

محاسبه و تحلیل تنوع زمینی (ژئومورفودیورسیتی) (مطالعه موردی: شهرستان ساری)

محسن اسلامی آکندی

دانش آموخته دوره دکتری، رشته برنامه ریزی شهری، واحد چالوس، دانشگاه آزاد اسلامی، چالوس، ایران

مریم ایلانلو

استادیار گروه جغرافیا، واحد ماهشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، ماهشهر، ایران

m.ilanlou@mhriau.ac.ir

لیلا ابراهیمی جنمانی

استادیار گروه جغرافیا، واحد چالوس، دانشگاه آزاد اسلامی، چالوس، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱/۱۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۵/۲۷

چکیده

آشنایی با پتانسیل‌های بالقوه در مناطق مختلف کشور می‌تواند باعث توسعه ژئوتوریسم شده و شکوفایی پایدار اقتصادی و اجتماعی و زندگی و رفاه بهتر را برای ساکنین آن تداعی و ترسیم کند. ژئومورفودیورسیتی بخشی از ژئودیورسیتی است که به ارزیابی ژئومورفولوژیکی یک قلمرو از نظر کمیت و تعداد انواع مختلف لندفرم‌ها به صورت بیرونی و درونی می‌پردازد. این مقاله از داده‌های SRTM و تکنیک‌های GIS برای ارزیابی تنوع ژئومورفودیورسیتی شهرستان ساری استفاده می‌کند. عوامل مناسب برای ارزیابی تنوع ژئومورفودیورسیتی زمین شناسی، وضعیت شیب، خاک، موقعیت لندفرم، ارتفاعات نسبی، تراکم زهکشی و زبری ناهمواری شناسایی شدند. پس از تهیه نقشه‌ها و آماده‌سازی هر یک در نهایت هر عامل با اعمال شکست‌های طبیعی در پنج طبقه شامل V1 خیلی کم V2، کم، V3 متوسط، V4 و زیاد V5 و خیلی زیاد طبقه‌بندی شدند. برای ارزیابی ژئومورفودیورسیتی از شاخص بر اساس شاخص GmI استفاده شده است. نقشه نهایی تنوع ژئومورفودیورسیتی از هم‌پوشانی جمع وزنی نقشه‌های هفت عامل به دست آمده است. نتایج نشان می‌دهند بیش از نیمی از منطقه ۳۵ درصد در طبقه زیاد (V4) و ۱۴ درصد در طبقه (V5) قرار دارد. این مناطق در قسمت جنوبی و شرقی منطقه واقع شده است. قسمت‌های شمالی منطقه از تنوع ژئومورفودیورسیتی کمتری برخوردار هستند. در ادامه، به منظور تحلیل دقیق‌تر ساختار تنوع زمینی و شناسایی الگوهای فضایی موجود، از روش خوشه‌بندی مبتنی بر یادگیری ماشین استفاده شد. نتایج خوشه‌بندی نشان داد که منطقه به چند خوشه متمایز تقسیم می‌شود که هر خوشه معرف نوع خاصی از تنوع زمینی است. به طور مشخص، خوشه‌های با تنوع زیاد و خیلی زیاد در نواحی جنوبی و شرقی متمرکز بوده و خوشه‌های با تنوع کمتر در مناطق شمالی و مرکزی مشاهده شدند. این نتایج هم‌راستا با تحلیل شاخص GmI بوده و اعتبار بیشتری به شناسایی دقیق نواحی با ارزش ژئومورفودیورسیتی می‌بخشد. خوشه‌بندی مبتنی بر یادگیری ماشین علاوه بر تایید یافته‌های شاخص GmI، امکان برنامه‌ریزی مدیریتی هدفمندتر و حفظ بهتر منابع ژئومورفولوژیکی را فراهم می‌آورد.

