

## Analysis of Changes in the Area of Hamoon Wetlands and other Water Bodies in Sistan Region using Satellite Images

Mohsen Ebrahimi Khusfi<sup>✉</sup>

Assistant Professor of Remote Sensing, Department of Geography, University of Yazd

✉E-mail: [Mohsen.ebrahimi@yazd.ac.ir](mailto:Mohsen.ebrahimi@yazd.ac.ir)



**How to Cite:** Ebrahimi Khusfi, M. (2023). Analysis of Changes in the Area of Hamoon Wetlands and other Water Bodies in Sistan Region using Satellite Images. *Geography and Development*, 21 (71), 139-165.

**DOI:** <http://dx.doi.org/10.22111/GDIJ.2023.7598>

**Received:**

25 October 2022

**Received in revised form:**

1 February 2023

**Accepted:**

25 February 2023

**Published online:**

20 May 2023

### ABSTRACT

Sistan region is one of the important regions whose life depends on the flow of Hirmand river. In this research, the trend of changes in the area of Hamoon wetlands and the factors affecting it, were investigated using satellite and meteorological data. For this purpose, the minimum, maximum, average temperature, precipitation and evaporation of Zabol station were used in the period of 1985-2018. Furthermore, satellite products include water bodies extracted from Landsat satellite images (JRC products 1985-2020), NDVI, PDSI, Sentinel 2 and GRACE satellite data used in the period of 2000-2022. The man-Kendall and Sen's slope tests were used for evaluating time series trends of data. AWEI index was used to calculate the water areas of Sistan region. The results show a significant decrease the minimum, maximum, average temperature, precipitation, area of permanent water bodies, GRACE and PDSI. On the other hand, the changes in NDVI showed a significant increasing trend, which is caused by the quantitative development of agricultural lands in the Sistan plain. Also, the anthropogenic activities of Afghanistan have an impact on this river entering Iran. The results of the AWEI index showed that after the full exploitation of the Kamal Khan diversion dam, the natural flow of the Hirmand River has been diverted towards Gowdzereh in such a way that the area of water flowing in Gowdzereh is more than 34000 hectares and the area of water behind the Kamal-Khan dam is equal to 2899 hectares, which confirms the diversion effect of Kamal Khan Dam.

**Keywords:**

Transboundary water,  
Man-Kendall,  
Google earth engine,  
Chah-Nimeh,  
Gowdzereh,  
Remote sensing.



© the Author(s).

**Publisher:** University of Sistan and Baluchestan

### Extended Abstract

#### 1. Introduction

Sistan region, located in the northern part of Sistan and Baluchistan province, is one of the important and strategic regions of Iran in terms of economy, trade and security. This area is located at the end of Hirmand watershed, shared with Afghanistan, and all sources of surface water entering Iran originate from the heights located in Afghanistan. Considering that Sistan plain has no aquifer, Hirmand River is the lifeblood of Sistan plain and Hamoon wetlands. Satellite remote sensing is increasingly used as a source of supplementary information for terrestrial monitoring networks, and

in many cases and regions, it is the only available source. Satellite sensors are able to directly and indirectly measure almost all components of the hydrological cycle, including precipitation, evaporation and transpiration, the water level of lakes and wetlands, soil moisture, total water and underground reserves, and temperature (Lettenmaier et al. 2015; McCabe et al. 2017; Zhang et al. 2016) and can provide different time series information for researchers. In addition, remote sensing provides the possibility of monitoring and supervising the production of agricultural products, food production, storage and

trade, and it is considered as an expression of water and food security for each region (Dalin et al. 2017). The purpose of this research is to investigate the changes in the water areas of the Sistan plain and Hamoon wetlands, as well as to analyze the factors affecting these changes using the available time series of satellite products and images.

## 2. Methods and Material

To do this research, the meteorological data of minimum temperature, maximum temperature, average temperature, precipitation and evaporation of Zabol station were used in the period of 1985-2018. Furthermore, satellite products include water bodies extracted from Landsat satellite images 1985-2020 (JRC monthly and yearly products), Normalized Different Vegetation Index (NDVI), Palmer Drought Severity Index (PDSI), Sentinel 2 satellite images and GRACE gravity satellite images used in the period of 2000-2022. The man-Kendall and Sen's slope tests were used for evaluating trends of above mentioned data. To calculate the water areas of Sistan region, Automatic Water Extraction Index (AWEI) was used using Sentinel2 images in September 2022.

## 3. Results and Discussion

To analyze the trend of various time series parameters, we used Mann-Kendall and Sen's slope tests. The results of investigating the changes in the area of water bodies in Sistan region using the annual time series of permanent and seasonal water bodies extracted from satellite images in the study area showed a significant decrease in the annual average area of permanent water bodies during the study period. In other words, with passing the time and the reduction of water sources entering the Sistan plain, the areas that were considered permanent, have turned into seasonal water areas. The results of trend analysis of meteorological parameters show a significant decrease in the parameters of minimum temperature, maximum temperature, average temperature, precipitation, area of permanent water bodies, ground water resources (GRACE satellite product) and PDSI in the studied period. On the other hand, the changes in NDVI index showed a significant increasing

trend, which is caused by the quantitative development of agricultural lands in the Sistan plain. The results of the AWEI index showed that the area of water flowing in Gowdzereh is more than 34000 hectares and the area of water behind the Kamal-Khan dam is equal to 2899 hectares, while the area of water stored in the Chah-Nimeh is equal to 3747 hectares.

## 4. Conclusion

The factors affecting the changes in water bodies in Sistan region can be divided into two categories: natural factors and anthropogenic factors. To investigate natural factors, meteorological data of precipitation, temperature, evaporation and the Palmer drought index satellite product were used. The results of the investigation of changes in climatic parameters show a significant decrease in rainfall and a significant increase in minimum temperature, maximum temperature, average temperature and Palmer drought index in this region. The anthropogenic factors affecting the reduction of water resources entering the water areas of Sistan region can be divided into two parts: 1) The first part is related to the quantitative development of agricultural lands upstream of Hirmand basin by Afghanistan and also the increase of agricultural lands in Sistan region. The results of this research showed a significant increase in the NDVI vegetation index during 2000-2020 show in this index. The agricultural statistics data confirm this finding because the area of agricultural lands has been increased from 75500ha to 89741 during 2000-2020. 2) The second part is related to Afghanistan activities, such as the construction of numerous dams in the upstream of Hirmand River. The results of the AWEI index showed that from 2020 onwards and after the full exploitation of the Kamal Khan diversion dam, the natural flow of the Hirmand River has been diverted towards Gowdzereh, which confirms the effect of Kamal Khan Dam operation on the natural flow of the Hirmand River.

**Keywords:** Transboundary water, Man-Kendall, Google earth engine, Chah-Nimeh, Gowdzereh, Remote sensing.

## 5. References

- Afzali, R., Kamran Dastjerdi, H., Zibasaz Khoshmanzareh, S., Zaki, Y., & Yazdanpanah Dero, Q (2022). Monitoring of water resources and vegetation in the Helmand Basin using satellite image time-series and border hydro-political challenges. *Water Policy* 1246-1223,24.  
<https://doi.org/10.2166/wp.2022.280>
- Asghari, S., & Naderianfar, M (2014). Vulnerability of rural settlements from the sand dunes of the dry bed of Hamoon International Wetland in Hirmand county. *Journal of Spatial Analysis of Environmental Hazards*, 2(1), 17-30. [In Persian].  
<https://www.sid.ir/paper/264770/fa>
- Chambers, D.P (2006). Evaluation of new GRACE time-variable gravity data over the ocean. *Geophysical Research Letters*, 33  
<https://doi.org/10.1029/2006GL027296>
- Dalin, C., Wada, Y., Kastner, T., & Puma, M.J (2017). Groundwater depletion embedded in international food trade. *Nature*, 543, 700-704.  
DOI: 10.1038/nature21403
- Deoli, V., & Kumar, D (2020). Analysis of groundwater fluctuation using GRACE satellite data. *Indian Journal of Ecology*, 47, 299-302.  
<https://doi.org/10.3390/w15020282>
- Didan, K (2021). MODIS/Terra Vegetation Indices 16-Day L3 Global 500m SIN Grid V061 [Data set]. NASA EOSDIS Land Processes DAAC.  
<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/missions-and-measurements/products/MOD13A1>
- Department of Environment (2014). Iran's Wetlands Protection Plan – Hamoon International Wetlands Comprehensive Management Plan. [In Persian].  
<http://www.wetlandsproject.ir/publications/books/detail/Hamoun-International-Wetlands-Management-Plan-1006/view>
- Ebrahimi-Khusfi, M., & Pourasghar-Sangachin, F (2017). Investigating the effects of neighboring countries' water regulation programs in transboundary basins on Iran. Development and Foresight Research Center. Research report [In Persian].  
<https://waterhouse.ir/news/1464>
- Feyisa, G.L., Meilby, H., Fensholt, R., & Proud, S.R (2014). Automated Water Extraction Index: A new technique for surface water mapping using Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment*, 140, 23-35  
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.08.029>
- Firouzi, F., Nikpour, N., Rakhshani, Z., Ghafarian-Malmiri, H., & Mahmoudi, M (2019). Monitoring the trend change of sand dunes with remote sensing approach (case study: Sistan plain). *Geomorphology quantitative researches*, 9(3), 255-239. [In Persian].  
[http://www.geomorphologyjournal.ir/article\\_122228.html](http://www.geomorphologyjournal.ir/article_122228.html)
- Ghorbani, K., Bararkhanpour, S., Valizadeh, E., & Mola-Arazi, A (2019). Regional analysis of trend and breaking point in SPEI drought index seasonal series in Iran, *Journal of Water and Soil Protection Research*, 27(4), 185-200. [In Persian].  
[https://jwsc.gau.ac.ir/article\\_5218.html](https://jwsc.gau.ac.ir/article_5218.html)
- Haji Hosseini, M., Haji Hosseini, H., Shaygan, M., Morid, S., Vatanfeda, J., & Najafi, A (2012). Investigating land use changes in downstream of Kajki dam in Hirmand basin, Afghanistan using maximum likelihood classifier, decision tree and support vector machines. *Iranian Journal of Remote Sensing and GIS*, 5(4), 69-87. [In Persian].  
[https://gisj.sbu.ac.ir/article\\_95234.html](https://gisj.sbu.ac.ir/article_95234.html)
- Iran Statistics Center (2019). Statistical calendar system. Statistical Yearbook of Sistan and Baluchistan Province.  
[https://nnt.sci.org.ir/sites/Apps/yearbook/Lists/year\\_book\\_req/Item/newifs.aspx](https://nnt.sci.org.ir/sites/Apps/yearbook/Lists/year_book_req/Item/newifs.aspx)
- Islamic Council Research Center (2004). Water resources of the Sistan plain. Office of basic studies and legal studies. Subject code 410(7302).  
<https://rc.majlis.ir/fa/report/show/734820>

- Hejazizadeh, Z., Naserzadeh, M.H., Hatami-Zarneh, D., & Rezaei, M (2013). The application of statistical methods and drought indices in the analysis of rainfall fluctuations, a case study: Kerman station. *Geographical studies of dry regions*, 5(17), 35-51. [In Persian].  
<http://journals.hsu.ac.ir/jarhs/article-1-249-fa.html>
- Imani, R., Qazavi, R., & Ismaili, A (1400). Investigating the trend, analysis, modeling and prediction of monthly rainfall using stochastic models (case study of Ardabil station), *geographical studies of dry areas*, 11(44), 84-98. [In Persian].  
<http://journals.hsu.ac.ir/jarhs/article-1-1687-fa.html>
- Karami, R., Rezaei, H., Salman-Mahini, A., & Ghorbani-Nasrabadi, Kh (2022). Assessment of climate changes in Hamoon International Wetland Basin using LARS-WG6 model, *Journal of Natural Environmental Hazards*, 11(31), 107-122. [In Persian].  
[https://journals.usb.ac.ir/article\\_5948.html](https://journals.usb.ac.ir/article_5948.html)
- Kendall, M (1975). Rank correlation measures, Vol .202 .Charles Griffin, London, 15
- Landerer, F.W., & Swenson, S (2012). Accuracy of scaled GRACE terrestrial water storage estimates. *Water resources research*, 48.  
<https://doi.org/10.1029/2011WR011453>
- Lettenmaier, D.P., Alsdorf, D., Dozier, J., Huffman, G.J., Pan ,M., & Wood, E.F (2015). Inroads of remote sensing into hydrologic science during the WRR era. *Water resources research*, 51, 7309-7342.  
<https://doi.org/10.1002/2015WR017616>
- Mann, H.B (1945). Nonparametric tests against trend. *Econometrica: Journal of the econometric society*, 245-259
- McCabe, M.F., Rodell, M., Alsdorf, D.E., Miralles, D.G., Uijlenhoet, R., Wagner, W., Lucieer, A., Houborg, R., Verhoest, N.E., & Franz, T.E (2017). The future of Earth observation in hydrology. *Hydrology and earth system sciences*, 21, 3879-3914.  
[doi: 10.5194/hess-21-3879-2017](https://doi.org/10.5194/hess-21-3879-2017)
- Moiwo, J.P., Yang, Y., Li, H., Han, S., & Hu, Y (2009). Comparison of GRACE with in situ hydrological measurement data shows storage depletion in Hai River basin, Northern China. *Water Sa*, 35.  
[doi: 10.4314/wsa.v35i5.49192](https://doi.org/10.4314/wsa.v35i5.49192)
- Maleki, S., Koupaei, S.S., Soffianian, A., Saatchi, S., Pourmanafi, S., & Rahdari, V (2019). Human and climate effects on the Hamoun wetlands. *Weather, Climate, and Society*, 11, 609-622.  
[DOI: 10.1175/WCAS-D-18-0070.1](https://doi.org/10.1175/WCAS-D-18-0070.1)
- Maleki, S., Rahdari, V., Baghdadi, N., & Pahlawanravi, A (2019). Using Sentinel-1 synthetic aperture radar data to study aquatic ecosystems. *Iran's water resources research*, 16(2), 259-270.  
[http://www.iwrr.ir/article\\_113051.html](http://www.iwrr.ir/article_113051.html)
- Management and Planning Organization of Sistan and Baluchistan Province (2021). Document on the development and spatial planning of the counties of Sistan and Baluchistan province - Zabol County, research project. [In Persian].
- Mazidi, A., & BahauddinBegi, H (2021). Studying the trend of temperature, precipitation and wind speed in the northern and western regions of Kerman province using parametric and non-parametric tests. *Geography and human relations*. 4(14), 254-246.  
<https://www.magiran.com/paper/2362495>
- Najafi, A., & Vatanfada, J (2011). Environmental challenges in trans-boundary waters, case study: Hamoon Hirmand Wetland (Iran and Afghanistan). *International Journal of Water Resources and Arid Environments*, 1, 16-24.  
[https://www.psipw.org/attachments/article/300/IJWRAE\\_1\(1\)16-24.pdf](https://www.psipw.org/attachments/article/300/IJWRAE_1(1)16-24.pdf)
- Omidvar, K., & Salari, H (2012). Studying the trend of heat and precipitation changes in the west and northwest of Iran using parametric and non-parametric methods. *Geography*, 11(37), 288-271. [In Persian].  
<https://www.sid.ir/paper/150411/fa>
- Parliament laws (1978). The law of the treaty regarding the water of the Hirmand River between the Government of Iran and the Government of Afghanistan. Law approved on 1978/08/20.  
<https://rc.majlis.ir/fa/law/show/95041>



