

## **Probabilistic Modeling in Investigating the Factors Affecting Knickpoints Case Study: Zagros Mountain Belt, Ghaleh Shahrokh Basin**

**Hamed Adab<sup>1</sup>, Mahnaz Shiran<sup>2</sup>, Seyyed Mehdi Pourbagher<sup>3\*</sup>**

1- Assistant Professor of Remote Sensing, Faculty of Geography and Environmental Sciences, University of

Hakim Sabzevari, Sabzevar, Iran

2- PhD student of Geomorphology, Faculty of Geography and Environmental Sciences, University of Hakim Sabzevari, Sabzevar, Iran

3- Assistant Professor of Geomorphology, Faculty of Geography, Payame Noor University, Tehran, Iran

(\*Corresponding Author Email: m.pourbagher@pnu.ac.ir)

### **Extended Abstract:**

#### **Introduction:**

Rivers react to subsidence at their baseline by cutting and digging topographic features. The development of an upstream incision is often accompanied by a steep fracture called a river break (Loget & Van Den Driessche, 2009). The presence of river breaks in a geographical landscape is an indication of a steady-state in river systems. Therefore, the presence of knickpoints shows the system instability. The study of knickpoints can be used in the field of studies related to the evolution of valleys, identification of tectonic active areas and rock outcrops, river surface changes, erosion and sedimentation, and geomorphological changes in river systems. The basin studied in this study is located in the Qaleh Shahrokh-Chelgard area in the northeastern part of Chaharmahal and Bakhtiari province, Iran. The reason for selecting this basin is the extensive activities of the Zagros fault along the northwest-southeast and the existence of a hydrographic network affected by the trend of faults and the potential for knickpoints.

#### **Methodology:**

In this study, the locations of knickpoints were detected from the Radiometrically Terrain-Corrected (RTC) model which is extracted from the active microwave sensor ALOS PALSAR with a spatial resolution of 12 meters (Logan *et al.*, 2014) as input data to the MATLAB executive toolbox called Tec DEM. Tec DEM is an executable toolbox in MATLAB software and uses a Digital Elevation Model (DEM) as input for morphotectonics in the basin. Tec DEM tool can be used in a variety of fields in the analysis of surface anomalies, drainage network and surface dynamics of basins, production of base maps, incisions (local roughness), vertical dissection and drainage density of basins and sub-basins, determination of turning points or knickpoints, hypsometric analysis and slope and concavity index of canal profiles (Shahzad & Gloaguen, 2011). The determination of knickpoints according to the shape of the longitudinal profile of the river is done semi-automatically. In this study, these points in the study areas were investigated according to field observations.

In this study, geological variables and geomorphic variables related to knickpoints were used to identify the knickpoints. Information layers including geology, distance from the fault, distance from the boundary of geological formations, surface roughness index, fractal dimension, base surfaces, local roughness, and the vertical dissection as predictor variables and the layers of knickpoints as the prediction variables were used for modeling. For geological and tectonic studies of the region,

geological maps of 100,000 sheets of Chadegan and Fereydunshahr and 250,000 sheets of Shahrekord were used. A total of 8 raster layers were used to analyze and predict the possibility of the presence of a knickpoint in the study area. Since 8 layers have different units and are not suitable as direct input for logistic regression, the input parameters were normalized in the range of 0 to 1. Nominal layers, such as geological data, became sequential variables between 0 and 1. All of these layers were then re-sampled as a network format with a cell size of 195\*195 m using the nearest neighbor method, to allow all layers to be combined. Then, a matrix of square cell structure was prepared for the study area. It consisted of a matrix of 273 rows and 273 columns representing a total of 39,650 cells. Of these, 74 cells were identified as knickpoint points. These areas were identified with code 1 (presence of knickpoint) and the rest of the cells that did not have knickpoints were recorded with code 0 (absence of knickpoint).

### **Discussion:**

The probabilistic relationship of the presence of a knickpoint as one of the important results of the research was obtained by the logistic regression method. This relationship predicted the probability of the presence of knickpoints based on geological and geomorphic variables. The probability map of the knickpoints in the study area was obtained based on the statistical relationship. According to the results, there is a possibility of river knickpoints in the southwestern regions and parts of the northeastern Basin. The results of the probability ratio test to determine the statistical significance of each of the independent variables in the proposed model showed that the geology and the distance from the boundaries of the geological formations in the model were significant. The results of the Yuden index for the training dataset, validation, and test data were equal to 0.72, 0.76, and 0.66, respectively, which indicated the accurate information on the probability status of knickpoint points, especially for the test data of the model. The results of the Kappa agreement coefficient for training, validation, and test data were also equal to 0.62, 0.73, and 0.60, respectively, which indicated the agreement of both methods with the observed values of knickpoints.

### **Conclusion:**

The results of this study showed that at the boundary of lithology, because of the presence of joints and cracks due to differences in the type of rocks, the probability of the presence of river break was more than other parts of the region. Although the presence of some relatively high slope knickpoints indicated active tectonics in that area, in the present study, the effect of the fault system or active tectonics in the formation of knickpoints was not statistically significant. Particularly, the reduction of local roughness index and baselines was associated with less tectonic activity, but in this study, the appearance of knickpoints has been associated with a decrease in these two factors.

**Keywords:** Ghaleh Shahrokh Basin, Logistic Regression, Knickpoint, Probabilistic Modeling.

### **References:**

- Alexander, J., & Leeder, M. R. (1990). Geomorphology and Surface Tilting in an Active Extensional Basin, SW Montana, USA. *Journal of the Geological Society*, 147(3), 461-467.
- Aman, M. A., Yunus, A. P., & Javed, A. (2020). Fluvial Knickpoint Identification and Their Characterizations in the Drainage Basins of Western Ghats, India. *Spatial Information Research*,

1-10.

- Ayalew, L., & Yamagishi, H. (2005). The Application of GIS-Based Logistic Regression for Landslide Susceptibility Mapping in the Kakuda-Yahiko Mountains, Central Japan. *Geomorphology*, 65(1-2), 15-31.
- Berlin, M. M., & Anderson, R. S. (2007). Modeling of Knickpoint Retreat on the Roan Plateau, Western Colorado. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 112(3), 1-16.
- Bishop, P. (2007). Long-Term Landscape Evolution: Linking Tectonics and Surface Processes. *Earth Surface Processes and Landforms. The Journal of the British Geomorphological Research Group*, 32(3), 329-365.
- Boulton, S. J. (2020). Geomorphic Response to Differential Uplift: River Long Profiles and Knickpoints from Guadalcanal and Makira (Solomon Islands). *Frontiers in Earth Science*, 10(8), 1-23
- Bowman, D., Shachnovich-Firtel., Y., & Devora, S. (2007). Stream Channel Convexity Induced by Continuous Base Level Lowering, The Dead Sea, Israel. *Geomorphology*, 92(1-2), 60-75.
- Gardner, T. W. (1983). Experimental Study of Knickpoint and Longitudinal Profile Evolution in Cohesive, Homogeneous Material. *Geological Society of America Bulletin*, 94(5), 664-672.
- Gilbert, G. K. (1896). *Niagara Falls and Their History*. USA: American Book Company.
- Gonga-Saholiariliva, N., Gunnell, Y., Harbor, D., & Mering, C. (2011). An Automated Method for Producing Synoptic Regional Maps of River Gradient Variation: Procedure, Accuracy Tests, and Comparison with Other Knickpoint Mapping Methods. *Geomorphology*, 134(3-4), 394-407
- Hayakawa, Y. S., & Oguchi, T. (2006). DEM-Based Identification of Fluvial Knickzones and Its Application to Japanese Mountain Rivers. *Geomorphology*, 78(1-2), 90-106.
- Heine, R. A., & Lant, C. L. (2009). Spatial and Temporal Patterns of Stream Channel Incision in the Loess Region of the Missouri River. *Annals of the Association of American Geographers*, 99(2), 231-253.
- Kamintzis, J. E., Irvine-Fynn, T. D. L., Holt, T. O., Jones, J. P. P., Tooth, S., Griffiths, H. M., & Hubbard, B. (2019). Knickpoint Evolution in a Supraglacial Stream. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, 101(2), 118-135.
- Lee, S. I., Lee, H., Abbeel, P., & Ng, A. Y. (2006). Efficient L1 Regularized Logistic Regression. *In Aaai*, 6, 401-408.
- Loget, N., & Van Den Driessche, J. (2009). Wave Train Model for Knickpoint Migration. *Geomorphology*, 106(3-4), 376-382.
- Mackey, B. H., Scheingross, J. S., Lamb, M. P., & Farley, K. A. (2014). Knickpoint Formation, Rapid Propagation, and Landscape Response Following Coastal Cliff Retreat at the Last Interglacial Sea-Level Highstand: Kaua 'i, Hawai 'i. *Geological Society of America Bulletin*, 126(7-8), 925-942.
- Marrucci, M., Zeilinger, G., Ribolini, A., & Schwanghart, W. (2018). Origin of Knickpoints in an Alpine Context Subject to Different Perturbing Factors, Stura Valley, Maritime Alps (North-Western Italy). *Geosciences*, 8(12), 443.
- Miller, J. R. (1991). The Influence of Bedrock Geology on Knickpoint Development and Channel-Bed Degradation Along Downcutting Streams in South-Central Indiana. *The Journal of Geology*, 99(4), 591-605.
- Muehlbauer, J. D., & Doyle, M. W. (2012). Knickpoint Effects on Macroinvertebrates, Sediment, and Discharge in Urban and Forested Streams: Urbanization Outweighs Microscale Habitat

