پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمّی، سال سیزدهم، شماره ۱، تابستان ۱۴۰۳
صص. ۲۰۷-۱۹۲

ارزیابی شاخص ژئودایورسیتی با استفاده از تابع تراکم کرنل (مطالعه موردی: آبریز قزل اوزن، استان کردستان)

محمدصدیق قربانی*- استادیار، گروه جغرافیا، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران.
نگین عالی- استادیار، گروه جغرافیا، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران.
محمد ادریس فاتحی- کارشناسی ارشد ژئومورفولوژی، گروه جغرافیا، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران.

پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۱۲/۱۱ تائید نهایی: ۱۴۰۳/۰۳/۲۲

چکیده

ژئودایورسیتی نقشی کلیدی در آمایش سرزمین و رویکردهای حفاظتی داشته و مفهوم آن توسط مجامع علمی در سطح جهانی پذیرفته شده است. تاکنون از روش‌های کیفی و کمی گوناگونی برای ارزیابی ژئودایورسیتی و دستیابی به شاخصی برای طبقه بندی نواحی استفاده شده است. در این پژوهش با بهره‌گیری از روش کمی تابع تراکم کرنل و استفاده از متغیرهای لیتولوژی، ژئومورفولوژی، خاک، گسل و هیدروگرافی، شاخص ژئودایورسیتی در آبریز قزل اوزن استان کردستان ارزیابی و محاسبه شده است. پس از آماده سازی لایه‌های اطلاعاتی مربوط به حوضه، طی مراحلی این لایه‌ها وارد ابزار تحلیل تراکم کرنل در نرم افزار ArcGIS شدند. با تعریف پارامترهای مهم این ابزار، شامل اندازه سلول، شعاع جستجو و واحد سطح به کیلومترمربع، نقشه شاخص ژئودایورسیتی حوضه تهیه شد. براساس ارزش‌های عددی، نقشه حاصل به روش شکست طبیعی که باعث برجسته شدن تفاوت بین طبقات می‌شود، به ۵ طبقه تقسیم شد. دامنه اعداد هر طبقه بیانگر تعداد نقطه یا به عبارتی تعداد عارضه در کیلومتر مربع است. در نهایت، براساس شاخص عددی ژئودایورسیتی در هر طبقه، یک دامنه کیفی شامل تراکم خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد تهیه گردید. دامنه تنوع عوارض در سلول‌های نقشه خروجی بین صفر تا ۱۶۶ متغیر است. بیشترین کانون‌های تراکم در غرب، محدوده های کوچکی در شمال، شرق و جنوب حوضه دیده می‌شود. مناطقی که دارای بیشترین ارزش از نظر شاخص ژئودایورسیتی هستند از مناطق مهم ژئوتوریستی استان کردستان محسوب می‌شوند. نهایتاً برای تعیین میزان تأثیر گذاری هر لایه در شاخص ژئودایورسیتی، با حذف هر یک از لایه‌ها، در پنج حالت دیگر نقشه شاخص ژئودایورسیتی حوضه تهیه شد. نتایج نشان داد که متغیر ژئومورفولوژی دارای بیشترین تأثیر در تعیین شاخص ژئودایورسیتی حوضه است و پس از آن متغیرهای هیدروگرافی، لیتولوژی، گسل و خاک شناسی در مراتب بعدی قرار دارند.

واژگان کلیدی: ژئومورفولوژی، قزل اوزن، ژئودایورسیتی، تراکم کرنل.

---

* نویسنده مسئول: E-mail: ms.ghorbani@pnu.ac.ir

مقدمه

تغییرات سریع محیطی و چالش‌های رسیدن به توسعه پایدار نیاز به درک و مدیریت بهتر طبیعت را برجسته کرده است. ژئودایورسیتی نقشی کلیدی در آمایش سرزمین و رویکردهای حفاظتی داشته و مفهوم آن توسط مجامع علمی در سطح جهانی پذیرفته شده است(گونچالوز و همکاران[۱]، ۲۰۲۲). جزیره تاسمانی در استرالیا به عنوان سرزمینی شناخته می شود که نخستین ایده‌های حفاظت محیط از آنجا برخاسته است و رساله‌ای در تاسمانی از شارپلس[۲](۱۹۹۳) پر ارجاع ترین اثر منتشر شده به زبان انگلیسی محسوب می‌شود که برای نخستین بار از اصطلاح ژئودایورسیتی در آن استفاده شده است(شارپلس و همکاران[۳]، ۲۰۱۸). ژئودایورسیتی یک مفهوم بنیادی مربوط به حفاظت محیط است که در اوایل دهه ۹۰ میلادی معرفی و یک دهه بعد توسط گری[۴] (۲۰۰۴، ۲۰۰۸، ۲۰۱۳) به عنوان نوعی پارادایم توسعه یافت. به طور کلی ژئودایورسیتی به عنوان تنوعی از پدیده‌های زمین شناسی شناخته می‌شود که تشکیل دهنده میراث های طبیعی بوده و از این منظر نیازمند نگهداری و محافظت هستند(روبان[۵]، ۲۰۱۴). در واقع ژئودایورسیتی ستون فقرات میراث های زمین[۶] و حفاظت از زمین[۷] است(گری، ۲۰۱۸). این مفهوم در رابطه با پدیده‌های زمین شناختی و ژئومورفولوژیک به نوعی هم ارز تنوع زیستی در مطالعات زیست شناسی است. امروزه علاقمندی وافری به ژئودایورسیتی و حفاظت از عناصر غیرزیستی محیط شکل گرفته که در چشم‌اندازی کلی بر مفاهیمی پیرامون میراث‌های زمین شناختی و میراث‌های ژئومورفولوژیک استوار است(سیلوا و همکاران[۸]، ۲۰۱۴). به عقیده گری(۲۰۲۱) ژئودایورسیتی با وجود نوظهور بودن، مفهومی نیست که بتوان از آن چشم‌پوشی کرد بلکه برعکس یک پارادایم مهم، چند وجهی و در حال تکامل مربوط به علوم زمین است.

مفهوم ژئودایورسیتی طیف گسترده‌ای از مطالعات را به خود اختصاص داده است. از میان تازه‌ترین بررسی‌ها می‌توان به ارتباط ژئودایورسیتی با ژئوتوریسم (نیوسام و لد[۹]، ۲۰۲۲)، ژئوسایت‌ها و ژئوپارک‌ها(روبان[۱۰]، ۲۰۱۷، برد و همکاران[۱۱]، ۲۰۲۲، احمد، ۲۰۲۳)، ژئومورفوسایت‌ها(نجور و همکاران[۱۲]، ۲۰۲۳) و حفاظت از محیط(کروناتو و سوارز[۱۳]، ۲۰۲۲، احمدی و همکاران ۲۰۲۲) و حتی ارزش‌های فرهنگی ژئودایورسیتی(پریرا و فاریاس[۱۴]، ۲۰۲۰) اشاره کرد.

نظر به اهمیت، جایگاه، کارکردها و کاربردهای ژئودایورسیتی، روز به روز بر گستره مطالعات مرتبط با این حوضه افزوده می‌شود. به موازات طرح مفهومی، تاکنون مجموعه‌ای از رویکردها و روش‌ها برای ارزیابی و سنجش ژئودایورسیتی براساس شاخص‌های کیفی و کمی ارائه شده است. در کار داسیلوا و همکاران[۱۵](۲۰۱۹) به مجموعه ای از این روش های کیفی و

---

۱ - Gonçalves & et al
۲ - Sharples
۳ - Sharples & et al
۴ - Gray
۵ - Ruban
۶ - Geoheritage
۷ - Geoconservation
۸ - Silva & et al
۹ - Newsome & Ladd
۱۰ - Ruban
۱۱ - Berred & et al
۱۲ - Najwer & et al
۱۳ - Coronato & et al
۱۴ - Pereira and et al
۱۵ - Da sliva & et al

کمی پرداخته شده است. از روش‌های مبتنی بر ارزش های کیفی که غالبا سلیقه‌ای و براساس نظر کارشناسی است می توان به گری(۲۰۱۳) و بریلها و همکاران[۱](۲۰۱۸) اشاره کرد. درمیان روش‌های کمی که براساس مدل‌های ریاضی و نرم افزاری است می توان به سیستم طبقه بندی کوزلوسکی[۲](۲۰۰۴)، روش ارزیابی ژئومورفوسایت‌ها براساس ارزش‌های علمی، اکولوژیک، زیبایی شناختی، فرهنگی و اقتصادی رینارد و همکاران[۳](۲۰۰۷)، روش ارزیابی ژئودایورسیتی کوت[۴](۲۰۱۴) براساس یک سیستم پیوند نقطه ای شامل ارزیابی زمین شناسی، ژئومورفولوژی، هیدرولوژی، خاک شناسی و اقلیم اشاره کرد. در این میان، روش شبکه‌ای پریرا و همکاران[۵](۲۰۱۳) که براساس ارزیابی عددی عناصر غیر زیستی در داخل هر سلول از شبکه است، به صورتی گسترده‌تر در ارزیابی های محیطی مورد استفاده قرار گرفته است. نهایتاً روش فورته و همکاران[۶](۲۰۱۸) که از تلفیق چند نقشه موضوعی براساس تابع تراکم کرنل به ارزیابی شاخص ژئودایورسیتی می پردازد از روش‌های جدیدی محسوب می‌شود که مورد توجه قرار گرفته است و در بررسی حاضر از آن بهره گرفته می شود. این روش توسط داسیلوا و همکاران(۲۰۱۹) صحت سنجی شده و براهمیت و دقت آن تاکید شده است.

