



University of  
Sistan and Baluchestan



Association of Geography  
and Planning  
of Border Areas of Iran

## Detecting Morphological Changes in Hirmand River from Roodbar Afghanistan to Hamoon Sistan

Samad Fotoohi<sup>1</sup>✉, Hossein Negaresh<sup>2</sup>, Narges Hatami Hadad<sup>3</sup>

1. Associate Professor Department of Physical Geography, Faculty of Geography and Environmental Planning, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran.

✉ E-mail: fotohi@gep.usb.ac.ir

2. Professor Department of Physical Geography, Faculty of Geography and Environmental Planning, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran.

E-mail: H\_negaresh@gep.usb.ac.ir

3. M.Sc. Student, Department of Physical Geography, Faculty of Geography and Environmental Planning, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran.

E-mail: n.hatami2410@gmail.com



**How to Cite:** Fotoohi, S; Negaresh, H & Hatami Hadad, N. (2022). Detecting Morphological Changes in Hirmand River from Roodbar Afghanistan to Hamoon Sistan. *Geography and Territorial Spatial Arrangement*, 12 (44), 117-122.

**DOI:** <http://dx.doi.org/10.22111/GAII.2022.34681.2786>

### Article type:

Research Article

### Received:

17/12/2021

### Received in revised form:

13/04/2022

### Accepted:

11/07/2022

### Publisher online:

21/09/2022

### ABSTRACT

Natural rivers are constantly changing in terms of dimensions, shape, direction and patterns under the influence of various factors and variables, and the diversion of rivers is always studied. Features such as river flow trends, network route changes, river network patterns, and communication can be done using satellite imagery. The purpose of this study is to move Hirmand River from Rudbar Afghanistan to Hamoon Sistan with a length of 275 km using Landsat 5, 7 and 8 time series satellite images from 1988 to 2018. The image was taken and analyzed every 5 years, ie 1988, 1993, 1998, 2003, 2008, 2013, 2015 and 2018. GIS and ENVI softwares are the most important tools used in this research that were used to prepare and extract data. The studied river has geometric parameters such as mean and standard deviation, etc. for curvature coefficient, valley length and wavelength have been calculated. The results of this study showed that as we go from 1988 to 2018, the geometric parameters have had an increasing trend due to the changes in the river, and due to the long path of the river, the transverse changes have been divided into 11 intervals until the results be better and more accurately analyzed. The results also show that the average curvature coefficient in 1988 was 1.5 but in 2018 it reached to 2.5. This increase indicates many changes in the route and bed of the river. The longitudinal changes and the maze of the Hirmand River in the period 1988 to 2018 have changed a lot and the movement of the river has increased.

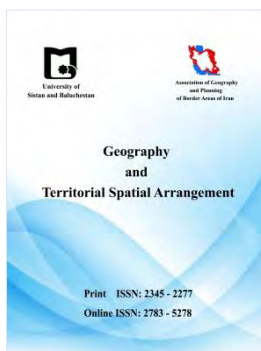
### Keywords:

Rudbar Afghanistan, Hamoon Sistan, morphological changes, Hirmand River.



© the Author(s).

Publisher: University of Sistan and Baluchestan



## Extended Abstract

### Introduction

Rivers are continuously changing ecosystems, and change is a constant feature of rivers, which over time has created different perspectives according to the dominant environment of the river and due to the interrelationship of human loss, its study is inevitable. Changing the direction of rivers and moving them is always associated with problems. Some of these problems are changes in the area of property, the disintegration of waterways, the disappearance of settlements and the deprivation of settlements of river water and the non-use of water facilities. Hirmand River is one of the rivers that has a displacement. This river has had frequent movements in the past. In a way that the path has never been fixed. However, based on the available evidence, such as satellite images, existing reports, and the destruction of settlements, it is possible to trace the movement of the Helmand River bed. The purpose of this study is to study the changes in the Helmand River during the period 1998 to 2018 to understand the morphology and processes that govern it and to investigate its changes and displacements along the route from Afghanistan River to Hamoon in Iran.

### Study Area

The area studied in this research is limited to the length of the Hirmand river on the border with Afghanistan, 30 kilometers long from the point where the river meets the border at the geographical coordinates of 29 degrees 11 minutes and 25 seconds to 31 degrees 54 minutes and 50 seconds north latitude and It is 60 degrees and 55 minutes to 63 degrees and 55 minutes of east longitude.

### Material and Methods

The study area in this study is limited to the longitudinal length of the Hirmand River on the border with Afghanistan with a length of 30 km from the confluence of the river with the border in geographical coordinates 29 degrees 11 minutes and 25 seconds to 31 degrees and 54 minutes and 50 seconds north latitude and 60 Degrees 55 minutes to 63 degrees 55 minutes east longitude. Historical method has been used to study the morphological changes of Hirmand River from Rudbar Afghanistan to Hamoon Sistan. Methods used to study the changes of rivers according to the purpose of three historical methods, experimental model and fundamental model are used. In this research, due to the availability of satellite images in different periods, the historical method has been used. First, Landsat 5, 7 and 8 satellite images were taken at 5-year intervals from the site (<https://earthexplorer.usgs.gov>). Atmospheric and radiometric corrections were then made on these images using ENVI software. Calculations of geomorphological changes have been performed in Auto Cad and ARC GIS software.

### Result and Discussion

The results of this study show that from 1988 to 2018, the longitudinal changes of the river have been increasing. The mazes have been increasing from 1988 to 2018. In 1988, the average curvature coefficient was 1.5, in 2003 it reached 1.9 and finally in 2018 it reached 2.5. The slope of the area. According to the slope map, the slope of the area is between 0.2 and 3.5. The slope of the riverbed is greater than the surrounding area. The conclusion to be drawn from the divisions of the length of the river into different intervals is that the first period has changed relatively little. In this period, most arches are related to 2018 and 2013. During this period, the slope percentage was between 0.2 and 0.3. In the second period, the slope percentage was between 0.2 and 0.35%. To study the transverse changes of Helmand River on satellite images and perform its transverse changes calculations, if the whole river was studied in one interval and its calculations and maps were prepared, due to the small scale of the maps, the transverse changes on it would not be specified. In addition, due to the similarity of the geological formations of the study area and very low slope, the entire length of the river in the study area has the same similarities. Dividing the length of the river into eleven equal intervals has been done simply to facilitate the study and preparation of quality maps to study the transverse changes of the river. In this type of calculation, significant displacement due to floods or displacement due to sudden deposition can be monitored. To monitor very small changes, high-resolution satellite imagery is required, which is difficult to access.

### Conclusion

Rivers are important communication networks of the hydrological cycle. The behavior of this network and how it operates is influenced by various factors. Factors controlling the hydrological behavior of rivers include hydraulic, geological, soil, geomorphological, climatic, vegetation, and physiographic characteristics of the

basins. The results of this study showed that as we go from 1988 to 2018, the geometric parameters have increased due to changes in the river. This increasing trend of geometric parameters and curvature coefficient is due to human and natural changes that have occurred along the river. The average curvature coefficient was 1.5 in 1988 but reached 2.5 in 2018. This increase indicates many changes in the route and bed of the river. In general, it can be concluded that the longitudinal and winding changes of the river in the study area in the period 1988 to 2018 have undergone many changes.

**Key words:** Rudbar Afghanistan, Hamoon Sistan, morphological changes, Hirmand River.

### References (Persian)

- Al-Modaresi, S. A.; Khabazi, M.; Olyaei, A.; Shahbazi, M. (2018). Investigating Effective Factors on Meandering and Changes of Dalaki River Using Remote Sensing and Geographic Information System. *Journal of Geography and Environmental Planning, University of Isfahan, Vol. 29, No. 1, pp. 165-176.*  
DOI :10.22108/GEP.2018.97778.0.
- Arshad, S.; Morid, S.; Mirabolqasemi, H. (2007). Investigating Morphologic Changes of Rivers Using Remote Sensing: A Case Study of Karun River from Gotvand to Farsiat (1990-2003). *Journal of Agriculture and Natural Resources Sciences, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Vol. 14, No. 6, pp. 180-195.*
- Dolati, J. (2008). Investigating Geomorphologic Changes in Middle Part of Atrak River Using GIS. Master's thesis, University of Tehran, Faculty of Geography, p. 287.
- Farrokhi, Z.; Barani, Q. A.; Arshad, S. (2005). Investigating Changes in Dez River Plan Using Remote Sensing and GIS. The 5th Iranian Hydraulic Conference, Shahid Bahonar University, Kerman, pp. 1-9.
- Kayani, A.; Fazelnia, Q.; Rezaei, B. (2012). Investigating and Prioritizing Risks in Natural Environment of Zabol. *Journal of Geography and Environmental Studies, Islamic Azad University of Najafabad, Vol. 1, No. 1, pp. 98-111.*
- Maghsoudi, M.; Sharafi, S.; Maghami, Y. (2010). Changes in Morphologic Pattern of Khorram Abad River Using AutoCad, GIS and RS. *Journal of Spatial Planning (Humanities Faculty), Tarbiat Modares University, Vol. 14, No. 3, pp. 249-275.*
- Mirzaei, M. A. (2007). Overview of Border Rivers with Emphasis on Aras and Hirmand. *Geography Education Growth, Education Department, Vol. 21, No. 4, pp. 20-23.*
- Natural Disasters Research Institute (2019). Flood report on January 10, 2020 in Sistan and Baluchistan Province, p. 10.
- Rajaei, A. (1994). *Applied Geomorphology in Environmental Planning.* Ghoomes Publishing Company, Tehran.
- Rezaei Moghadam, M. H.; Pirouzi Nejad, N. (2014). Investigating Channel Changes and Bank Erosion of Gamasiab River from 1955 to 2010. *Scientific Journal of Geography and Planning, Tabriz University, Vol. 18, No. 47, pp. 109-132.*
- Rokhshani Mehr, H. (2014). Analyzing Role of Climate in Urban Housing: A Case Study of Zabol. Master's thesis in geography and urban planning, supervisor: Akbar Kiyani, Zabol University.
- Sharifikia, M.; Malamiri, N. (2013). Detecting Spatial Changes of Hirmand River and Analyzing Its Morphology. *Journal of Quantitative Geomorphological Research, Iranian Association of Geomorphology, No. 4, pp. 149-160.*
- Tehran Sahab Consulting Engineers. (1992). Optimal Utilization Plan of Hirmand, Report No. 28, Zahedan
- Yamani, M., Sharafi, S. (2012). Geometric Parameters and Their Role in Time-spatial Changes of River Beds: A Case Study of Hor Rood, a Sub-basin of Karkhe River in Kurdistan Province. *Journal of Geography and Development, University of Sistan and Baluchistan, No. 26, pp. 35-48.*  
DOI : 10.22111/gdij.2012.422.

Yamani, M.; Fakhri, S. (2012). Factors Affecting Changes in Pattern of Jagin River in Makran Coastal Plain. *Journal of Geography*, No. 34, pp. 141-158.

Zomorodian, M. J.; Pourkermani, M. (1988). Discussion on Geomorphology of Sistan and Baluchistan Province (2). Special issue of *Zabul water and soil, geographical research quarterly*, Mohammad Hossein Papoli Yazdi, No. 9, third year, pp. 100-122.

### References (English)

Burge, M.L. (2004). Testing links between river patterns and in channel characteristics using MRPP and ANOVA. *Geomorphology*, 63, pp. 115-130.

<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2004.03.010>

Casado, A., Peiry, J., Cambo, A.M., (2016). Geomorphic and vegetation changes in a meandering dryland river regulated by a large dam, Sauce Grand River, Argentina *Geomorphology*, 268, 21-34.

Clerici, A., Perego, S., Chelli, A., Tellini, C., (2015). Morphological changes of the floodplain reach of the Taro River (Northern Italy) in the last two centuries, *Journal of Hydrology*, Volume 527, 1106-1122.

<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.05.063>

Dade, W.B., (2000). Grain size, sediment transport and alluvial channel pattern. *Geomorphology*. Volume 35, issues 1 p. 119-126.

DOI : 10.1016/S0169-555X(00)00030-1

Di Silvio G and Nones M., (2013) Morphodynamic reaction of a schematic river to sediment input changes: Analytical approaches, pp 1-8.

DOI : [10.1016/j.geomorph.2016.05.036](https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.05.036)

Dort, W., Jr., 1978. Channel Migration Investigation, Historic Channel Change Map, Kansas River and Tributaries Bank Stabilization Component, Kansas and Osage Rivers, Kansas Study, U.S. Army Corps of Engineers, Kansas City District. *Hungarian plain" Quaternary science Reviews*. 22. P. 2206.

Eaton BC, Millar, R.G., Davidsons, P., (2014). Channel patterns: braided, a ranching, and single thread. *Geography*. Volume 12, issues 3 p. 353-364. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.04.010>.

Gerasimov, I.P., (1978). Ancient rivers in the deserts of soviet central Asia, in Brice, W.C., ed., *The environmental history of the Near and Middle East*; London, Academic Press, p 319-334.