- Heterogeneity. *Freshwater Science*, 31(2), 282-295.
- Nakas, C. T. (2014). Developments in Roc Surface Analysis and Assessment of Diagnostic Markers in Three-Class Classification Problems. *REVSTAT – Statistical Journal*, 12(1), 43-65.
  - Ouimet, W. B., Whipple, K. X., Royden, L. H., Sun, Z., & Chen, Z. (2007). The Influence of Large Landslides on River Incision in a Transient Landscape: Eastern Margin of the Tibetan Plateau (Sichuan, China). *Geological Society of America Bulletin*. 119(11-12), 1462-1476.
  - Pavano, F., Pazzaglia, F. J., & Catalano, S. (2016). Knickpoints as Geomorphic Markers of Active Tectonics: A Case Study from Northeastern Sicily (Southern Italy). *Lithosphere*, 8(6), 633-648.
  - Peifer Bezerra, D., & Persano, C. (2017). Identifying Knickpoints Using Elevation Breaks and Offsets in Slope-Area Scaling. *Geophysical Research Abstracts of EGU General Assembly Conference*.
  - Phillips, J. D., McCormack, S., Duan, J., Russo, J. P., Schumacher, A. M., Tripathi, G. N., ... & Pulugurtha, S. (2010). Origin and Interpretation of Knickpoints in the Big South Fork River Basin, Kentucky–Tennessee. *Geomorphology*, 114(3), 188-198.
  - Saadat, M., Khandelwal, M., & Monjezi, M. (2014). An ANN-Based Approach to Predict Blast-Induced Ground Vibration of Gol-E-Gohar Iron Ore Mine, Iran. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 6(1), 67-76.
  - Schumm, S. A., Dumont, J. F., & Holbrook, J. M. (2002). *Active Tectonics and Alluvial Rivers*. Cambridge: Cambridge University Press.
  - Shahzad, F., & Gloaguen, R. (2011a). TecDEM: A MATLAB Based Toolbox for Tectonic Geomorphology, Part 1: Drainage Network Preprocessing and Stream Profile Analysis. *Computers & Geosciences*, 37(2), 250-260.
  - Shahzad, F., & Gloaguen, R. (2011b). TecDEM: A MATLAB Based Toolbox for Tectonic Geomorphology, Part 2: Surface Dynamics and Basin Analysis. *Computers and Geosciences*, 37(2), 261-271.
  - Verdel, C., Wernicke, B. P., Ramezani, J., Hassanzadeh, J., Renne, P. R., & Spell, T. L. (2007). Geology and Thermochronology of Tertiary Cordilleran-Style Metamorphic Core Complexes in the Saghand Region of Central Iran. *Geological Society of America Bulletin*, 119(7-8), 961-977.
  - Viera, A. J., & Garrett, J. M. (2005). Understanding Interobserver Agreement: The Kappa Statistic. *Family Medicine Research Series*, 37(5), 360-363.
  - Wohl, E. E. (1992). Gradient Irregularity in the Herbert Gorge of Northeastern Australia. *Earth Surface Processes and Landforms*, 17(1), 69-84.
  - Zhu, W., Zeng, N., & Wang, N. (2010). Sensitivity, Specificity, Accuracy, Associated Confidence Interval and ROC Analysis with Practical SAS Implementations. *NESUG Proceedings: Health Care and Life Sciences, Baltimore, Maryland*, 19, 67.

## مدل‌سازی احتمالاتی در بررسی عوامل مؤثر بر ایجاد رودشکن‌ها نمونه پژوهش: کمربند کوهستانی زاگرس، حوضه قلعه شاهرخ

حامد ادب، استادیار سنجش از دور، دانشکده جغرافیا و علوم محیطی، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران

h.adab@hsu.ac.ir

مهناز شیران، دکترای تخصصی ژئومورفولوژی، دانشکده جغرافیا و علوم محیطی، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران.

mahnaz.shiran@gmail.com

سیدمهدی پورباقر\*، استادیار ژئومورفولوژی، گروه جغرافیا، دانشگاه پیام‌نور، تهران، ایران

m.pourbagher@pnu.ac.ir

### چکیده

رودشکن‌ها از لندفرم‌های پرشیب رودخانه‌ای هستند که در تحول سیستم‌های رودخانه‌ای اهمیت دارند. این پژوهش با هدف شناسایی عوامل مؤثر بر ایجاد رودشکن و تعیین مناطق مستعد ایجاد رودشکن در حوضه قلعه شاهرخ با استفاده از روش رگرسیون لجستیک باینری انجام شده است. بدین منظور عوامل مؤثر بر ایجاد رودشکن انتخاب شدند و سپس ارتباط آنها با پراکنش رودشکن‌ها بررسی شد؛ در ادامه متغیرهای تأثیرگذار و میزان تأثیر آنها بر رودشکن تعیین و مدل پیش‌بینی با رگرسیون لجستیک روی این متغیرها انجام شد. نتایج آزمون درست‌نمایی در مدل ارائه شده نشان می‌دهد زمین‌شناسی و فاصله از مرزهای سازندهای زمین‌شناسی در مدل معنادارند. تحلیل نتایج نشان می‌دهد با کاهش مقدار در شاخص‌های بریدگی و سطوح هم‌پایه، فاصله از مرزهای سازندهای زمین‌شناسی و با افزایش برش عمودی احتمال وجود رودشکن افزایش می‌یابد. درباره سایر عوامل استفاده شده، رابطه‌ای دیده نشد. دقت ۸۷ درصدی داده‌های آزمون در نمودار راک بیان‌کننده دقت زیاد مدل در تشخیص درست نقاط رودشکن در حوضه قلعه شاهرخ است. نتیجه شاخص بودن برای داده‌های آزمون ۰/۶۶ است که ارائه اطلاعات درست از وضعیت احتمال نقاط رودشکن به‌ویژه برای داده‌های آزمون مدل را نشان می‌دهد. نتیجه ضریب توافق کاپا برای داده‌های آزمون ۰/۶۰ است که تطابق و توافق هر دو روش را با مقادیر مشاهداتی نقاط رودشکن نشان می‌دهد. براساس نتایج این پژوهش، سازندهای زمین‌شناسی و توپوگرافی در رخداد رودشکن‌ها در منطقه مطالعه شده نقش مهمی دارند و رگرسیون لجستیک نیز، مدل مناسبی برای پیش‌بینی وقوع رودشکن است.

**کلید واژه‌ها:** حوضه قلعه شاهرخ، رگرسیون لجستیک، رودشکن، مدل‌سازی احتمالاتی

## مقدمه

برهم‌کنش عوامل خارجی مانند اقلیم و عواملی مانند تکتونیک و سطح اساس، اهمیت اساسی در روند تحول سیستم‌های رودخانه‌ای دارد. در مناطق فعال تکتونیک، فعالیت‌های تکتونیک ممکن است مستقیماً بر سیستم‌های رودخانه با تغییر در شیب کانال و در نتیجه تغییر قدرت جریان یا کج‌شدگی مسیر کانال و تغییر شکل‌های سطحی تأثیر بگذارد. اشکال ژئومورفولوژیکی در مناطق دریاچه‌های بزرگ، شواهدی دال بر پاسخ تدریجی فرایندهای سطحی از گذشته‌های دور در اثر فعالیت‌های تکتونیک ارائه می‌دهند (Alexander and Leeder, 1990: 461)؛ به بیان دیگر سیستم‌های رودخانه‌ای در خلال دوره‌های فعال تکتونیک بیشتر الگوهای واکنشی پیچیده را در مجموعه‌های ژئومورفولوژیکی و رسوبی نشان می‌دهند. رودخانه‌ها به فرونشینی سطح اساس با برش و حفر توپوگرافی پاسخ می‌دهند.

توسعه یک برش در بالادست اغلب با شکستگی پرشیب همراه است که به آن رودشکن<sup>۱</sup> می‌گویند و به پارامترهای مختلفی از جمله مساحت حوضه، لیتولوژی، میزان فرونشست و دیگر عوامل بستگی دارد (Loget and Van Den Driessche, 2009: 376). نقاط رودشکن به شکل شکستگی‌های پرشیب در نیمرخ طولی یک رودخانه‌اند که باعث تغییرات شیب کانال آبراهه می‌شوند و به شکل تنداب یا آبشار نمود می‌یابند؛ همچنین رودشکن به معنای ناهنجاری شیب رودخانه است که بین یک گرادیان بالا و گرادیان پایین شیب توپوگرافی واقع می‌شود (Berlin and Anderson, 2007: 1).

برای بازه‌های پله‌ای پرشیب در کانال آبراهه و پروفیل‌های محدب که به‌طور گسترده‌ای بیش از ده کیلومتر طول دارند، اصطلاح منطقه رودشکن<sup>۲</sup> استفاده می‌شود (Gonga-Saholiariliva et al., 2011: 395). نیمرخ طولی رودخانه شیب‌دار<sup>۳</sup> که معمولاً رودشکن نامیده می‌شود، در واقع نوعی شاهد ژئومورفولوژیکی متأثر از آشفستگی‌های تکتونیک، اقلیمی و سایر آشفستگی‌ها مانند اسارت رودخانه و تغییرات سطح دریا در نیمرخ طولی رودخانه است؛ از این رو حضور رودشکن‌ها در یک چشم‌انداز جغرافیایی نشانه‌ای مبنی بر خروج از حالت پایدار یا یکنواختی فضایی شرایط مرزی در سیستم‌های رودخانه‌ای است و در نتیجه ناپایداری سیستم را نشان می‌دهد (Peifer Bezerra and Persano, 2017: 1).

رودشکن‌ها شرایط متفاوت و فرایندهای رودخانه‌ای را بازتاب می‌دهند و بیشتر با عوامل تکتونیک، اقلیمی یا لیتولوژیکی کنترل می‌شوند (Mackey et al., 2014: 925)؛ در واقع رودشکن‌ها محل بروز آشفستگی و تغییرات ناگهانی در نیمرخ آبراهه هستند. بسیاری از این نقاط ناشی از فرسایش‌های جریان، آشفستگی‌های بستر، تغییرات لیتولوژیکی و حتی فعالیت‌های انسانی هستند که بر هیدرولوژی و ژئومورفولوژی سیستم جریانی تأثیر می‌گذارند (Heine and Lant, 2009: 233). نقاط رودشکن پس از ایجاد حالت ایستا ندارند و پدیده‌ای دینامیک هستند و به بالادست مهاجرت می‌کنند. این مهاجرت باعث ایجاد فرسایش پس‌رونده و بالاکند<sup>۴</sup> می‌شود و تعادل سیستم جریانی را به هم می‌زند. نقاط رودشکن یک توالی از جریان-خیزاب-حوضچه<sup>۵</sup> ایجاد می‌کنند که ویژگی‌های متفاوتی را از نظر ژئومورفولوژیکی در محدوده‌های

1. Knickpoint
2. Knickzone
3. Steepened longitudinal river profile
4. Headcut
5. Run-riffle-pool sequence

کوچک جغرافیایی شکل می‌دهد؛ از طرفی برای اکولوژیست‌ها نیز جالب توجه است؛ زیرا در مقیاس میکرو، این نقاط محل تنوع زیستی گونه‌های متفاوتی هستند (Muehlbauer and Doyle, 2012: 283).

