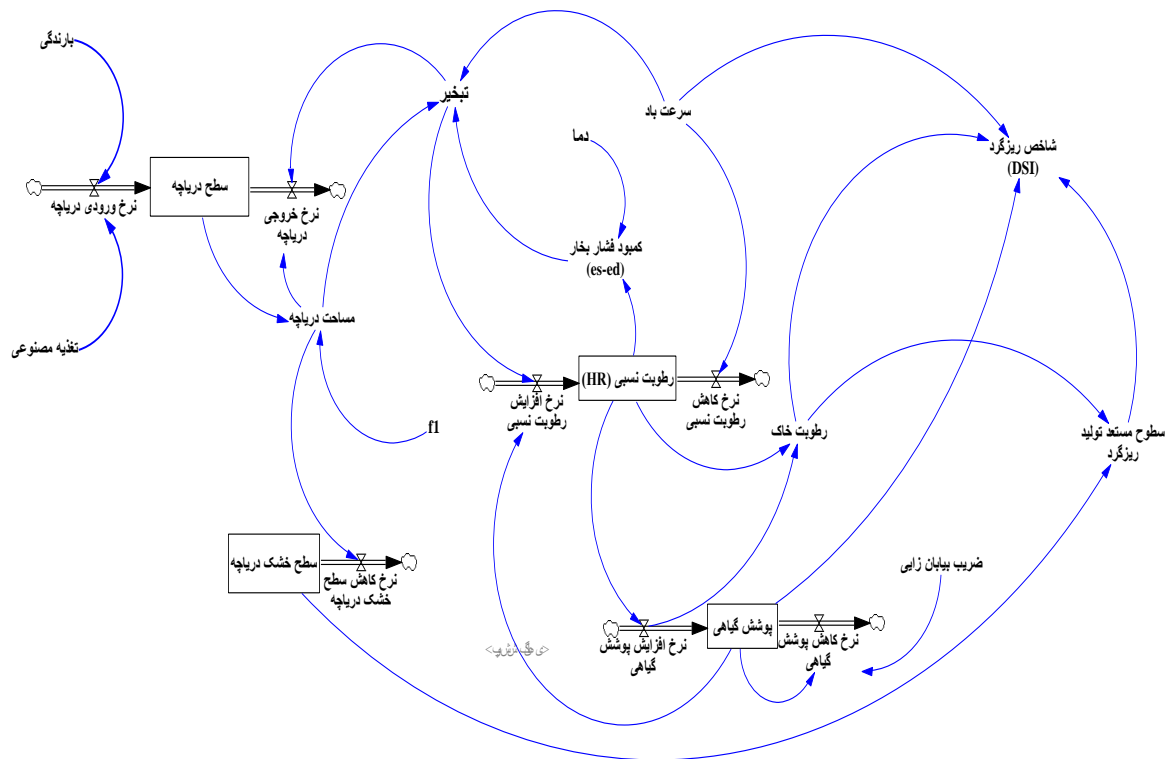
۱- متغیرهای حالت^۳، شامل: سطح دریاچه، سطح خشک دریاچه، رطوبت نسبی هوا، پوشش گیاهی.

۲- متغیر نرخ یا جریان^۴، شامل: نرخ ورودی دریاچه، نرخ خروجی دریاچه، نرخ افزایش رطوبت، نرخ کاهش رطوبت، نرخ افزایش پوشش گیاهی، نرخ کاهش پوشش گیاهی، نرخ کاهش سطح خشک دریاچه.
 ۳- متغیر کمکی^۵، شامل: سرعت باد (U)، دما (T)، تبخیر، بارش (P) و رطوبت خاک، کمبود فشار بخار ($e_s - e_d$)، مساحت دریاچه، ضریب بیابان‌زایی، سطوح مستعد تولید گرد و غبار، شاخص گرد و غبار (DSI)، طبقه‌بندی شدند. در شکل ۶ نمودار جریان- حالت نمایش داده شده است.

1. Stock and Flow Diagram

۲. نمودار حالت-جریان بیان‌کننده مفهوم اساسی سیستم دینامیک یعنی ساختارهای بازخوردی از روابط حالت‌ها و جریان‌هاست که رفتار سیستم را ایجاد می‌کند می‌باشد (کویل، ۱۹۹۶؛ فور، ۱۹۹۹؛ فارستر، ۱۹۶۱؛ استرمن، ۲۰۰۰). این نمودار شامل سه دسته از متغیرها شامل متغیرهای «حالت»، «متغیرهای جریان» و متغیرهای «کمکی» است. متغیر حالت حاصل تجمع موجودیت قابل اندازه‌گیری یا همان نرخ‌ها می‌باشند (فور، ۱۹۹۹). نرخ‌ها یا جریان‌ها موجودیتی فیزیکی یا ادراکی در سیستم هستند که در طول زمان تغییر می‌کنند. با تغییر متغیرهای نرخ متغیر حالت که بیان‌کننده وضعیت سیستم است تغییر می‌کند. متغیرهای کمکی مفاهیم واسطه اضافه شده به مدل برای کمک به وضوح بیشتر مدل می‌باشند (استرمن، ۲۰۰۰). به عبارت دیگر آنها به توصیف جریان‌ها کمک می‌کنند (فور، ۱۹۹۹).