<https://doi.org/10.1002/esp.3290180705>

Hickin, E.J., (1974). The development of meanders in natural river channels, *American Journal of Science* 274, P 414-442

Huggett, R. G., (2017). *Fundamentals of geomorphology*. Routledge, P. 225-229

Jain, V., Sinha, R. (2005). Response of active tectonics on the alluvial Baghmata River, Himalayan foreland basin, eastern India. *Geomorphology*, Volume 70, issues 3-4, pages 339-359.

<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2005.02.012>

Knighton, A.D., Nanson, G.c., (1993). Anastomosis and the continuum of channel pattern, *Earth surface processes and landforms*, Volume 18, Issue 7, 613-625.

<https://doi.org/10.1002/esp.3290180705>

Leopold, L. B., & Wolman, M. G. (1960). River meanders. *Geological Society of America Bulletin*, 71(6), 769-793.

[https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1960\)71\[769:RM\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1960)71[769:RM]2.0.CO;2)

Miller, G.T., (1990). *Living in the environment: an introduction to environmental science*, 6th ed. Wadsworth Publishing Company, Belmont, California

Minh Hai, D., Umeda, S., Yuhi, M., (2019). Morphological changes of the lower Tedori River, Japan, over 50 Years. *Water* 11, no. 9: 1852.

<https://doi.org/10.3390/w11091852>

Ouchi, S. (1983). Response of active tectonics (New Mexico, California). PhD thesis. Colorado State University.

Pan, S. (2013). Application of Remote Sensing and GIS in studying changing river course in Bankura District, West Bengal. *International journal of Geomatics and Geosciences*, 4, 149-163.

Shum H. W. (1984), River and Related Problems, Symposium on River Meandering -june 1984, Colorado State . University, fort Collins, Colorado.

Ralph, T.J., Hesse, P., (2010). Downstream hydrogeomorphic changes along the Macquarie River, southeastern Australia, leading to channel breakdown and floodplain wetlands. *Geomorphology*. Volume 118, issues 1-2 p. 48-64.

DOI :10.1016/j.geomorph.2009.12.007

Singha, A., Balachandar, R., (2011). Structure of wake of a sharp – edged bluff body in a shallow channel flow. *Journal of Fluids and Structures*. 27 no. 2 233-249.

DOI : 10.1016/j.jfluidstructs.2010.11.001.

Tamura, T., Horaguchi, K., Saito, Y., Van, L.N., Tateishi, M., Thi, K.O.T., Nanayama, F., Watanabe, K. (2010). Monsoon-influenced variations in morphology and sediment of a mesotidal beach on the Mekong River delta coast. *Geomorphology*. 116, no. 1-2. 11-23.

DOI : 10.1016/j.geomorph.2009.10.003.

Truong, SH., Ye, Q, Stive, M.J.F., (2017). Estuarine mangrove squeeze in the Mekong Delta, Vietnam. *Journal of Coastal Research*. 33, no, 4. 747-763.

DOI : 10.2112/JCOASTRES-D-16-00087.1.

Turki, I., Medina, R., Gonzalez, M., Coco, G., (2013). Natural variability of shoreline position: observations at three pocket beaches. *Marine Geology*. 338. 76-89.

DOI : 10.1016/j.margeo.2012.10.007.

Wang, W., Lu, H., Yang, D., Sothea, K., Jiao, Y., Gao, B., Pang, Z., (2016). Modelling hydrologic processes in the Mekong River basin using a distributed model driven by satellite precipitation and rain gauge observation. *PLOS ONE*. 11, no 3: 22-29.

DOI : 10.1371/journal.pone.0152229.

Williams, G.P., Wolman, M.G., (1984). Professional Paper. US Geological Survey; Washington, D.C. Downstream effects of dams on alluvial rivers. Pp1286-1289. 83 pp.

Xiaojun, Y., Damen, M., Zuidam, R.V., Gelder, A.V., Van den Berg, G.H., (1999). Satellite Remote Sensing and Geographic Information System for Monitoring and Morphodynamics of the Active Yellow River Delta. China. 0- 7803 40.

DOI: 10.1109/IGARSS.1996.516948.





## آشکار سازی تغییرات مورفولوژیکی رودخانه هیرمند از رودبار افغانستان تا هامون سیستان

صمد فتوحی<sup>۱\*</sup>، حسین نگارش<sup>۲</sup>، نرگس حاتمی حداد<sup>۳</sup>

### مقاله پژوهشی

جغرافیا و آمایش شهری- منطقه‌ای  
 شماره ۴۴، پاییز ۱۴۰۱  
 تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۹/۲۶  
 تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۰۱/۲۴  
 تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۴/۲۰  
 صفحات: ۱۴۴-۱۲۳



واژه‌های کلیدی:  
 رودبار افغانستان، هامون سیستان،  
 تغییرات ژئومورفولوژی، رودخانه  
 هیرمند.

### چکیده

رودخانه‌های طبیعی تحت تأثیر عوامل و متغیرهای مختلف، پیوسته از نظر ابعاد، شکل، راستا و الگوها در حال تغییرات هستند و تغییر مسیر رودخانه‌ها، همواره مورد مطالعه قرار می‌گیرد. ویژگی‌هایی مثل روند حرکت رودخانه‌ها، تغییرات مسیر شبکه‌ها، الگوها و ارتباط شبکه رودخانه‌ها با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای قابل انجام است. هدف از این پژوهش، جابه‌جایی رودخانه هیرمند از رودبار افغانستان تا هامون سیستان به طول ۲۷۵ کیلومتر با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای سری زمانی لندست ۵ و ۷ از سال ۱۹۸۸ تا ۲۰۱۸ است. به فاصله هر ۵ سال یعنی سال‌های ۱۹۸۸، ۱۹۹۳، ۱۹۹۸، ۲۰۰۳، ۲۰۰۸، ۲۰۱۳، ۲۰۱۸ و ۲۰۱۸ تصویر اخذ شده و مورد آنالیز قرار گرفته است. نرم‌افزار GIS و ENVI از مهم‌ترین ابزارهای مورد استفاده در این پژوهش بوده که در جهت آماده‌سازی و استخراج داده‌ها مورد استفاده قرار گرفتند. رودخانه مورد مطالعه پارامترهای هندسی همچون میانگین و انحراف معیار و... برای ضریب خمیدگی و طول دره و طول موج محاسبه شده است. نتایج این تحقیق نشان داد که هر چه از سال ۱۹۸۸ به سال ۲۰۱۸ می‌رویم، پارامترهای هندسی با توجه به تغییرات رود، روند افزایشی داشته‌اند و به دلیل طولانی‌بودن مسیر رودخانه تغییرات عرضی به ۱۱ بازه تقسیم شده تا نتایج بهتر و دقیق‌تر مورد تحلیل قرار بگیرند. همچنین نتایج بررسی نشان می‌دهد که میانگین ضریب خمیدگی در سال ۱۹۸۸ به مقدار ۱/۵ بوده است؛ اما در سال ۲۰۱۸ به میزان ۲/۵ رسیده است. همین افزایش مبین تغییرات زیاد در مسیر و بستر رود است که تغییرات طولی و پیچ‌وخم رودخانه هیرمند در بازه ۱۹۸۸ تا ۲۰۱۸ تغییرات زیادی داشته و جابه‌جایی رودخانه افزایش پیدا کرده است.

### مقدمه

رودخانه‌ها اکوسیستم‌های پیوسته متغیری هستند و تغییر، صفت همیشگی رودخانه‌هاست که در طول زمان سبب ایجاد چشم‌اندازهای متفاوتی با توجه به محیط مسلط به رودخانه شده و به دلیل ارتباط متقابل با زندگی انسان، بررسی آن را اجتناب‌ناپذیر ساخته است (رجایی، ۱۳۷۳). رودخانه‌ها سیستم‌های کاملاً پویایی هستند که الگوی مورفولوژیک آن‌ها به‌طور پیوسته در طول زمان تغییر می‌کند؛ از این‌رو فرسایش کناری و آسیب‌زدن به تأسیسات ساحلی و جابه‌جایی مرزها را در پی دارند. البته عوامل مختلفی مانند انحراف آبراهه در کناره‌ها، کف‌کنی رود، فعالیت انسانی، اختلاف سازند بستر و سیل‌خیزی باعث تخریب دیواره، کف بستر و تغییر الگوی مجاری می‌شود (یمانی و شرفی، ۱۳۹۱: ۳۶). تغییرات طولانی‌مدت در ویژگی‌های مورفولوژیکی رودخانه‌ها در نتیجه فرایندهای طبیعی متغیر زمانی-مکانی و اختلالات انسانی پیچیده است؛ بنابراین درک بهتر رابطه آن‌ها برای مدیریت حوضه

۱- دانشیار، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، دانشگاه سیستان و بلوچستان (نویسنده مسئول)

۲- استاد، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، دانشگاه سیستان و بلوچستان

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد ژئومورفولوژی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، دانشگاه سیستان و بلوچستان n.hatami2410@gmail.com

رودخانه مهم است (مین های و همکاران<sup>۱</sup>، ۲۰۱۹). مطالعات روی تغییرات مورفولوژیکی رودخانه عمدتاً شامل تغییرات در مقدار آب و بارهای رسوبی، (سینگا و بالاچاندار<sup>۲</sup>، ۲۰۱۱، وانگ و همکاران<sup>۳</sup>، ۲۰۱۶) تغییرات عرضی در کانال‌های رودخانه (تامورا و همکاران<sup>۴</sup>، ۲۰۱۰؛ ترکی و همکاران<sup>۵</sup>، ۲۰۱۳؛ تروونگ ی و استیو<sup>۶</sup>، ۲۰۱۷)، تغییر شکل طولی (ویلیامز و ولمن<sup>۷</sup>، ۱۹۸۴؛ داد<sup>۸</sup>، ۲۰۰۰؛ رالف و هسه<sup>۹</sup>، ۲۰۱۰)، تکامل میکروژئومورفیک کانال‌های رودخانه (ایتون میلار و دیویدسونز<sup>۱۰</sup>، ۲۰۱۴) است. تغییر در مسیر رودخانه‌ها و جابه‌جایی آن‌ها همیشه با مشکلاتی همراه است (رضائی‌مقدم و پیروزی نژاد). تغییر در مساحت املاک، به‌هم‌ریختن حقایقه‌ها، از میان رفتن سکونتگاه‌ها و محروم شدن مراکز سکونتگاهی از آب رودخانه و بدون استفاده ماندن تأسیسات آبی برخی از این مشکلات است. رودخانه هیرمند از جمله رودخانه‌هایی است که دارای جابه‌جایی است. این رودخانه جابه‌جایی مکرری نیز در گذشته داشته‌است. به‌گونه‌ای که هیچ‌گاه مسیر آن ثابت نبوده‌است؛ اما براساس شواهد و مدارک موجود، مانند تصاویر ماهواره‌ای، گزارش‌های موجود و نابودی سکونتگاه‌ها می‌توان مسیر جابه‌جایی بستر رودخانه هیرمند را دنبال کرد. گراسیموف<sup>۱۱</sup> (۱۹۷۸)، به‌نقل از کانلی<sup>۱۲</sup> با اشاره به تغییر مسیری که در رودخانه هیرمند اتفاق افتاده بود، می‌نویسد که هیرمند کانال جریان غربی را ترک کرده و وارد یک کانال فرعی شده‌است. اگرچه ساکنان اطراف مسیر قدیمی سعی کردند هیرمند را به کانال قبلی برگردانند، سیل بعدی تلاش آنان را از بین برد و رودخانه در کانال جدید باقی ماند. بر اثر این تغییر، مراکز سکونتگاهی نیز جابه‌جا شدند و هرج‌ومرج به‌دنبال تغییر کانال اتفاق افتاد. هر تغییری در مسیر این رودخانه باعث جابه‌جایی مراکز سکونتگاهی، حفر کانال‌های جدید برای آبیاری زمین‌های حاشیه مسیر جدید، ساخت کانال‌های جدید در مزارع قبلی، خسارت به کشاورزان، هرج‌ومرج و مسائل حقوقی مالکیت زمین‌های کشاورزی، خسارات ناشی از ساخت روستاهای جدید به‌دنبال دارد. این تغییرات به سبب مرزی‌بودن رودخانه، تغییرات خط مرز و تغییرات اراضی ملی دارای حساسیت زیادی است و مشاجرات مرزی را به‌دنبال دارد. این پژوهش به‌دنبال آن است که به آشکارسازی جابه‌جایی رودخانه هیرمند بپردازد. به‌دلیل اینکه رودخانه مرزی بوده و هرگونه جابه‌جایی آن، مشکلاتی را به‌دنبال خواهد داشت، این پژوهش حائز اهمیت قرار می‌گیرد؛ علاوه‌براین آنگیری مخازن آب چاه‌نیمه‌ها از این رودخانه و تنها منبع آب کشاورزی منطقه زابل است و هرگونه تغییر و جابه‌جایی در مسیر آن با مشکلاتی همراه است.