- Pekel, J.F., Cottam, A., Gorelick, N., & Belward, A.S (2016). High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. *Nature*, 540, 418-422.  
<https://doi.org/10.1038/nature20584>
- Rahimi, M., Shokohi-razi, K., & Zolfaqari., A (2019). Investigating the trend of hydrological and meteorological variables in Hirmand Basin and its effect on land degradation in Sistan Plain, *Journal of Water and Soil Protection Research*, 27(3), 228-213. [In Persian].  
[https://jwsc.gau.ac.ir/article\\_5143.html](https://jwsc.gau.ac.ir/article_5143.html)
- Roudari, A., Hassanpour, F., Yaqubzadeh, M., & Delavar, H (2018). Investigating the relationship between meteorological and hydrological drought in the Sistan plain. *Environmental Science and Technology*, 21(85), 33-44. [In Persian].  
[https://jest.srbiau.ac.ir/article\\_12146.html](https://jest.srbiau.ac.ir/article_12146.html)
- Salighe, M (2011). The effect of Hamoon lake level changes on the local climate of Sistan. *Proceedings of the Fourth International Congress of Geographers of the Islamic World*. Zahedan. [In Persian].  
<https://civilica.com/doc/82832/>
- Salmi, T (2002). Detecting trends of annual values of atmospheric pollutants by the Mann-Kendall test and Sen's slope estimates-the Excel template application Makesens. *Ilmatieteen laitos*  
<https://www.scienceopen.com/document?vid=3d345849-152c-4d63-8c1a-c3159fa3563d>
- Sargazi, V (2021). The economic and social functions of the Hamoon lake in the life of the people of Sistan. *Journal of Applied Studies in Social Sciences and Sociology*, 2(15), 43-50. [In Persian].  
<http://shij.ir/asscs/post.aspx?id=709>
- Shakeryari, M., Ehsani, A., Nasrabadi, T., & Mahmoudi, P (2015). Investigating the capability of Landsat sensor data to investigate land cover changes (case study: Hamoon International Wetland). *Desert Ecosystem Engineering Journal*, 5(10), 69-84. [In Persian].  
<https://deej.kashanu.ac.ir/article-1-316-fa.html>
- Sharifi Kia, M (2011). Monitoring water level changes in Hamoon Lake, based on time series analysis of remote sensing images. *Spatial Planning of Space*, 14(3), 155-176. [In Persian].  
<https://hsmmp.modares.ac.ir/article-21-6406-fa.html>
- Srivastava, A., & Saran, S (2017). Comprehensive study on AOD trends over the Indian subcontinent: a statistical approach. *International Journal of Remote Sensing*, 38, 5127-5149.  
<https://doi.org/10.1080/01431161.2017.1323284>
- Swenson, S (2012). GRACE monthly land water mass grids Netcdf Release 5.0. Ver. 5.0. PO. DAAC  
[https://podaac.jpl.nasa.gov/dataset/TELLUS\\_LAND\\_NC\\_RL05](https://podaac.jpl.nasa.gov/dataset/TELLUS_LAND_NC_RL05)
- Tamiminia, H., Salehi, B., Mahdianpari, M., Quackenbush, L., Adeli, S., & Brisco, B (2020). Google Earth Engine for geo-big data applications: A meta-analysis and systematic review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 164, 152-170.  
<https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2020.04.001>
- United Nations Environment Programme (2006). *History of environmental change in the Sistan Basin: Based on satellite image analysis: 1976 – 2005*.  
<https://wedocs.unep.org/20.500.11822/7690>
- UNEP-DHI, U (2016). *Transboundary river basins: Status and trends*. Nairobi, Kenya.  
<https://www.unepdhi.org/transboundary-river-basins/>
- Van Dijk, A., & Renzullo, L.J (2011). Water resource monitoring systems and the role of satellite observations. *Hydrology and earth system sciences*, 15, 39-55.  
<https://doi.org/10.5194/hess-15-39-2011>
- Vicente-Serrano, S.M., Beguería, S., & López-Moreno, J.I (2010). A multiscale drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of climate*, 23, 1696-1718.  
<https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1>
- Zhang, Y., Pan, M., & Wood, E.F (2016). *On creating global gridded terrestrial water budget estimates from satellite remote sensing*. *Remote sensing and water resources* (59-78): Springer.  
[DOI: 10.1007/978-3-319-32449-4\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-319-32449-4_4)

## تحلیل تغییرات مساحت تالاب‌های هامون و سایر پهنه‌های آبی منطقه سیستان با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای

دکتر محسن ابراهیمی خوسفی

مقاله پژوهشی

### چکیده

منطقه سیستان یکی از مناطق استراتژیک کشور است که حیات آن وابسته به برقراری پایدار جریان آب رودخانه هیرمند است. در این تحقیق، روند تغییرات مساحت تالاب‌های هامون و سایر پیکره‌های آبی واقع در منطقه سیستان و عوامل مؤثر بر آن با استفاده از تصاویر و محصولات ماهواره‌ای، داده‌های هواشناسی و آزمون من-کندال و شیب سن مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور از داده‌های هواشناسی دمای حداقل، دمای حداکثر، دمای میانگین، بارش و تبخیر ایستگاه زابل در بازه زمانی ۲۰۱۸-۱۹۸۵؛ محصولات ماهواره‌ای شامل پهنه‌های آبی مستخرج از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۲۰۲۰-۱۹۸۵، شاخص تفاضلی پوشش گیاهی، شاخص شدت خشکسالی پالم و همچنین تصاویر ماهواره‌ای سنتینل ۲ و نقل‌سنجی GRACE در بازه زمانی ۲۰۲۲-۲۰۰۰ استفاده شد. برای بررسی آخرین وضعیت و محاسبه پهنه‌های آبی منطقه سیستان، از شاخص اتوماتیک استخراج آب (AWEI) با استفاده از تصاویر سنتینل ۲ در شهریور ۱۴۰۱ استفاده شد. نتایج حاصل نشان‌دهنده روند کاهش معنی‌دار پارامترهای دمای حداقل، دمای حداکثر، دمای میانگین، بارش، مساحت پهنه‌های آبی و شاخص خشکسالی پالم است. از طرفی تغییرات شاخص NDVI روندی افزایشی معنی‌دار را نشان داد که ناشی از توسعه کمی اراضی زیر کشت کشاورزی در دشت سیستان است. فعالیت‌های کشور افغانستان در بالادست حوضه آبریز هیرمند نیز بر منابع آب ورودی این رودخانه به ایران تأثیرگذار است. نتایج حاصل از شاخص AWEI نشان داد پس از بهره‌برداری کامل از بند انحرافی کمال‌خان، مسیر طبیعی جریان آب رودخانه هیرمند به سمت گودزره منحرف شده، به نحوی که مانع از ورود آب به خاک ایران و باعث آبیگری شورزار گودزره شده است؛ به گونه‌ای که مساحت آب جریان‌یافته در گودزره بیش از ۳۴ هزار هکتار و مساحت آب پشت سد کمال‌خان معادل ۲۸۹۹ هکتار است. در حالی که مساحت آب ذخیره‌شده در مجموعه چاه‌نیمه‌ها معادل ۳۷۴۷ هکتار است که مؤید تأثیر بهره‌برداری سد کمال‌خان بر جریان طبیعی رودخانه هیرمند است.

جغرافیا و توسعه، شماره ۷۱، تابستان ۱۴۰۲  
تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۸/۰۳  
تاریخ بازنگری داوری: ۱۴۰۱/۱۱/۱۲  
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۰۶  
صفحات: ۱۳۹-۱۶۵



واژه‌های کلیدی:  
آب‌های مرزی، گوگل‌ارت انجین، چاه‌نیمه، گودزره، سنجش از دور.

### مقدمه

ایران از ارتفاعات واقع در کشور افغانستان سرچشمه می‌گیرد. حوضه آبریز هیرمند یک حوضه آبریز بسته است که بخش‌های بزرگی از جنوب و غرب افغانستان و بخش‌های کوچکی از جنوب شرق ایران را دربرمی‌گیرد. این حوضه شامل تعدادی رود است که از ارتفاعات افغانستان سرچشمه می‌گیرند و به سمت دریاچه‌ها و تالاب‌های آب شیرین هامون و در نهایت به سمت گودزره افغانستان که در انتهای حوضه و در کشور افغانستان واقع است، روان هستند (UNEP, 2006: 5).<sup>۱</sup> بخشی از این آب در خاک ایران، در چاه‌نیمه‌های یک تا چهار برای مصارف کشاورزی و شرب در طول سال ذخیره می‌شود. تالاب‌های بین‌المللی هامون واقع در

منطقه سیستان، واقع در قسمت شمالی استان سیستان و بلوچستان، یکی از مناطق مهم و استراتژیک کشور از نظر اقتصادی، تجاری و امنیتی است. این منطقه شامل پنج شهرستان زابل، زهک، نیمروز، هیرمند و هامون با جمعیتی بالغ بر ۳۹۴ هزار نفر است و با داشتن بیش از ۹۰ هزار هکتار اراضی کشاورزی، نقش مهمی در تأمین امنیت غذایی کشور ایفا می‌کند (سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی استان سیستان و بلوچستان، ۱۴۰۰؛ مرکز آمار ایران، ۱۳۹۹). این منطقه در قسمت انتهایی حوضه آبریز هیرمند مشترک با کشور افغانستان قرار گرفته و همه منابع آب‌های سطحی ورودی به

دشت سیستان دارای منابع غنی و ارزشمندی است که در زمان پربابی، امرار معاش گروه‌های مختلفی از مردم منطقه به‌طور مستقیم به آن وابسته است و باعث پویایی و خودکفایی اقتصادی مردم منطقه سیستان است. دامداری، صیادی، حصیریافی و کشاورزی از جمله فعالیت‌های اقتصادی در این منطقه است (سرگزی، ۱۴۰۰: ۴۸)؛ بنابراین، منابع آب شرب و کشاورزی دشت سیستان و همچنین حقایق‌های تالاب‌های هامون کاملاً وابسته به میزان آب ورودی به ایران است. افغانستان تاکنون سدهای متعددی در این حوضه احداث کرده که مهم‌ترین آن‌ها سدهای کجکی و ارغنداب در بالادست و سد کمالخان در نزدیکی مرز با ایران است (ابراهیمی خوسفی و همکاران، ۱۳۹۷: ۱۴۳). بر مبنای معاهده سال ۱۳۵۱ مابین ایران و افغانستان، حقایق ایران ۲۲ مترمکعب آب در ثانیه به‌طور متوسط در سال نرمال آبی (مجلس شورا، ۱۳۵۱: ماده دو) معادل ۸۲۰ میلیون مترمکعب در سال است که با بهره‌برداری از سدهای بالادست، دریافت حقایق ایران با چالش اساسی مواجه شده است.

مطالعات انجام‌شده توسط برنامه محیط‌زیست سازمان ملل نشان می‌دهد که تنش‌های آبی محیط‌زیستی و انسانی به‌ویژه در منطقه جنوب غرب آسیا تشدید خواهد شد. با لحاظ شاخص‌های جمعیت، میزان برداشت از منابع آب و دسترسی به منابع آب، چهار منطقه به عنوان مناطق بحرانی شدید با خطر بالا در خصوص بهره‌برداری از حوضه‌های مشترک مرزی توسط برنامه محیط‌زیست سازمان ملل شناسایی شده است که عبارت‌اند از: (۱) خاورمیانه، (۲) آسیای مرکزی، (۳) جنوب آفریقای جنوبی و (۴) جنوب شرق آسیا. حوضه‌های اصلی شرقی کشور (هیرمند و هریرود) جزو این مناطق بحرانی طبقه‌بندی شده‌اند که نشان‌دهنده احتمال بروز بحران‌های فزاینده ناشی از کمبود آب در منطقه اطراف کشور ایران در مقایسه با سایر نقاط جهان است (UNEP-DHI, 2016: 161).