در ایران ژئودایورسیتی به روش‌های گوناگونی چون بهره گیری از شاخص کیفی-کمی GI (مقصودی و همکاران، ۱۴۰۲) و روش شبکه بندی سـرانو و رویـز فلانـو (شایان یگانه و همکاران ۱۳۹۹، صالحی میلانی و همکاران، ۱۴۰۰ و باتجربه و همکاران، ۱۴۰۱) ارزیابی و تحلیل شده است. براساس بررسی منابع موجود، از روش تخمین تراکم کرنل در مطالعات متعددی مانند شناسایی نقاط حادثه خیز جاده‌ای(صیدایی و همکاران، ۱۳۹۹)، تحلیل مکانی تصادفات(زینلی و همکاران، ۱۳۹۴) و تخمین بار رسوبی معلق رودخانه(جودی و ستاری، ۱۳۹۵) استفاده شده؛ اما چنین پیداست که در ایران تاکنون از این روش(روش فورته) برای ارزیابی ژئودایورسیتی استفاده نشده است. همچنانکه اشاره شد شاخص ژئودایورسیتی از چنان اهمیتی برخوردار است که پژوهشگران متعدی با رویکردهای مختلف کیفی و کمی اقدام به ارزیابی آن نموده‌اند. ارزیابی و استخراج شاخص ژئودایورسیتی می‌تواند به برنامه‌ریزان کمک کند تا با صرف هزینه مادی و زمانی اندکی به نگرشی مفید در خصوص مناطق مستعدی که دارای بیشترین ارزش از نظر ژئودایورسیتی هستند دست یابند. ارزیابی شاخص ژئودایورسیتی هم در بحث بهره‌برداری از مناطق مستعد از جمله در حوضه ژئوتوریسم و هم در بحث حفاظت از محدوده‌هایی که دارای ارزش بیشتری هستند می‌تواند راه‌گشا باشد. شناخت مناطقی که دارای ارزش بیشتری از نظر ژئودایورسیتی هستند سرمایه مهمی برای مدیریت سرزمین محسوب می‌شود. بنابراین در پژوهش حاضر شاخص ژئودایورسیتی در آبریز رودخانه قزل اوزن در استان کردستان با استفاده از تابع تراکم کرنل تحلیل و ارزیابی خواهد شد.

منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز قزل اوزن در استان کردستان حدود ۱۴ هزار کیلومتر مربع است که تقریباً نصف مساحت استان را شامل می‌شود. چنانچه استان کردستان را به دو بخش شرقی و غربی تقسیم کنیم، بخش اعظم ناحیه شرقی آن توسط رودخانه قرل اوزن و زیرشاخه‌های آن زهکشی می‌شود. رودخانه قزل اوزن پس از دریافت شاخه‌های متعددی همچون قزل اوزن،

---

۱ - Brilha & et al

۲ - Kozlowski & et al

۳ - Reynard & et al

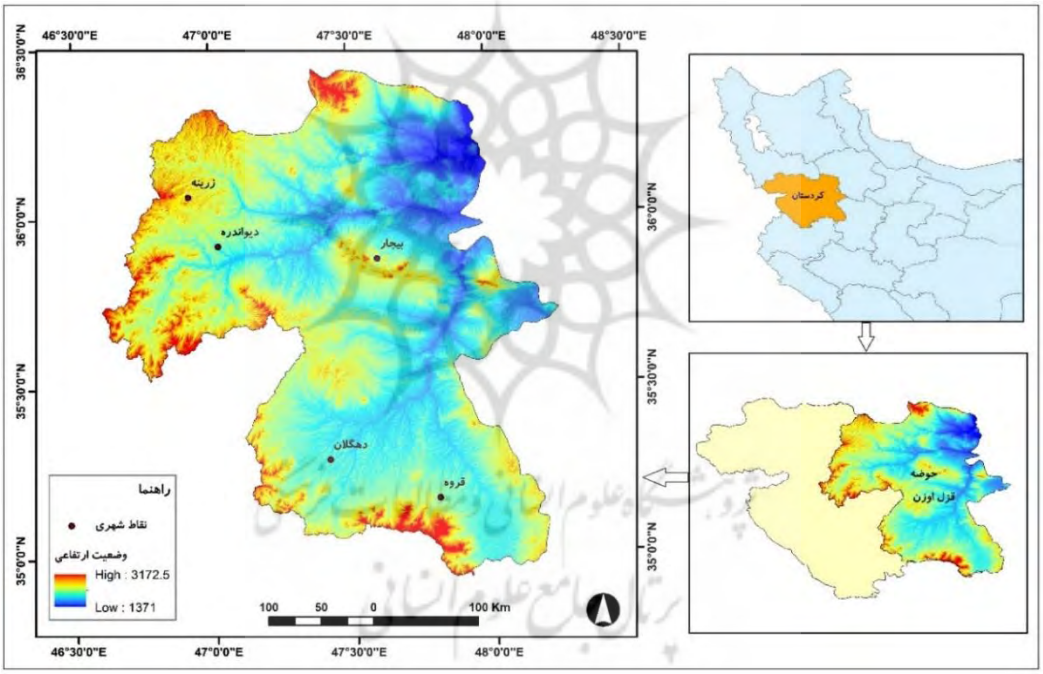
۴ - Kot & et al

۵ - Pereira & et al

۶ - Forte & et al

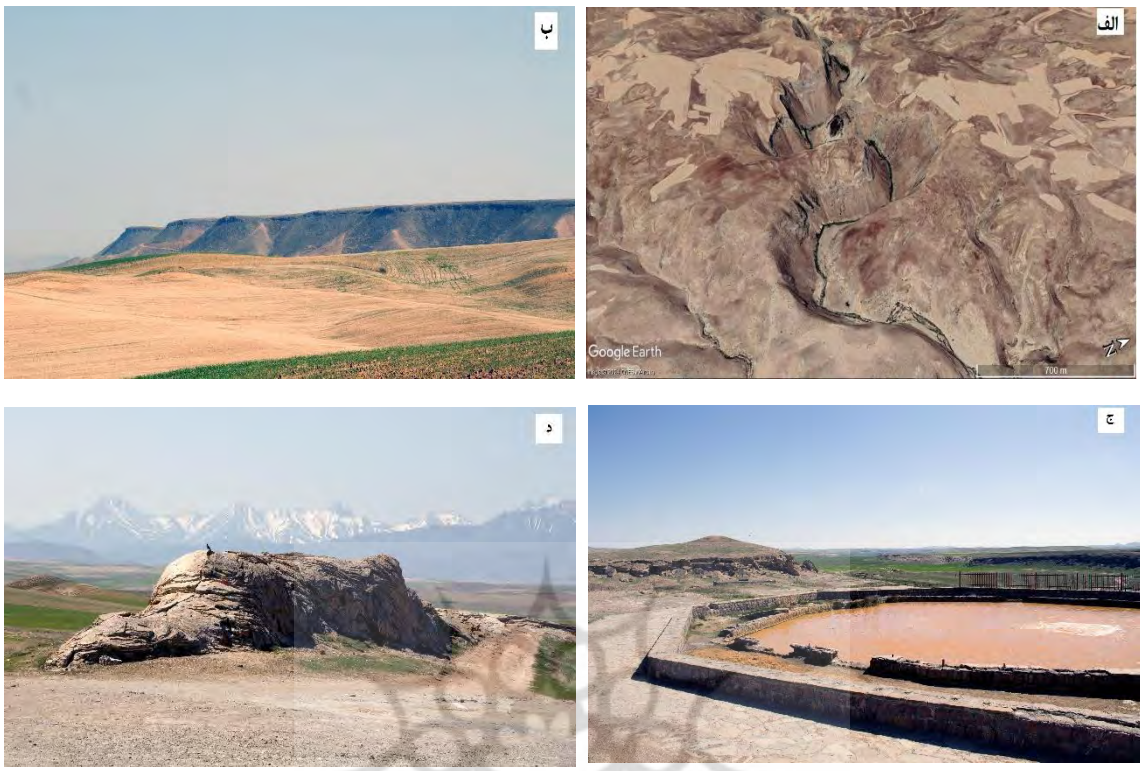
تروال، چم شور، چم زرد، قروچای، قوچم، گوزن، خسروآباد، ازون دره، قم چقای، سنگ سیاه و دهگلان، از شمال شرقی استان خارج شده و وارد استان زنجان می‌گردد و به سمت سفید رود و دریای خزر جاری می شود.