واژگان کلیدی: تنوع زمین‌شناسی، ژئومورفولوژی، لندفرم، شهرستان ساری

زمین پرجمعیت‌ترین دوره تاریخ خود را تجربه می‌کند و مناطق شهری در سراسر جهان افزایش می‌یابد. پیش‌بینی‌های آینده گزارش می‌دهند که ۷۰ درصد انسان‌ها تا سال ۲۰۵۰ در شهرها زندگی خواهند کرد (United Nations, 2018). گسترش بی‌رویه مناطق ساخته شده تقاضای زیادی برای زمین دارد و تأثیر زیادی بر سیستم‌های طبیعی اطراف مناطق شهری دارد. اکولوژی شهری اخیراً به عنوان یک رشته پدیدار شده است (Schiavina et al, 2022:2)، که شهرها را یا به عنوان اکوسیستم‌های یکپارچه یا به عنوان خود اکوسیستم مورد بحث قرار می‌دهد (Hamilton & Rae, 2020:775). برای تجزیه و تحلیل پایداری اکولوژیکی، مطالعات اکولوژی شهری توجه فزاینده‌ای را به تأثیر انسان بر فرآیندها و اجزای اکوسیستم شهری معطوف کرده است. این منجر به توسعه متغیرهای اساسی، و متغیرهای اساسی تنوع زمین شد. در این چارچوب، ارزیابی تنوع جغرافیایی در نواحی شهری ممکن است نشان‌دهنده تأثیر انسان بر محیط‌زیست باشد. تعداد کمی از مطالعات مورفولوژی و ژئودایورسیتی^۱ به بررسی محیط شهری می‌پردازند و بر عناصر تنوع جغرافیایی و ارزیابی برنامه‌ریزی و مدیریت ژئوتوریسم و شهرنشینی متمرکز است.

ژئودایورسیتی تنوع جغرافیایی محدوده طبیعی یا تنوع ویژگی‌های زمین‌شناسی (سنگ‌ها، کانی‌ها، فسیل‌ها)، ژئومورفولوژیکی (فرم‌های زمین، توپوگرافی، فرآیندهای فیزیکی) و ویژگی‌های خاک را نشان می‌دهد (Burnelli et al, 2023: 3025). در مقایسه با ناهمگونی توپوگرافی، توصیف کامل‌تری از تنوع سطح زمین را نشان می‌دهد (Hiwahashi & Yamazaki, 2022: 22; Alvioli., 2020: 67). اجزای تنوع جغرافیایی از چندین بخش زمین نشأت می‌گیرند که از نظر آب و هوا، توپوگرافی، زمین‌شناسی و هیدرولوژی متفاوت می‌باشند، به‌ویژه اگر این دلیل اختلاف در تأمین منابع برای پیچیدگی بیولوژیکی در نظر گرفته شود (Brandolini et al, 2020: 78). ژئومورفودایورسیتی^۲ بخشی از ژئودایورسیتی می‌باشد که به عنوان ارزیابی خاص از ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی یک قلمرو، با مقایسه آنها به صورت بیرونی (مقایسه با مناطق دیگر) و درونی (تنوع و پیچیدگی لندفرم‌ها در منطقه) و با توجه به سطح کیفیت علمی آنها، مقیاس تحقیق و هدف پژوهش تعریف شده است ژئومورفودایورسیتی تابعی از حساسیت چشم‌انداز و واکنش در برابر فرآیندهای غیرخطی و دینامیک در مقیاس‌های زمانی و مکانی مختلف است. در همین رابطه ژئومورفولوژی دینامیک (پیچیدگی فرآیندها، ناهمسانی اقلیمی، تغییرات مداوم فرآیندهای سطحی)، پیشینه لندفرم‌ها (تنوع کروئولوژیکی، پیشینه تکتونیک و اقلیم) و میراث زمین‌شناختی (تنوع لندفرم‌ها، تنوع پتروگرافیک، تنوع تکتونیک) اجزای اصلی ژئومورفودایورسیتی را تشکیل می‌دهند (پورخسروانی و همکاران، ۱۴۰۳).

تلاش‌های متفاوتی در ادبیات تعریف رسمی و عینی از ژئودایورسیتی در چند دهه اخیر وجود دارد (Gray, 2008:289). آنها در دو گروه اصلی قرار می‌گیرند. تحلیل‌های کیفی بر واحدهای زمین، مضامین، مناطق و محیط‌های خاص متمرکز هستند. روش‌های کمی و عینی برای ارزیابی تغییرپذیری ژئومورفولوژیکی یک منظر وجود دارد که نتیجه تعامل بین مجتمع‌های زمین‌شناسی، فرآیندهای سطحی و کنش آب‌وهوایی است.