در دشت سیستان، سفره‌های آب زیرزمینی به مفهوم واقعی و پیوسته وجود ندارد و آنچه که وجود دارد، سفره‌های نیمه‌سطحی آب شور هستند که عمق آن‌ها با توجه به فصول و نوع خاک بین ۵۰ تا ۱۰۰ سانتی‌متر تغییر می‌کند و در برخی نقاط در فصول خشک به عمق ۶ متری نیز می‌رسد (مرکز پژوهش‌های مجلس، ۱۳۸۳: ۶)؛ بنابراین با توجه به اینکه دشت سیستان فاقد آبخوان است، رودخانه هیرمند رگ حیات دشت سیستان و تالاب‌های هامون محسوب می‌شود. مهم‌ترین تأثیرات منفی کاهش آب ورودی هیرمند به کشور، عبارتند از: (۱) خشک‌شدن تالاب‌های بین‌المللی هامون؛ (۲) تغییر اقلیم محلی منطقه به‌صورت افزایش دمای سطح زمین و کاهش بارندگی‌ها؛ (۳) افزایش مدت زمان و سرعت بادهای ۱۲۰ روزه سیستان؛ (۴) بیابانزایی و حرکت ماسه‌های روان؛ (۵) تشدید وقوع ریزگردها؛ (۶) خالی‌شدن مرز و تهدید امنیت و همبستگی ملی کشور؛ (۷) تشدید مهاجرت و حاشیه‌نشینی؛ (۸) تشدید فقر مردم سیستان؛ (۹) تشدید قاچاق و (۱۰) هدررفت سرمایه‌گذاری‌های صورت‌گرفته به‌ویژه در طرح ۴۶۰۰۰ هکتاری آبیاری دشت سیستان و تخریب اراضی و زیرساخت‌های کشاورزی (ابراهیمی خوسفی و همکاران، ۱۳۹۷: ۱۵۸-۱۳۶؛ سرگزی، ۱۴۰۰: ۴۹؛ فیروزی و همکاران، ۱۳۹۹: ۲۵۳؛ سلیقه، ۱۳۸۹: ۱۳؛ اصغری و نادریان‌فر، ۱۳۹۴: ۲۸).

سنجش‌ازدور ماهواره‌ای به‌طور فزاینده‌ای به‌عنوان منبع اطلاعات تکمیلی برای شبکه‌های نظارت زمینی استفاده می‌شود و در بسیاری از موارد و مناطق، تنها منبع در دسترس است. سنجنده‌های ماهواره‌ای، قادر به اندازه‌گیری مستقیم و غیرمستقیم تقریباً همه اجزای چرخه هیدرولوژیکی از جمله بارش، تبخیر و تعرق، سطح آب دریاچه‌ها و تالاب‌ها، رطوبت خاک، مجموع ذخایر آبی و زیرزمینی و دما هستند (Lettenmaier et al, 2015: 7309; McCabe et al, 2017: 3879; Zhang et al, 2016: 59) و می‌توانند

پیکره‌های آبی پرداختند. با وجود خشکسالی‌های شدید، نتایج تحقیق نشان‌دهندهٔ مداخلات انسانی و افزایش مصرف آب و افزایش سطح پوشش گیاهی در بالادست رودخانهٔ هیرمند است (Afzali et al, 2022: 1243).

نجفی و همکاران (۲۰۱۱) به مطالعهٔ چالش‌های آب‌های فرامیزی به‌ویژه رودخانهٔ هیرمند و تالاب‌های هامون پرداختند و به این نتیجه رسیدند که کاهش آب ورودی به ایران می‌تواند باعث تغییر فرایند مهاجرت پرندگان، تخریب زیستگاه‌ها، کاهش کیفیت آب، افزایش طوفان‌های گرد و غبار، تهدید سلامت و اثرات منفی اقتصادی و اجتماعی بر مردم منطقهٔ سیستان شود (Najafi and Vatanfada, 2011:21).

ملکی و همکاران (۲۰۱۹) تأثیرات اقلیمی و انسانی بر تالاب‌های هامون را در بازهٔ زمانی ۱۹۷۷ تا ۲۰۱۴ مورد بررسی قرار داده و به این نتیجه رسیدند که باوجود خشکسالی‌های شدید در حوضهٔ آبریز هلمند، کشاورزی در این حوضه غالب بوده و فشار آبی مضاعفی را بر منابع محدود این حوزه وارد کرده است (Maleki et al, 2019: 617).

با توجه به اهمیت استراتژیک منطقهٔ سیستان و تالاب‌های هامون، مطالعات متعددی در حوزه‌های مختلف اقتصادی، امنیتی، محیط‌زیستی و... در این منطقه انجام شده است. شریفی‌کیا و همکاران (۱۳۸۹) از تحلیل سری زمانی تصاویر ماهواره‌ای لندست برای پایش تغییرات تراز آبی هامون استفاده کردند و نشان دادند در فاصلهٔ زمانی سال ۱۳۵۵ تا سال ۱۳۸۴، تغییر در عرصه‌های آب‌گیری‌شدهٔ هامون به زیان بخش ایران (هامون صابری) و به نفع بخش واقع در افغانستان (هامون پوزک) بوده و عرصه‌ای به مساحت ۷۷۷ کیلومتر مربع از هامون هیرمند واقع در ایران کاسته شده و عرصهٔ جدیدی به مساحت ۴۹۲ کیلومتر مربع از بخش‌های غیرآبگیر هامون پوزک در افغانستان، آبگیری شده است که ناشی از انباشت

اطلاعات سری‌های زمانی مختلف را در اختیار کاربران و پژوهشگران قرار دهند. همچنین این سنجنده‌ها قادر به ارائهٔ اطلاعات حیاتی در حمایت از مدیریت آب و نظارت بر بلایای طبیعی (نظیر سیل و خشکسالی) و اثرات مخرب آن‌ها هستند (Van Dijk & Renzullo, 2011: 39). علاوه‌براین، سنجنش‌ازدور امکان پایش و نظارت بر تولید محصولات کشاورزی، تولید مواد غذایی، ذخیره‌سازی و تجارت آن را فراهم می‌کند و به‌نحوی بیانگر امنیت آب و غذا برای هر منطقه به شمار می‌رود (Dalin et al, 2017: 700).

مویو و همکاران (۲۰۰۹)، در پژوهش خود به مقایسهٔ GRACE با داده‌های اندازه‌گیری هیدرولوژیک، در حوضهٔ رودخانهٔ Hai در شمال چین برای دورهٔ ژانویهٔ ۲۰۰۳ تا دسامبر ۲۰۰۶ پرداختند. مقایسهٔ سری‌های زمانی نشان داد که همبستگی خوبی بین این دو نوع داده با ضریب همبستگی ۰/۸۲ وجود دارد (Moiwo et al, 2009: 667).

دئولی و همکاران (۲۰۲۰)، در پژوهش خود به تجزیه و تحلیل نوسانات آب زیرزمینی با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای GRACE برای منطقهٔ Terai در هند از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۶ پرداختند. برای بررسی تغییرات سطح آب زیرزمینی، تحلیل روند ناپارامتریک با استفاده از روش‌های رگرسیون خطی، آزمون من‌کندال و مدل‌های میانگین متحرک استفاده شده است. نتایج مطالعه نشان داده است که نوسانات آب زیرزمینی طی سال‌های مورد بررسی به‌شدت کاهش یافته و روند برای این دورهٔ مطالعه منفی است (Deoli and Kumar, 2020: 300).

افضلی و همکاران (۲۰۲۲)، در پژوهش خود به پایش منابع آبی و پوشش گیاهی کلان حوضهٔ هیرمند با استفاده از آن سری زمانی تصاویر ماهواره‌ای بارش جهانی GPM<sup>۱</sup> و داده‌های GRACE و همچنین تصاویر لندست ۵ و ۸ برای طبقه‌بندی پوشش گیاهی و



تصاویر ماهواره‌ای لندست نشان دادند افزایش مساحت این تپه‌ها در دشت سیستان از حدود ۷ درصد در سال ۱۹۹۵ به حدود ۱۱ درصد در سال ۲۰۱۸ است که ناشی از کاهش مساحت تالاب‌های هامون است (فیروزی و همکاران، ۱۳۹۹: ۳۳۹).

هدف از این پژوهش، بررسی روند تغییرات پهنه‌های آبی دشت سیستان و محدوده تالاب‌های هامون و همچنین تحلیل عوامل مؤثر بر این تغییرات با استفاده از سری زمانی محصولات و تصاویر ماهواره‌ای در دسترس است.

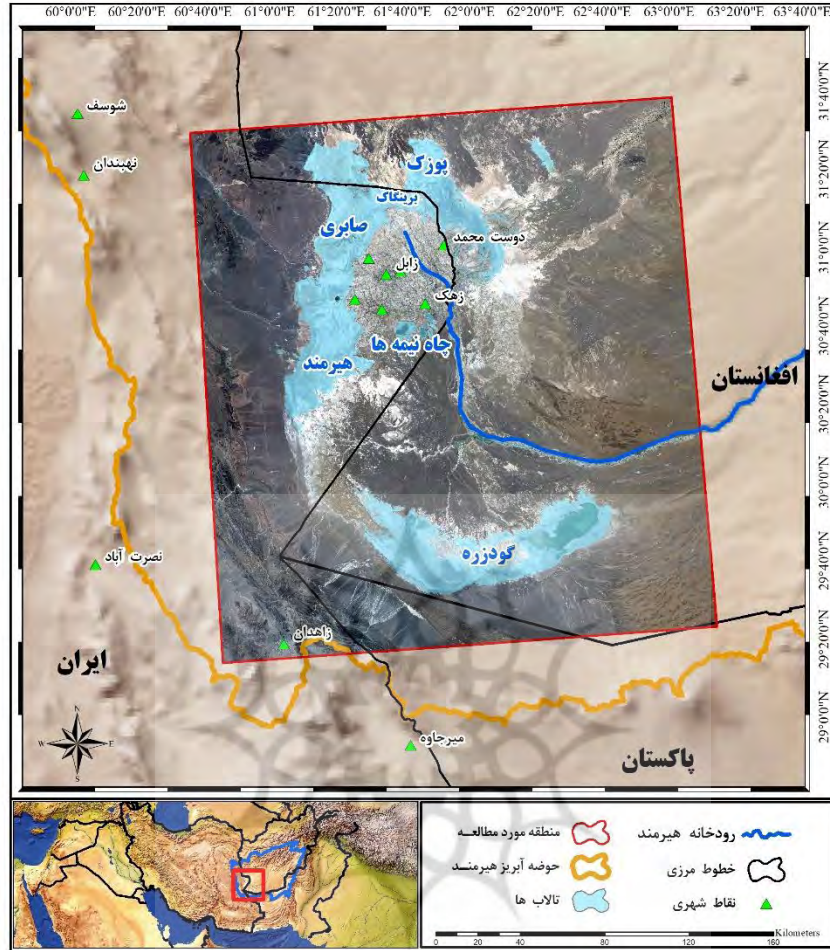
#### منطقه مورد مطالعه

منطقه سیستان واقع در قسمت انتهایی حوضه آبریز هیرمند، یکی از مناطق مهم و استراتژیک کشور محسوب می‌شود. این منطقه دربرگیرنده تالاب‌های هامون است. هامون، بزرگ‌ترین دریاچه آب شیرین شرق ایران، به‌عنوان ذخیره‌گاه زیست‌کره در فهرست تالاب‌های بین‌المللی کنوانسیون رامسر به ثبت رسیده است (سازمان حفاظت محیط‌زیست، ۱۳۹۴: ۸). با توجه به اهمیت اقتصادی، اجتماعی و امنیتی دشت سیستان و نظر به اهمیت محیط‌زیستی تالاب‌های هامون، محدوده مناطق آبریز در انتهای حوضه آبریز مشترک مرزی هیرمند به‌عنوان محدوده مورد مطالعه در این پژوهش انتخاب شد که در شکل ۱ نشان داده شده است. این محدوده به مساحت تقریباً ۶۸۰۰۰ کیلومتر مربع در عرض جغرافیایی ۲۹/۱۰ درجه شمالی تا ۳۱/۵ درجه شمالی و طول جغرافیایی ۶۰/۴۰ درجه شرقی تا ۶۳/۱۰ درجه شرقی واقع شده است. در این منطقه، چهار تالاب شامل برینگاک، هامون پوزک، هامون صابری و هامون هیرمند و شورزه‌زار گودزره قرار دارد که در موقع حداکثر آبرگیری به هم می‌پیوندند.

رسوبات بادی در کنار موانعی نظیر جاده و دیوار ساحلی است (شریفی‌کیا و همکاران، ۱۳۸۹: ۱۵۶-۱۵۵). شاکریاری و همکاران (۱۳۹۵) به بررسی قابلیت داده‌های سنجنده لندست به‌منظور بررسی تغییرات پوشش اراضی در محدوده تالاب بین‌المللی هامون در بازه زمانی سال‌های ۱۹۷۷ تا ۲۰۱۴ پرداختند و به این نتیجه رسیدند که در طول کل دوره روند تغییرات تالاب در جهت تخریب آن بوده است (شاکریاری و همکاران، ۱۳۹۵: ۶۹).

رودری و همکاران (۱۳۹۸) با بررسی رابطه خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژی در دشت سیستان به این نتیجه رسیدند که وضعیت خشکسالی دشت سیستان را خشکسالی هیدرولوژی به‌دلیل حجم کم بارش و ضریب تغییرات بالای آن و نقش حیاتی جریان‌های سطحی در تأمین منابع آب دشت، نسبت به خشکسالی هواشناسی بهتر نشان می‌دهد (رودری و همکاران، ۱۳۹۸: ۴۲). رحیمی و همکاران (۱۳۹۹) به بررسی روند متغیرهای آب و هواشناختی حوضه هیرمند شامل دما، بارش و دبی آب ورودی رودخانه هیرمند و تأثیر آن بر تخریب زمین در دشت سیستان پرداخته و به این نتیجه رسیدند که ورودی آب به بستر هامون‌ها طی دوره بازه زمانی ۲۱ ساله ۱۹۹۶ تا ۲۰۱۶ روند نزولی داشته و کلاس تخریب زمین در طی مدت موردنظر در همه واحدهای کاری از کلاس خطر متوسط به خطر خیلی شدید افزایش یافته است (رحیمی و همکاران، ۱۳۹۹: ۳۳).