رودخانه‌ها به تغییرات شیب کانال، تغییر دبی و ذخیره رسوب نیز وابسته هستند. رودخانه‌های دارای مئاندر در دشت سیلابی پیچ‌وتاب می‌خورند. حرکت به‌صورت مستقیم و حرکت به‌صورت مارپیچی به‌طور قراردادی با سینوس ۱/۵ تعریف می‌شود که با تقسیم طول کانال بر طول دره محاسبه می‌شود. جریان آب در یک الگوی مشخص مئاندري حرکت می‌کند. کناره‌های مقعر را فرسایش می‌دهد و در حاشیه محدب رسوب‌گذاری می‌کند و منجر به

1 Minh Hai et al

2 Singha and Balachandar

3 Wang et al

4 Tamura et al

5 Turki et al

6 Truong ye and Stive

7 Williams and Wolman

8 Dade

9 Ralph and Hesse

10 Eaton Millar and Davidsons

11 Gerasimov

12 Conolly



انحراف کانال می‌شود (هوگت<sup>۱</sup>، ۲۰۱۷). مسیر رودخانه‌ها را می‌توان به سه بخش، بالارود، میان‌رود و پایین‌رود تقسیم کرد. بخش بالارود جوان‌ترین بخش رودخانه و پایین‌رود پیرترین بخش یک رودخانه است. بخش پایین‌رود دارای دره‌های پهن، جلگه سیلابی وسیع، فرسایش کناری و شیب کمتری است. در پایین‌رود به دلیل کاهش شیب، انرژی آب کاهش می‌یابد. رسوبات حمل‌شده دانه ریزتر شده رسوب بیشتری جا گذاشته می‌شود؛ به همین دلیل مسیر رودخانه دارای تغییرات عرضی بیشتری است (شکل ۱).



شکل ۱. تغییر شیب و ارتباط آن با تغییرات عرضی و مماندری شدن رودخانه (منبع: میلر<sup>۲</sup>، ۱۹۹۰)

تغییرات کانال رودخانه از طریق زمان و مکان بسیاری از مشکلات مدیریت جغرافیایی و مدیریت رودخانه و... را ایجاد می‌کند. رودخانه‌های مماندری تغییرات مشخصی در موقعیت و جابه‌جایی در میان دشت سیلابی دارد (هیکن<sup>۳</sup>، ۱۹۷۴: ۴۱۴). مهاجرت جانبی به تغییر موقعیت یک کانال رودخانه‌ای به‌عنوان پاسخی به تغییرات تأثیرپذیری جریان و رسوبات اشاره دارد و همواره با فرسایش بستر جریان یا دیواره کانال در شرایط جریان همراه است (شیائوچون و همکاران<sup>۴</sup>، ۱۹۹۹). مطالعه کانال رودخانه‌ها و تغییرات پیچان‌رودها براساس نقشه‌ها و تغییرات تاریخی، ابتدا بر رودخانه کاتراس، و شاخه‌هایش بین سال‌های ۱۸۵۷ تا ۱۸۶۸ و ۱۹۷۶ براساس تحقیقات دورت<sup>۵</sup> (۱۹۷۸) شروع شد. با اختراع عکاسی هوایی در سال ۱۹۲۰ و ۱۹۳۰، مطالعه پلتفرم رودخانه‌ها سرعت گرفت و بسیاری از محققان از این عکس‌ها در جهت طبقه‌بندی فرم پیچان‌رودها استفاده کرده‌اند. لئوپلد و ولمن<sup>۶</sup> (۱۹۶۰) براساس نقشه‌ها و عکس‌های هوایی روابط ژئومتریک مهندسی را ارائه کردند. تغییر مسیر رودخانه‌ها دارای پیشینه تحقیق کاملی است و پژوهشگران خارجی و داخلی با مدل‌های مختلف و بعضاً با ابزارهای گوناگون و نرم‌افزارهای

1 Huggett

2 Miller

3 Hickin

4 Xiaojun et al

5 Dort

6 Leopold and Wolman

جدید به پایش جابه‌جایی رودخانه‌ها اقدام کرده‌اند. هر پژوهش جدید، براساس تحقیقات پیشین است. هرچه پیشینه پژوهش درباره منطقه یا موضوع مورد مطالعه از نظر علمی قوی‌تر باشد، پژوهش جدید استحکام علمی قوی‌تری پیدا می‌کند. درباره موضوع مورد مطالعه پژوهشگران متعددی به مطالعه پرداخته‌اند. شوم<sup>۱</sup> (۱۹۸۴) رودخانه رانی تاتا در نیوزلند را مورد بررسی قرارداد و به این نتیجه رسید که بعد از خارج شدن از دره عمیق در میان تراس‌های پلیوستن باعث شریانی شدن در میان دشت‌های کانتربری شده‌است. اوچی (۱۹۸۳) درباره واکنش رودخانه‌های آبرفتی به تکتونیک فعال در کالیفرنیا و نیومکزیکو کار کرده است و نتایج نشان داد که افزایش سینوسی رودخانه در ارتباط با افزایش شیب بوده و کانال‌های شریانی از طریق تغییرات عمودی به بالآمدگی واکنش نشان می‌دهند؛ درحالی‌که کانال‌های مئاندری به وسیله تغییرات جانبی واکنش نشان نمی‌دهند. جین و سینا<sup>۲</sup> (۲۰۰۵) درباره اثر تکتونیک فعال بر رودخانه‌ها عنوان کرده‌اند که تکتونیک فعال در حوضه از طریق تغییر در شیب کانال نقش مهمی در کنترل سیستم رودخانه‌ای دارد. رودخانه‌ها به تغییر مداوم تکتونیکی در حوضه از طریق ایجاد مئاندر، تغییر شیب ناگهانی در نیمرخ طولی، برش کانال، تغییرات سینوسی غیرعادی، تغییر ناگهانی در جهت جریان، توزیع سیلاب، دریاچه‌ها و مناطق باتلاقی مؤثرند. نایتون و نانسون<sup>۳</sup> (۱۹۹۳) نشان دادند که نوسانات دبی به‌عنوان یک مکانیسم جهانی با اثرگذاری روی کشش جریان، فرسایش‌پذیری کناری و فراوانی نسبی بار بستر به‌عنوان کنترل‌گرهای اصلی روی الگوی رودخانه عمل می‌کنند. دی سیلیویو و نونس<sup>۴</sup> (۲۰۱۳) دریافتند که تغییرات فراوانی از سواحل رودخانه که به دلایل طبیعی (مثل تغییرات آب وهوا) یا تأثیرات انسانی (مثل برداشت آب، سدسازی یا برداشت رسوب) رخ می‌دهد، ممکن است باعث تغییر شکل مورفولوژیکی رودخانه در درازمدت شود و در نهایت رودخانه بخش‌های بزرگی از حوضه خود را از دست بدهد. پن<sup>۵</sup> (۲۰۱۳) در تحقیقی به بررسی تغییرات رود بانکرا در غرب بنگال با استفاده از تصاویر ماهواره‌اندست پرداخت. نتایج حاصل از تحقیق بیانگر تغییر در پارامترهای مختلف مورفولوژیک آبراهه‌ای مانند شاخص حرکت موجی، عدم‌تقارن متقابل دره، نسبت پیچ و خم دارد. کلریکی و همکاران<sup>۶</sup> (۲۰۱۵) به بررسی تغییرات مورفولوژیکی رودخانه تارو در شمال ایتالیا در دو قرن اخیر پرداختند؛ به‌طور کلی با بهره‌گیری از تجزیه و تحلیل پارامترهای مورفولوژی و مستندات تاریخی مثل نقشه و عکس‌های هوایی، شناسایی تغییرات کانال نشان داد که بیشترین تغییرات را انسان ایجاد کرده است و باعث تنگ‌شدگی مقطع کانال رودخانه به‌دلیل استفاده از بستر رودخانه برای مقاصد کشاورزی و صنعتی، ساخت پل‌های متعدد و ساحل‌سازی شده‌است. کاسادو و همکاران<sup>۷</sup> (۲۰۱۶) تغییرات پوشش گیاهی و ژئومورفیک را در رودخانه آرژانتین مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش مجرای کانال رودخانه ساوس گراند<sup>۸</sup>، قبل و بعد از احداث سد روی آن مورد مطالعه قرار گرفته‌است.

فرخی و همکاران (۱۳۸۴) با بررسی تغییرات پلان رودخانه دز با استفاده از سنجش از دور و GIS نتیجه گرفتند که رودخانه بیشتر از الگوی پیچان‌رودی تبعیت می‌کند و سواحل آن جابه‌جایی زیادی داشته‌است. بورگ<sup>۹</sup> (بورگ،

1 Shum

2 Jain and sinha

3 Knighton and Nanson

4 Di Silvio and Nunes

5 Pan

6 Clerici et al

7 Casado

8 Sauce Grande

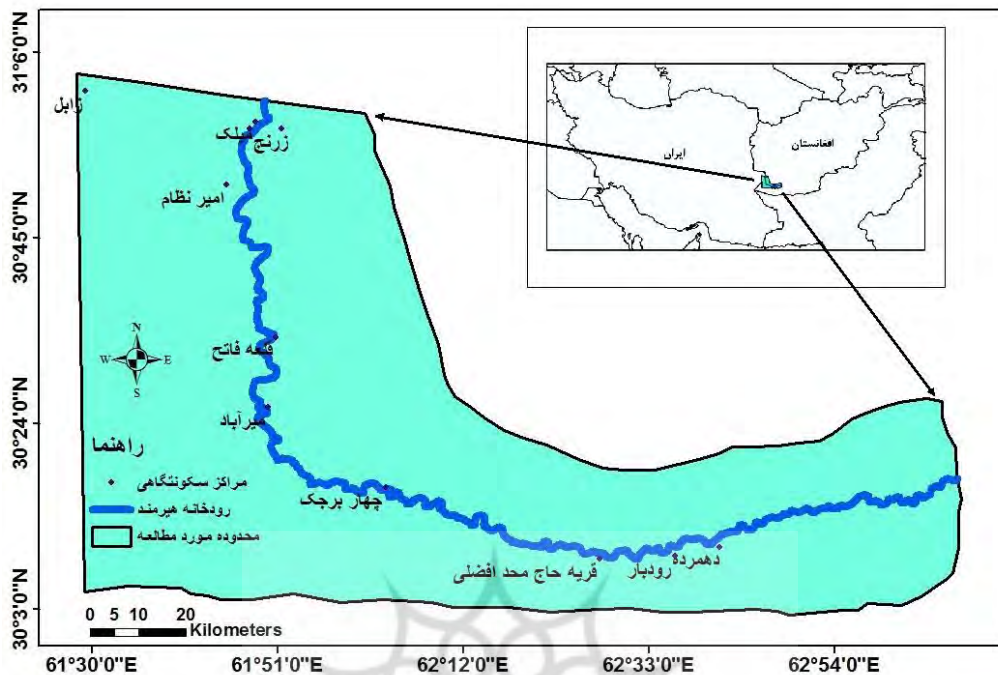
9 Burge

۲۰۰۴) در رابطه با الگوهای رودخانه و ویژگی‌های کانال در رودخانهٔ رنوس<sup>۱</sup> کانادا پژوهشی انجام داد و نقش الگوهای رودخانه‌ای و ویژگی‌های کانال تحت تأثیر زمین‌شناسی، آب‌وهوا و دبی متفاوت است. ارشد و همکاران (۱۳۸۶) در پژوهشی روند تغییرات مورفولوژیکی رود کارون (از گتوند تا فارسیات) را با استفاده از سنجش‌ازدور مورد مطالعه قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که خصوصیات قوس‌ها در طول رود در حال تغییر است و مقدار جابه‌جایی عرض قوس‌ها در مناطقی به ۱۹۵۰ متر در طول ۱۳ سال می‌رسد. همچنین تراکم و اندازهٔ انحنای قوس‌ها به سمت پایین دست جابه‌جا شده‌اند. یمانی و فخری (۱۳۹۱) در پژوهشی، تغییرات مجرای رودخانهٔ جگین در سطح جلگهٔ ساحلی مکران را بررسی کردند. ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی و هیدرودینامیکی مسیر این رودخانه از جمله شیب کم دلتا، ریزدانه‌بودن رسوبات، طغیانی‌بودن رودخانه و عوامل تکتونیکی، از عوامل اصلی ناپایداری مجرای رودخانهٔ جگین هستند. شریفی‌کیا و امیری (۱۳۹۲) الگوی مکانی، فضایی رودخانهٔ هیرمند و علل جابه‌جایی آن را استخراج کردند و به این نتیجه رسیدند که علاوه بر عوامل هیدرولوژیکی در منطقه، مسئلهٔ خشکسالی‌های دههٔ اخیر عامل این تغییرات بوده‌است. المدرسی و همکاران (۱۳۹۷) به بررسی نقش عوامل مؤثر بر پیچان‌رودشدن و تغییرات رودخانهٔ دالکی با استفاده از سنجش‌ازدور پرداختند و به این نتیجه رسیدند که شیب و جنس سازندها مهم‌ترین عوامل تغییرات و پیچان‌رودشدن رودخانهٔ دالکی است. هدف از این تحقیق، مطالعهٔ تغییرات رودخانهٔ هیرمند، شناخت مورفولوژی و فرایندهای حاکم بر آن و بررسی تغییرات و جابه‌جایی‌های آن در طول مسیر از رودبار افغانستان تا هامون در ایران است.