یکی از کاربردهای مهم شناسایی رودشکن‌ها در مطالعات به تکتونیک فعال مربوط است. تکتونیک فعال و فرایندهای ژئودینامیکی با تغییر شکل‌های سطحی و صخره‌ها با توجه به نشانه‌های ژئومورفیک و چینه‌شناسی سنجیده می‌شوند؛ برای نمونه نیمرخ طولی آبراهه‌ها و شبکه زهکشی به‌ویژه به تغییرات سطح اساس بسیار حساس هستند. با فرونشینی سطح اساس، نشانه‌های ژئومورفولوژیکی مانند تراس‌ها و رودشکن‌ها با برش‌های ناپایدار رودخانه ایجاد می‌شوند (Pavano et al., 2016: 634). مطالعه نقاط رودشکن در روند تحول دره‌ها، شناسایی مناطق فعال تکتونیکی و فرایش یا برخاستگی<sup>۱</sup> صخره‌ها، تغییرات لیتولوژیکی بستر کانال‌ها، تغییرات سطح اساس پهنه‌های آبی، تغییرات فرسایش و رسوب و تحولات ژئومورفولوژیکی سیستم‌های رودخانه‌ای نقش مهمی ایفا می‌کند.

مطالعات متعددی درباره شناسایی و بررسی نقاط رودشکن انجام شده است. شاید اولین رودشکن‌هایی که توجه ژئومورفولوژیست‌ها را جلب کردند، آبشارهایی بودند که قدرت جریان آنها در تماس با سنگ‌بستر طی سقوط آزاد از بین می‌رفته است (Gilbert, 1896: 213).

گاردنر<sup>۲</sup> (1983) نقاط رودشکن و روند تحول نیمرخ آبراهه را در مواد همگن و یکپارچه بررسی کرد. میلر<sup>۳</sup> (1991) تأثیرات سنگ‌بستر را بر گسترش نقاط رودشکن و فرسایش بستر کانال در امتداد پایین‌دست نقطه برش مطالعه کرد.

بعضی مطالعات در زمینه رودشکن‌ها روی الگوهای شبکه جریان و پروفیل جریان به‌منظور تعمیم پاسخ‌های چشم‌انداز به تغییرات ساختارهای زمین‌شناسی و سایر فرایندهای ژئومورفیک انجام شده است. هریک از دانشمندان در مطالعه رودشکن‌ها برای منطقه پژوهش خود بر عامل خاصی تأکید داشته‌اند؛ برای نمونه میلر (1991) نقش عامل لیتولوژی را در شکل‌گیری زون‌های رودشکن برجسته دانسته است.

باومن و همکاران<sup>۴</sup> (2007) بر عامل تغییرات سطح پایه رودخانه تأکید کرده‌اند. به گفته فیلیپس و همکاران<sup>۵</sup> (2010) مطالعات بر پایه بررسی علل مختلف در ایجاد رودشکن‌ها در یک سیستم رودخانه‌ای کمتر مدنظر بوده است.

پژوهشگرانی نیز مدل‌سازی نقاط رودشکن را بررسی کرده‌اند؛ برای نمونه شهزاد و گلوگان<sup>۶</sup> (2011) با طراحی افزونه‌ای در محیط متلب، تکتونیک فعال را به کمک مدل رقومی ارتفاع مطالعه کردند که در آن امکان بررسی نیمرخ رودخانه و مشخص کردن نقاط رودشکن وجود دارد.

- 
1. Uplifting
  2. Gardner
  3. Miller
  4. Bowman et al.
  5. Phillips et al.
  6. Shahzad and Gloaguen

پاوانو و همکاران<sup>۱</sup> (2016) ارتباط حضور نقاط رودشکن را با تکتونیک فعال بررسی کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد هر جایی از بستر رودخانه که رودشکن‌های پرشیب دارد، تکتونیک عامل ایجاد آن بوده است.

ماروسی و همکاران<sup>۲</sup> (2018) با بررسی نقاط رودشکن و نیمرخ رودخانه در یک دره در شمال غرب ایتالیا، تکامل حوضه‌های جداشده در آن را بازسازی کردند.

کامینتزیس و همکاران<sup>۳</sup> (2019) برای نخستین بار نقاط رودشکن را در یک جریان یخچالی بزرگ در سوئیس بررسی کردند و نشان دادند این نقاط به رژیم‌های تخلیه این جریان یخچالی ارتباط دارند.

عمان و همکاران<sup>۴</sup> (2020) رودشکن‌ها را در سه رودخانه غرب هند بررسی کردند و نشان دادند مستعدترین نقاط برای ایجاد رودشکن سنگ‌های دگرگونی منطقه بوده‌اند؛ همچنین بارندگی‌های شدید تابستانی منطقه در ایجاد تغییرات سطح پایه محلی رود تأثیر داشته است.

بولتون<sup>۵</sup> (2020) با مطالعه نقاط رودشکن در سلسله‌جزایر سلیمان، تکامل ژئومورفولوژیکی چشم‌اندازها را در این منطقه بررسی کرده است.

در پژوهش حاضر، مدلی برپایه ویژگی‌های مورفومتری، ژئومورفولوژی و لیتولوژی برای پیش‌بینی نقاط رودشکن طراحی شد. منطقه پژوهش در یک منطقه فعال تکتونیک و پیچیده از نظر ساختارهای لیتولوژیکی و زمین‌شناسی قرار گرفته است و نقاط رودشکن متعددی در نیمرخ آبراهه‌های آن دیده می‌شود.

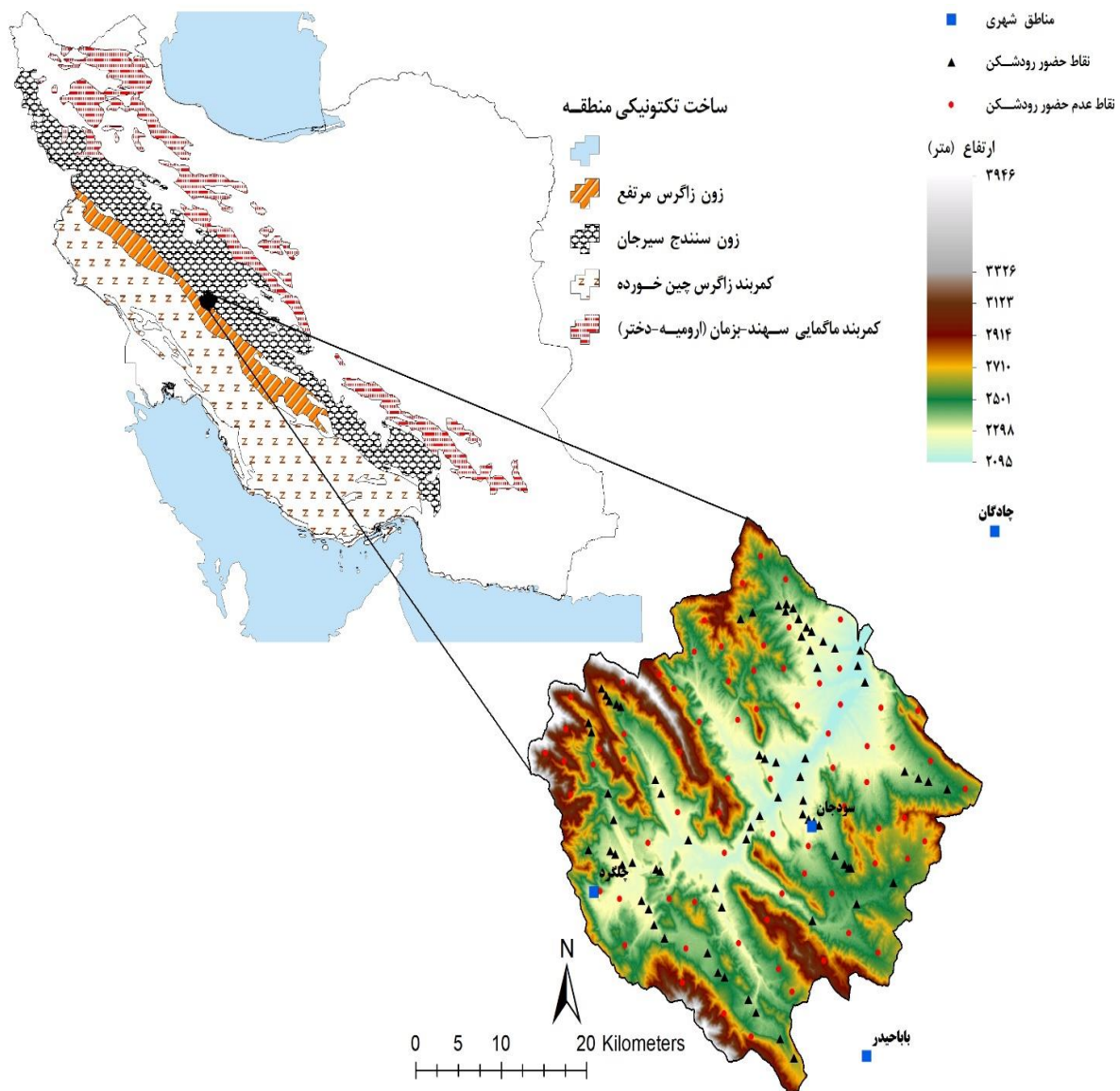
هدف اصلی این پژوهش، مدل‌سازی آماری رودشکن‌ها و بررسی ارتباط آن با سایر متغیرها برای شناسایی احتمال حضور رودشکن‌ها در یک سیستم زهکش پهناور است. شناسایی رودشکن‌ها علاوه بر جاذبه‌های گردشگری در ایجاد سایت‌های سدهای برقایی (Gardner, 1983: 665) و برای تحلیل فرایندهای رودخانه مانند مطالعه الگوهای برش و ناهمواری محلی در رودخانه‌ها جالب توجه هستند (Bishop, 2007: 344). برای شناسایی رودشکن از روش متداول استفاده می‌شود که براساس مدل رقومی ارتفاع است (Hayakawa and Oguchi, 2006: 90).