ملکی و همکاران (۱۳۹۹) با استفاده از تصاویر راداری سنتینل ۱، نقشه پوشش اراضی تالاب هامون هیرمند را در دوره‌های آبرگیری و خشک تهیه کرده و نشان دادند که تصاویر راداری قابلیت مناسبی برای پایش اکوسیستم‌های آبی دارند (ملکی و همکاران، ۱۳۹۹: ۲۵۹). فیروزی و همکاران (۱۳۹۹) نیز با پایش روند تغییرات تپه‌های ماسه‌ای با استفاده از سری زمانی



شکل ۱: منطقه مورد مطالعه - محدوده تالاب‌های هامون در حوضه آبریز مشترک مرزی ایران-افغانستان تهیه و ترسیم: نگارنده، ۱۴۰۱

جدول ۱: خصوصیات خصوصیات مجموعه تالاب‌های واقع در منطقه مورد مطالعه

پهنه آبی	متوسط عمق (متر)	مساحت (کیلومتر مربع)	حجم (میلیون مترمکعب)
برینگاک	۱	۲۲۲	۲۲۲
هامون هیرمند	۲	۲۳۸۹	۴۷۷۷
هامون پوزک (افغانستان)	۳	۱۴۵۳	۴۳۶۰
هامون پوزک (ایران)	۲	۶۱	۱۲۲
هامون صابری	۳	۱۱۶۱	۳۴۸۴
گودزره	۱۰	۲۴۱۷	۲۴۱۷۵
مجموع	-	۷۷۰۳	۳۷۱۴۰

ماخذ: UNEP, 2006

## داده‌های مورد استفاده

همه داده‌ها و محصولات ماهواره‌ای مورد استفاده در این پژوهش از سامانه گوگل ارث‌انجین اخذ و در همان سامانه همه پردازش‌های مربوط انجام پذیرفته است. سامانه گوگل ارث‌انجین، مجموعه‌ای چند پتابیتی از تصاویر و محصولات ماهواره‌ای و داده‌های مکانی را به صورت رایگان در اختیار کاربران مختلف قرار می‌دهد. این سامانه، قابلیت انجام پردازش‌ها و محاسبات مختلف روی داده‌ها را نیز به زبان‌های برنامه‌نویسی پایتون و جاوااسکریپت بدون نیاز به دانلود فراهم کرده است (Tamiminia et al, 2020: 152). داده‌های مورد استفاده در این پژوهش به شرح زیر است که همه آن‌ها در سامانه گوگل ارث‌انجین دریافت و پردازش شده است:

- مجموعه اطلاعاتی پیکره آب‌های سطحی جهان<sup>۱</sup> حاصل از پردازش تصاویر سنجنده‌های لندست ۵، ۷ و ۸ در بازه زمانی ۱۹۸۴ تا ۲۰۲۰ (Pekel et al, 2016:418). محصول ماهواره GRACE به دست آمده از میانگین داده‌های مرکز تحقیقات فضایی تگزاس<sup>۲</sup> (CSR) و آزمایشگاه پیشرانه جت ناسا<sup>۳</sup> (JPL) در بازه زمانی سال‌های ۲۰۰۲ تا ۲۰۲۰ در مقیاس زمانی ماهانه و با قدرت تفکیک مکانی ۱۱۱۳۲۰ متر (Chambers, 2006:1; Landerer and Swenson, 2012:10; Swenson 2012). اطلاعات این ماهواره بیانگر تغییرات کل منابع آب اعم از آب‌های سطحی، زیرزمینی، رطوبت خاک و برف در مقیاس کلان و با ابعاد پیکسل بیش از ۱۱۰ کیلومتری است.

- محصول ۱۶ روزه شاخص‌های گیاهی سنجنده MODIS ماهواره Terra محصول MOD13A1 در بازه زمانی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰ (Didan, 2015: 6).

- محصول شاخص شدت خشکسالی پالم (PDSI)<sup>۴</sup> از سری محصولات ماهانه TerraClimate دانشگاه آیداهو با قدرت تفکیک مکانی ۴۳۶۸ متر در بازه زمانی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰ (Vicente-Serrano et al, 2010: 1696).

- تصاویر ماهواره‌ای سنتینل ۲ برای تعیین محدوده آب‌های سطحی در منطقه مورد مطالعه در سال ۲۰۲۲.

- داده‌های درازمدت متوسط سالانه پارامترهای دمای حداقل، دمای حداکثر، دمای میانگین و بارندگی ایستگاه هواشناسی واقع در شهر زابل در طی دوره ۱۹۸۵ تا ۲۰۱۸ و متوسط تخییر سالانه در بازه زمانی ۱۹۹۲ تا ۲۰۱۸.

## روش کار

نمودار فرایندی روش کار این تحقیق در شکل ۲ نشان داده شده است. ابتدا مجموعه داده‌های مورد نیاز برای انجام تحقیق شامل داده‌های زمینی و داده‌های ماهواره‌ای از منابع مختلف اشاره شده در قسمت قبل، اخذ شد. با توجه به تفاوت قدرت تفکیک مکانی محصولات مختلف ماهواره‌ای مورد استفاده و عدم تلفیق آن‌ها در فرایند این تحقیق، همسان‌سازی ابعاد پیکسل‌ها انجام نشد و ابعاد پیکسل استاندارد محصول برای محاسبه میانگین ماهانه یا سالانه آن محصول در کل منطقه مورد مطالعه، در نظر گرفته شد. در گام بعدی، داده‌های هواشناسی ایستگاه زابل در بازه زمانی ۱۹۸۵ تا ۲۰۱۸ آماده‌سازی شد.

روش‌های پارامتری و ناپارامتری متعددی در جهت ارزیابی روند تغییرات متغیرهای هیدرواقليم ارائه شده است. عدم‌نیاز به تبعیت از یک تابع توزیع خاص و داشتن حساسیت کمتر به مقادیر حدی از مزایای روش ناپارامتری است. به همین دلیل گستره استفاده از روش ناپارامتری نسبت به پارامتری در مطالعات ارزیابی

1. Global Surface Water  
2. U. Texas / Center for Space Research  
3. Jet Propulsion Laboratory

4. Palmer Drought Severity Index

$$\operatorname{sgn}(x) = \begin{cases} +1 & x > 0 \\ 0 & x = 0 \\ -1 & x < 0 \end{cases} \quad (۲)$$

براساس این آزمون در صورتی که مقدار  $S$  اختلاف معنی‌داری با صفر نداشته باشد، روند وجود ندارد و در غیر این صورت روند، صعودی یا نزولی خواهد بود. برای آزمون معنی‌دار بودن روند، از متغیر  $Z$  نرمال استاندارد مطابق با رابطه ۳ استفاده می‌شود. فرض صفر ( $H_0$ ) در آزمون من-کندال نبود روند و فرض  $H_1$  وجود روند است (Salmi, 2002: 10).

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\operatorname{var}(S)}} & \text{if } S > 0 \\ 0 & \text{if } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\operatorname{var}(S)}} & \text{if } S < 0 \end{cases} \quad (۳)$$

$$\operatorname{Var}(S) = \{n(n-1)(2n+5)\} \quad (۴)$$

### آزمون شیب سن

در این آزمون شیب میانه برای سری زمانی محاسبه شده و معنی‌داری شیب در سطوح مختلف اطمینان به دست می‌آید. شیب میانه بین داده‌ها با استفاده از رابطه (۵) محاسبه می‌شود.

$$Q = \frac{x_t - x_s}{t - s}, i = 1, 2, \dots, N \quad (۵)$$

در این رابطه  $x_t$  و  $x_s$  به ترتیب داده در زمان‌های  $t > s$  و  $N = \frac{n(n-1)}{2}$  هستند. مقدار مثبت شیب سن بیانگر روند افزایشی و مقدار منفی آن روند کاهشی است. برای انجام آزمون من-کندال و تخمین شیب سن، از کدهای نوشته شده در محیط نرم‌افزار اکسل و همچنین راهنمای کاربری مربوط به آن استفاده شد (Salmi, 2002: 11).

تغییرات پارامترهای اقلیمی بیشتر است (امیدوار و سالاری، ۱۳۹۲: ۲۷۱؛ حجازی‌زاده و همکاران، ۱۳۹۳: ۳۵؛ قریانی و همکاران، ۱۳۹۹: ۱۸۵؛ مزیدی و بهالدین بیگی، ۱۴۰۰: ۲۴۶؛ ایمانی و همکاران، ۱۴۰۰: ۸۴).

آزمون‌های روند من-کندال<sup>۱</sup>، من-کندال اصلاح شده<sup>۲</sup>، سن<sup>۳</sup> و پتیت<sup>۴</sup> از جمله روش‌های ناپارامتری هستند که استفاده گسترده‌ای در مطالعات دارند (قریانی و همکاران، ۱۳۹۹: ۱۸۶). در این تحقیق، با استفاده از آزمون من-کندال، روند تغییرات همه پارامترها در سطوح معنی‌داری مختلف مورد بررسی قرار گرفت. برای تعیین شیب تغییرات نیز از تخمین گر شیب سن استفاده شد. آزمون من-کندال بر پایه رتبه داده‌ها در یک سری زمانی بسط و توسعه داده شده است که در ابتدا توسط من و سپس توسط کندال ارائه شد (Kendall, 1975; Mann, 1945: 250). همچنان که اشاره شد، این آزمون به عنوان یک روش ناپارامتری دارای مزایایی است که سبب شده به طور متداول و گسترده‌ای در تحلیل روند سری‌های هیدرولوژیکی و هواشناسی به کار گرفته شود (Srivastava & Saran, 2017: 5127). در این آزمون فرض صفر بیانگر تصادفی بودن و نبود روند در سری زمانی داده‌ها بوده و پذیرش فرض یک (رد فرض صفر) دلالت بر وجود روند در سری داده‌ها است. در روش من-کندال فرض بر این است که یک سری زمانی به صورت  $x_1, x_2, \dots, x_n$  وجود دارد. آماره آزمون من-کندال با استفاده از رابطه ۱ محاسبه می‌شود که در این رابطه  $j$  و  $k$  مرتبه مشاهدات هستند و تابع علامت  $\operatorname{sgn}(x)$  به صورت رابطه (۲) تعریف می‌شود.

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \operatorname{sgn}(x_j - x_k) \quad (۱)$$

1. Mann-Kendall
2. Modified Mann-Kendall
3. Sen's slope
4. Pettite's change point



سنتینل ۲ استفاده شد. استخراج مساحت پیکره‌های آبی نیز با استفاده از شاخص AWEI<sup>۱</sup> انجام پذیرفت که از رابطه (۶) محاسبه می‌شود: ( Feyisa et al, 2014: 26).

(۶)

$$AWEI = 4 \times (GREEN - SWIR2) - (0.25 \times NIR + 2.75 \times SWIR1)$$

در این رابطه، GREEN معادل بازتاب سطحی باند ۳، NIR معادل باند ۸، SWIR1 معادل باند ۱۱ و SWIR2 معادل باند ۱۲ تصاویر ماهواره سنتینل ۲ است. این شاخص با استفاده از باندهای سبز، مادون قرمز نزدیک و میانی، تأثیر سایه عوارض مختلف یا عوارض با بازتاب اندک را بر تعیین مرز پیکره‌های آبی به حداقل می‌رساند.

مسیر طبیعی رودخانه هیرمند پس از عبور از خاک افغانستان بر مرز مشترک ایران و افغانستان امتداد می‌یابد و با ورود به تالاب‌های هامون از سمت شمال در دشت سیستان، در نهایت از قسمت جنوبی مجدداً به خاک افغانستان بازگشته و به شوره‌زار گودزره وارد می‌شود. کشور افغانستان در سال ۱۳۹۹ اقدام به افتتاح سد کمال‌خان روی رودخانه هیرمند در نزدیکی مرز ایران و قبل از ورود آب هیرمند به مرز مشترک دو کشور کرد که در نتیجه آن، بخش عمده‌ای از منابع آب این رودخانه بدون ورود به خاک ایران، مستقیماً وارد گودزره و از دسترس خارج می‌شود. برای تعیین مرز پیکره‌های آبی در کل منطقه مورد مطالعه از جمله منطقه گودزره در خاک افغانستان (ناشی از آبیگری سد کمال‌خان و انحراف مسیر طبیعی رودخانه هیرمند)، از تصاویر ماهواره‌ای



شکل ۲: نمودار فرایندی روش تحقیق

تهیه و ترسیم: نگارنده، ۱۴۰۱

## نتایج

میزان بارندگی در طی دوره مورد بررسی روندی کاهشی معنی دار و دمای حداقل، دمای میانگین و دمای حداکثر روندی افزایشی معنی دار را نشان می‌دهد. روند تغییرات تبخیر در این ایستگاه کاهشی و از نظر آماری غیرمعنی دار است.

نتایج بررسی روند تغییرات داده‌های سالانه بارندگی، دمای حداقل، دمای حداکثر و تبخیر در ایستگاه هواشناسی زابل از سال ۱۹۸۵ تا ۲۰۱۸ در جدول ۲ نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود،

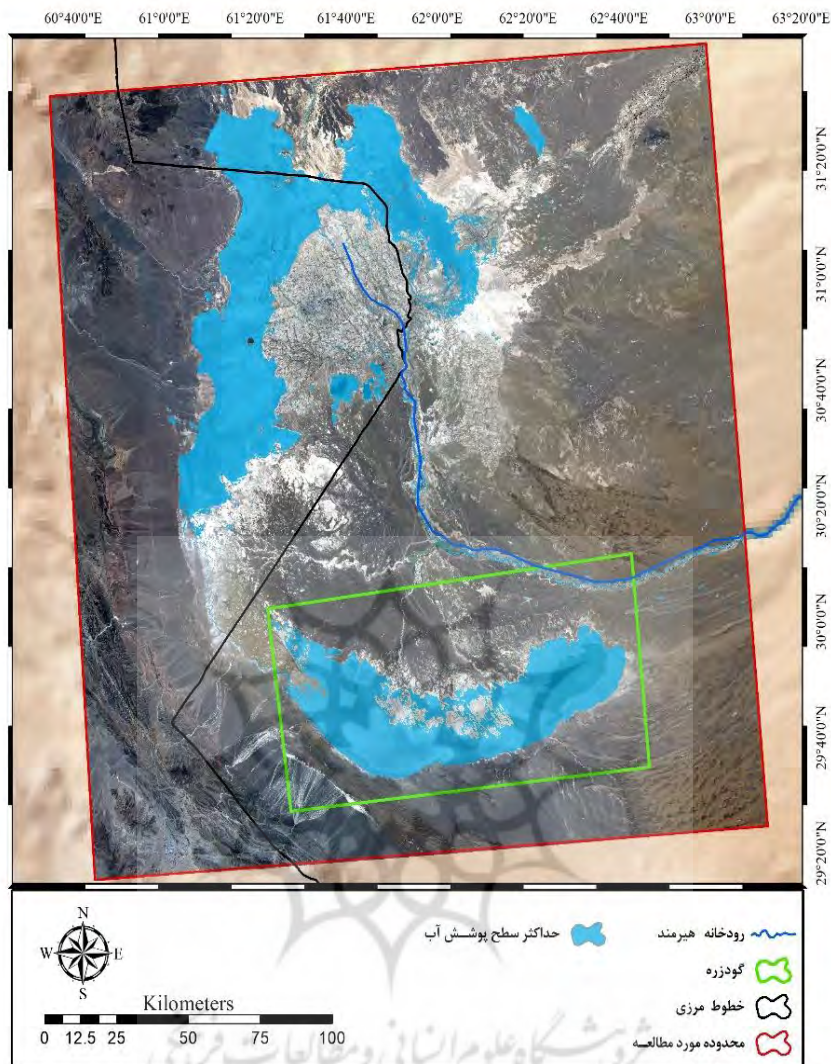
جدول ۲: نتایج آزمون من-کندال و تخمین گر شیب سن بر پارامترهای اقلیمی ایستگاه هواشناسی زابل