این حوضه از نظر توپوگرافی تنوع چشمگیری دارد. دشت‌های وسیع و توپوگرافی تپه ماهوری آن در مرکز، توسط حصاری کوهستانی در جنوب، غرب و تا حدودی شمال احاطه شده است. کوههای بیر و پریشان و دروازه در جنوب شهر قروه، کوههای چهل چشمه در شمال غربی دیواندره و کوه حلقه میر در شمال شهرستان بیجار از مهمترین ارتفاعات این حوضه هستند. دشت‌های وسیع دهگلان معروف به بان لیلاخ، دشت قروه، دشت‌های بیجار و دشت‌های منطقه دیواندره و زرینه در این حوضه واقع شده‌اند. این ناحیه از نظر ساختمانی در زون سنندج–سیرجان واقع شده است. تنوع زمین شناسی(سنگهای رسوبی، آتشفشانی و دگرگونی) و ویژگی‌های متنوع توپوگرافیکی در تعامل با دینامیک بیرونی باعث تنوع چشمگیری در لندفرم ها شده است. انواع لندفرم‌های رودخانه‌ای، یخچالی، کارستی، آتشفشانی و حتی کویر را می توان در این حوضه مشاهده کرد. با توجه به این که آبریز قزل‌اوزن یکی از آبخیزهای بسیار مهم کشاورزی در استان کردستان محسوب می‌شود، بررسی ژئودایورسیتی آن می‌تواند کمک شایان توجهی در امر برنامه یزی و مدیریت این ناحیه بنماید(شکل ۱).



شکل ۱: موقعیت آبریز قزل اوزن در استان کردستان

مجموعه‌ای از ژئوسایت های مهم در آبریز قزل اوزن وجود دارند که از سایت‌های مهم ژئوتوریستی استان کردستان محسوب می‌شوند. ارتفاعات کوهستانی بیر و پریشان در جنوب و توده کوهستانی چهل چشمه و سارال در غرب حوضه به همراه میراث‌های یخچالی آنها، توده‌ها و مخروط‌های آتشفشانی همچون توده آتشفشانی کوه سیاه، فلات‌های بازالتی(مزا) از جمله فلات شاخص بازالتی معروف به بان، سراب‌های قروه و بیجار، بقایای چشمه‌های تراورتن و از جمله چشمه فعال تراورتن باباگرگر و توده تراورتنی اژدهای باباگرگر، اثر طبیعی–تاریخی قمچقای شامل کانیون قمچقای و قلعه‌ها و آثار تاریخی آن و قلمروهای کارستی حوضه که اثر مهمی همچون غار گلسانه در آن شکل گرفته از جمله ژئوسایت‌های مهم آبریز قزل اوزن محسوب می‌شوند(شکل ۲).



شکل ۳: تعدادی از ژئوسایت‌های مهم آبریز قزل اوزن. الف–کانیون قمچقای ب– فلات بازالتی(مزا) بان ج– چشمه تراورتنی فعال باباگرگر د– رسوبات چشمه تراورتنی موسوم به اژدهای باباگرگر.

مواد و روش

در این بررسی از داده‌ها، ابزار و روش تراکم کرنل برای نیل به اهداف و نتیجه استفاده شده است که در زیر به هر کدام اشاره خواهد شد.

داده های استفاده شده در این بررسی عبارتند از:

مدل رقومی ارتفاع(DEM) ۲۸,۵ متر منطقه

نقشه‌های زمین شناسی استان کردستان تهیه شده توسط سازمان زمین شناسی کشور با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰

نقشه گسلها تهیه شده از ورقه‌های زمین شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ منطقه

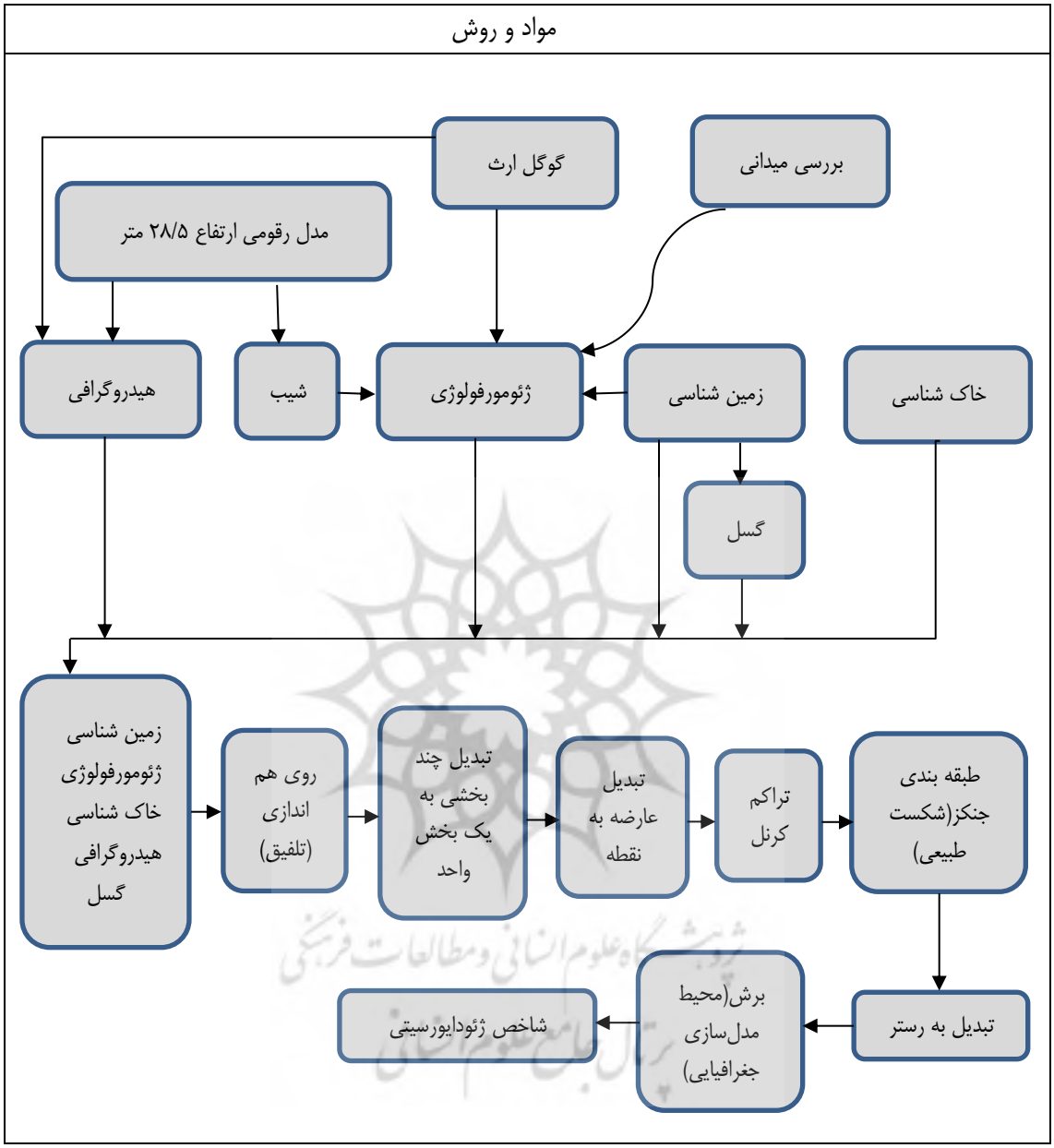
نقشه ژئومورفولوژی منطقه، تهیه شده براساس بررسی میدانی، نقشه‌های زمین شناسی و نرم افزار گوگل ارث

نقشه خاکهای استان کردستان با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰۰

نقشه هیدروگرافی حوضه، استخراج شده از مدل رقومی ارتفاع

با توجه به ماهیت و روش بررسی که مستلزم استفاده از نرم افزار است؛ در این پژوهش از نرم‌افزارهای ArcGIS نسخه ۱۰,۴,۱ و نرم افزار Google Earth Pro بهره گرفته شده است.

همچنانکه پیشتر اشاره شد در این مطالعه جهت استخراج شاخص ژئودایورسیتی از روش فورته و همکاران(۲۰۱۸) که مبتنی بر استفاده از تابع تراکم کرنل است استفاده می‌شود(شکل ۲).