3. Stock, State, Box, Level



شکل ۶: نمودار حالت- جریان مدل دینامیک سیستم حوضه‌ی جازموریان (DJBSD).

تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۴۰۲

این معادله نشان می‌دهد حجم آب دریاچه با نرخ ورودی افزایش و با نرخ تبخیر (خروجی) کاهش می‌یابد؛ بنابراین حجم آب دریاچه در هر زمان (t) با حجم آب موجود در زمان شروع منهای حجم «خارج‌شده» به دلیل تبخیر برابر است. در اینجا dt مخفف یک بازه زمانی محدود است. میزان تبخیر از دریاچه به‌عنوان متغیر نرخ با استفاده از سرعت باد، کمبود فشار بخار و مساحت دریاچه از معادله تجربی انتقال مواد (معادله ۱) محاسبه شد. با در دست داشتن متوسط دما (T) و متوسط رطوبت نسبی (RH) از معادله ۲ کمبود فشار بخار محاسبه شد.

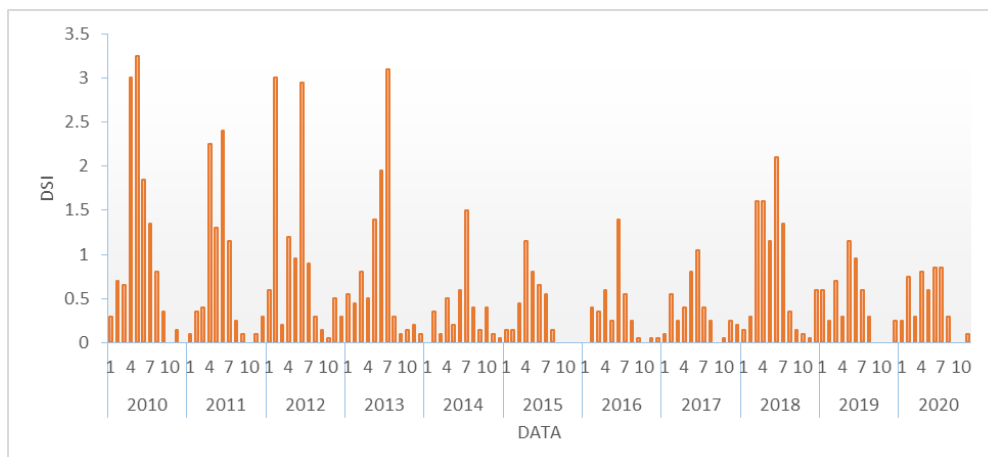
برای بررسی پارامترهایی اقلیمی و نوع ارتباط آن‌ها با پدیده گرد و غبار، از داده‌های ایستگاه‌های سینوپتیک موجود در منطقه به‌صورت ماهانه برای تبخیر، دمای هوا، رطوبت نسبی و سرعت باد و برای داده‌های

مدل حالت- جریان در شکل ۶ نشان می‌دهد که چگونه حالت و جریان به هم مرتبط هستند و حلقه‌های بازخورد چگونه به هم مرتبط شده‌اند. در این مرحله روابط و مقادیر متغیرها محاسبه و تعیین می‌شود. این مرحله به تبدیل مدل حالت - جریان به مدلی ریاضی مشهور است. در این مرحله روابط متغیرها چون دما، سرعت باد و بارش براساس داده‌های سینوپتیک گرفته‌شده از سازمان هواشناسی به‌عنوان متغیرهای کمکی استخراج شد. برای شبیه‌سازی تغییرات سطح و حجم دریاچه براساس مسئله موردنظر، سطح آب دریاچه به‌عنوان «متغیر حالت» عمل می‌کند.

$$\text{حجم آب دریاچه (t)} = \text{حجم آب دریاچه (t-dt)} + (\text{نرخ تبخیر} + \text{نرخ ورودی}) \times (dt)$$

مقادیر DSI با استفاده از داده‌های گرفته‌شده برای هر ایستگاه سینوپتیک از طریق استخراج حداکثر کدهای گرد و غبار روزانه (SDS^1 ، MDS^2 و LDE^3) با استفاده از معادله (McTainsh 2007:9) زیر محاسبه شد (شکل ۷).