### منطقه پژوهش

حوضه مطالعه‌شده در این پژوهش، در منطقه قلعه شاهرخ- چلگرد در بخش شمال شرق استان چهارمحال و بختیاری قرار دارد. موقعیت این حوضه از نظر قرارگیری در زون‌های ساختاری ایران حائز اهمیت است. گسل بزرگ و سراسری زاگرس از میان این حوضه عبور کرده و گسل فعال اردل به‌مثابه بخشی از تراس اصلی زاگرس بر این زیرحوضه از لحاظ تکتونیک تأثیر گذاشته است. کمربند کوه‌زایی زاگرس بخشی از سیستم کوه‌زایی آلپ- هیمالیاست. بیشتر سطح پلیت ایران به شکل نسبتاً یکنواختی با رسوبات قاره‌ای دوران پالئوزوئیک پوشیده شده است که مشابه آن

- 
1. Pavano et al
  2. Marrucci et al.
  3. Kamintzis et al.
  4. Aman et al.
  5. Boulton

روی سطح پلتفرم عربی نیز وجود دارد. در امتداد محل تصادم بین دو صفحه عربی و اوراسیا، گسل یا رانندگی بزرگ زاگرس ایجاد شده است و در شمال این گسل یک کمربند حاشیه‌ای شامل سنگ‌های دگرگونی به نام زون سنندج-سیرجان وجود دارد (Verdel et al., 2007: 962). حوضه مدنظر در چنین ساختار پیچیده‌ای از نظر زمین‌شناسی قرار گرفته و شامل هر دو زون زاگرس مرتفع و سنندج-سیرجان و گسل اصلی زاگرس است. این حوضه در بالادست و سرچشمه رودخانه زاینده‌رود به‌منزله یکی از بزرگ‌ترین حوضه‌های ایران مرکزی واقع شده است. زیرحوضه‌های این حوضه متأثر از فعالیت‌های گسل زاگرس در امتداد شمال غربی-جنوب شرقی شکل گرفته و شبکه هیدروگرافی متأثر از روند گسل‌ها در منطقه است (شکل ۱).



شکل ۱. موقعیت محدوده مطالعاتی (حوضه قلعه شاهرخ) در زون‌های ساختاری ایران (نویسندگان، ۱۳۹۹)

Figure 1. Location of the study area (Ghaleh Shahrokh Basin) in the structural zones of Iran (Authors, 2021)

## روش‌شناسی و متغیرهای پژوهش

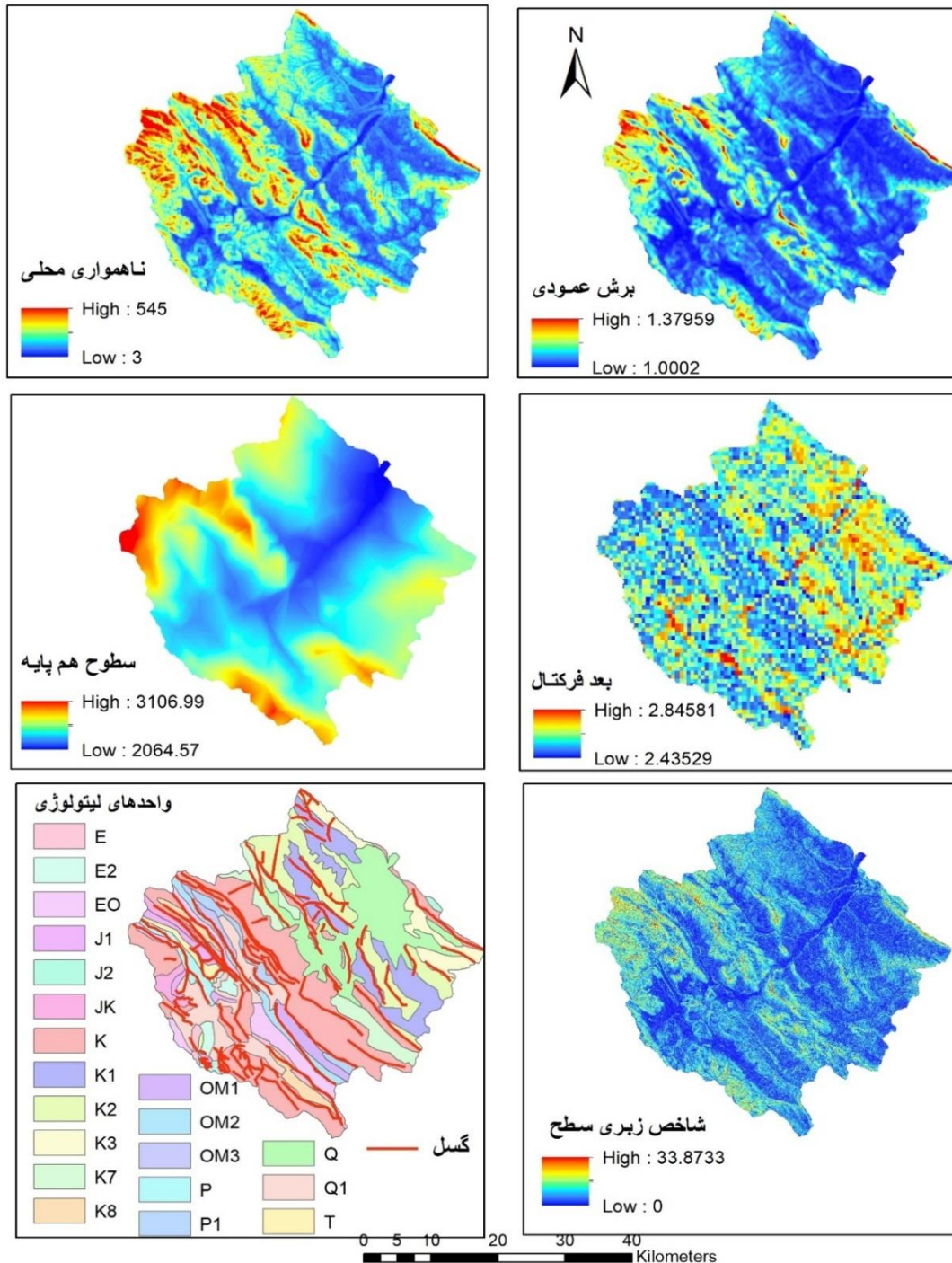
برای آشکارسازی و تعیین مکان رودشکن‌ها از مدل رقومی ارتفاع تصحیح‌شده<sup>۱</sup> مستخرج از سنجنده مایکروویو فعال ALOS PALSAR با توان تفکیک مکانی ۱۲ متر به‌مثابه داده ورودی به جعبه‌ابزار اجرایی متلب با عنوان تکنیک مدل رقومی ارتفاع در متلب یا تکنیک Tec DEM استفاده شد. Tec DEM یک جعبه‌ابزار<sup>۲</sup> اجرایی در نرم‌افزار متلب است و برای بررسی مورفوتکتونیک در حوضه از مدل رقومی ارتفاع به‌مثابه ورودی استفاده می‌کند (Shahzad and Gloaguen, 2011: 250). مدل‌های رقومی ارتفاع به‌مثابه یک جایگزین مناسب برای نقشه‌های قدیمی توپوگرافی، ابزاری کارآمد برای کمی‌سازی تأثیرات فرایندهای تکتونیکی بر تغییرات سطحی و تکامل چشم‌اندازهای زمین محسوب می‌شوند. Tec DEM قادر به تحلیل دینامیک سطحی و تحلیل بعضی شاخص‌های مورفومتریک حوضه در پاسخ به تکتونیک است و از مدل‌های رقومی ارتفاع به‌مثابه مبنای ورودی برای تحلیل‌های ساختارهای زهکشی و مورفومتریک حوضه‌ها بهره می‌برد (Shahzad and Gloaguen, 2011: 261). از توانایی‌های این ابزار در تحلیل ناهنجاری‌های سطحی، شبکه زهکشی و دینامیک سطحی حوضه‌ها، تولید نقشه‌های هم‌پایه<sup>۳</sup>، بریدگی‌ها (ناهمواری محلی)<sup>۴</sup>، برش عمودی<sup>۵</sup> و تراکم زهکشی<sup>۶</sup> حوضه‌ها و زیرحوضه‌ها، تعیین نقاط عطف یا رودشکن، تحلیل فراسنجی<sup>۷</sup> و بررسی شاخص شیب<sup>۸</sup> و تقعر<sup>۹</sup> نیمرخ آبراهه‌ها و شاخص تقارن توپوگرافی عرضی<sup>۱۰</sup> است (همان).

براساس مطالعات اویمت و همکاران<sup>۱۱</sup> (2007)، لوگت و دریسچ<sup>۱۲</sup> (2009) حضور و جابه‌جایی رودشکن‌ها به پارامترهای مختلفی نظیر ویژگی‌های شبکه زهکشی، سنگ‌شناسی، دامنه کاهش سطح پایه و شیب‌های تند توپوگرافی بستگی دارد؛ حتی ویژگی‌های ساختاری مانند گسل‌ها و شکستگی‌ها نیز ممکن است به ایجاد رودشکن‌ها منجر شود (Phillips et al., 2010: 189)؛ بنابراین در این پژوهش، از متغیرهای زمین‌شناسی و متغیرهای ژئومورفیک مرتبط با رودشکن‌ها استفاده شد. از لایه‌های اطلاعاتی شامل زمین‌شناسی، فاصله از گسل، فاصله از مرز سازندهای زمین‌شناسی، شاخص زبری سطح<sup>۱۳</sup>، بُعد فرکتال، سطوح هم‌پایه، ناهمواری محلی و برش عمودی به‌مثابه متغیرهای پیش‌بینی‌کننده (شکل ۲) و لایه نقاط رودشکن به‌مثابه متغیر پیش‌بینی‌شونده استفاده شد (جدول ۱).

