

ارزیابی حساسیت ژئودایورسیتی در حوضه آبریز بابلرود، استان مازندران

رضا اسماعیلی* - دانشیار ژئومورفولوژی، گروه جغرافیا، دانشکده علوم انسانی و اجتماعی، دانشگاه مازندران.
پرستو خوشخو - کارشناسی ارشد ژئومورفولوژی، گروه جغرافیا، دانشکده علوم انسانی و اجتماعی، دانشگاه مازندران.

پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۳/۱۴ تأیید نهایی: ۱۴۰۲/۰۹/۲۱

چکیده

ژئودایورسیتی (تنوع زمینی) گوناگونی محیط غیرزنده زمین است که پایه اغلب فعالیت‌های انسانی و حیات اکوسیستم محسوب می‌شود. گسترش فعالیت‌های انسانی و تخریب این محیط بی‌جان مهم‌ترین عوامل تهدیدکننده ژئوسیتیم و اکوسیستم محسوب می‌شود. هدف این تحقیق ارزیابی کمی ژئودایورسیتی و تعیین حساسیت‌پذیری آن بوده است که به صورت نمونه در حوضه آبریز بابلرود در استان مازندران مورد مطالعه قرار گرفته است. برای ارزیابی کمی ژئودایورسیتی از چهار شاخص اصلی زمین‌شناسی، ژئومورفولوژی، خاک‌شناسی و هیدروگرافی استفاده شد و تعداد عناصر در شبکه‌های مربعی $1/5 * 1/5$ کیلومتری شمارش شدند. سپس شاخص تهدید با استفاده از نقشه کاربری اراضی و روش هم‌روبی طبقه‌بندی شد. با ترکیب این دو عامل نقشه نهایی حساسیت ژئودایورسیتی حاصل شد. ۲۳ درصد از مساحت حوضه در طبقات تنوع زمینی بسیار زیاد و زیاد قرار گرفته‌اند. نیمه جنوبی حوضه خصوصاً جنوب شرقی حوضه بیشترین تنوع زمینی را دارد. از میان شاخص‌ها در نقشه ژئودایورسیتی، شاخص ژئومورفولوژی با مقدار میانگین $44/5$ درصد بیشترین تأثیر را نسبت به سایر شاخص‌ها دارا بوده است. در نقشه حساسیت ژئودایورسیتی، قسمت‌های جنوبی و شرقی حوضه با تنوع زمینی بالا و به ترتیب با کاربری‌های مرتع و دریاچه سد البرز در طبقه بیشترین حساسیت قرار گرفته‌اند. تلفیق دو نقشه ژئودایورسیتی و شاخص تهدید می‌تواند اطلاعات بسیار مفیدی را به صورت یکپارچه فراهم نماید تا برای مدیریت سرزمینی، برنامه‌ریزی و حفاظت مورد استفاده قرار گیرد.

واژگان کلیدی: ژئودایورسیتی، شاخص هم‌روبی، مازندران، حوضه بابلرود.

مقدمه

ژئودایورسیتی به معنی تنوع زمینی، برای گوناگونی اجزاء غیرزنده محیطی سطح زمین به کار می‌رود. استفاده از این اصطلاح از سال ۱۹۹۳ اندکی پس از کنوانسیون تنوع زیستی ریودوژانیرو (۱۹۹۲) توسط دانشمندان علوم زمین (مانند شارپلز^۱ ۱۹۹۳). شروع شد. ژئودایورسیتی مشتمل بر تنوع عناصر زمین‌شناسی (کانی‌ها، سنگ‌ها و فسیل‌ها)، ژئومورفولوژی (لندفرم‌ها، توپوگرافی و فرایندهای فیزیکی)، خاک و عوارض هیدرولوژیکی است و علاوه بر گوناگونی مجموعه‌ها، ساختارها، سیستم‌ها و مشارکت آنها در چشم‌انداز را هم شامل می‌شود (گری^۲، ۲۰۱۳). ژئودایورسیتی بستر تنوع زیستی را فراهم می‌آورد و تأثیر مهمی در گسترش اکوسیستم‌ها از مقیاس‌های کوچک تا قاره‌ای دارد (جورت^۳ و همکاران، ۲۰۱۵). خدمات متعدد اکوسیستم به صورت مستقیم و غیرمستقیم به اجزاء غیرزنده زمین و تنوع آنها بستگی دارد. این خدمات در ۴ طبقه اصلی، شامل خدمات تولیدی، تنظیمی، فرهنگی و پشتیبانی قرار می‌گیرند (MEA^۴, 2005). اگرچه بخشی از این خدمات که صرفاً به منابع زمین‌شناسی و ژئومورفولوژی مرتبط می‌شوند به‌عنوان خدمات ژئوسیستم معرفی شده‌اند (وانری و وان بوکرینگ^۵، ۲۰۱۶). تنوع زمینی علاوه بر تأثیر بسیار زیادی که بر اکوسیستم دارند به صورت مستقل هم ارزشمند هستند (جانکوسکی^۶ و همکاران، ۲۰۲۰) و اهمیت زیادی برای فعالیت‌های ژئوتوریسم، حفاظت زمین، ایجاد ژئوپارک‌ها و میراث زمینی دارند (کوراتزا^۷ و همکاران، ۲۰۱۸).

با توجه به اهمیت و منافع تنوع زمینی، طی سال‌های اخیر مطالعات متعددی برای ارزیابی ژئودایورسیتی صورت گرفته است. (سرانو و روئیزفلانو^۸ ۲۰۰۷، بنتیو کالو^۹ و همکاران ۲۰۰۹، جورت و لوتو^{۱۰} ۲۰۱۰، پیرا^{۱۱} و همکاران ۲۰۱۳، سیلوا^{۱۲} و همکاران ۲۰۱۳، کت و لس‌نیاک^{۱۳} ۲۰۱۷، گونکالوز^{۱۴} و همکاران ۲۰۲۰، زاخاروفسکی و نمث^{۱۵} ۲۰۲۱، میسیک پونجیگر^{۱۶} و همکاران ۲۰۲۱، کاریون مرو^{۱۷} و همکاران ۲۰۲۲، مانوسو^{۱۸} و همکاران ۲۰۲۲، و ناجور^{۱۹} و همکاران ۲۰۲۲). این روشها شاخص‌های ژئودایورسیتی را به صورت کمی مورد ارزیابی قرار داده‌اند. در چند منطقه از ایران هم ژئودایورسیتی توسط تعدادی از محققین به صورت کمی ارزیابی شده است که می‌توان به کارهای انجام شده در حوضه‌های شمال غربی استان فارس (گلی مختاری و همکاران، ۱۳۹۷)، ژئوپارک پیشنهادی غرب خراسان (شایان یگانه و همکاران، ۱۳۹۹)، شمال استان ایلام (احمدی و همکاران، ۲۰۲۱)، حوضه‌های مشرف به دریاچه نمک و حوض سلطان (صالحی‌پور و همکاران، ۱۴۰۱)، بالادست سد کرج (قهرودی تالی و همکاران، ۱۴۰۱)، حوضه آبریز درونگر خراسان رضوی (باتجربه و همکاران، ۱۴۰۱)، حوضه نورآباد استان فارس (نصیری و همکاران، ۲۰۲۲) و شمال غرب کوه‌های زاگرس (احمدی و

1. Sharples
2. Gray
3. Hjort
4. Millennium Ecosystem Assessment
5. Van Ree & Van Beukering
6. Jankowski
7. Coratza
8. Serrano & Ruiz-Flaño
9. ee nttoaaa vo
10. Hjort & Luoto
11. Pereira
12. Silva
13. Kot & Lennkkk
14. Gonçalves
15. Zakharovskiy & Németh
16. MécććPoniiger
17. Carrión-Mero
18. Manosso
19. Najwer

همکاران، ۲۰۲۲) ۱ اشاره کرد. برخی از این تحقیقات انجام شده در خصوص تنوع ژئومورفولوژیکی (ژئومورفودایورسیتی) است که می‌توان به کارهای باتجربه و همکاران (۱۳۹۶) در شهرستان مشهد، مقصودی و همکاران (۱۳۹۸) برای قله دماوند و مختاری و همکاران (۱۴۰۱) در کوهستان میشو در شمال غرب ایران، اشاره کرد.

گسترش انواع فعالیت‌های انسانی در سطح زمین به‌عنوان تهدیدی برای تنوع زمینی و زیستی محسوب می‌شود. با تخریب و کاهش ژئودایورسیتی، در واقع بخش غیرزنده اکوسیستم که پایه تنوع زیستی است دچار تخریب و نابودی می‌شود. مهم‌ترین تهدیدات انسانی برای ژئودایورسیتی عبارتند از گسترش مناطق شهری، نفوذناپذیر شدن خاک‌ها، تخریب زمین (بیابان‌زایی، جنگل‌زدایی، کشت متمرکز و غیره)، فشار ناشی از گردشگری، معدن‌کاری، احداث سد و مدیریت و مهندسی رودخانه که می‌تواند اثرات منفی ملموس یا غیرملموس بر ژئودایورسیتی داشته باشد.

