

Diagnostic and Separation Modeling of Hierarchical Structure of Morphology In Geomorphology

Rasoul Samadzadeh^{1✉}, Fatemeh Nematollahi², Sina Solhi³

1. Associate Professor of Geography, Islamic Azad University of Ardabil Branch, Ardabil, Iran

✉ E-mail: r.samadzadeh@iauardabil.ac.ir

2. Postdoctoral researcher of Physical Geography, Faculty of Geographical Sciences and Planning, Isfahan University, Isfahan, Iran

E-mail: f.nematollahi@geo.ui.ac.ir

3. Graduated in Geomorphology, Isfahan University, Isfahan, Iran

E-mail: sinasolhi2009@gmail.com



How to Cite: Samadzadeh, R; Nematollahi, F; & Solhi, S. (2022). Diagnostic and Separation Modeling of Hierarchical Structure of Morphology In Geomorphology. *Geography and Development*, 20 (67), 218-249.

DOI: <http://dx.doi.org/10.22111/J10.22111.2022.6917>

Received:

10 September 2021

Received in revised form:

9 November 2021

Accepted:

17 December 2021

Published online:

24 May 2022

ABSTRACT

The diversity and broadness of applied research in the field of geomorphology has led to a semantic and conceptual disconnection between such a research and the theoretical foundations and intellectual ideas that support them. Today, there is a need for a clearer relationship between applied research in the field of geomorphology and the schools of thought that support them, which justifies the need for current research. Samadzadeh et al. (1400) have proposed a new definition of morphological structure in the science of geomorphology. This study emphasizes the importance of fundamental studies, so that changes in the basic and theoretical concepts of science, create the opportunity for new attitudes and the creation of new theoretical ideas in a scientific discipline. Hence, they have explained a hierarchical structure of morphology defined in seven levels, including: land-concept, land-space, land-context, landscape, land-form, land-feature and land-object. Prior to this, Ramesht (2005), in her book Symbols and images in geomorphology, has dealt with the principles of morphology in geomorphology and declared hierarchical theories as a basis for the form units' classifications in geomorphology. This research, which is a kind of link between a fundamental research in presenting the new structure of morphology and its practical application in geomorphology, it tries to act by quantifying the basic ideas for the improvement of geomorphological science in the field of morphological classification systems.

Keywords:

Modeling,
Morphology,
Geomorphology,
Hierarchical structure.



© the Author(s).

Publisher: University of Sistan and Baluchestan

Extended Abstract

1. Introduction

The diversity and broadness of applied research in the field of geomorphology has led to a semantic and conceptual disconnection between such a research and the theoretical foundations and intellectual ideas that support them. Today, there is a need for a clearer relationship between applied research in the field of geomorphology and the schools of thought that support them, which

justifies the need for current research. Samadzadeh et al. (1400) have proposed a new definition of morphological structure in the science of geomorphology. This study emphasizes the importance of fundamental studies, so that changes in the basic and theoretical concepts of science, create the opportunity for new attitudes and the creation of new theoretical ideas in a scientific discipline. Hence, they have explained a

hierarchical structure of morphology defined in seven levels, including: land-concept, land-space, land-context, landscape, land-form, land-feature and land-object. Prior to this, Ramesht (2005), in her book *Symbols and images in geomorphology*, has dealt with the principles of morphology in geomorphology and declared hierarchical theories as a basis for the form units' classifications in geomorphology. This research, which is a kind of link between a fundamental research in presenting the new structure of morphology and its practical application in geomorphology, it tries to act by quantifying the basic ideas for the improvement of geomorphological science in the field of morphological classification systems.

2. Methods and Material

In this research, relying on the modern hierarchical system of morphology in geomorphology, all levels of the system, were identified and recognized visual and quantitatively. The following steps were taken to identify and define the seven levels of the new hierarchical morphological system:

Step 1: Land-concept definition

The first step in creating a hierarchical structure of morphology is to determine the meaning of the land. In this study, the meaning of the earth was considered to be, high and convex. so being high and convex is two parameters of the land-concept definition in this case.

1- Defining the meaning of the high-lands

To define the meaning of being high, two absolute and relative heights were used. In determining the absolute height, a hypothetical basis level was used based on expert opinion. This absolute threshold can be defined depending on the territorial conditions of a country or region. To determine the limit, according to the regional conditions of Iran and the expert opinion, the threshold was set at 2000 meters above sea level. On the other hand, to determine the meaning of high-lands was taken into account with using the concept of relative height. In this regard, two concepts of classification and clustering were used. In the classification approach, quantile, natural break, geometric interval and maximum distance techniques were used, and in the

clustering approach, the unsupervised K-means clustering was used.

1-1- Defining the meaning of the high-lands using quantile classification method

The quantile classification method is a data classification method that classifies numerical values into groups in a way that they have the same number.

1-2- Defining the meaning of the high-lands using natural break classification method

The natural break classification method is a data classification system for optimizing the arrangement of data sets in natural classes. A natural class is the optimal class range that can be found naturally in a data set.

1-3- Defining the meaning of the high-lands using geometrical interval classification method

The geometrical interval classification method is a kind of classification pattern of distributing numerical values based on geometric series. In this classification scheme, the classification thresholds or class breaks are based on successive distances obtained from the geometric series.

1-4- Defining the meaning of the high-lands using maximum distance classification method

In this method, to determine the meaning of the high-lands, the relationship between air pressure and ground height has been taken into account.

1-5- Defining the meaning of the high-lands using K-means Clustering method

The k-means clustering is a vector optimization method that is primarily rooted in signal processing. The main purpose of this method is to segment n observations in k clusters so that each observation is related to the closest distance to the center of gravity of the cluster.

2- Defining the meaning of the land convexity

The second step to achieve the meaning of the land was to define the concept of the convexity using quantitative models and methods. For this purpose, seven mathematical models in calculating the terrain curvature were used. Using these methods and with the help of digital elevation model, surface convexity or the meaning of land-convexity is also defined.

Step 2: Land-space definition

In the next level of hierarchy, we encounter land-space level. In this hierarchy, according to the meanings considered in the land-concept, the mountain land-space is defined. Considering the height and convex land-concept, which was obtained in the previous step, these two land-concept combined with each other and the land-space meaning of the mountain appeared.

Step 3: Land-context recognition

At the next level, to define and distinguish land-context from mountain land-space, scale dependencies and some degree of generalization applied.

Step 4: Landscape recognition

In the fourth step, to determine the landscape, SPSR algorithm (Solhi and Seif, 1399) implemented. Using the results of SPSR algorithm, which is obtained from the digital elevation model, values higher than 50% selected and the lower values were removed. Then, by applying a filter, the landscape of the mountain ridges extracted.

Step 5: Land-form recognition

In this step, the results of TPI and SPSR algorithms were used to detect the form of the land. remind that, the SPSR algorithm is calculated from a digital elevation model. Topographic position index (TPI) is one of the geomorphometric indicators.

Step 6: Land-feature recognition

By classifying the results obtained from the SPSR algorithm, the main ridges land-feature was recognized. For this purpose, SPSR values between 70 and 100%, were classified and thus the land-features of the main ridgelines were extracted.

Step 7: Land-object recognition

The results of SPSR algorithm were used to recognize minor ridgelines. In this section, by classifying the SPSR results between 50 and 70%, the land-object of the minor ridgelines were also identified.

3. Results and Discussion

According to the explanations provided in the research methodology section about the method of recognizing and drawing the levels of the basic morphology system, each level of morphology was identified, and mapped. In this research, the theoretical foundations created within the Iranian geomorphology schools of thought were used to localize and apply in a visual and quantitative way. As a result, according to the above-mentioned goals, the new system of fundamental morphology system, proposed in the native schools of Iran's geomorphology implemented. Using quantitative methods, the movement from conceptual and symbols to the physical appearances of this meanings, followed and the results provided in the form of images, charts and maps.

4. Conclusion

Studies in the field of geomorphology are mainly pursued in two main areas: one is the field of theoretical and fundamental studies and the other, which has a larger volume and frequency, is the field of applied research so there is a research gap for intermediate studies between these two fields. In applied research, mainly the connection between research methodology and research method is not well and clearly stated. And in many cases, there is no meaningful connection between the theoretical and ideological foundations, behind the methods and techniques used. The recent study, which is basically a continuation of a fundamental and theoretical research conducted by the same authors, is the link between the theoretical and applied fields in Iranian geomorphology school of thought. Future researchers are advised to take steps to connect theoretical meanings and foundations to applied methods and, if possible, to move in the intermediate space of theoretical and practical territories.

Keywords: Modeling, Morphology, Geomorphology, Hierarchical structure.

5. References

- Brunsdn, D. (1996). Geomorphological events and landform change. The Centenary Lecture to the Department of Geography, University of Heidelberg. *Zeitschrift für Geomorphology*, 40(3), 273-288.
[DOI: 10.1127/zfg/40/1996/273](https://doi.org/10.1127/zfg/40/1996/273)
- De Boer, D. H. (1992). Hierarchies and spatial scale in process Geomorphology: a review. *Geomorphology*, 4(5), 303-318.
[DOI:10.1016/0169-555X\(92\)90026-K](https://doi.org/10.1016/0169-555X(92)90026-K)
- Dikau, R. (1989). The application of a digital relief model to landform analysis. In: Raper, J.F. (Ed.), *Three Dimensional Applications in Geographical Information Systems*, Taylor & Francis, London, 51-77.
[DOI:10.1201/9781003069454-5](https://doi.org/10.1201/9781003069454-5)
- Etzelmüller, B. and Sulebak, J.S. (2000). Developments in the use of digital elevation models in periglacial geomorphology and glaciology, *Physische Geography*, 41: 35-58.
https://www.researchgate.net/publication/285427262_Developments_in_the_use_of_digital_elevation_models_in_periglacial_geomorphology_and_glaciology
- Fels, J.E. and Matson, K.C.(1996). A cognitively based approach for hydro-geomorphic land classification using digital terrain models, in: *Proceedings of the 3rd International Conference/Workshop on Integrating GIS and Environmental Modeling*, Santa Fe, NM, January 21-25, National Centre for Geographic Information and Analysis, Santa Barbara, CA, USA.
http://www.ncgia.ucsb.edu/SANTA_FE_CD-ROM/sf_papers/fels_john/fels_and_matson.html
- Forgy, E. W. (1965). Cluster analysis of multivariate data: efficiency versus interpretability of classifications. *Biometrics*, 21, 768-780.
<https://www.semanticscholar.org/paper/Cluster-analysis-of-multivariate-data-%3A-efficiency-Forgy/5c4feeae0d911e30866b7149c1195cd8c007199b>
- Gallant, J.C., Wilson, J. P. (2000). Primary topographic attributes. In: Wilson, J.P., Gallant, J.C. (Eds.), *Terrain Analysis: Principles and Applications*. Wiley, New York, 51-85.
https://www.researchgate.net/publication/303543730_Primary_topographic_attributes
- Guzzetti, F and Reichenbach, P (1994). Toward the definition of topographic divisions for Italy, *Geomorphology*, 11: 57-75.
[https://doi.org/10.1016/0169-555X\(94\)90042-6](https://doi.org/10.1016/0169-555X(94)90042-6)
- Hammond, E.H. (1964). Analysis of properties in land form geography: An application to broad-scale land form mapping, *Annals of the Association of American Geographers*, 54: 11-19.
<https://doi.org/10.1111/j.1467-8306.1964.tb00470.x>
- Hengl, T, & Reuter, H. I. (Eds.) (2008). *Geomorphometry: concepts, software, applications*. Newnes.
<https://libgen.is/book/index.php?md5=2B87E41FF2E1DA7AE0D7C081739F8FF1>
- Jenks, G. F. (1967). The data model concept in statistical mapping. *International yearbook of cartography*, 7, 186-190.
https://archives.lib.ku.edu/repositories/3/archival_objects/382862
- Jenks, G. F., & Caspall, F. C. (1971). Error on choroplethic maps: definition, measurement, reduction. *Annals of the Association of American Geographers*, 61(2), 217-244.
<https://doi.org/10.1111/j.1467-8306.1971.tb00779.x>
- Krcho, J (1973). *Morphometric Analysis of Relief on the Basis of Geometric Aspect of Field Theory (=Acta Geographica Universitatis Comenianae)*. Geographico-physica, 425.
<https://www.amazon.com/Morphometric-geographica-Universitatis-Comenianae-Geographico-physica/dp/B0006CGVMI>
- Lloyd, C.D. and Atkinson, P.M. (1998). Scale and the spatial structure of landform: optimizing sampling strategies with geostatistics. In: *Proceedings of the 3rd International Conference on GeoComputation*, University of Bristol, United Kingdom, 17-19 September 1998, University of Bristol, Bristol, UK, 16.
http://www.geocomputation.org/1998/15/gc_15.htm
- Lucieer, A.; Fisher, P. and Stein, A. (2003). Texture-based segmentation of high-resolution remotely sensed imagery for identification of fuzzy objects, In: *Proceedings of the Seventh International Conference on Geocomputation*, University of Southampton, Southampton, UK,9.
<http://www.geocomputation.org>
- MacQueen, J (1967). Some methods for classification and analysis of multivariate observations. In *Proceedings of the fifth Berkeley symposium on mathematical statistics and probability* (Vol. 1, No. 14, 281-297).
<https://www.cs.cmu.edu/~bhiksha/courses/mlsp.fall2010/class14/macqueen.pdf>

- Meijerink, A.M.J. (1988). Data acquisition and data capture through terrain mapping units, *ITC Journal*, 1:23-44.
<https://library.wur.nl/WebQuery/groenekennis/746977>
- Mulla, D.J. (1988). Using geostatistics and spectral analysis to study spatial patterns in the topography of southeastern Washington State, USA, *Earth Surface Processes and Landforms*, 13: 389-405.
<https://doi.org/10.1002/esp.3290130505>
- Phillips, J. D. (1988). The role of spatial scale in geomorphic systems. *Geographical Analysis*, 20(4), 308-317.
<https://doi.org/10.1111/j.1538-4632.1988.b00185.x>
- Pike, R.J. (1988). The geometric signature: quantifying landslide-terrain types from Digital Elevation Models, *Mathematical Geology*, 20: 491-511.
<https://doi.org/10.1007/BF00890333>
- Rana, S (2006). Use of Plan Curvature Variations for the Identification of Ridges and Channels on DEM, in: *Progress in Spatial Data Handling*, edited.
https://doi.org/10.1007/3-540-35589-8_49
- Ramesht, Mohammad Hussein (2005). *Geomorphological Maps, Symbols and Permits*, Samet Publications, 190.
<https://samta.samt.ac.ir/content/10974>
- Samzadzadeh, Rasool, Solhi, Sina, Nematollahi, Fatemeh, (2021). A New Definition of the fundamental Structural Formation in Geomorphology, quantitative Geomorphological Research, Volume 10, Issue 2, No. 38.4.
 DOI: [10.22034/GMPJ.2021.276105.1260](https://doi.org/10.22034/GMPJ.2021.276105.1260)
- Schmidt, J.; Merz, B. and Dikau, R (1998). Morphological structure and hydrological process modelling, *Zeitschrift für Geomorphologie NF*, 112: 55-66.
https://gfzpublic.gfz-potsdam.de/pubman/item/item_226915
- Schumm, S. A., and Lichty, R. W. (1965). Time, Space, and Causality in Geomorphology. *American Journal of Science* 263(2), 110-119.
 DOI: <https://doi.org/10.2475/ajs.263.2.110>
- Shary, P. A. (1995). Land surface in gravity points classification by a complete system of curvatures. *Mathematical geology*, 27(3), 373-390.
<https://doi.org/10.1007/BF02084608>
- Shary, P. A., Sharaya, L. S., & Mitusov, A. V. (2002). Fundamental quantitative methods of land surface analysis. *Geoderma*, 107(1-2), 1-32.
[https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(01\)00136-7](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(01)00136-7)
- Starkel, L. (1999). Space and time scales in geomorphology. Fourth International Conference on Geomorphology - Plenary Lecture, *Suppl. Geogr. Fis. Dinam. Quat.* 61-66.
 DOI: [10.1127/zfgsuppl/115/1999/19](https://doi.org/10.1127/zfgsuppl/115/1999/19)
- Suryana, N. and de Hoop, S. (1994). Hierarchical structuring of terrain mapping units. In: *Proceedings of the Fifth European Conference and Exhibition on Geographic Information Systems, EGIS 94*, EGIS Foundation, Utrecht, The Netherlands, 1: 869-877.
<https://library.wur.nl/WebQuery/wurpubs/26931>
- Weiss, A. (2001). Topographic position and landforms analysis. In Poster presentation, ESRI user conference, San Diego, CA (Vol. 200). aweiss@tnc.org
- Young, M., & Evans, I. S. (1978). Statistical Characterization of Altitude Matrices by Computer. Report 5. *Terrain Analysis: Program Documentation*. Durham Univ (United Kingdom) Dept of Geography, 1-26.
 DOI: [10.21236/ADA086793](https://doi.org/10.21236/ADA086793)