برای بررسی‌های زمین‌شناسی و تکتونیک منطقه از نقشه‌های زمین‌شناسی برگه‌های یکصد هزار چادگان و فریدون‌شهر و برگه ۲۵۰ هزارم شهرکرد استفاده شد. به دلیل صعب‌العبوربودن مناطق کوهستانی زاگرس مرتفع و

1. Radiometrically terrain-corrected (RTC)
2. Toolbox
3. Isobase
4. Incision
5. Vertical dissection
6. Drainage Density
7. Hypsometry
8. Steepness
9. Concavity
10. Transverse topographic symmetry factor
11. Ouimet et al.
12. Loget and Driessche
13. Terrain Ruggedness Index (TRI)

گسترده‌گی منطقه، کار براساس کنترل‌های لازم از طریق تصاویر گوگل‌ارث و نقشه‌های توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰ سازمان جغرافیایی ارتش ایران صورت گرفت.



شکل ۲. لایه‌های اطلاعاتی شامل زمین‌شناسی، گسل، شاخص زبری سطح، بعد فرکتال، سطوح هم پایه، ناهمواری محلی، برش عمودی (نویسندگان، ۱۳۹۹)

Figure 2. Information layers including geology, fault, surface roughness index, fractal dimension, base surfaces, local roughness, vertical dissection (Authors, 2021)

## جدول ۱. متغیرهای مستقل استفاده‌شده برای بررسی ارتباط آماری با نقاط رودشکن

Table 1. Independent variables used to investigate the statistical relationship with river knickpoint

منبع / روش تهیه	توضیحات / نوع داده	نام متغیر	عامل	منبع / روش تهیه	توضیحات / نوع داده	نام متغیر	عامل
سازمان زمین‌شناسی / GIS	نسبت سطح ناهمواری به یک سطح کاملاً مسطح / رستری	برش عمودی	$X_5$	سازمان زمین‌شناسی / GIS	نقشه‌های زمین‌شناسی / رستری	سنگ‌شناسی	$X_1$
سازمان زمین‌شناسی / GIS	نقشه‌های زمین‌شناسی / رستری	فاصله از گسل	$X_6$	DEM/ TecDEM	یک سطح فرضی است که با اتصال پروفیل‌های آبراهه‌ای با رده مشابه به وجود آمده است و سطوح هم‌فرسایش را نشان می‌دهد / رستری	هم‌پایه	$X_2$
DEM/GIS	در هر پیکسل ناهمگنی توپوگرافی با در نظر گرفتن همسایگی، ۸ پیکسل مجاور به دست می‌آید	شاخص زبری ناهمواری	$X_7$	DEM/ TecDEM	تفاوت بین بیشینه و کمینه ارتفاع در پنجره هدف / رستری	ناهمواری محلی	$X_3$
سازمان زمین‌شناسی / GIS	نقشه‌های زمین‌شناسی / رستری	فاصله از مرز سنگ‌شناسی	$X_8$	DEM/GIS	شیب رگرسیون لگاریتم مساحت فضای تقسیم‌شده در برابر لگاریتم محاسبه شده در همان فضا / رستری	بعد فرکتال	$X_4$

## روش رگرسیون لجستیک باینری

الگوریتم‌هایی تحلیلی یا آماری وجود دارند که پراکنش نقاط را با ارتباط دادن با لایه‌های متغیرهای جغرافیایی تحلیل و پیش‌بینی می‌کنند. رگرسیون لجستیک به‌منابۀ یکی از روش‌های یادگیری ماشین، به‌طور گسترده در حل مسائل طبقه‌بندی استفاده می‌شود؛ به‌ویژه هنگامی که فقط تعداد کمی از نمونه‌های آموزشی وجود دارد یا وقتی تعداد زیادی پارامتر وجود دارد که باید با ماشین یاد گرفته شود (Lee et al., 2006: 401). رگرسیون لجستیک، شکلی از رگرسیون است که متغیر وابسته در آن به‌صورت احتمال یک پیامد دو مقوله‌ای (دو ارزشی) یا چندسطحی است؛ همچنین متغیرهای مستقل ممکن است از هر نوع متغیری باشند. در مطالعات محیطی، متغیر پیشامد معمولاً حضور یا عدم حضور یک مخاطره را به تعدادی متغیر پیش‌بینی‌کننده بالقوه در پهنه فضا ارتباط می‌دهد؛ بنابراین برای این نوع پیش‌بینی به دلیل هدف قراردادن دو گروه (حضور یا عدم حضور رودشکن) از رگرسیون لجستیک باینری استفاده می‌شود.

هدف در رگرسیون لجستیک، پیدا کردن بهترین و مناسب‌ترین مدل برازش‌یافته به‌منظور مدل‌کردن ارتباط بین متغیر پیشامد (پاسخ یا وابسته) و مجموعه‌ای از متغیرهای مستقل (پیش‌بینی‌کننده یا توضیحی) است. در رگرسیون لجستیک برخلاف سایر روش‌ها مانند تحلیل جداسازی خطی، فرضیه در توزیع متغیرها لازم نیست. در رگرسیون خطی مقدار متغیر وابسته از ترکیب خطی متغیرهای مستقل به دست می‌آید؛ در حالی که در رگرسیون لجستیک از ترکیب خطی تابع لجیت<sup>۱</sup> استفاده می‌شود (Ayalew and Yamagishi, 2005: 16)؛ از این رو احتمال پیش‌بینی‌شده باید بین اعداد ۰ و ۱ قرار گیرد که در روش‌های رگرسیون خطی ساده، دستیابی به آن مطلوب نیست. با تعریف  $p$  به‌منزله احتمال تعلق یک مشاهده به گروه حضور و  $1 - p$  احتمال تعلق یک مشاهده به گروه غایب، معادله کلی رگرسیون لجستیک به‌صورت رابطه ۱ بیان می‌شود.

$$\text{رابطه ۱} \quad \text{Log} \left( \frac{p}{1-p} \right) = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k = \alpha + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i$$

در آن،  $p$  احتمال وقوع رخداد و نشان‌دهنده احتمال تخصیص ۱ پیکسل به سطحی از احتمال ۰ یا ۱،  $x_i$   $i$  آمین متغیر مستقل و  $\beta_i$  ضریب برآوردشده با رگرسیون برای آمین متغیر مستقل و  $\beta_0$  عرض از مبدأ است. ضرایب رگرسیون متغیرهای مستقل  $\beta_0$  تا  $\beta_k$  از مدل رگرسیون لجستیک با روش حداکثر درست‌نمایی<sup>۲</sup> برآورد می‌شود. از تبدیل لگاریتم طبیعی تابع لجیت برای تعیین احتمال عضویت پیکسل‌ها به یک تابع خطی به‌دست‌آمده از متغیرهای پیش‌بینی‌کننده استفاده می‌شود؛ در واقع در رابطه ۱ مقادیر لجیت  $p$  برآورد و سپس براساس آن مقادیر،  $p$  احتمال وقوع رخداد مشخص می‌شود. در رگرسیون خطی ضرایب به روش کمترین مربعات<sup>۳</sup> به دست می‌آید که این روش برای لجستیک رگرسیون کارایی ندارد؛ زیرا داده‌های ورودی متغیر وابسته از نوع ترتیبی، طبقه‌ای و باینری هستند.

روش حداکثر درست‌نمایی برای برآورد ضرایب استفاده می‌شود. در روش رگرسیون لجستیک، بنا بر تعریف،  $p$  مقادیر صفر یا یک خواهد بود؛ همچنین امکان تعیین احتمال تعلق هر پیکسل بین ۰ تا ۱ به هریک از سطوح متغیر وابسته میسر است. در رگرسیون لجستیک، روش‌های متعددی برای ورود متغیرهای وابسته به مدل وجود دارد؛ از این بین، از روش همزمان به‌منابۀ روشی استفاده می‌شود که در آن تمامی متغیرهای مستقل مهم فرض و در یک مرحله به مدل وارد می‌شوند.