شکل ۲: داده ها و روش شناسی فرایند استخراج شاخص ژئودایورسیتی

تابع تراکم کرنل

تابع تراکم کرنل را می‌توان هم برای عوارض نقطه‌ای و هم عوارض خطی محاسبه کرد. این تابع تراکم عوارض نقطه‌ای را پیرامون هر سلول رستری خروجی محاسبه می‌کند. از نظر مفهومی، برای عوارض نقطه‌ایی یک سطح منحنی صاف بر روی هر نقطه قرار می‌گیرد. ارزش و مقدار سطح در محل نقطه بالاترین است و با افزایش فاصله از نقطه کاهش می یابد و در انتهای فاصله شعاع جستجو از نقطه، به صفر می رسد. برای هر نقطه فقط یک دایره همسایگی وجود دارد. حجم زیر سطح از نظر آماری برابر است با مقدار ستون فراوانی برای نقطه، یا چنانچه فراوانی وجود نداشته باشد برابر با ۱ است. تراکم در هر سلول رستری خروجی، با افزودن مقادیر تمام سطوح کرنلی که بر روی مرکز سلول رستری روی هم اندازی شده‌اند

محاسبه می شود. این تابع به صورت یک ابزار جانبی در بخش تحلیل‌های فضایی نرم‌افزار ArcGIS گنجانده شده است. پس از وارد کردن داده‌های نقطه‌ای در ابزار محاسبه تراکم کرنل، چند پارامتر وجود دارد که براساس کار سیلورمن[۱](۱۹۸۶) به صورت اجمالی مورد اشاره قرار می گیرند.

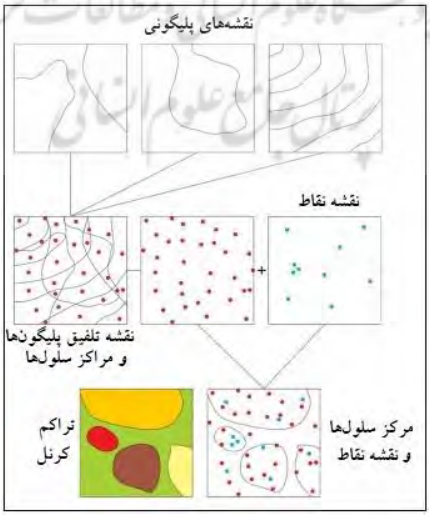
گزینه جمعیت یا فراوانی(Population field): گزینه‌ای انتخابی و اختیاری است. چنانچه عوارض از نظر آماری دارای فراوانی باشند و در جدول اطلاعات توصیفی ستون مربوط به آن وجود داشته باشد، می‌توان جهت مشخص کردن وزن هر عارضه در تحلیل، آن را انتخاب کرد. با توجه به ماهیت داده‌ها در بررسی حاضر، نیازی به استفاده از این گزینه وجود ندارد.

اندازه سلول‌های خروجی(Output cell size): با توجه به اینکه خروجی این ابزار به صورت یک نقشه رستری است لازم است اندازه سلول‌های نقشه خروجی تعریف شود. معمولاً این اندازه به صورت پیش فرض متناسب با مقیاس لایه ورودی تعریف شده است. اندازه سلول را می‌توان در صورت نیاز، با توجه به اهداف پژوهش تغییر داد.

شعاع جستجو(Search radius): متناسب با واحد متریک استفاده شده(مایل یا متر) شعاع جستجو مسافتی است که برای جستجوی عوارض همسایه تعریف می‌شود. سطح تراکم در محل نقاط یا مرکز سلول‌ها بیشتر و در انتهای شعاع جستجو به صفر می‌رسد. مقدار شعاع جستجو معمولا باتوجه به ارتباط فضایی داده‌ها (نقطه‌ای یا خطی)، براساس یک الگوریتم خاص در ابزار محاسبه تراکم کرنل به صورت پیش فرض تعریف شده است. شعاع جستجو را می‌توان در صورت لزوم تغییر داد.

واحدهای مساحت(Area units): تابع تراکم کرنل را باید بر روی نقشه‌هایی عملیاتی کرد که دارای سیستم مختصات متریک باشند. این واحد به صورت پیش فرض کیلومتر مربع است. در نقشه خروجی تراکم کرنل می‌توان هر یک از واحدهای متریک را انتخاب کرد. بنابراین با تعیین این پارامتر، نتیجه حاصل، تعداد نقطه در واحد متریک خواهد بود.

در این پژوهش پنج لایه اطلاعاتی شامل لیتولوژی، گسلها، ژئومورفولوژی، خاک شناسی و هیدروگرافی که نقش موثری در ارزیابی شاخص ژئودایورسیتی دارند انتخاب شده و طی سلسله مراتب خاصی که توضیح داده خواهد شد، نهایتا به یک لایه نقطه‌ای جهت محاسبه تراکم کرنل تبدیل شده‌اند(شکل ۲).



شکل ۲: نمودار ساده شده روش محاسبه تراکم کرنل(داسیلوا و همکاران، ۲۰۱۹)

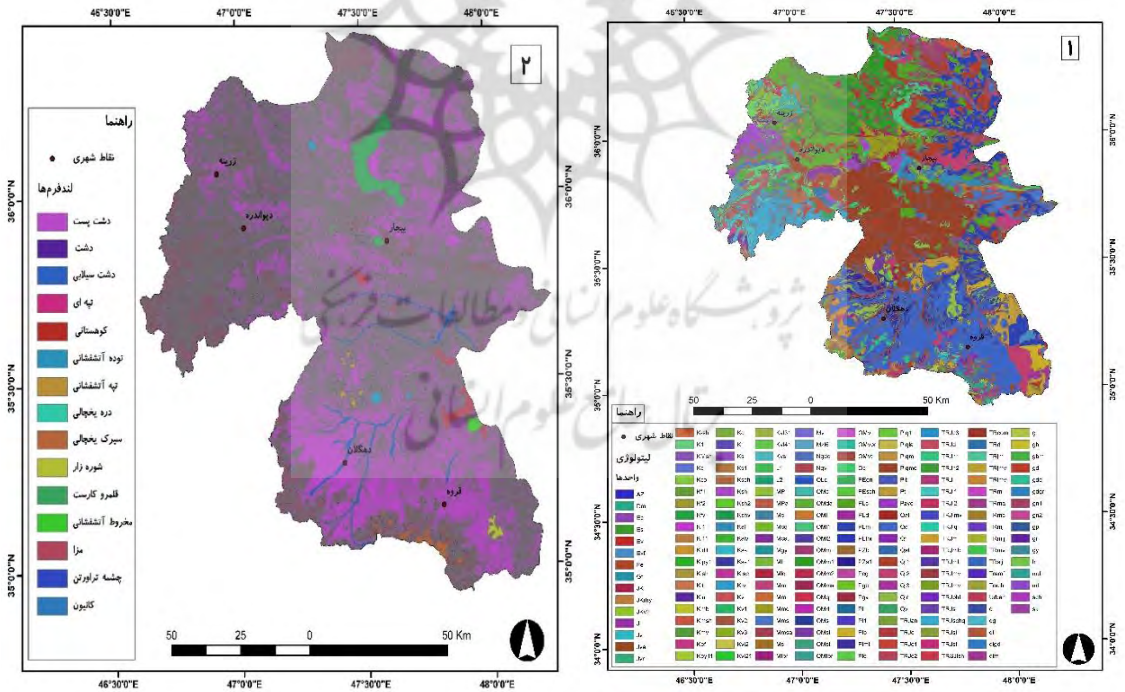
۱ - Silverman

بحث و یافته ها

انتخاب متغیرها

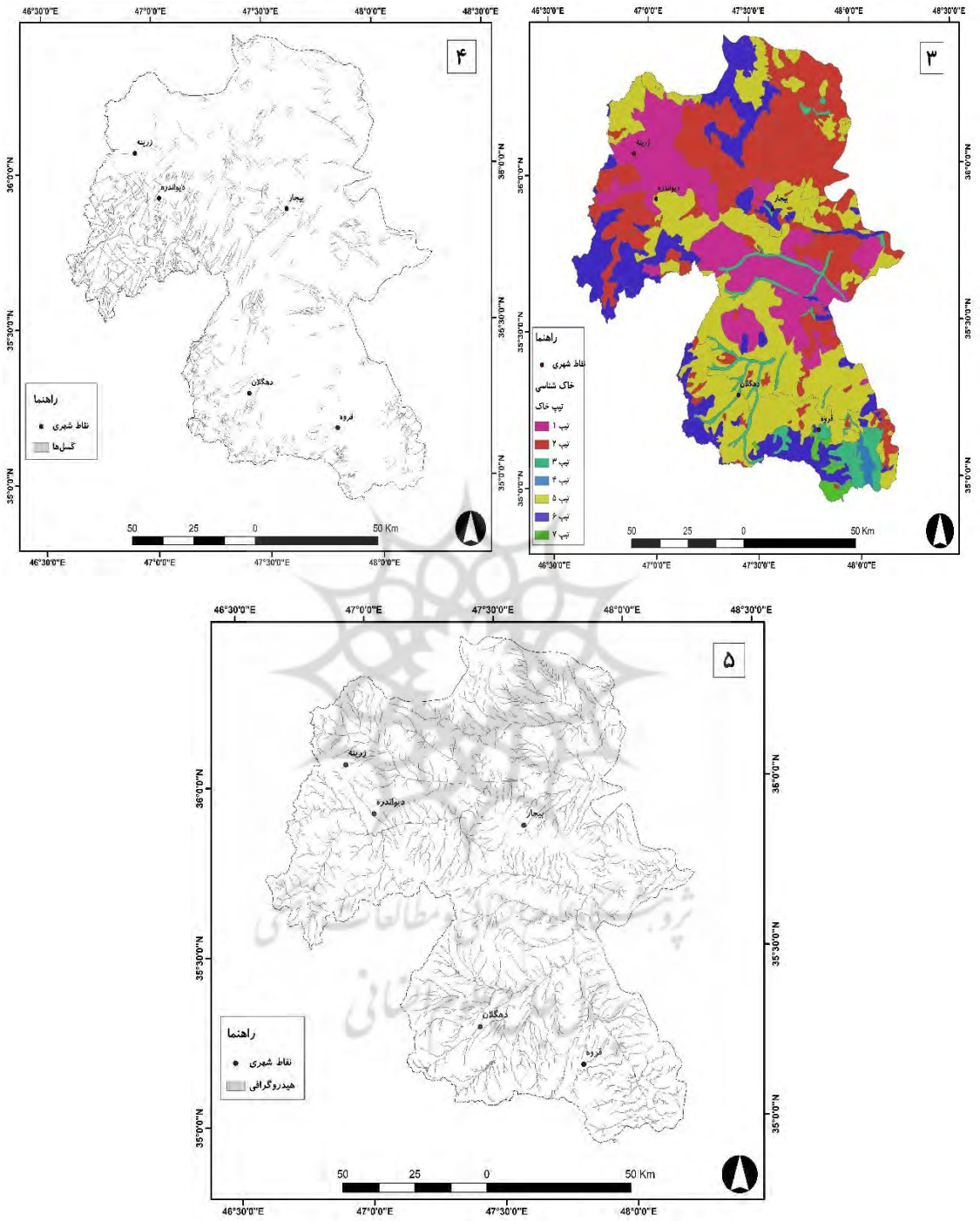
عناصر غیر زیستی که می‌توانند بر میزان تنوع زمین یا ژئودایورسیتی موثر باشند طیف وسیعی را در برمی‌گیرند. همچنانکه گری(۲۰۰۴) اشاره می‌کند؛ برای بررسی ژئودایورسیتی، تحلیل تمام عناصر غیر زیستی به صورت همزمان امکان پذیر نیست. هرچند هنوز رویکرد یا معیار مشخصی در مورد نحوه انتخاب داده‌ها برای تحلیل ژئودایورسیتی و شاخص آن ارائه نشده است. اما گام های عملی قابل توجهی در این زمینه برداشته شده است. در برخی از بررسی‌ها پوشش سطحی زمین اعم از طبیعی و انسانی برای استخراج شاخص ژئودایورسیتی در نظر گرفته شده است. بنابراین در کنار داده‌های زمین شناسی، ژئومورفولوژی و توپوگرافی از داده‌های مربوط به کاربری اراضی نیز استفاده کرده‌اند(زولینیسکی[۱]، ۲۰۰۹، چروبک و همکاران[۲]، ۲۰۲۱). اما با توجه به پیوند نزدیک بحث ژئودایورسیتی با مفاهیمی همچون میراث‌های زمین، ژئوسایت‌ها، ژئومورفوسایت‌ها و حفاظت از زمین در بیشتر بررسی‌ها از متغیرهای طبیعی جهت ارزیابی شاخص ژئودایورسیتی بهره گرفته شده است. در این میان زمین شناسی و ژئومورفولوژی از اصلی‌ترین متغیرها هستند. به طوری که فورته و همکاران(۲۰۱۸) که پژوهش حاضر مبتنی بر رویکرد آنهاست، عنوان کرده‌اند که زمین شناسی و ژئومورفولوژی باید همیشه در ارزیابی ژئودایورسیتی حضور داشته باشند؛ زیرا متغیرهای کلیدی هستند.

متغیرهایی که براساس روش پیش گفته، به منظور ارزیابی شاخص ژئودایورسیتی در آبریز قزل اوزن استان کردستان انتخاب شده‌اند عبارتند از لیتولوژی، ژئومورفولوژی، خاک شناسی، گسل‌ها و هیدروگرافی(شکل ۳).



[۱] - Zwoliński

[۲] - Chrobak & et al



شکل ۳: متغیرهای استفاده شده در ارزیابی ژئودایورسیتی. ۱- لیتولوژی ۲- ژئومورفولوژی ۳- خاک شناسی ۴- گسل‌ها ۵- هیدروگرافی

آماده سازی نقشه متغیرها

برای محاسبه تراکم کرنل علاوه بر سیستم مختصات متریک، لازم است که تمام لایه ها به صورت پلی‌گون باشند. در این پژوهش، برای تمام لایه‌ها از سیستم جهانی مرکاتور معکوس(UTM) که سیستم مختصاتی متریک است استفاده شده است. غیر از لایه‌های لیتولوژی، ژئومورفولوژی و خاک که خود پلی‌گونی هستند، در مرحله اول لازم بود که لایه‌های گسل

و هیدروگرافی به صورت پلی‌گون تعریف شوند. برای این منظور با تعریف یک بافر، لایه خطی گسل‌ها و آبراهه‌ها به پلی‌گون تبدیل شدند. لازم به ذکر است که پهنه های آبی حوضه شامل سدها و حوضچه سراب‌های معروف قروه، بیجار و باباگرگر در هیدروگرافی ادغام گردیدند و لایه نهایی شبکه هیدروگرافی به صورت پلی‌گونی تهیه گردید.

لیتولوژی: نقشه لیتولوژی حوضه، برشی از نقشه زمین شناسی استان کردستان است که خود از ورقه‌های زمین شناسی استان با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ تهیه شده است. با توجه به اینکه این نقشه پلی‌گونی است، تغییری در آن صورت نگرفته و مستقیما از آن استفاده شده است. این لایه صرفاً شامل سنگ شناسی است و گسل‌ها آن نقشی ندارند.

ژئومورفولوژی: در نقشه ژئومورفولوژی که حاصل از بررسی میدانی، نقشه‌های زمین شناسی و نرم افزار گوگل ارث بوده و مجموعه متنوعی از لندفرم‌ها را شامل می‌شود، شیب توپوگرافی نیز در قالب چهار عارضه دشت پست، دشت، تپه و کوهستان ادغام گردید.

خاک شناسی: نقشه خاک حوضه برشی از نقشه رده‌های خاک استان کردستان با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰۰ است که ۷ تیپ خاک را شامل می‌شود. این لایه نیز پلی‌گونی بوده و مستقیماً از آن استفاده شده است.

گسل‌ها: لایه گسل‌ها از نقشه‌های زمین شناسی حوضه با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ استخراج شده است. همچنانکه اشاره شد این لایه با تعریف یک بافر ۲ متری، از لایه خطی به پلی‌گونی تبدیل گردید.

هیدروگرافی: نقشه آبراهه‌های حوضه از مدل رقومی ارتفاع حوضه(۲۸,۵ متر) استخراج شده است. این لایه نیز با تعریف یک بافر ۵ متری به یک لایه پلی‌گونی تبدیل شد. نقشه پلی‌گونی پهنه‌های آبی حوضه شامل سدها و آبگیرها به صورت جداگانه ترسیم و با لایه پلی‌گونی آبراهه‌ها ادغام گردید و نهایتاً نقشه هیدروگرافی حوضه تهیه شد.

لازم به یادآوری است که در بحث محاسبه تراکم کرنل در هر لایه اطلاعاتی تنها تعداد عارضه و سطحی که هر عارضه اشغال کرده و باعث تنوع شده است اهمیت دارد. اینکه ماهیت آن عارضه چه چیزی باشد امتیاز خاصی ندارد. بنابراین در نقشه لیتولوژی تعداد و تنوع جنس واحدها اهمیت پیدا می‌کند و اینکه جنس واحدها آذرین، رسوبی و یا دگرگونی باشد اهمیت ویژه‌ای ندارد. به همین ترتیب در نقشه خاک شناسی نیز تنها تعداد و مساحت تیپ‌های خاک اهمیت دارد. این موضوع برای تمام لایه‌های اطلاعاتی صادق است.

محاسبه شاخص ژئودایورسیتی

پس از آماده‌سازی لایه‌های اطلاعاتی اولیه، برای محاسبه شاخص ژئودایورسیتی لازم است که این لایه‌ها طی سلسله مراتب خاصی به یک لایه واحد نقطه‌ای جهت ورود به ابزار تراکم کرنل پردازش شوند. این پردازش از طریق ابزارهای نرم افزار ArcGIS صورت می گیرد که در زیر به آنها اشاره می شود.