مدل سازی تشخیصی و تفکیک ساختار سلسله مراتبی فرم شناسی در دانش ژئومورفولوژی

دکتر رسول صمدزاده^{۱*}، فاطمه نعمت‌اللهی^۲، سینا صلحی^۳

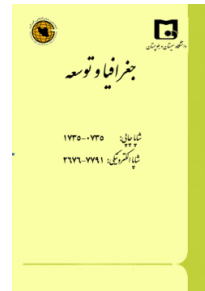
مقاله پژوهشی

چکیده

تنوع و گستردگی پژوهش‌های کاربردی در حوزه علم ژئومورفولوژی منجر به قطع ارتباط معنایی و مفهومی این گونه پژوهش‌ها با مبانی نظری و ایده‌های فکری تغذیه‌کننده آن‌ها شده است. امروزه ضرورت دارد که بین پژوهش‌های کاربردی حوزه علم ژئومورفولوژی و مکاتب فکری پشتیبان آن‌ها، ارتباط شفاف‌تری برقرار شود که این مسئله توجیه‌کننده ضرورت پژوهش حاضر است؛ بنابراین در جهت دستیابی به اهداف کلیدی این پژوهش، ایده‌های نظری مطرح‌شده در مکاتب نظری و فلسفی ژئومورفولوژی ایران مورد کاوش قرار گرفت؛ از این رو با اتکا به ریشه‌های نظری و بنیادین مطرح‌شده در نظام فرم‌شناسی دانش ژئومورفولوژی و با روشی تحلیلی، عملیات مصداق‌سازی و کمی‌سازی ایده‌های بنیادین، با استفاده از مدل‌ها و تکنیک‌های مرفومتريک تبیین شد.

در نتیجه، هفت سطح زمین‌معنا، زمین‌فضا، زمین‌متن، زمین‌منظر، زمین‌شکل، زمین‌عارضه و زمین‌شیء، پیکربندی، مصداق‌سازی و در حوزه ژئومورفولوژی، کمی، بصری و کاربردی شد. بدین معنا که با ایجاد یک حلقه واسط، فضای نظری با روش‌ها و تکنیک‌های کمی، مصداق‌سازی و کاربردی شد.^۴

جغرافیا و توسعه، شماره ۶۷، تابستان ۱۴۰۱
تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۶/۱۹
تاریخ بازنگری داوری: ۱۴۰۰/۰۸/۱۸
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۹/۲۶
صفحات: ۲۴۹-۲۱۸



واژه‌های کلیدی:
مدل‌سازی، فرم‌شناسی، ژئومورفولوژی،
ساختار سلسله‌مراتبی.

مقدمه

زمین‌شکل، زمین‌عارضه و زمین‌شیء تبیین و تشریح کرده‌اند. پیش از این، رامشت (۱۳۸۴)، در کتاب نقشه‌های ژئومورفولوژی نمادها و مجازها به اصول فرم‌شناسی در ژئومورفولوژی پرداخته است و مبنای طبقه‌بندی واحدهای فرمی در ژئومورفولوژی را نظریه سلسله‌مراتبی می‌داند (رامشت، ۱۳۸۴: ۱۵). در این شیوه، هر واحد تقسیمی مرکب از چند واحد کوچک‌تر است و در زمره اجزای آن تلقی می‌شود؛ به عبارت دیگر این نوع طبقه‌بندی از نظر ساختاری با طبقه‌بندی‌هایی که در گیاه‌شناسی، جانورشناسی و خاک‌شناسی به کار می‌رود، مشابه است. بزرگترین واحد فرمی در این طبقه‌بندی چشم‌انداز است و هر چشم‌اندازی شامل چند منظر می‌شود. مناظر ژئومورفیک شامل سطوح

صمدزاده و همکاران (۱۴۰۰) در مطالعات خود تعریفی نو از ساختار فرم‌شناسی در دانش ژئومورفولوژی مطرح کرده‌اند. در این پژوهش به این نکته اشاره شده است که اهمیت مفاهیم و نقش آن‌ها بر ترسیم فضای فکری بر کسی پوشیده نیست و تأکید شده که تغییر در مفاهیم بنیادین و نظری علوم، مجال نگرش‌های نوین و خلق مفاهیم نظری جدید، در یک نظم علمی را ایجاد می‌کند و از طرف دیگر این تغییر، نیاز به تغییرات اصطلاح‌شناسی داشته تا از همپوشانی ذهنیت جامعه علمی با مفاهیم پیشین جلوگیری کند؛ از این رو، یک ساختار سلسله‌مراتبی فرم‌شناسی در هفت سطح شامل زمین‌معنا، زمین‌فضا، زمین‌منظر،

که ویژگی مشترک این فرم‌ها در مقیاس‌های فضایی مختلف، همزیستی آن‌ها در فضا است، اگرچه از لحاظ مقیاس زمانی متفاوت هستند. فرم‌هایی که دارای مقیاس فضایی بزرگ‌تری هستند را پایدارتر و فرم‌های مقیاس فضایی کوچک را زودگذر و ناپایدار می‌داند (Starkel, 1999: 61). این پژوهش که نوعی پیوند بین یک پژوهش بنیادین در ارائه ساختار نوین فرم‌شناسی و مصداق‌سازی کاربردی آن در ژئومورفولوژی را نشان می‌دهد، سعی دارد با کمی‌سازی ایده‌های بنیادین در جهت زایایی علم ژئومورفولوژی در حیطه سیستم‌های طبقه‌بندی فرم‌شناسی عمل کند.

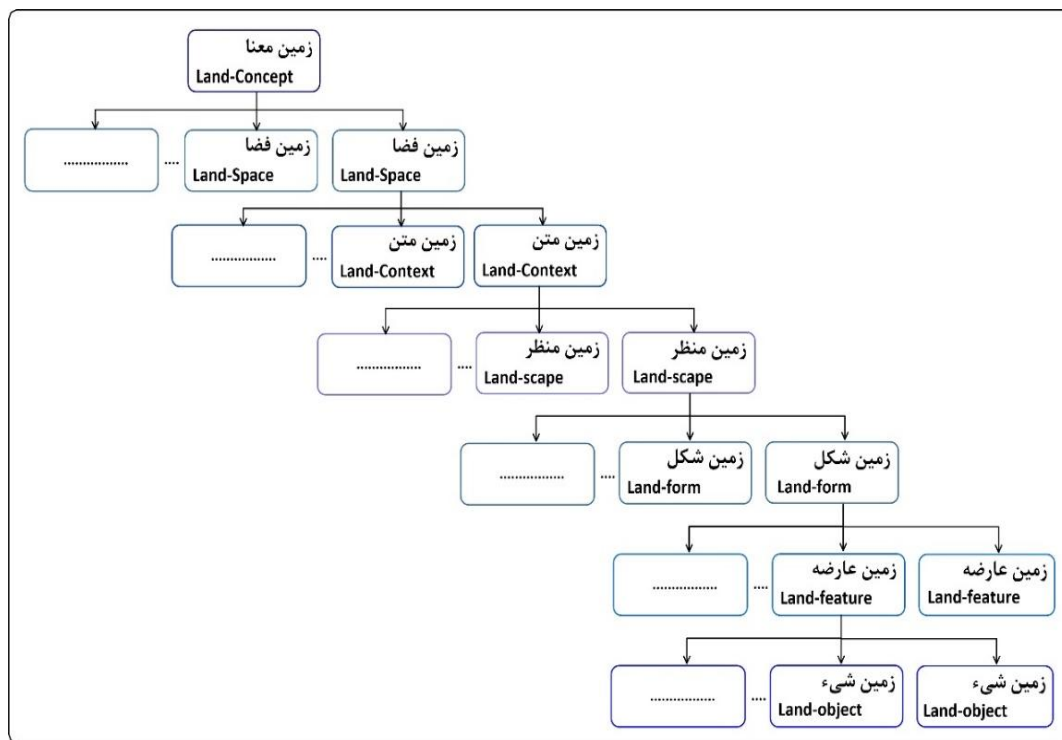
مبانی نظری

در مطالعات پیشین، نظام فرمی در علم ژئومورفولوژی براساس واحدهای چشم‌انداز، منظر، زمین‌نما و فرم ارضی در نظر گرفته شده‌است (رامشت، ۱۳۸۴: ۱۵)؛ اما مقوله‌بندی واحدهای فرمی مورد توجه در این پژوهش، دارای قدرت تفکیک ساختارهای فرمی و سطح‌بندی متفاوتی با طبقه‌بندی‌های قبلی است. صمدزاده و همکاران (۱۴۰۰) با هدف توسعه اصطلاح‌شناسی و توسعه ریشه‌های نظری علم ژئومورفولوژی در قالب یک پژوهش بنیادین و به‌طور کلی در جهت ارائه یک بازتعریف از ساختار سلسله‌مراتبی فرم‌شناسی در علم ژئومورفولوژی گام جدیدی برداشته‌اند. این سیستم سلسله‌مراتبی نوین فرم‌شناسی در ژئومورفولوژی در شکل ۱ ارائه شده است. ویژگی بارز ساختار این مقوله‌بندی، در قدرت تفکیک بالاتر و نیز معنایی بودن این ساختار است. در صورتی که وجه اشتراک ساختار فرمی آن با طبقه‌بندی پیشین، در سلسله‌مراتبی بودن آن است.

ارضی است. واحد سوم در طبقه‌بندی فرمیک، زمین‌نما است. این واحد تأثیرپذیری فرم‌ها از بافت و جنس ارضی را بر مبنای مقاومت آن‌ها در برابر فرسایندهایی بیان می‌دارد و کوچک‌ترین و آخرین واحد تقسیمی در این تقسیم‌بندی فرم ارضی است. زمین دارای سطحی پیوسته است که دارای چشم‌اندازها و لندفرم‌های مختلفی است. طبقه‌بندی و قطعه‌بندی لندفرم‌های زمین به چندین طبقه و کلاس به هنگام مطالعه و بررسی آن‌ها ضروری است. چشم‌اندازها و لندفرم‌ها معمولاً با سلسله‌مراتبی از مقیاس‌ها و ابعاد، شناسایی و تعیین می‌شوند (Hammond, 1964:11; Meijerink, 1988: 23; Mulla, 1988: 389; Pike, 1988:491; Dikau, 1989: 51; Guzzetti & Reichenbach, 1994: 57; Suryana & de Hoop, 1994: 869; Fels & Matson, 1996; Lloyd & Atkinson, 1998; Schmidt, Merz, & Dikau: 1998:56; Etzelmüller & Sulebak, 2000:40; Lucieer, Fisher & Stein, 2003:1

شوم و لیختی (۱۹۶۵: ۱۱۲) و فیلیپس (۱۹۸۸: ۳۱۰) در مطالعات خود، نقش مقیاس‌های مکانی-فضایی و زمانی را در ژئومورفولوژی و سیستم‌های ژئومرفیک به‌وضوح بیان کرده‌اند. دی‌بوئر (۱۹۹۲: ۳۰۳)، نظریه سلسله‌مراتبی و مقیاس مکانی-فضایی را در ژئومورفولوژی فرایندی مورد بررسی قرار داده و از نظر وی سیستم‌های ژئومورفیک دارای ساختاری تودرتو و سلسله‌مراتبی هستند: هر سیستم ژئومورفیکی از سلسله‌مراتبی از سیستم‌های سطح پایین‌تر و هرچند کوچک‌تر تشکیل شده‌است. استارکل (۱۹۹۹: ۶۱) نیز با ارائه مقاله‌ای با عنوان مقیاس‌های مکانی و زمانی در ژئومورفولوژی، با استفاده از سیستم اصطلاح‌شناسی مطرح‌شده توسط برانسدن (۲۷۴: ۱۹۹۶)، فرم‌های مگا، ماکرو، مزو، میکرو، نانو، و پیکو^۱ را به‌صورت سلسله‌مراتبی در بحث مقیاس‌های فضایی مشخص کرده‌است. وی بیان می‌کند

1. Mega- macro- meso- micro- nano- and pico- forms.



شکل ۱: سیستم سلسله‌مراتبی نوین فرم‌شناسی بنیادین در ژئومورفولوژی

مأخذ: صمدزاده و همکاران، ۱۴۰۰

معنای مرتفع‌بودن می‌تواند فلات یا کوهستان و... را دربرگیرد. در واقع معنای مرتفع‌بودن، هم در فلات و هم در کوهستان مستتر است. در نتیجه کوهستان یک زمین فضا و فلات یک زمین فضای دیگری است. وقتی به سطح زمین فضا می‌رسیم، از درجه معنایی کاسته و به درجه فرمی افزوده می‌شود. کوهستان که یکی از زمین‌فضاهای زمین معنایی مرتفع‌بودن است، شامل زمین‌متن‌های مختلفی است؛ به‌عنوان مثال زمین‌متن کوه‌های منفرد، یا زمین‌متن کمربند کوهستانی. اکنون وقتی کمربند کوهستانی را یکی از زمین‌متن‌های زمین فضای کوهستانی در نظر بگیریم، بسته به زاویه دید، مقطع و نوع نگاه ما، زمین‌منظرهای مختلفی را در دل خود جای می‌دهد؛ به‌طور مثال یک دره یخچالی یا یک رشته‌کوه، زمین‌منظرهای مختلف زمین‌متن کمربند کوهستانی هستند. به تعبیر دیگر، یک دره یخچالی یا یک دره رودخانه‌ای، معنای مرتفع‌بودن را حمل می‌کند، در فضای کوهستان قرار دارد و جزئی از

به‌طوری که در شکل ۱ ملاحظه می‌شود، این نظام دارای ساختار سلسله‌مراتبی بوده و هر واحد فرمی می‌تواند دربرگیرنده تعدادی زیرواحد دیگر باشد. از ترکیب هفت واحد سلسله‌مراتبی فرم-معنایی^۱، ساختار فرم‌شناسی نوین در ژئومورفولوژی تدوین شده است که بزرگترین واحد فرمی در این ساختار زمین-معنا و کوچک‌ترین واحد آن زمین‌شیء است. در ادامه به توضیح مختصری از هر یک از سطوح فرم‌شناسی بنیادین در ژئومورفولوژی بر مبنای روش پیشنهادی صمدزاده و همکاران (۱۴۰۰) می‌پردازیم (جدول ۱).

مواد و روش‌ها

در این پژوهش با اتکا به سیستم سلسله‌مراتبی نوین فرم‌شناسی در ژئومورفولوژی و با روش کمی، به‌صورت مصداقی تمامی سطوح مدل فرم‌شناسی، تشخیص و تفکیک شد. همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده است، زمین معنای می‌تواند «مرتفع‌بودن» باشد،

یک قله را تشکیل داده است؛ به طور مثال خطالرأس‌های اصلی که یال‌های اصلی تشکیل‌دهنده قله است، زمین‌عارضه نامیده می‌شود. اگر خطالرأس‌ها یا یال‌های اصلی تشکیل‌دهنده یک قله را زمین‌عارضه بنامیم، خطالرأس‌های فرعی یا شیرها و شکاف‌های کوچکی که بر روی آن دیده می‌شود، به نام زمین‌شیء نامیده خواهد شد که کوچک‌ترین واحد فرمی در این نظام طبقه‌بندی سلسله‌مراتبی است و در مقیاس مطالعاتی ژئومورفولوژی کوچک‌ترین واحد فرم‌شناسی را به خود اختصاص می‌دهد.

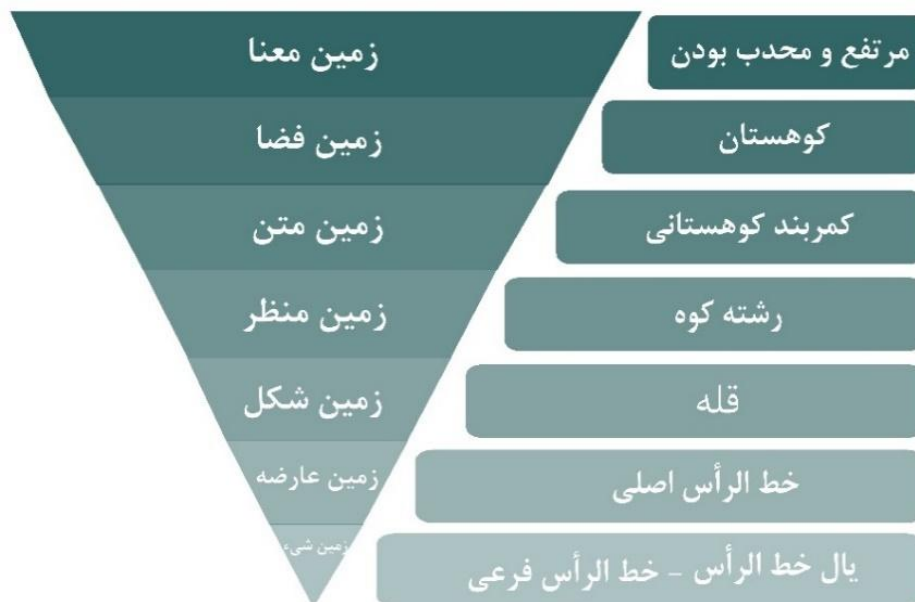
زمین‌متن کمربندهای کوهستانی هستند؛ اما مناظر متفاوتی از یک رشته‌کوه را دارند. در نتیجه در سایر اجزاء مشترک، اما از نظر منظر متفاوت هستند. اکنون رشته‌کوه یکی از زمین‌منظرهای این نظام سلسله‌مراتبی را در نظر بگیرید، لندفرم‌ها یا زمین‌شکل‌های مختلفی در یک رشته‌کوه یا زمین‌منظر وجود دارد. نمونه‌هایی از این لندفرم‌ها، قله، گردنه، سیرک یخچالی و مواردی از این دست هستند. در نتیجه قله یکی از لندفرم‌های زمین‌منظر رشته‌کوه به حساب می‌آید. اکنون لندفرم قله، خود دارای عوارضی دیگر است؛ به عنوان مثال یکی از این عوارض خطالرأس‌های اصلی است که اسکلت

جدول ۱: شرح مفاهیم سطوح فرم‌شناسی

شرح مفاهیم	سطوح فرم‌شناسی
مجموعه‌ای از معانی، مفاهیم، ویژگی‌ها، صفات و خواص و به‌طور کلی هویت مکانی حاکم بر قسمتی از زمین را، زمین‌معنا می‌نامیم که این معانی در تمامی سلسله‌مراتب فرم‌شناسی ساری و جاری است.	زمین‌معنا ^۱
هر زمین‌معنایی، با توجه به نحوه و نوع چیدمان، قرارگیری، تلفیق و ترکیب در فضاهای مختلف جغرافیایی، مفهومی به نام زمین‌فضا ایجاد می‌کند. در نتیجه معنای زمین با توجه به الگوی چیدمانی به‌صورت زمین‌فضاهای مختلف می‌تواند متجلی شود.	زمین‌فضا ^۲
بعد از شکل‌گیری یک زمین‌فضا، معنای جلوه‌گر می‌شوند و در نتیجه، تمایل به تجسد تقویت شده و وجوه مرتبط با فرم تقویت می‌شود. در سلسله‌مراتب فرم‌شناسی بنیادین از معنای به فرم می‌رسیم، یعنی سیر نماد به نمود در این سلسله‌مراتب وجود دارد. زمانی که معنای زمین، هویت فضا را بسته به نوع و الگوی چیدمانی خاص خود دریافت کند و نیز تجسد و نمود بیشتری پیدا کند، مفهوم زمین‌متن تشکیل می‌شود. در نتیجه متأثر از معنای زمین و از تلاقی خواص فضایی، مکانی و فیزیکی در یک موقعیت خاص جغرافیایی، زمین‌متن‌های مختلفی ایجاد می‌شوند.	زمین‌متن ^۳
اگر برشی از یک زمین‌متن زده شود و از زاویه یا نگاه خاصی به آن نگریسته شود، مفهوم زمین‌منظر نمایان خواهد شد. زمین‌منظر و تعریف آن به‌شدت تحت‌تأثیر نگرش محقق، کاربردها، خواسته‌ها و اهداف فرایند پژوهش خواهد بود. زمین‌منظر در مسیر سلسله‌مراتبی فرم‌شناسی بنیادین به نسبت سطوح مافوق خود، تجسد بیشتری پیدا کرده است.	زمین‌منظر ^۴
در برشی که بر زمین‌منظر زده شود، زمین‌شکل معنا پیدا می‌کند. در نتیجه زمین‌شکل تحت‌تأثیر زمین‌منظر است و تغییر در زمین‌منظر به‌شدت زمین‌شکل را متأثر می‌سازد. هر زمین‌منظر می‌تواند نماینده زمین‌شکل‌های متنوعی باشد. درجهٔ تکامل یا نمود فرم‌شناسی به نسبت سطوح قبلی تکامل بیشتری می‌یابد و تجسد معنا به فرم، بیشتر آشکار خواهد شد.	زمین‌شکل ^۵
زمانی که یک ویژگی برجسته شود، عارضه نامیده می‌شود. در صورتی که این ویژگی یا صفت غالب، تواتر یا تکرار فراکتالی یابد، زمین‌عارضه را به‌وجود می‌آورد. در نتیجه زمین‌شکل، مجموعه‌ای از صفات غالب با فراکتالی است که کاملاً متجسد و صلب شده‌اند.	زمین‌عارضه ^۶
هر زمین‌عارضه از عناصر یا اجزای همگن و متجانسی تشکیل شده که به آن‌ها زمین‌شیء گفته می‌شود. دربارهٔ زمین‌شیء، معنا به‌طور کامل متجسد شده و تجانس و همگنی آن، در نظام سلسله‌مراتبی فرم‌شناسی مورد بحث در این پژوهش، به حداکثر رسیده است.	زمین‌شیء ^۷

مأخذ: صمدزاده و همکاران، ۱۴۰۰

1. Land-Concept
2. Land-Space
3. Land-Context
4. Landscape
5. Land-From
6. Land-Feature
7. Land-Objct

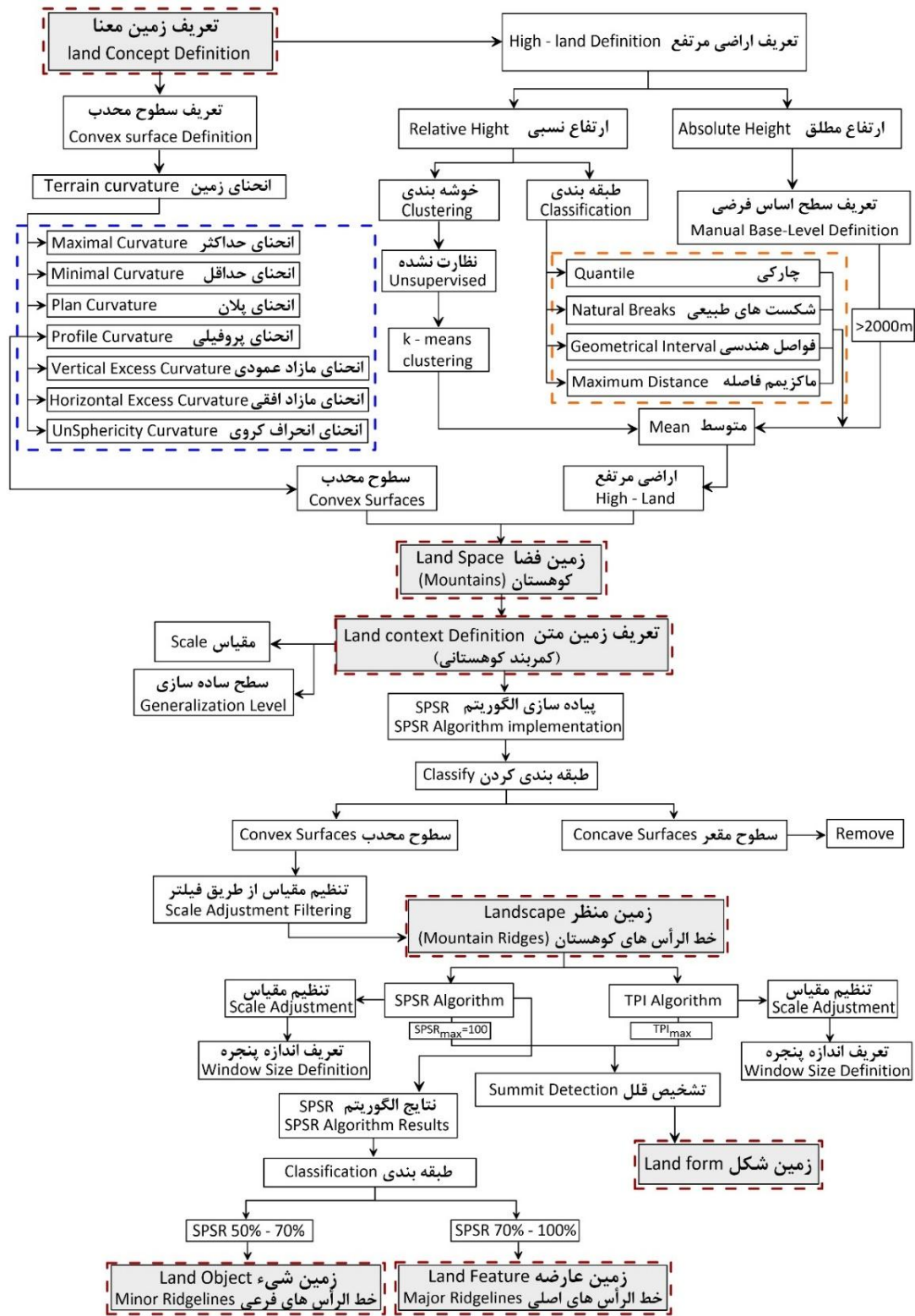


شکل ۲: مصادیق سطوح مدل فرم‌شناسی

مأخذ: صمدزاده و همکاران، ۱۴۰۰

نقشه‌های موضوعی تهیه و ترسیم شدند. به‌منظور دستیابی به اهداف پژوهش فرایند زیر طراحی شده‌است (شکل ۳).

سطوح سلسله‌مراتبی فرم‌شناسی با استفاده از روش‌ها، مدل‌ها و تکنیک‌های کمی، گام‌به‌گام، شناسایی و تفکیک شده و درنهایت به‌صورت



شکل ۳: روند نمای پژوهش

تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۴۰۱

گام نخست: تعریف زمین معنا

گام نخست در خلق ساختار سلسله‌مراتبی فرم‌شناسی، تعیین معنای زمین است. در این پژوهش معنای زمین به صورت مصداقی، مرتفع و محدب بودن در نظر گرفته شد. به بیان دیگر معنای زمین^۱ براساس دو معنای محدب بودن و مرتفع بودن تعریف شد. در نتیجه بایستی به لحاظ کمی، در یک فاز، معنای مرتفع بودن^۲ و در فاز دیگر معنای محدب بودن زمین^۳ تعریف شود.

- تعریف معنای مرتفع بودن زمین

برای تعریف معنای مرتفع بودن، از دو ارتفاع مطلق و نسبی^۴ استفاده شد. در تعیین ارتفاع مطلق یا همان حد بین معنای مرتفع و غیرمرتفع بودن، از یک سطح مبنای فرضی و براساس نظر کارشناسی استفاده شد. این آستانه مطلق می‌تواند بسته به شرایط سرزمینی یک کشور یا منطقه تعریف شود. برای تعیین حد، با توجه به شرایط سرزمینی ایران و نظر کارشناسی آستانه ۲۰۰۰ متر تعیین شد. از طرف دیگر برای تعیین معنای مرتفع بودن از طریق ارتفاع نسبی نیز اقدام شد. در این راستا دو محور طبقه‌بندی^۵ و خوشه‌بندی^۶ مورد نظر قرار گرفت. در بخش طبقه‌بندی از روش‌های طبقه‌بندی چارکی^۷، شکست‌های طبیعی^۸، فواصل هندسی^۹ و روش ماکزیمم فاصله^{۱۰} و در بخش خوشه‌بندی از روش نظارت‌نشده K-means Clustering استفاده شد.

- تعیین معنای مرتفع بودن زمین با روش طبقه‌بندی چارکی

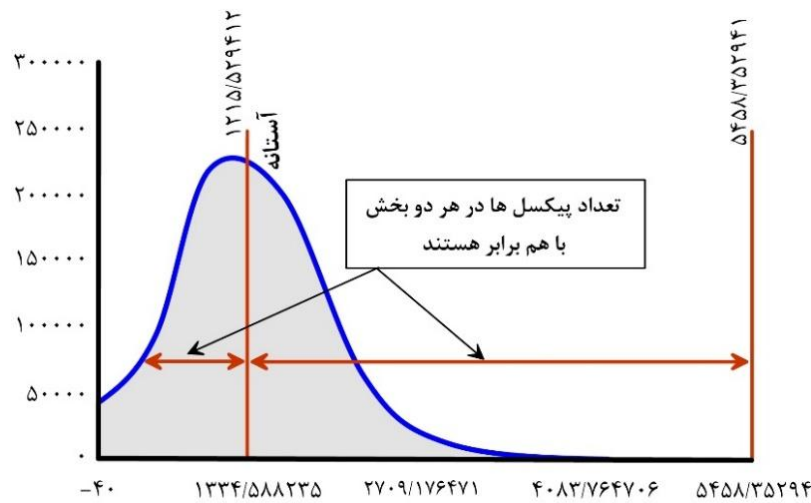
روش طبقه‌بندی چارکی یک روش طبقه‌بندی داده‌است که مقادیر عددی را به گروه‌هایی طبقه‌بندی می‌کند به طوری که دارای تعداد یکسانی باشند. رابطه (۱)، تعداد داده‌هایی که مطابق با روش چارکی در هر کلاس قرار می‌گیرند را نشان می‌دهد؛ به طوری که در این رابطه، Q تعداد مشاهدات هر کلاس، T تعداد کل مشاهدات و N تعداد کلاس‌ها است.

$$Q = \frac{T}{N} \quad \text{رابطه (۱):}$$

در این روش هیچ کلاسی بدون عضو نخواهد بود و همچنین محدودیتی در حد بالا و پایین تعداد اعضای هر کلاس نیز وجود ندارد (سایت رسمی شرکت Esri^{۱۱}). روش طبقه‌بندی چارکی، تعداد کلاس‌ها در بخش بالایی و میانی داده‌ها را یکسان در نظر می‌گیرد و هر کلاس به طور یکسان نمایش داده می‌شود. در مواقعی که با داده‌های ترتیبی^{۱۲} روبه‌رو هستیم، این روش بسیار مفید و مؤثر است. هنگام استفاده از این روش بین داده‌ها امکان ایجاد فاصله^{۱۳} وجود دارد که این فواصل خالی بعضی مواقع می‌توانند منجر به وزن‌دهی بیش از حد به داده‌های پرت^{۱۴} و خارج در آن کلاس شود (شکل ۴).

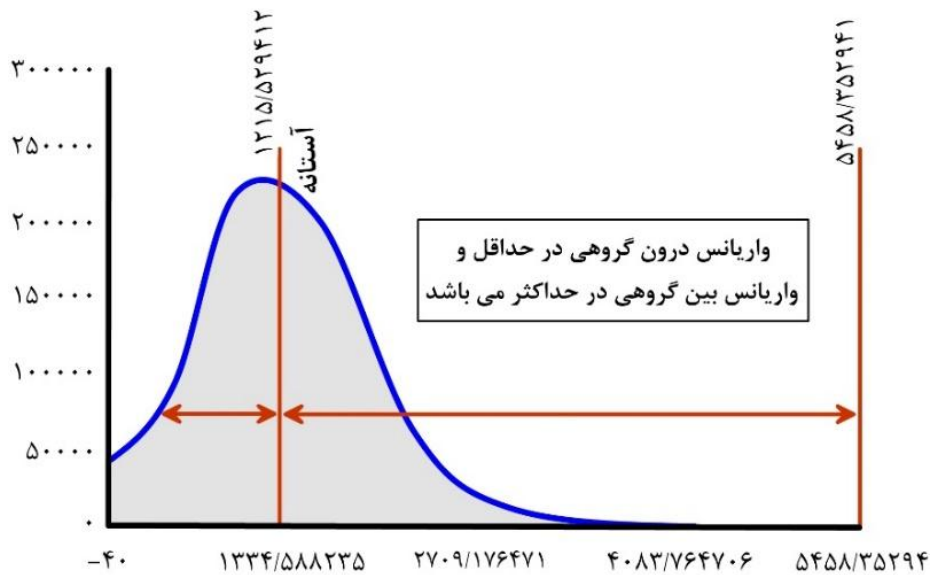
1. Land-Concept Definition
2. High-land Definition
3. Convex-surface Definition
4. Absolute and Relative Height
5. Classification
6. Clustering
7. Quantile
8. Natural Break
9. Geometrical Interval
10. Maximum Distance (Dmax)

11. WWW.Esri.com
12. Ordinal
13. Gap
14. Outlier



شکل ۴: روش طبقه‌بندی چارکی

تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۴۰۱



شکل ۵: روش طبقه‌بندی شکست‌های طبیعی

تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۴۰۱

آیتم‌های شبیه به هم است که یک گروه طبیعی درون مجموعه داده را تشکیل می‌دهند (Jenks, 1967:188). این روش طبقه‌بندی به دنبال مینیمم کردن، انحراف متوسط از میانگین کلاس است، در حالی که انحراف از میانگین با سایر کلاس‌ها به ماکزیمم برسد. این روش واریانس درون گروهی را کاهش و واریانس بین گروهی را افزایش می‌دهد (شکل ۵) و معمولاً به نام GVF^1 نامیده

- تعیین معنای مرتفع بودن زمین با روش طبقه‌بندی شکست‌های طبیعی

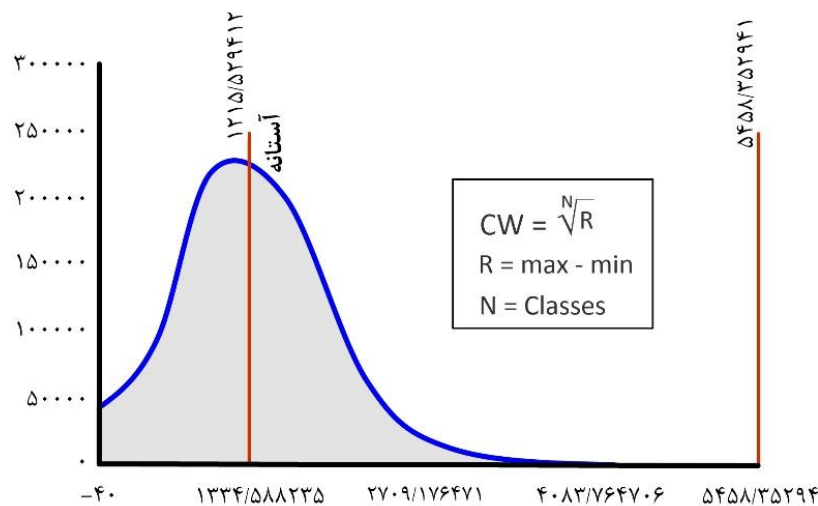
روش طبقه‌بندی شکست‌های طبیعی یک سیستم طبقه‌بندی داده برای بهینه‌سازی آرایش مجموعه‌های داده در کلاس‌های طبیعی است. یک کلاس طبیعی بهینه‌ترین دامنه کلاس است که به صورت طبیعی در یک ست داده، می‌توان یافت. دامنه هر کلاس، ترکیبی از

از سری هندسی هستند. این روش طبقه‌بندی، برای نمایش داده‌هایی که کاملاً به صورت نرمال توزیع نشده‌اند، مناسب است یا زمانی که توزیع داده‌ها به شدت دارای چولگی هستند. روش طبقه‌بندی فواصل هندسی، از روش چارکی در نمایش سطوح پیش‌بینی شده، که اغلب دارای توزیع نرمال نیستند، بهتر است. فواصل هندسی، زمانی که داده‌ها در بخش وسیعی پراکنده شده‌اند و دارای توزیع خوبی نیستند، بهترین عملکرد را دارد (سایت رسمی شرکت Esri).

می‌شود که برابر با تفاضل $SDCM^2$ از $SDAM^3$ است (Jenks & Caspall, 1971:228).

- تعیین معنای مرتفع‌بودن زمین با روش طبقه‌بندی فواصل هندسی

روش طبقه‌بندی فواصل هندسی نوعی الگوی طبقه‌بندی توزیع مقادیر عددی، براساس سری هندسی^۴ است. در این طرح طبقه‌بندی، آستانه‌های طبقه‌بندی یا حد بین کلاس‌ها، براساس فواصل پی‌درپی به‌دست‌آمده



شکل ۶: روش طبقه‌بندی فواصل هندسی، در تعیین آستانه طبقه‌بندی توزیع داده‌های ورودی تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۴۰۱

فرمول براساس روابط فیزیکی فشار هوا را با استفاده از ارتفاع زمین تخمین می‌زند.

$$p = (e^b) \quad \text{رابطه (۲):}$$

به‌طوری‌که در این رابطه p فشار هوا بر حسب میلی‌متر جیوه، e عدد نپرین تقریباً معادل $۲/۷۱۸۲۸$ است و b با استفاده از رابطه (۳) محاسبه می‌شود.

$$b = 6.63 - \frac{h}{7941} \quad \text{رابطه (۳):}$$

در مرحله بعدی در بازه ارتفاعی منطقه مورد نظر، از حداقل ارتفاع تا حداکثر ارتفاع، فشار هوای متناظر به‌دست آمد و در نموداری که در شکل ۷، نشان داده

- تعیین معنای مرتفع‌بودن زمین با روش طبقه‌بندی ماکزیمم فاصله

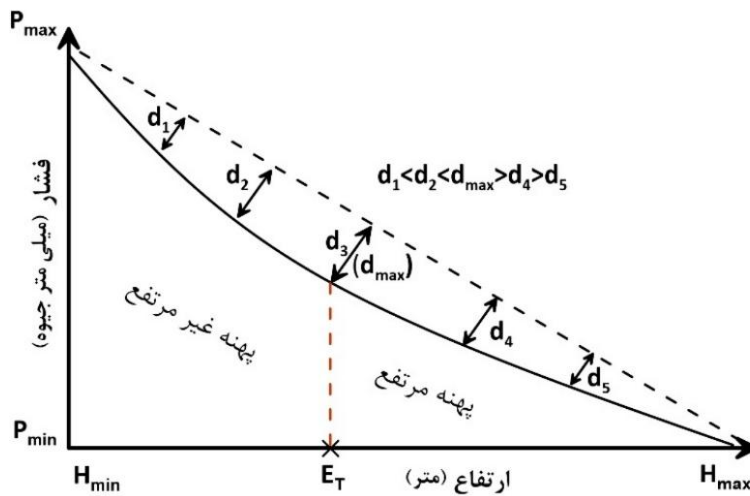
در این روش برای تعیین معنای مرتفع‌بودن زمین از مفهوم رابطه بین فشار هوا و ارتفاع زمین استفاده شده‌است. رابطه (۲)، فشار هوا بر حسب میلی‌متر جیوه را با استفاده از ارتفاع زمین محاسبه می‌کند. این

1. Goodness of Variance Fit (GVF)
2. Sum of squared deviations for class means
3. Sum of squared deviations for array mean

۴. در ریاضیات سری هندسی (Geometric Propagation)، که البته به نام توالی هندسی (Geometric Sequences) نیز شناخته می‌شوند، رشته‌ای از اعداد است که تمامی اعداد بعد از اولین عدد، در عددی ثابت غیر صفر به نام ضریب مشترک (Common Ratio) ضرب می‌شوند.

استفاده از نتایج به‌دست‌آمده از شکل ۷، فاصله مستقیم بین تمامی نقاط بر روی منحنی تغییرات فشار-ارتفاع با خط $P_{max} - H_{max}$ مشخص شده و براساس ماکزیمم فاصله (D_{max})، آستانه ارتفاعی (E_T) مبنای تعریف عنای مرتفع‌بودن مشخص می‌شود.

شده، ترسیم شد. همان‌طور که در این شکل ملاحظه می‌شود، رابطه تغییرات ارتفاع با فشار هوا در ارتفاعات مختلف حالت غیرخطی دارد. در ارتفاعات پایین، تغییرات ارتفاع منجر به تغییرات شدید فشار هوا می‌شود و در ارتفاعات بالا شیب تغییرات فشار هوا بسته به تغییرات ارتفاع، کاهش می‌یابد. اکنون با



شکل ۷: سیستم تعریف معنای مرتفع‌بودن براساس رابطه تغییرات ارتفاع با فشار هوا تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۴۰۱

هدف اصلی این روش در بخش‌بندی n مشاهده در k خوشه است؛ به‌طوری‌که هر مشاهده مرتبط با نزدیک‌ترین فاصله با مرکز ثقل خوشه باشد. درنهایت، ادامه این روند منجر به بخش‌بندی یا خوشه‌بندی تمامی مشاهدات در خوشه‌ها خواهد شد. در این مدل تنها تعداد خوشه‌ها تعیین شده و الگوریتم به‌طور خودکار تمامی مشاهدات را در آن خوشه‌ها (k) خوشه‌بندی می‌کند (Forgy, 1965:775).

در این پژوهش دو خوشه مرتفع و غیرمرتفع براساس ارتفاع سطوح اراضی تعیین شد که این مدل خوشه‌بندی به‌صورت نظارت‌نشده، معنای مرتفع‌بودن را تعیین می‌کند. تعداد خوشه‌ها $k=2$ تعیین شد و مدل خوشه‌بندی k -means Clustering با استفاده از کتابخانه

برای محاسبه فاصله عمودی نقاط از منحنی ارتفاع-فشار تا خط $P_{max} - H_{max}$ از رابطه (۴)، استفاده شد.

$$d = \frac{|ax_0 + by_0 + c|}{\sqrt{a^2 + b^2}} \quad \text{رابطه (۴)}$$

براساس رابطه (۴)، ابتدا معادله خط $P_{max} - H_{max}$ به‌دست آمده و سپس فاصله عمودی بین نقاط روی منحنی ارتفاع-فشار با خط $P_{max} - H_{max}$ به‌دست می‌آید.

- تعیین معنای مرتفع‌بودن زمین با استفاده از روش خوشه‌بندی نظارت‌نشده K -means Clustering
روش k -means Clustering یک روش بهینه‌سازی برداری است که در اصل ریشه در پردازش سیگنال دارد (MacQueen, 1967:291).

مقادیر r, s, t, p, q در ساختار پردازش‌های رستری با پنجره متحرک به ابعاد ۳ در ۳ سطر و ستون (شکل ۸) و با استفاده از روابط (۶) تا (۱۰) به دست آمدند.

Z1	Z2	Z3
Z4	Z5	Z6
Z7	Z8	Z9

شکل ۸: پنجره متحرک به منظور پردازش رستری با ابعاد ۳ در ۳ سطر و ستون تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۴۰۱

رابطه (۶):

$$r = \frac{Z_1 + Z_3 + Z_4 + Z_6 + Z_7 + Z_9 - 2 \cdot (Z_2 + Z_5 + Z_8)}{3 \cdot \Delta s}$$

رابطه (۷):

$$s = \frac{Z_3 + Z_7 - Z_1 - Z_9}{4 \cdot \Delta s^2}$$

رابطه (۸):

$$t = \frac{Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_7 + Z_8 + Z_9 - 2 \cdot (Z_4 + Z_5 + Z_6)}{3 \cdot \Delta s^2}$$

رابطه (۹):

$$p = \frac{\partial z}{\partial x} = \frac{Z_3 + Z_6 + Z_9 - Z_1 - Z_4 - Z_7}{6 \times \Delta s}$$

رابطه (۱۰):

$$q = \frac{\partial z}{\partial y} = \frac{Z_1 + Z_2 + Z_3 - Z_7 - Z_8 - Z_9}{6 \times \Delta s}$$

با توجه به نشان‌گذاری‌های فوق، انحنای پروفیلی^۱ با استفاده از رابطه (۱۱) (Young et al, 1978:3; Krcho, 1973: 278) به دست آمد.

رابطه (۱۱):

$$\text{Profile Curv} = -\frac{p^2 \cdot r + 2 \cdot p \cdot q \cdot r \cdot s + q^2 \cdot t}{(p^2 + q^2) \cdot \sqrt{(1 + p^2 + q^2)}}$$

Scikit-learn زبان برنامه‌نویسی پایتون پیاده‌سازی و اجرا شد و در نهایت از این طریق معنای مرتفع‌بودن زمین تعریف و تعیین شد. نتایج به دست آمده از تمامی روش‌های فوق‌الذکر میانگین‌گیری شد و بدین صورت معنای مرتفع‌بودن زمین به صورت واحد تعریف و تعیین شد.

تعریف معنای محدب‌بودن زمین

گام دوم در تعیین معنای زمین، تعریف معنای محدب‌بودن زمین با استفاده از مدل‌ها و روش‌های کمی بود. بدین منظور از هفت مدل ریاضی محاسبه انحنای زمین در ساختارهای شبکه‌ای استفاده شد. با استفاده از این هفت روش و به کمک مدل رقومی ارتفاعی، سطوح محدب یا معنای محدب‌بودن زمین نیز تعریف شد. هفت مدل انحنای سطحی شامل انحنای حداکثر، حداقل، پلان، پروفیل، مازاد عمودی و مازاد افقی و انحراف کروی از مدل رقومی زمین استخراج شد و با تجمیع نتایج به دست آمده از این مدل‌ها، معنای محدب‌بودن زمین نیز تعریف شد.

- تعیین معنای محدب‌بودن زمین با استفاده از مدل‌های انحنای سطحی

برای تعیین معنای محدب‌بودن زمین از مدل‌های انحنای سطحی استفاده شد. برای محاسبه انحنای سطحی زمین نیاز به محاسبه مؤلفه‌های r, s, t, p, q است (Rana, 2006: 892). برای محاسبه این مؤلفه‌ها از رابطه (۵)، استفاده شد.

رابطه (۵):

$$r = \frac{\partial^2 z}{\partial x^2}, \quad s = \frac{\partial^2 z}{\partial x \partial y}, \quad t = \frac{\partial^2 z}{\partial y^2},$$

$$p = \frac{\partial z}{\partial x}, \quad q = \frac{\partial z}{\partial y}$$

انحنای انحراف کروی، نشان دهنده اختلاف سطح به نسبت کره است و در نتیجه دارای مقدار ۰ برای شکلی کروی است. انحنای دیفرانسیلی به صورت نیمی از تفاضل بین انحنای افقی و عمودی تعریف می‌شود. برای محاسبه این نوع انحنای از رابطه (۱۵) استفاده شد (Shary, 1995:378).

رابطه (۱۵):

$$\text{Differential Curv} = \frac{q^2.r - 2.p.q.s + p^2.t}{(p^2 + q^2).(1 + p^2 + q^2)^{\frac{1}{2}}} - \frac{(1 + q^2).r - 2.p.q.s + (1 + p^2).t}{2.(1 + p^2 + q^2)^{3/2}}$$

از سه انحنای متوسط، انحراف کروی و دیفرانسیلی سایر انحنای شامل: انحنای حداکثر، حداقل، مازاد افقی و عمودی، گوسی، تجمعی کل، دایره‌ای کل و انحنای خطوط جریانی، با استفاده از روابط (۱۶) تا (۱۹) (Shary, Sharaya & Mitusov, 2002:27; Shary, 1995:382) محاسبه شدند.

رابطه (۱۶):

$$\text{Minimal Curv} = \text{Mean Curv} - \text{Unspphericity Curv}$$

رابطه (۱۷):

$$\text{Maximal Curv} = \text{Mean Curv} + \text{Unspphericity Curv}$$

رابطه (۱۸):

$$\text{Horizontal excess Curv} = \text{Unspphericity Curv} - \text{Differential Curv}$$

رابطه (۱۹):

$$\text{Vertical excess Curv} = \text{Unspphericity Curv} + \text{Differential Curv}$$

انحنای کانتوری که به انحنای پلان^۱ نیز معروف است از رابطه (۱۲) (Hengl, T, & Reuter, 2008:151) محاسبه شد. رابطه (۱۲):

$$\text{Plan Curv} = - \frac{q^2.r - 2p.q.s + q^2.t}{\sqrt{(1 + p^2 + q^2)^3}}$$

انحنای متوسط^۲ عبارت است از میانگین انحنای متعامد در همه منحنی‌های تماس که می‌تواند از انحنای پروفیلی و تانژانتی محاسبه شود (Young, 1805:72). رابطه ۱۳ روش محاسبه انحنای متوسط را نشان می‌دهند.

رابطه (۱۳):

$$\text{Mean Curv} = \frac{q^2.r - 2.p.q.s + p^2.t}{(p^2 + q^2).\sqrt{1 + p^2 + q^2}} - \frac{(1 + q^2).r - 2.p.q.s + (1 + p^2).t}{2.(1 + p^2 + q^2)^{3/2}}$$

انحنای متوسط نشان دهنده متوسط تحدب زمین بوده که می‌تواند به طور خاص برای مطالعات ژئومورفولوژیکی استفاده شود. مقادیر مثبت انحنای متوسط در ارتباط با مناطق دارای تجمع سطحی بوده در حالی که مقادیر منفی در مناطق دارای واگرایی نمایش داده می‌شوند (Shary, 1995:378). شری (۱۹۹۵) سیستمی از ۱۲ نوع انحنای پیشنهاد می‌کند که سه انحنای متوسط، غیرکروی و دیفرانسیلی برای محاسبه ۹ انحنای دیگر استفاده می‌شود. انحنای انحراف کروی براساس روش شری با استفاده از رابطه (۱۴) محاسبه شد.

رابطه (۱۴):

$$\text{Unspphericity Curv} = \frac{\left(r.\sqrt{\frac{1+q^2}{1+p^2}} - t.\sqrt{\frac{1+p^2}{1+q^2}} \right)^2 .(1+p^2+q^2) + \left(p.q.r.\sqrt{\frac{1+p^2}{1+q^2}} - 2.s.\sqrt{(1+q^2).(1+p^2)} + p.q.t.\sqrt{\frac{1+p^2}{1+q^2}} \right)^2}{2.(1+p^2+q^2)^{3/2}}$$

گام دوم: تشخیص زمین‌فضا

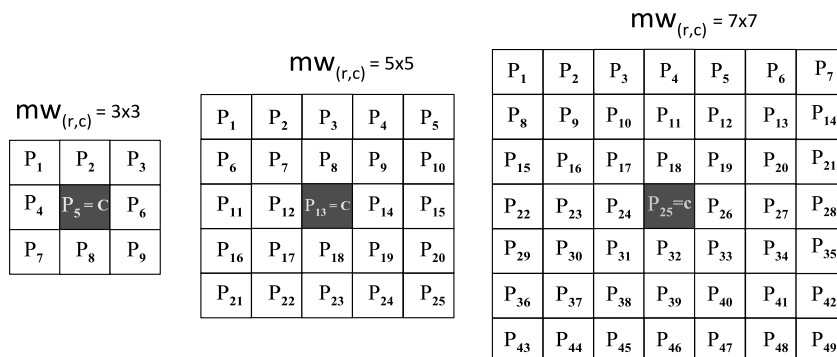
در سلسله‌مراتب فرم‌شناسی بنیادین در سطح بعدی با زمین‌فضا روبه‌رو می‌شویم. در این سلسله‌مراتب طبق معانی در نظر گرفته شده در بخش زمین‌معنا، زمین‌فضای کوهستان مطرح می‌شود. با در نظر گرفتن زمین‌معنای مرتفع و محدب‌بودن که در مرحله پیشین، به دست آمد این دو زمین‌معنا با یکدیگر جمع شده و زمین‌فضای کوهستان را متجلی می‌سازد. به طوری که در زمین‌فضای کوهستان هر دو معنای مرتفع‌بودن و محدب‌بودن مستتر است.

گام سوم: تشخیص زمین‌متن

در سطح بعد، برای تعریف و تشخیص زمین‌متن از زمین‌فضای کوهستان با اعمال مقیاس و سطحی از جنرالیزاسیون زمین‌متن تشخیص داده و تهیه و ترسیم شد.

گام چهارم: تشخیص زمین‌منظر

در گام چهارم، برای تعیین زمین‌منظر، ابتدا از الگوریتم SPSR (شیرانی و همکاران، ۱۴۰۰: ۱۳)، استفاده شد. با استفاده از نتایج الگوریتم SPSR که بر روی مدل رقومی ارتفاعی اعمال می‌شود، مقادیر بالاتر از ۵۰ درصد انتخاب و مقادیر پایین‌تر، حذف شد. سپس با اعمال یک فیلتر، زمین‌منظر خط‌الرأس‌های کوهستانی استخراج شد. الگوریتم SPSR با استفاده از تعریف یک پنجره متحرک بر روی شبکه رستری پیکسل‌های موجود در پنجره متحرک mw با ابعاد سطر و ستونی، r, c را به‌طور زوجی مقایسه کرده (شکل ۹) و در نهایت با استفاده از رابطه (۲۰)، درصد SPSR را محاسبه می‌کند.



شکل ۹: نحوه توزیع پیکسل‌ها در الگوریتم تشخیص تک‌نقطه‌ای SPSR

تهیه و ترسیم: شیرانی و همکاران، ۱۴۰۰

در این رابطه در صورتی که ارزش ارتفاعی پیکسل مرکزی (C) در هر زوج مقایسه بیشتر از ارزش ارتفاعی سایر پیکسل‌های پنجره متحرک $mw_{(r,c)}$ با ابعاد سطر و ستونی (r, c) باشد، یک واحد به مقدار m اضافه می‌شود. تعداد کل حالات مقایسه‌ای محتمل (n) برابر با ضرب تعداد سطر و ستون پنجره متحرک منهای یک واحد است. بعد از محاسبه مقدار m و n با استفاده از رابطه ۲۱ درصد شباهت به عارضه قله و خط‌الرأس

الگوریتم تشخیص تک‌نقطه‌ای قله با استفاده از رابطه ۲۱ پیاده‌سازی و با نماد ریاضی نشان داده شده‌است.
رابطه (۲۰):

$$mw_{(r,c)} = \begin{cases} m = \sum_{i=1}^n C > P_i \\ n = (r \times c) - 1 \end{cases}$$

شد. بدین منظور مقادیر SPSR بین ۷۰ تا ۱۰۰ درصد طبقه‌بندی و تفکیک شد و بدین صورت زمین‌عارضه خطالرأس‌های اصلی استخراج و ترسیم شد.

گام هفتم: تشخیص زمین‌شئی

برای تشخیص و تفکیک خطالرأس‌های فرعی از نتایج الگوریتم SPSR استفاده شد. در این بخش با طبقه‌بندی نتایج SPSR بین مقادیر ۵۰ تا ۷۰ درصد، زمین‌شئی خطالرأس‌های فرعی نیز تشخیص، تفکیک و ترسیم شد.

بحث و یافته‌ها

با توجه به توضیحاتی که در بخش روش‌شناسی پژوهش درباره روش تشخیص و ترسیم سطوح نظام فرم‌شناسی بنیادین، ارائه شد. هریک از سطوح فرم‌شناسی، تشخیص، تفکیک و ترسیم شدند. در گام نخست با تعیین دو معنای مرتفع‌بودن و محدب‌بودن، زمین‌معنا تعریف شد. معنای مرتفع‌بودن با استفاده از دو ارتفاع مطلق و نسبی تعریف شد. ارتفاع مطلق ۲۰۰۰ متر با توجه به موقعیت و شرایط ژئومورفولوژیکی سرزمین ایران و با مشاوره با متخصصان با روش کارشناسی تعیین شد. بر مبنای این سطح فرضی سطوح با معنای مرتفع و کم‌ارتفاع تعیین شد. در شکل ۱۰ زمین‌معنای مرتفع‌بودن با تعیین آستانه فرضی ارتفاع مطلق برای سرزمین ایران تهیه و ترسیم شد.

براساس الگوریتم تشخیص تک‌نقطه‌ای قلیل (SPSR) به‌دست می‌آید.
رابطه (۲۱):

$$S.S_{SPSR} = \left(\frac{m}{n}\right) \times 100$$

گام پنجم: تشخیص زمین‌شکل

در این گام برای تشخیص و تمیز زمین‌شکل از نتایج الگوریتم TPI و SPSR استفاده شد. در بخش قبلی به روش محاسبه الگوریتم SPSR از مدل رقومی ارتفاعی پرداخته شد. الگوریتم TPI یا شاخص موقعیت توپوگرافی یکی از شاخص‌های مطرح در بخش ژئومورفومتری است. الگوریتم TPI، تفاضل بین ارتفاع پیکسل یا نقطه مرکزی پنجره متحرک با متوسط پیکسل‌های مجاور در یک شعاع مشخص است (گالانت و ویلسون، ۲۰۰۰: ۷۳؛ ویس، ۲۰۰۱) مقدار TPI با استفاده از روابط ۲۲ و ۲۳ از مدل رقومی ارتفاعی محاسبه شد.

$$TPI = Z_0 - \bar{Z} \quad \text{رابطه (۲۲)}$$

$$\bar{Z} = \frac{1}{n_R} \sum_{i \in R} Z_i \quad \text{رابطه (۲۳)}$$

در نهایت از ماکزیمم مقدار TPI و ماکزیمم مقدار SPSR که برابر با ۱۰۰ بود در تشخیص و ترسیم زمین‌شکل قله، استفاده شد.

گام ششم: تشخیص زمین‌عارضه

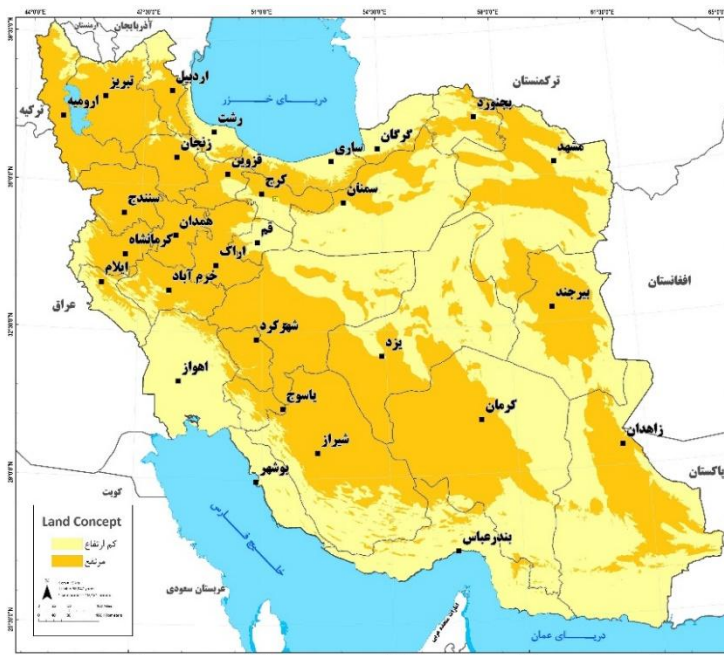
با طبقه‌بندی نتایج به‌دست‌آمده از الگوریتم SPSR، زمین‌عارضه خطالرأس‌های اصلی تشخیص و تفکیک



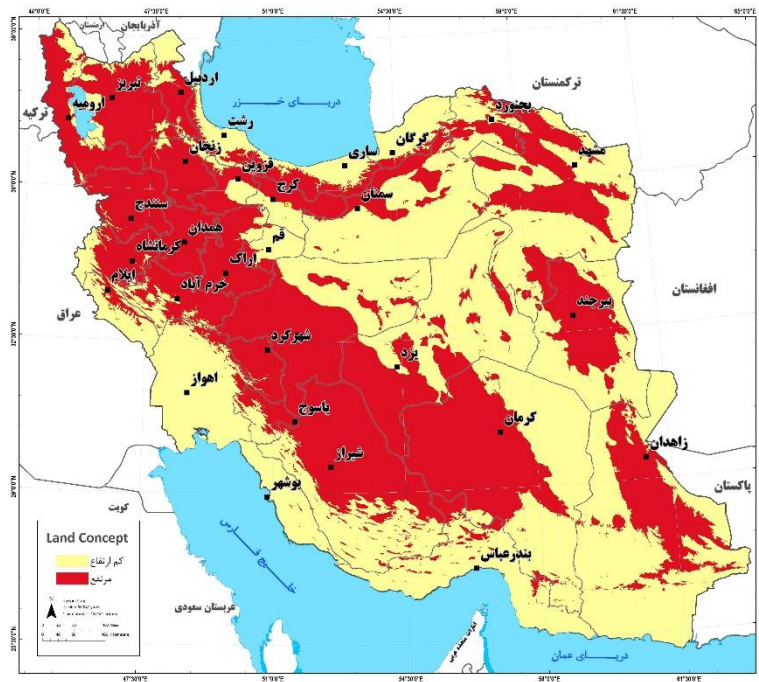
شکل ۱۰: تعیین زمین معنای مرتفع بودن با استفاده از روش تعیین ارتفاع مطلق
تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۴۰۱

فواصل هندسی و نیز روش ماکزیمم فاصله با احتساب دو کلاس (مرتفع و کم ارتفاع) معنای مرتفع بودن زمین را تعریف کردند. در شکل‌های ۱۱ تا ۱۴ نتایج این روش‌ها نشان داده شده‌است.

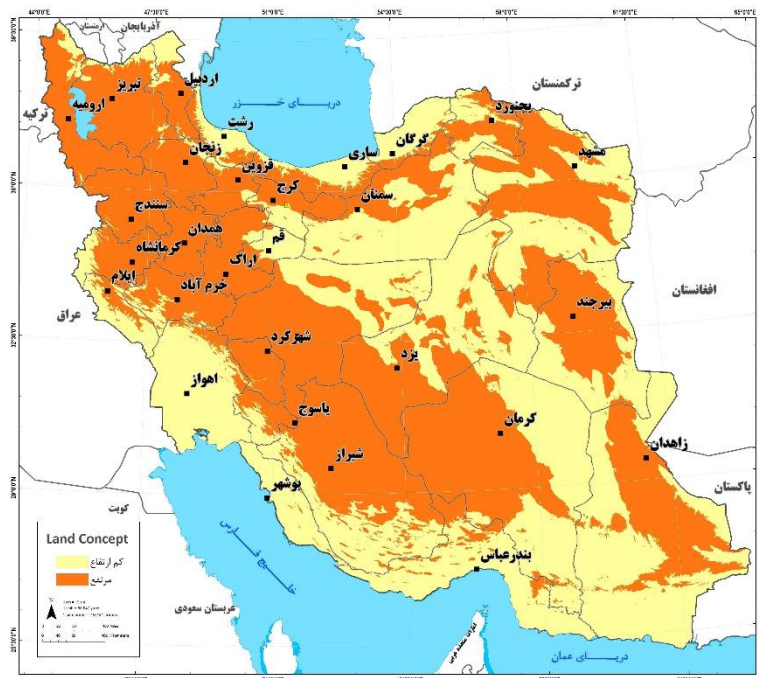
در گام دوم، معنای مرتفع بودن زمین با استفاده از یک حد ارتفاعی نسبی تعیین شد. در این روش از دو رویکرد طبقه‌بندی و خوشه‌بندی استفاده شد. روش‌های طبقه‌بندی چارکی، شکست‌های طبیعی و



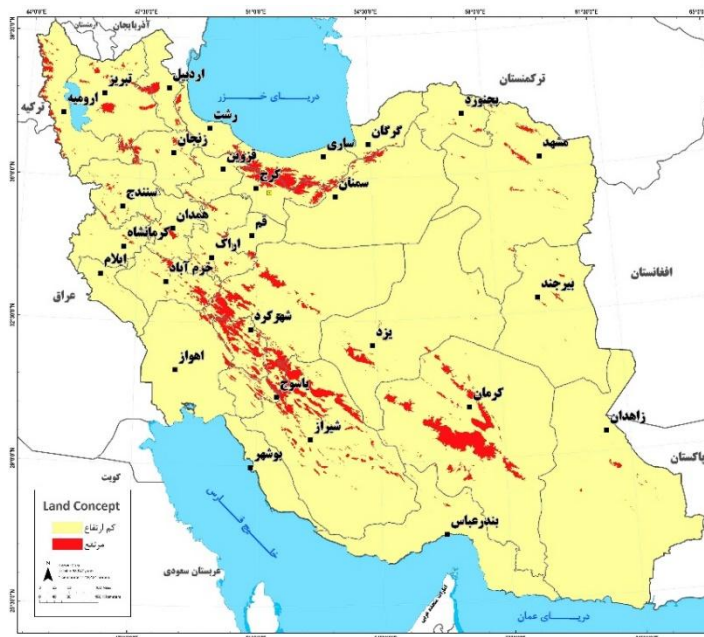
شکل ۱۱: تعیین زمین معنای مرتفع بودن با استفاده از روش طبقه‌بندی چارکی
تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۴۰۱



شکل ۱۲: تعیین زمین معنای مرتفع بودن با استفاده از روش طبقه بندی شکست های طبیعی
تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۴۰۱

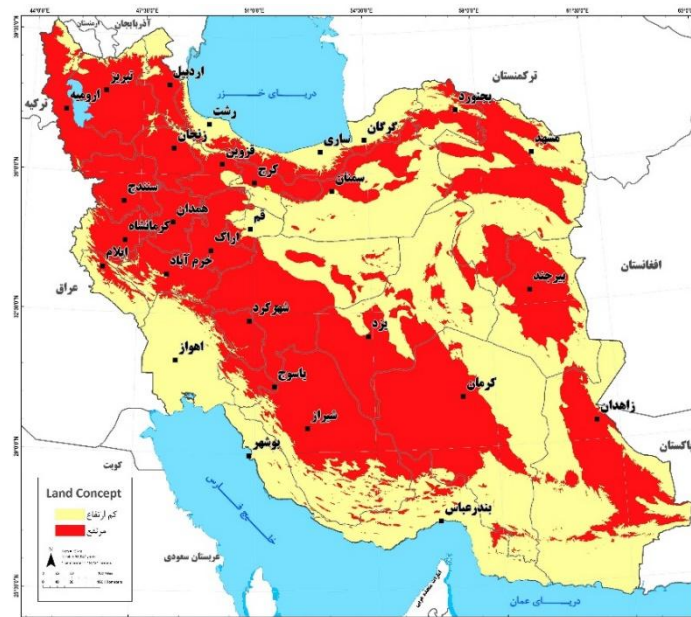


شکل ۱۳: تعیین زمین معنای مرتفع بودن با استفاده از روش طبقه بندی فواصل هندسی
تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۴۰۱



شکل ۱۴: تعیین زمین معنای مرتفع بودن با استفاده از روش طبقه‌بندی D_{max} تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۴۰۱

روش دیگری که جزء روش‌های خوشه‌بندی محسوب می‌شود، برای تعیین معنای مرتفع بودن زمین مورد استفاده قرار گرفت. شکل ۱۵ نتیجه تعیین معنای زمین با استفاده از روش خوشه‌بندی k-means clustering را نشان می‌دهد.



شکل ۱۵: تعیین زمین معنای مرتفع بودن با استفاده از روش خوشه‌بندی K-means Clustering تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۴۰۱

در جدول ۲، لیستی از روش‌های طبقه‌بندی و خوشه‌بندی مربوط به تعریف زمین‌معنای مرتفع‌بودن

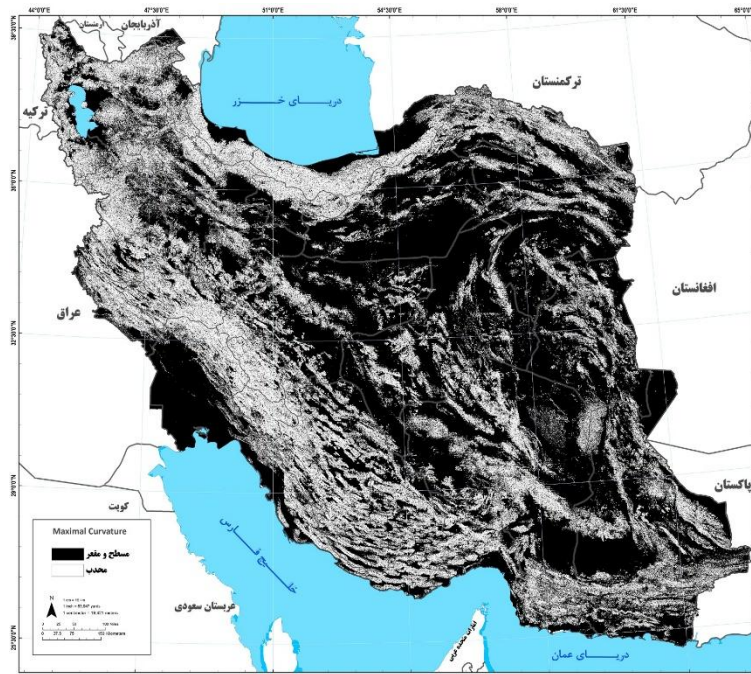
جدول ۲: متدهای تعریف زمین‌معنای مرتفع‌بودن و آستانه‌های ارتفاعی محاسبه‌شده

آستانه ارتفاع (m)	مبنای ارتفاعی	روش عملکرد	متد تعریف زمین‌معنای مرتفع‌بودن
۱۲۳۶	نسبی	طبقه‌بندی	چارکی
۱۲۹۶	نسبی	طبقه‌بندی	شکست‌های طبیعی
۱۱۷۰	نسبی	طبقه‌بندی	فواصل هندسی
۱۲۰۰	نسبی	خوشه‌بندی	روش K-means Clustering
۲۴۳۰	نسبی	طبقه‌بندی	روش D_{max}
۲۰۰۰	مطلق	طبقه‌بندی	روش حد ارتفاعی کارشناسی

مأخذ: نگارندگان، ۱۴۰۱

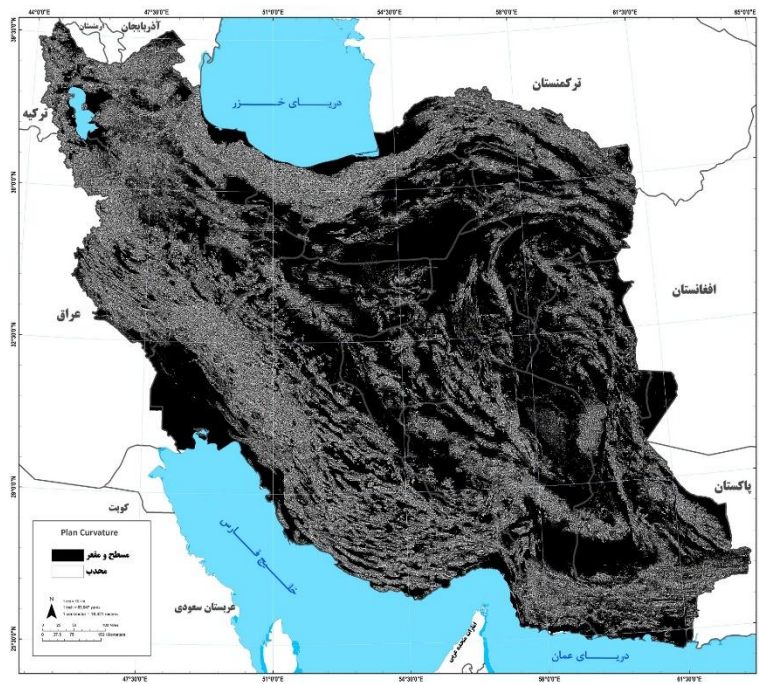
مدل‌ها شامل مدل انحنای حداکثری، پلان، مازاد افقی، پروفیلی، حداقلی، ناکروی و مازاد عمودی بودند. در اشکال ۱۶ تا ۲۲ زمین‌معنا براساس معنای محدب‌بودن ترسیم و نمایش داده شده‌است.

در گام دوم، زمین‌معنا براساس معنای محدب‌بودن تعریف شد. برای تعریف معنای محدب‌بودن از میان مدل‌های چهارده‌گانه تشخیص محدب سطحی، هفت روش که عملکرد متناسب‌تری داشت، انتخاب شد. این

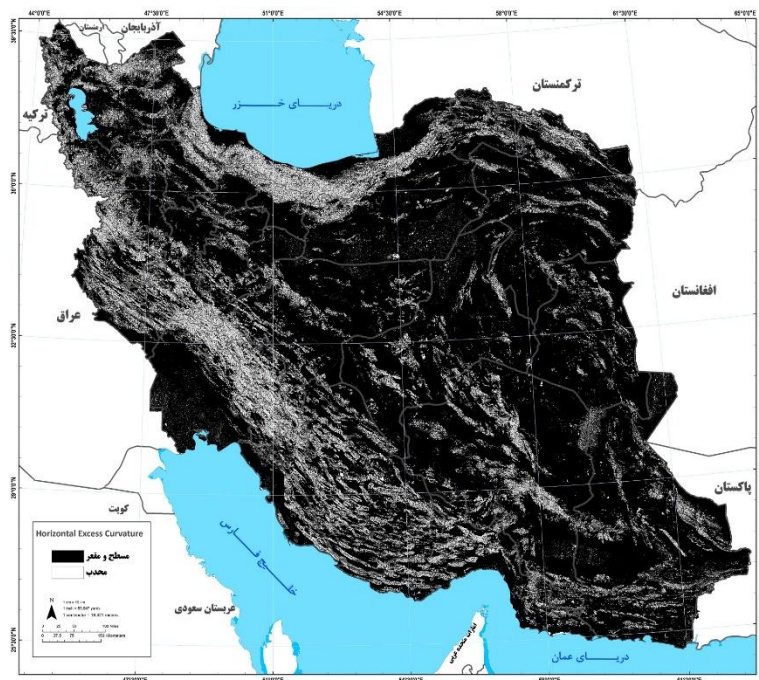


شکل ۱۶: تعیین زمین‌معنای محدب‌بودن با استفاده از انحنای حداکثری

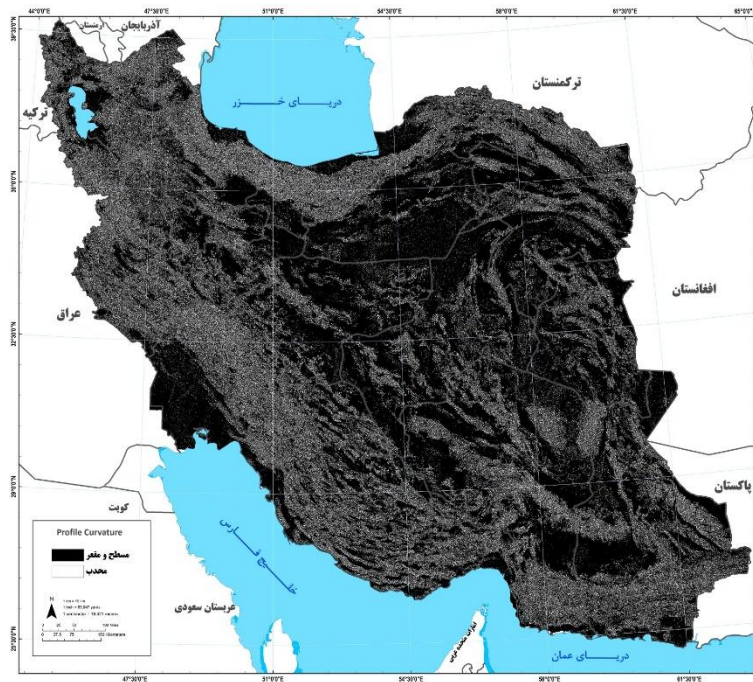
تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۴۰۱



شکل ۱۷: تعیین زمین‌معنای محدب‌بودن با استفاده از انحنای پلان
تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۴۰۱

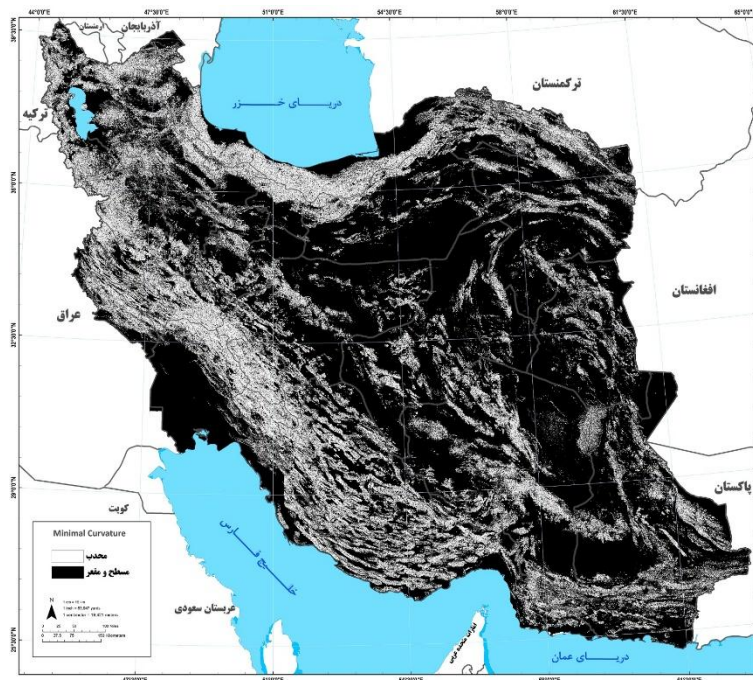


شکل ۱۸: تعیین زمین‌معنای محدب‌بودن با استفاده از انحنای مازاد افقی
تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۴۰۱



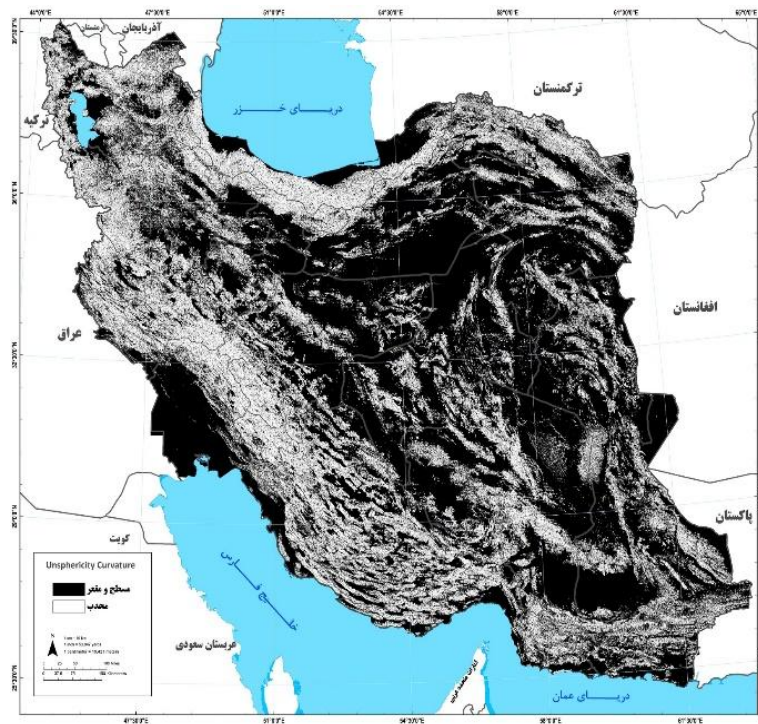
شکل ۱۹: تعیین زمین‌معنای محدب‌بودن با استفاده از انحناى پروفیلی

تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۴۰۱



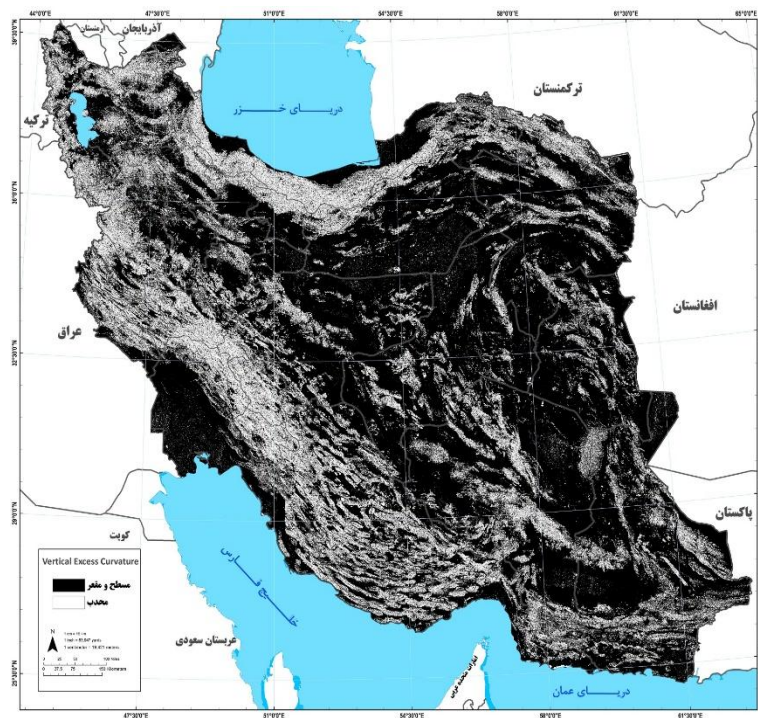
شکل ۲۰: تعیین زمین‌معنای محدب‌بودن با استفاده از انحناى حداقلی

تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۴۰۱



شکل ۲۱: تعیین زمین معنای محدب بودن با استفاده از انحنای ناکروی

تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۴۰۱

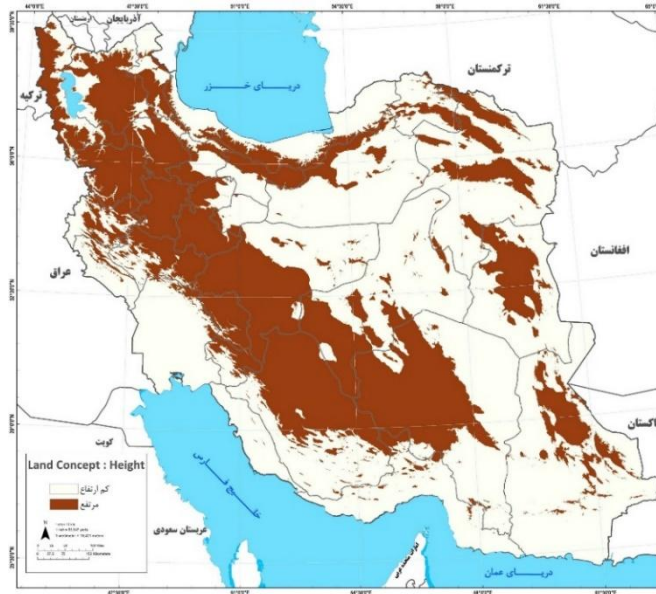


شکل ۲۲: تعیین زمین معنای محدب بودن با استفاده از انحنای مازاد عمودی

تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۴۰۱

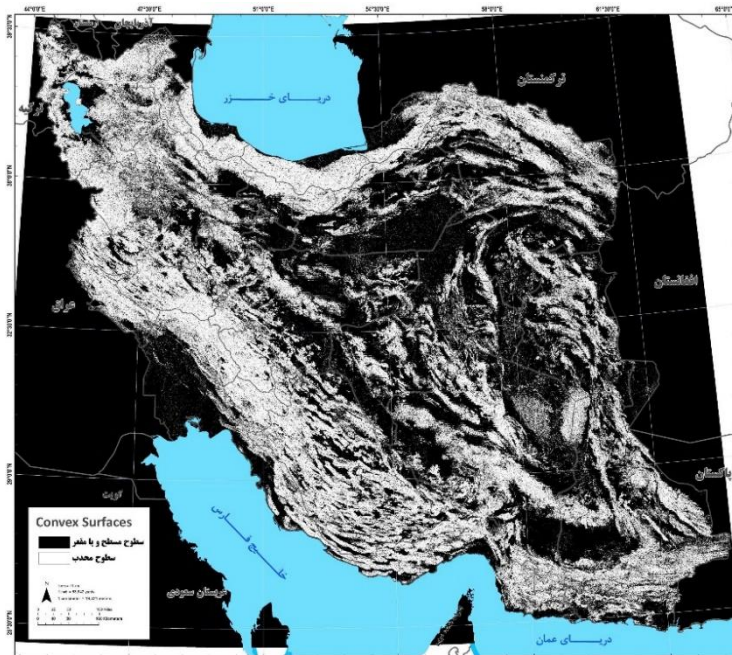
انحنای سطحی به دست آمد. سپس تمامی این هفت نقشه با یکدیگر تلفیق و نقشه نهایی زمین معنای محدب بودن ترسیم شد که نتیجه در شکل ۲۴ نشان داده شده است.

بعد از تهیه نقشه زمین معنای مرتفع بودن با استفاده از شش متد مختلف (جدول ۲)، نتایج آن با هم تلفیق و نقشه نهایی زمین معنای مرتفع بودن ترسیم شد که در شکل ۲۳ نشان داده شده است. نقشه زمین معنای محدب بودن نیز با استفاده از هفت متد محاسبه



شکل ۲۳: نقشه نهایی زمین معنای مرتفع بودن

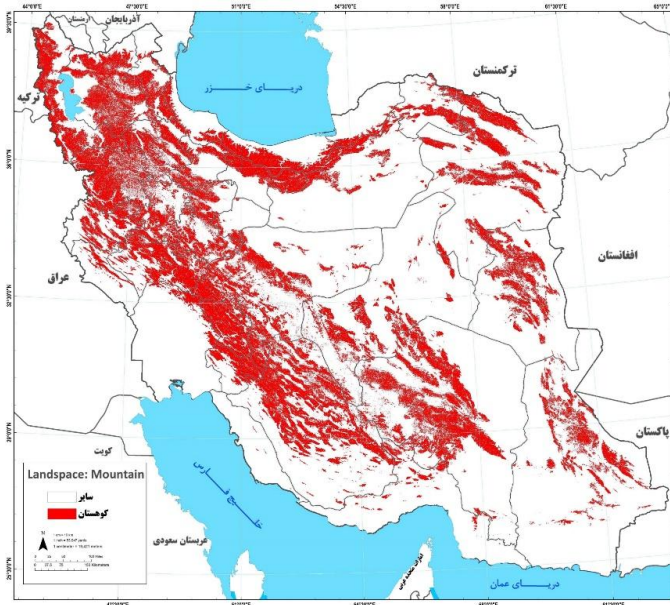
تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۴۰۱



شکل ۲۴: نقشه نهایی زمین معنای محدب بودن

تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۴۰۱

بعد از تهیه نقشه زمین معنا با دو معنای مرتفع و محدب بودن، براساس ترکیب این دو زمین معنا، نقشه ۲۵ نمایش داده شده است. زمین فضای کوهستان به دست آمد که نتایج در شکل

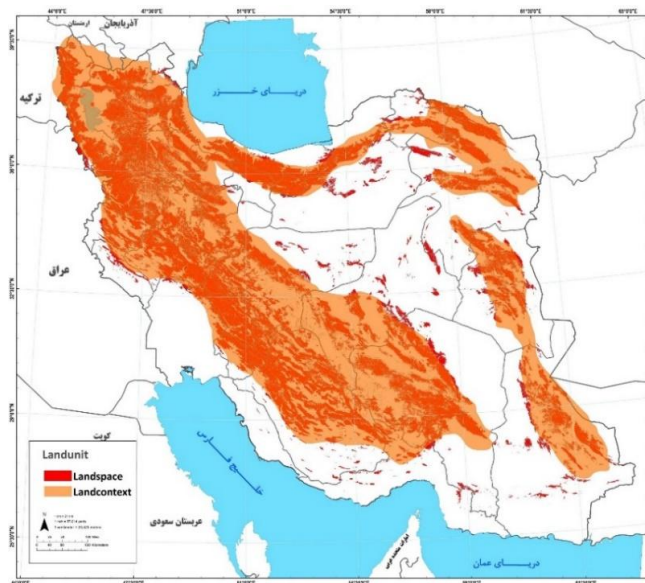


شکل ۲۵: زمین فضای کوهستان

تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۴۰۱

همان طور که در شکل ملاحظه می شود، سه زمین متن اصلی زاگرس، البرز و کمربند شرقی نشان داده شده است.

در ادامه براساس زمین فضای کوهستان که در مرحله پیش به دست آمده بود، زمین متن کمربند کوهستانی به صورت نظارت شده و با نظر کارشناسی تهیه و ترسیم شد که نتیجه در شکل ۲۶ نشان داده شده است.

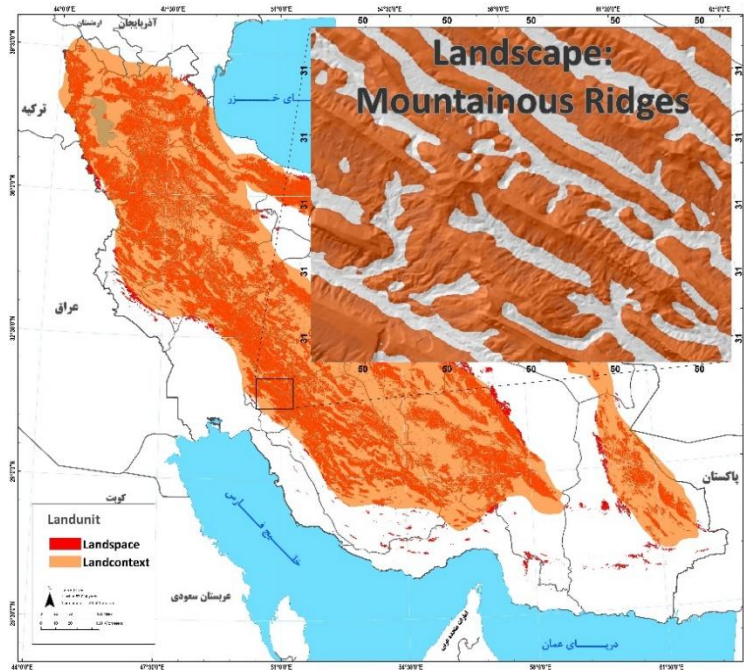


شکل ۲۶: نقشه نهایی زمین متن

تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۴۰۱

که در روش‌شناسی به آن اشاره شد، زمین‌منظر رشته‌های کوهستانی از درون، زمین‌متن استخراج و ترسیم شد که در شکل ۲۷ نشان داده شده‌است.

بعد از استخراج زمین‌متن، در سلسله‌مراتب فرم‌شناسی بنیادین مورد نظر، نوبت به استخراج زمین‌منظر رسید. با طبقه‌بندی نتایج الگوریتم SPSR و اعمال فیلتر تنظیم‌کننده و تنظیم مقیاس به شرحی

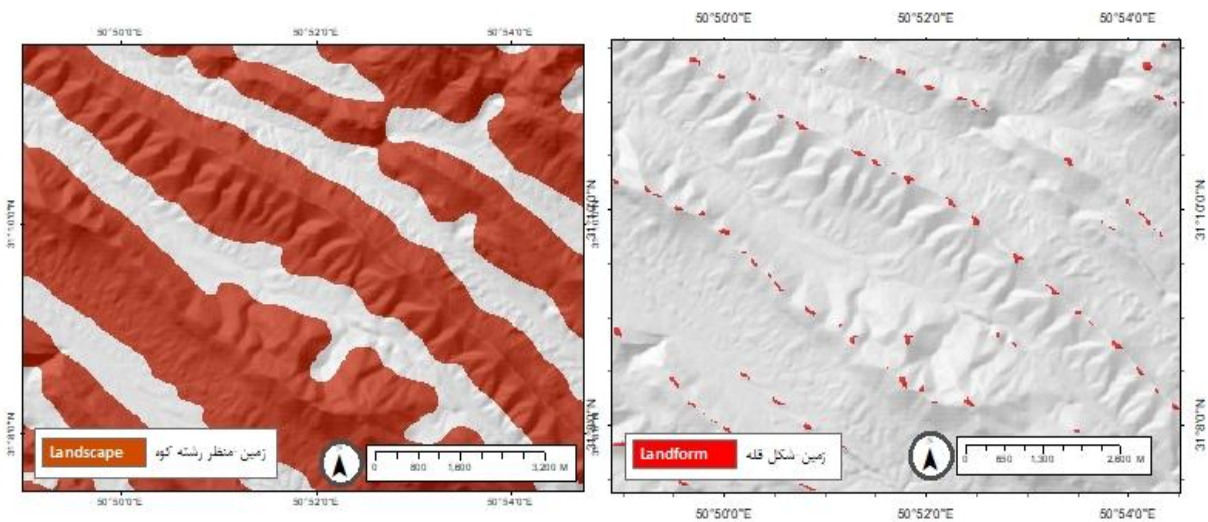


شکل ۲۷: نقشه زمین‌منظر رشته‌های کوهستانی

تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۴۰۱

زمین‌شکل قله در شکل ۲۸ نشان داده شده‌است.

در سطح بعدی، براساس نتایج الگوریتم TPI و SPSR، نقشه زمین‌شکل قله تهیه و ترسیم شد. نقشه

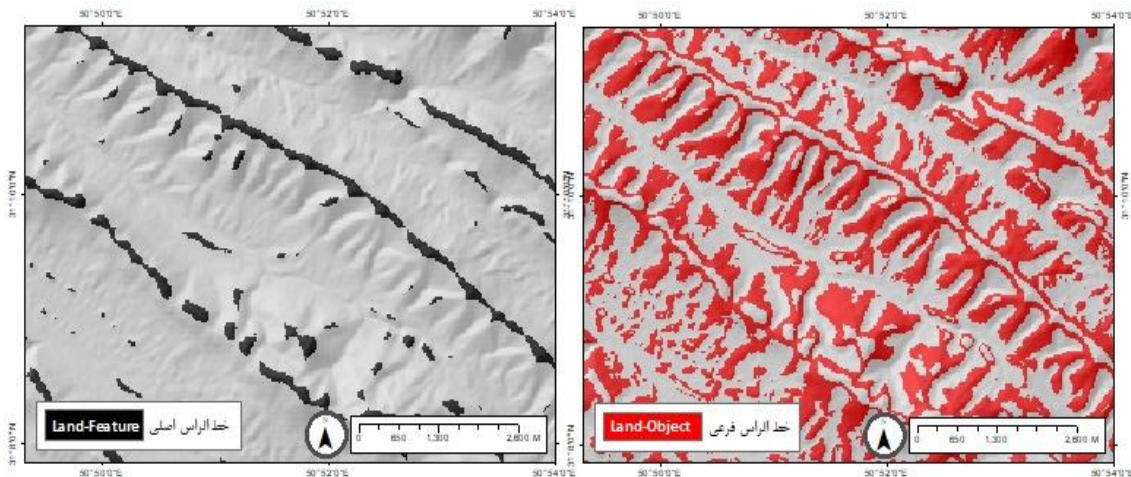


شکل ۲۸: نقشه زمین‌شکل قله

تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۴۰۱

شکل ۲۹ نقشه زمین‌عارضه و زمین‌شیء نشان داده شده‌است.

در نهایت نقشه زمین‌عارضه و زمین‌شیء براساس طبقه‌بندی نتایج الگوریتم SPSR به شرحی که در روش‌شناسی به آن اشاره شد، تهیه و ترسیم شد.



شکل ۲۹. نقشه زمین‌عارضه خط‌الرأس‌های اصلی و زمین‌شیء خط‌الرأس‌های فرعی و یال‌های عرضی تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۴۰۱

باشند تا موجب معنابخشی، پویایی و باروری بیشتر نظام‌های علمی و فکری شوند. در ضمن کمی‌سازی معانی و ایده‌های پژوهش‌های بنیادین منجر به خلق فضای کارکردی منعطف و قدرتمندی می‌شود که نیازهای کاربردی و کارکردی حوزه ژئومورفولوژی و مدیریت محیطی را به‌طور مؤثرتری تأمین خواهد کرد.

در این پژوهش از مبانی نظری خلق شده در درون مکاتب فکری ژئومورفولوژی ایران بهره گرفته شد تا این ایده‌های فکری با زبان بصری و با استفاده از روش‌ها و تکنیک‌های مطالعات کمی، بومی‌سازی و کاربردی شود. در نتیجه در راستای هدف فوق‌الذکر عمل شد. نظام نوین فرم‌شناسی بنیادین مطرح‌شده در مکاتب بومی ژئومورفولوژی ایران مورد کاوش قرار گرفت، با استفاده از روش‌ها و تکنیک‌های کمی، سیر نماد به نمود دنبال شد و نتایج در غالب تصاویر و نقشه‌ها نشان داده شد. به پژوهندگان آتی توصیه می‌شود که در جهت اتصال معانی و مبانی نظری به روش‌ها و تکنیک‌های کاربردی گام بردارند و در صورت امکان در فضای بینابینی حوزه ایده‌پردازی نظری و کاربردهای عملی حرکت کنند.

نتیجه

مطالعات حوزه ژئومورفولوژی عمدتاً در دو محور اصلی دنبال می‌شود. یکی حوزه مطالعات نظری و بنیادین و دیگری که حجم و فرکانس بیشتری را به خود اختصاص داده، حوزه پژوهش‌های کاربردی است. جای مطالعات بینابینی یا واسط بین این دو حوزه مطالعاتی خالی است. در پژوهش‌های کاربردی عمدتاً اتصال یا ارتباط بین روش‌شناسی تحقیق و روش تحقیق، به‌خوبی و آشکارا بیان نشده‌است و در بسیاری موارد اتصال معناداری بین مبانی نظری و فکری پشت‌زمینه روش‌ها و تکنیک‌های مورد استفاده، برقرار نشده‌است. پژوهش حاضر که در اصل در ادامه یک پژوهش بنیادین و نظری است که توسط همین نویسندگان انجام گرفته است، پیوند بین یک حوزه نظری و کاربردی در ژئومورفولوژی ایران است. نکته قابل توجه در این زمینه آن است که این پژوهش با هدف کاربردی‌کردن و کمی‌سازی ایده‌های نظری ناب در ژئومورفولوژی ایران دنبال شده‌است و قصد طرح این موضوع را داشته که پژوهش‌های کاربردی لازم است که ارتباط شفاف و روشنی با مبانی نظری و فکری داشته

منابع

- رامشت، محمدحسین (۱۳۸۴). نقشه‌های ژئومورفولوژی، نمادها و مجازها، انتشارات سمت. صفحه ۱۹۰.
<https://samta.samt.ac.ir/content/10974>
- شیرانی، کورش؛ سینا صلحی؛ فاطمه نعمت‌اللهی (۱۴۰۱). تشخیص خودکار لندفرم‌های زمین با استفاده از تحلیل مکانی الگوی کرنل، سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی. دوره ۱۳. شماره ۱. شماره ۴۶.
<http://dorl.net/dor/20.1001.1.26767082.1401.13.1.4.2>
- صمدزاده، رسول؛ سینا صلحی؛ فاطمه نعمت‌اللهی (۱۴۰۰). نوتریفی از ساختار فرم‌شناسی بنیادین در دانش ژئومورفولوژی، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی. دوره ۱۰. شماره ۲. پی‌اچ ۳۸.
[DOI: 10.22034/GMPJ.2021.276105.1260](https://doi.org/10.22034/GMPJ.2021.276105.1260)
- ### References
- Brunsdon, D. (1996). Geomorphological events and landform change. The Centenary Lecture to the Department of Geography, University of Heidelberg. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 40(3), 273-288.
[DOI: 10.1127/zfg/40/1996/273](https://doi.org/10.1127/zfg/40/1996/273)
- De Boer, D. H. (1992). Hierarchies and spatial scale in process Geomorphology: a review. *Geomorphology*, 4(5), 303-318.
[DOI:10.1016/0169-555X\(92\)90026-K](https://doi.org/10.1016/0169-555X(92)90026-K)
- Dikau, R. (1989). The application of a digital relief model to landform analysis. In: Raper, J.F. (Ed.), *Three Dimensional Applications in Geographical Information Systems*, Taylor & Francis, London, 51-77.
[DOI:10.1201/9781003069454-5](https://doi.org/10.1201/9781003069454-5)
- Etzelmüller, B. and Sulebak, J.S. (2000). Developments in the use of digital elevation models in periglacial geomorphology and glaciology, *Physische Geographie*, 41: 35-58.
https://www.researchgate.net/publication/285427262_Developments_in_the_use_of_digital_elevation_models_in_periglacial_geomorphology_and_glaciology
- Fels, J.E. and Matson, K.C. (1996). A cognitively based approach for hydro-geomorphic land classification using digital terrain models, in: *Proceedings of the 3rd International Conference/Workshop on Integrating GIS and Environmental Modeling*, Santa Fe, NM, January 21-25, 1996, National Centre for Geographic Information and Analysis, Santa Barbara, CA, USA.
http://www.ncgia.ucsb.edu/SANTA_FE_CD-ROM/sf_papers/fels_john/fels_and_matson.html
- Forgy, E. W. (1965). Cluster analysis of multivariate data: efficiency versus interpretability of classifications. *biometrics*, 21, 768-780.
<https://www.semanticscholar.org/paper/Cluster-analysis-of-multivariate-data-%3A-efficiency-Forgy/5c4f6eae0d911e30866b7149c1195cd8c007199b>
- Gallant, J.C., Wilson, J.P. (2000). Primary topographic attributes. In: Wilson, J.P., Gallant, J.C. (Eds.), *Terrain Analysis: Principles and Applications*. Wiley, New York, 51-85.
https://www.researchgate.net/publication/303543730_Primary_topographic_attributes
- Guzzetti, F. and Reichenbach, P. (1994). Toward the definition of topographic divisions for Italy, *Geomorphology*, 11: 57-75.
[https://doi.org/10.1016/0169-555X\(94\)90042-6](https://doi.org/10.1016/0169-555X(94)90042-6)
- Hammond, E.H. (1964). Analysis of properties in land form geography: An application to broad-scale land form mapping, *Annals of the Association of American Geographers*, 54: 11-19.
<https://doi.org/10.1111/j.1467-8306.1964.tb00470.x>
- Hengl, T., & Reuter, H. I. (Eds.). (2008). *Geomorphometry: concepts, software, applications*. Newnes.
<https://libgen.is/book/index.php?md5=2B87E41FF2E1DA7AE0D7C081739F8FF1>
- Jenks, G. F. (1967). The data model concept in statistical mapping. *International yearbook of cartography*, 7, 186-190.
https://archives.lib.ku.edu/repositories/3/archival_objects/382862
- Jenks, G. F., & Caspall, F. C. (1971). Error on choroplethic maps: definition, measurement, reduction. *Annals of the Association of American Geographers*, 61(2), 217-244.
<https://doi.org/10.1111/j.1467-8306.1971.tb00779.x>

- Krcho, J (1973). Morphometric Analysis of Relief on the Basis of Geometric Aspect of Field Theory (=Acta Geographica Universitatis Comenianae). *Geographico-physica*, 425.
<https://www.amazon.com/Morphometric-geographica-Universitatis-Comenianae-Geographico-physica/dp/B0006CGVMI>
- Lloyd, C.D. and Atkinson, P.M. (1998). Scale and the spatial structure of landform: optimizing sampling strategies with geostatistics. In: Proceedings of the 3rd International Conference on GeoComputation, University of Bristol, United Kingdom, 17-19 September 1998, University of Bristol, Bristol, UK, 16.
http://www.geocomputation.org/1998/15/gc_15.htm
- Lucieer, A.; Fisher, P. and Stein, A. (2003). Texture-based segmentation of high-resolution remotely sensed imagery for identification of fuzzy objects, In: Proceedings of the Seventh International Conference on Geocomputation, University of Southampton, Southampton, UK, 9.
<http://www.geocomputation.org>
- MacQueen, J (1967). Some methods for classification and analysis of multivariate observations. In Proceedings of the fifth Berkeley symposium on mathematical statistics and probability (Vol. 1, No. 14, 281-297).
<https://www.cs.cmu.edu/~bhiksha/courses/mlsp.fall2010/class14/macqueen.pdf>
- Meijerink, A.M.J. (1988). Data acquisition and data capture through terrain mapping units, *ITC Journal*, 1:23-44.
<https://library.wur.nl/WebQuery/groenekennis/746977>
- Mulla, D.J. (1988). Using geostatistics and spectral analysis to study spatial patterns in the topography of southeastern Washington State, USA, *Earth Surface Processes and Landforms*, 13: 389-405.
<https://doi.org/10.1002/esp.3290130505>
- Phillips, J. D. (1988). The role of spatial scale in geomorphic systems. *Geographical Analysis*, 20(4), 308-317.
<https://doi.org/10.1111/j.1538-4632.1988.b00185.x>
- Pike, R.J. (1988). The geometric signature: quantifying landslide-terrain types from Digital Elevation Models, *Mathematical Geology*, 20: 491-511.
<https://doi.org/10.1007/BF00890333>
- Rana, S., 2006, Use of Plan Curvature Variations for the Identification of Ridges and Channels on DEM, in: Progress in Spatial Data Handling, edited.
https://doi.org/10.1007/3-540-35589-8_49
- Schmidt, J.; Merz, B. and Dikau, R (1998). Morphological structure and hydrological process modelling, *Zeitschrift für Geomorphologie NF*, 112: 55-66.
https://gfzpublic.gfz-potsdam.de/pubman/item/item_226915
- Schumm, S. A., and Lichty, R. W. (1965). Time, Space, and Causality in Geomorphology. *American Journal of Science* 263(2), 110-119.
 DOI: <https://doi.org/10.2475/ajs.263.2.110>
- Shary, P. A. (1995). Land surface in gravity points classification by a complete system of curvatures. *Mathematical geology*, 27(3), 373-390.
<https://doi.org/10.1007/BF02084608>
- Shary, P. A., Sharaya, L. S., & Mitusov, A. V. (2002). Fundamental quantitative methods of land surface analysis. *Geoderma*, 107(1-2), 1-32.
[https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(01\)00136-7](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(01)00136-7)
- Starkel, L. (1999). Space and time scales in geomorphology. Fourth International Conference on Geomorphology - Plenary Lecture, *Suppl. Geogr. Fis. Dinam. Quat.* 61-66.
 DOI: [10.1127/zfgsuppl/115/1999/19](https://doi.org/10.1127/zfgsuppl/115/1999/19)
- Suryana, N. and de Hoop, S. (1994). Hierarchical structuring of terrain mapping units. In: Proceedings of the Fifth European Conference and Exhibition on Geographic Information Systems, EGIS 94, EGIS Foundation, Utrecht, The Netherlands, 1: 869-877.
<https://library.wur.nl/WebQuery/wurpubs/26931>
- Weiss, A. (2001). Topographic position and landforms analysis. In Poster presentation, ESRI user conference, San Diego, CA (Vol. 200).
aweiss@tnc.org
- Young, M., & Evans, I. S. (1978). Statistical Characterization of Altitude Matrices by Computer. Report 5. Terrain Analysis: Program Documentation. Durham Univ (United Kingdom) Dept of Geography, 1-26.
 DOI: [10.21236/ADA086793](https://doi.org/10.21236/ADA086793)
- Young, T. (1805). III. An essay on the cohesion of fluids. *Philosophical transactions of the royal society of London*, (95), 65-87.
<https://doi.org/10.1098/rstl.1805.0005>