1. Logit
2. Maximum Likelihood (ML)
3. Least Squares

در این پژوهش، در مجموع از ۸ لایهٔ رقومی رستری به منظور تحلیل و پیش‌بینی احتمال حضور رودشکن در منطقه مطالعه شده استفاده شد. با توجه به اینکه ۸ لایهٔ ورودی واحدهای متفاوتی دارند و به‌مثابهٔ ورودی مستقیم برای رگرسیون لجستیک مناسب نیستند، پارامترهای ورودی در محدودهٔ ۰ تا ۱ نرمال شدند. لایهٔ اسمی مانند داده‌های زمین‌شناسی به متغیرهای دنباله‌دار تبدیل شدند که در بین ۰ و ۱ قرار می‌گیرد. تمام این لایه‌ها به‌صورت فرمت شبکه‌ای با ابعاد اسمی سلولی ۱۹۵×۱۹۵ متر با روش نزدیک‌ترین همسایه، نمونه‌گیری دوباره شد تا امکان ترکیب لایه‌ها فراهم شود؛ سپس ماتریسی از سلول‌های مربعی شکل برای منطقه مطالعه شده تهیه شد که دربرگیرندهٔ ماتریسی از ۲۷۳ سطر و ۲۷۳ ستون بود و بیان‌کنندهٔ تعداد کلی ۳۹۶۵۰ سلول است. از این تعداد، ۷۴ سلول به‌مثابهٔ نقاط رودشکن تشخیص داده شد. این نواحی با کد ۱ (حضور رودشکن) مشخص شدند و بقیهٔ سلول‌هایی که نقاط رودشکن نداشتند، با کد ۰ (غیاب رودشکن) ثبت شدند. به‌مثابهٔ یک قاعدهٔ کلی زمانی که تعداد حضور و غیاب در سلول‌ها به میزان چشمگیری تقارن نداشته باشد، تأثیرات منفی بر عملکرد روش‌های داده‌محور مانند رگرسیون لجستیک دارند؛ بنابراین به میزان تعداد سلول‌های حضور (۷۴ سلول)، سلول‌های عدم حضور به‌طور تصادفی (۷۴ سلول) از منطقه انتخاب شد. در مجموع ۱۴۸ سلول کد ۱ و ۰ برای آموزش، اعتبارسنجی و آزمون استفاده شد. این مجموعه داده‌ها به‌طور تصادفی به سه دسته تقسیم می‌شوند؛ حدود ۶۰٪ برای آموزش شبکه (۸۷ مجموعه داده)، حدود ۲۰٪ برای تست شبکه (۳۱ مجموعه داده) و حدود ۲۰٪ اعتبارسنجی روش آموزش مجموعه داده (۲۰ مجموعه داده)؛ (Saadat et al., 2014: 74). از داده‌های آموزش برای فرایند یادگیری و ساخت مدل استفاده می‌شود؛ از داده‌های اعتبارسنجی برای جلوگیری از وقوع بیش‌برازش مدل‌شده در فرایند آموزش استفاده می‌شود؛ هدف اعتبارسنجی، کاهش وابستگی مدل به داده‌های آموزشی است و از داده‌های آزمون برای بررسی دقت و صحت نهایی مدل استفاده می‌شود.

### اعتبارسنجی مدل‌ها

اعتبارسنجی از مهم‌ترین مراحل ارزیابی یک مدل مکانی است که در آن میزان معتبربودن نتایج حاصل از مدل به‌منظور کاربردی کردن مدل بررسی می‌شود. این مرحله از ارزیابی برای بررسی میزان موفقیت یک مدل انجام می‌شود. روش‌های متعددی برای بررسی کارایی مدل‌های دسته‌بندی داده‌ها وجود دارد. در این پژوهش عملکرد روش رگرسیون لجستیک در تشخیص درست نقاط رودشکن (تعداد سلول‌هایی که به‌خوبی طبقه‌بندی شده‌اند) با استفاده از ضریب توافق کاپا<sup>۱</sup>، منحنی تشخیص عملکرد نسبی<sup>۲</sup> (منحنی راک) و سطح زیرمنحنی<sup>۳</sup> بررسی شد. در این تجزیه و تحلیل، قدرت پیش‌بینی مدل به تفکیک درست بین تعداد حضور و غیاب نقاط رودشکن با سطح زیرمنحنی راک مشخص می‌شود. این منحنی میزان دقت مدل را به‌صورت کمی نشان می‌دهد. مقدار عددی سطح زیرمنحنی راک

1. Cohen's kappa coefficient
2. Receiver Operating Characteristic Curve (ROC)
3. Area Under the Curve (AUC)

حداکثر ۱ به این معناست که مدل تشخیصی صددرصد در تمایز بین حضور و غیاب رودشکن دقیق است و مدل بهترین دقت را از نقشه پیش‌بینی رودشکن ارائه می‌دهد که با توجه به نسبت مدل‌ها، حالت آرمانی خواهد بود. کمینه آن برابر با ۰ است که به‌مثابه یک نتیجه غیردقیق مدنظر قرار می‌گیرد و به این معناست که مدل، تمام نقاط دارای رودشکن را به‌صورت غایب و تمام نقاط بدون رودشکن را به‌صورت حضور در نظر گرفته است.

تفسیر کیفی - کمی سطح زیرمنحنی و ارزیابی مدل تخمین بدین صورت است که اگر سطح زیرمنحنی بین اعداد ۰/۶ تا ۰/۷ قرار گیرد، ارزیابی مدل ضعیف یا نه‌چندان خوب و اگر بین اعداد ۰/۷ تا ۰/۸ قرار گیرد، ارزیابی متوسط و اگر بین اعداد ۰/۸ تا ۰/۹ قرار گیرد، ارزیابی خوب و اگر سطح زیرمنحنی بین اعداد ۰/۹ تا ۱ قرار گیرد، ارزیابی مدل عالی طبقه‌بندی می‌شود (Zhu et al., 2010: 7).

شاخص یودن<sup>۱</sup> به‌طور گسترده‌ای در مطالعات ارزیابی دقت مدل‌های تشخیصی و عملکرد پیش‌بینی آن در پیش‌آگهی یا خطر استفاده می‌شود. این شاخص به‌صورت فاصله عمودی بیشینه بین منحنی و خط ۴۵ درجه روی منحنی راک محاسبه می‌شود. این شاخص برای مدلی که اطلاعات کافی ارائه نمی‌دهد، عدد صفر و برای یک مدل ایدئال عدد ۱ را بیان می‌کند (Nakas, 2014: 45).

در این مطالعه از ضریب توافق کاپا استفاده شد که از ساده‌ترین و مهم‌ترین روش‌های اندازه‌گیری توافق بین دو روش طبقه‌بندی است. این ضریب که بین ۰ تا ۱ است و به‌صورت درصد هم بیان می‌شود، میزان هماهنگی و توافق روش‌های طبقه‌بندی را با نقاط رودشکن به‌مثابه سنجش حضور محاسبه می‌کند. میزان ۱ نشان‌دهنده توافق و وضعیت همسان و ۰ نشان‌دهنده عدم توافق است. کلاسه‌بندی ضریب کاپا به این صورت است که کمتر از ۰/۲ ضعیف، ۰/۲۱ تا ۰/۴۰ پایین‌تر از متوسط، ۰/۴۱ تا ۰/۶۰ متوسط، ۰/۶۱ تا ۰/۸۰ خوب و ۰/۸۱ تا ۱ عالی تقسیم‌بندی می‌شود (Viera and Garrett., 2005: 362). براساس مقادیر ارائه‌شده ضریب کاپا، حداقل مقدار قابل قبول کاپا بیش از ۰/۶۱ و مقادیر بیش از ۰/۸۱ در توافق بین مدل و مشاهدات ایده‌آل در نظر گرفته می‌شود.

### یافته‌های پژوهش

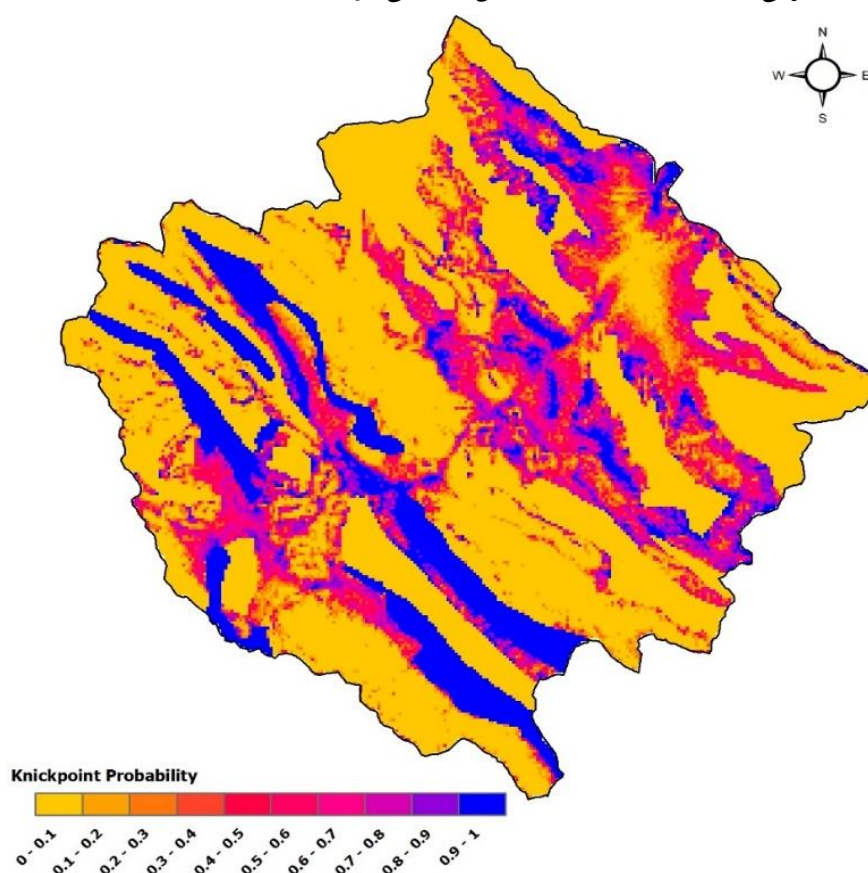
براساس توضیحات داده‌شده در بخش روش‌شناسی پژوهش، با استفاده از عوامل استفاده‌شده در این پژوهش و ورود این عوامل به روش رگرسیون لجستیک، رابطه احتمالاتی حضور رودشکن به‌مثابه یکی از نتایج مهم پژوهش به دست آمد (رابطه ۲).

$$Pred = \frac{1}{(1+Exp(-46.75-Linear))} \quad \text{رابطه ۲}$$

$$16.94,9, 20.36,10, 14.97,11, 16.53,12, 0.49,13, - 17.92,14, - 17.92,15, \\ - 17.45,16, 20.22,17,20.22,18, - 18.38,19, - 18.38,20, 2.36) + 0.0058 \times X_2 \\ + 0.054 \times X_3 + 2.89 \times X_4 + (-74.05 \times X_5) + (-0.000053 \times X_6) + 0.368 \times X_7 \\ + 0.0019 \times X_8$$

در این رابطه،  $Pred$  احتمال حضور رودشکن (احتمال ۰ تا ۱۰۰ درصد)،  $X_1$  زمین‌شناسی،  $X_2$  هم‌پایه،  $X_3$  ناهمواری محلی،  $X_4$  بعد فرکتال،  $X_5$  تحلیل عمودی،  $X_6$  فاصله از گسل (برحسب متر)،  $X_7$  شاخص زبری سطح و  $X_8$  فاصله از مرز سازند زمین‌شناسی (برحسب متر) است.