همان‌طور که در بالا اشاره شد، اغلب تحقیقات انجام شده بر ارزیابی ژئودایورسیتی متمرکز شده و اثرات تخریب و تهدیدات انسانی در آنها مورد توجه قرار نگرفته است؛ لذا تحقیقات بسیار کمی از ارزیابی اثرات انسانی بر ژئودایورسیتی در سطح جهان انجام شده است که می‌توان به کارهای زیر اشاره کرد. فرر-والرو^۱ و همکاران (۲۰۱۷) اثرات ناشی از توسعه شهری و گردشگری را بر ژئودایورسیتی لندفرم‌های ساحلی در جزایر فناری به صورت کمی ارزیابی کردند. نتایج کار آنها نشان داد که فعالیت‌های انسانی به میزان ۳۲ درصد موجب کاهش تنوع زمینی شده است. سانتوس^۲ و همکاران (۲۰۱۷) با استفاده از تفهیر عکس‌های هوایی و تهیه نقشه گسترش شهر، اثرات رشد شهر را بر ژئودایورسیتی در ریودوژانیرو (برزیل) به صورت کمی بررسی کردند. بتارد و پالواست^۳ (۲۰۱۹) شاخص‌های ژئودایورسیتی را با شاخص‌های تهدیدات انسانی (بیابان‌زایی و کاربری اراضی) به صورت یکپارچه در برزیل مورد ارزیابی قرار دادند و با ترکیب شاخص‌های ژئودایورسیتی و شاخص‌های تهدید کننده، نقشه حساسیت ژئودایورسیتی را تهیه نمودند. بر این اساس، مناطق دارای ژئودایورسیتی بسیار زیاد که مورد تهدید فعالیت‌های انسانی قرار گرفته است به‌عنوان نقطه داغ^۴ ژئودایورسیتی معرفی شدند.

دامنه‌های شمالی کوه‌های البرز از مناطق با تنوع زمینی بالا بوده و فعالیت‌های گسترده انسانی در بخش‌های مختلف اقتصادی و گردشگری، موجب تغییرات زیاد کاربری اراضی شده است. از این‌رو، این تحقیق باهدف ارزیابی کمی ژئودایورسیتی و تلفیق آن با شاخص فعالیت‌های انسانی، جهت تعیین حساسیت ژئودایورسیتی در حوضه آبریز بابلرود انجام شده است.

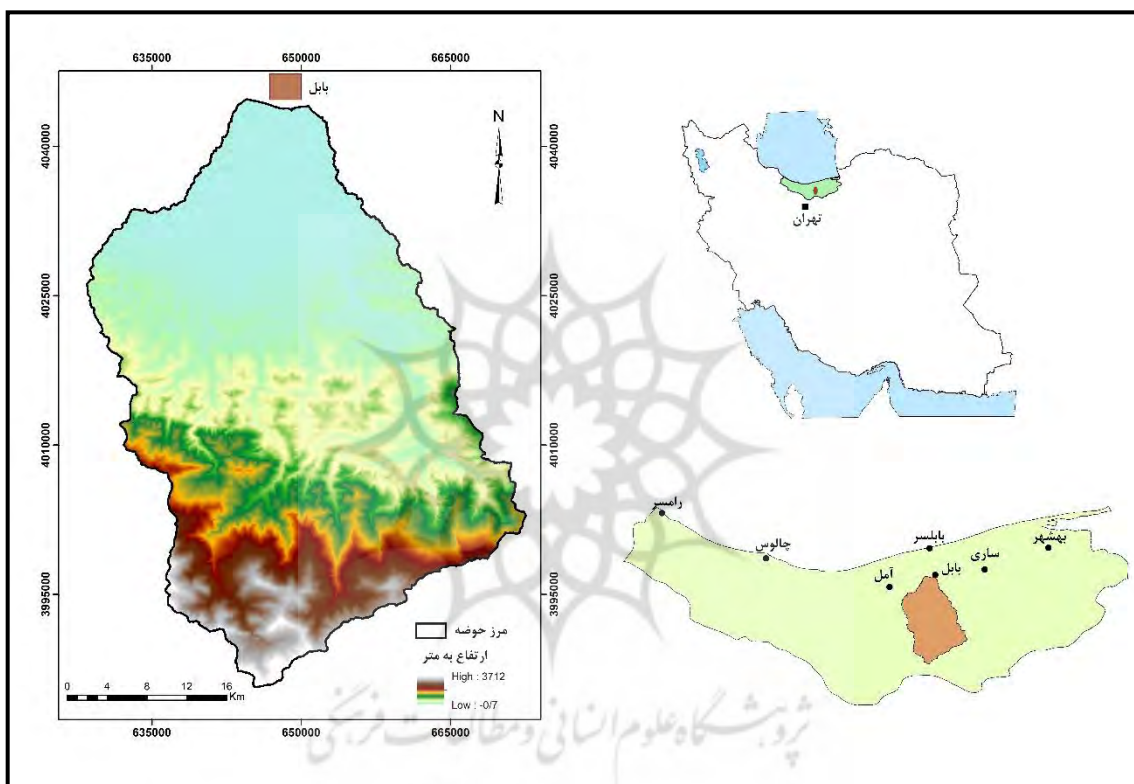
منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز بابلرود با مساحت ۱۴۹۳ کیلومتر مربع در استان مازندران و جنوب شهر بابل واقع شده است (شکل ۱). منطقه مورد مطالعه در عرض‌های جغرافیایی 36° تا 33° شمالی و طول‌های جغرافیایی $52^{\circ} 25'$ تا $52^{\circ} 55'$ شرقی قرار دارد. بر اساس تقسیمات زمین‌شناسی نوی (۱۳۵۵)، ۸۰ درصد مساحت حوضه در زون البرز و ۲۰ درصد آن در زون گرگان - رشت قرار گرفته است. سنگ‌شناسی حوضه شامل سازندهای دوران پالئوژوئیک تا کواترنر می‌شود. سازند شمشک (شیل، ماسه سنگ و لایه زغالی) و رسوبات کواترنری (عمدتاً نهشته‌های آبرفتی) در مجموع ۵۱ درصد مساحت حوضه را دربر گرفته‌اند.

حداکثر و حداقل ارتفاع این حوضه به ترتیب ۳۷۱۲ و ۰ متر از سطح دریای آزاد و میانگین ارتفاع حوضه ۷۶۷ متر است. واحدهای ناهمواری حوضه در سه کلاس دشت (تا ۲۰۰ متر)، تپه (۲۰۰-۵۰۰ متر) و کوهستان (بیش از ۵۰۰) قابل تفکیک

1. Ferrer-Valero
2. Santos
3. Bétard & Peulvast
4. Hotspot

است. بر اساس داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی و باران‌سنجی حوضه و اطراف آن، میانگین بارش سالانه حوضه ۷۹۰ میلیمتر و میانگین دمای سالانه حوضه ۱۳/۳ درجه سلسیوس محاسبه شده است. میانگین دبی سالانه رودخانه بابلرود در ایستگاه هیدرومتری کشتارگاه، ۱۶ مترمکعب در ثانیه اندازه‌گیری شده است. مناطق جنگلی با ۵۸/۶ درصد از مساحت، پوشش غالب حوضه محسوب می‌شوند و بعد از آن کاربری زمین‌های کشاورزی و اراضی مرتعی به ترتیب با ۲۳/۶ و ۱۵ درصد از مساحت قرار دارند.