۱ -تبدیل تمام لایه ها به پلی‌گون

۲ -ادغام و همپوشانی لایه ها از طریق عملگر Union در بخش ابزارهای تحلیل

۳ -ایجاد پلی‌گون واحد از طریق عملگر Multipart to singlepart در بخش مدیریت داده‌ها

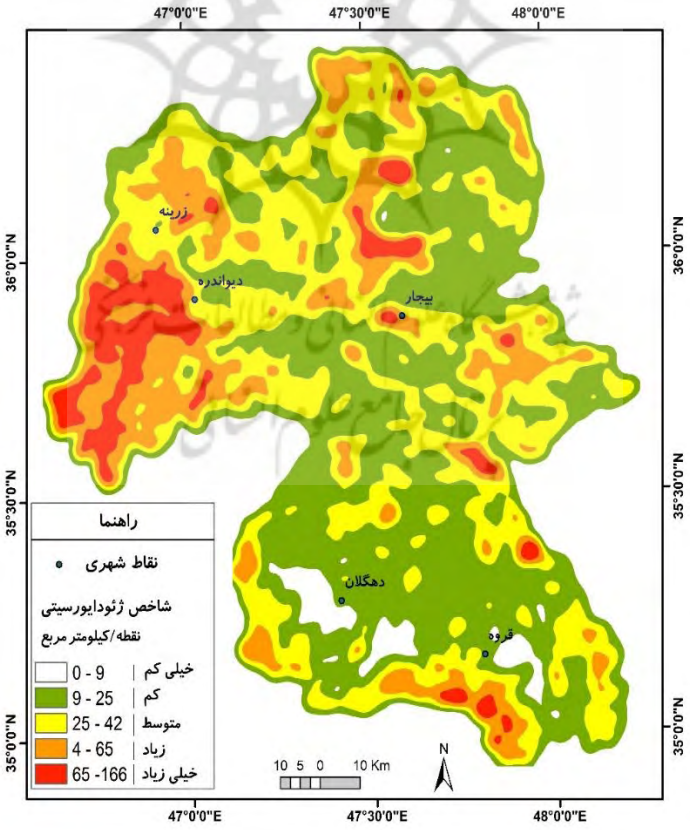
۴ -تبدیل پلی‌گون واحد به لایه نقطه ای در بخش مدیریت داده‌ها

۵ -استفاده از لایه نقطه ای برای محاسبه تراکم کرنل

پس از تهیه لایه نقطه‌ای واحد، با مراجعه به بخش تحلیل فضایی، این لایه در ابزار محاسبه تراکم کرنل وارد گردید و پارامتر مهمی که در این ابزار وجود دارند تعریف شدند.

در نقشه رستری خروجی، براساس لایه‌های ورودی، اندازه هر سلول ۵۹۵,۵ متر در ۵۹۵,۵ متر بود که جهت افزایش دقت جستجو، ابعاد هر سلول ۱۰۰ متر در ۱۰۰ متر تعریف گردید. شعاع جستجو که براساس روابط فضایی نقاط و الگوریتم خاصی تعیین می‌شود به صورت پیش فرض۳۶۱۴,۷ بود که بدون تغییر مورد استفاده قرار گرفت. لازم به یادآوری است که انتخاب نهایی اندازه سلول‌ها و شعاع جستجو پس از آزمون‌های متعددی بر روی این پارامترها حاصل گردید. واحد متریک خروجی نیز به صورت کیلومتر مربع تعیین شد.

نکته مهم در ارزیابی شاخص ژئودایورسیتی شکل‌گیری کانون‌های تراکم در نقشه خروجی است که شعاع جستجو، نقش تعیین کننده‌ای در آن دارد. در نهایت با لحاظ کردن مجموع شرایط لازم، با وارد کردن لایه نقطه‌ای در عملگر تراکم کرنل و انتخاب اندازه سلول خروجی، شعاع جستجو و واحد متریک، شاخص ژئودایورسیتی حوضه استخراج شد. براساس ارزش های عددی، نقشه حاصل به روش شکست طبیعی[۱] که باعث برجسته شدن تفاوت بین طبقات می‌شود، به ۵ طبقه تقسیم شد. دامنه اعداد هر طبقه بیانگر تعداد نقطه یا به عبارتی تعداد عارضه در کیلومتر مربع است. در نهایت، براساس شاخص عددی ژئودایورسیتی در هر طبقه، یک دامنه کیفی شامل ترکم خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد تهیه گردید(شکل۴).نقشه نهایی شاخص ژئودایورسیتی نشان می‌دهد که بیشترین تنوع در غرب حوضه وجود دارد. پس از آن محدوده‌های کوچکی در شمال، شرق و جنوب نیز دارای بیشترین تنوع هستند. کمترین تنوع در اطراف شهرهای قروه و دهگلان دیده می‌شود. تنوع در سایر بخش‌های حوضه در دامنه کم تا زیاد قرار دارد.



شکل ۴: نقشه نهایی شاخص ژئودایورسیتی آبریز قزل اوزن

[۱] - Natural Break

ارزیابی اهمیت لایه‌های اطلاعاتی

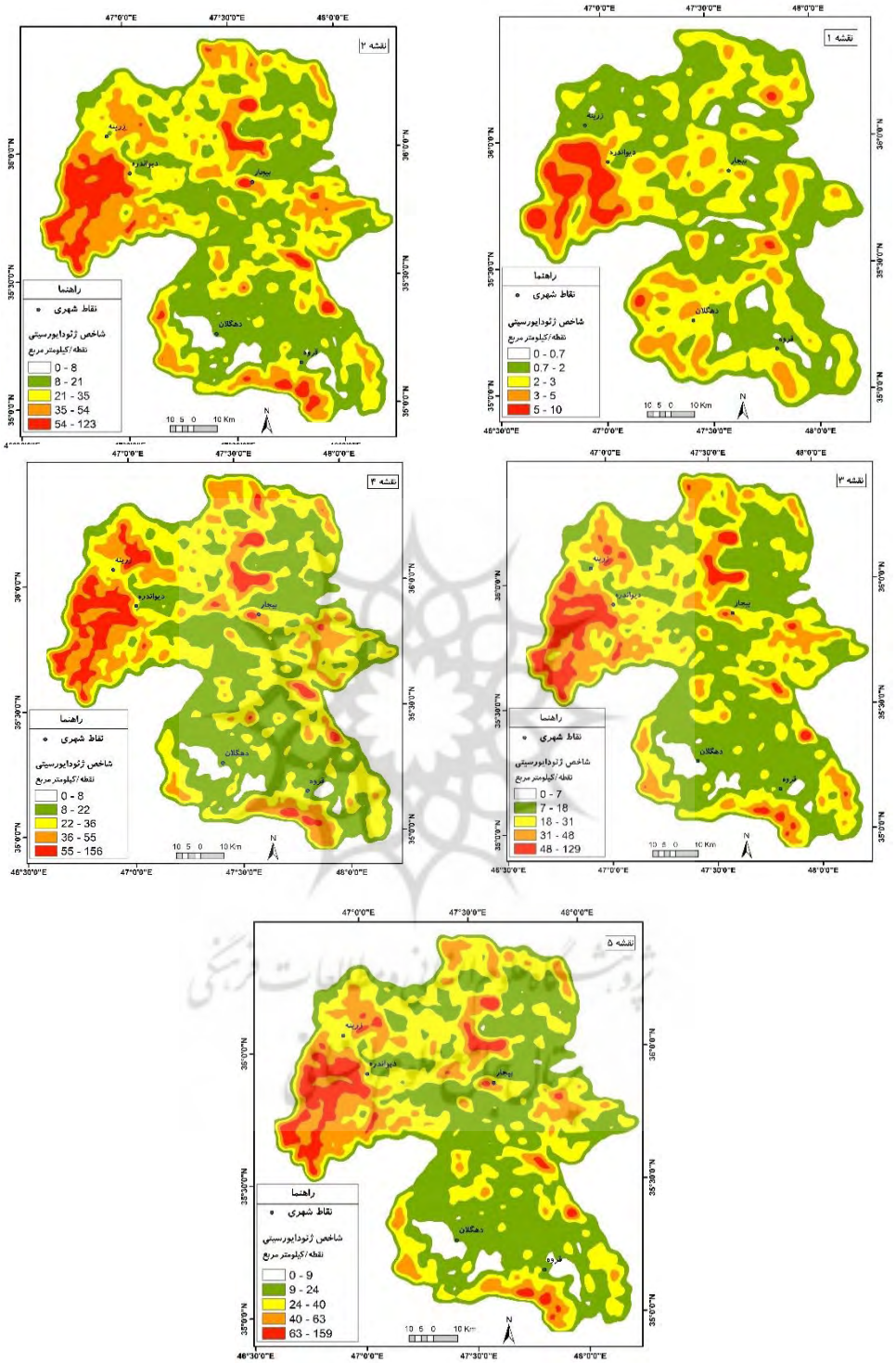
پس از تهیه نقشه شاخص ژئودایورسیتی آبریز قزل اوزن، برای تعیین میزان تأثیر گذاری هر لایه در شاخص ژئودایورسیتی، با حذف هر یک از لایه‌های لیتولوژی، ژئومورفولوژی، خاک، گسل و هیدروگرافی، در پنج حالت دیگر به ترتیب ، نقشه شاخص ژئودایورسیتی بر اساس تراکم کرنل تهیه گردید. این حالت ها در جدول ۱ و شکل ۵ براساس اهمیت هر متغیر در محاسبه شاخص ژئودایورسیتی مرتب شده اند.