## داده‌ها و روش‌ها

### معرفی منطقهٔ مورد مطالعه

منطقهٔ مورد مطالعه در این پژوهش محدود به امتداد طولی رودخانهٔ هیرمند در مرز مشترک با کشور افغانستان به طول ۳۰ کیلومتر از محل تلاقی رودخانه با مرز در مختصات جغرافیایی ۲۹ درجه و ۱۱ دقیقه و ۲۵ ثانیه تا ۳۱ درجه و ۵۴ دقیقه و ۵۰ ثانیهٔ عرض شمالی و ۶۰ درجه و ۵۵ دقیقه تا ۶۳ درجه و ۵۵ دقیقهٔ طول شرقی است (شکل ۲).



شکل ۲. موقعیت منطقه مورد مطالعه

(منبع: نویسندگان، ۱۴۰۰)

رودخانه هیرمند از ارتفاعات بابایغما در رشته کوه‌های هندوکش در جنوب غربی کابل سرچشمه می‌گیرد. طول هیرمند ۱۳۹۰ کیلومتر است. این رود پس از طی مسیر و ورود به مرز مشترک ایران و افغانستان به دو شاخه اصلی تقسیم می‌شود. از این دوشاخه، یکی ام پریان مشترک وارد مرز ایران شده و در امتداد مرز دو کشور ادامه مسیر داده و به هامون پوزک افغانستان می‌ریزد. دومین شاخه اصلی رود هیرمند، در محل شهری زهک وارد ایران می‌شود و رودخانه سیستان را تشکیل می‌دهد. این شاخه اصلی نیز خود به دوشاخه فرعی تقسیم می‌شود که یکی به هامون صابری و دیگری به هامون پوزک می‌ریزد (میرزایی، ۱۳۸۶). از نظر زمین‌شناسی منطقه سیستان ایران دنباله بلوک هلمند به حساب می‌آید که بخش عمده آن در خاک افغانستان قرار گرفته است. این بلوک در واقع یک فروافتادگی تکتونیکی محسوب می‌شود که از بقایای دوران سوم زمین‌شناسی است و در اثر حرکات زمین‌ساختی به شکل چاله درآمد و به مرور زمان از رسوبات آبرفتی رودخانه هیرمند انباشته شده است. زمین‌شناسی افغانستان از لحاظ ساختمانی بسیار پیچیده و درهم‌تنیده است و اساساً شامل توالی‌هایی از روندهای باریک سرزمین‌های شمال شرقی - جنوب غربی خردده‌های قاره‌ای به سن پالئوزوئیک تا ترشیری است. این قطعات به سمت شمال حرکت کرده و به‌طور مایل با توده قاره‌ای آسیا در حال برخورد است. در دشت زابل آن عواملی که سیمای توپوگرافی و ژئومورفولوژی یک منطقه را پرعارضه می‌سازند، چندان فعال نبوده‌اند و این پدیده تحت تأثیر دو عامل قرار داشته است. از یک طرف وجود بلوک سیستان به‌عنوان یک ناحیه سخت و محکم در زیر رسوبات این دشت مانع از آن شده است که رسوبات تحت تأثیر عوامل تکتونیکی قرار بگیرد و ناهمواری‌های قابل ملاحظه‌ای در آن به وجود آید. از طرف دیگر چاله سیستان همواره به‌عنوان سطح اساس رودخانه هیرمند عمل کرده و هرچند بیشتر به رسوبات دهانه‌ای رودخانه در این منطقه افزوده شده است (رخشانی مهر، ۱۳۹۳). دشت سیستان یک دشت آبرفتی و دریاچه‌ای آب شیرین است.

این دشت در اواخر دوران سوم و در طول دوران چهارم محل رسوب گذاری رودخانه هیرمند بوده است. این حوضه رسوبی ضمن دریافت بار رسوب در حال نشست بوده است و این عمل تا حال حاضر نیز ادامه دارد. دشت سیستان و قسمت‌های شرقی آن در افغانستان با عنوان دلتای هیرمند در آخرین دوران زمین‌شناسی در اثر انباشته شدن رسوبات رودخانه هیرمند پر شده و به شکل کنونی درآمده است (مهندسان مشاور تهران سحاب، ۱۳۷۱). دشت سیستان هموار، نسبتاً مسطح و شیب ملایمی دارد. شیب آن ابتدا از جنوب شرق به طرف شمال غرب است. به گونه‌ای که در حوالی مرز افغانستان تند و در نزدیکی هامون ملایم می‌شود. سپس این شیب از شمال غرب به جنوب تغییر می‌یابد و شیب عمومی دشت در جهت جنوب به طرف پست‌ترین قسمت آبخیز، یعنی گود زره قرار می‌گیرد. ارتفاع متوسط ارتفاع دشت حدود ۵۰۰ متر و بلندترین عارضه دشت کوه خواجه با ارتفاع ۵۹۵ متر است (زمردیان و پورکرمانی، ۱۳۶۷).

#### الف- روش تحقیق

برای بررسی تغییرات مورفولوژیکی رودخانه هیرمند از رودبار افغانستان تا هامون سیستان از روش تاریخی استفاده شده است. روش‌های مورد استفاده برای بررسی تغییرات رودخانه‌ها با توجه به هدف از سه روش تاریخی، مدل تجربی و مدل بنیادی استفاده می‌شود. در این پژوهش با توجه به در دسترس بودن تصاویر ماهواره‌ای در دوره‌های مختلف از روش تاریخی استفاده شده است. ابتدا تصاویر ماهواره لندست ۵، ۷ و ۸ با فاصله زمانی دوره‌های ۵ ساله از وبسایت (<https://earthexplorer.usgs.gov>) گرفته شد (جدول ۱). سپس با استفاده از نرم‌افزار ENVI تصحیحات اتمسفری و رادیومتری روی این تصاویر انجام گرفت. انجام محاسبات تغییرات ژئومورفولوژیکی در نرم‌افزار Auto Cad و ARC GIS انجام گرفته است.

جدول ۱. تصاویر مورد استفاده در پژوهش

ماهواره	سنجنده	باندها	قدرت تفکیک مکانی	سال	ماه	ساعت
لندست ۵	TM	۱ تا ۵	۳۰ متر	۱۹۸۸	دی	۹.۴۵
لندست ۵	TM	۱ تا ۵	۳۰ متر	۱۹۹۳	دی	۹.۴۵
لندست ۷	ETM+	۱ تا ۵ و ۷	۳۰ متر	۱۹۹۸	دی	۱۰.۳۰
لندست ۷	ETM+	۱ تا ۵ و ۷	۳۰ متر	۲۰۰۳	دی	۱۰.۳۰
لندست ۷	ETM+	۱ تا ۵ و ۷	۳۰ متر	۲۰۰۸	دی	۱۰.۳۰
لندست ۸	OLI	۲ تا ۶	۳۰ متر	۲۰۱۳	دی	۱۰.۴۵
لندست ۸	OLI	۲ تا ۶	۳۰ متر	۲۰۱۸	دی	۱۰.۴۵

(منبع: نویسندگان، ۱۴۰۰)



## ب- روش کار

## پیش پردازش های تصاویر ماهواره ای

در این پژوهش ابتدا مراحل زیر روی تصاویر انجام شد تا برای تجزیه و تحلیل های بعد آماده شوند که شامل:

## ۱. تصحیحات رادیومتریکی

یک نوع تبدیل ساده است و مقادیر DN با به رادیانس (Radiance)، یا بازتاب سطح عوارض در بالای اتمسفر (Reflectance\_TOA) برمی گرداند. برای محاسبه رادیانس از رابطه ۱ استفاده شده است.

$$\text{Radiance} = \text{Gain} * \text{DN} + \text{Offset} \quad \text{رابطه (۱)}$$

در رابطه (۱) پارامتر Gain اشاره به میزان شیب خط رابطه بین درجه روشنایی و انرژی رسیده به سنجنده دارد. پارامتر Offset نیز اشاره به عرض از مبدأ رابطه بین درجه روشنایی و انرژی رسیده به سنجنده دارد. برای محاسبه Reflectance-TOA از رابطه (۲) استفاده شده است.

$$\text{Reflectance} = (p * L * d) / (ESUN * \sin(\text{teta})) \quad \text{رابطه (۲)}$$

در رابطه (۲)، P عدد پی، L رادیانس تصویر ماهواره ای، D فاصله زمین تا خورشید در زمان تصویربرداری ماهواره، ESUN تابش خورشیدی رسیده به سطح زمین در طول موج های باندهای سنجنده مورد نظر و Teta زاویه ارتفاعی خورشید بر حسب درجه است.

## ۲. تصحیحات اتمسفری

تصحیح اتمسفری معمولاً پس از تصحیح رادیومتریکی انجام می شود. روش های مختلفی برای تصحیح اتمسفری ارائه شده است. دقیق ترین روش Empirical Line Model نام دارد. در این روش، شما باید هم زمان با تصویربرداری ماهواره ای منطقه مورد مطالعه، در آن حضور داشته و با استفاده از دستگاه spectrometer نسبت به برداشت رفتارهای طیفی پدیده های غالب منطقه اقدام کنید. سپس از طریق رابطه رفتارهای طیفی دستگاه طیف سنج و تصویر ماهواره ای، ضرایب تصحیح استخراج شده و برای تصحیح نهایی تصویر ماهواره ای استفاده می شود.

## ۳. موزاییک کردن تصاویر

موزاییک کردن به معنای قراردادن تصاویری که از لحاظ جغرافیایی باهم شباهت دارند در کنار هم است. ممکن است عکس های موزاییک شده با هم پوشش داشته باشند یا نداشته باشند، اما بهترین نوع موزاییک کردن طوری است که عوارض در قسمت پوششی کاملاً پیوسته باشند؛ ولی همواره موزاییک کردن با خطایی مواجه است که عوارض کمی شیفت پیدا می کنند. روش PIXEL BASE موزاییک کردن که باید ابعاد تصاویر باهم برابر باشند. این روش دقیقاً از کنار هم قراردادن PIXEL به PIXEL استفاده می کند و فقط تصویر را در کنار هم قرار می دهد؛ یعنی به صورت ذیل عمل می شود. فقط باید توجه داشت که بسیار مهم است ابعاد PIXEL تصویر باهم برابر باشند.

## ۴. محاسبه پارامترهای هندسی رودخانه

پارامترهای هندسی رودخانه در نرم‌افزار اتوکلد محاسبه می‌شود که شامل: زاویه مرکزی، شعاع پیچان‌رود، طول موج و طول دره و ضریب خمیدگی است. از زاویه مرکزی و شعاع پیچان‌رود به‌عنوان معیاری برای توسعه پیچان‌رود استفاده می‌شود. این معیار به‌وسیله ترسیم دایره‌های مماس بر مسیر رودخانه استفاده می‌شود. از مرکز هر یک از دایره‌های مماس بر قوس‌ها دو شعاع بر نقطه عطف دایره‌ها با دره رودخانه ترسیم می‌شود. به زاویه ایجادشده از محل اتصال دو شعاع، زاویه مرکزی و به شعاع مماس بر دایره قوس‌ها، شعاع دایره گفته می‌شود (مقصودی و همکاران، ۱۳۸۹).

ضریب کرباطه (۳) استفاده می‌شود که در رابطه (۳)، از قوس‌ها، از هر یک خمیدگی ضریب میزان برای محاسبه نصف طول موج است (دولتی، ۱۳۸۷).  $\lambda/2$  طول قوس و  $L$  خمیدگی،

$$S = \frac{L}{\lambda/2} \quad \text{رابطه (۳)}$$

### بررسی تغییرات طولی

برای بررسی تغییرات طولی یا همان طول رودخانه در طول سری زمانی از نرم‌افزار ENVI استفاده شده است. به این شیوه که ابتدا مسیر رودخانه با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای در دوره‌های زمانی ۵ ساله به‌دست آمده و در محیط نرم‌افزار ENVI طول رودخانه محاسبه شد.

### بررسی تغییرات عرضی

پس از محاسبه کاربردی‌ترین شاخص‌های آب، انتخاب شاخص بهینه با استفاده از نمودار ROC صورت پذیرفت. منحنی ROC یکی از روش‌های مناسب برای ارزیابی نتایج روش الگوریتم آستانه‌گیری و ارزیابی قابلیت آستانه‌های گوناگون در تفکیک پدیده موردنظر است. این منحنی رابطه بین سلول‌هایی که به‌درستی طبقه‌بندی شده‌اند و سلول‌هایی که به اشتباه طبقه‌بندی شده‌اند را نشان می‌دهد.