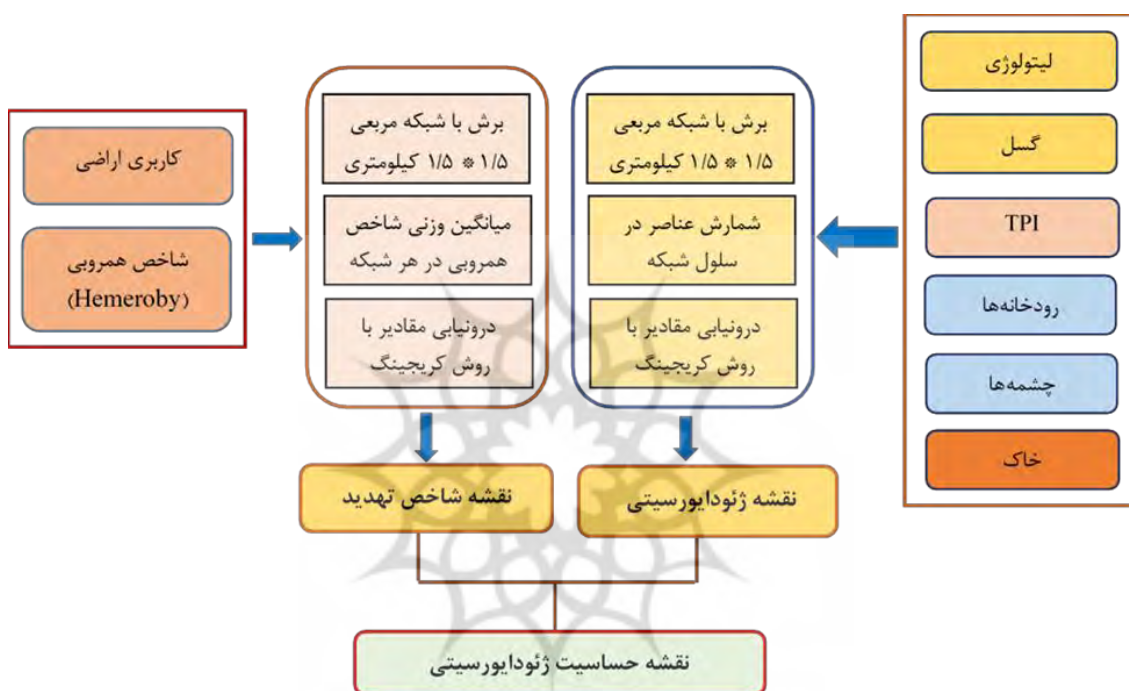
شکل ۱: نقشه موقعیت حوضه آبریز بابلرود در ایران و استان مازندران

روش تحقیق

در این تحقیق ارزیابی حساسیت ژئودایورسیتی در سه مرحله اصلی به شرح زیر انجام شد (شکل ۲):
 مرحله اول: در این مرحله با استفاده از چهار شاخص اصلی زمین‌شناسی، ژئومورفولوژی، هیدروگرافی و خاک، ژئودایورسیتی حوضه مورد ارزیابی قرار گرفت. برای انجام این کار ابتدا یک شبکه مربعی با ابعاد هر مربع $1/5 * 1/5$ کیلومتر و در مجموع تعداد ۷۹۲ مربع متناسب با ابعاد حوضه تهیه شد. سپس لایه‌های اطلاعاتی مختلف، هر کدام به صورت جداگانه با این شبکه‌ها برش داده شدند و تعداد عناصر متفاوت هر لایه در هر شبکه در نرم‌افزار QGIS شمارش شد (شکل ۳).

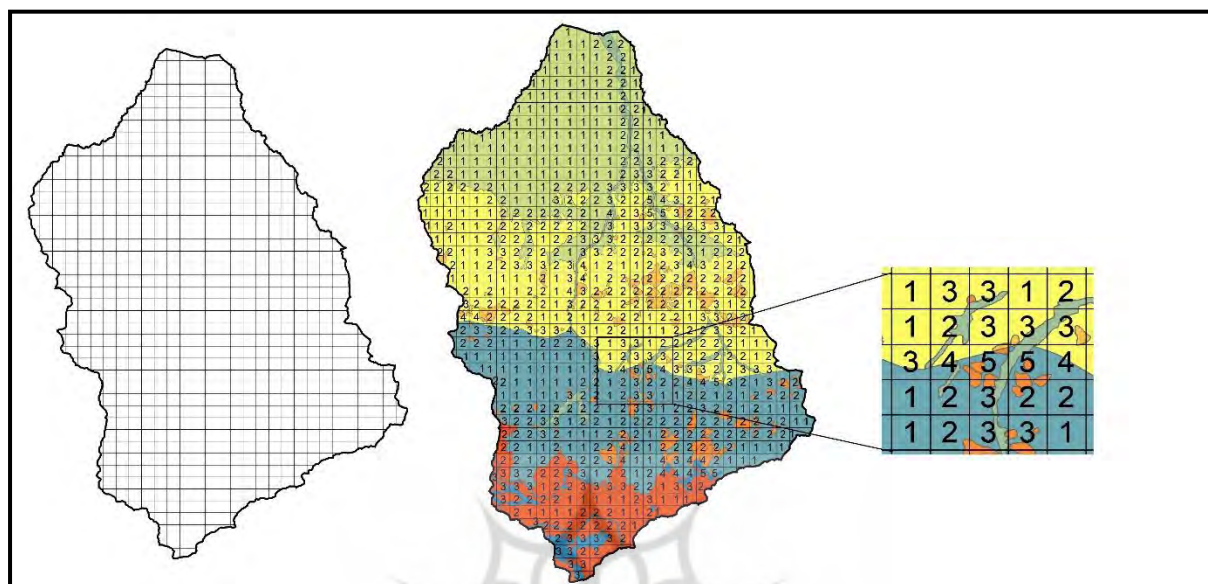
برای شاخص زمین‌شناسی از دو زیرشاخص لیتولوژی و گسل استفاده شد این داده‌ها از نقشه‌های زمین‌شناسی قائمشهر و بابل با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ که توسط سازمان زمین‌شناسی کشور تهیه شده است استخراج گردید.

در شاخص ژئومورفولوژیکی، لندفرم‌ها با شاخص موقعیت توپوگرافی^۱ (TPI) و با استفاده از مدل ارتفاعی رقومی (DEM) با قدرت تفکیک ۲۸ متر SRTM در نرم‌افزار SAGA محاسبه شدند. شاخص TPI توسط گوینسن^۲ و همکاران (۱۹۹۹) مطرح گردید. در این شاخص اختلاف ارتفاع نقطه مرکزی با میانگین ارتفاع اطراف در یک شعاع مشخص محاسبه می‌شود (گالانت و ویلسون^۳ ۲۰۰۰، ویس^۴ ۲۰۰۱، درو^۵ و همکاران ۲۰۱۳). این شاخص ابزار مفیدی برای طبقه‌بندی لندفرم‌ها محسوب می‌شود (ویس ۲۰۰۱، درو و همکاران ۲۰۱۳، مکرم و همکاران ۲۰۱۵). بر اساس این روش لندفرم‌ها به ۱۰ کلاس شامل یال‌های مرتفع، یال‌های محلی، آبراهه روی دامنه، برجستگی‌های روی دامنه، دامنه‌های باز، دشت،



شکل ۲: مراحل ارزیابی حساسیت ژئودایورسیتی در تحقیق حاضر

1. Topographic position index
2. Guisan
3. Gallant
4. Weiss
5. De Reu



شکل ۳: ایجاد شبکه‌های مربعی و شمارش عوارض در هر شبکه برای شاخص‌های مختلف ژئودایورسیتی

رودها، آبراهه‌های بالای دامنه، دامنه‌های بالایی و دره‌ها طبقه‌بندی می‌شوند. در روش فوق، وجود کلاس‌های مختلف در هر شبکه مربعی به‌عنوان شاخص در نظر گرفته شد.

در شاخص هیدروگرافی از دو زیرشاخص رودخانه‌ها و چشمه‌ها استفاده شد. شبکه رودخانه‌ها بر اساس روش رتبه‌بندی شبکه زهکشی استرال (۱۹۵۷) انجام شد و متناظر هر رتبه رود به آنها امتیاز داده شد. به این ترتیب به بالاترین رتبه در حوضه که رتبه ۶ داشت امتیاز شش و به شبکه‌های فاقد رود امتیاز صفر داده شد. زیرشاخص چشمه، بر اساس داده‌های وزارت جهاد کشاورزی (۱۳۹۲) به سه گروه طبقه‌بندی شدند.

نقشه خاک‌های منطقه بر اساس روش آمریکایی تاکسونومی خاک^۱ که در مطالعات منابع طبیعی و آبخیزداری حوضه بابل با مقیاس ۱:۵۰۰۰۰ تهیه شده است، مورد استفاده قرار گرفت (وزارت جهاد کشاورزی، ۱۳۹۲). بر اساس این طبقه‌بندی، انواع خاک‌های موجود در هر شبکه شمارش شدند.

بعد از انجام مراحل فوق، جمع مقادیر شش لایه مذکور محاسبه شد و لایه پلیگونی به لایه نقطه‌ای تبدیل شدند. این نقاط در مرکز هر شبکه قرار گرفتند با استفاده از روش کریجینگ معمولی درون‌یابی شدند و نقشه ژئودایورسیتی حوضه حاصل شد.

مرحله دوم: برای بررسی میزان دخالت و تخریب انسان در چشم‌انداز، نقشه کاربری اراضی حوضه که توسط وزارت جهاد کشاورزی (۱۳۹۲) در مقیاس ۱:۵۰۰۰۰ تهیه شد استفاده گردید. این نقشه به شاخص همروبی^۲ تبدیل شد و به‌عنوان یک لایه مورد استفاده قرار گرفت.