نقشه احتمال وجود رودشکن‌ها در حوضه مطالعه‌شده در شکل ۳ به‌مثابه یکی دیگر از نتایج این پژوهش آمده است. این نقشه با کمک رابطه ۲ به دست آمد که احتمال حضور رودشکن‌ها را براساس متغیرهای زمین‌شناسی و ژئومورفیکی پیش‌بینی می‌کند. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود، احتمال وجود مناطقی که شرایط ایجاد رودشکن در آنها وجود دارد با رنگ آبی در مناطق جنوب غربی حوضه مشخص است؛ همچنین سایر نواحی به‌صورت پراکنده در قسمت‌هایی از شمال شرقی منطقه مطالعه‌شده تشخیص داده می‌شوند.



شکل ۳. احتمال حضور رودشکن در حوضه قلعه شاهرخ با روش رگرسیون لجستیک (نویسندگان، ۱۳۹۹)

Figure 3. Probability of the presence of the knickpoint in Shahrokh Ghaleh basin by logistic regression method (Authors, 2021)

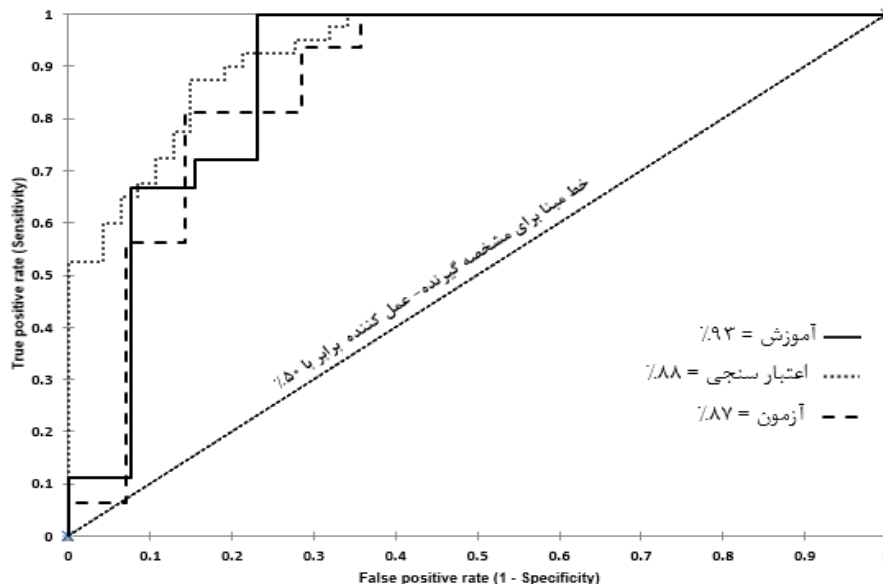
نتایج آزمون نسبت درست‌نمایی برای تعیین میزان اهمیت آماری هریک از متغیرهای مستقل در مدل ارائه‌شده نشان می‌دهد زمین‌شناسی و فاصله از مرزهای سازندهای زمین‌شناسی در مدل معنادارند. این مفهوم با علامت ستاره (\*) در جدول ۲ نشان داده شد.

## جدول ۲. اثر متغیرهای مدل لجستیک با آزمون نسبت درست‌نمایی

Table 2. Effect of logistic model variants by likelihood ratio test

Prob>ChiSq	L-R ChiSquare	Source
۰/۰۳۴۸*	۲۷/۶۵۴۰	سنگ‌شناسی
۰/۰۷۰۲	۳/۲۷۸۲	هم‌پایه
۰/۰۱۷۹*	۵/۶۰۷۱	ناهمواری محلی
۰/۶۶۸۴	۰/۱۸۳۴	بعد فرکتال
۰/۰۵۶۴	۳/۶۴۰۳	برش عمودی
۰/۸۵۳۹	۰/۰۳۳۹	فاصله از گسل
۰/۴۸۴۹	۰/۴۸۷۷	شاخص زبری ناهمواری
۰/۰۰۱۰*	۱۰/۹۱۰۷	فاصله از مرز سنگ‌شناسی

مقایسه نمودار راک روش‌های رگرسیون لجستیک برای داده‌های آموزشی، اعتبارسنجی و آزمون (شکل ۴) نشان می‌دهد مقادیر سطح زیر نمودار برای تمام داده‌ها بیش از  $0/8$  ( $p=0/001$ ) و مقادیر تشخیص غلط اندک است. دقت ۸۷ درصدی داده‌های آزمون در نمودار راک بیان‌کننده دقت زیاد مدل در تشخیص درست نقاط رودشکن در حوضه قلعه شاهرخ است. نتایج شاخص یودن برای داده‌های آموزشی، اعتبارسنجی و آزمون به ترتیب برابر با  $0/72$ ،  $0/76$  و  $0/66$  است که ارائه اطلاعات درست از وضعیت احتمال نقاط رودشکن را به‌ویژه برای داده‌های آزمون مدل نشان می‌دهد. نتایج ضریب توافق هر دو روش را با مقادیر مشاهداتی نقاط رودشکن نشان می‌دهد. است که تطابق و توافق هر دو روش را با مقادیر مشاهداتی نقاط رودشکن نشان می‌دهد.



شکل ۴. مقایسه قدرت پیش‌بینی رگرسیون لجستیک باینری در شناسایی نقاط رودشکن (نویسندگان، ۱۳۹۹)

Figure 4. Comparison of the predictive power of binary logistic regression in identifying the knickpoints (Authors, 1399)

رودشکن‌ها وقفه ناگهانی توپوگرافی را در پروفیل کانال طولی نشان می‌دهند و عموماً به‌مثابه شکل‌های غیرتعدادی در نظر گرفته می‌شوند؛ برای نمونه مطالعات میلر (1991) و هایاکاوا و همکاران<sup>۱</sup> (2006) نشان می‌دهند رودشکن‌ها در نتیجه عملکرد نیروهای مختلفی مانند تأثیر سنگ‌شناسی، فرایند هیدرولوژیکی و همچنین زمین‌ساخت و سیستم گسلی ایجاد می‌شوند. توزیع رودشکن‌ها همچنین متأثر از فراوانی درز و شکاف<sup>۲</sup>، لایه‌بندی سنگ‌شناسی و رابطه بین شیب لایه‌ها<sup>۳</sup> و جهت جریان است (Miller, 1991: 591).

نتایج مطالعه حاضر نیز مؤید این امر است که سنگ‌شناسی و مرز بین لایه‌های سنگ‌شناسی از عوامل مهم در ایجاد رودشکن در زون ساختاری زاگرس در منطقه مطالعه شده است. نتایج مطالعاتی در نواحی جنوبی ایندیاناپولیس نشان داده است رودشکن‌ها منحصراً در سنگ‌های کربناتی ایجاد می‌شوند. لایه‌های غنی از سیلیس روی لایه‌های کربناتی ممکن است در برابر فرسایش مقاوم‌تر باشند، اما هیچ مدرکی مبنی بر این وجود نداشت که نقاط رودشکن به‌طور ترجیحی با فواصل سیلیسی در ارتباط هستند (Miller, 1991: 591).

مطالعات وول<sup>۴</sup> (1992) نشان می‌دهد در صورتی که جریان آب به اندازه کافی تند و همچنین تغذیه آنها زیاد باشد، انرژی آب می‌تواند با توجه به نوع سنگ‌بستر و ریخت‌شناسی محل در ایجاد رودشکن مؤثر باشد؛ همچنین اختلاف فراوانی رودشکن‌ها در سنگ‌های مختلف نشان‌دهنده تأثیر نوع سنگ در ایجاد رودشکن است. همچنان که مطالعه حاضر مؤید این نکته است که لیتولوژی تأثیر معناداری بر وجود رودشکن دارد.

شکل ۵ تصویر یک رودشکن نسبتاً مرتفع در جنوب حوضه را نشان می‌دهد که برای ساختن بند آبخیزداری روی رودخانه از آن استفاده شده است؛ همچنین نشان‌دهنده دو رودشکن کوچک محلی در قسمت تغییر لایه‌های سخت و سست رودخانه است. فراوانی رودشکن‌ها در یک نوع خاص سنگ ممکن است نمایانگر فعالیت جدید زمین‌ساختی باشد (خاوری، ۱۳۹۳: ۵۳). نتایج این پژوهش نشان می‌دهد در مرز سنگ‌شناسی به دلیل وجود درزه‌ها و شکاف‌های ناشی از اختلاف جنس سنگ‌ها، احتمال وجود رودشکن‌ها بیش از سایر نقاط منطقه است. نتایج مطالعات خاوری (۱۳۹۳) روی رودخانه‌های استان خوزستان نشان داد فراوانی رودشکن‌ها تابع مهمی از گسل‌های فعال ناحیه است؛ اما در پژوهش حاضر تأثیر سیستم گسلی بر رودشکن‌ها از نظر آماری معنادار نبود.

---

1. Hayakawa et al.  
2. joint frequency  
3. Strata dip  
4. Wohl



شکل ۵. رودشکن‌های محلی در محل تغییر لایه‌های متناوب سخت و سست در جنوب حوضه

Figure 5. Local knickpoints at the site of alternating hard and loose alternating layers in the south of the basin

### نتیجه‌گیری

رودشکن‌ها به‌مثابه یک پدیده ژئومورفولوژیکی نشان‌دهنده تفاوت در شرایط و فرایندها در شکل‌گیری نیمرخ یک رودخانه‌اند که متأثر از عوامل مختلفی مانند فرسایش ناشی از یک دوره یخچالی، شرایط هیدرولوژی، فرسایشی فعال، توپوگرافی، زمین‌ساختی و زمین‌شناسی به شکل شکستگی‌های پرشیب در بستر رودخانه‌ها نمود می‌یابند و وجود آنها نشان‌دهنده نبود تعادل در سیستم‌های رودخانه‌ای است.