### بررسی تغییرات قوس‌ها

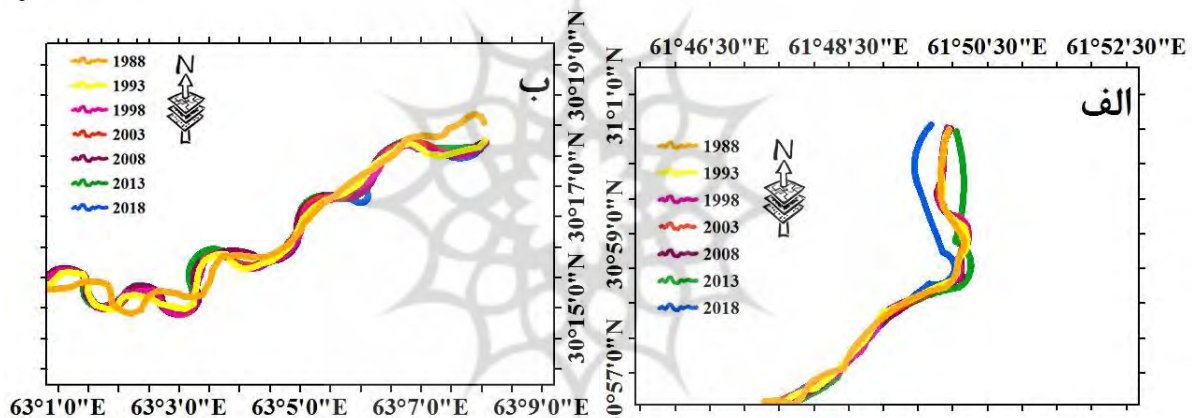
تغییرات ایجادشده در مسیر رودخانه با الگوی پیچش‌ها و دایره‌های مماس بر آن‌ها، پس از رقومی کردن مسیر رودخانه از روی تصاویر ماهواره‌ای برای هر دوره در محیط نرم‌افزار GIS به‌دست آمده است.

### یافته‌های تحقیق

#### تغییرات طولی رودخانه

تصاویر ماهواره‌ای، با فاصله زمانی ۵ ساله لندست ۵، ۷ و ۸ از رودبار افغانستان تا هامون سیستان تهیه شد (۲۰۱۸-۱۹۸۸). تصحیحات لازم روی ۷ سری تصاویر انجام شد. سپس مسیر رودخانه روی تصاویر آشکارسازی شد. محاسبه طول رودخانه در نرم‌افزار ENVI انجام گرفت. تصاویر روی هم قرار داده شدند و از آن‌ها خروجی گرفته شد. در این نوع محاسبه، جابه‌جایی‌های ناشی از سیلاب‌ها که قابل توجه باشد یا جابه‌جایی‌های ناشی از رسوب‌گذاری‌های ناگهانی قابل‌پایش است. برای پایش تغییرات بسیار جزئی، نیاز به تصاویر ماهواره‌ای با دقت بالا است که دسترسی به این نوع تصاویر مشکل است. رودخانه‌ها همیشه با توجه به میزان پیچ‌وخم‌ها دچار تغییرات هم در طول و هم عرض می‌شود. شکل ۳ و جدول ۲ میزان تغییرات طولی رودخانه در منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد. میزان طول

رودخانه در سال ۱۹۸۸ به میزان ۲۷۰ کیلومتر است. در سال ۱۹۹۳ طول رود ۲۷۰ کیلومتر بوده و نسبت به سال ۱۹۸۸ تغییری را نشان نمی‌دهد. در سال ۱۹۹۸ طول رودخانه ۲۷۰/۳ کیلومتر و در سال ۱۹۹۸ نسبت به سال ۱۹۹۳ به میزان ۳۰۰ متر افزایش داشته‌است. در سال ۲۰۰۳ نسبت به سال ۱۹۹۸ ۲۰۰ متر افزایش داشته و به ۲۷۰/۵ کیلومتر رسیده‌است. در سال ۲۰۰۸ به ۲۷۰/۶ کیلومتر و سال ۲۰۱۳ نیز ۲۷۱ کیلومتر بوده‌است. در سال ۲۰۱۸ طول رودخانه ۲۷۱/۵ کیلومتر بوده که نسبت به سال ۲۰۰۸ و ۲۰۱۳ فقط ۵۰۰ متر افزایش یافته‌است. با توجه به نتایج گفته شده می‌توان این‌طور بیان کرد که بیشترین طول رودخانه، سال ۲۰۱۸ و کوتاه‌ترین آن سال ۱۹۸۸ بوده‌است. علل تغییرات طولی رودخانه، مماندرهای متعددی است که در طول رودخانه به وجود می‌آید. به وجود آمدن مماندرها باعث افزایش طول رودخانه و قطع مماندرها و مستقیم شدن مسیر رود باعث کاهش طول رود می‌شود؛ علاوه بر این جابه‌جایی رودخانه از یک مسیر به مسیری جدید در تغییرات طولی رودخانه مؤثرند و باعث افزایش یا کاهش طول رودخانه می‌شود.



شکل ۳. تغییرات طولی رود در بازه ۱۹۸۸ تا ۲۰۱۸ (الف: اول رود، ب: آخر رود)

(منبع: نویسندگان، ۱۴۰۰)

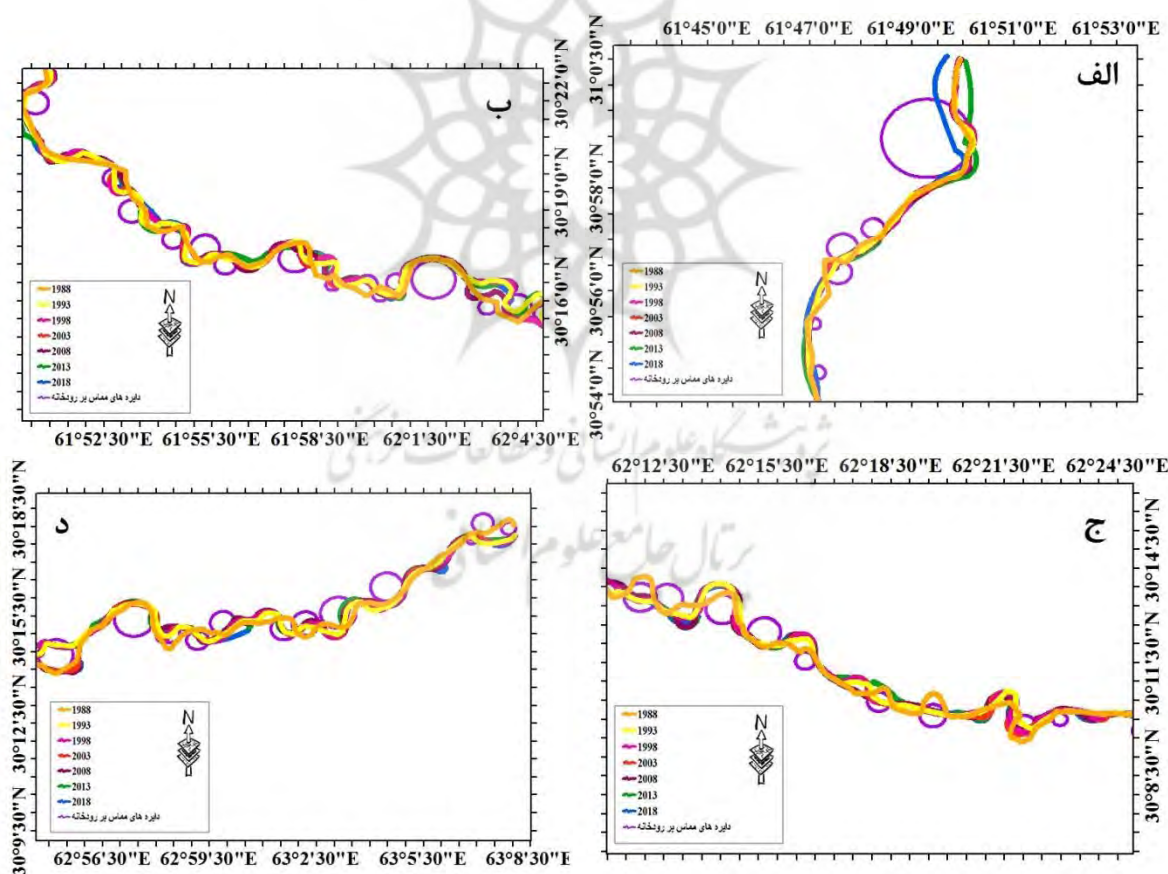
جدول ۲. تغییرات طولی رود در بازه ۱۹۸۸ تا ۲۰۱۸

سال	طول رودخانه به کیلومتر
۱۹۸۸	۲۷۰
۱۹۹۳	۲۷۰
۱۹۹۸	۲۷۰/۳
۲۰۰۳	۲۷۰/۵
۲۰۰۸	۲۷۰/۶
۲۰۱۳	۲۷۱
۲۰۱۸	۲۷۱/۵

(منبع: نویسندگان، ۱۴۰۰)

### تغییرات قوسی رودخانه

شکل ۴ تغییرات قوس‌های رودخانه مورد مطالعه را نشان می‌دهد. همچنین جدول ۳ پارامترهای هندسی را (ضریب خمیدگی، طول دره و طول موج)، برای بازه ۱۹۸۸ تا ۲۰۱۸ نشان می‌دهد. نتایج به دست آمده حاکی از آن است که تغییرات مماندیری از سال ۱۹۸۸ تا ۲۰۱۸ افزایش یافته است. در سال ۱۹۸۸ میانگین ضریب خمیدگی ۱/۵ بوده و در سال ۲۰۰۳ به ۱/۹ رسیده است. در سال ۲۰۱۸ میانگین ضریب خمیدگی نسبت به سال‌های دیگر افزایش داشته و به ۲/۵ رسیده است. طول دره و طول موج نیز از سال ۱۹۸۸ تا سال ۲۰۰۳ و ۲۰۱۸ روند کاهشی داشته است. این روند کاهش، نشان‌دهنده کاهش فاصله بین مماندرهای رود و افزایش تعداد مماندرها در سال ۱۹۸۸ نسبت به سال ۲۰۱۸ است. همان‌طور که ذکر شد، طول رودخانه از سال ۱۹۸۸ تا سال ۲۰۱۸ افزایش داشته است. این افزایش طول رودخانه در دوره مطالعاتی نشان‌دهنده افزایش و بیشتر شدن تعداد و میزان پیچان‌رودها است. افزایش میزان تعداد پیچان‌رودها در بخش افغانستان بیشتر از قسمت رود در مرزهای ایران است و دلیل این امر، جریان بیشتر آب و شیب کمتر در این منطقه است.



شکل ۴. تغییرات قوسی رود سال ۱۹۸۸ تا ۲۰۱۸ (الف: اول رودخانه، ب: وسط رودخانه، ج: وسط رودخانه، د: آخر رودخانه)

(منبع: نویسندگان، ۱۴۰۰)

جدول ۳. نتایج تجزیه و تحلیل آماری پارامترهای هندسی قوس‌های رودخانه، سال ۱۹۸۸ تا ۲۰۱۹

سال	پارامترهای هندسی	ضریب خمیدگی (-)	طول دره (متر)	طول موج (متر)
۱۹۸۸	میانگین	۱.۵	۲۲۲۵	۱۸۹۰
	انحراف معیار	۵.۵	۶۵۴۵	۲۱۲۲
	ضریب تغییرات	۱۱.۵	۲۴۵۵۰	۳۵۴۵
	حداکثر	۱۰	۲۴۲۰	۷۱۵۰
	حداقل	۰.۶	۵۴۵	۴۵۲
	چولگی	۲.۵	۳.۵	۰.۷
	کشیدگی	۹	۴.۵	۳.۵
۱۹۹۳	میانگین	۱.۵	۲۲۰۰	۱۷۸۰
	انحراف معیار	۵.۷	۶۵۰۰	۲۰۰۰
	ضریب تغییرات	۱۲	۱۸۵۰۰	۳۵۰۰
	حداکثر	۱۱.۱	۲۰۰۰	۶۵۸۰
	حداقل	۰.۶	۵۰۰	۴۵۰
	چولگی	۲.۸	۳.۳	۰.۸
	کشیدگی	۱۱	۴.۹	۳.۹
۱۹۹۸	میانگین	۱.۷	۲۲۰۰	۱۷۷۰
	انحراف معیار	۶	۵۰۰۰	۱۹۰۰
	ضریب تغییرات	۱۲.۲	۱۶۴۵۰.۵	۳۱۲۲
	حداکثر	۱۱.۱	۱۹۸۰	۶۴۵۵
	حداقل	۰.۹	۴۴۰	۳۸۰
	چولگی	۲.۸	۳.۲	۰.۹
	کشیدگی	۱۲	۶	۴.۸
۲۰۰۳	میانگین	۱.۹	۱۹۸۰	۱۵۴۵
	انحراف معیار	۷.۹	۴۵۵۰	۱۸۷۸
	ضریب تغییرات	۱۳.۵	۹۵۰۰	۲۸۸۸
	حداکثر	۱۲.۵	۱۵۴۰	۵۸۸۸
	حداقل	۱.۵	۲۸۸	۳۲۲
	چولگی	۲.۹	۳.۲	۱.۲
	کشیدگی	۱۴.۵	۶	۵.۳
۲۰۰۸	میانگین	۱.۹	۱۵۰۰	۱۳۲۰
	انحراف معیار	۸	۴۰۰۰	۱۵۲۵
	ضریب تغییرات	۱۸	۸۵۴۰	۲۱۴۵
	حداکثر	۱۸	۱۳۲۰	۴۸۷۸
	حداقل	۱.۱	۱۹۸	۲۹۵
	چولگی	۳	۳	۱.۸
	کشیدگی	۱۸	۱۲.۲	۶.۶
۲۰۱۳	میانگین	۲.۱	۱۰۰۰	۱۱۱۰
	انحراف معیار	۱۰	۳۷۴۰	۱۲۰۰
	ضریب تغییرات	۱۸.۸	۸۰۰۰	۱۹۸۹
	حداکثر	۲۰	۱۱۰۰	۴۵۸۷
	حداقل	۱.۸	۱۵۰	۱۵۵