اصطلاح همروبی، اولین بار توسط جالاس^۱ (۱۹۵۵) گیاه‌شناس معرفی شد؛ ولی بعداً این مفهوم برای کل اکوسیستم اعمال شد (والز و استین^۲، ۲۰۱۴). براین اساس، همروبی به مفهوم اندازه‌گیری تأثیر مداخلات انسانی بر اکوسیستم‌ها است. این شاخص بر اساس مقدار مداخلات انسان در کاربری اراضی به هفت کلاس طبقه‌بندی می‌شود (جدول ۱). کلاس‌های یک تا هفت، به ترتیب حالت کاملاً طبیعی تا تأثیر بسیار شدید انسانی را نشان می‌دهند. برای تهیه لایه شاخص همروبی، ابتدا شاخص همروبی وزن‌دار برای هر شبکه بر اساس رابطه زیر محاسبه شد (والز و استین ۲۰۱۴، توکیانن^۳ و همکاران ۲۰۱۷).

$$M = \sum_{h=1}^n f_n * h$$

M : شاخص همروبی، n : تعداد کلاس‌های همروبی، f_n : نسبت طبقه n ، h : کلاس همروبی است. رابطه فوق بر مساحت هر شبکه تقسیم شد تا میانگین وزنی هر شبکه بدست آید.

پس از محاسبه میانگین وزنی شاخص همروبی در هر شبکه، مقادیر شبکه به لایه نقطه‌ای تبدیل شد و با درون‌یابی کریجینگ معمولی نقشه شاخص همروبی حوضه تهیه شد.

مرحله سوم: پس از انجام مراحل یک و دو، دو لایه ژئودایورسیتی و لایه شاخص همروبی در هم ضرب شدند و نقشه حساسیت ژئودایورسیتی منطقه حاصل شد و در پنج کلاس حساسیت طبقه‌بندی شدند.

جدول ۱: کلاس‌های کاربری اراضی با طبقه‌بندی همروبی (والز و استین ۲۰۱۴)

درجه همروبی	درجه طبیعی بودن	نوع پوشش سطح زمین و کاربری اراضی
۱ Ahemerobic	اغلب بدون اثرات انسانی	صخره‌ها، یخچال‌ها و برف‌های دائمی
۲ Oligohemerobic	اثرات انسانی ضعیف	جنگل‌های پهن برگ، جنگل‌های سوزنی برگ، باتلاق‌های شور، منطقه جزرومدی، جنگل‌های مخلوط، لاگون‌های ساحلی، سواحل و تپه‌های ماسه‌ای، خورها، دریاها و اقیانوس‌ها، مرداب‌های داخلی، باتلاق‌ها
۳ Mesohemerobic	اثرات انسانی متوسط	جنگل‌های مخروطی (بالقوه غیرطبیعی)، جنگل‌های مخلوط (بالقوه غیر طبیعی)، محدوده انتقالی درختزارها و درختچه‌ها، مناطق با پوشش گیاهی تنک، علفزارهای طبیعی
۴ α -Euhemerobic	اثرات انسانی متوسط - زیاد	مناطق سبز شهری، مراتع، آبراهه‌ها، توده‌های آبی، زمین‌های اشغال شده به‌وسیله کشاورزی با گیاهان طبیعی
۵ β -Euhemerobic	اثرات انسانی زیاد	تسهیلات ورزشی و اوقات فراغت، زمین‌های زراعی غیرآبی، تاکستان، الگوهای کشاورزی مرکب، درختان میوه و باغ‌ها
۶ Polyhemerobic	اثرات انسانی بسیار زیاد	بافت شهری ناپیوسته، استخراج معادن، مکان‌های ساخته شده، سایت‌های زباله
۷ Metahemerobic	اثرات انسانی بیش از حد زیاد و تخریب بیوسنوز	بافت شهری پیوسته، بندر و فرودگاه‌ها، واحدهای تجاری و صنعتی، جاده‌ها و شبکه‌های راه‌آهن

1. Jalas

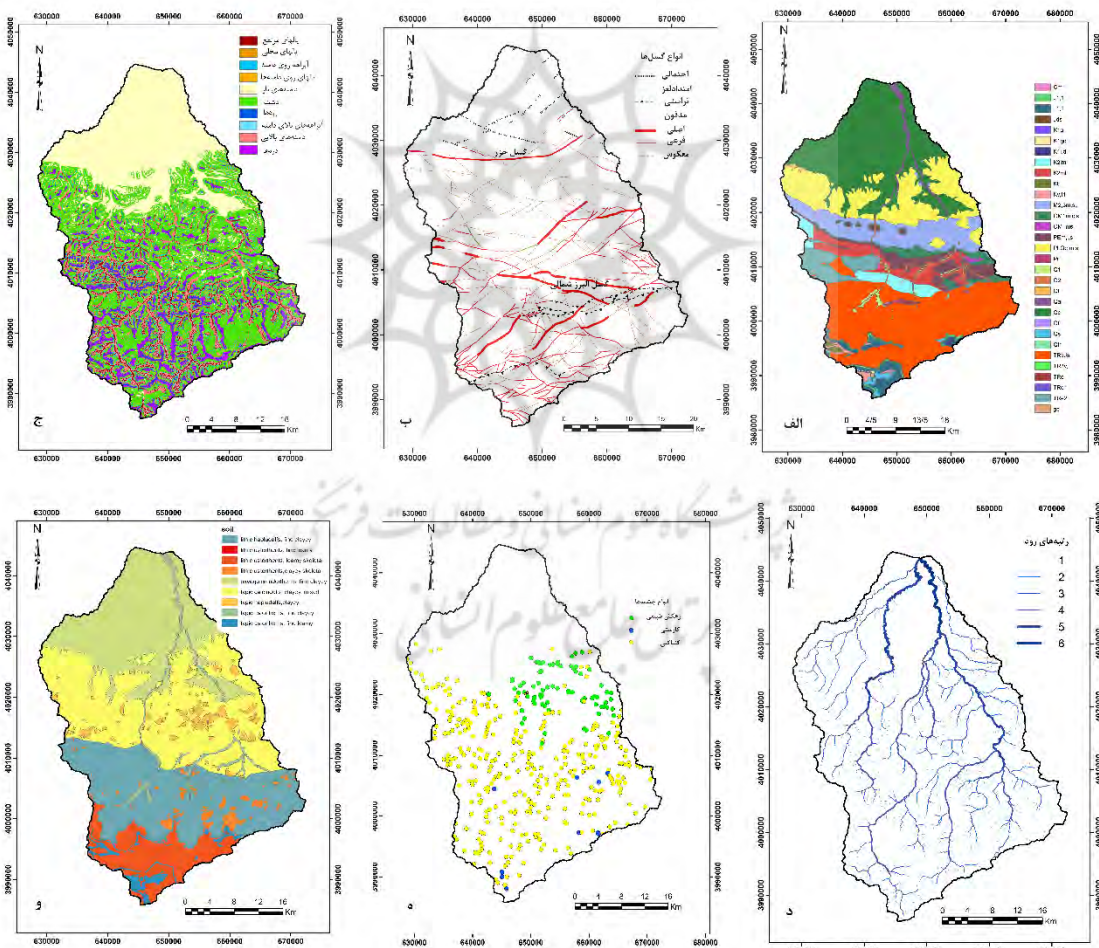
2. Walz & Stein

3. Tukiainen

بحث و یافته‌ها

برای ارزیابی ژئودایورسیتی حوضه مورد مطالعه شش لایه اطلاعاتی شامل لیتولوژی، گسل، شاخص موقعیت توپوگرافی (TPI)، شبکه زهکشی، انواع چشمه‌ها و انواع خاک مورد استفاده قرار گرفت (شکل ۴).

لیتولوژی: سنگ‌شناسی حوضه شامل انواع سنگ‌های کربناته (آهک و دولومیت) شیل و لایه‌های زغالی (سازند شمشک) و رسوبات کواترنری می‌شود این سنگ‌ها از نظر سن مربوط به دوره‌های پالئوزوئیک تا کواترنری می‌شوند. توالی انواع سنگ‌های مربوط به دوره‌های مختلف زمین‌شناسی موجب تنوع سنگ‌شناسی حوضه شده است. انواع سنگ‌ها در هر شبکه $1/5 \times 1/5$ کیلومترمربع از ۱ تا ۹ متغیر بوده که در پنج کلاس بسیار کم تا بسیار زیاد طبقه‌بندی شدند (شکل ۵ الف). طبقات زیاد و بسیار زیاد در قسمت‌هایی از شرق و جنوب غربی حوضه قرار گرفته‌اند. بیش از ۸۶ درصد حوضه دارای تنوع لیتولوژیکی بسیار کم و کم هستند.