متغیر	توصیف (متوسط سالانه)	آزمون من-کندال			شیب سن Q
		آزمون Z	سطح معنی داری	روند	
Rainfall	بارش سالانه	-۲/۱۳	**	کاهشی معنی دار	-۱/۳۵۳
$T_{min}$	دمای حداقل	۵/۲۲	***	افزایشی معنی دار	۰/۰۵۳۶
$T_{max}$	دمای حداکثر	۴/۶۳	***	افزایشی معنی دار	۰/۰۹۴
$T_{mean}$	دمای متوسط	۳/۹۱	***	افزایشی معنی دار	۰/۰۶۳
Ev	تبخیر	-۱/۱۳		کاهشی	-۱۱/۸۷۳
*** سطح معنی داری ۰/۰۰۱ $\alpha =$ ** سطح معنی داری ۰/۰۱ $\alpha =$ * سطح معنی داری ۰/۰۵ $\alpha =$ + سطح معنی داری ۰/۱ $\alpha =$					

مأخذ: محاسبات نگارنده، ۱۴۰۱

این منطقه سیلی با حداکثر دبی اتفاق افتاده در ۴۰ سال گذشته رخ دهد، محدوده‌ای به مساحت تقریبی ۸۷۵۵ کیلومترمربع در منطقه تالاب‌های هامون و گودزره را پوشش می‌دهد.

نتایج بررسی لایه اطلاعاتی حداکثر مساحت پیکره‌های آبی در شکل ۳ نشان داده شده است. در این شکل، محدوده‌هایی که در بازه زمانی سال‌های ۱۹۸۴ تا سال ۲۰۲۰ حداقل یکبار زیر پوشش آب قرار گرفته است، نمایان است. به عبارت دیگر، در صورتی که در



شکل ۳. محدوده‌های تحت پوشش آب در حالت حداکثر ورودی آب به تالاب‌ها در بازه زمانی سال‌های ۱۹۸۵-۲۰۲۰ تهیه و ترسیم: نگارنده، ۱۴۰۱

یکسال همواره دارای آب بوده است (نظیر چاه‌نیمه‌های یک تا سه). پهنه‌های آبی فصلی نیز شامل پهنه‌هایی است که در طول سال در برخی از ماه‌ها خشک شده و مجدداً آبدار می‌شوند. در طول بازه زمانی ۱۹۸۵ تا ۲۰۲۰، مساحت پهنه‌های آبی دائمی، سال‌به‌سال رو به کاهش بوده است.

نتایج آزمون من-کندال و تخمین‌گر شیب سن برای بررسی روند تغییرات مساحت پهنه‌های آبی بر روی سری زمانی ماهانه مساحت پهنه‌های آبی (دائمی و فصلی) و همچنین سری زمانی سالانه پهنه‌های آبی دائمی و فصلی در منطقه مورد مطالعه از سال ۱۹۸۵ تا ۲۰۲۰ در جدول زیر نشان داده شده است. آب‌های دائمی در منطقه شامل پهنه‌هایی است که در طول

جدول ۳: نتایج آزمون من-کندال و تخمین گر شیب سن بر روند تغییرات ماهانه و سالانه پیکره‌های آبی

ماه	آزمون من-کندال			شیب سن Q
	آزمون Z	سطح معنی‌داری	روند	
Jan	-۴/۲۳	***	کاهش معنی‌دار	-۴۲۴۸
Feb	-۲/۵۵	*	کاهش معنی‌دار	-۴۴۶۹
Mar	-۱/۴۱		کاهش	-۲۹۷۳
Apr	-۰/۳۸		کاهش	-۹۱۶
May	-۱/۵۱		کاهش	-۳۷۳۱
Jun	-۰/۶۶		کاهش	-۱۲۶۰
Jul	-۲/۴۶	*	کاهش معنی‌دار	-۴۱۱۳
Aug	-۲/۳۱	*	کاهش معنی‌دار	-۴۸۶۹
Sep	-۲/۸۷	**	کاهش معنی‌دار	-۳۳۷۵
Oct	-۱/۷۷	+	کاهش معنی‌دار	-۴۱۳۲
Nov	-۲/۸۵	**	کاهش معنی‌دار	-۷۱۱۴
Dec	-۴/۵۸	***	کاهش معنی‌دار	-۱۹۱۷
پیکره‌های آبی دائمی	-۴/۲۷	***	کاهش معنی‌دار	-۳۸۲۶
پیکره‌های آبی فصلی	-۱/۲۷		کاهش	-۲۸۹۰

\*\*\* سطح معنی‌داری  $\alpha = 0.001$  \*\* سطح معنی‌داری  $\alpha = 0.01$  \* سطح معنی‌داری  $\alpha = 0.05$  + سطح معنی‌داری  $\alpha = 0.1$

مأخذ: محاسبات نگارنده، ۱۴۰۱

سال‌های مختلف، روند تغییراتی کاهش اما غیر معنی‌دار را نشان می‌دهد.

جدول ۴، نتایج بررسی روند تغییرات پارامترهای ضخامت آب معادل ماهواره GRACE، شاخص پوشش گیاهی NDVI و شدت خشکسالی پالمر از سری محصولات ماهواره‌ای TerraClimate را در بازه زمانی بین سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰ نشان می‌دهد.

با توجه به نتایج حاصل، جز ماه‌های مارس، آوریل، می و ژوئن، مساحت پیکره‌های آبی در محدوده مورد مطالعه در سایر ماه‌ها روند کاهش معنی‌داری را نشان می‌دهد. همچنین، متوسط سالانه مساحت پیکره‌های آبی دائمی در طول دوره مورد بررسی به صورت معنی‌داری کاهش است. روند تغییرات متوسط سالانه پیکره‌های آبی فصلی به دلیل وقوع بارش‌های فصلی در

جدول ۴: نتایج آزمون من-کندال و تخمین گر شیب سن بر پارامترهای محیطی مستخرج از محصولات ماهواره‌ای

متغیر (متوسط سالانه)	توصیف	آزمون من-کندال			شیب سن Q
		آزمون Z	سطح معنی‌داری	روند	
GRACE (cm)	تغییرات آب زیرزمینی	-۴/۹۰	***	کاهش معنی‌دار	-۰/۸۹۷
NDVI	شاخص پوشش گیاهی	۳/۷۱	***	افزایش معنی‌دار	۰/۰۰۱
PDSI	شدت خشکسالی پالمر	۳/۲۹	**	افزایش معنی‌دار	۰/۲۷۹

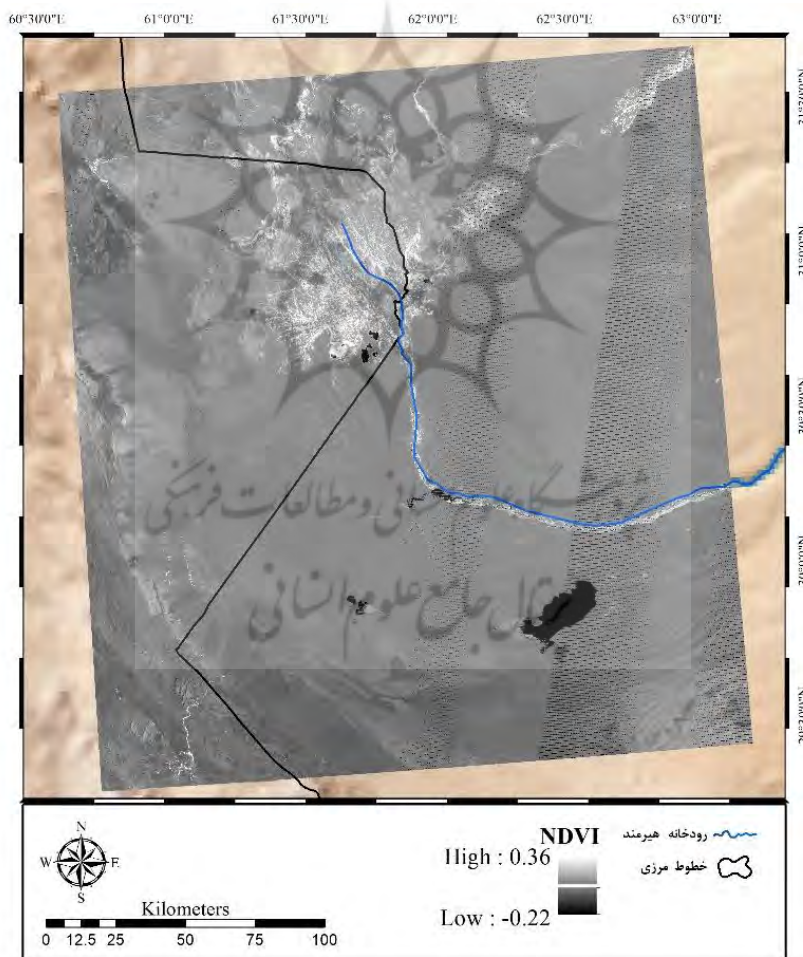
\*\*\* سطح معنی‌داری  $\alpha = 0.001$  \*\* سطح معنی‌داری  $\alpha = 0.01$  \* سطح معنی‌داری  $\alpha = 0.05$  + سطح معنی‌داری  $\alpha = 0.1$

مأخذ: محاسبات نگارنده، ۱۴۰۱



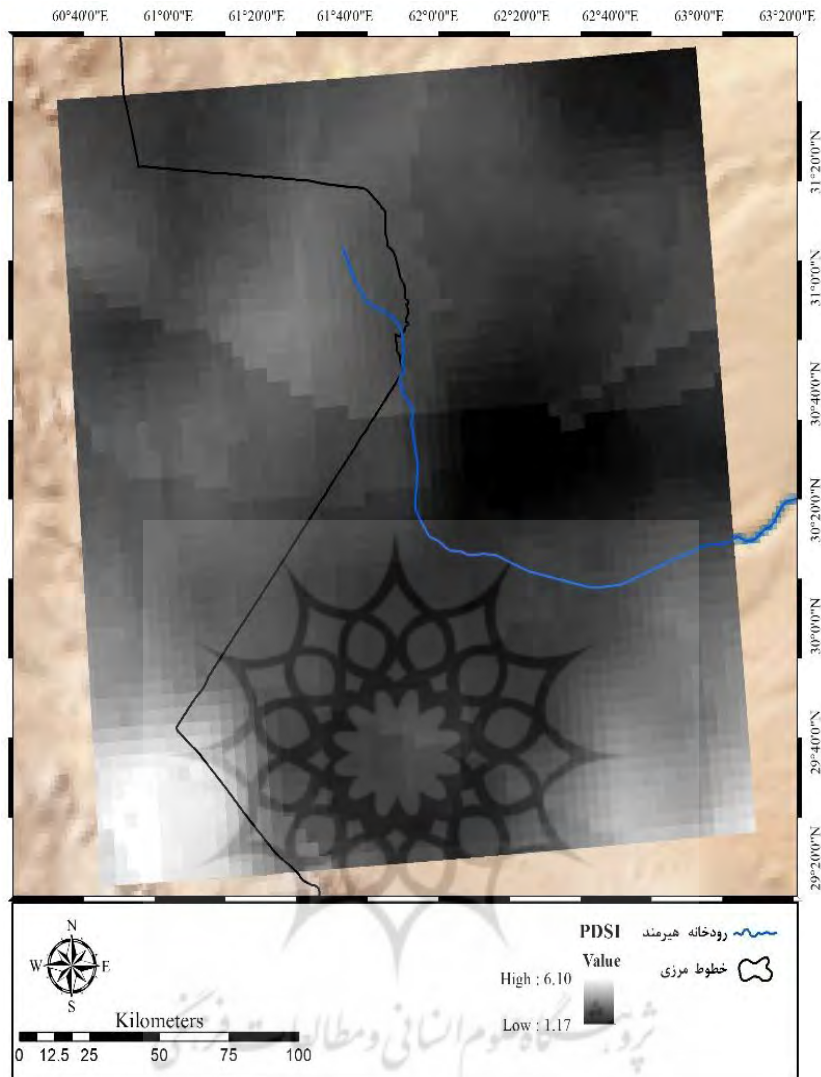
تغییرات گرانشی زمین را با توجه به تغییرات عمودی آب‌های زیرزمینی (زیرسطحی) بر حسب سانتی‌متر نشان می‌دهند. اطلاعات این ماهواره بیانگر تغییرات کل منابع آب زیرزمینی (زیرسطحی) اعم از آب‌های موجود در آبخوان‌ها، آب‌های ژرف، رطوبت خاک و سایر منابع آبی موجود زیرسطح زمین در مقیاس کلان و با ابعاد پیکسل بیش از ۱۱۰ کیلومتری است. شکل ۴، شاخص پوشش گیاهی NDVI در شهریور ۱۴۰۱ و شکل ۵ شاخص PDSI سال ۲۰۲۰ را در منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد.