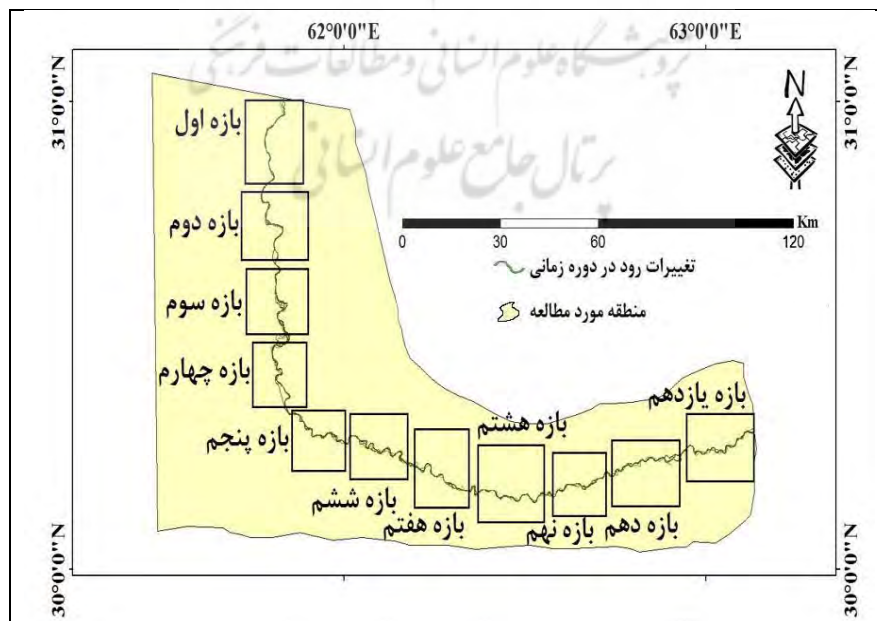


۲.۵	۲.۸	۳.۵	چولگی	۲۰۱۸
۷.۱	۱۳.۵	۲۰	کشیدگی	
۸۸۵	۸۸۰	۲.۵	میانگین	
۱۱۱۱	۲۸۹۰.۵	۱۱.۸	انحراف معیار	
۱۴۷۸	۵۵۴۰	۱۹.۹	ضریب تغییرات	
۳۸۷۸	۹۸۸	۲۳.۵	حداکثر	
۱۱۲	۱۰۰	۱.۵	حداقل	
۲.۸	۲.۱	۳.۸	چولگی	
۸.۵	۱۵.۴	۲۵	کشیدگی	

(منبع: نویسندگان، ۱۴۰۰)

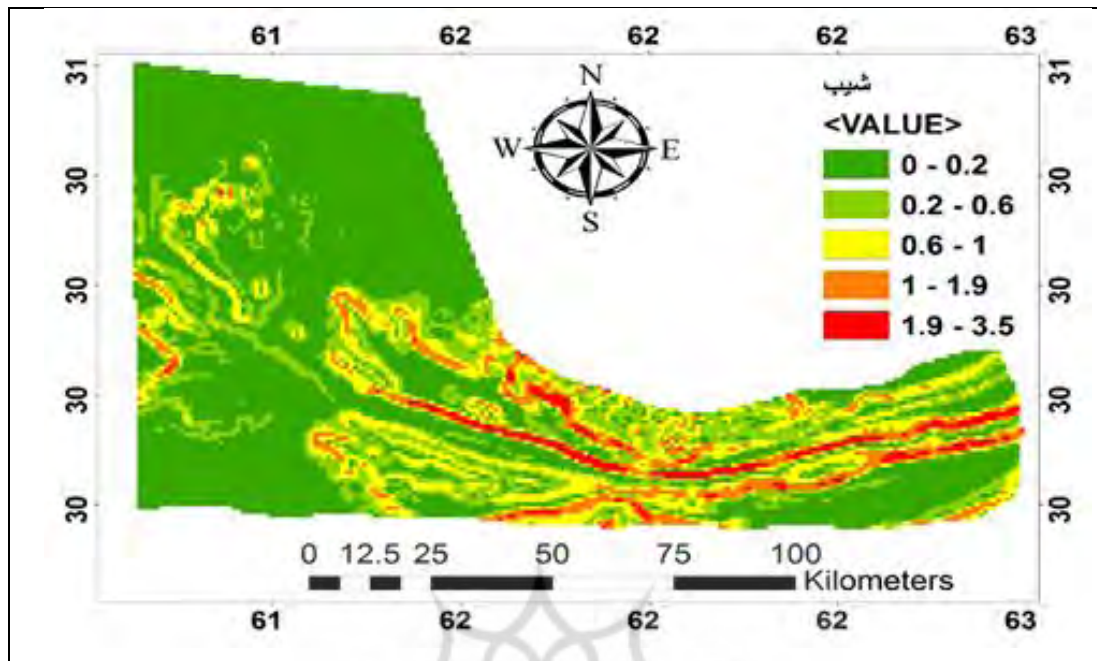
### تغییرات عرضی رودخانه

برای بررسی تغییرات عرضی رودخانه هیرمند روی تصاویر ماهواره‌ای و انجام محاسبات تغییرات عرضی آن، اگر کل رودخانه در یک بازه مورد بررسی قرار می‌گرفت و محاسبات آن انجام و نقشه آن تهیه می‌شد، به دلیل مقیاس کوچک نقشه‌ها، تغییرات عرضی روی آن مشخص نمی‌شد؛ علاوه بر این به دلیل یکسان بودن سازندهای زمین‌شناسی محدوده مورد مطالعه و شیب بسیار اندک، تمام طول رودخانه در محدوده مورد مطالعه دارای مشابهت هستند. تقسیم کردن طول رودخانه به یازده بازه مساوی، صرفاً برای آسانی مطالعه و تهیه نقشه‌های باکیفیت، در جهت بررسی تغییرات عرضی رودخانه بوده است؛ علاوه بر این شناسایی دقیق‌تر تغییرات رودخانه در بازه‌های کوچک‌تر آسان‌تر می‌شد. شکل ۵ نقشه مسیر رودخانه در منطقه مورد مطالعه از سال ۱۹۸۸ تا ۲۰۱۸ که به ۱۱ بازه متفاوت تقسیم‌بندی شده است را نشان می‌دهد. با توجه به نقشه شیب (شکل ۶) میزان شیب منطقه بین ۰/۲ تا ۳/۵ است که میزان شیب در بستر رودخانه از محدوده‌های اطراف بیشتر است.



شکل ۵. بازه‌های طولی در جهت محاسبه تغییرات عرض رود در دوره‌های مختلف

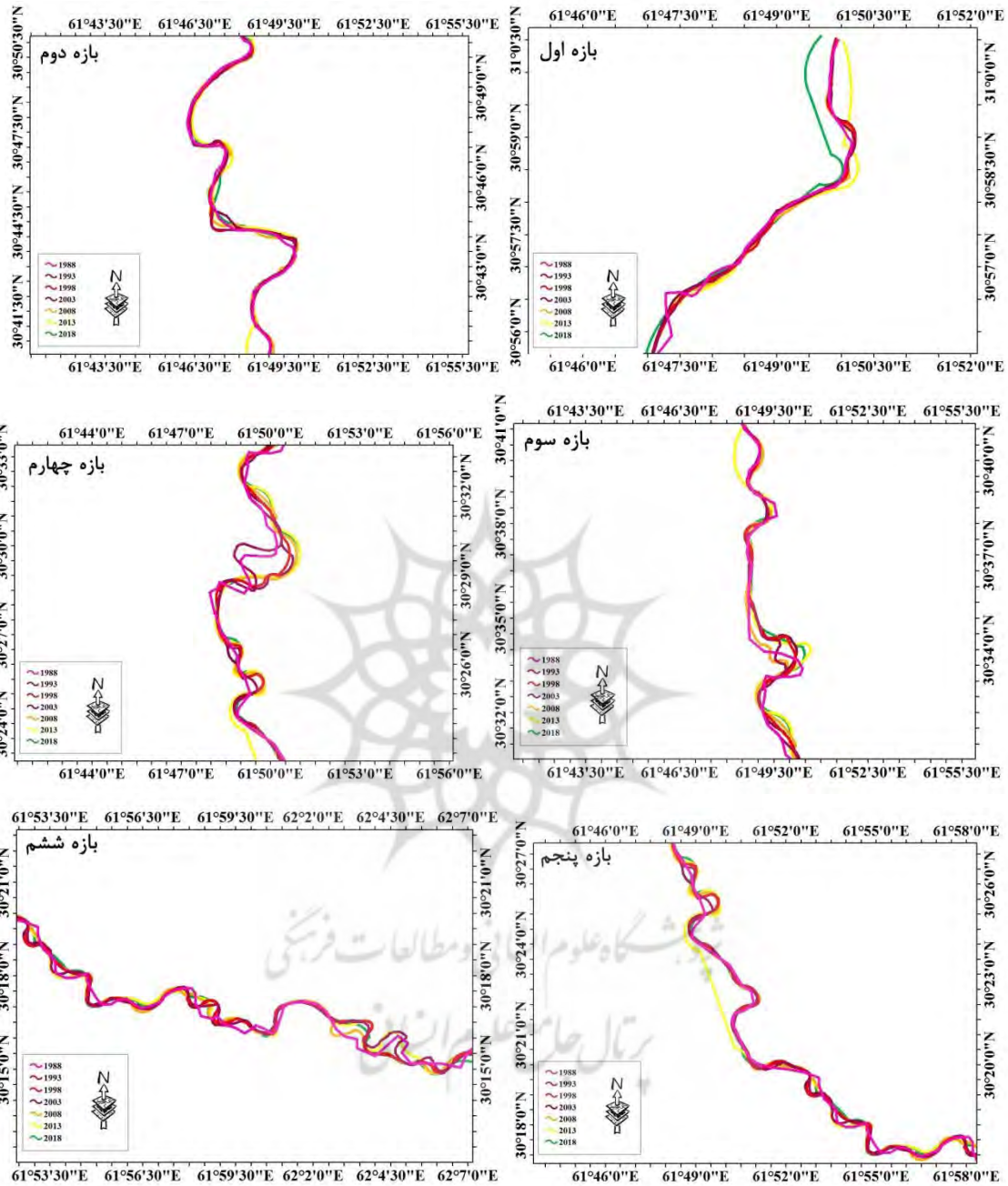
(منبع: نویسندگان، ۱۴۰۰)

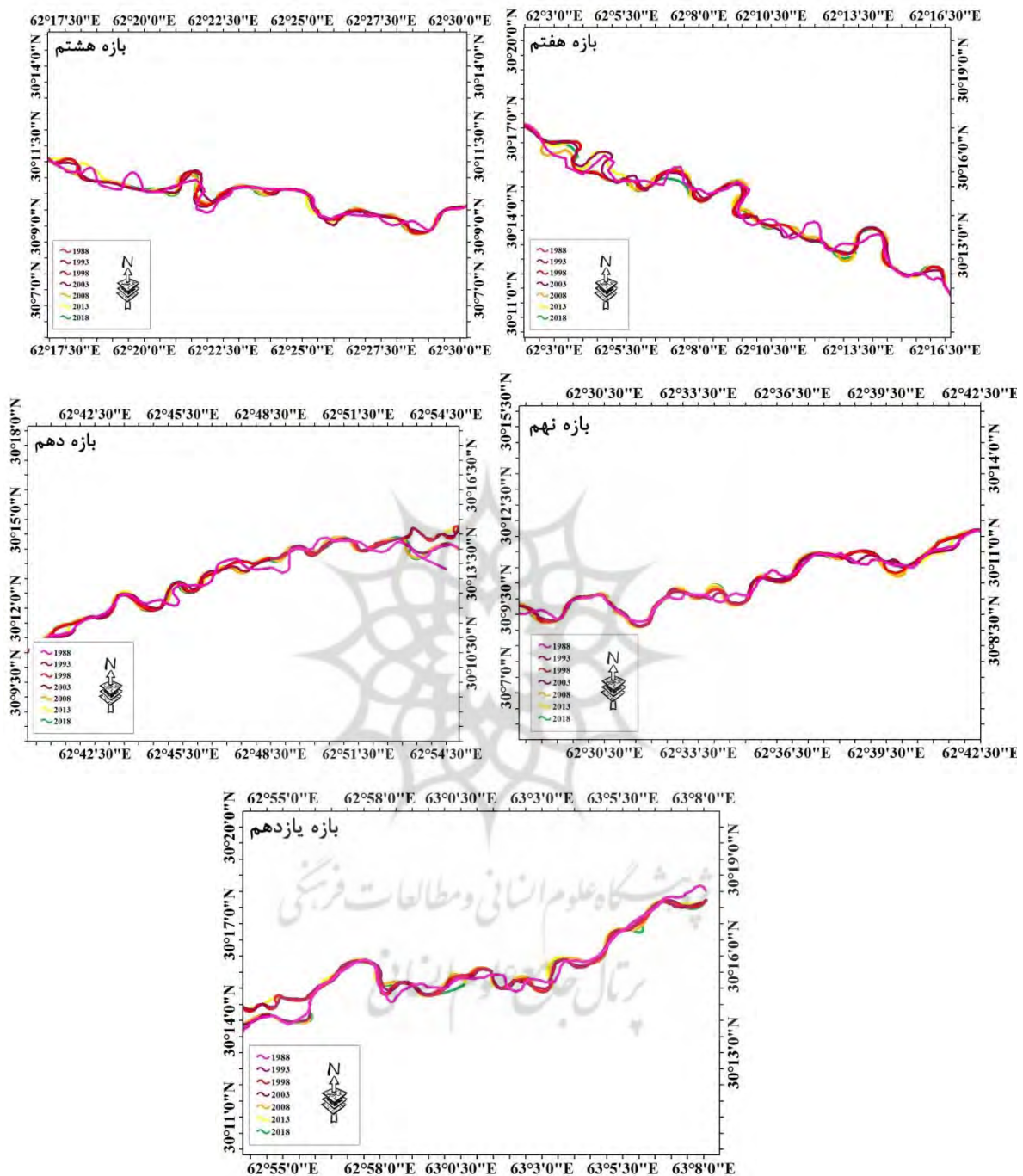


شکل ۶. نقشه شیب محدوده مطالعه

(منبع: نویسندگان، ۱۴۰۰)