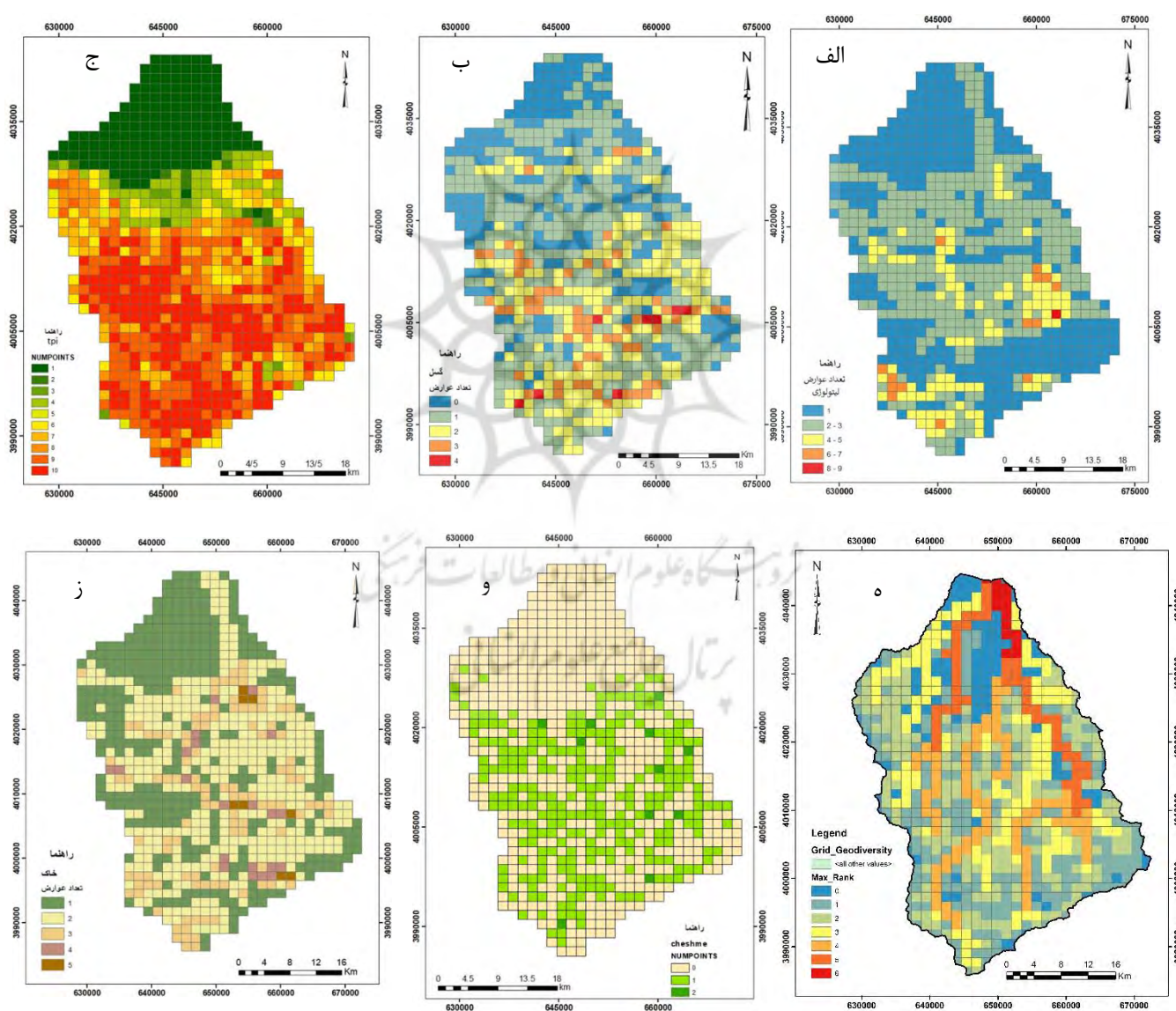


شکل ۴: لایه‌های اطلاعاتی حوضه آبریز بابلرود، الف) لیتولوژی، ب) گسل ج) TPI د) رتبه‌بندی رود، ه) چشمه‌ها، و) خاک

گسل‌ها: قرارگیری حوضه بابلرود در زون البرز که خاستگاه تکتونیکی پیچیده‌ای دارد موجب ایجاد انواع گسل‌ها شده است که انواع مختلف آنها در منطقه شامل گسل‌های اصلی (گسل‌های خزر و البرز شمالی)، گسل‌های فرعی، رورانده،

امتداد لغز، معکوس، پنهان و محتمل است. بر اساس وجود انواع گسل در هر شبکه، این لایه به پنج طبقه از ۰ (بدون گسل) تا ۴ در شبکه طبقه‌بندی شدند. مناطق شمالی حوضه در گروه کم و بسیار کم و مناطق جنوبی در طبقات بالای تنوع قرار گرفته‌اند (شکل ۵ ب).

شاخص موقعیت توپوگرافی (TPI): این شاخص طبقه‌بندی لندفرم‌ها را نشان می‌دهد. حوضه مورد مطالعه بخشی از کوه‌های البرز شمالی بوده و دامنه تغییرات ارتفاعی آن از ۰ تا ۳۷۱۲ متر متغیر است. بر این اساس نیمه جنوبی حوضه با ۷ تا ۱۰ لندفرم در هر شبکه در طبقات زیاد و بسیار زیاد تنوع لندفرم‌ها قرار گرفته و نیمه شمالی با ۱ تا ۴ لندفرم در هر شبکه در طبقات بسیار کم و کم، قرار گرفتند (شکل ۵ ج).



شکل ۵: فراوانی عوارض شاخص‌های مختلف در حوضه آبریز بابلرود، (الف) تنوع سنگ‌شناسی، (ب) تنوع گسل، (ج) شاخص لندفرم (TPI)، (د) حداکثر رتبه رود، (و) تنوع چشمه‌ها، (ز) تنوع خاک‌ها

شاخص هیدروگرافی: شاخص هیدروگرافی شامل دو زیرشاخص شبکه رود و چشمه‌ها است. بالاترین رتبه رود بر مبنای روش استرال در شبکه رودخانه‌های حوضه رتبه ۶ بوده است که در نزدیکی خروجی حوضه قرار گرفته است. مناطق بدون رود هم امتیاز صفر گرفته‌اند. امتیاز سایر رتبه‌ها در شکل ۵ (د) نشان داده شده است. چشمه‌های حوضه برحسب منشأ به سه دسته زهکش طبیعی، تماسی (کنتاکتی) و کارستی طبقه‌بندی شدند (جهاد کشاورزی، ۱۳۹۲) و تنوع این چشمه‌ها در هر شبکه مورد ارزیابی قرار گرفت. براین اساس به مناطق فاقد چشمه مقدار صفر داده شد و حداکثر مشاهده شده هم مقدار ۲ را کسب کردند (شکل ۵ ه).

تنوع خاک‌ها: خاک‌های موجود در حوضه در نه گروه قرار گرفتند؛ اما تنوع آنها در هر شبکه مربعی از ۱ تا ۵ متغیر بوده است. مناطق با تنوع زیاد خاک در بخش‌هایی از مرکز و جنوب حوضه و مناطق با حداقل تنوع در شمال حوضه و بخش‌های از غرب حوضه قرار گرفته‌اند (شکل ۵ ز).

ژئودایورسیتی حوضه

مقادیر نقشه ژئودایورسیتی حوضه از ۴ تا ۳۱ متغیر بوده است که بر اساس روش شکست طبیعی به ۵ گروه طبقه‌بندی شدند (جدول ۲ و شکل ۶). طبقات بسیار کم (۴-۱۱) و کم (۱۱-۱۶) در مجموع ۵۳ درصد از مساحت حوضه را شامل شده و عمدتاً در قسمت‌های شمالی حوضه قرار گرفته‌اند. طبقات زیاد (۱۸-۲۳) و بسیار زیاد (۲۳-۳۱) به ترتیب ۲۲/۳ و ۱ درصد از مساحت حوضه را شامل شده که بیشتر در قسمت‌های مرکزی و جنوب شرقی حوضه مشاهده می‌شوند (شکل ۶).