جدول ۱: حالت‌های مختلف ترکیب متغیرها جهت روشن شدن میزان تأثیرگذاری هر متغیر

			شاخص ژئودایورسیتی(تعداد نقطه در کیلومتر مربع)					
حالت‌ها	ترکیب متغیرها	متغیر حذف شده	خیلی کم	کم	متوسط	زیاد	خیلی زیاد	نقشه ها
۱	لیتولوژی، خاک، گسل و هیدروگرافی	ژئومورفولوژی	۰/۷-۰	۲-۰/۷	۳-۲	۵-۳	۱۰-۵	نقشه۱
۲	لیتولوژی، ژئومورفولوژی، خاک و گسل	هیدروگرافی	۸-۰	۲۱-۸	۳۵-۲۱	۵۴-۳۵	۱۲۳-۵۴	نقشه۲
۳	ژئومورفولوژی، خاک، گسل و هیدروگرافی	لیتولوژی	۷-۰	۱۸-۷	۳۱-۱۸	۴۸-۳۱	۱۲۹-۴۸	نقشه۳
۴	لیتولوژی، ژئومورفولوژی، خاک و هیدروگرافی	گسل	۸-۰	۲۲-۸	۳۶-۲۲	۵۵-۳۶	۱۵۶-۵۵	نقشه۴
۵	لیتولوژی، ژئومورفولوژی، گسل و هیدروگرافی	خاک	۹-۰	۲۴-۹	۴۰-۲۴	۶۳-۴۰	۱۵۹-۶۳	نقشه۵

نتایج حاصل از شکل ۵ نشان می‌دهد که با حذف لایه ژئومورفولوژی(نقشه ۱) شاخص ژئودایورسیتی به شدت کاهش می یابد که نشان از اثر گذاری زیاد این لایه در تعیین شاخص ژئودایورسیتی در حوضه است. با توجه به ادغام عوارض توپوگرافی در لایه ژئومورلوژیک و افزایش تنوع عوارض، وزن و اهمیت این لایه از دیگر داده‌ها بسیار بیشتر است. به طوری که با حذف آن شاخص ژودایورسیتی به شدت کاهش پیدا کرده است.

متغیر هیدروگرافی(نقشه ۲، شکل ۵) در درجه دوم اهمیت قرار گرفته است. دلیل اهمیت یافتن این متغیر ناشی از بالا بودن تراکم زهکشی در آبریز قزل اوزن است که خود متأثر از ویژگی‌های زمین شناسی حوضه می‌باشد. پس از آن متغیر لیتولوژی(نقشه ۳، شکل ۵) در درجه سوم اهمیت قرار می‌گیرد. البته ذکر این نکته لازم است که از نظر درجه اهمیت، هیدروگرافی و لیتولوژی بسیار به هم نزدیک هستند. به طوری که در تمام طبقات، تفاوت آنها چندان زیاد نیست و می‌توان گفت تقریباً اثر مشابهی دارند. متغیر گسل(نقشه ۴، شکل ۵) در مرتبه چهارم قرار گرفته است. گسل‌ها بیشترین تراکم را در بخش غربی حوضه دارند و در سایر بخش‌ها از تراکم کمی برخوردارند. نهایتاً متغیر خاک(نقشه ۵، شکل ۵) از نظر اهمیت در مرتبه پنجم قرار گرفته است. با توجه به تنوع کم تیپ خاک‌های حوضه این نتیجه دور از انتظار نیست. مسلماً ارزیابی شاخص ژئودایورسیتی در مقیاس‌های بزرگتر و در اختیار داشتن داده‌های مفصل‌تر می‌تواند نتایج بهتری به همراه داشته باشد.



شکل ۵: شاخص ژئودایورسیتی در حالت های مختلف. نقشه های ۱ تا ۵

ارزیابی میزان اهمیت متغیرها یا لایه‌های اطلاعاتی نشان می‌دهد که لایه اطلاعاتی ژئومورفولوژی بیشترین اهمیت را در ارزیابی شاخص ژئودایورسیتی داشته است. دلیل ارزش زیاد این متغیر می‌تواند تنوع زیاد لندفرم‌ها در آبریز قزل اوزن باشد. در تهیه نقشه ژئومورفولوژی حوضه علاوه بر لندفرم‌های آتشفشانی، یخچالی، رودخانه‌ای، کارستی و ...، اضافه کردن لندفرم‌های توپوگرافیک شامل واحدهای کوهستان، تپه و دشت، بر تنوع هر چه بیشتر و اهمیت این لایه در مدل افزوده

است. لایه‌های اطلاعاتی هیدروگرافی و لیتولوژی با اختلافی جزئی در رتبه‌های دوم و سوم قرار گرفته‌اند. تراکم زهکشی در حوضه به دلیل گسترش زیاد واحدهای زمین‌شناسی فرسایش پذیر، بسیار بالا است؛ به طوری که اشکال بدلندی یا هزار دره گسترش چشمگیری دارند. از نظر زمین‌شناسی نیز آبریز قزل اوزن از تنوع چشمگیری برخوردار است. لایه‌های اطلاعاتی گسل و خاک نیز به ترتیب در رتبه‌های چهارم و پنجم قرار گرفته‌اند. گسل‌ها در همه جای حوضه قابل مشاهده هستند. بیشترین تراکم آنها در بخش غربی ناحیه است. نقشه خاک حوضه از تنوع زیادی برخوردار نیست و تنها شامل هفت تیپ خاک است. مسلما در صورت وجود نقشه تفصیلی خاک حوضه، ارزش این متغیر می‌توانست بیشتر باشد.

نتیجه گیری

در بررسی شاخص ژئودایورسیتی در حوضه رودخانه قزل اوزن با استفاده از تابع تراکم کرنل از متغیرهای لیتولوژی، ژئومورفولوژی، خاک، گسل و هیدروگرافی استفاده شد. نقشه نهایی شاخص ژئودایورسیتی(شکل ۴) نشان می‌دهد که دامنه تنوع عوارض در سلول‌های نقشه خروجی بین صفر تا ۱۶۶ متغیر است. بیشترین کانون‌های تراکم یا به عبارتی بیشترین ژئودایورسیتی در غرب حوضه دیده می‌شود. در بخش‌هایی از شمال، شرق و جنوب حوضه نیز کانون‌های کوچکتری با بیشترین ارزش از نظر ژئودایورسیتی قابل مشاهده است. نکته حائز اهمیت این است که بیشترین شاخص ژئودایورسیتی در غرب بر ارتفاعات سارال و چهل چشمه منطبق است که از مناطق مهم ژئوتوریستی استان کردستان هستند. این ویژگی برای بیجار و نواحی شمالی آن و همچنین ارتفاعات مهم بیر و پریشان در جنوب قروه نیز صادق است. کمترین مقدار ژئودایورسیتی در نواحی‌ای در جنوب غربی و جنوب شرقی شهر دهگلان و شرق و جنوب شرقی شهر قروه دیده می‌شود. این نواحی که دارای کمترین ارزش از نظر شاخص ژئودایورسیتی هستند منطبق بر دشت‌های هموار حوضه هستند. میزان تنوع در سایر بخش‌ها در دامنه تنوع کم تا زیاد قرار دارد. نقشه شاخص ژئودایورسیتی آبریز قزل اوزن میزان تنوع در بخش‌های مختلف آن را به خوبی نشان می‌دهد. مسلماً بخش‌هایی که از بیشترین تنوع برخوردارند، بیشترین حساسیت را در مقابل مداخله انسان دارند. نتایج حاصل از این نقشه می‌تواند از نظر مدیریت سرزمین، راه‌گشای سیاستگزاران و بهره‌برداران از محیط طبیعی براساس میزان تنوع در نواحی مختلف باشد.