نتایج حاصل نشان می‌دهد که شدت خشکسالی پالمر در این منطقه دارای روندی افزایشی معنی‌دار است. باوجود افزایش شدت خشکسالی در طی دوره مورد بررسی، روند شاخص پوشش گیاهی، افزایشی معنی‌دار در سطح ۹۹ درصد است. از طرفی، داده‌های ثقل‌سنجی ماهواره GRACE نیز بیانگر روند کاهشی معنی‌دار منابع آب در منطقه مورد مطالعه است. ماهواره GRACE ناهنجاری‌های گرانشی ماهانه را نسبت به خط پایه میانگین زمانی ۲۰۱۰-۲۰۰۴ ارائه می‌دهد. داده‌های این ماهواره، واحدهای «ضخامت آب معادل» هستند که



شکل ۴: شاخص NDVI در منطقه مورد مطالعه در شهریور ۱۴۰۱

تهیه و ترسیم: نگارنده، ۱۴۰۱

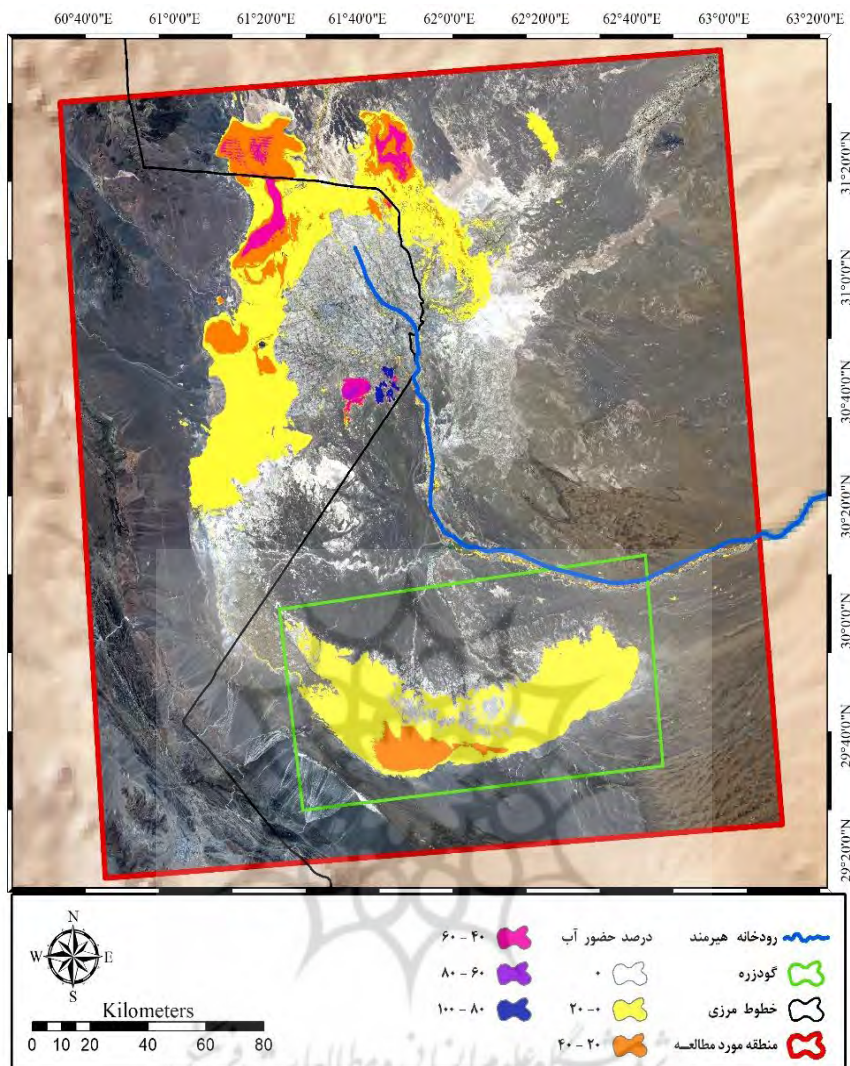


شکل ۵: شاخص PDSI منطقه مورد مطالعه در سال ۲۰۲۰

تهیه و ترسیم: نگارنده، ۱۴۰۱

مشاهده می‌شود، در طی دوره مورد بررسی از سال ۱۹۸۵ تا سال ۲۰۲۰، در بخش عمده‌ای از گودزره، تنها ۲۰ درصد مواقع آب جاری شده است. در قسمت مرکزی گودزره که در امتداد مسیر طبیعی جریان آب از سمت مرز ایران به افغانستان قرار گرفته است، حداکثر در ۴۰ درصد مواقع آب وجود داشته است.

شکل ۶ بیانگر درصد حضور آب در تالاب‌های هامون، چاه‌نیمه‌ها و گودزره در منطقه مورد مطالعه است. ارزش هر پیکسل این لایه اطلاعاتی بیانگر درصد حضور آب در آن پیکسل در طی بازه زمانی ۱۹۸۴ تا سال ۲۰۲۰ است. به عبارت دیگر، ارزش ۱۰۰ درصد به معنای پیکسل‌هایی است که در طول این دوره همواره آب وجود داشته است. همانگونه‌که



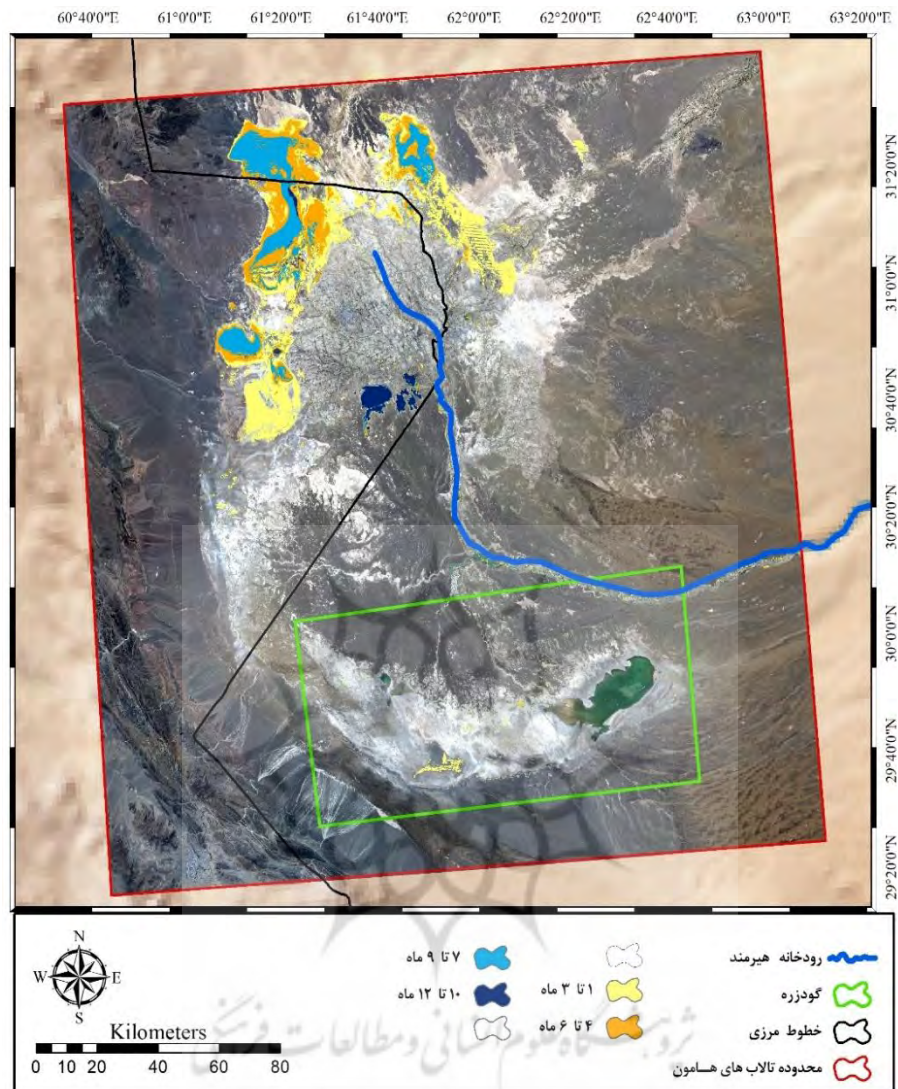
شکل ۶: درصد حضور آب در طی دوره زمانی سال‌های ۱۹۸۴ تا ۲۰۲۰ در تالاب‌ها

تهیه و ترسیم: نگارنده، ۱۴۰۱

ماه در قسمت مرکزی آن آب جاری بوده است. در حالی که در چاه‌نیمه‌های سیستان آب همواره وجود داشته است. در تالاب‌های هامون نیز با توجه به میزان ورودی آب، بین ۲ تا ۱۰ ماه به‌طور متوسط در طی دوره مورد بررسی آب جاری بوده است. مناطق مرکزی تالاب‌های هامون (به‌ویژه هامون صابری) که عمق بیشتری نیز دارند، به‌طور متوسط بیش از ۷ ماه در هر سال، آب جاری بوده است.

شکل ۷ بیانگر میانگین تعداد ماه‌های حضور آب در منطقه مورد مطالعه در طی دوره مورد بررسی است. ارزش پیکسل این لایه بیانگر تعداد ماه‌هایی است که در طول سال‌های ۱۹۸۴ تا ۲۰۲۰، آب در آن پیکسل وجود داشته است. ارزش ۱۲ به معنای مناطقی است که در همه ۱۲ ماه سال، آب در آن مناطق وجود داشته است. همانگونه که مشاهده می‌شود، در منطقه گودزره به‌طور متوسط حداکثر دو





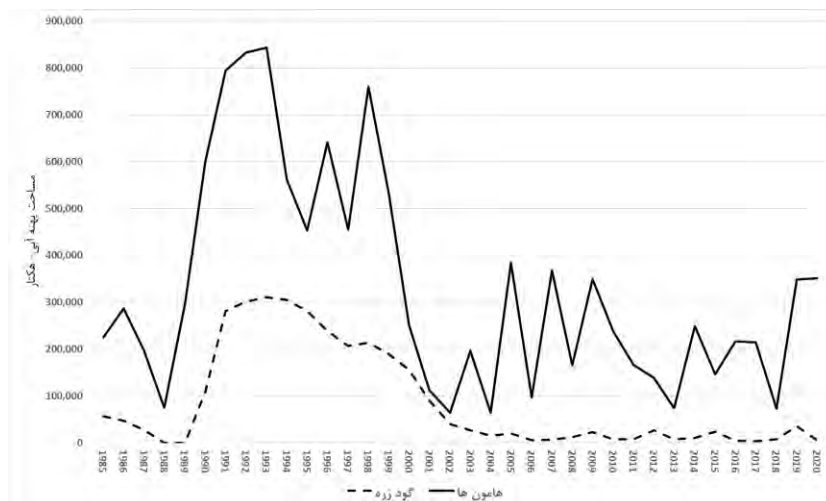
شکل ۷: میانگین تعداد ماه‌های حضور آب در تالاب‌های منطقه مورد مطالعه در بازه زمانی سال‌های ۱۹۸۴ تا ۲۰۲۰

تهیه و ترسیم: نگارنده، ۱۴۰۱

به ایران از رودخانه هیرمند، پهنه آبی گودزره تقریباً به طور کامل خشک بوده است و تنها در سال ۲۰۱۹ حداکثر در ۳۵۰۰۰ هکتار از این اراضی گودزره به صورت موقت آب جاری بوده است.

در شکل ۸، مقایسه روند تغییرات مساحت کل آبیگری هامون‌های پوزک، صابری و هیرمند با مساحت پهنه آبی گودزره را نشان می‌دهد. از سال ۲۰۰۰ به بعد، به دلیل خشکسالی‌های ممتد و کاهش آب ورودی



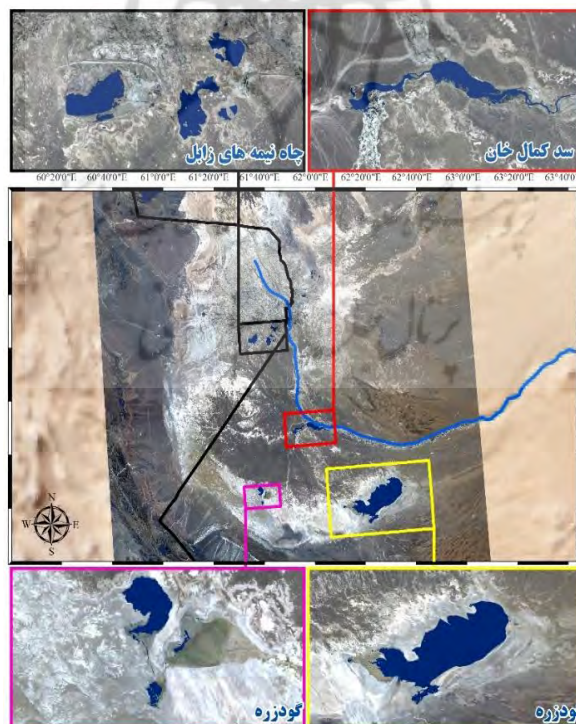


شکل ۸: مقایسه روند تغییرات مساحت پهنه‌های آبی در منطقه مورد مطالعه و گودزرها (مساحت پهنه آبی کل منطقه، دربرگیرنده مساحت پهنه آبی گودزرها نیز است).

تهیه و ترسیم: نگارنده، ۱۴۰۱

مورد مطالعه چهار محدوده آبیگیری شده است که عبارت‌اند از: چاه‌نیمه‌ها، سد کمال‌خان در افغانستان، غرب گودزرها و شرق گودزرها. آنچه واضح است، عدم آبیگیری هامون‌ها و خشکیدگی کامل آن‌ها است.

شکل ۹ نتایج حاصل از تعیین محدوده‌های آبیگیری شده در منطقه مورد مطالعه در شهریور سال ۱۴۰۱ مستخرج از شاخص AWEI با استفاده از تصاویر سنتینل را نشان می‌دهد. در این زمان، در کل منطقه



شکل ۹: محدوده‌های آبیگیری شده در شهریور ۱۴۰۱ مستخرج از شاخص AWEI تصاویر سنتینل

تهیه و ترسیم: نگارنده، ۱۴۰۱

متوسط در طی دوره مورد بررسی آب جاری بوده است. همچنین، مقایسه روند تغییرات مساحت کل آبیگری هامون‌های پوزک، صابری و هیرمند با مساحت پهنه آبی گودزره نشان می‌دهد که از سال ۲۰۰۰ به بعد، به دلیل خشکسالی‌های ممتد و کاهش آب ورودی به ایران از رودخانه هیرمند، پهنه آبی گودزره تقریباً به‌طور کامل خشک بوده است و منابع آب محدودی که وارد ایران می‌شده، صرفاً باعث آبیگری چاه‌نیمه‌ها و بخش‌هایی از هامون‌ها در ایران شده است و آب کافی برای ادامه مسیر طبیعی رودخانه و رسیدن به گودزره وجود نداشته است.