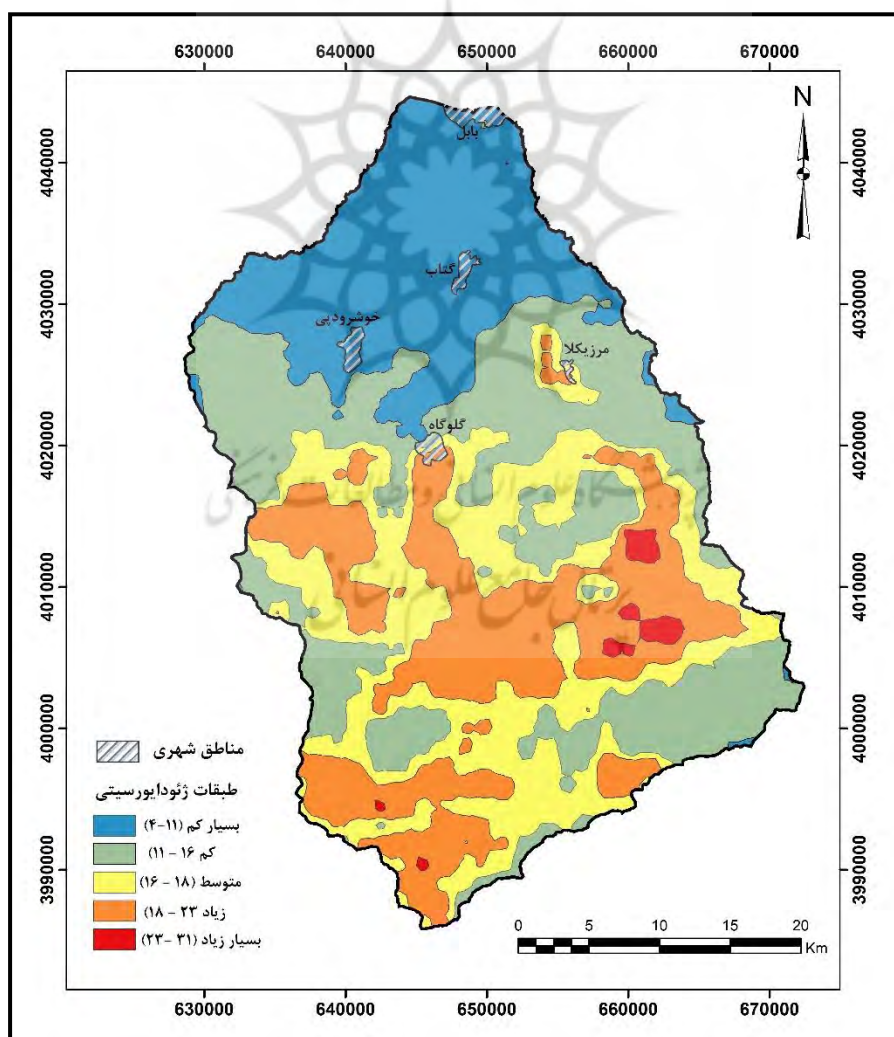
جدول ۲: طبقه‌بندی و مساحت ژئودایورسیتی در حوضه آبریز بابلرود

ردیف	طبقه	توصیف طبقه	مساحت (Km ²)	درصد مساحت
۱	۴-۱۳	خیلی کم	۳۳۸/۶۶	۲۲/۶۸
۲	۱۳-۱۶	کم	۴۵۱/۳	۳۰/۲۲
۳	۱۶-۱۸	متوسط	۳۵۵/۲۴	۲۳/۸
۴	۱۸-۲۲	زیاد	۳۳۲/۳	۲۲/۳
۵	۲۲-۳۱	خیلی زیاد	۱۴/۵	۱
مجموع			۱۴۹۳	۱۰۰

برای بررسی تأثیر هر شاخص در مقدار کل شاخص‌ها، مقدار هر شاخص بر مقدار کل ژئودایورسیتی تقسیم شد (جدول ۳). شاخص ژئومورفولوژی با میانگین ۴۴/۵ درصد بیشترین سهم را در نقشه نهایی ژئودایورسیتی دارد. شاخص‌های زمین‌شناسی، هیدرولوژی و خاک‌شناسی به ترتیب با مقادیر میانگین ۰/۲۳۳، ۰/۱۷۹ و ۰/۱۴۴ مقدار کل ژئودایورسیتی حوضه نقش داشته‌اند.

جدول ۳: مقادیر نسبی هر شاخص به مقدار کل ژئودایورسیتی

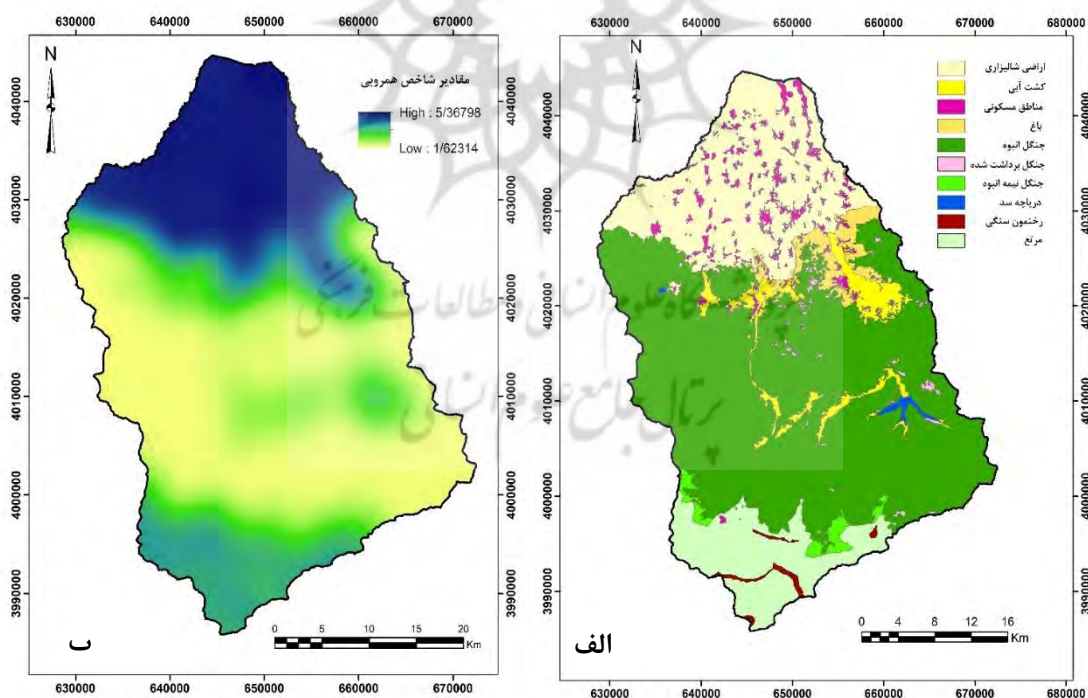
شاخص‌ها	حداقل	میانگین	حداکثر	انحراف معیار
زمین‌شناسی	۰/۰۶۳	۰/۲۳۳	۰/۶	۰/۰۹
ژئومورفولوژی	۰/۰۸۳	۰/۴۴۵	۰/۸۱۸	۰/۱۶
خاک‌شناسی	۰/۰۴۵	۰/۱۴۴	۰/۴	۰/۰۶۷
هیدرولوژی	۰	۰/۱۷۹	۰/۶۲۵	۰/۱۳۵



شکل ۶: نقشه ژئودایورسیتی حوضه آبریز بابلرود

شاخص همروبی: نقشه شاخص همروبی بر اساس نقشه کاربری اراضی حوضه (شکل ۷) تهیه گردید. مقادیر وزنی این شاخص از ۱/۶ (اثرات انسانی ضعیف) تا ۵/۳۶ (اثرات انسانی شدید) متغیر بوده است. قسمت‌های جلگه‌ای شمال حوضه که تحت تأثیر فعالیت‌های زیاد انسانی قرار دارند بیشترین امتیاز و مناطق مرکزی حوضه که تحت غلبه جنگل‌های انبوه قرار دارد حداقل امتیاز را کسب نموده‌اند. قسمت‌های جنوبی حوضه که تحت پوشش مراتع قرار دارند در حالت متوسط قرار گرفته‌اند.