نتیجه‌ای که از تقسیمات طول رودخانه به بازه‌های مختلف گرفته می‌شود، این است که بازه اول تغییرات نسبتاً کمی داشته‌است. در این بازه بیشترین قوس‌ها مربوط به سال ۲۰۱۸ و ۲۰۱۳ است. در این بازه درصد شیب بین ۰/۲ و ۰/۳ بوده‌است. در بازه شماره دوم نیز درصد شیب بین ۰/۲ و ۰/۳۵ بوده‌است. در بازه شماره سه، درصد تغییرات نسبت به دو بازه دیگر نسبتاً بیشتر بوده، به خصوص سال ۲۰۱۳ و ۲۰۱۸ که میزان پیچ‌وخم‌های آن بیشتر شده‌است. در این بازه درصد شیب بیشتر از دو بازه دیگر یعنی بازه اول و دوم است. درصد شیب در بازه سوم بین ۰/۷ و ۱/۱ است. در بازه شماره چهار، درصد شیب آن بین ۰/۸ و ۱/۳ است. در این بازه سال ۱۹۸۸ و سال ۱۹۹۳ مسیر عبور آب با سال‌های دیگر متفاوت است. این تفاوت در مسیر عبور آب منحرف شدن رود به مسیرهای دیگر رود است. در بازه شماره چهار میزان قوس‌های سال ۲۰۱۳ و ۲۰۱۸ بیشتر از سال‌های دیگر است. بازه شماره پنج که درصد شیب آن نسبت به بازه شماره یک تا چهار افزایش زیادی دارد و به ۲/۵ تا ۳/۵ درصد می‌رسد (شکل ۷).





شکل ۷. تقسیمات عرضی رودخانه از بازه یک تا یازدهم

(منبع: نویسندگان، ۱۴۰۰)

در بازه ششم تا یازدهم، درصد شیب منطقه بین  $\frac{2}{5}$  تا  $\frac{3}{5}$  است. در این بازه‌ها بیشترین میزان تغییرات پیچ‌وخم رودخانه مربوط به سال ۲۰۱۳ و ۲۰۱۸ است (شکل ۶). درصد تغییرات بازه اول تا یازدهم، روند افزایشی دارد؛ یعنی با افزایش درصد شیب، میزان تغییرات نیز بیشتر می‌شود. در کل می‌توان نتیجه گرفت که تغییرات طولی و پیچ‌وخم رودخانه در منطقه مورد مطالعه در بازه ۱۹۸۸ تا ۲۰۱۸ از سال ۱۹۸۸ تا سال ۲۰۱۸ تغییرات زیادی داشته‌است.



رودخانه هیرمند حدود ۲۰ کیلومتر پایین دست روستای چهار برجک افغانستان وارد چاله سیستان می‌شود. در این مکان رودخانه بیابان از هیرمند جدا می‌شود و به طرف غرب جریان می‌یابد. حدود ۱۸ کیلومتر بعد شاخه دیگری به نام سنارود از هیرمند جدا می‌شود. جریان رودخانه هیرمند به طرف شمال ادامه می‌یابد تا به روستای خوابگاه در سه کیلومتری مرز ایران و افغانستان می‌رسد و شاخه دیگری به نام رودخانه سیستان از هیرمند جدا می‌شود. از روستای چهار برجک تا محل جدایش رودخانه سیستان دو واحد دلتایی وجود دارد که یکی واحد دلتایی قدیمی و دیگری واحد جدید است. بازه‌های ۱ تا ۶ روی واحد جدید و بازه‌های ۶ تا ۱۱ روی واحد قدیمی جریان دارند. رفتار رودخانه نسبت به این دو واحد متفاوت است و رودخانه در واحد قدیمی دارای مئاندرهایی است که در داخل مسیر رودخانه جابه‌جا می‌شود؛ در حالی که در واحد مخروط افکنه‌ای جدید مسیر رودخانه جابه‌جا می‌شود و رودخانه مسیری را ترک و مسیر جدیدی را انتخاب می‌کند (بازه‌های ۱ و ۴). بیشترین تغییرات عرضی رودخانه مربوط به زمانی است که رودخانه مدتی خشک بوده و با بارش‌های سنگین آبدار می‌شود. دبی بالای آب و رسوبات بادی کف بستر باعث ایجاد مانع شده و رودخانه دچار انحراف می‌شود.

جدول ۴. میزان تغییرات عرضی به متر در قسمت مشخص شده تصویر (بازه‌های اول تا پنجم)

سال	میزان تغییرات عرضی بازه اول (به متر)	میزان تغییرات عرضی بازه دوم (به متر)	میزان تغییرات عرضی بازه سوم (به متر)	میزان تغییرات عرضی بازه چهارم (به متر)	میزان تغییرات عرضی بازه پنجم (به متر)
۱۹۹۳ نسبت به ۱۹۸۸	۴	۴	۵	۵	۲
۱۹۹۸ نسبت به ۱۹۸۸	۴.۲	۳.۵	۶	۱۰	۴
۲۰۰۳ نسبت به ۱۹۸۸	۵	۴	۳.۷۵	۷	۴
۲۰۰۸ نسبت به ۱۹۸۸	۵.۲	۶	۶.۵	۹	۳
۲۰۱۳ نسبت به ۱۹۸۸	۶	۶.۵	۷.۵	۸.۲	۴.۵
۲۰۱۸ نسبت به ۱۹۸۸	۶	۲	۸	۱۰	۴.۵

ادامه جدول ۴. میزان تغییرات عرضی به متر در قسمت مشخص شده تصویر (بازه ششم تا یازدهم)

سال	میزان تغییرات عرضی بازه ششم (به متر)	میزان تغییرات عرضی بازه هفتم (به متر)	میزان تغییرات عرضی بازه هشتم (به متر)	میزان تغییرات عرضی بازه نهم (به متر)	میزان تغییرات عرضی بازه دهم (به متر)	میزان تغییرات عرضی بازه یازدهم (به متر)
۱۹۹۳ نسبت به ۱۹۸۸	۲.۵	۴	۳	۱	۲.۵	۲.۵
۱۹۹۸ نسبت به ۱۹۸۸	۲.۵	۴	۳.۲	۱.۵	۳	۳
۲۰۰۳ نسبت به ۱۹۸۸	۳.۴	۴.۲	۴	۲	۲	۳.۵
۲۰۰۸ نسبت به ۱۹۸۸	۵	۴.۳	۴	۴	۳	۴
۲۰۱۳ نسبت به ۱۹۸۸	۵	۴.۵	۴.۲	۴.۵	۳	۴.۵
۲۰۱۸ نسبت به ۱۹۸۸	۵	۴.۸	۴.۲	۵	۴	۵



تغییرات عرضی، طولی و قوسی رودخانه هیرمند ناشی از عوامل متعددی است.

۱- تغییرات شیب: رودخانه هیرمند از سه بخش بالارود، میانرود و پایینرود تشکیل شده است. این رودخانه در بالارود از بیشترین میزان شیب برخوردار است و هرچه به سمت پایینرود پیش می‌رود، از میزان شیب رودخانه کم می‌شود. رودخانه در بالارود دارای انرژی بالا و قدرت فرسایشی زیادی است و فرسایش بار رسوبی زیادی در اختیار رودخانه قرار داده است. این بار رسوبی در پایینرود با کم شدن میزان شیب و کاهش انرژی رودخانه رسوب‌گذاری می‌شود. کاهش شیب باعث ایجاد مائدر در پایینرود نسبت به میانرود و بالارود می‌شود.

۲- سیلاب‌ها: رودخانه هیرمند مانند همه رودخانه‌های مناطق خشک دارای سیلاب‌های کاتاستروف و ناگهانی است. کانلی در سال ۱۸۴۰ گزارش داد که سیل بزرگی در سال ۱۸۳۰ باعث شده بود هیرمند کانال قبلی خود را که در غرب کانال فعلی است ترک کند و در کانال فعلی جریان یابد (گراسیموف، ۱۹۷۸). سیلاب ۲۰ فروردین ۱۳۶۸، بهمن ۱۳۶۹، سیلاب سال ۱۳۸۴، ۱۳۹۵، ۱۳۹۸ نمونه‌هایی از سیلاب این رودخانه است (کیانی و همکاران، ۱۳۹۱؛ پژوهشکده سوانح طبیعی، ۱۳۹۸). سیلاب‌ها باعث تغییر مسیر رودخانه، برش مائدرها و مستقیم شدن مسیر آن‌ها و به وجود آمدن مائدرهای جدید می‌شود.

۳- خشکسالی: همراه با پدیده خشکسالی و کاهش دبی رودخانه هیرمند و گاهی خشک شدن رودخانه در بخش پایینرود، جابه‌جایی ماسه‌های روان به وسیله بادهای ۱۲۰ روزه شدت می‌گیرد. در سال‌هایی که بستر رودخانه خشک می‌شود، باد، بستر رودخانه را با ماسه‌های بادی پر می‌کند. با جریان یافتن رودخانه و مسدود بودن مسیر رودخانه با ماسه‌های روان، جریان رود تغییر پیدا می‌کند و مسیر آن جابه‌جا می‌شود (شکل ۹).



شکل ۸. پر شدن مسیر هیرمند با ماسه‌های بادی و جابه‌جایی آن به مسیر جدید در بازه پنجم

(منبع: نویسندگان، ۱۴۰۰)

## نتیجه‌گیری

رودخانه‌ها شبکه‌های ارتباطی مهم چرخه هیدرولوژی هستند. رفتار این شبکه و چگونگی عملکرد آن تحت تأثیر عوامل مختلفی قرار دارد. عوامل کنترل‌کننده رفتار هیدرولوژیکی رودخانه‌ها، شامل عوامل هیدرولیکی، زمین‌شناسی، خاک‌شناسی، ژئومورفولوژیکی، اقلیمی، پوشش گیاهی و خصوصیات فیزیوگرافی حوضه‌ها است. رفتار رودخانه در بخش‌های بالارود، میان‌رود و پایین‌رود نیز متفاوت است. تغییرات طولی رودخانه هیرمند به دلیل به‌وجود آمدن مائدرهای جدید یا از بین رفتن مائدرهای تکامل‌یافته و مستقیم‌شدن مسیر رودخانه است. نتایج حاصل از این تحقیق نشان می‌دهد که تغییرات قوسی رودخانه تحت تأثیر تغییرات شیب قرار دارد و در مناطق با شیب ملایم، تغییرات جزئی کاهشی یا افزایش شیب منجر به تغییرات قوسی می‌شود. در سال‌های خشکسالی تمام یا بخش‌هایی از بستر رودخانه به وسیله باد رسوب‌گذاری می‌شود و در هنگامی که رودخانه جریان می‌یابد، در برخورد با این موانع دچار تغییرات قوسی می‌شود. علاوه بر تغییرات طولی و قوسی، رودخانه هیرمند دارای جابه‌جایی عرضی نیز می‌باشد. در بازه چهارم در سال ۱۹۸۸ و در سال ۱۹۹۳ مسیر رودخانه از مسیر قبلی خود جابه‌جا شده است. بازه چهارم محل تغییر مسیر رودخانه هیرمند از مخروط‌افکنه قدیمی خود به سمت شهر سوخته به سمت مخروط‌افکنه جدید و حرکت رودخانه به سمت مرز مشترک ایران و افغانستان است. این تغییر واحد مورفولوژی از یک مخروط‌افکنه قدیمی به مخروط‌افکنه جدید، باعث تغییر رفتار رودخانه و بیشترین جابه‌جایی شده است. چون محدوده مورد بررسی از نظر ویژگی‌های خاک‌شناسی یکسان است (خاک‌های رسوبی رودخانه‌ای و رسوبات بادی)، بیشترین اثر در تغییرات مورفولوژیکی و تغییر مسیر مربوط به شیب است. شریفی‌کیا و همکاران روی الگوی تغییرات مکانی رودخانه هیرمند و المدرسی و همکاران روی عوامل مؤثر بر پیچان‌رود شدن و تغییرات رودخانه‌دالکی مطالعه کردند. نتایج پژوهش شریفی‌کیا و همکاران نشان‌دهنده این است که علاوه بر مسدود شدن آبراهه‌ها، شیب اندک و بافت رسی و در تحقیق المدرسی و همکاران شیب و جنس سازندها عاملی برای جابه‌جایی رودخانه بوده است که با نتایج این پژوهش مشابه است. نتایج این تحقیق نشان داد که هرچه از سال ۱۹۸۸ به سال ۲۰۱۸ می‌رویم، پارامترهای هندسه با توجه به تغییرات رود افزایشی داشته‌اند. این روند افزایشی پارامترهای هندسی و ضریب خمیدگی به دلیل تغییرات انسانی و طبیعی رخ داده در مسیر رودخانه است. میانگین ضریب خمیدگی در سال ۱۹۸۸ به مقدار ۱/۵ بوده، اما در سال ۲۰۱۸ به میزان ۲/۵ رسیده است. همین افزایش مبتنی تغییرات زیاد در مسیر و بستر رود است. در کل می‌توان نتیجه گرفت که تغییرات طولی و پیچ‌وخم رودخانه در منطقه مورد مطالعه در بازه ۱۹۸۸ تا ۲۰۱۸ از سال ۱۹۸۸ تا سال ۲۰۱۸ تغییراتی زیادی داشته است.