مربوط به پدیده گرد و غبار از داده‌های در مقیاس زمانی ۳ ساعته استفاده شده است. مجموع داده‌های به‌دست‌آمده از ۶ ایستگاه سینوپتیک (گرفته‌شده از سازمان هواشناسی کشور) در یک بازه زمانی از ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۰ مورد استفاده قرار گرفت. در این پژوهش



شکل ۷: تغییرات شاخص گرد و غبار در دوره ۲۰۱۰-۲۰۲۰

تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۴۰۲

معادله ۶:

$$DSI = \sum_{i=1}^n [(5 \times SDS) + MDS + (0.5 \times LDE)]_i$$

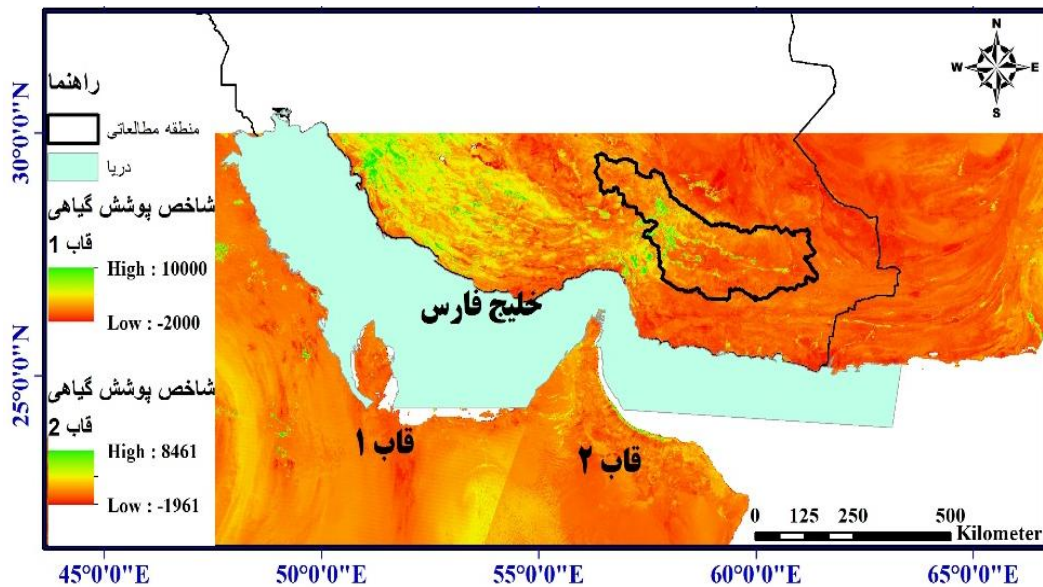
این پارامتر با پدیده گرد و غبار، در این مطالعه از شاخص پوشش گیاهی (NDVI) در جهت ارزیابی تغییرات این پارامتر در یک سری زمانی و تأثیر آن بر پدیده گرد و غبار استفاده شده است. برای این منظور داده‌های NDVI ماهانه از سنجنده MODIS محصول MODIS13Q1 NDVI با وضوح مکانی ۲۵۰ مترمربع تهیه شد که با توجه به وسعت منطقه مطالعاتی و همچنین دوره مطالعه ۱۱ ساله (۲۰۲۰-۲۰۱۰) تعداد ۲۶۶ تصویر MODIS-NDVI تهیه شد^۴ (شکل ۸). همچنین در راستای بررسی تغییرات رطوبت خاک نیز از داده‌های رطوبت خاک که از

در این معادله، n تعداد کل ایستگاه‌های سینوپتیک انتخاب شده است و i برابر است با i امین ایستگاه از n ایستگاه مطالعاتی، این رویدادها از طریق استفاده از کدهای آب و هوا (WW) تعریف شده توسط سازمان جهانی شناسایی می‌شوند. SDS تعداد روزهای گرد و غبار شدید (حداکثر کد گرد و غبار روزانه ۳۳-۳۵)، MDS تعداد روزهای گرد و غبار متوسط (حداکثر کد گرد و غبار روزانه ۳۰-۳۲ و ۹۸)، LDE وقایع گرد و غبار محلی (حداکثر کد گرد و غبار برابر با ۰۷-۰۹) است. با توجه به اهمیت پوشش گیاهی به‌عنوان عامل اصلی مؤثر در فرسایش بادی، در راستای تعیین رابطه

1. Severe dust storms
2. Moderate dust storms
3. Local dust events
4. <https://earthdata.nasa.gov>

مجموعه داده‌ها توسط سرویس تغییرات آب و هوایی کوپرنیکوس (C3S) تولید می‌شود. داده‌های رطوبت خاک، با وضوح $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ از رابط کدنویسی برنامه کاربردی فروشگاه داده‌های آب و هوایی (C3S)^۱، بارگیری و سپس داده‌ها جمع‌آوری شد تا رطوبت خاک به صورت ماهانه در بازه زمانی ژانویه ۲۰۱۰ تا اول دسامبر ۲۰۲۰ تولید شود.