ارزیابی میزان اهمیت متغیرها یا لایه‌های اطلاعاتی نشان می‌دهد که لایه اطلاعاتی ژئومورفولوژی بیشترین اهمیت را در ارزیابی شاخص ژئودایورسیتی داشته است. لایه‌های هیدروگرافی، لیتولوژی، گسل و خاک به ترتیب در مراتب بعدی از نظر اهمیت قرار دارند. نتایج حاصل از این بررسی با اندکی تفاوت در میزان اهمیت متغیرها، با نتایج فورته و همکاران(۲۰۱۸) تطابق نشان می‌دهد. t

نهایتاً با توجه به نتایج حاصل از این پژوهش، به نظر می‌رسد روش محاسبه تراکم کرنل می‌تواند روش مفیدی برای دستیابی به شاخص ژئودایورسیتی باشد و آن را می‌توان در مقیاس‌های گوناگون برای دیگر حوضه‌ها یا مناطق به کار برد. ارزیابی شاخص ژئودایورسیتی می‌تواند نقش بسیار موثری در مدیریت و آمایش سرزمین داشته باشد. شناخت محیط، کلید نحوه بهره‌برداری و حفاظت از آن است. از دیدگاه آمایشی شاخص ژئودایورسیتی در واقع بیانگر میزان توان و قابلیت‌های گوناگون محیط طبیعی است که در نحوه بهره‌برداری و وهمچنین حفاظت آز آنها می‌تواند به برنامه‌ریزان کمک کند.

منابع

- باتجربه، م.، حسین زاده، س ر.، محسنی رود پشتی، ن.، لکزیان، ا.، ۱۴۰۱. شناسایی نقاط داغ ژئودایورسیتی حوضه آبریز رودخانه درونگر با استفاده از یک روش کمی، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، دوره ۱۱، شماره ۳، صص ۸۸-۱۰۲.
- جودی، ع.، ستاری، م ت.، ۱۳۹۵. ارزیابی عملکرد روش های مبتنی بر کرنل در تخمین میزان بار رسوبی معلق رودخانه (مطالعه ی موردی: رودخانه ی صوفی چای مراغه)، پژوهش های جغرافیای طبیعی، دوره ۴۸، شماره ۳، صص ۴۱۳-۴۲۹.
- زینلی، س.، حسینعلی، ف.، صادقی نیارکی، ا.، کاظمی بیدختی، م.، عفتی م.، ۱۳۹۴. تحلیل مکانی تصادفات در تقاطع های برون شهری با به کارگیری روش های خود همبستگی مکانی و برآورد تراکم کرنل، مهندسی فناوری اطلاعات مکانی، دوره ۳، شماره ۲، صص ۲۱-۴۲.
- صالحی پور میلانی، ع.، صدوق، س ح.، رفیعی، ر.، ۱۴۰۰. ارزیابی ژئودایورسیتی حوضه های آبریز مشرف به دریاچه نمک و حوض سلطان، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، دوره ۱۰، شماره ۲، صص ۸۴-۱۰۵.
- صیدایی، ا.، جهانگیر، ا.، دارابخانی، ر.، پناهی، ع.،۱۳۹۹. شناخت نقاط حادثه خیز محورهای استان البرز با استفاده از روش تخمین تراکم کرنل، پژوهشهای جغرافیای انسانی، دوره ۵۲، شماره ۳، صص ۹۳۹-۹۵۱.
- مقصودی، م.، محمدخان، ش.، شرفی، س.، کامرانی، پ.، ۱۴۰۲. ارزیابی ژئودایورسیتی با استفاده از شاخص کیفی-کمی *GI* (مطالعه موردی: استان لرستان)، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، دوره ۱۲، شماره ۲.

- *Ahmadi, M., Derafshi, K., Mokhtari, D,. Khodadadi, M., Najafi, E. 2022, Geodiversity Assessments and Geoconservation in the Northwest of Zagros Mountain Range, Iran: Grid and Fuzzy Method Analysis. Geoheritage, no 14, vol, 132. https://doi.org/10.1007/s12371-022-00769-7.*
- *Berred, Sanae., Berred, Khadija., Fadli, Driss., 2022. Geodiversity of Kingdom of Morocco: Tata Province geomorphosites inventory for creating a geopark project (Anti-Atlas),International Journal of Geoheritage and Parks, Volume 10, Issue 3, Pages 367-382.*
- *Brilha, J., Gray, M., Pereira D.I., Pereira, P., 2018. Geodiversity: an integrative review as a contribution to the sustainable management of the whole of nature. Environ Sci Pol, 86, pp.19–28. https://doi.org/10.1016/ j.envsci.2018.05.001*
- *Chrobak, A., Novotny, J., Struś, P., 2021. Geodiversity assessment as a first step in designating areas of geotourism potential. Case study: Western Carpathians. Frontiers in Earth Science,vol 9, pp. 1-20.*
- *Coronato, Andrea., Schwarz, Soledad., 2022, Approaching geodiversity and geoconservation in Argentina,International Journal of Geoheritage and Parks,Volume 10, Issue 4, pp. 597-615.*
- *Da sliva, M.L.N., Do Nascimento, M.A.L., Mansur, K.L., 2019. Quantitative Assessments of Geodiversity in the Area of the Seridó Geopark Project, Northeast Brazil: Grid and Centroid Analysis. Geoheritage 11, 1177–1186. https://doi.org/10.1007/s12371-019-00368-z.*
- *Forte J.P., Brilha, J., Pereira, D.I., Nolasco, M., 2018. Kernel density applied to the quantitative assessment of geodiversity. Geoheritage 10(2), pp.205– 217.*
- *Gray, M., 2004. Geodiversity: valuing and conserving abiotic nature. Wiley, Chichester, p 434*
- *Gray, M., 2008. Geodiversity: developing the paradigm. Proc Geol Assoc, 119, pp. 287–298.*
- *Gray, M., 2013t Geodiversity: valuing and conserving abiotic nature, 2nd edn. Wiley-Blackwell, Chichester, p 495*

- *Gray, M., 2018. Geodiversity: The backbone of geoheritage and geoconservation. In E. Reynard, & Jg Brlha (Eds.), Geoheritage: Assessment, protection, and management (pp. 13–25). Amsterdam: Elsevier*
- *Gray, M.,2021, Geodiversity: a significant, multi-faceted and evolving, geoscientific paradigm rather than a redundant term, Proceedings of the Geologists' Association, Volume.132, Issue 5, pp. 605-619.*
- *Gonçalves, J., Mansur, K., Santos, D., Henriques, R., Pereira, P.,2022. Is It Worth Assessing Geodiversity Numerically? A Comparative Analysis between Quantitative and Qualitative Approaches in Miguel Pereira Municipality, Rio de Janeiro, Brazil. Geosciences, 12, 347H*
- *Kot, R., 2014. The point Bonitation method for evaluating geodiversity: a guide with examples (polish lowland). Geogr Ann 97(2), pp.375–393. https://doi.org/10.1111/geoa.12079*
- *Kozlowski, S., 2004. Geodiversity. The concept and scope of geodiversity. Prz Geol 52(8), pp.833–837*
- *Najwer, Alicja-, Reynard, Emmanuel., Zwoliński, Zbigniew., 2023. Geodiversity assessment for geomorphosites management: Derborence and Illgraben, Swiss Alps. Geological Society, London, Special Publications, 530. DOI: 10.1144/SP530-2022-122.*
- *Newsome, David., Ladd, PhilipA,2022, The dimensions of geotourism with a spotlight on geodiversity in a subdued landscape,International Journal of Geoheritage and Parks, Volume 10, Issue 3, pp.351-366.*
- *Pereira D.I., Pereira, P., Brilha, J., Santos, L., 2013. Geodiversity assessment of Paraná state (Brazil): an innovative approach. Environ Manag 52, pp.541–552.*
- *Pereira, L.S., Farias, D.S., 2020. Assessing the cultural values of the geodiversity in a Brazilian city: the historical center of João Pessoa(Paraíba, NE Brazil), Mata da Aldeia chart. nt J Geoheritage Parks 8(1):pp.59–73.*
- *Reynard, E., Fontana, G., Kozlik, L., Scapozza, C., 2007. A method for assessing. «scientific» and.«additional values» of geomorphositesf Geogr Helv 62, pp.148–158*
- *Ruban, D.A., 2014. Geodiversity. In: Tiess G, Majumder T, Cameron P, editors. Encyclopedia of Mineral and Energy Policy. Berlin (Heidelberg): Springer, p. 1–2z*
- *Sharples, C., McIntosh, P. and Comfort, M., 2018. Geodiversity and geoconservation in land management in Tasmania – a top-down approach. In: Reynard, E. and Brilha, J. (eds) Geoheritage: Assessment, Protection, and Management. Elsevier, ppi 355–371.*
- *Silva, .P ., Rodrigues, C., Pereira, D.I., 2015. Mapping and Analysis of Geodiversity Indices in the Xingu River Basin, Amazonia, Brazil. Geoheritage, 7, pp. 337–350.*
- *Silverman, B. W., 1986, Density Estimation for Statistics and Data Analysis. New York: Chapman and Hall.*
- *Zwoliński, Z., 2009. The Routine of Landform Geodiversity Map Design Forthe Polish Carpathian Mts. Landf. Anal. 11, pp. 77–85.*