^۱ - Geodiversity

^۲ - Geomorphodiversity

لندفرم‌ها نماینده تنوع ژئومورفولوژی هستند، زیرا نتیجه تعامل بین انواع سنگ‌شناسی، فرآیندهای سطحی و متغیرهای آب و هوایی هستند (Bucci et al, 2022: 56).

نمونه‌هایی از روش‌های جایگزین، ترکیبی از رویکردهای کمی و کیفی وجود دارد (Zumpano et al., 2021: 134). رویکرد GIS تا حد زیادی بر تجزیه و تحلیل یک مدل ارتفاعی رقومی (DEM)، ویژگی‌های مشتق‌شده توسط تحلیل مورفومتریک، و رابطه آن‌ها با داده‌های زمین‌شناسی متکی است. یک شاخص مبتنی بر DEM دارای مزیت تکرارپذیری زیاد در مناطق وسیع و پراپتانسیل در مقیاس‌ها و وضوح‌های مختلف کاربرد دارد (Zwoliński et al., 2018: 27).

در این زمینه مطالعاتی در سطح ایران و خارج از کشور صورت پذیرفته است. برنلی^۳ و همکاران (۲۰۲۵) مقاله‌ای تحت آیا ریخت‌زایی انسانی به تنوع ژئومورفودیوارسیتیوارسیتی در محیط‌های شهری کمک می‌کند؟ به نگارش درآورده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که هم فرآیندهای طبیعی و هم فرآیندهای انسانی به تنوع ژئومورفودیوارسیتی در محیط شهری و در مناطقی که سطح شهرنشینی متفاوتی دارند کمک می‌کنند. آن‌ها برای درک تأثیر مورفوژن انسانی بر تنوع ژئومورفودیوارسیتی در محیط شهری مرتبط هستند. لویز بدویا^۴ و همکاران (۲۰۲۵) مقاله‌ای تحت عنوان تنوع ژئومورفودیوارسیتیوارسیتی زودگذر: بحث مفهومی، ارزش‌گذاری و مدیریت میراث به نگارش درآورده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که راه‌حل این موضوع یک استراتژی متناسب با ماهیت آن‌ها است، زیرا ماهیت متغیر و متحرک آن‌ها مانع استفاده از برنامه‌های مدیریتی با موفقیت در سایر انواع میراث می‌شود. نکته کلیدی در درک این نکته نهفته است که تکامل لندفرم‌ها و از بین بردن آن‌ها مترادف با تخریب نیست، بلکه جنبه دیگری از ارزش میراث را نشان می‌دهد که باید از طریق تکنیک‌های نوآورانه افزایش یابد. خلاصه‌ای نهایی پایه‌های زیربنای این استراتژی خاص را ایجاد می‌کند و به دنبال ارتقای این میراث به وضعیتی هم‌تراز با سایر دسته‌بندی‌های میراث تثبیت شده در قلمرو ژئومورفولوژی است. برنلی^۵ و همکاران (۲۰۲۳) مقاله‌ای تحت عنوان تنوع سطح زمین: یک شاخص تنوع ژئومورفودیوارسیتی ایتالیا به نگارش درآورده‌اند. نتایج نشان می‌دهد مرتبط کردن پارامترهای پردازش و ویژگی‌های فضایی زمین به وضوح مجموعه داده‌ها، انتخاب خوبی برای ارزیابی شاخص تنوع سطح زمین قابل تکرار است. گنجاندن تراکم زهکشی باعث بهبود نتایج در مناطق مسطح می‌شود که در آن سایر عوامل نتایج بی‌اهمیتی را نشان می‌دهند. ما استدلال می‌کنیم که این شاخص برای مدیریت کاربری زمین، ارزیابی تنوع زیست محیطی مرتبط است و ممکن است به توصیف تعامل بین بخش‌های غیرزنده و زیستی کمک کند.