مجموعه وسیعی از سنسورهای ماهواره‌ای براساس طرح تغییرات آب و هوایی ESA و مطابق با الزامات مشاهده‌ای سیستماتیک که توسط سیستم رصد جهانی آب و هوا (GCOS) تعریف شده، استفاده شد. این مجموعه محصول تجزیه و تحلیل جوی جهانی است که توسط ECMWF توسعه یافته است. داده‌های رطوبت خاک از نوع ترکیبی بوده که شامل داده‌های رطوبت‌سنج و رادیومتر رطوبت خاک است. این



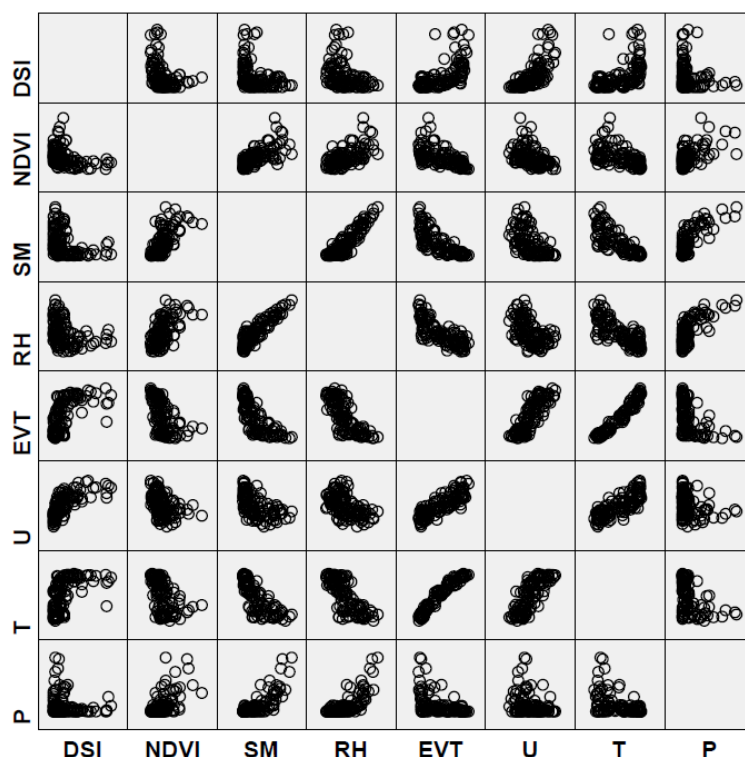
شکل ۸: موقعیت منطقه مورد مطالعه بر روی تصاویر MODIS

تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۴۰۲

مطالعه، رابطه بین متغیر وابسته (DSI) و متغیرهای مستقل (سرعت باد، رطوبت خاک، سطوح تولیدکننده گرد و غبار و شاخص پوشش گیاهی) با استفاده از روش رگرسیون خطی چندگانه بررسی شد. این روش متغیرهای مهم را از متغیرهای با اهمیت کمتر در مدل رگرسیون متمایز می‌کند و همچنین با توجه به هم‌خطی متغیرهای مستقل، همبستگی هر پارامتر را به متغیر وابسته محاسبه می‌کند. در سایر پارامترها نیز نوع اثرگذاری آن‌ها بر یکدیگر براساس فرضیات موردنظر به دست آمد (شکل ۹).

به منظور برآورد میزان تأثیرگذاری متغیرها بر یکدیگر و استفاده از نتایج آن‌ها در مدل، از روش رگرسیون خطی در جهت تحلیل داده‌ها استفاده شد. با توجه به اینکه در این مطالعه واکاوی ارتباط آماری بین متغیرهای مستقل و متغیر وابسته مدنظر است؛ از این رو می‌بایست برای تشخیص اثربخشی و معنی‌داری متغیرها و همچنین جلوگیری از افزایش خطای استاندارد ضرایب، وجود وابستگی خطی بین متغیرهای مستقل (هم‌خطی چندگانه^۲) بررسی و در صورت تشخیص، چندخطی بودن برطرف شود. در این

1- <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/satellite-soil-moisture>
2. Multicollinearity



شکل ۹: چگونگی روابط بین پارامترها، براساس تجزیه و تحلیل داده‌های هواشناسی و تصاویر ماهواره‌ای تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۴۰۲

اعتبارسنجی مدل

پس از شبیه‌سازی مدل دینامیک منطقه باید اعتبارسنجی صورت گیرد؛ بنابراین از طریق آزمون‌های ساختاری مستقیم و آزمون شرایط حدی (Newton 1999: 158) اعتبار ساختار مدل در برابر سیستم واقعی ارزیابی شد. در این آزمون رفتار متغیرهای کلیدی سطح دریاچه، تبخیر، رطوبت نسبی، شاخص گرد و غبار و رطوبت خاک در حالت آبیگری دریاچه (شرایط حدی) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که هرچه پارامترهای ورودی به شرایط حدی نزدیک شوند، باز هم مدل، رفتار منطقی از خود نشان می‌دهد.

ارزیابی سناریوهای مختلف احیای دریاچه

از آنجا که مطالعه حاضر بر میزان شاخص گرد و غبارها استوار شده است، با توجه به پیشینه تراز آبی دریاچه، ۳ سناریو برای تبیین نقش دریاچه در راستای کاهش گرد و غبار شبیه‌سازی شد (جدول ۱) و اثر سناریوهای مختلف آبیگری دریاچه بر DSI، پوشش گیاهی و رطوبت خاک مورد بررسی قرار گرفت. بررسی این سناریوها با استفاده از مدل SD می‌تواند دیدگاه احیای دریاچه جازموریان را در موقعیت بهتری برای درک پیچیدگی و جنبه‌های پویای سیستم قرار دهد و از آن‌ها برای مدیریت و تصمیم‌گیری مؤثرتر حمایت کند.

جدول ۱: سناریوهای اعمالی در راستای تبیین نقش دریاچه در برابر گرد و غبار

سناریو	تراز سطح آب دریاچه (متر)	مساحت دریاچه (کیلومتر مربع)	حجم آب دریاچه (میلیارد مترمکعب)	میانگین شاخص گرد و غبار
۱	۴۰۵	۱۰۲۲۳	۲۴۳	۰/۷
۲	۳۹۰	۷۰۱۴	۱۰۴	۱
۳	۳۷۰	۳۵۲۹	۵	۱/۸

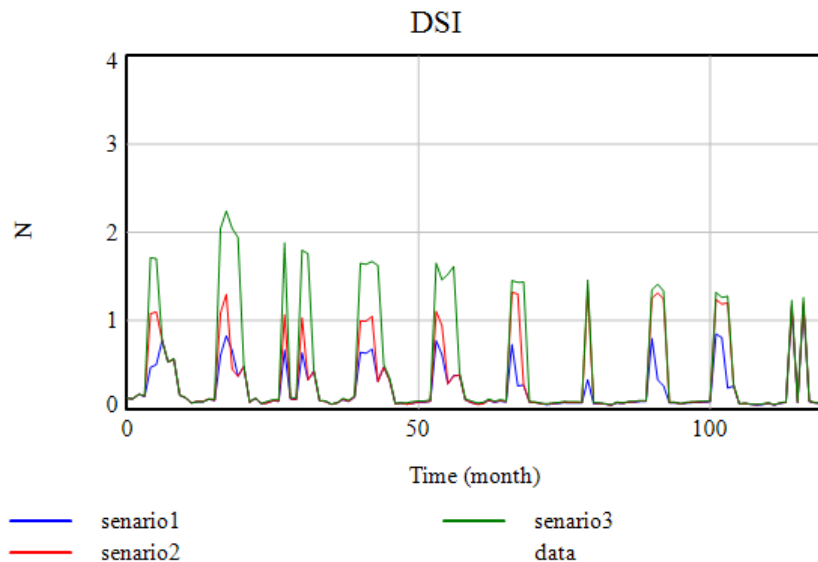
مأخذ: نگارندگان، ۱۴۰۲

دریاچه از ۴۰۵ متر به ۳۹۰ متر (از سطح دریا) تقلیل یابد، مساحت آب دریاچه به حدود ۷ هزار کیلومتر مربع کاهش خواهد یافت؛ اما در میزان شاخص گرد و غبارها تغییر چندانی به وجود نمی‌آید و شاخص گرد و غبارها نسبت به سناریوی اول تنها ۰/۳ افزایش یافته و به ۱ میل می‌کند.

- اعمال سناریوی ۳: در صورتی که ارتفاع آب سطح دریاچه از ۳۹۰ متر به ۳۷۰ متر (از سطح دریا) تقلیل یابد، شاخص گرد غبار به شدت افزایش می‌یابد و به رقم واقعی یعنی ۲/۲ میل می‌کند.

اکنون می‌توان نتایج رقومی به دست آمده از بررسی جازموریان به عنوان یک سیستم دینامیک و نحوه عملکرد آن در برابر سطح آب دریاچه را در سه سناریو زیر به صورت متن به شرح زیر خلاصه نمود (شکل ۱۰).
- سناریوی ۱: آبیگری دریاچه در بالاترین حدی که به خود دیده. تغییرات سریع افت شاخص گرد و غبار مشاهده و تا حد زیادی کنترل می‌شود و میزان حداکثری این شاخص از ۲/۵۸ فعلی به ۰/۷ کاهش خواهد یافت.

- اعمال سناریوی ۲: در صورتی که ارتفاع آب سطح



شکل ۱۰: اثر سناریوهای مختلف آبیگری دریاچه بر DSI

تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۴۰۲

نتیجه

یکی از مشکلات و مسائل مطرح در شرق کشور، پدیده گرد و غبارهاست. خشکسالی و احداث سدهای متعدد در مسیر رودخانه‌های منتهی به دریاچه جازموریان باعث شده بستر خشک این دریاچه از جمله فعال‌ترین منابع تولیدکننده گرد و غبارها باشد. سؤالی که در اینجا وجود دارد این است، با توجه به پیشینه موجود از دریاچه، میزان و شدت پدیده گرد و غبار در شرایط احیای دریاچه چگونه خواهد بود؟ از این رو سعی شده است با مهندسی معکوس محیطی، شرایط گذشته را بازسازی کنیم و به نتایج ناشی از شرایط گذشته محیطی دست یابیم. در این مطالعه، با استفاده از مدل‌سازی سیستم‌های پویا، مدلی برای بررسی فعل و انفعالات پیچیده در سیستم احیای دریاچه جازموریان با لحاظ مجموعه عوامل مؤثر، توسعه داده شد. به منظور آینده‌نگری و کاهش مشکلات براساس محتمل شدن احیای دریاچه جازموریان، سناریوهای مختلفی بر مبنای شرایط گذشته آن و تغییرات محتمل نیروهای محیطی در سه حالت مختلف تدوین شد.

نتایج این تحقیق که براساس روش معکوس مهندسی محیط و استفاده از سیستم دینامیک صورت گرفت، نشان می‌دهد که:

۱- احیای دریاچه در تراز ۴۰۵ متر و پایداری آن نقش بسیار مهمی در کنترل و کاهش گرد و غبارها دارد؛ به طوری که میزان شاخص گرد و غبارها از ۲/۵۸ فعلی به ۰/۷ تقلیل می‌یابد.

۲- در صورت به‌کارگیری سناریوی ۲ یعنی پایداری سطح ۳۹۰ متری از دریا به‌عنوان کارآمدترین سیاست ممکن در راستای کنترل گرد و غبارها قادر است متوسط سالیانه DSI را به ۱ کاهش دهد و این بدان معنی است که میزان گرد و غبارها، تا ۷۵ درصد کاهش خواهد یافت.

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده می‌توان گفت چنانچه با تزریق حدود ۱۰۰ میلیارد متر مکعب آب به دریاچه و حفظ و پایداری سطح آب در ۳۹۰ متری با وسعت ۷ هزار کیلومترمربعی دریاچه، می‌توان گرد و غبارهای منطقه را تا سقف ۷۵ درصد کاهش داد؛ به‌عبارت‌دیگر براساس نظریه کیاس و مدل سیستم‌های دینامیک از میان‌ده‌ها عامل و متغیر محیطی، آستانه‌های کنترل گرد و غبارهای منطقه تنها با کنترل حجم یک‌صد میلیارد مترمکعبی دریاچه با سطحی معادل ۷۰۰۰ کیلومترمربع امکان‌پذیر خواهد بود. شعبانی و همکاران در سال ۱۴۰۰ با استناد به پادگانه‌های دریاچه‌ای، خطوط ساحلی دریاچه گذشته جازموریان در پلایای امروزی را بررسی کرده‌اند. مطالعات او در منطقه جازموریان بیانگر سه سطح پادگانه دریاچه‌ای در ارتفاع ۴۱۰، ۳۷۵ و ۳۷۰ متری از سطح دریاست که دریاچه‌ای با گستره‌ای به‌ترتیب ۱۱۹۳۵، ۶۵۷۹ و ۵۴۸۶ کیلومترمربع را در گذشته اثبات می‌کند. پژوهش ذکرشده و همچنین یافته‌های هوکریده و مونود در سال ۱۹۷۱ مبنی بر پوشش گیاهی غنی این منطقه وجود دریاچه‌ای بزرگ با گستره و عمق متغیر در چاله جازموریان و تأثیر آن بر شرایط محیطی را به اثبات می‌رساند و نتایج این پژوهش را تأیید می‌کند.

منابع:

ابراهیم‌قزوینی، زهرا؛ علی محمد احمدوند (۱۳۹۸). مدل‌سازی دینامیکی میزان پایداری پوشش فضای سبز شهری مطالعه موردی باغ گیاه‌شناسی، کنفرانس ملی پژوهش‌های کاربردی در مدیریت و مهندسی صنایع. ایران. تهران.

<https://civilica.com/doc/903545>

رامشت، محمدحسین (۱۳۸۵). نمادها و تصاویر در ژئومورفولوژی، ویرایش هفتم. سازمان مطالعه و تالیف کتب درسی دانشگاهی در علوم انسانی. انتشارات سمت. صفحه ۲۰۰.

شعبانی‌عراقی، عارفه؛ مجتبی‌ایمانی؛ ابوالقاسم گورابی؛ راضیه لک (۱۴۰۰). بازایی سکنس‌ها و گستره دریاچه دیرینه در پلایای جازموریان براساس پادگانه‌های دریاچه‌ای در کواترنری، مجله پژوهش‌های فرسایش محیطی. جلد ۱۱. شماره ۲. صفحات ۲۷-۴۶.

علیزاده، شهراد؛ حسین محمدی؛ پرویز کردوانی (۱۳۹۶). مدل‌سازی پراکندگی خشکسالی‌های ناشی از تغییر اقلیم در ایران با به‌کارگیری سیستم دینامیک، آمایش سرزمین. دوره نهم. شماره اول. بهار و تابستان. صفحات ۱۸۸-۱۶۹.

<https://dx.doi.org/10.22059/jtcp.2017.61408>

کریمی، ابراهیم؛ امیر سعدالدین؛ ناصر طهماسبی‌پور؛ حسین رضایی (۱۳۹۵). معرفی رویکرد پویایی سیستم در مدل‌سازی مشارکتی مدیریت جامع منابع آب و خاک برای استفاده در مقیاس آبخیز، یازدهمین همایش ملی علوم و مهندسی آبخیزداری ایران. توسعه مشارکتی در مدیریت حوزه‌های آبخیز. دانشگاه یاسوج. صفحات ۶۲-۵۴.