عوامل مؤثر بر تغییرات سطح پهنه‌های آبی در منطقه سیستان را می‌توان به دو دسته عوامل طبیعی و انسانی تقسیم‌بندی کرد. برای بررسی عوامل طبیعی، از داده‌های هواشناسی بارش، دما، تبخیر و محصول ماهواره‌ای شاخص خشکسالی پالمر استفاده شد. نتایج بررسی روند تغییرات پارامترهای اقلیمی، نشان‌دهنده کاهش معنی‌دار روند بارندگی و افزایش معنی‌دار روند دمای حداقل، دمای حداکثر، دمای میانگین و شاخص خشکسالی پالمر در این منطقه است. بررسی روند تغییرات آبی اقلیمی نیز که توسط کرمی و همکاران (۱۴۰۱: ۱۰۷) انجام شده، بیانگر افزایش میانگین فصلی و سالانه دماهای کمینه و بیشینه در سناریوهای مختلف در دوره‌های آبی تا سال ۲۰۸۰ است. نتایج شبیه‌سازی پارامتر بارش در منطقه سیستان نیز حاکی از افزایش بارندگی در فصل‌های تابستان، بهار و پاییز و کاهش آن در فصل زمستان است که این مسئله در نهایت به کاهش ذخیره آب و نیز وقوع سیلاب در بهار و پاییز می‌شود (کرمی و همکاران، ۱۴۰۱: ۱۰۷).

نتایج مطالعه خسروی و همکاران (۱۳۹۴: ۱۹۷) نیز نشان‌دهنده کاهش بارش در فصل پاییز، افزایش بارش در فصل بهار و عدم تغییر بارش در فصول زمستان و تابستان در آینده در ایستگاه زابل است. دمای کمینه

جدول ۵ مساحت پیکره‌های آبی واقع در منطقه مورد مطالعه در شهریور ۱۴۰۱ را نشان می‌دهد. مساحت آب جریان‌یافته در منطقه گودزره شرقی و غربی معادل ۳۴/۰۵۱ هکتار، مساحت آب پشت سد کمال‌خان معادل ۲۸۹۹ هکتار و مساحت آب ذخیره‌شده در چاه‌نیمه‌های سیستان معادل ۳۷۴۷ هکتار است.

جدول ۵: مساحت پیکره‌های آبی واقع در

منطقه مورد مطالعه در شهریور ۱۴۰۱

نام محدوده	مساحت پیکره آبی (هکتار)
گودزره- شرق	۳۲۷۶۹
گودزره- غرب	۱۲۸۲
سد کمال‌خان	۲۸۹۹
چاه‌نیمه‌ها	۳۷۴۷

مأخذ: محاسبات نگارنده، ۱۴۰۱

#### بحث

نتایج بررسی روند تغییرات مساحت پهنه‌های آبی منطقه سیستان با استفاده از سری زمانی سالانه پهنه‌های آبی دائمی و فصلی مستخرج از تصاویر ماهواره‌ای در منطقه مورد مطالعه نشان داد که متوسط سالانه مساحت پیکره‌های آبی دائمی در طول دوره مورد بررسی به‌صورت معنی‌داری کاهش یافته است. به‌عبارت‌دیگر، با گذشت زمان و کاهش منابع آب ورودی به دشت سیستان، پهنه‌هایی که در گذشته در طول سال همواره دارای آب بوده و دائمی محسوب می‌شدند، به پهنه‌های آبی فصلی تبدیل شده‌اند. نتایج لایه اطلاعاتی درصد حضور آب (شکل ۵) و تعداد ماه‌های حضور آب (شکل ۶) نشان می‌دهد که در طی بازه زمانی سال‌های ۱۹۸۵ تا ۲۰۲۰، در بخش عمده‌ای از گودزره، تنها ۲۰ درصد مواقع و به‌طور میانگین کمتر از ۲ ماه در بازه زمانی ۱۹۸۵ تا ۲۰۲۰، آب جاری شده است. در حالی که در چاه‌نیمه‌های سیستان، آب همواره وجود داشته است. در تالاب‌های هامون نیز با توجه به میزان ورودی آب، در هر نقطه، بین ۲ تا ۱۰ ماه به‌طور

۱۹۷۷ تا ۲۰۱۴ از ۲۹۲ کیلومتر مربع به ۶۲۴ کیلومتر مربع همخوانی دارد. علاوه بر این، ملکی و همکاران نیز در سال ۲۰۱۹ در مطالعه خود که بر کل حوضه آبریز هیرمند با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست انجام شد، به این نتیجه رسیدند که مساحت اراضی کشاورزی از ۴۳۴/۷۰۴ کیلومتر مربع در سال ۱۹۷۷ به ۸۶۸/۴۲۰ کیلومتر در سال ۲۰۱۴ افزایش یافته است (Maleki et al, 2019).

نتایج بررسی حاجی حسینی و همکاران (۱۳۹۲: ۱۲) نیز در خصوص تغییرات کاربری اراضی پایین دست سد کجکی در افغانستان نشان می‌دهد که مجموع کل کشت محصولات آبی در این منطقه، حدود ۶۲ درصد افزایش یافته، به طوری که مقدار آن از میزان ۱۰۳ هزار هکتار در سال ۱۹۹۰، به حدود ۱۲۲ هزار هکتار در سال ۲۰۰۱ و به حدود ۱۶۷ هزار هکتار در سال ۲۰۱۱ رسیده است؛ بنابراین، با استناد به مطالعات گذشته، آمارنامه کشاورزی و همچنین نتایج تغییرات شاخص پوشش گیاهی محاسبه شده در این پژوهش می‌توان نتیجه گرفت که افزایش سطح زیرکشت محصولات کشاورزی یکی از دلایل کاهش رواناب ورودی از رودخانه هیرمند به ایران است.

بخش دوم مربوط به اقدامات سازه‌ای افغانستان نظیر احداث سدها و بندهای انحرافی متعدد در بالادست و مسیر رودخانه هیرمند است که مهم‌ترین آن‌ها سد کجکی و ارغنداب در بالادست حوضه و سد کمال‌خان در نزدیکی مرز ایران است. اگرچه بهره‌برداری از سدهای کجکی و ارغنداب تا حدی باعث کاهش جریان ورودی آب هیرمند به ایران شد؛ اما از سال ۲۰۲۰ به بعد و پس از بهره‌برداری کامل از بند انحرافی کمال‌خان، مسیر طبیعی جریان آب رودخانه هیرمند به سمت گودزره منحرف شده، به نحوی که مانع آبیگری هامون‌ها و باعث آبیگری مناطقی از گودزره شده که در طی ۴۰ سال گذشته کمتر از ۲۰ درصد مواقع آب به آن منطقه می‌رسیده است. بررسی مساحت پیکره‌های آبی در

در فصول زمستان و بهار کاهشی و در فصول پاییز و تابستان افزایشی خواهد بود؛ بنابراین، مجموعه یافته‌های حاصل از این پژوهش و سایر تحقیقات، بیانگر کاهش منابع آب در دشت سیستان است. از طرفی افزایش جمعیت و به تبع آن افزایش تقاضا برای مصرف آب نیز باعث کاهش سرانه آب در دسترس در منطقه خواهد شد. عوامل انسانی مؤثر بر کاهش منابع آب ورودی به پهنه‌های آبی منطقه سیستان را می‌توان به دو بخش تقسیم‌بندی کرد:

۱) بخش اول مربوط به توسعه کمی اراضی کشاورزی در بالادست حوضه هیرمند توسط افغانستان و همچنین توسعه اراضی کشاورزی در منطقه سیستان است. نتایج بررسی روند تغییرات شاخص پوشش گیاهی NDVI در بازه زمانی بین سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰ نشان‌دهنده افزایش معنی‌دار این شاخص است. مطابق با سالنامه آماری استان سیستان و بلوچستان در سال ۲۰۰۰ (۱۳۷۹)، سطح زیر کشت کل اراضی کشاورزی در منطقه سیستان معادل ۷۵/۵۰۰ هکتار بوده است که این مقدار در آخرین سالنامه آماری موجود مربوط به سال ۱۳۹۹ معادل ۸۹/۷۴۱ هکتار است<sup>۱</sup>. این افزایش سطح زیرکشت، ناشی از توسعه کمی اراضی زیر کشت کشاورزی در این منطقه است که در قالب برنامه‌های توسعه کشور و بهره‌برداری بهینه از منابع آب‌های مرزی، چندین هزار هکتار از اراضی منطقه در قالب طرح توسعه کشاورزی ۴۶ هزار هکتاری برای کشت محصولات مختلف بهره‌برداری شده است (سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی استان سیستان و بلوچستان، ۱۴۰۰).

نتایج این پژوهش مبنی بر افزایش شاخص پوشش گیاهی با یافته‌های مطالعه شاکریاری و همکاران (۱۳۹۵: ۱۳) که نشان‌دهنده افزایش مساحت پوشش گیاهی در محدوده تالاب‌های هامون در بازه زمانی

۱. آمار دریافت شده از سالنامه آماری مرکز آمار ایران به آدرس [https://mnt.sci.org.ir/sites/Apps/yearbook/Lists/year\\_book\\_re/q/Item/newifs.aspx](https://mnt.sci.org.ir/sites/Apps/yearbook/Lists/year_book_re/q/Item/newifs.aspx)

محیطزیست منطقه، شرایط زیست مردم را دچار مشکل ساخته و زمینه‌ساز مهاجرت از این منطقه و تخلیه مناطق مرزی کشور شده است. نتایج و یافته‌های حاصل از این پژوهش نشان می‌دهد پارامترهای دمای حداقل، دمای حداکثر، دمای میانگین، بارش، مساحت پهنه‌های آبی و شاخص خشکسالی پالمر دارای روندی کاهشی معنی‌دار در طی دوره مورد بررسی بوده‌اند. از طرفی تغییرات شاخص NDVI روندی افزایشی معنی‌دار را نشان داد که ناشی از توسعه کمی اراضی زیر کشت کشاورزی در دشت سیستان است. فعالیت‌های کشور افغانستان در بالادست حوضه آبریز هیرمند نیز بر منابع آب ورودی این رودخانه به ایران تأثیرگذار است. نتایج حاصل از شاخص AWEI نشان داد پس از بهره‌برداری کامل از بند انحرافی کمال‌خان، مسیر طبیعی جریان آب رودخانه هیرمند به سمت گودزره منحرف شده، به‌نحوی که مانع از ورود آب به خاک ایران و باعث آبیگری شوره‌زار گودزره شده است.

شهریور ۱۴۰۱ با استفاده از شاخص AWEI و تصاویر سنتینل ۲ نشان داد که مساحت آب جریان‌یافته در گودزره بیش از ۳۴ هزار هکتار و مساحت آب پشت سد کمال‌خان معادل ۲۸۹۹ هکتار است؛ درحالی‌که مساحت آب ذخیره‌شده در مجموعه چاه‌نیمه‌ها معادل ۳۷۴۷ هکتار است که مؤید تأثیر بهره‌برداری سد کمال‌خان بر جریان طبیعی رودخانه هیرمند است.

### نتیجه

منطقه سیستان یکی از مناطق مهم و استراتژیک کشور از نظر اقتصادی، اجتماعی، امنیتی و محیط‌زیستی محسوب می‌شود که حیات آن وابسته به برقراری پایدار جریان آب رودخانه هیرمند است. معیشت مردم این منطقه عمدتاً وابسته به محصولات کشاورزی و دامپروری است که در سال‌های اخیر به دلیل کاهش محسوس آب ورودی به کشور از طریق رودخانه هیرمند، با مشکلاتی مواجه شده است. کاهش منابع آب ورودی، ضمن خشکیدگی تالاب‌های هامون و آسیب به

### منابع

- ابراهیمی‌خوسفی، محسن؛ فرزام پوراصغر سگنجین (۱۳۹۷). بررسی تأثیرات برنامه‌های تنظیم آب کشورهای همسایه در حوضه‌های مشترک مرزی بر ایران، مرکز پژوهش‌های توسعه و آینده‌نگری سازمان برنامه و بودجه کشور. گزارش پژوهشی. <https://waterhouse.ir/news/1464>
- اصغری، صادق؛ مهدی نادریان‌فر (۱۳۹۴). آسیب‌پذیری سکونتگاه‌های روستایی از ماسه‌های روان بستر خشک تالاب بین‌المللی هامون در شهرستان هیرمند، نشریه تحلیل فضایی مخاطرات محیطی. سال دوم، شماره ۱. صفحات ۳۰-۱۷. <https://www.sid.ir/paper/264770/fa>
- امیدوار، کمال؛ حسین سالاری (۱۳۹۲). مطالعه روند تغییرات گرما و بارش در غرب و شمال غرب ایران با استفاده از روش‌های پارامتری و ناپارامتری، جغرافیا. دوره یازدهم. شماره سی و هفتم. صفحات ۲۸۸-۲۷۱. <https://www.sid.ir/paper/150411/fa>
- ایمانی، رسول؛ رضا قضاوی؛ ابادر اسماعیلی اوری (۱۴۰۰). بررسی روند، تجزیه و تحلیل، مدل‌سازی و پیش‌بینی بارش ماهانه با استفاده از مدل‌های تصادفی (مطالعه موردی: ایستگاه اردبیل)، مطالعات جغرافیایی مناطق خشک. دوره یازدهم. شماره ۴۴. صفحات ۹۸-۸۴.



حاجی حسینی، محمدرضا؛ حمیدرضا حاجی حسینی؛ مهران شایگان؛ سعید مرید؛ جبار وطن فدا؛ علیرضا نجفی (۱۳۹۲). بررسی تغییرات کاربری اراضی پایین دست سد کجکی حوضه هیرمند افغانستان با استفاده از طبقه‌بندی‌کننده بیشترین شباهت، درخت تصمیم‌گیری و ماشین‌های بردار پشتیبان، مجله سنجش‌ازدور و GIS ایران. سال پنجم. شماره چهارم. زمستان ۱۳۹۲. صفحات ۸۷-۶۹.