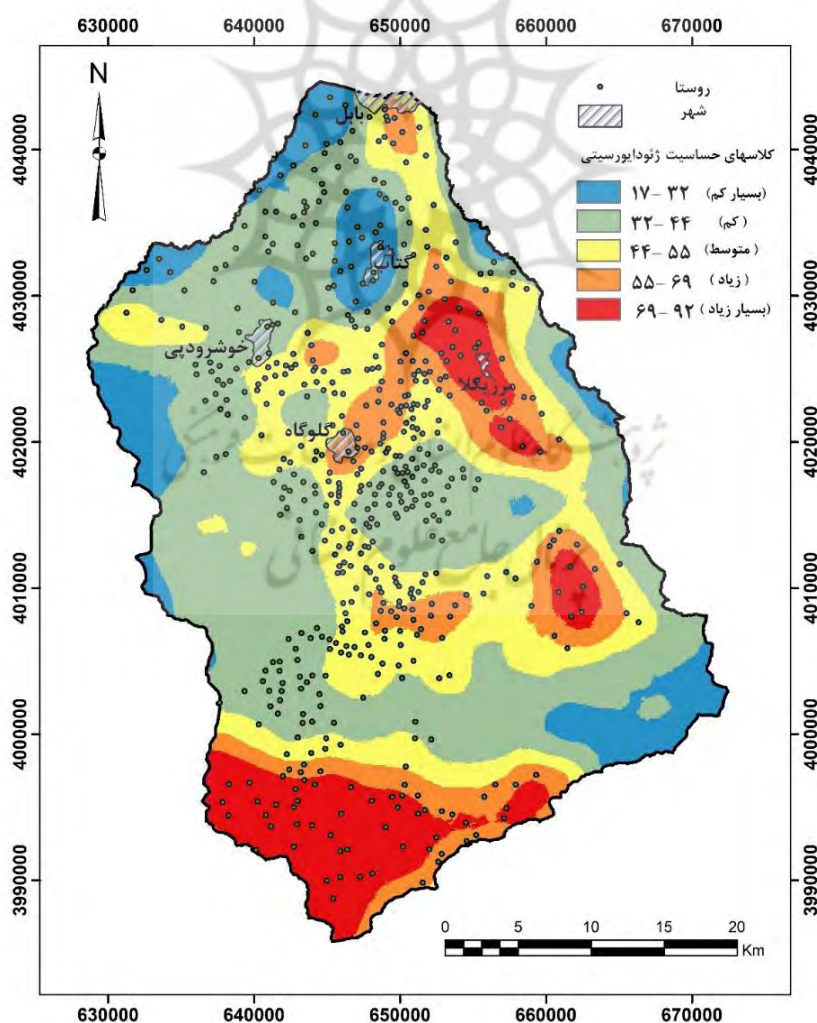
حساسیت ژئودایورسیتی: نقشه حساسیت ژئودایورسیتی از ضرب دولایه ژئودایورسیتی و شاخص همروبی حاصل گردید (شکل ۸). بر اساس این نقشه ۱۱/۳۲ و ۱۲/۲۵ درصد از مساحت حوضه به ترتیب در طبقات حساسیت بسیار زیاد (۶۹ - ۹۲) و زیاد (۵۵ - ۶۹) گرفتند (جدول ۴). بیشتر این مناطق در قسمت جنوب و شرق حوضه قرار گرفتند (شکل ۸). قسمت‌های جنوبی حوضه با کاربری مرتعی و قسمت‌های شرق حوضه در محل استقرار دریاچه سد البرز و پایین‌دست آن که کاربری زراعی دارد با داشتن ژئودایورسیتی بالا و دخالت‌های انسانی بیشترین حساسیت را دارند. مناطق جنگلی که دخالت انسانی زیاد بوده و پاک‌تراشی و تخریب صورت گرفته است در طبقه حساسیت متوسط و زیاد قرار گرفتند. طبقه حساسیت کم (۳۲ - ۴۴) با ۴۱/۵ درصد از مساحت حوضه بیشترین پراکنش را در سطح حوضه داشته است. این طبقه عمدتاً در قسمت‌های دشتی شمال حوضه و مناطق جنگلی با تراکم بالا و حداقل دخالت انسانی قرار گرفته است.



شکل ۷: الف) نقشه کاربری اراضی حوضه بابلرود، ب) نقشه میانگین وزنی شاخص همروبی

جدول ۴: طبقه‌بندی حساسیت ژئودایورسیتی در حوضه آبریز بابلرود

ردیف	طبقه	توصیف طبقه	مساحت (Km ²)	درصد مساحت
۱	۱۷ - ۳۲	خیلی کم	۱۷۳/۶	۱۱/۶۳
۲	۳۲ - ۴۴	کم	۶۱۹/۶	۴۱/۵
۳	۴۴ - ۵۵	متوسط	۳۴۷/۹	۲۳/۳
۴	۵۵ - ۶۹	زیاد	۱۸۲/۸	۱۲/۲۵
۵	۶۹ - ۹۲	خیلی زیاد	۱۶۹/۱	۱۱/۳۲
مجموع			۱۴۹۳	۱۰۰



شکل ۸: نقشه حساسیت ژئودایورسیتی حوضه آبریز بابلرود

یکی از مصادیق تخریب سرزمین، فرسایش خاک است که با فشارهای انسانی و تغییر کاربری اراضی به شدت در حال افزایش است. از این رو جهت تحلیل بیشتر نقشه حساسیت ژئودایورسیتی، ضریب همبستگی این نقشه با نقشه تیپ اشکال فرسایش خاک محاسبه گردید. این ضریب به صورت پیکسل به پیکسل در نرم‌افزار ARC GIS محاسبه شد و مقدار ۰/۸۱ به دست آمد که بیانگر ارتباط خوب بین این دو عامل است.

بتارد و پالواست (۲۰۱۹) شاخص تهدید سه عامل بیابان‌زایی، کاربری اراضی و مناطق حفاظتی را برای حساسیت ژئودایورسیتی مورد استفاده قرار دادند و هر کدام را در ۳ کلاس طبقه‌بندی کردند. در تحقیق حاضر، به علت عدم وجود مناطق حفاظتی این شاخص امتیاز یکسانی داشت. اما شاخص کاربری اراضی با روش طبقه‌بندی هم‌روبی در هفت گروه با جزئیات بیشتری مورد استفاده قرار گرفت؛ لذا به نظر می‌رسد این روش می‌تواند دقت بیشتری را برای تعیین حساسیت تنوع زمینی فراهم آورد.

نتیجه‌گیری

ژئودایورسیتی هر منطقه بیانگر بخش مهمی از توان محیطی آن منطقه است. اگرچه طی سال‌های اخیر روش‌های ارزیابی ژئودایورسیتی در حال گسترش بوده است؛ اما روش‌هایی که بتواند عناصر ژئودایورسیتی را با عوامل تهدیدکننده آنها به صورت یکپارچه مورد ارزیابی قرار دهد بسیار کم و محدود بوده است. در این تحقیق، ارزیابی کمی ژئودایورسیتی با طبقه‌بندی کاربری اراضی به روش هم‌روبی ترکیب شد و نقشه حساسیت ژئودایورسیتی حاصل شد. در نقشه حساسیت تنوع زمینی در مقیاس منطقه‌ای، مناطق با تنوع زمینی زیاد و شاخص تهدید بالا به عنوان مناطق حساس شناسایی شده‌اند. در قسمت شرقی حوضه در محل گسل البرز شمالی، تنوع سنگ‌ها به علت جابجایی‌های ایجاد شده و وجود گسل‌های فرعی و تنوع لندفرم‌ها بیشترین مقادیر ژئودایورسیتی ارزیابی شده است از طرفی دیگر با احداث سد البرز در همین محدوده و تشکیل دریاچه سد، این منطقه در بالاترین سطح حساسیت در حوضه بابلرود قرار دارد. کلاس بسیار زیاد ژئودایورسیتی ۱ درصد مساحت حوضه را شامل می‌شود این کلاس در ترکیب با عامل تهدید به ۱۱/۳ درصد افزایش یافته است که نقش عامل کاربری را ایجاد حساسیت در ژئودایورسیتی نشان می‌دهد.

تهیه چنین نقشه‌هایی به وجود لایه‌های اطلاعاتی با مقیاس مناسب و کیفیت مطلوب دارد. از این رو برای تعیین کلاسهای ژئودایورسیتی لایه‌های اطلاعاتی بیشتر می‌تواند دقت ارزیابی را افزایش دهد. در نقشه ژئودایورسیتی حاصله عامل ژئومورفولوژی با ۴۴ درصد میانگین مقادیر نقش مهمی در تعیین مقادیر نهایی نقشه ژئودایورسیتی داشته است.

این نگرش به ژئودایورسیتی (تهیه نقشه حساسیت ژئودایورسیتی) می‌تواند برای ایجاد برنامه‌های حفاظتی و مدیریت کاربری اراضی در مقیاس حوضه توسط دانشمندان علوم زمین، برنامه‌ریزان و تصمیم‌سازان در مدیریت محیطی و توسعه راهبردهای مؤثر مورد استفاده قرار گیرد.

منابع

- باتجربه، م، سپهر، ع، حسین‌زاده، س. ر.، ۱۳۹۷. تهیه نقشه تنوع زمینی شهرستان مشهد بر پایه اختلاف حساسیت پذیری لندفرم‌ها، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، سال ششم شماره ۲، صص ۹۹-۱۱۵.
- باتجربه، م، حسین‌زاده، س. ر.، محسنی، ن.، لکزیان، ا.، ۱۴۰۱. ارزیابی ژئودایورسیتی حوضه آبریز رودخانه درونگر با استفاده از روش اصلاح شده سرانو و رویز-فلنو، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، سال یازدهم شماره ۳، صص ۸۸-۱۰۲.