<https://sid.ir/paper/885761/fa>

محمدی، علی (۱۳۸۹). رسوب‌شناسی و ژئوشیمی نهشته‌های پلایای جازموریان. دو فصلنامه علمی پژوهشی خشک‌بوم. دوره ۱. شماره ۱. صفحات ۷۸-۶۸.

<https://dori.net/dor/20.1001.1.2008790.1389.1.1.7.1>

محمودی، فرج‌اله (۱۳۶۷). تحول ناهم‌واری‌های ایران در کواترنر، پژوهش‌های جغرافیایی. شهریور ۱۳۶۷. شماره ۲۳. صفحات ۵-۴۳.

<https://www.noormags.ir/view/en/citation/ris/336881>

References

Ahmadi, H., Esmailpour, Y., Moradi, A. and Gholami, H (2019). Assessment of land Sensitivity to Desertification Hazard Using System Dynamics Approach in the Jazmurian Watershed.

<https://dx.doi.org/10.22069/jwsc.2019.15565.3076>

Bala, B.K., Arshad, F.M. and Noh, K.M (2017). System dynamics.pour from the atmosphere for irrigation in

[https://doi.org/10.1016/S0306-2619\(99\)00054-9](https://doi.org/10.1016/S0306-2619(99)00054-9)

Bastan, M., Abdollahi, F. and Shokoufi, K (2013). Analysis of Iran from the atmosphere for irrigation in Bahrain.Hazard Using System Dynamics Approach in the Jazmurian Watershed. hstan, M.f Wa

Brooks, C.E.P (1950). Climate in everyday life (p. 26). London: Benn.

<https://journalhosting.ualgary.ca/index.php/arctic/article/download/67073/50986/188785>

Campbell, G. S., J. M. Norman (1997). An Introduction to Environmental Biophysics, 2nd ed., 286 pp., Springer, New York.

<https://doi.org/10.1007/978-1-4612-1626-1>

Chikofsky, E.J. and Cross, J.H (1990). Reverse engineering and design recovery: A taxonomy. IEEE software, 7(1), 13-17.

<https://doi.org/10.1109/52.43044>

- Clifford Holmes, J.K., Slinger, J.H., Musango, J.K., Brent, A.C. and Palmer, C.G (2014). Using system dynamics to explore the water supply and demand dilemmas of a small South African municipality. Inlinger, J.H., Musango, J.K., Brent, A.C. and Palmer, C.G (2014). Using system dynamics to explore the water supply and demand dilemmas of a small
- <http://resolver.tudelft.nl/uuid:c5a645f5-d5f4-4d7d-bd74-7a3329930472>
- Ewers, M (2005), July. Combining hydrology and economics in a system dynamics approach: modeling water resources for the San Juan Basin. In of applied researches in management and industrial engineering, Tehran., Musango, J.K
- https://www.researchgate.net/publication/255636110_Combining_Hydrology_and_Economics_in_a_Systems_Dynamics_Approach_Modeling_Water_Resources_for_the_San_Juan_Basin
- Ford, D.N (1999). A behavioral approach to feedback loop dominance analysis.s approach: modeling water resources for the San Juan Basin. In of applied researches
- [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1727\(199921\)15:1%3C3::AID-SDR159%3E3.0.CO;2-P](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1727(199921)15:1%3C3::AID-SDR159%3E3.0.CO;2-P)
- Forrester, JW (1961). [2013 reprint]. Industrial Dynamics. Mansfield Centre, CN: Martino Fine Books.
- Forrester, J.W (1969). Urban Dynamics. Cambridge, Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology Press.
- Forrester JW (1971). World Dynamics. (2nd edn 1973). Pegasus Communications: Waltham, MA.
- https://monoskop.org/images/d/dc/Forrester_Jay_W_World_Dynamics_2nd_ed_1973.pdf
- Gameros, A., De Chiffre, L., Siller, H.R., Hiller, J. and Genta, G (2015). A reverse engineering methodology for nickel alloy turbine blades with internal features. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 9, 116-124.
- <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2014.12.001>
- Guo, H.C., Liu, L., Huang, G.H., Fuller, G.A., Zou, R. and Yin, Y.Y (2001). A system dynamics approach for regional environmental planning and management: a study for the Lake Erhai Basin. Journal of environmental management, 61(1), 93-111.
- <https://doi.org/10.1006/jema.2000.0400>
- Harrison, J.V (1943). The Jazmurian depression, Persian Baluchistan.2015). A reverse engineering methodology for nick.
- <https://doi.org/10.2307/1789627>
- Huckride, R (1971). The forth geological period and the Late Mesolithic Age in Kerman Province (Persian translation by Kardavani, P.). Geographical Reports, 7: 126-134. (In Persian)
- Karamouz, M., Nazif, S. and Falahi, M (2012). Hydrology and hydroclimatology: principles and applications. CRC Press.
- <https://doi.org/10.1201/b13771>
- Karlsson, R., Nasir, J and Dandekar, P. P (2000). Sustainable Business Development, in the 18th International Conference of the System of the System Dynamics Society, Bergen, Norway.
- <http://www.albany.edu/cpr/sds/>
- Koushali, H.P., Moshtagh, R. and Mastoori, R (2015). Water resources modelling using system dynamic in Vensim. Conference of the System of the System Dynamics.
- <http://dx.doi.org/10.5963/JWRHE0403006>
- Luo, Y., Khan, S., Cui, Y. and Peng, S (2009). Application of system dynamics approach for time varying water balance in aerobic paddy fields. Paddy and Water Environment, 7(1), 1-9.
- <https://doi.org/10.1007/s10333-008-0146-6>
- McTainsh, G.H., Tews, E.K.n (2007). Soil erosion by wind- Dust Storm Index (DSI): National Monitoring and Evaluation Framework. Australian Government National Land and Water Resources Audit, 28.
- https://www.researchgate.net/profile/Errol-Tews/publication/237356114_National_Monitoring_and_Evaluation_Framework/links/00b4952d78eb686062000000/National-Monitoring-and-Evaluation-Framework.pdf
- Meadows, D. H., Meadows, D. L., & Randers, J. WWB III (1972). The limits to growth: a report for the Club of Rome's project on the predicament of mankind.