[https://gisj.sbu.ac.ir/article\\_95234.html](https://gisj.sbu.ac.ir/article_95234.html)

حجازی‌زاده، زهرا؛ محمدحسین ناصرزاده؛ داریوش حاتمی‌زننه؛ محمد رضایی (۱۳۹۳). کاربرد روش‌های آماری و نمایه‌های خشکسالی در تحلیل نوسانات بارش مطالعه موردی: ایستگاه کرمان، مطالعات جغرافیایی مناطق خشک. دوره پنجم. شماره هفدهم. صفحات ۵۱-۳۵.

<http://journals.hsu.ac.ir/jarhs/article-1-249-fa.html>

خسروی، محمود؛ تقی طاوسی؛ اکبر زهرایی (۱۳۹۴). شبیه‌سازی تغییرات آب و هوایی استان سیستان و بلوچستان با استفاده از ریزگردانی داده‌های مدل گردش عمومی جو (GCM) برای دوره آب و هوای ۲۰۴۰-۲۰۰۹، سال ۳۰. شماره سوم. پاییز ۱۳۹۴. شماره پیاپی ۱۱۸. صفحات ۲۰۶-۱۸۵.

[https://journals.ui.ac.ir/article\\_18130.html](https://journals.ui.ac.ir/article_18130.html)

رحیمی، محمد؛ کامیار شکوهی‌رازی؛ علی‌اصغر ذوالفقاری (۱۳۹۹). بررسی روند متغیرهای آب و هواشناختی حوضه هیرمند و تأثیر آن بر تخریب زمین در دشت سیستان، مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک. دوره ۲۷. شماره ۳. صفحات ۲۲۸-۲۱۳.

[https://jwsc.gau.ac.ir/article\\_5143.html](https://jwsc.gau.ac.ir/article_5143.html)

رودری، آرتمیس؛ فرزاد حسن‌پور؛ مصطفی یعقوب‌زاده؛ حمید دلاور (۱۳۹۸). بررسی رابطه خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژی در دشت سیستان، فصلنامه علوم و تکنولوژی محیط‌زیست. دوره ۲۱. شماره ۶. پیاپی ۸۵. صفحات ۴۴-۳۳.

[https://jest.srbiau.ac.ir/article\\_12146.html](https://jest.srbiau.ac.ir/article_12146.html)

سازمان حفاظت محیط‌زیست (۱۳۹۴). طرح حفاظت از تالاب‌های ایران - برنامه مدیریت جامع تالاب‌های بین‌المللی هامون. <http://www.wetlandsproject.ir/publications/books/detail/Hamoun-International-Wetlands-Management-Plan-1006/view/>

سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی استان سیستان و بلوچستان (۱۴۰۰). سند توسعه و آمایش شهرستان‌های استان سیستان و بلوچستان - شهرستان زابل، طرح پژوهشی.

سرگزی، زهره (۱۴۰۰). کارکردهای اقتصادی و اجتماعی دریاچه هامون در زندگی مردم سیستان، فصلنامه مطالعات کاربردی در علوم اجتماعی و جامعه‌شناسی. سال چهارم. شماره ۲. پیاپی ۱۵. صفحات ۵۰-۴۳.

<http://shij.ir/asscs/post.aspx?id=709>

سلیقه، محمد (۱۳۸۹). اثر تغییرات سطح دریاچه هامون بر اقلیم محلی سیستان، مجموعه مقالات چهارمین کنگره بین‌المللی جغرافیدانان جهان اسلام. زاهدان

<https://civilica.com/doc/82832/>

شاکریاری، مجتبی؛ امیرهوشنگ احسانی؛ تورج نصرآبادی؛ پیمان محمودی (۱۳۹۵). بررسی قابلیت داده‌های سنجنده لندست به‌منظور بررسی تغییرات پوشش اراضی (مطالعه موردی: تالاب بین‌المللی هامون)، نشریه مهندسی اکوسیستم بیابان. دوره پنجم. شماره ۱۰. صفحات ۸۴-۶۹.

<https://deej.kashanu.ac.ir/article-1-316-fa.html>

شریفی‌کیا، محمد (۱۳۸۹). پایش تغییرهای تراز آبی در دریاچه هامون، مبتنی بر تحلیل سری زمانی تصاویر سنجنش‌ازدوری، برنامه‌ریزی و آمایش فضا. دوره ۱۴. شماره ۳. صفحات ۱۷۶-۱۵۵.

<https://hsm.sp.modares.ac.ir/article-21-6406-fa.html>

فیروزی، فاطمه؛ نورالله نیک‌پور؛ زینب رخشانی؛ حمیدرضا غفاریان مالمیری؛ پیمان محمودی (۱۳۹۹). پایش روند تغییرات تپه‌های ماسه‌ای با رویکرد سنجش‌ازدور (مطالعه موردی: دشت سیستان)، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی. دوره نهم. شماره ۳. صفحات ۲۵۵-۲۳۹.

[http://www.geomorphologyjournal.ir/article\\_122228.html](http://www.geomorphologyjournal.ir/article_122228.html)

قربانی، خلیل؛ صدیقه برارخان‌پور؛ اسماعیل ولیزاده؛ عبدالجبار ملاراضی (۱۳۹۹). تحلیل منطقه‌ای روند و نقطه شکست در سری‌های فصلی شاخص خشکسالی SPEI در ایران، نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک. دوره بیست و هفتم. شماره چهارم. صفحات ۲۰۰-۱۸۵.

[https://jwsc.gau.ac.ir/article\\_5218.html](https://jwsc.gau.ac.ir/article_5218.html)

کرمی، رقیه؛ حسن رضایی؛ عبدالرسول سلمان ماهینی؛ خلیل قربانی نصرآبادی (۱۴۰۱). ارزیابی تغییرات اقلیمی در حوضه تالاب بین‌المللی هامون با استفاده از مدل LARS-WG6، دوره یازدهم. شماره ۳۱. صفحات ۱۲۲-۱۰۷.

[https://journals.usb.ac.ir/article\\_5948.html](https://journals.usb.ac.ir/article_5948.html)

مجلس شورا (۱۳۵۱). قانون معاهده راجع به آب رود هیرمند بین دولت شاهنشاهی ایران و دولت افغانستان، قانون مصوب تاریخ ۱۳۵۲/۰۵/۱۰.

<https://rc.majlis.ir/fa/law/show/95041>

مرکز آمار ایران (۱۳۹۹). سامانه سالنامه آماری. سالنامه آماری استان سیستان و بلوچستان.

[https://nnt.sci.org.ir/sites/Apps/yearbook/Lists/year\\_book\\_req/Item/newifs.aspx](https://nnt.sci.org.ir/sites/Apps/yearbook/Lists/year_book_req/Item/newifs.aspx)

مرکز پژوهش‌های مجلس شورای اسلامی (۱۳۸۳). منابع آب دشت سیستان، دفتر مطالعات زیربنایی و مطالعات حقوقی. کد موضوعی ۴۱۰. شماره مسلسل ۷۳۰۲.

<https://rc.majlis.ir/fa/report/show/734820>

مزیدی، احمد؛ حسن بهال‌الدین بیگی (۱۴۰۰). مطالعه روند دما، بارش و سرعت باد در مناطق شمالی و غربی استان کرمان با استفاده از آزمون‌های پارامتری و ناپارامتری، جغرافیا و روابط انسانی. دوره چهارم. شماره چهارده. صفحات ۲۵۴-۲۴۶.

<https://www.magiran.com/paper/2362495>

ملکی، سعیده؛ وحید راهداری؛ نیکلاس بغدادی؛ احمد پهلوانزوی (۱۳۹۹). استفاده از داده‌های رادار دهانه مصنوعی سنتینل-۱ به منظور مطالعه اکوسیستم‌های آبی، تحقیقات منابع آب ایران. دوره ۱۶. شماره ۲. شهریور ۱۳۹۹. صفحات ۲۷۰-۲۵۹.

[http://www.iwrr.ir/article\\_113051.html](http://www.iwrr.ir/article_113051.html)

## References

- Afzali, R., Kamran Dastjerdi, H., Zibasaz Khoshmanzareh, S., Zaki, Y., & Yazdanpanah Dero, Q (2022). Monitoring of water resources and vegetation in the Helmand Basin using satellite image time-series and border hydro-political challenges. *Water Policy* 1246-1223,24.  
<https://doi.org/10.2166/wp.2022.280>
- Chambers, D.P (2006). Evaluation of new GRACE time-variable gravity data over the ocean. *Geophysical Research Letters*, 33.  
<https://doi.org/10.1029/2006GL027296>
- Dalin, C., Wada, Y., Kastner, T., & Puma, M.J (2017). Groundwater depletion embedded in international food trade. *Nature*, 543, 700-704.  
 DOI: 10.1038/nature21403
- Deoli, V., & Kumar, D (2020). Analysis of groundwater fluctuation using GRACE satellite data. *Indian Journal of Ecology*, 47, 299-302.  
<https://doi.org/10.3390/w15020282>
- Didan, K (2015). MODIS/Terra Vegetation Indices 16-Day L3 Global 500m SIN Grid V061 [Data set]. NASA EOSDIS Land Processes DAAC. In.  
<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/missions-and-measurements/products/MOD13A1>

- Feyisa, G.L., Meilby, H., Fensholt, R., & Proud, S.R (2014). Automated Water Extraction Index: A new technique for surface water mapping using Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment*, 140, 23-35. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.08.029>
- Kendall, M (1975). Rank correlation measures, Vol. 202. Charles Griffin, London, 15
- Landerer, F.W., & Swenson, S (2012). Accuracy of scaled GRACE terrestrial water storage estimates. *Water resources research*, 48. <https://doi.org/10.1029/2011WR011453>
- Lettenmaier, D.P., Alsdorf, D., Dozier, J., Huffman, G.J., Pan, M., & Wood, E.F (2015). Inroads of remote sensing into hydrologic science during the WRR era. *Water resources research*, 51, 7309-7342. <https://doi.org/10.1002/2015WR017616>
- Maleki, S., Koupaei, S.S., Soffianian, A., Saatchi, S., Pourmanafi, S., & Rahdari, V (2019). Human and climate effects on the Hamoun wetlands. *Weather, Climate, and Society*, 11, 609-622. DOI: [10.1175/WCAS-D-18-0070.1](https://doi.org/10.1175/WCAS-D-18-0070.1)
- Mann, H.B (1945). Nonparametric tests against trend. *Econometrica: Journal of the econometric society*, 245-259.
- McCabe, M.F., Rodell, M., Alsdorf, D.E., Miralles, D.G., Uijlenhoet, R., Wagner, W., Lucieer, A., Houborg, R., Verhoest, N.E., & Franz, T.E (2017). The future of Earth observation in hydrology. *Hydrology and earth system sciences*, 21, 3879-3914. doi: [10.5194/hess-21-3879-2017](https://doi.org/10.5194/hess-21-3879-2017)
- Moiwo, J.P., Yang, Y., Li, H., Han, S., & Hu, Y (2009). Comparison of GRACE with in situ hydrological measurement data shows storage depletion in Hai River basin, Northern China. *Water Sa*, 35, 663-670. DOI: [10.4314/wsa.v35i5.49192](https://doi.org/10.4314/wsa.v35i5.49192)
- Najafi, A., & Vatanfada, J (2011). Environmental challenges in trans-boundary waters, case study: Hamoon Hirmand Wetland (Iran and Afghanistan) *International Journal of Water Resources and Arid Environments*, 1, 16-24. [https://www.psipw.org/attachments/article/300/IJWRAE\\_1\(1\)16-24.pdf](https://www.psipw.org/attachments/article/300/IJWRAE_1(1)16-24.pdf)
- Pekel, J.-F., Cottam, A., Gorelick, N., & Belward, A.S (2016). High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. *Nature*, 540, 418-422. <https://doi.org/10.1038/nature20584>
- Salmi, T (2002). Detecting trends of annual values of atmospheric pollutants by the Mann-Kendall test and Sen's slope estimates-the Excel template application MAKESENS. *Ilmatieteen laitos*, 1-35. <https://www.scienceopen.com/document?vid=3d345849-152c-4d63-8c1a-c3159fa3563d>
- Srivastava, A., & Saran, S (2017). Comprehensive study on AOD trends over the Indian subcontinent: a statistical approach. *International Journal of Remote Sensing*, 38, 5127-5149. <https://doi.org/10.1080/01431161.2017.1323284>
- Swenson, S (2012). GRACE monthly land water mass grids NETCDF RELEASE 5.0. Ver. 5.0. PO. DAAC. [https://podaac.jpl.nasa.gov/dataset/TELLUS\\_LAND\\_NC\\_RL05](https://podaac.jpl.nasa.gov/dataset/TELLUS_LAND_NC_RL05)
- Tamiminia, H., Salehi, B., Mahdianpari, M., Quackenbush, L., Adeli, S., & Brisco, B (2020). Google Earth Engine for geo-big data applications: A meta-analysis and systematic review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 164, 152-170. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2020.04.001>
- United Nations Environment Programme (2006). History of environmental change in the Sistan Basin: Based on satellite image analysis: 1976-2005. <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/7690>
- UNEP-DHI, U (2016). Transboundary river basins: Status and trends. Nairobi, Kenya. <https://www.unepdhi.org/transboundary-river-basins/>
- Van Dijk, A., & Renzullo, L.J (2011). Water resource monitoring systems and the role of satellite observations. *Hydrology and earth system sciences*, 15, 39-55. <https://hess.copernicus.org/articles/15/39/2011/>
- Vicente-Serrano, S.M., Beguería, S., & López-Moreno, J.I (2010). A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of climate*, 23, 1696-1718. <https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1>
- Zhang, Y., Pan, M., & Wood, E.F (2016). On creating global gridded terrestrial water budget estimates from satellite remote sensing. *Remote sensing and water resources (59-78)*: Springer. DOI: [10.1007/978-3-319-32449-4\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-319-32449-4_4)