- شایان یگانه، ع. ا.، زنگنه اسدی، م. ع.، امیراحمدی، ا.، ۱۳۹۹. ارزیابی کمی ژئودایورسیتی ژئوپارک پیشنهادی غرب خراسان رضوی برای حفاظت از میراث زمین‌شناسی آن، آمایش جغرافیایی فضا، سال دهم شماره ۳۶، صص ۹۰-۷۷.
- صالحی پور میلانی، ع.، صدوق، س. ح.، رفیعی، ر.، ۱۴۰۰. ارزیابی ژئودایورسیتی حوضه‌های آبریز مشرف به دریاچه نمک و حوض سلطان، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، سال دهم شماره ۲، صص ۱۰۵-۸۴.
- قهرودی تالی، م.، علی نوری، خ.، فرجادی نیا، س.، ۱۴۰۱. کاربرد ژئودایورسیتی در مدیریت محیط (مطالعه موردی حوضه بالادست سد کرج)، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، سال دهم شماره ۴، صص ۱۷-۱.
- گلی مختاری، ل.، نگهبان، س.، شفیع، ن.، ۱۳۹۷. تحلیل مقایسه‌ای ژئودایورسیتی (تنوع زمین‌شناختی) در حوضه‌های شمال غربی استان فارس، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، سال هفتم شماره ۳، صص ۱۶۳-۱۵۱.
- گلی مختاری، ل.، بیرامعلی، ف.، ۱۳۹۷. محاسبه و تحلیل تنوع زمینی (ژئودایورسیتی) (مطالعه موردی: شهرستان اشهرارد)، پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، دوره ۵۰ شماره ۲، صص ۳۲۲-۳۰۷.
- مختاری، د.، رضایی مقدم، م. ح.، اسفندیاری، م.، ۱۴۰۱. شاخص ژئومورفودایورسیتی: کمی کردن تنوع چشم انداز طبیعی و لندفرم‌های کوهستان میشو، شمال غرب ایران، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، سال یازدهم شماره ۳، صص ۱۹-۲۰۰.
- مقصودی، م.، مقیمی، ا.، یمانی، م.، رضایی، ن.، مرادی، ا.، ۱۳۹۸. بررسی ژئومورفودایورسیتی آتشفشان دماوند و پیرامون آن بر اساس شاخص GmI، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، سال هشتم شماره ۱، صص ۶۹-۵۲.
- وزارت جهاد کشاورزی، ۱۳۹۲. مطالعات جامع منابع طبیعی و آبخیزداری حوزه آبخیز بابلرود، سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری کشور

- Ahmadi, M., Mokhtari, D., Khodadadi, M., & Shahabi, H. (2021). Geodiversity evaluation and geoconservation using grid analysis: case study, north of Ilam Province. *Applied Geomatics*, 13(4), 537-553.
- 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*, 14(4), 1-16.
- Benito Calvo, A., Pérez González, A., Magri, O., & Meza, P. (2009). Assessing regional geodiversity: the Iberian Peninsula. *Earth surface processes and landforms*, 34(10), 1433-1445.
- Bétard, F., & Peulvast, J.P. (2019). Geodiversity hotspots: Concept, method and cartographic application for geoconservation purposes at a regional scale, *Environmental management*, 63(6), 822-834.
- Carrión-Mero, P., Dueñas-Tovar, J., Jaya-Montalvo, M., Berrezueta, E., & Jiménez-Orellana, N. (2022). Geodiversity assessment to regional scale: Ecuador as a case study. *Environmental Science and Policy*, 136, 167-186.
- Coratza, P., & Hobléa, F. (2018). The specificities of geomorphological heritage. In: Reynard E., Brilha J. (Eds), *Geoheritage: Assessment, protection, and management*, Elsevier, 87-106. Waltham, in press.
- Da Silva, 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(3), 1177-1186.
- De Reu, J., Bourgeois, J., Bats, M., Zwertvaegher, A., Gelorini, V., De Smedt, P., et al. (2013). Application of the topographic position index to heterogeneous landscapes. *Geomorphology*, 186, 39-49.
- Ferrer-Valero, N., Hernández-Calvento, L., & Hernández-Cordero, A.I. (2017). Human impacts quantification on the coastal landforms of Gran Canaria Island (Canary Islands). *Geomorphology*, 286, 58-67.

- Gallant, J.C. (2000). *Primary topographic attributes*. In: Wilson, J.P, and Gallant, J.C. (Eds), *Terrain analysis: principles and application*, John Wiley & Sons, New York, pp. 51-86.
- Gonçalves, J., Mansur, K., Santos, D., Henriques, R., & Pereira, P. (2020). *A discussion on the quantification and classification of geodiversity indices based on GIS methodological tests*. *Geoheritage*, 12(2), 1-20.
- 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.
- Guisan, A., Weiss, S.B., & Weiss, A.D. (1999). *GLM versus CCA spatial modeling of plant species distribution*. *Plant ecology*, 143(1), 107-122.
- Hjort, J., Gordon, J.E., Gray, M., & Hunter J.M.L. (2015). *Why geodiversity matters in valuing nature's stage*. *Conservation Biology*, 29(3), 630-639.
- Hjort, J., & Luoto, M. (2010). *Geodiversity of high latitude landscapes in northern Finland*. *Geomorphology*, 115, 109–116.
- Jankowski, P., Najwer, A., Zwoliński, Z., & Niesterowicz, J. (2020). *Geodiversity assessment with crowdsourced data and spatial multicriteria analysis*. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(12), 716.
- Nasiri, A., Shafiei, N., & Zandi, R. (2022). *Evaluation of Geodiversity Across Noorabad Basin (Fars Province, Iran)*. *Geoheritage*, 14(4), 1-9.
- Kot, R., & Leśniak, K. (2017). *Impact of different roughness coefficients applied to relief diversity evaluation: Chełmno Lakeland (Polish Lowland)*. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, 99(2), 102-114.
- Manosso, F.C., Zwoliński, Z., Najwer, A., Basso, B. T., Santos, D. S., & Pagliarini, M.V. (2021). *Spatial pattern of geodiversity assessment in the Marrecas River drainage basin, Paraná, Brazil*. *Ecological Indicators*, 126, 107703.
- MEA (Millennium Ecosystem Assessment), 2005. *Ecosystems and Human Well-Being: A Framework for Assessment*. Island Press, Washington, DC.
- Micić Ponjiger, T., Lukić, T., Vasiljević, Đ. A., Hose, T. A., Basarin, B., Marković, S. B., & Blešić, I. (2021). *Quantitative Geodiversity Assessment of the Fruška Gora Mt.(North Serbia) by Using the Geodiversity Index*. *Geoheritage*, 13(3), 1-12.
- Mokarram, M., Roshan, G., & Negahban, S. (2015). *Landform classification using topography position index (case study: salt dome of Korsia-Darab plain, Iran)*. *Modeling Earth Systems and Environment*, 1(4), 1-7.
- Najwer, A., Jankowski, P., Niesterowicz, J., & Zwoliński, Z. (2022). *Geodiversity assessment with global and local spatial multicriteria analysis*. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 107, 102665.
- Pereira, D.I., Pereira, P., Brilha, J., & Santos, L. (2013). *Geodiversity assessment of Paraná State (Brazil): an innovative approach*. *Environmental management*, 52(3), 541-552.
- Santos, D.S., Mansur, K. L., Gonçalves, J. B., Junior, E. R. A., & Manosso, F. C. (2017). *Quantitative assessment of geodiversity and urban growth impacts in Armação dos Búzios, Rio de Janeiro, Brazil*. *Applied geography*, 85, 184-195.
- Serrano, E., & Ruiz-Flaño, P. (2007). *Geodiversity: a theoretical and applied concept*. *Geographica helvetica*, 62(3), 140-147.
- Sharples, C. (1993). *A methodology for the identification of significant landforms and geological sites for geoconservation purposes*. Report to Forestry Commission, Hobart, Tasmania
- Silva, J. P., Pereira, D. I., Aguiar, A. M., & Rodrigues, C. (2013). *Geodiversity assessment of the Xingu drainage basin*. *Journal of Maps*, 9(2), 254-262.

- Strahler, A.N. (1957). *Quantitative analysis of watershed geomorphology*. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 38(6), 913-920.
- Tukiainen, H., Alahuhta, J., Field, R., Ala-Hulkko, T., Lampinen, R., & Hjort, J. (2017). *Spatial relationship between biodiversity and geodiversity across a gradient of land-use intensity in high-latitude landscapes*. *Landscape Ecology*, 32(5), 1049-1063.
- Van Ree, C.C.D.F., & Van Beukering, P.J.H. (2016). *Geosystem services: A concept in support of sustainable development of the subsurface*. *Ecosystem services*, 20, 30-36.
- Walz, U., & Stein, C. (2014). *Indicators of hemeroby for the monitoring of landscapes in Germany*. *Journal for Nature Conservation*, 22(3), 279-289.
- Weiss, A. (2001). *Topographic position and landforms analysis*. In *Poster presentation, ESRI user conference, San Diego, CA (Vol. 200)*.
- Zakharovskiy, V., & Németh, K. (2021). *Quantitative-qualitative method for quick assessment of geodiversity*. *Land*, 10(9), 946.