- Monod, Th (1971). A brief survey of the physical features of the Lut. (Persian translation by Mahmudi, F.). Geographical Reports, 7: 54-100. (In Persian)
- Monteith, J. L., Unsworth, M. H (1990). Radiation environment. Principles of environmental physics, 2nd ed., Edward Arnold, London, 36-57.
<http://booksite.elsevier.com/9780123869104>
- Muscolino, G (1996). Dynamically modified linear structures: deterministic and stochastic response. Journal of engineering mechanics, 122(11), 1044-1051.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(1996\)122:11\(1044\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(1996)122:11(1044))
- Newton.P (1999). An Introduction to System Dynamics, Presented Paper in Sustainable Green Bay Conference.
- Rashki, A., M. Arjmand, and D. G. Kaskaoutis (2017). Assessment of dust activity and dust-plume pathways over Jazmurian Basin, southeast Iran. Aeolian Research 24:145d Wat
https://ui.adsabs.harvard.edu/link_gateway/2017AeoRe..24..145R/doi:10.1016/j.aeolia.2017.01.002
- Ravi, S., D'Odorico, P., Over, T.M. and Zobeck, T.M (2004). On the effect of air humidity on soil susceptibility to wind erosion: The case of air-dry soils. Geophysical Research Letters, 31(9).
<https://doi.org/10.1029/2004GL019485>
- Richardson, G.P., (1981). Pugh III: Introduction to system dynamics modeling. Productivity, Cambridge.
<https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2600961>
- Roberts, E.B (1981). Managerial applications of system dynamics. Cambridge, Massachusetts: Productivity Press. (No. 04; HD31, R6.).
<https://lccn.loc.gov/77026952>
- Rong, L (2004). "Using System Dynamics in Decision Support for Sustainable Waste Management," Master of Engineering, Department of Civil Engineering, National University of Singapore, Singapore.
<https://core.ac.uk/download/pdf/48629742.pdf>
- Saieedifar, Z., Rahimi, M., Khosroshahi, M. and Yazdani, M (2021). Identification of areas susceptible to high dust concentrations and their relationship with synoptic factors in Jazmourian basin..ience and Technology, 9, pp.11 eange Protection Research, 18(2), 254-273.
<https://dx.doi.org/10.22092/ijfrpr.2020.341749.1413>
- Shaw, E.M., Beven, K.J., Chappell, N.A., Lamb, R (2010). Hydrology in practice, CRC press: London, ISBN 0203030230.
<https://doi.org/10.1201/9781315274904>
- Simonovic, S. P., & Rajasekaram, V (2004). Integrated analyses of Canada's water resources: a system dynamics approach.ncentrations and their relationship with synoptic factors in Jazmourian basin..ience and Tec
<https://doi.org/10.4296/cwrj223>
- Sokovic, M. and Kopac, J (2006). RE (reverse engineering) as necessary phase by rapid product development.cs approach.ncentrations and their relationship with synoptic facto
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.04.047>
- Sterman, J (2002). System Dynamics: systems thinking and modeling for a complex world.
<http://hdl.handle.net/1721.1/102741>
- Wang, Y.C., Lin, Y.P., Huang, C.W., Chiang, L.C., Chu, H.J. and Ou, W.S (2012). A system dynamic model and sensitivity analysis for simulating domestic pollution removal in a free-water surface constructed wetland.ogy,er, Air, & Soil Pollution, 223(5), 2719-2742.
<https://doi.org/10.1007/s11270-011-1062-8>
- Winz, I., Brierley, G. and Trowsdale, S (2009). The use of system dynamics simulation in water resources management.ty analysis for simulating domestic pollution remo
<https://doi.org/10.1007/s11269-008-9328-70>
- Xi, X. and Poh, K.L (2013). Using system dynamics for sustainable water resources management in Singapore.anagement.ty analysis for simulating domestic
<https://doi.org/10.1016/j.procs.2013.01.017>