بر اساس نتایج حاصل از انطباق رودشکن‌ها با مدل ارائه‌شده می‌توان نتیجه گرفت که شرایط زمین‌شناسی و توپوگرافی اهمیت ویژه‌ای در ظهور رودشکن‌ها در مرز دو زون ساختاری زاگرس مرتفع و سنندج- سیرجان در حوضه قلعه شاهرخ دارد. مدل ارائه‌شده برای تعیین احتمال وجود رودشکن نشان داد این مدل از توانایی مناسب تخمینی با سطح زیرمنحنی بیش از ۸۰ درصد صحت برخوردار است؛ همچنین این نتایج نشان می‌دهد در این حوضه، تکتونیک فعال به شکل مستقیم بر ایجاد رودشکن‌های محلی تأثیر نداشته است؛ به‌ویژه اینکه کاهش شاخص ناهمواری محلی و خطوط هم‌پایه با فعالیت‌های کمتر تکتونیک ارتباط دارد و در این مطالعه ظهور رودشکن‌ها با کاهش این دو عامل ارتباط داشته است؛ همچنین افزایش احتمال رودشکن با افزایش برش عمودی نشان‌دهنده تأثیر توپوگرافی بر ظهور رودشکن‌ها در این منطقه است؛ زیرا برش عمودی سطح به نسبت افزایش ناهمواری در سطح اشاره دارد؛ همچنین وقوع رودشکن‌ها در ترازهای مشابه ارتفاعی دلیلی بر شکل‌گیری آنها در مراحل برخاستگی مشابه تلقی می‌شود.

موقعیت حوضه در مرز بین دو زون زاگرس مرتفع (سنگ‌های رسوبی) و سنندج- سیرجان (سنگ‌های دگرگونی) باعث ایجاد تفاوت مقاومت سنگ‌ها در این دو منطقه شده است. قرارگیری لایه‌ها با مقاومت‌های متفاوت در مجاورت

یکدیگر از عوامل مهم در ایجاد رودشکن در این منطقه بوده است. نحوهٔ پراکنش رودشکن‌ها در این حوضه نشان می‌دهد بیشتر آنها در پایین‌دست آبراهه‌ها و در سازندهایی با مقاومت کمتر یا مرز بین لایه‌های سخت و سست ایجاد شده‌اند که ناشی از تأثیر فرایندهای کوترنری در اثر فرسایش شدید آبکندی و تفریقی در این نواحی بوده و بالادست این آبراهه‌ها متأثر از تکتونیک باعث ایجاد سطح اساس‌های جدید در پایین‌دست شده است. این تغییرات سطح اساس به شکل مستقیم یا غیرمستقیم به گسترش بی‌نظمی و بریدگی در طول نیمرخ آبراهه‌ها منجر می‌شوند.

## منابع

خاوری، رضوان. (۱۳۹۳). تعیین رودشکن‌های رودخانه‌های استان خوزستان بر پایهٔ مدل رقومی - ارتفاعی ناحیه،

نشریهٔ علوم زمین، دورهٔ ۲۴، شمارهٔ پیاپی ۹۴، صص ۶۲-۵۳.

- Alexander, J., M.R., Leeder, (1990). **Geomorphology and surface tilting in an active extensional basin**, SW Montana, USA. *Journal of the Geological Society*, Vol 147 (3): 461-467.
- Aman, M.A., Yunus, A.P., Javed, A., (2020). **Fluvial knickpoint identification and their characterizations in the drainage basins of Western Ghats, India**, *Spatial Information Research*, <https://doi.org/10.1007/S41324-020-00345-7>, 1-10.
- Ayalew, L., Yamagishi, H., (2005). **The application of GIS-based logistic regression for landslide susceptibility mapping in the Kakuda-Yahiko Mountains, Central Japan**, *Geomorphology*, 65 (1-2): 15-31.
- Berlin, M.M., Anderson, R.S., (2007). **Modeling of knickpoint retreat on the Roan Plateau**, western Colorado, *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 112 (F3): 1-16.
- Bishop, P., (2007). **Long-term landscape evolution: linking tectonics and surface processes**, *Earth Surface Processes and Landforms*, The Journal of the British Geomorphological Research Group, 32 (3): 329-365.
- Boulton, S.J., (2020). **Geomorphic response to differential uplift: river long profiles and knickpoints from Guadalcanal and Makira (Solomon Islands)**, *Frontiers in Earth Science*, Vol 10 (8): 1-23
- Bowman, D., Shachnovich-Firtel, Y., Devora, S., (2007). **Stream channel convexity induced by continuous base level lowering, the Dead Sea, Israel**, *Geomorphology*, 92 (1-2): 60-75.
- Gardner, T.W., (1983). **Experimental study of knickpoint and longitudinal profile evolution in cohesive, homogeneous material**, *Geological Society of America Bulletin*, 94 (5): 664-672.
- Gilbert, G.K., (1896). **Niagara Falls and their history**, American Book Company.
- Gonga-Saholiariliva, N., Gunnell, Y., Harbor, D., Mering, C., (2011). **An automated method for producing synoptic regional maps of river gradient variation: Procedure, accuracy tests, and comparison with other knickpoint mapping methods**. *Geomorphology*, 134 (3): 394-407
- Hayakawa, Y.S., Oguchi, T., (2006). **DEM-based identification of fluvial knickzones and its application to Japanese mountain rivers**, *Geomorphology*, 78 (1-2): 90-106.
- Heine, R.A., Lant, C.L., (2009). **Spatial and temporal patterns of stream channel incision in the loess region of the Missouri River**, *Annals of the Association of American Geographers*, 99 (2): 231-253.
- Kamintzis, J.E., Irvine-Fynn, T.D.L., Holt, T.O., Jones, J.P.P., Tooth, Griffiths, S., B.Hubbard, H.M., (2019). **Knickpoint evolution in a supraglacial stream**, *Geografiska Annaler: Series A., Physical Geography*, 101 (2), 118-135.
- Lee S.I., Lee, H., Abbeel, P., Y.Ng., A., (2006). **Efficient L1 regularized logistic regression**, In *AAAI*. 6: 401-408.
- Loget, N., Van Den Driessche, J., (2009). **Wave train model for knickpoint migration**, *Geomorphology*, 106 (3): 376-382.

- Mackey, B.H., Scheingross, J.S., Lamb, M.P., Farley, K.A., (2014). **Knickpoint formation, rapid propagation, and landscape response following coastal cliff retreat at the last interglacial sea-level highstand: Kaua ‘i, Hawai ‘i**. *Geological Society of America Bulletin*, 126 (7-8): 925-942.
- Marrucci, M., Zeilinger, G., Ribolini, A., Schwanghart, W., (2018). **Origin of knickpoints in an alpine context subject to different perturbing factors, Stura Valley, Maritime Alps (north-western Italy)**, *Geosciences*, 8 (12), 443.
- Miller, J.R., (1991). **The influence of bedrock geology on knickpoint development and channel-bed degradation along downcutting streams in south-central Indiana**, *The Journal of Geology*, 99 (4): 591-605.
- Muehlbauer, J.D., Doyle, M.W., (2012). **Knickpoint effects on macroinvertebrates, sediment and discharge in urban and forested streams: urbanization outweighs microscale habitat heterogeneity**, *Freshw. Sci.* 31 (2): 282-295.
- Nakas, K., (2014). **Developments in roc surface analysis And assessment of diagnostic markers In three-class classification problems**, *REVSTAT – Statistical Journal*, 12 (1), PP: 43-65.
- Ouimet, W.B., Whipple, K.X., Royden, L.H., Sun, Z., Chen, Z., (2007). **The influence of large landslides on river incision in a transient landscape: Eastern margin of the Tibetan Plateau (Sichuan, China)**, *Geological Society of America Bulletin*, 119 (11-12): 1462-1476.
- Pavano, F., Pazzaglia, F.J., Catalano, S., (2016). **Knickpoints as geomorphic markers of active tectonics: A case study from northeastern Sicily (southern Italy)**, *Lithosphere*, 8 (6): 633-648.
- Peifer Bezerra, D., Persano, C., (2017). **Identifying knickpoints using elevation breaks and offsets in slope-area scaling**. *Geophysical Research Abstracts*, EGU General Assembly, P:1.
- Phillips, J.D., McCormack, S., Duan, J., Russo, J.P., Schumacher, A.M., Tripathi, G.N., Pulugurtha, S., (2010). **Origin and interpretation of knickpoints in the Big South Fork River basin, Kentucky–Tennessee**, *Geomorphology*, 114 (3): 188-198.
- Saadat, M., Khandelwal, M., Monjezi, M., (2014). **An ANN-based approach to predict blast-induced ground vibration of Gol-E-Gohar iron ore mine, Iran**, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 6 (1): 67-76.
- Shahzad, F., Gloaguen, R., (2011). **TecDEM: A MATLAB based toolbox for tectonic geomorphology, Part 1: Drainage network preprocessing and stream profile analysis**, *Computers & Geosciences*, 37 (2): 250-260.
- Shahzad, F., Gloaguen, R., (2011). **TecDEM: A MATLAB based toolbox for Tectonic Geomorphology, Part 2: Surface dynamics and basin analysis**, *Computers and Geosciences*, 37 (2): 261-271.
- Verdel, C., Wernicke, B.P., Ramezani, J., Hassanzadeh, J., Renne, P.R., Spell, T.L., (2007). **Geology and thermochronology of Tertiary Cordilleran-style metamorphic core complexes in the Saghand region of central Iran**, *Geological Society of America Bulletin*, 119 (7-8): 961-977.
- Viera, A.J., Garrett, J.M., (2005). **Understanding interobserver agreement: the kappa statistic**, *Family Medicine Research Series*, 37 (5): 360-363.
- Wohl, E.E., (1992). **Gradient irregularity in the Herbert Gorge of northeastern Australia**, *Earth surface processes and landforms*, 17 (1): 69-84.
- Zhu, W., Zeng, N., Wang, N., (2010). **Sensitivity, Specificity, Accuracy, Associated Confidence Interval and ROC Analysis with Practical SAS ® Implementations**, *NESUG proceedings*:

