



<https://gеп.uis.ac.ir/?lang=en>
Geography and Environmental Planning
E-ISSN: 2252- 0910
Document Type: Research Paper
Vol. 34, Issue 4, No.92, Winter 2023, pp. 1- 2
Received: 12/09/2022 Accepted: 15/01/2023

The Use of Geomorphometric Indices for Quantifying the Geodiversity of Mountainous Areas (Case study: Mishu Mountain, Northwestern Iran)

Mahdie Esfandiari¹, Davoud Mokhtari^{2*}, Mohammad Hosein Rezaei Moghadam³

1- Ph.D. Student in Geomorphology, Department of Geomorphology, Faculty of Planning and Environmental Science, University of Tabriz, Tabriz, Iran
mahdie.esfandiari@yahoo.com

2- Full Professor, Department of Geomorphology, Faculty of Planning and Environmental Science, University of Tabriz, Tabriz, Iran
d_mokhtari@tabrizu.ac.ir

3- Full Professor, Department of Geomorphology, Faculty of Planning and Environmental Science, University of Tabriz, Tabriz, Iran
rezmogh@tabrizu.ac.ir

Abstract

Geodiversity assessment is one of the first and main steps in the development of land conservation measures. The main goal of the present study was to quantitatively evaluate the geodiversity of a mountain mass, which was neglected due to its visibility. This research proposed a possible standardized method of calculation through the sum of the elements of Surface Area/Ratio (SAR), Dissection Index (DI), Elevation relief (Er), Slope gradient (Sg), Amplitude of relief (Ar), Stream Length (SL), Drainage density (Dd), Stream frequency (fu), Topographic wetness Index (TwI), and lithology. In general, the distance between the northern and southern faults of the studied mountain had created the most diversity around it. The presented method can be a potentially effective tool for supporting decision-making processes regarding management and protection of geodiversity at different scales with possible applications in Iran.

Keywords: Geomorphometric Indices, Geodiversity Quantity, Mishu Mountain, Northwestern Iran

*Corresponding Author

Esfandiari, M., & Mokhtari, D., Rezaei Moghadam, M. H. (2023). The use of geomorphometric indices in quantifying the geodiversity of mountainous areas Case study: Mishu Mountain, Northwest Iran. *Geography and Environmental Planning*, 34 (4), 1 - 2.

2252-0910 © University of Isfahan

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).



10.22108/GEP.2023.135108.1543

Introduction

Mountainous regions are characterized by spatial geomorphic heterogeneity, which gives significant geodiversity to the environment. Geodiversity assessment is one of the first and main steps in the development of land conservation measures. Geodiversity studies can be a valuable tool in ecosystem management and ecosystem service delivery, including sustainable geotourism. In recent decades, many researchers have turned their attention to the definition of geodiversity and its relationship to biodiversity, natural environment protection, ecosystem services, and geotourism. This research tried to use and measure some indicators to measure geomorphological diversity in Mishu mountain region. The Mishu Mountains contain a variety of geomorphological phenomena. The mountain area is less popular today among different regions due to habitat destruction and species extinction. In the past, it was one of the most valuable regions in the country in the regional network and was considered as an irreplaceable region. Due to the recent droughts, lack of codified management plans, and lack of attention to control and supervise miners as one of the main conflicts in the Mishu Mountains, we can point to the imbalance between livestock and rangeland. This area has witnessed many destructions over the past years. Mainly, geodiversity of Mishu Mountain region has been involved in its development, providing both opportunities and constraints that need to be managed and understood. With the advent of new approaches to geodiversity, geographical spaces, such as Mount. Misho can be used effectively.

Materials & Methods

In this research, the methods of Benito-Calvo et al. (2009) and Melelli et al. (2017) were used with some special changes. Moreover, a possible standardized method was proposed through the sum of the values of the elements of Surface Area/Ratio (ASR), Dissection Index (DI), Elevation relief (Er), Slope gradient (Sg), Amplitude of relief (Ar), Stream Length (SL), Drainage density (Dd), Stream frequency (fu), Topographic wetness Index (TwI), and lithology. In this article, the quantitative index of GMI was estimated with 9 geomorphometric indices derived from digital elevation models in GIS environment. In addition, the lithology index was extracted from the geological map (Eq. 1).

$$GmI = SARv + DIv + ERv + SGv + Arv + SLv + Ddv + Fuv + TWIv + Geov$$

It is necessary to mention that the maps went through two stages of processing in all the factors, except for the factor of geological map. The first step was to extract the raw data. The second stage was based on normalization by using natural ruptures. This algorithm reduced the variance within the groups and maximized the variance between them. In the stage of Normalization, the ArcGIS 10.7 reclassification tool was used to create 5 classes for each factor. V1 and V5 were the lowest and highest diversity classes (V), respectively. This formula was classified into 5 categories (very low to very high levels). The focus of the research method of this model was on the spatial analysis of the indicators obtained from Dem 12.5 meters. To evaluate the variability of each parameter, a focal function was applied as a result of the variability.

Research findings

The results of this study showed that the geodiversity range of the study area decreased from the peaks to the plains, while the areas with low geodiversity values were located in the plains. The lowest diversity (V1) consisted of Quaternary deposits and the highest diversity (V4 and V5) was composed of carbonate formations, intrusive masses, and volcanic formations. Since they were the rarest types of rocks all over the Earth's surface, they were mainly located in the eastern Mishu Mountains. The high values of diversity for the geological factors were related to the erosion-resistant geological substrates, such as volcanic compositions and intrusive masses, while the lowest values of diversity were related to the Quaternary deposits along the valleys and plains.


Discussion of Results & Conclusion

The results of the present research showed that the replacement of landforms with geomorphometric parameters and their results in terms of spatial diversity could be a valuable parameter in defining the diversity of physiographic units. Comparison of the results with the geomorphological map of the region provided a validation method. The results showed that the geodiversity range of the study area decreased from the peaks to the plains, while the areas with low geodiversity values were located in the plains. Also, the lowest diversity (V1) consisted of Quaternary deposits and the highest diversity (V4 and V5) consists of carbonate formations, intrusive masses, and volcanic compounds because they were the rarest types of rocks all over the Earth, which were mainly located in the eastern parts of Mishu Mountains. The high values of diversity for the geological factors were related to the erosion-resistant geological substrates, such as volcanic compounds and intrusive masses, while the lowest values of diversity were related to the Quaternary deposits along the valleys and plains.

کاربرد شاخص‌های ژئومورفومتریک در تعیین کمیت ژئودایورسیتی مناطق کوهستانی مطالعه موردی: کوهستان میشو داغی، شمال غرب ایران

مهدیه اسفندیاری، دانشجوی دکتری، گروه ژئومورفولوژی، دانشکده برنامه ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

mahdie.esfandiari@tabrizu.ac.ir

داود مختاری *، استاد تمام، گروه ژئومورفولوژی، دانشکده برنامه ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

d_mokhtari@tabrizu.ac.ir

محمدحسین رضائی مقدم، استاد تمام، گروه ژئومورفولوژی، دانشکده برنامه ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

Rezmogh@tabrizu.ac.ir

چکیده

ارزیابی ژئودایورسیتی یکی از مراحل اولیه و اصلی در توسعه اقدامات حفاظت از زمین است. هدف اصلی پژوهش حاضر، ارزیابی کمی تنوع زمینی توده کوهستانی است که از شدت نمایان بودن مورد اغفال است. این پژوهش، یک روش استاندارد شده احتمالی پیشنهاد می‌کند که از طریق جمع مقادیر عناصر تراکم آبراهه، فرکانس جریان، برجستگی ارتفاع، شدت فرسایش، گرادیان شیب، رطوبت توپوگرافی، شیب طولی رودخانه، نسبت مساحت سطح، فراوانی ناهمواری و لیتولوژی محاسبه می‌شود. نتایج نشان‌دهنده آن بود که تنوع تراکم آبراهه در دامنه‌ها بیشتر است. مقادیر زیاد تنوع در عامل زمین‌شناسی مربوط به بستر زمین‌شناسی مقاوم در برابر فرسایش است. زاویه شیب بیشتر تنوع بیشتری را در منطقه ایجاد می‌کند. مقدار زیاد شاخص شدت فرسایش موجبات شکل‌گیری تنوع بیشتری را در منطقه فراهم کرده است. مقدار زیاد فرکانس جریان 5 در منطقه موجبات تنوع بیشتری در منطقه شده است. مقادیر زیاد تر شاخص فراوانی ناهمواری به طور دقیق بر مناطقی منطبق است که تغییر شکل چشمگیری دارند و نشان‌دهنده تنوع بیشتری است. بیشترین مقدار شاخص رطوبت توپوگرافی $20/8$ و در مناطق دشتی است. مقادیر نزدیک به $0/00$ یا $1/00$ برجستگی ارتفاع هر دو توپوگرافی زیر افقی را نشان می‌دهند که مقدار نزدیک تر $1/00$ نشان‌دهنده تنوع بیشتری در منطقه است. مقادیر زیاد نسبت مساحت سطح، حاکی از یک منطقه ناهموار با تنوع زیاد است. بخش‌هایی تنوع بیشتری دارند که مقادیر شاخص شیب طولی رودخانه بیشتری به خود اختصاص داده‌اند. در کل، حد فاصل گسل شمالی و جنوبی کوهستان بیشترین تنوع را در اطراف خود ایجاد کرده است. روش ارائه شده ابزاری بالقوه و مؤثر برای حمایت از فرایندهای تصمیم‌گیری درباره مدیریت و حفاظت از ژئودایورسیتی در مقیاس‌های مختلف با کاربردهای احتمالی بیشتر در ایران است.

واژه‌های کلیدی: شاخص‌های ژئومورفومتریک، کمیت ژئودایورسیتی، کوهستان میشو داغی، شمال غرب ایران.

*نویسنده مسئول

اسفندیاری، مهدیه، مختاری، داود، رضائی مقدم، محمد حسین. (۱۴۰۱). کاربرد شاخص‌های ژئومورفومتریک در تعیین کمیت ژئودایورسیتی مناطق کوهستانی مطالعه موردی: کوهستان میشو داغی، شمال غرب ایران جغرافیا و برنامه ریزی محیطی، ۳۴ (۴)، ۲۲-۱.



مقدمه

ژئودایورسیتی^۱، نقشی کلیدی در سیاست‌های مدیریت و حفاظت سرزمینی دارد و مفهوم آن به‌خوبی از سوی جامعه علمی در سراسر جهان پذیرفته شده است. میان تعاریف مختلف موجود، تعریف موری گری^۲ یکی از پر استنادهاست که ژئودایورسیتی را به‌عنوان گستره طبیعی (تنوع) زمین‌شناسی (سنگ‌ها، کانی‌ها و فسیل‌ها)، ژئومورفولوژیکی (فرم‌های زمین، توپوگرافی و فرایندهای طبیعی) و ویژگی‌های خاک و هیدرولوژیکی تعریف می‌کند (Gray, 2004). تعریف و ارزیابی اجزای غیر زنده گامی اساسی برای مقایسه و مدل‌سازی سیر تکاملی اکوسیستم است؛ بنابراین از دهه گذشته، جامعه علمی شروع به توسعه زمینه تحقیقاتی خاص در علوم زمین با هدف تعریف و اندازه‌گیری، در دیدگاه کمی، تنوع اجزای غیر زنده یا ژئودایورسیتی کرده است (Melelli et al., 2017). در دهه‌های اخیر بسیاری از محققان توجه خود را به موضوع تعریف ژئودایورسیتی و روابط آن با تنوع زیستی، حفاظت از محیط‌زیست طبیعی، خدمات اکوسیستم و ژئوتوریسم معطوف کرده‌اند. در ایران اگرچه مطالعات زیادی در ارتباط با ژئومورفولوژی منطقه مورد مطالعه صورت گرفته است (مختاری، ۱۳۹۰؛ رضایی مقدم و همکاران، ۱۳۹۲؛ پیر علیلو و همکاران، ۱۳۹۳)، تاکنون مطالعه مدونی درباره ژئودایورسیتی منطقه صورت نگرفته است. در سال‌های اخیر، تعداد کمی از پژوهش‌ها به مسائل روش‌شناختی مربوط به ارزیابی ژئودایورسیتی توجه کرده‌اند. به‌تازگی در زمینه ژئودایورسیتی، چندین نویسنده شاخص‌های مبتنی بر ویژگی‌های توپوگرافی را استفاده و آزمایش کردند. این مطالعات فرسایش ناهمواری را به‌عنوان یک عنصر ساختاری چشم‌انداز (Zwoliński, 2009)، ناهمواری توپوگرافی را به‌عنوان ضریب اندازه‌گیری واحدهای همگن نقشه‌های اساسی و داده‌های مورفومتری را به روش‌های مختلف برای کمی‌کردن تنوع (Calvo et al., 2009 Santos et al., 2020)؛ و ایجاد الگوریتم اقدام برای ارزیابی ژئودایورسیتی لندفرم زمین با استفاده از پارامترهای ژئومورفومتریکی و بر تحلیل‌های فضایی شاخص‌های حاصل از DEM معرفی کرده‌اند (Najwer, 2015; Zwoliński et al., 2018; Melelli et al., 2017; Kot, 2017 & Zwoliński, 2015؛ مقصودی و همکاران، ۱۳۹۸؛ حق‌جو، ۱۳۹۹). سنتوس و همکاران در مطالعه خود نقشه شاخص ژئودایورسیتی منطقه را ایجاد کردند که نشان‌دهنده غنا و توزیع عناصر تنوع زمین (زمین‌شناسی، ژئومورفولوژی، خاک و هیدرولوژی) در سراسر قلمرو است (Santos et al., 2020). با این خروجی متنوع‌ترین دایورسیتی مناطق شهری شناسایی شد. نتایج نشان‌دهنده آن بود که شهرنشینی بخش چشمگیری از مناطق طبقه‌بندی شده با شاخص‌های تنوع زمینی زیاد و بسیار زیاد را تحت‌تأثیر قرار داده و این امر نشان‌دهنده آن است که محیط کالبدی و در نتیجه تنوع زیستی در معرض تهدید جدی قرار دارد و باید در سیاست‌های عمومی و مدیریت سرزمینی مورد توجه قرار گیرد. پیریرا و همکاران بر استفاده از مقیاس مناسب (خرده، متوسط و بزرگ) تأکید دارند (Pereira et al., 2013). آنها شاخص‌های زمین‌شناسی (چینه‌شناسی و سنگ‌شناسی)، ژئومورفولوژی، دیرینه‌شناسی و خاک را به‌عنوان مؤلفه‌های اصلی ژئودایورسیتی به کار بردند. در این بررسی شاخص ژئودایورسیتی به شکل نقشه ایزولاین تعریف شده است که به‌عنوان ابزاری در برنامه‌ریزی کاربری زمین، به‌ویژه

1. Geodiversity

2. Mury Gray

شناسایی مناطق اولویت دار برای حفاظت، مدیریت و استفاده از منابع طبیعی در سطح ایالت استفاده می‌شود. کالوو و همکاران نقشه مورفومتریک (۱۰ طبقه)، ریخت اقلیمی (پنج طبقه) و زمین‌شناسی (۱۵ طبقه) را با عملیات همپوشانی به ۴۱۹ کلاس طبقه‌بندی کردند (Calvo et al., 2009). با استفاده از متریک‌های منظر (تراکم ناهمواری در هر قطعه، شاخص تنوع و یکنواختی شانون، شاخص تنوع و یکنواختی سیمپسون) تنوع چشم‌انداز محاسبه شد.

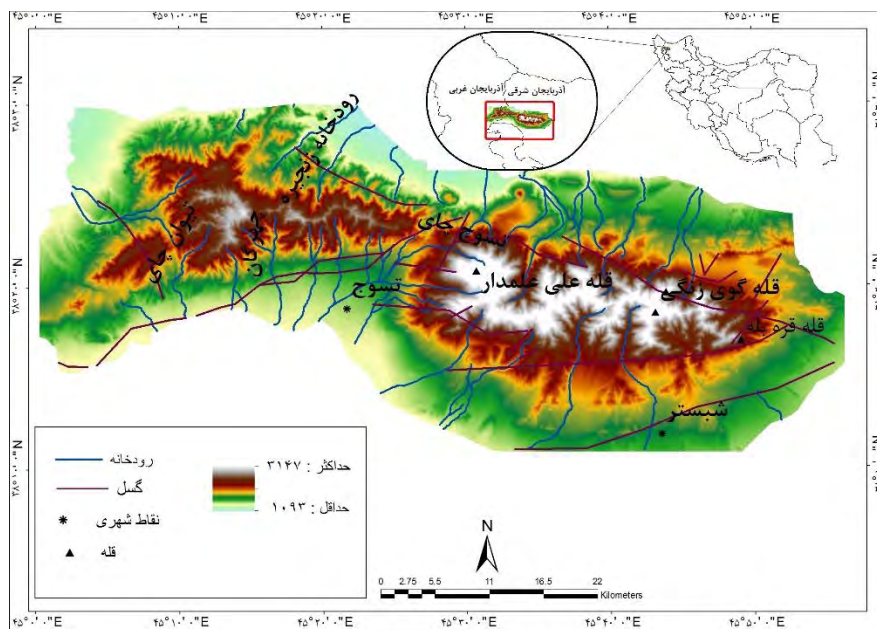
نجوار و زوالنسکی نقشه‌های هفت فاکتور انحنای عمومی، بازبودن توپوگرافی، تابش خورشیدی ورودی بالقوه، شاخص موقعیت و رطوبت توپوگرافی، شاخص همگرایی و ارتفاعات نسبی را در منطقه مورد مطالعه خود تهیه کردند (Najwer & Zwoliński, 2015). سپس داده‌ها را ادغام و تجزیه و تحلیل اطلاعات جغرافیایی لازم را انجام دادند. مرحله بعدی، طبقه‌بندی امتیازی نقشه‌های ورودی با استفاده از تجزیه و تحلیل زمین آماری و کارشناسی انجام شده است. نتیجه آنکه روش ارزیابی تنوع زمین براساس پارامترهای ژئومورفومتریک نتایجی را در سطحی مشابه با روش استفاده از لایه‌های موضوعی ارائه می‌دهد. مقصودی و همکاران (۱۳۹۸)، ژئومورفودایورسیتی آتش‌فشان دماوند را با استفاده از روش GMI بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که تراکم بیشتر لندفرم‌ها در این منطقه، باعث شده است، مجموعه‌ای غنی و منحصربه‌فرد از انواع مختلف لندفرم‌ها و فرایندهای ژئومورفولوژیکی به وجود آید. پژوهشگران این بررسی به این نتیجه رسیده‌اند که ژئومورفودایورسیتی زیاد اغلب بر بستر زمین‌شناسی آبرفتی در محل تلاقی گدازه‌ها و آبرفت‌ها منطبق است. علاوه بر این، دامنه ژئومورفودایورسیتی کوهستان دماوند از محل دره‌ها به سمت قله‌ها کاهش می‌یابد. کت، تنوع ژئومورفولوژیکی را در منطقه کوچکی از دشت لهستان با استفاده از روش‌های مختلف ارزیابی کرده و نتایج را بر روی نقشه‌ها ارائه می‌کند (Kot, 2017). با مقایسه این نقشه‌ها و تجزیه و تحلیل ضرایب همبستگی نتایج به دست آمده، دو روش را شناسایی می‌کند که برای نشان دادن مناطق با بیشترین تنوع ژئومورفولوژیکی در دشت‌ها مناسب‌تر هستند. این دو روش Bon_2 و WLC_4 متعلق به روش‌های چند معیاره هستند. آنها طیف وسیعی از ۱۲ معیار را شامل متغیرهای مستقیم و غیرمستقیم در نظر می‌گیرند. در Bon_2 همه معیارها به یک اندازه مهم هستند و در WLC معیارهای غیرمستقیم (شیب) وزن بیشتری نسبت به معیارهای مستقیم (انواع شکل زمین) دارند. مللی و همکاران در پژوهش خود ارزش ژئومورفودایورسیتی منطقه اومبریا را از مجموعه ۵ عامل تنوع زمین‌شناسی، تراکم زهکشی، زبری ناهمواری، شاخص وضعیت شیب و طبقه‌بندی لندفرم محاسبه کردند (Melelli et al., 2017). روش پژوهش، مبتنی بر تحلیل‌های فضایی شاخص‌های حاصل از DEM است. این پژوهشگران در پژوهش خود به این نتیجه رسیده‌اند که ژئومورفودایورسیتی زیاد با مجموعه کربنات‌ها تطابق دارد و دامنه ژئومورفودایورسیتی از سمت قله‌ها به سمت دشت کاهش می‌یابد. زولینسکی و گودیچ با هدف محاسبه، طبقه‌بندی پارامترهای ژئومورفومتریک و تشریح تنوع ژئوفرم‌های زمین در پهنه‌های مورفوکلیمی مطالعاتی براساس مقادیر انجام دادند (Zwoliński & Gudowicz, 2016). پارامترهای اولیه شامل ارتفاع نسبی، شیب، پلان و انحنای پروفیل است و برای تجزیه و تحلیل از پارامترهای ثانویه یعنی شاخص رطوبت توپوگرافی و همگرایی استفاده کردند. نتایج نشان‌دهنده آن بود که همه پارامترها به طور کامل برای ویژگی‌ها و تمایز مناطق مورفوکلیمی مفید نیستند؛ با این حال، در بسیاری از موارد، تجزیه و تحلیل طرح‌بندی خاص این پارامترها امکان کشف مشاهدات مورفوزنتیکی جالب

را فراهم می‌کند. مزیت انکارناپذیر بسیاری از پارامترهای ژئومورفومتری امکان نشان‌دادن وضعیت برجستگی مورفومتری است که حضور خطرات ژئومورفولوژیکی مانند سیل یا رانش زمین را تقویت می‌کند.

به‌طور خاص، با توجه به بولاتی و همکاران و ارجاعات موجود در آن، کمیت ژئودایورستی در سه سطح بررسی می‌شود: الف) سایتی واحد (ژئودایورستی ذاتی سایت)؛ ب) در یک منطقه (ژئودایورستی ذاتی منطقه‌ای)؛ ج) در سطح منطقه‌ای در مقایسه با سایر مناطق (ژئودایورستی خارجی). سطح (ب) یکی از مواردی است که اغلب استفاده می‌شود؛ زیرا به‌راحتی برای اهداف مدیریتی در مناطق خاص اجرا می‌شود (Bollati et al., 2016). عناصر طبیعی مانند ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی و زمین‌شناسی، عناصر اصلی را در ارزیابی ژئودایورستی تشکیل می‌دهند (Kozlowski, 2004; Serrano & Flano, 2007). ترکیبی از زمین‌شناسی، ژئومورفولوژی، اطلاعات هیدرولوژیکی با استفاده از رویکردهای ژئوآفورماتیکی در کمی‌سازی ژئودایورستی برای مقیاس منطقه‌ای مفید است (Benito-Calvo et al., 2009; Hjort & Luoto, 2010). این پژوهش، با هدف ارزیابی ژئودایورستی کوهستان میشو داگی، یکی از جذاب‌ترین و زیباترین کوه‌های ایران و منطقه آذربایجان به شمار می‌رود. این کوهستان شامل پدیده‌های متنوع ژئومورفولوژیکی نظیر دره، تراس رودخانه، مخروطه افکنه، چشمه‌ها و پرتگاه‌هاست. مناطق خوش بیلاقی این کوهستان امروزه میان مناطق مختلف به علت تخریب زیستگاه‌ها و انهدام گونه‌ها رغبت کمتری را برمی‌انگیزد، در گذشته در شبکه منطقه‌ای جزو ارزشمندترین‌های کشور بوده است و منطقه‌ای غیرقابل‌جانشین به حساب می‌رفت. با خشک‌سالی‌های چند ساله اخیر، نبود برنامه‌های مدیریتی مدون و کم‌توجهی در کنترل و نظارت نسبت به استخراج‌کنندگان معادن و نیز از عمده‌ترین تعارضات در کوهستان میشو به‌نوبت تعادل دام و مرتع اشاره می‌شود. در طول سال‌های گذشته آسیب‌های بسیاری به این منطقه وارد آمده است. به‌طور عمده ژئودایورستی منطقه در توسعه آن نقش داشته است. فرصت‌ها و محدودیت‌هایی باید مدیریت شود که ژئودایورستی منطقه فراهم می‌کند. با ظهور رویکردهای جدید در ژئودایورستی از فضاها و جغرافیای مثل کوهستان میشو داگی به نحو احسن استفاده می‌شود. این پژوهش در زمینه اولین ارزیابی ژئودایورستی منطقه نوآوری دارد که زمینه را برای استفاده از شاخص‌های ژئومورفومتریکی بیشتر فراهم می‌کند، اطلاعات ژئومورفولوژیکی، هیدرولوژیکی و مورفوتکتونیک هرچه بیشتر برجسته می‌شود و قابلیت بهتری برای نمایش ژئودایورستی دارد.

منطقه مورد مطالعه

کوهستان میشو داگی نام یکی از رشته‌کوه‌های استان آذربایجان شرقی است که حد فاصل شهرستان شبستر و شهرستان مرند است. بلندترین قله آن علی‌المدار با ارتفاع ۳۱۵۵ متر است. این کوهستان در مختصات جغرافیایی ۳۸ درجه، ۱۹ دقیقه، ۳۳ ثانیه شمالی و ۴۵ درجه، ۳۷ دقیقه و ۱۴ ثانیه شرقی واقع شده است. کوهستان میشو داگی به‌صورت یک هورست بین چاله تکتونیک مرند و دریاچه ارومیه بالا آمده است. این رشته‌کوه با ارتفاع بیش از ۱۶۰۰ متر، تصویری از ژئومورفولوژی را در منطقه ایجاد می‌کند. از نظر ویژگی‌های مورفولوژیکی و زمین‌شناسی به دو بخش میشو شرقی و غربی تقسیم می‌شود. جهت‌گیری شرقی-غربی آن تعاملی عظیم و منحصر به فرد جو زمین را در منطقه ایجاد می‌کند شکل (۱).



شکل (۱) منطقه مورد مطالعه (منبع: نویسندگان).

Figure (1) the study area

روش شناسی

ارزیابی ژئودایورسیتی تنها به دو نوع داده و دو نوع نرم‌افزار برای تهیه و محاسبه نیاز دارد: نقشه زمین‌شناسی مدل با ۱:۱۰۰۰۰۰ با ایجاد یک فایل با فرمت شیپ با استفاده از ابزار ترسیم در نرم‌افزار GIS برای ترسیم نقشه لیتولوژی استفاده شد. مدل ارتفاعی دیجیتال^۱ ۱۲/۵ متری که در سایت vertex.daac.asf.alaska.edu در دوره‌های زمانی متوالی بارگزاری شده است و نرم‌افزار محبوب GIS و SAGA GIS. طبقه‌بندی ژئومورفومتریک براساس شاخص‌های ژئومورفومتریک شامل شاخص‌های نسبت مساحت سطح^۲، شدت فرسایش^۳، برجستگی ارتفاع^۴، گرادیان شیب^۵، فراوانی ناهمواری^۶، شاخص طول-شیب آبراهه^۷ تراکم آبراهه‌ها^۸، فرکانس جریان^۹ و شاخص رطوبت توپوگرافی^{۱۰} صورت گرفت. در این پژوهش در مدل ملی و همکاران با برداشتی مبتکرانه از مقاله آتانیوس و همکاران اصلاحاتی اساسی صورت گرفته است که زمینه را برای استفاده از شاخص‌های ژئومورفومتریک بیشتر فراهم می‌کند، اطلاعات ژئومورفولوژیک، هیدرولوژیک و مورفوتکنونیک هرچه بیشتر برجسته می‌شود و قابلیت بهتری برای نمایش ژئودایورسیتی دارد (Melelli et al., 2017)؛ (Athanasios et al., 2016). مدل ملی از طریق جمع مقادیر عناصر تراکم زهکشی، وضعیت شیب، طبقه‌بندی

1. DEM
2. Surface Area/ Raitio(SAR)
3. Dissection index(DI)
4. Elevation relief(Er)
5. Slope Gradient(Sg)
6. Amplitude of relief(Ar)
7. Stream length(SL)
8. Drainage density(Dd)
9. Stream frequency(fu)
10. Topographic wetness Index(TwI)

لندفرم، شدت ناهمواری و سنگ‌شناسی محاسبه می‌شود. در نهایت، نقشه ژئومورفودایورسیتی با این ۵ فاکتور ترسیم می‌شود. آثناسیوس و همکاران مقادیر عناصر تراکم آبراهه، فرکانس جریان، برجستگی ارتفاع، شدت فرسایش، گرادیان شیب، رطوبت توپوگرافی، شیب طولی رودخانه، نسبت مساحت سطح، فراوانی ناهمواری، نقشه زمین‌شناسی و داده‌های آب‌وهوای فصلی را شاخص‌های مؤثری می‌دانند که اطلاعات ژئومورفولوژیکی، هیدرولوژیکی، مورفولوژیکی، زمین‌شناسی و آب‌وهوایی مناسبی ارائه می‌دهند (Athanasios et al., 2016). در این مدل نقشه ژئودایورسیتی به این شکل تهیه و متریک‌های سیمای سرزمین این نقشه محاسبه می‌شود. مجموع ده پارامتر زیر نشان‌دهنده میزان ژئودایورسیتی منطقه است (جدول ۱).

جدول (۱) پارامترهای مدل GmI

Table (1) GmI model parameters

فاکتور	توضیحات	فاکتور	توضیحات
SAR _v	نقشه رستری طبقه‌بندی‌شده نسبت مساحت سطح است.	SL _v	نقشه رستری طبقه‌بندی‌شده شیب طولی رودخانه است.
DI _v	نقشه رستری طبقه‌بندی‌شده شدت فرسایش است.	Dd _v	نقشه رستری طبقه‌بندی‌شده تراکم آبراهه است.
ER _v	نقشه رستری طبقه‌بندی‌شده برجستگی ارتفاع است.	Fu _v	نقشه رستری طبقه‌بندی‌شده فرکانس جریان است.
SG _v	نقشه رستری طبقه‌بندی‌شده گرادیان شیب است.	TWI _v	نقشه رستری طبقه‌بندی‌شده تنوع رطوبت توپوگرافی است.
Ar _v	نقشه رستری طبقه‌بندی‌شده فراوانی ناهمواری است.	Geo _v	نقشه رستری طبقه‌بندی‌شده تنوع زمین‌شناسی است.
$GmI = SAR_v + DI_v + ER_v + SG_v + Ar_v + SL_v + Dd_v + Fu_v + TWI_v + Geo_v$			

تجزیه و تحلیل شاخص‌ها با استفاده از نرم‌افزارهای پیشرفته مثل GIS و SAGA باعث افزایش اعتبار یافته‌ها و نتایج پژوهش می‌شود. ذکر این نکته ضروری است که به جز فاکتور نقشه زمین‌شناسی، در سایر فاکتورها نقشه‌ها دو مرحله پردازش را طی کردند. مرحله اول، استخراج از داده‌های خام است. مرحله دوم، نرمال‌سازی با استفاده از گسست‌های طبیعی است. این الگوریتم، واریانس درون گروه‌ها را کاهش می‌دهد و واریانس بین آنها را به بیشترین مقدار می‌رساند. نرمال‌سازی از ابزار طبقه‌بندی مجدد ArcGIS برای ایجاد پنج کلاس برای هر عامل استفاده می‌کند. V1 کمترین و در عین حال، V5 بالاترین کلاس تنوع (V) است. در این فرمول به پنج طبقه (خیلی کم) تا (خیلی زیاد) دسته‌بندی شده است. هر یک از شاخص‌های یادشده با استفاده از دستورات زیر در نرم‌افزار GIS و SAGA محاسبه می‌شود. کانون روش پژوهش این مدل تحلیل‌های فضایی شاخص‌های حاصل از Dem ۱۲/۵ متر است. به منظور ارزیابی تنوع هر پارامتر، یک تابع کانونی (تابع آمار همسایگی) در نتیجه تنوع اعمال می‌شود.

به منظور طبقه‌بندی ژئومورفومتری، متغیرهای ژئومورفومتری از DEM استخراج شدند. در این بررسی سعی بر آن بود تا اطلاعات ژئومورفولوژیکی و مورفولوژیکی برجسته شود. بدین منظور برای برجسته‌سازی اطلاعات ژئومورفولوژیکی شاخص‌های نسبت مساحت سطح، شدت فرسایش، برجستگی ارتفاع و گرادیان شیب که ناهمواری زمین، تشریح، تقارب یا تحذب را برجسته می‌کند، از طریق فرمول‌ها و محاسبات مختلف در نرم‌افزار GIS استخراج شد. اطلاعات مورفولوژیکی از سوی شاخص‌هایی مانند فراوانی ناهمواری، شاخص طول-شیب آبراهه ترکیب شد

(Toudeshki & Arian, 2011). برخی از شاخص‌های تکمیلی مانند تراکم آبراهه‌ها، فرکانس جریان و شاخص رطوبت توپوگرافی برای ارائه اطلاعات هیدرولوژیکی بررسی شد؛ در حالی که ارتباط متقابل آنها اطلاعات ژئومورفولوژیکی و مورفوتکتونیک را برجسته می‌کند (Argyriou et al., 2016; Kouli et al., 2007). شاخص‌های ژئومورفومتری زیر و اطلاعات ژئومورفولوژیکی، هیدرولوژیکی و مورفوتکتونیک آنها بررسی شد. **جدول (۲).**

جدول (۲) پارامترهای ژئومورفومتریک و فرمول آنها

Table (2) Geomorphometric parameters and their formulas

توضیحات	فرمول	پارامتر	شماره
نشان‌دهنده میزان سرایشی، نفوذپذیری سنگ و رواناب سطح است (Horton, 1945).	$Fu = N/A$ N=تعداد کل جریان‌ها، A=مساحت حوضه	فرکانس جریان	۱
شاخص ترکیب پستی و بلندی بوده است که نسبت بین شیب‌ها را در منطقه به نمایش می‌گذارد.	$TWI = [CA/Slope]$ CA=منطقه‌ای که با یک شبکه تخلیه می‌شود، Slope=شیب برای هر سلول	رطوبت توپوگرافی	۲
نشان‌دهنده تغییر رخ داده در ارتفاع بین هر سلول و همسایگان است.	$ATAN (\sqrt{[(dz/dx)^2 + (dz/dy)^2])}$ (نرخ تغییر (دلتا) سطح در جهت افقی (dz/dx) و عمودی (dz/dy) از سلول مرکزی، شیب را تعیین می‌کند.	گرادیان شیب	۳
میزان توسعه شبکه آبراهه‌های یک حوضه نسبت به مساحت آن حوضه است (Horton, 1945).	$Dd = \frac{L}{A}$ L=مجموع طولی آبراهه‌ها، A=مساحت کل حوضه	تراکم آبراهه‌ها	۴
ناهمواری را در سطح یک رستر پیوسته توصیف و اطلاعات هیپسومتریک را راجع به حوضه‌ای آبریز فراهم می‌کند، مشابه انتگرال هیپسومتریک و نشان‌دهنده درجه تعادل نبود تعادل نیروهای فرسایشی و تکتونیک است.	$Er = Mean H - Min H / Max H - Min H$ Mean H=میانگین ارتفاع Min H=کمترین ارتفاع Max H=بیشترین ارتفاع	برجستگی ارتفاع	۵
برای برآورد درجه عمودی فرسایش و فازهای توسعه‌ای لندفرم‌ها در هر منطقه فیزیوگرافی است (Hajam et al., 2013).	$DI = \frac{RR}{AR}$ RR=ناهمواری منطقه AR=ارتفاع متوسط منطقه	شدت فرسایش	۶
مبنایی برای اندازه‌گیری پستی و بلندی چشم‌انداز است (عرب عامری و همکاران، ۱۳۹۷).	$SAR = \frac{A}{AS}$ A=مساحت سطح منطقه، AS=مساحت پلانی متریک	نسبت مساحت سطح	۷
از روش‌های اندازه‌گیری، تغییر ناگهانی شیب در مسیر طولی بستر رودخانه است؛ زیرا نشان‌دهنده جریان آب نسبت به تغییر اوضاع در پی شیب بستر حساسیت است (نگهبان و درتاج، ۱۳۹۸).	$SL = \left(\frac{\Delta H}{\Delta L}\right) \cdot L$ ΔH =اختلاف ارتفاع در یک قطعه، ΔL =طول آبراهه، L =طول رودخانه از نقطه مرکزی مقطع اندازه‌گیری شده تا سرچشمه رودخانه	شاخص شیب طولی رودخانه	۸
شاخص مهمی است که از نظر کمی شکل ویژگی توپوگرافی را مشخص و انواع توپوگرافی را طبقه‌بندی می‌کند (Zhang & Dong, 2012).	$RA = H \max - H \min$ H Max=بیشترین ارتفاع H Min=کمترین ارتفاع	فراوانی ناهمواری	۹

بسیاری از محققان نشان داده‌اند که شاخص‌های ذکر شده شاخص‌های موثری از روند کارایی سطح زمین و تکامل چشم انداز هستند (Jamieson et al., 2004, Toudeshki & Arin, 2011, Currado & Fredi, 2000). ماتریس ضریب همبستگی برای اعتبارسنجی وابستگی متقابل کم‌نماتر متغیر انتخاب‌شده تولید شده است (جدول ۳). ماتریس ضریب همبستگی نشان‌دهنده آن بود که شاخص‌ها با همبستگی پایینی (مقادیر $> 0/6$) مشخص می‌شوند؛ در نتیجه، شاخص‌های انتخاب‌شده طیف وسیعی را از اطلاعات متغیر در رابطه با زمینه ژئومورفولوژیکی، هیدرولوژیکی و مورفوتکتونیک تا طبقه‌بندی ژئومورفومتریک نهایی ارائه می‌دهند.

جدول (۳) ماتریس ضریب همبستگی

Table (3) Correlation coefficient matrix table

لايه	فراواني ناهمواري %	گراديان طولی رودخانه %	فرکانس جریان %	تراکم آبراهه‌ها %	برجستگی ارتفاع %	رطوبت توپوگرافی %	گرادیان شیب %	نسبت مساحت سطح %	شدت فرسایش %
فراواني ناهمواري درصد	۱	۰/۵۲۸	-۰/۰۵۶	-۰/۱۳۸	۰/۰۲۲	۰/۰۶۷	۰/۵۸۵	۰/۴۷۴	۰/۰۴۸
گراديان طولی رودخانه درصد	۰/۵۲۸	۱	۰/۰۶۳	-۰/۰۴۵	۰/۰۱۵	-۰/۰۳۳	۰/۲۸۵	۰/۲۱۲	۰/۳۶۵
فرکانس جریان درصد	-۰/۰۵۶	۰/۰۶۳	۱	۰/۳۵۶	-۰/۰۰۲	۰/۱۵۳	-۰/۰۶۱	-۰/۰۳۲	۰/۲۱۵
تراکم آبراهه‌ها درصد	-۰/۱۳۸	-۰/۰۴۵	۰/۳۶۵	۱	۰/۰۰۴	۰/۱۰۶	-۰/۱۵۷	-۰/۰۹۲	۰/۱۴
برجستگی ارتفاع درصد	۰/۰۲۲	۰/۰۱۵	-۰/۰۰۲	۰/۰۰۴	۱	-۰/۲۱۷	۰/۰۱۳	۰/۰۰۵	۰/۰۱۶
رطوبت توپوگرافی درصد	-۰/۰۶۷	-۰/۰۳۳	۰/۱۵۳	۰/۱۰۶	۰/۲۱۷	۱	-۰/۱۳۸	-۰/۰۹۳	۰/۰۸۸
گرادیان شیب درصد	۰/۵۸۵	۰/۲۸۵	-۰/۰۶۱	-۰/۱۵۷	۰/۰۱۳	-۰/۱۳۸	۱	۰/۵۶۶	-۰/۳۰۷
نسبت مساحت سطح درصد	۰/۴۷۴	۰/۲۱۲	-۰/۰۳۲	-۰/۰۹۲	۰/۰۰۵	-۰/۰۹۳	۰/۵۶۶	۱	-۰/۱۳۳
شدت فرسایش درصد	-۰/۰۴۸	۰/۳۶۵	۰/۲۱۵	۰/۱۴	۰/۰۱۶	۰/۰۸۸	-۰/۳۰۷	-۰/۱۳۳	۱

طبقه‌بندی زمین‌شناسی

فاکتور زمین‌شناسی ویژگی‌های اصلی بستر است که اثرات فرایندهای مدل‌سازی را بر ناهمواری بیان می‌کند. به‌منظور به دست آوردن طبقه‌بندی زمین‌شناسی، شاخص در نظر گرفته شد؛ به همین دلیل عامل زمین‌شناسی به داده‌های ورودی اضافه و براساس نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ منطقه، نقشه لیتولوژی ترسیم شد. ویژگی لیتولوژیکی منطقه، با توجه به مقاومت سنگ یا رسوبات و عکس‌العمل یکسان در برابر فرایندهای فرسایشی طبقه‌بندی شد؛ بنابراین ویژگی لیتولوژیکی منطقه، با توجه به نوع سنگ یا رسوبات و پاسخ توپوگرافیکی آنها به فرایندهای فرسایشی (چسبندگی، نفوذپذیری و استایل تکتونیک) طبقه‌بندی گردید. طبقه‌بندی ذکر شده در محیط Arc map بر روی نقشه لیتولوژی اعمال، سپس لایه پلیگونی به‌دست‌آمده به شبکه‌ای با اندازه سلولی ۲۵ متر تبدیل و در پنج کلاس طبقه‌بندی شد. براساس این طبقه‌بندی، کمترین تنوع (رسوبات آبرفتی، رودخانه‌ای و مخروط افکنه‌ای)، تنوع کم (ترکیبات آواری یا واریزه‌ای)، متوسط (مجموعه‌های ترکیبی)، زیاد (رسوبات کربناتی) و درنهایت، بیشترین تنوع (ترکیبات آتش‌فشانی) است.

یافته‌ها

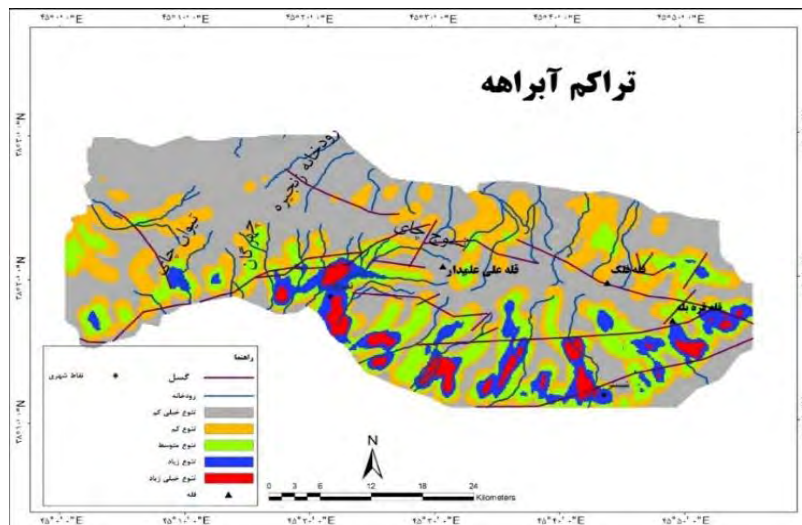
این پژوهش با تعیین کمی ژئودایورسیتی، کوهستان میشو داغی را از طریق ویژگی‌های زمین، براساس اطلاعات ژئومورفولوژی و زمین‌شناسی ارزیابی کرده است. این روش با چند تغییر ویژه از روش مللی و همکاران و روش آتاسیوس پیروی می‌کند: الف) اصلاح شاخص‌های مدل GMI مللی؛ ب) طبقه‌بندی ژئومورفولوژیکی از شاخص‌های مختلف ژئومورفومتری تشکیل شده است تا زمینه ژئومورفولوژی، هیدرولوژیکی و مورفوتکتونیک را برجسته کند؛ ج) توجه نکردن به طبقه‌بندی اقلیمی به دلیل محدودیت در وجود ایستگاه اقلیمی در اطراف کوهستان (Melelli et al., 2017; Athanasios et al., 2016).

الگوریتم پیشنهادی در این کار از بیان سرانو و فلانو الهام گرفته شده است که در آن ژئودایورسیتی از ضرب بین N و R ، تقسیم بر $\ln S$ محاسبه می‌شود (Serrano & Flano, 2007). در این فرمول N مجموع حسابی عناصر فیزیکی، R زبری و S سطح واقعی است. لگاریتم ناپری برای عادی‌سازی نتیجه با مساحت واحد معرفی شده است. در معادله ارائه شده در اینجا (جدول ۱) فقط مجموع حسابی عناصر طبیعی در نظر گرفته شده است؛ زیرا در این کار فقط ژئودایورسیتی ارزیابی شده است؛ بنابراین پارامترهای مورفومتریک به عنوان مهم‌ترین عوامل برای تحلیل در نظر گرفته می‌شوند. تنها پارامتری که به طور کامل مورفومتریک نیست، زمین‌شناسی است. انتخاب این پارامتر مبتنی بر این است که انواع سنگ‌ها بر پاسخ برجستگی به عوامل ژئومورفیک و در نتیجه لندفرم‌های حاصل تأثیر می‌گذارند. مزیت اصلی این فرمول تنوع هر داده ورودی است که از قبل معیاری برای اندازه‌گیری تنوع اجزای غیر زنده هستند. عملکرد کانونی امکان اندازه‌گیری تنوع را در مناطق اطراف تشخیص می‌دهد؛ بنابراین اطلاعات اولیه زمین را به مرحله‌ای میانی تبدیل می‌کند که به پردازش داده‌ها از نظر «تنوع» منجر می‌شود. علاوه بر این، منبع داده‌های ورودی (به جز لایه زمین‌شناسی) شبکه DEM است. اطلاعات ژئومورفولوژیکی شامل شاخص‌های نسبت مساحت سطح، شدت فرسایش، برجستگی ارتفاع و گرادیان شیب است. اطلاعات مورفوتکتونیک با شاخص‌هایی مانند فراوانی ناهمواری و شاخص طول-شیب آبراهه ترکیب شد. برخی از شاخص‌های تکمیلی مانند تراکم آبراهه‌ها، فرکانس جریان و شاخص رطوبت توپوگرافی به منظور ارائه اطلاعات هیدرولوژیکی بررسی شد.

این روش با استفاده از نقشه‌های ژئومورفولوژیکی سنتی تأیید شد. هدف مقایسه، طبقه‌بندی کیفی چشم‌انداز براساس لندفرم‌ها و فرایندهای شکل‌دهی با روش کمی GMI است. در روش پیشنهادی، تابع کانونی خاص با هدف ارزیابی تنوع در هر پیکسل (یا سلول) استفاده می‌شود (Melelli et al., 2017). روش کمی پیشنهاد شده در این کار و نتایج از نظر تنوع فضایی پارامتر ارزشمندی در تعریف واحدهای فیزیوگرافیک است.

هدف اساسی این کار، ارائه شاخصی از ژئودایورسیتی، تهیه نقشه‌های ژئودایورسیتی منطقه مورد مطالعه و در نهایت، گسترش روشی است که از GIS و مدل‌های ارتفاعی دیجیتال (DEMs) برای به دست آوردن بیان ریاضی خودکار و منصفانه به منظور مؤلفه مورفولوژیکی GI، شاخص ژئودایورسیتی (GMI) استفاده می‌کند. تحلیل‌های فضایی شاخص‌های حاصل از dem کانون روش تحقیق این پژوهش است. نقشه نهایی GMI نتیجه اعمال معادله است (جدول ۱). نقشه GMI مجموع تنوع هر پارامتر زمین در نظر گرفته شده است. هر گرید تنوع به پنج کلاس طبقه‌بندی می‌شود تا وزن یکسان برای هر پارامتر در مجموع نهایی مشخص شود.

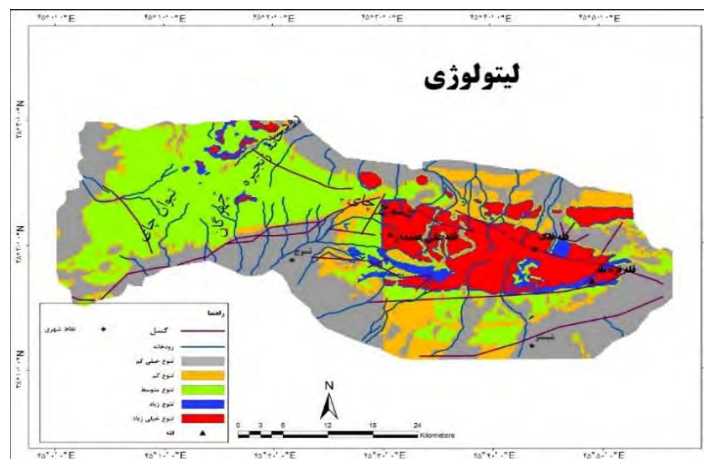
با توجه به اینکه تعداد جریان‌ها در دامنه‌ها بیشتر، تنوع تراکم آبراهه نیز در دامنه‌ها بیشتر می‌شود و کمترین مقدار تنوع شبکه آبراهه‌ای نیز در بالای قله‌ها و ارتفاعات وجود دارد (شکل ۲). مقادیر زیاد تنوع در عامل زمین‌شناسی مربوط به بستر زمین‌شناسی مقاوم در برابر فرسایش (مانند ترکیبات آتش‌فشانی و توده‌های نفوذی) و کمترین مقادیر تنوع نیز مربوط به رسوبات آبرفتی، رودخانه‌ای و مخروطه افکنه‌ای (نهشته‌های دوره کواترنری) در امتداد دره‌ها و دشت‌هاست (شکل ۳). زاویه شیب بیشتر تنوع بیشتری را در منطقه ایجاد می‌کند (شکل ۴). بیشترین شدت فرسایش در مجموعه‌های ترکیبی (تشکیلات قم) واقع شده است. میزان پارامتر شاخص شدت فرسایش ۰/۷۹ است. میزان این پارامتر نشان‌دهنده شیب توپوگرافی زیاد، افزایش ضریب رواناب به علت کاهش نفوذپذیری و درنهایت، فرسایش یافتگی زیاد عمودی و ناهمواری زیاد کوهستان میشو داغی است. کمترین مقدار این شاخص برابر با ۰/۰۰۴ و نشان‌دهنده مناطق مسطح و فرسایش کم مناطق با این مقادیر است. بیشترین مقدار این شاخص برابر با ۰/۷۹ و نشان‌دهنده فرسایش زیاد و ناهمواری زیاد است که در نتیجه مقدار زیاد این شاخص موجبات شکل‌گیری تنوع بیشتری را در منطقه فراهم می‌کند (شکل ۵). مقدار زیاد فرکانس جریان < 5 در منطقه با عملکرد مواد سطح قابل‌انعطاف، برجستگی زیاد و ظرفیت نفوذ کم است که تنوع بیشتری را در منطقه موجب شده است؛ در حالی که مقادیر کم فراوانی آبراهه حاوی مواد سطحی نفوذپذیر، برجستگی کم و ظرفیت نفوذ زیاد است (شکل ۶). مقادیر زیاد شاخص فراوانی ناهمواری به‌طور دقیق منطبق بر مناطقی است که تغییر شکل چشمگیری دارند و تنوع بیشتری را ایجاد می‌کنند. مقادیر پایین بر مناطقی از منطقه منطبق است که تغییر شکل بارزی ندارند و در واحد سطح دارای کمترین اختلاف هستند (شکل ۷). به‌طور نرمال نرخ شاخص رطوبت توپوگرافی بین ۳- تا ۳۰ قرار دارد. بیشترین مقدار شاخص رطوبت توپوگرافی ۲۰/۸ و در مناطق دشتی و کمترین مقدار شاخص رطوبت توپوگرافی ۱/۲۶ و در مناطق کوهستانی است. در مناطقی رطوبت توپوگرافی بیشترین مقدار را به خود اختصاص داده است که شیب منطقه کمتر و کمترین مقدار شاخص در مناطقی نمایان شده که منطقه دارای شیب بیشتری است. این شاخص رطوبت توپوگرافی و اشباع سطح را ارزیابی می‌کند که تحت تأثیر تغییرات شیب موقعیتی مانند ریزش دامنه‌ها یا وصول دامنه‌ها قرار دارد. در مناطق هموار به دلیل کاهش شیب رودخانه، افزایش حجم آب، برداشت ماسه و کم‌عرض بودن دشت در معرض طغیان رودخانه، این نواحی در معرض خطر سیل قرار دارند. بخش‌هایی که رطوبت توپوگرافی بیشتری به خود اختصاص داده‌اند، قابلیت تغییر شکل و ایجاد تنوع بیشتری در چشم‌انداز دارند (شکل ۸).



شکل (۲) نقشه تنوع تراکم آبراهه در فرمت شبکه. رنگ‌ها نشان‌دهنده تنوع هستند که از کلاس خیلی کم تا خیلی زیاد افزایش می‌یابد (منبع: نویسندگان).

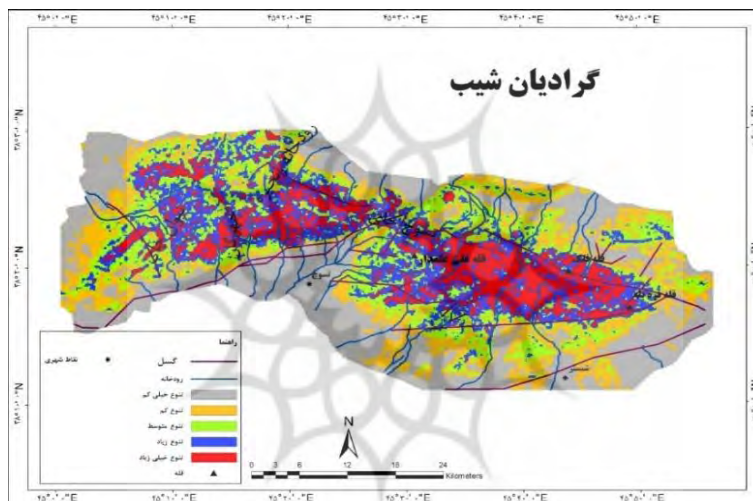
Figure (2) The map of the diversity of drainage density in the network format. The colors represent variation that increases from very low to very high class.

مقادیر برجستگی ارتفاع به‌طور نرمال بین ۰ و ۱ است که منطقه مورد مطالعه نیز به‌طور کامل بر این استاندارد منطبق است. مقادیر نزدیک به ۰/۰۰ یا ۱/۰۰ نشان‌دهنده برجستگی ارتفاع هر دو توپوگرافی زیر افقی است. مقدار نزدیک تر ۰/۰۰ نشان‌دهنده زمین‌های تقعر یا زیر افقی با برخی قله‌های جدا شده است؛ در حالی که مقدار نزدیک‌تر ۱/۰۰ نشان‌دهنده زمین‌های تحدب یا زیر افقی با برش عمیق است که بخش‌های محدب تنوع بیشتری در منطقه ایجاد کرده‌اند (شکل ۹). مقادیر زیاد نسبت مساحت سطح، نشان‌دهنده منطقه‌ای ناهموار با تنوع زیاد و مناطق هموار به‌صورت اعداد کم و تنوع پایین است که در منطقه مورد مطالعه کامل بر این موارد منطبق است (شکل ۱۰). پس از بررسی مقادیر شاخص شیب طولی رودخانه در نقاط اندازه‌گیری شده مشخص شد. ساختارهای تکتونیکی نقش اصلی را در کنترل فعالیت نسبی زمین ساختی در ناحیه دارد و نقش لیتولوژی کمتر است. شاخص شیب طولی رودخانه در بخش‌هایی از منطقه بیشتر است که رودخانه تغییرات بیشتری در منطقه ایجاد کرده یا آنامولی تکتونیکی مثل پرتگاه، گسل یا تغییر مقاومت شدید در نتیجه حرکت گسل ایجاد شده است؛ در نتیجه بخش‌هایی که مقادیر بیشتری به خود اختصاص داده‌اند، تنوع بیشتری دارند (شکل ۱۱). درصد مساحت تنوع عوامل مؤثر در ژئودایورسیتی منطقه مورد مطالعه در شکل (۱۲) نمایش داده شده است. بیشترین مساحت در تنوع خیلی زیاد که ۱۵ درصد است، تنوع برجستگی ارتفاع به خود اختصاص داده است.



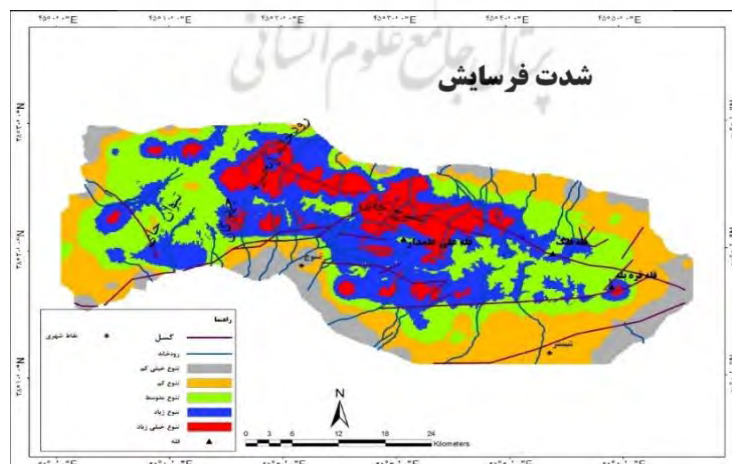
شکل (۳) نقشه تنوع لیتولوژی در فرمت شبکه (منبع: نویسندگان)

Figure (3) Lithology diversity map in grid format.



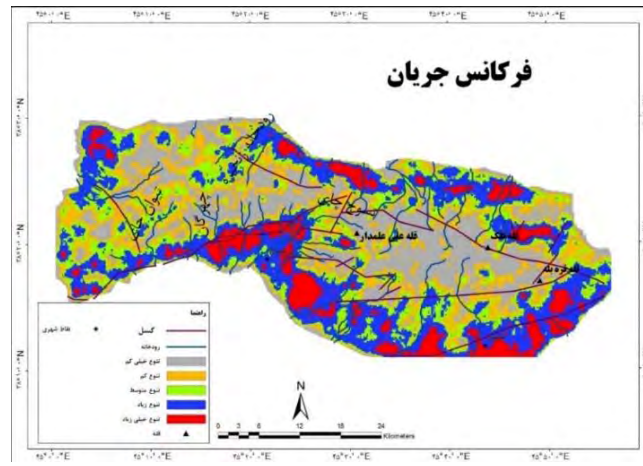
شکل (۴) نقشه تنوع گرادین شیب در فرمت شبکه (منبع: نویسندگان)

Figure (4) Slope gradient diversity map in grid format.



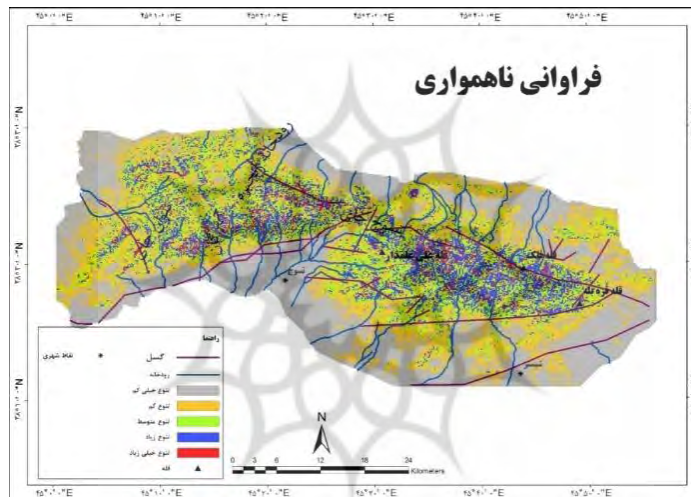
شکل (۵) نقشه تنوع شدت فرسایش در فرمت شبکه (منبع: نویسندگان)

Figure (5) The map of the Dissection index diversity in the grid format.



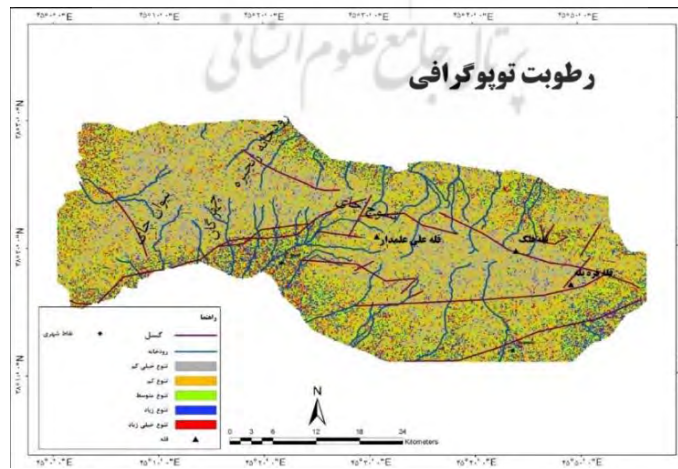
شکل (۶) نقشه تنوع فرکانس جریان در فرمت شبکه (منبع: نویسندگان)

Figure (6) The map of the Stream frequency diversity in the grid format.



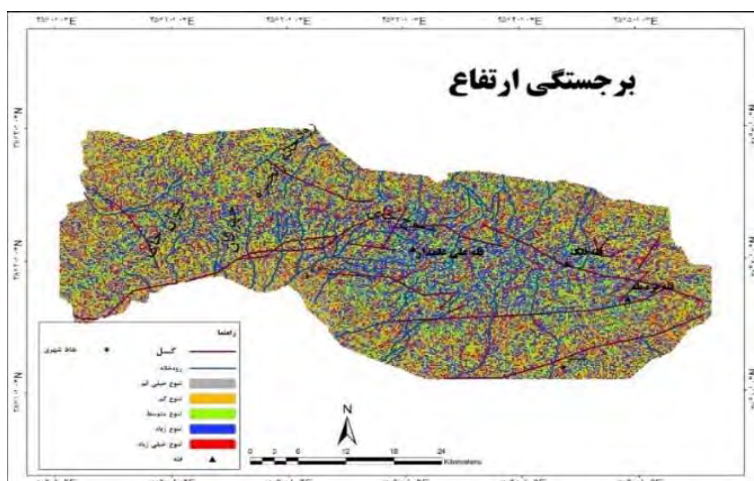
شکل (۷) نقشه تنوع فراوانی ناهمواری در فرمت شبکه (منبع: نویسندگان)

Figure (7) The map of the Amplitude of relief diversity in the grid format.



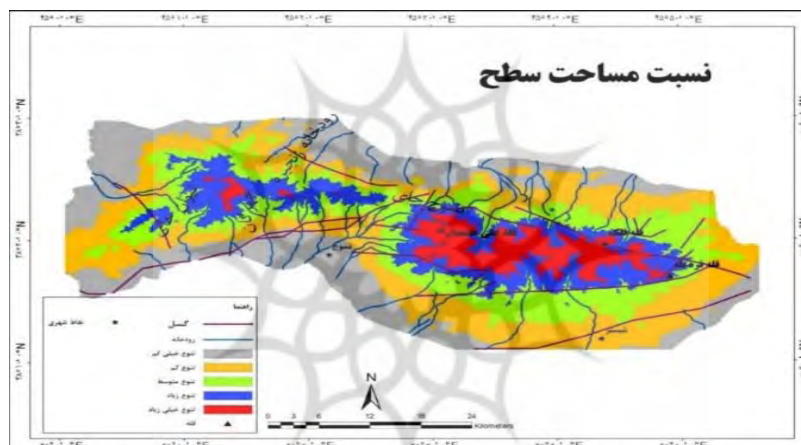
شکل (۸) نقشه تنوع برجستگی ارتفاع در فرمت شبکه (منبع: نویسندگان)

Figure (8) The map of the Topographic wetness Index diversity in the grid format



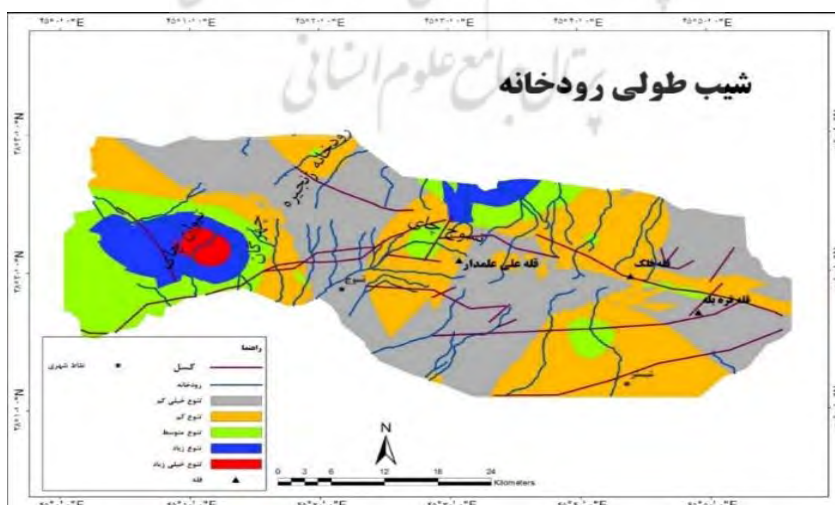
شکل (۹) نقشهٔ تنوع برجستگی ارتفاع در فرمت شبکه (منبع: نویسندگان)

Figure (9) The map of the Elevation relief diversity in the grid format



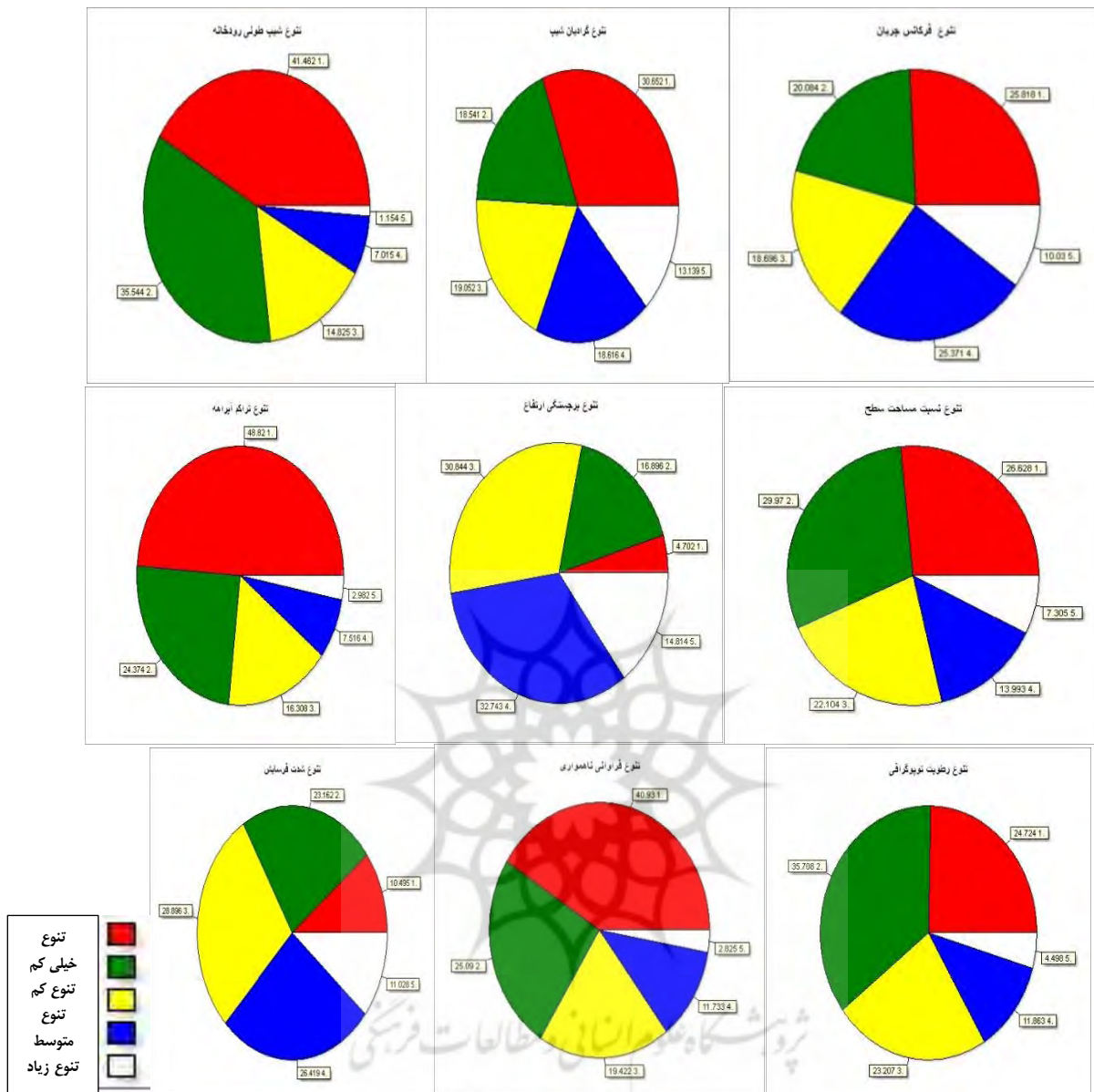
شکل (۱۰) نقشهٔ تنوع نسبت مساحت سطح در فرمت شبکه (منبع: نویسندگان)

Figure (10) The map of the surface area/ratio diversity in the grid format



شکل (۱۱) نقشهٔ شیب طولی رودخانه در فرمت شبکه (منبع: نویسندگان)

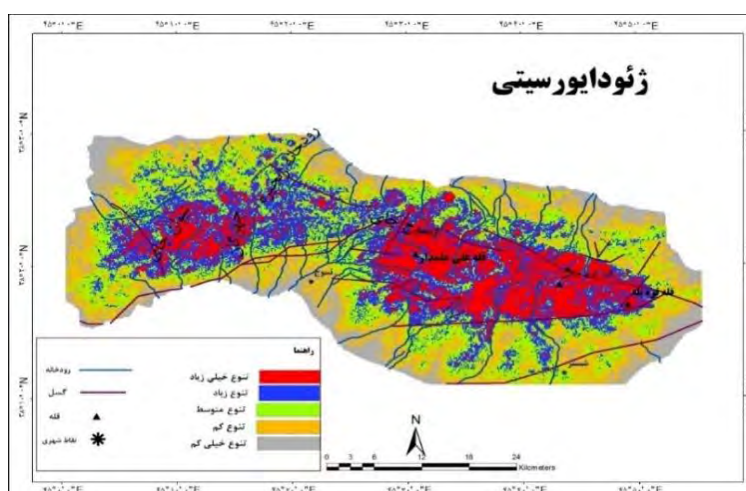
Figure (11) The map of the Stream length diversity in the grid ormat



شکل (۱۲) درصد مساحت تنوع عوامل مؤثر در ژئودایورسیتی منطقه مورد مطالعه (منبع: نویسندگان)

Figure (12) The area percentage of the diversity of the effective factors in the geodiversity of the study area

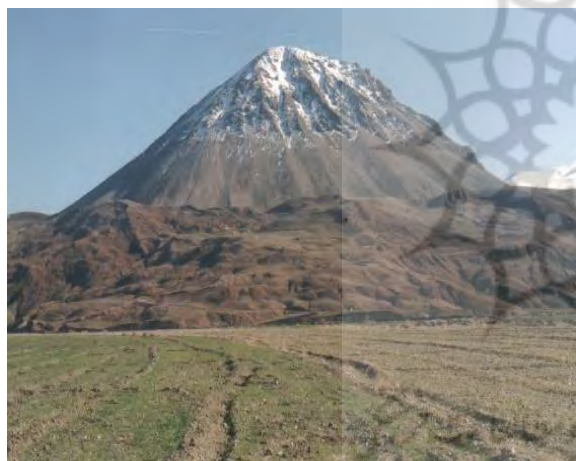
تنوع ارزش در نقشه نهایی GmI نشان داده شده است؛ همان‌طور که در شکل (۱۳) مشاهده می‌شود، روند متفاوت متغیرها به منطقه همسایه مورد استفاده برای برآورد آنها بستگی دارد. کمترین تنوع در امتداد دره‌ها توزیع می‌شود که متشکل از تشکیل شده است؛ زیرا نادرترین نوع سنگ‌ها در سراسر سطح زمین هستند که اغلب در قسمت‌های می‌شود شرقی قرار گرفته است.



شکل (۱۳) نقشه شاخص ژئودایورسیتی (GmI)

Figure (13) Geodiversity Index map

در پیمایش میدانی کوهستان میشو داغی نتایج شاخص ژئودایورسیتی تأیید شد. در شکل (۱۴) مواردی از تصاویر ژئودایورسیتی منطقه مورد مطالعه مشاهده می‌شود.



ب



الف



ج



د



ج

شکل (۱۴) تصاویری از ژئودایورسیتی منطقه مورد مطالعه (شکل الف) دره گزافر شکل؛ ب) استوک گچی قلعه سی؛

شکل پ) بدلندهای نهشته‌های کواترنز؛ شکل ت) آبشار عیش آباد؛ شکل ج) چشمه‌های آهن‌دار محدوده گرانیت میشو

Figure (14) Pictures of the geodiversity of the studied area (Figure A: Ghazafar Valley, Figure B: Gypsum stock of Castle C. Figure C: Badlands of Quaternary deposits. Figure T: Aishabad waterfall. Figure C: Iron springs of Mishu granite range)

بحث

در این کار، ارزیابی ژئودایورسیتی اغلب براساس روش توصیف‌شده از سوی مللی و همکاران و آتناسیوس و همکاران با چند تغییر ویژه انجام شد. شاخص ژئودایورسیتی اغلب برای مطالعات مقیاس منطقه‌ای اجرا شده که تعداد و کیفیت موارد تاریخی را در سال‌های اخیر بهبود بخشیده است (Hejort & Lotto, Benito-Calvo et al., 2009; Silva et al., 2014; Serrano & Flano, 2007; Melelli et al., 2010). در این زمینه، شاخص ژئودایورسیتی به‌تازگی با تکنیک جدید تصویرسازی زمین به‌منظور بهبود در کارتوگرافی دیجیتال و نمایش مجازی سه بعدی مرتبط شده است (Martinez-Graña et al., 2015al., 2017; Panizza & Piacente Ferrero et al., 2012). یا برای ارزیابی و پیشگیری از خطر (Gordon et al., 2012) پیشنهاد شده است. روش کمی برای ارزیابی شاخص ژئودایورسیتی به‌طور کلی از چندین پارامتر زمین، مانند مجموعه داده‌های زمین‌شناسی، ژئومورفولوژی، هیدروگرافی و توپوگرافی گزارش می‌شود. در این میان، داده‌های ژئومورفولوژیکی برای گنجاندن در روشی خودکار سخت‌ترین هستند. اگرچه تولید نقشه‌های ژئومورفولوژیکی هم‌تراز با تکنیک‌های دیجیتال جدید است (Gustavson et al., 2006)، در حال حاضر مشخصه‌های ژئومورفولوژیکی به‌ویژه به دلیل فقدان نقشه‌های ژئومورفولوژیکی برای مناطق بزرگ، هنوز سخت‌ترین هستند. علاوه بر این، اطلاعات ژئومورفولوژیکی بسیار پیچیده است؛ بنابراین به دلیل حجم عظیمی از داده‌های مرتبط که نشان داده می‌شود، نقشه‌ای به وجود می‌آید که به راحتی به فرمت دیجیتال تبدیل نمی‌شود (Carton et al., 2005; Melli et al., 2012 نقل در Melelli et al., 2017).

منطقه کوهستانی میشو منطقه آزمایشی عالی برای ارزیابی ژئودایورسیتی با روش کاربردی در این مقاله است. در این منطقه رابطه به‌خوبی تعریف‌شده‌ای بین آرایش توپوگرافی و موقعیت زمین‌شناسی در کل منطقه وجود دارد. نتایج

پژوهش حاضر نشان‌دهنده آن است که دامنه ژئودایورسیتی منطقه مورد مطالعه از سمت قله‌ها به سمت دشت کاهش می‌یابد. مناطق با ارزش ژئودایورسیتی کم در دشت و مناطق دارای ارزش ژئودایورسیتی زیاد در ارتفاعات بالاتر واقع شده است. نتایجی که [مقصودی و همکاران \(۱۳۹۸\)](#) در کوهستان دماوند بدان رسیده‌اند نیز نشان‌دهنده آن است که مناطق با ژئومورفودایورسیتی کم با ارزش بین ۵ الی ۱۰ مربوط به شمال غرب دماوند در محل دشت سرداغ و مخروط آتش فشان دماوند است. مللی و همکاران در منطقه اومبریا (ایتالیا) در پژوهش خود به این نتیجه رسیده است که ژئومورفودایورسیتی زیاد با مجموعه کربنات‌ها تطابق دارد؛ ولی در منطقه کوهستانی دماوند به نتیجه‌ای برخلاف این رسیده‌اند که ژئومورفودایورسیتی زیاد با مجموعه کربنات‌ها تطابق ندارد و اغلب بر بستر زمین‌شناسی آبرفتی در محل تلاقی گدازه‌ها و آبرفت‌ها منطبق است ([Melelli et al., 2017](#)). علاوه بر این، دامنه ژئومورفودایورسیتی کوهستان دماوند از محل دره‌ها به سمت قله‌ها کاهش می‌یابد؛ در حالی که در اومبریا از سمت قله‌ها به سمت دشت کاهش می‌یابد. این اختلاف به دلیل تفاوت توپوگرافیکی دو منطقه مورد مطالعه است که در کوهستان دماوند تحقیق در واحد کوهستان قرار دارد؛ ولی در اومبریا واحد دشت و حوضه‌های انتهایی نیز وجود دارد. با توجه به اینکه در منطقه مورد مطالعه نیز دشت و حوضه‌های انتهایی نیز بررسی شده‌اند، نتایج به نسبت مشابه نتایج مللی حاصل شده است. برخلاف مطالعه حاضر در پژوهش کوهستان دماوند مشخص شد که فرایندهای ژئومورفولوژیکی در دره‌ها و ارتفاعات پایین‌تر نقش بیشتری در افزایش ارزش ژئومورفودایورسیتی کل داشته‌اند که با نتایج مطالعه کت در حوضه ترونی در کشور لهستان مطابقت دارد ([Kot, 2017](#)). با وجود این، نتایج چند پژوهش ([Kot, Gray et al., 2013](#) ; [2017](#)) نشان‌دهنده آن است که تنوع لندفرم‌ها و فرایندها در محدوده‌های با ژئودایورسیتی و ژئومورفودایورسیتی زیاد پتانسیل بسیار زیادی برای ارائه خدمات مختلف ژئوسیستمی دارد و به‌عنوان شاخصی برای شناسایی و ارزیابی تنوع چشم‌انداز استفاده می‌شود. آن‌ها نیاز به مدیریت مناسب و حفاظت دارند تا برای نسل‌های آینده حفظ شوند. در پایان‌نامه‌ای که [حق‌جو \(۱۳۹۹\)](#) در منطقه یام انجام داده، نتایج نشان‌دهنده آن است که تنوع زمین‌شناسی مهم‌ترین نقش را در تولید سایر شاخص‌های ژئومورفودایورسیتی داشته است. گسل شمالی میشو که یک عامل زمین‌شناسی مهم محسوب می‌شود، بیشترین تأثیر را در افزایش تنوع ژئومورفودایورسیتی در منطقه یام داشته است. این نتیجه بر نتایج این پژوهش نیز منطبق است که وجود گسل شمالی و جنوبی میشو باعث افزایش ارزش ژئودایورسیتی هسته مرکزی میشو شده است. به‌طور کلی هسته مرکزی میشو داغ (حد فاصل گسل‌های شمالی و جنوبی میشو) دارای تنوع ژئودایورسیتی گسترده‌تری است.

مزیت عمده این روش، منبع داده‌های ورودی (به‌جز لایه زمین‌شناسی) شبکه DEM است. عملکرد کانونی که در این پژوهش استفاده شده است، امکان اندازه‌گیری براساس متوسط اندازه محدوده اطراف را فراهم می‌کند که نوعی یکنواختی و حد تعادل را در اندازه داده‌ها به وجود می‌آورد. در مجموع نهایی فرمول، هر یک از پیکسل‌ها از مجموع مقادیری از عناصر ناشی نمی‌شوند، بلکه عناصر شبکه‌های متشکل از مقادیر ۱ تا ۵ هستند که تنوع پارامتر ورودی را اندازه‌گیری می‌کنند. به این ترتیب، عملکرد کانونی خاص با هدف ارزیابی تنوع در هر سلول استفاده می‌شود. مهم است، ذکر شود که روش ما در مرحله توسعه است که هدف آن بهبود در تحقیقات بیشتر با استفاده از کالیبراسیون داخلی است.

با توجه به اینکه روش‌های ارزیابی ژئودایورسیتی در سراسر دنیا به شکل استاندارد در نیامده، سعی بر آن است که در تحقیقات آتی، مدل GMI با سایر روش‌های ارزیابی ژئودایورسیتی مقایسه شود تا استانداردهای لازم برای ارزیابی ژئودایورسیتی بهبود داده شود. در همین حال، مناطق منتخب که ارزش زیادی برای ژئودایورسیتی قائل شده‌اند، برای تأکید بر منحصربه‌فرد بودن آنها مورد مطالعه دقیق‌تری قرار می‌گیرند. نقشه شاخص ژئودایورسیتی در مدیریت سرزمینی و حفاظت از زمین، علاوه بر سایر ابزارهای مدیریت رایج استفاده می‌شود.

نتیجه‌گیری

مطالعه کمی ژئودایورسیتی درک تنوع را در هر واحد بالا می‌برد و تشخیص نقش عوامل مختلف و درجه اهمیت آنها را امکان‌پذیر می‌کند. از آنجایی که زمین‌شناسان در طول سال‌های متمادی در پی شناخت بیشتر زمین، دسترسی به اطلاعات و رفع ابهامات، غافل از ژئودایورسیتی بودند، ارزش چندانی برای بررسی ژئودایورسیتی قائل نبودند. با بررسی جهان از منظر ژئودایورسیتی درک بهتری از منابع طبیعی زمین حاصل می‌شود (مختاری و همکاران، ۱۳۹۷). در این پژوهش به بررسی کوهستان میشو داغی براساس معیارهای ژئومورفومتریک و زمین‌شناسی اقدام شد. روش پیشنهادی در این پژوهش، از داده‌های مورفومتریک حاصل از مدل رقومی ارتفاع و زمین‌شناسی استفاده می‌کند. ژئودایورسیتی از طریق جمع مقادیر عناصر تراکم آبراهه، فرکانس جریان، برجستگی ارتفاع، شدت فرسایش، گرایان شیب، رطوبت توپوگرافی، شیب طولی رودخانه، نسبت مساحت سطح، فراوانی ناهمواری و لیتولوژی محاسبه شد. با استفاده از نرم‌افزارهای در دسترس مانند GIS و SAGA GIS نقشه ژئودایورسیتی با موفقیت ترسیم شد. اعتبارسنجی براساس نقشه‌های ژئومورفولوژی سنتی انجام شد. نتیجه، این است که حد فاصل گسل شمالی و جنوبی کوهستان میشو داغی بیشترین تنوع را در اطراف خود ایجاد کرده است که مهم‌ترین قسمت منطقه از لحاظ وجود ژئودایورسیتی به شمار می‌آید. مناطقی که با کمترین مقدار تنوع زمین مشخص می‌شود، مربوط به مناطق مسطح منطقه است. دامنه ژئودایورسیتی منطقه مورد مطالعه از سمت قله‌ها به سمت دشت کاهش می‌یابد. میشو شرقی تنوع پیچیده‌تری نسبت به میشو غربی دارد. این محدوده برای موارد بیشتر پژوهش و مطالعه عمیق پیشنهاد می‌شود. در این مطالعه به روشی توجه شد که اکنون برای ارزیابی مکان‌های دیگر در ایران به منظور مقایسه نتایج از طریق تحقیقات بیشتر استفاده می‌شود. بهتر آن است که معادله با سایر مقادیر اصلی ژئودایورسیتی (هوازگی توده سنگ و خاک) و مقادیر اضافی مانند آب و هوا بهبود یابد. این کمک می‌کند تا ژئودایورسیتی در مکانی پیچیده‌تر ارزیابی شود. ژئودایورسیتی راهی برای برجسته کردن جنبه‌ها و ارزش‌های منحصربه‌فرد مکان‌های بی‌شماری است. بررسی ژئودایورسیتی به‌ویژه هنگام ترسیم مرزها پارک‌های ملی و سایر مناطق حفاظت شده بسیار مفید است. این رویکرد به‌ویژه در مناطقی مانند میشو معنادار است که نیروهای درون‌زا و برون‌زا در حال کار برای ایجاد چشم‌اندازی منحصربه‌فرد هستند و دنیای ما را پر از شگفتی می‌کنند.

منابع

پیرعلیلو، حمید، و رحیم زاده، عفت (۱۳۹۳). شناسایی جاذبه‌های ژئوتوریسمی با استفاده از روش *pralong* (موردی، میشو داغ مرند). اولین کنگره تخصصی مدیریت شهری و شوراهای شهر، ساری، مرکز همایش‌های

توسعه ایران. <https://civilica.com/doc/271513>

رضایی مقدم، محمدحسین، خیری‌زاده، منصور، و سرافروزه، سلیمان (۱۳۹۲). ارزیابی تکتونیک فعال در دامنه جنوبی میشوداغ. پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، ۲(۳)، ۱۴۱-۱۵۸.

https://www.geomorphologyjournal.ir/article_77926.html

عرب عامری، علیرضا، رضایی، خلیل، سهرابی، مسعود، و شیرانی، کورش (۱۳۹۷). ارزیابی کارایی پارامترهای کمی ژئومورفومتریک در افزایش صحت نقشه‌های پهنه بندی حساسیت زمین لغزش (مطالعه موردی: حوضه فریدون شهر، استان اصفهان). پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز، ۹(۱۸)، ۲۲۰-۲۳۲.

[10.29252/jwmr.9.18.220](https://www.jwmr.iair.ir/article_1029252.html)

گلی مختاری، لیلا، و بیرامعلی، فرشته (۱۳۹۷). محاسبه و تحلیل تنوع زمینی (ژئودایورسیتی) (مطالعه موردی: شهرستان اشتهارد). پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، ۵۰(۲)، ۳۰۷-۳۲۲.

[10.22059/JPHGR.2018.226075.1006996](https://www.jphgr.iair.ir/article_1022059.html)

مختاری، داود، کرمی، فریبا، و بیاتی خطیبی، مریم (۱۳۹۰). شناسایی اشکال مورفوتنیک فعال در گردنه پیام با هدف برنامه‌ریزی ژئوتوریسم. فصلنامه تحقیقات جغرافیایی، ۲۶(۴)، ۶۷-۹۲.

https://jgr.ui.ac.ir/article_17912.html

حق جو، مهدی (۱۳۹۹). بررسی شاخص‌های ژئومورفودایورسیتی گردنه پیام (شمالغرب ایران) بر اساس شاخص *GMI* [پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تبریز]. گنج.

<https://ganj.irandoc.ac.ir/#/articles/56a3dd0850727e1c9ad1f2a83b28723c>

مقصودی، مهران، مقیمی، ابراهیم، یمانی، مجتبی، رضایی، ناصر، و مرادی، انور (۱۳۹۸). بررسی ژئومورفودایورسیتی آتشفشان دماوند و پیرامون آن بر اساس شاخص *GMI*. پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، ۸(۱)، ۵۲-۶۹.

https://www.geomorphologyjournal.ir/article_91725.html

نگهبان، سعید، و درتاج، دینا (۱۳۹۸). ارزیابی تکتونیک فعال حوضه رودخانه سیروانبا استفاده از شاخص‌های ژئومورفیک. هیدروژئومورفولوژی، ۶(۱۹)، ۱۸۷-۲۰۹. https://hyd.tabrizu.ac.ir/article_9327.html

References

- Arabameri, A., Rezaei, K., Sohrabi, M., & Shirani, K. (2019). Evaluating of Quantitative Geomorphometric Parameters Efficiency in Increasing the Accuracy of Landslide Sensitivity Maps (Case Study: Fereydoun Shahr Basin, Isfahan Province). *Journal of Watershed Management Research*, 9(18), 220-232. [10.29252/jwmr.9.18.220](https://www.jwmr.iair.ir/article_1029252.html) [In Persian].
- Argyriou, A. V., Teeuw, R. M., Rust, D., & Sarris, A. (2016). GIS multi-criteria decision analysis for assessment and mapping of neotectonic landscape deformation: A case study from Crete. *Geomorphology*, 253, 262-274. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.10.018>
- Athanasios, V., Argyriou, S., Apostolos, T., & Richard, M. (2016). Using geoinformatics and geomorphometrics to quantify the geodiversity of Crete, Greece. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 51, 47-59. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jag.2016.04.006>
- Benito-Calvo, A., Perez-Gonzalez, A., Magri, O., & Meza, P. (2009). Assessing regional geodiversity: The Iberian Peninsula. *Journal of Earth Surface Processes and Landforms*, 34(10), 1433-1445. <http://dx.doi.org/10.1002/esp.1840>
- Bollati, I., Fossati, M., Zanoletti, E., Zucali, M., Magagna, A., & Pelfini, M. (2016). A methodological proposal for the assessment of cliffs equipped for climbing as a component of geoheritage and tools for Earth Science education: the case of the Verbano-Cusio-Ossola (Western Italian

- Alps). *Journal of the Virtual Explorer*, 49(1), 1-23. <https://www.researchgate.net/publication/310597935>
- Calvo, B. A., Pérez-González, A., Magri, O., & Meza, P. (2009). Assessing regional geodiversity: The Iberian Peninsula. *Earth Surface Process and Landforms*, (34), 1433-1445. <http://dx.doi.org/10.1002/esp.1840>
- Currado, C., & Fredi, P. (2000). Morphometric parameters of drainage basins and morphotectonic setting of eastern Abruzzo. *Memorie della Società Geologica Italiana*, 55, 411-419. <https://www.researchgate.net/publication/284098347>
- Ferrero, E., Giardino, M., Lozar, F., Giordano, E., Belluso, E., & Perotti, L. (2012). Geodiversity action plans for the enhancement of geoheritage in the Piemonte region (north-western Italy). *Annals of Geophysics*, 55(3), 487-495. <https://www.researchgate.net/profile/Elena-Ferrero-2/publication/267383078>
- Haghjoo, M. (2020). *Investigating geomorphodiversity indices of Payam Pass (northwest of Iran) based on GMI Indicator* [Master Thesis, Tabriz University]. Ganj. <https://ganj.irandoc.ac.ir/#/articles/56a3dd0850727e1c9ad1f2a83b28723c> [In Persian].
- Goli Mokhtari, L., & Beiramali, F. (2018). Analysis of Geodiversity (Case study: Eshtehard County, Iran). *Physical Geography Research*, 50(2), 307-322. [10.22059/JPHGR.2018.226075.1006996](https://doi.org/10.22059/JPHGR.2018.226075.1006996) [In Persian].
- Gray, M. (2004). *Geodiversity Valuing and Conserving Abiotic Nature*. John Wiley & Sons Ltd.
- Gray, M., Gordon, J. E., & Brown, E. J. (2013). Geodiversity and the ecosystem approach: the contribution of geoscience in delivering integrated environmental management. *Proceedings of the Geologists' Association*, 124(4), 659-673. <https://doi.org/10.1016/j.pgeola.2013.01.003>
- Gustavsson, M., Kolstrup, E., & Seijmonsbergen, A. C. (2006). A new symbol-and-GIS based detailed geomorphological mapping system: Renewal of a scientific discipline for understanding landscape development. *Geomorphology*, 77(1-2), 90-111. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.01.026>
- Gordon, J. E., Barron, H. F., Hansom, J. D., & Thomas, M. F. (2012). Engaging with geodiversity—why it matters. *Proceedings of the Geologists' Association*, 123(1), 1-6. <https://doi.org/10.1016/j.pgeola.2011.08.002>
- Horton, R. E. (1945). Erosional development of streams and their drainage basins; hydrophysical approach to quantitative morphology. *Geological society of America bulletin*, 56(3), 275-370. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1945\)56\[275:EDOSAT\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1945)56[275:EDOSAT]2.0.CO;2)
- Hjort, J., & Luoto, M. (2010). Geodiversity of high-latitude landscapes in northern Finland. *Geomorphology*, 115(1-2), 109-116. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2009.09.039>
- Hajam, R. A., Hamid, A., & Bhat, S. (2013). Application of morphometric analysis for geo-hydrological studies using geo-spatial technology—a case study of Vishav Drainage Basin. *Hydrology Current Research*, 4(3), 1-12. <https://B2n.ir/j80912>
- Jamieson, S. S. R., Sinclair, H. D., Kirstein, L. A., & Purves, R. S. (2004). Tectonic forcing of longitudinal valleys in the Himalaya: morphological analysis of the Ladakh Batholith, North India. *Geomorphology*, 58(1-4), 49-65. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(03\)00185-5](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(03)00185-5)
- Kot, R. (2017). A comparison of results from geomorphological diversity evaluation methods in the Polish Lowland (Toruń Basin and Chełmno Lakeland). *Geografisk Tidsskrift-Danish Journal of Geography*, 118(1), 17-35. <http://dx.doi.org/10.1080/00167223.2017.1343673>
- Kouli, M., Vallianatos, F., Soupios, P., & Alexakis, D. (2007). GIS-based morphometric analysis of two major watersheds, western Crete, Greece. *Journal of Environmental Hydrology*, 15, 1-17. <https://B2n.ir/n63991>
- Kozłowski, S. (2004). Geodiversity. The concept and scope of geodiversity. *Przegląd Geologiczny*, 52(8/2), 833-837. <https://www.researchgate.net/publication/259011668>
- Maqsoudi, M., Moghimi, A., Yamani, M., Rezaei, N., & Moradi, A. (2019). Investigating the geomorphodiversity of Damavand volcano and its surroundings based on the GmI index. *Journal of Quantitative Geomorphology Research*, 8(1), 52-69. https://www.geomorphologyjournal.ir/article_91725.html [In Persian].

- Melelli, L., Vergari, F., Liucci, L., & Del Monte, M. (2017). Geomorphodiversity index: Quantifying the diversity of landforms and physical landscape. *Journal of Science of the Total Environment*, 584, 701-714. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.01.101>
- Mokhtari, D., Karami, F., & Bayati Khatibi, M. (2011). Identification of active morphogenetic forms in Payam pass with the aim of geotourism planning. *Quarterly Journal of Geographical Research*, 26(4), 67-92. https://jgr.ui.ac.ir/article_17912.html [In Persian].
- Martinez-Grana, A. M., Goy, J. L., & Cimarra, C. (2015). 2D to 3D geologic mapping transformation using virtual globes and flight simulators and their applications in the analysis of geodiversity in natural areas. *Environmental earth sciences*, 73, 8023-8034. <https://doi.org/10.1007/s12665-014-3959-1>
- Najwer, A., & Zwoliński, Z. (2015, April). Geomorphometry-based method of landform assessment for geodiversity. In *EGU General Assembly Conference Abstracts* (p. 980). <https://www.researchgate.net/profile/Zbigniew-Zwolinski/publication/273886328>
- Negahban, S., & Dortaj, D. (2019). The Evaluation of the Active Tectonics of the Sirvan River Basin Using Geomorphic Indices. *Hydrogeomorphology*, 6(19), 187-209. https://hyd.tabrizu.ac.ir/article_9327.html?lang=en [In Persian].
- Panizza, M., & Piacente, S. (2009). Cultural geomorphology and geodiversity. In: Reynard, E., Coratza, P., Regolini-Bissig, G. (Eds). *Geomorphosites* (pp. 35–48). Pfeil Verlag.
- Pereira, D. I., Pereira, P., Brilha, J., & Santos, L. (2013). Geodiversity assessment of Paraná State (Brazil): an innovative approach. *Environmental management*, 52, 541-552. <https://doi.org/10.1007/s00267-013-0100-2>
- Piraliloo, H., & Rahimzade, E. (2014). *Identifying geotourism attractions using the pralong method (case, Misho Dagh Marand)*. The first specialized congress of urban management and city councils, Sari. <https://civilica.com/doc/271513> [In Persian].
- Rezaei Moghadam, M. H., Kheirizade, M., & Sarafrouze, S. (2014). Assessment of active tectonics in the southern slope of Mishodagh. *Quantitative Geomorphological Research*, 2(3), 141-158. https://www.geomorphologyjournal.ir/article_77926.html?lang=en [In Persian].
- Serrano, E., & Flano, P. (2007). Geodiversity: concept, assessment and territorial application. The case of Tiermes-Caracena. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 45(45), 389-393. <https://www.researchgate.net/publication/266021182>
- Santos, F. M., de La Corte Bacci, D., Saad, A. R., & da Silva Ferreira, A. T. (2020). Geodiversity index weighted by multivariate statistical analysis. *Applied Geomatics*, 12, 361-370. <https://doi.org/10.1007/s12518-020-00303-w>
- Silva, J., Rodrigues, C., & Pereira, D. I. (2015). Mapping and analysis of geodiversity indices in the Xingu River basin, Amazonia, Brazil. *Geoheritage*, 7, 337-350. <https://doi.org/10.1007/s12371-014-0134-8>
- Toudeshki, V. H., & Arian, M. (2011). Morphotectonic analysis in the ghezel ozan river basin: NW Iran. *Journal of Geography and Geology*, 3(1), 258–265. <http://dx.doi.org/10.5539/jgg.v3n1p258>
- Zhang X. R., & Dong, K. (2012). Neighborhood analysis-based calculation and analysis of multi-scales relief amplitude. *Advanced Materials Research*, 468, 2086-2089. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.468-471.2086>
- Zwoliński, Z., (2009). The routine of landform geodiversity map design for the Polish Carpathian Mts. *Landform Analysis*, 11, 77-85. <https://www.infona.pl/resource/bwmeta1.element.baztech-article-BUJ5-0052-0094>
- Zwolinski, Z., & Gudowicz, J. (2016). Geodiversity of landforms within morphoclimatic zones of the Earth. *Geophysical Research Abstracts*, 18. <https://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2016/EGU2016-11046.pdf>
- Zwoliński, Z., Najwer, A., & Giardino, M. (2018). Methods for assessing geodiversity. In *Geoheritage - Assessment, Protection, and Management* (pp. 27-52). <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-809531-7.00002-2>