## منابع

- ارشد، صالح؛ مرید، سعید؛ میرابوالقاسمی، هادی. (۱۳۸۶). بررسی روند مورفولوژیکی رودخانه‌ها با استفاده از سنجش‌ازدور: مطالعه موردی رودخانه کارون از گتوند تا فارسیات (۸۲-۱۳۶۹)، مجله علوم کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، جلد چهاردهم، شماره ششم، صص ۱۹۵-۱۸۰.
- پژوهشکده سوانح طبیعی. (۱۳۹۸). گزارش سیلاب ۲۰ دی ۱۳۹۸ در استان سیستان و بلوچستان، صص ۱۰.
- دولتی، جواد. (۱۳۸۷). بررسی تغییرات ژئومورفولوژیکی بخش میانی رودخانه اترک با استفاده از GIS پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران، دانشکده جغرافیا، صص ۲۸۷.

- رجایی، عبدالحمید. (۱۳۷۳). ژئومورفولوژی کاربردی در برنامه‌ریزی محیطی، نشر قومس، تهران.
- رخشانی مهر، حکمتیار، (۱۳۹۳). بررسی تحلیل نقش اقلیم بر مسکن شهری (مطالعه موردی شهر زابل)، پایان نامه کارشناسی ارشد جغرافیا و برنامه ریزی شهری، استاد راهنما اکبر کیانی، دانشگاه زابل.
- رضائی مقدّم، محمدحسین، پیروزی نژاد، نوشین، (۱۳۹۳). بررسی تغییرات مجرا و فرسایش کناره‌ای در رودخانه گاماسیاب از سال ۱۳۳۴ تا ۱۳۸۹، نشریه علمی پژوهشی جغرافیا و برنامه‌ریزی، دانشگاه تبریز، دوره ۱۸، شماره ۴۷، صص ۱۳۲-۱۰۹.
- زمردیان، محمدجعفر؛ پورکرمانی، محسن. (۱۳۶۷). بحثی پیرامون ژئومورفولوژی استان سیستان و بلوچستان (۲)، ویژه‌نامه آب‌و‌خاک زابل، فصلنامه تحقیقات جغرافیایی، محمد حسین پاپلی یزدی، شماره ۹، سال سوم، صص ۱۲۲-۱۰۰.
- شریفی کیا، محمد؛ مال‌امیری، نعمت. (۱۳۹۲). آشکارسازی تغییرات مکانی رودخانه هیرمند و تحلیل مورفولوژی آن، مجله پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، انجمن ایرانی ژئومورفولوژی شماره ۴، صص ۱۴۹-۱۶۰.
- فرخی، زهرا؛ بارانی، غلام عباس؛ ارشد، صالح. (۱۳۸۴). بررسی تغییرات پلان رودخانه دز با استفاده از سنجش‌ازدور و GIS، پنجمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشگاه شهید باهنر کرمان، صص ۹-۱.
- کیانی، اکبر؛ فاضل‌نیا، غریب؛ رضایی، بیت‌الله. (۱۳۹۱). بررسی و اولویت‌سنجی مخاطرات محیط طبیعی شهر زابل، مجله جغرافیا و مطالعات محیطی، دانشگاه آزاد اسلامی نجف‌آباد، دوره ۱، شماره ۱، صص ۹۸-۱۱۱.
- المدرسی، سید علی؛ خبازی، مصطفی؛ علیایی، علی؛ شهبازی، میثم. (۱۳۹۷). بررسی نقش عوامل مؤثر بر پیمان‌رودشدن و تغییرات رودخانه دالکی با استفاده از سنجش‌ازدور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، مجله جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، دانشگاه اصفهان، دوره ۲۹، شماره ۱، صص ۱۷۶-۱۶۵.

[DOI: 10.22108/GEP.2018.97778.0](https://doi.org/10.22108/GEP.2018.97778.0)

- مقصودی، مهران؛ شرفی، سیامک؛ مقامی، یاسر. (۱۳۸۹). روند تغییرات الگوی مورفولوژیکی رودخانه خرم‌آباد با استفاده از AutoCad و GIS, RS. مجله برنامه‌ریزی و آمایش فضا (مدرس علوم انسانی)، دانشگاه تربیت مدرس، دوره ۱۴، شماره ۳، صص ۲۴۹-۲۷۵.
- مهندسان مشاور تهران سحاب. (۱۳۷۱). طرح بهره‌برداری بهینه از هیرمند، گزارش شماره ۲۸، زاهدان.
- میرزایی، محمدعلی. (۱۳۸۶). کلیات رودهای مرزی با تأکید بر ارس و هیرمند، رشد آموزش جغرافیا، آموزش و پرورش، دوره ۲۱، شماره ۴، صص ۲۳-۲۰.
- یمانی، مجتبی؛ فخری، سیروس. (۱۳۹۱). بررسی عوامل مؤثر بر تغییرات الگوی رودخانه جگین در جلگه ساحلی مکران، مجله جغرافیا، شماره ۳۴، صص ۱۴۱-۱۵۸.
- یمانی، مجتبی، شرفی، سیامک. (۱۳۹۱). پارامترهای هندسی و نقش آنها در تغییرات زمانی - مکانی بستر رودها نمونه موردی: هرود سرچشمه رود کرخه در استان کردستان، مجله جغرافیا و توسعه، دانشگاه سیستان و بلوچستان، شماره ۲۶، صص ۴۸-۳۵.

[DOI: 10.22111/GDIJ.2012.422](https://doi.org/10.22111/GDIJ.2012.422)

Burge, M.L. (2004). Testing links between river patterns and in channel characteristics using MRPP and ANOVA. *Geomorphology*, 63, pp. 115-130.

<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2004.03.010>

Casado, A., Peiry, J., Cambo, A.M., (2016). Geomorphic and vegetation changes in a meandering dryland river regulated bu a large dam, Sauce Grand River, Argentina *Geomorphology*, 268, 21-34.

Clerici, A., Perego, S., Chelli, A., Tellini, C., (2015). Morphological changes of the floodplain reach of the Taro River (Northern Italy) in the last two centuries, *Journal of Hydrology*, Volume 527, 1106-1122.

<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.05.063>

Dade, W.B., (2000). Grain size, sediment transport and alluvial channel pattern. *Geomorphology*. Volume 35, issues 1 p. 119-126.

DOI : 10.1016/S0169-555X(00)00030-1.

Di Silvio G and Nones M., (2013) Morphodynamic reaction of a schematic river to sediment input changes: Analytical approaches, pp 1-8.

DOI : [10.1016/j.geomorph.2016.05.036](https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.05.036)

Dort, W., Jr., 1978. Chael Migration Investigation, Historic Channel Chang Map, Kansas River and Tributaries Bank Stabilization Component, Kansas and Osage Rivers, Kansas Study, U.S. Army Corps of Engineers, Kansas City District. *Hungarian plain" Quaternary science Reviews*. 22. P. 2206.

Eaton BC, Millar, R.G., Davidsons, P., (2014). Channel patterns: braided, a ranching, and single thread. *Geography*. Volume 12, issues 3 p. 353-364.

<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.04.010>

Gerasimov, I.P., (1978). Ancient rivers in the deserts of soviet central Asia, in Brice, W.C., ed., *The environmental history of the Near and Middle East*: London, Academic Press, p 319-334.

<https://doi.org/10.1002/esp.3290180705>

Hickin, E.J., (1974). The development of meanders in natural river channels, *American Journal of Science* 274, P 414-442 .

Huggett, R. G., (2017). *Fundamentals of geomorphology*. Routledge, P. 225-229.

Jain, V., Sinha, R. (2005). Response of active tectonics on the alluvial Baghmata River, Himalayan foreland basin, eastern India. *Geomorphology*, Volume 70, issues 3-4, pages 339-359.

<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2005.02.012>

Knighton, A.D., Nanson, G.c., (1993). Anastomosis and the continuum of channel pattern, *Earth surface processes and landforms*, Volume 18, Issue 7, 613-625.

<https://doi.org/10.1002/esp.3290180705>

Leopold, L. B., & Wolman, M. G. (1960). River meanders. *Geological Society of America Bulletin*, 71(6), 769-793.

[https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1960\)71\[769:RM\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1960)71[769:RM]2.0.CO;2)

Miller, G.T., (1990). *Living in the environment: an introduction to environmental science*, 6th ed. Wadsworth Publishing Company, Belmont, California

Minh Hai, D., Umeda, S., Yuhi, M., (2019). Morphological changes of the lower Tedori River, Japan, over 50 Years. *Water* 11, no. 9: 1852.

<https://doi.org/10.3390/w11091852>

Ouchi, S. (1983). Response of active tectonics (New Mexico, California). PhD thesis. Colorado State University.

Pan, S. (2013). Application of Remote Sensing and GIS in studying changing river course in Bankura District, West Bengal. *International journal of Geomatics and Geosciences*, 4, 149-163.

Shum H. W. (1984), *River and Related Problems*, Symposium on River Meandering -june 1984, Colorado State . University, fort Collins, Colorado.

Ralph, T.J., Hesse, P., (2010). Downstream hydrogeomorphic changes along the Macquarie River, southeastern Australia, leading to channel breakdown and floodplain wetlands. *Geomorphology*. Volume 118, issues 1-2 p. 48-64.

DOI : 10.1016/j.geomorph.2009.12.007

- Singha, A., Balachandar, R., (2011). Structure of wake of a sharp – edged bluff body in a shallow channel flow. *Journal of Fluids and Structures*. 27 no. 2 233-249.  
DOI :10.1016/j.jfluidstructs.2010.11.001.
- Tamura, T., Horaguchi, K., Saito, Y., Van, L.N., Tateishi, M., Thi, K.O.T., Nanayama, F., Watanabe, K. (2010). Monsoon-influenced variations in morphology and sediment of a mesotidal beach on the Mekong River delta coast. *Geomorphology*. 116, no. 1-2. 11-23.  
DOI : 10.1016/j.geomorph.2009.10.003.
- Truong, SH., Ye, Q, Stive, M.J.F., (2017). Estuarine mangrove squeeze in the Mekong Delta, Vietnam. *Journal of Coastal Research*. 33, no, 4. 747-763.  
DOI :10.2112/JCOASTRES-D-16-00087.1.
- Turki, I., Medina, R., Gonzalez, M., Coco, G., (2013). Natural variability of shoreline position: observations at three pocket beaches. *Marine Geology*. 338. 76-89.  
DOI :10.1016/j.margeo.2012.10.007.
- Wang, W., Lu, H., Yang, D., Sothea, K., Jiao, Y, Gao, B., Pang, Z., (2016). Modelling hydrologic processes in the Mekong River basin using a distributed model driven by satellite precipitation and rain gauge observation. *PLOS ONE*. 11, no 3: 22-29.  
DOI : 10.1371/journal.pone.0152229.
- Williams, G.P., Wolman, M.G., (1984). *Professional Paper*. US Geological Survey; Washington, D.C. Downstream effects of dams on alluvial rivers. Pp1286-1289. 83 pp
- Xiaojun, Y., Damen, M., Zuidam, R.V., Gelder, A.V., Van den Berg, G.H., (1999). Satellite Remote Sensing and Geographic Information System for Monitoring and Morphodynamics of the Active Yellow River Delta. *China*. 0- 7803 40.  
DOI: 10.1109/IGARSS.1996.516948