اسفندیاری و همکاران (۱۴۰۲) به کاربرد شاخص‌های ژئومورفومتریک در تعیین کمیت ژئودیوارسیتی مناطق کوهستانی مطالعه موردی: کوهستان میشوداگی، شمال غرب ایران پرداختند. نتایج نشان می‌دهد که 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 ارائه‌شده ابزاری بالقوه و مؤثر برای حمایت از فرایندهای تصمیم‌گیری درباره مدیریت و حفاظت از ژئودیوارسیتی

^۳ - Burnelli

^۴ - López Bedoya

^۵ - Burnelli

در مقیاس‌های مختلف با کاربردهای احتمالی بیشتر در ایران است. مختاری و همکاران (۱۴۰۲) به تحلیل تنوع زمینی (ژئودایورسیتی) در محدوده کوه‌های بینالود پرداختند. بر مبنای یافته‌های تحقیق می‌توان عنوان کرد که اختلاف شاخص‌ها در دو دامنه بسیار ناچیز است، اما به دلیل وضعیت ساختمانی و چینه‌شناسی و تأثیر عوامل ثانویه دامنه‌های جنوبی کوه‌های بینالود دارای ژئودایورسیتی بالاتری نسبت به دامنه‌های شمالی آن است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که بر اساس مقایسه دامنه شمالی و دامنه جنوبی کوه‌های بینالود با شاخص‌های پنج‌گانه ژئودایورسیتی سهم عوامل زمین‌شناسی بیشتر از عوامل مورفومتری و اقلیمی بوده است. سیستانی بدوئی و همکاران (۱۴۰۰) به بررسی تفاوت ژئودایورسیتی و ژئومورفودایورسیتی منطقه ساحلی دریای عمان و زون مکران از دماغه جاسک تا خلیج گواتر پرداختند. نتایج تحقیق نشان می‌دهد تنوع ژئومورفولوژیکی زون مکران با تراکم ناهمواری ۰/۰۰۰۹، تنوع شانون ۳/۳۵۲۹، ناهمواری شانون ۰/۹۳۲۹، تنوع سیمپسون ۰/۹۵۷۸ و ناهمواری سیمپسون برابر با ۰/۹۷۷۴ نسبت به تنوع زمین‌شناختی از اعتبار بالاتری برخوردار بوده و ارزش بیشتری را به خود اختصاص داده است. بنابراین به منظور توسعه منطقه ساحلی جنوب شرق کشور و مکران، لزوم توجه مسئولین و رسیدگی و احداث زیرساخت‌های مورد نیاز در توسعه صنعت ژئومورفوتوریسم لازم و ضروری می‌باشد.

علاوه بر این تحقیقات با وجود مطالعات متعدد در خصوص ژئودایورسیتی و ارزیابی کمی تنوع اشکال زمین در ایران، پژوهش‌های جدیدی به‌ویژه در مجله Geoheritage چاپ شده که دیدگاه‌های نوآورانه‌ای ارائه داده‌اند. به‌عنوان مثال، بررسی جامع Brilha و همکاران (۲۰۲۲) به ترسیم وضعیت کلی ژئودایورسیتی و اولویت‌های آتی ژئوهریتیج ایران پرداخته و لزوم بهره‌گیری روش‌های ترکیبی کمی و کیفی را توصیه می‌کند. مرتضوی و همکاران (۲۰۲۱) ارزیابی کمی و اولویت‌بندی حفاظتی مناطق مختلف البرز را با روش‌های جدید پیشنهاد داده‌اند. زمانی و همکاران (۲۰۲۰) در کویر لوت بهره‌گیری از شاخص‌های نوین و پیوند با ظرفیت‌های ژئوتوریسم را حائز اهمیت دانسته‌اند. همچنین کارهای آریان و همکاران (۲۰۲۱) در رشته‌کوه زاگرس و امامی و همکاران (۲۰۲۲) در زمینه ارائه چارچوب مدیریتی، مبنایی ارزشمند برای گسترش تحلیل‌ها در مطالعات منطقه‌ای مشابه میراث ژئومورفولوژیک به شمار می‌روند. در جنوب شرق ایران نیز موسوی و همکاران (۲۰۲۱)، ارزش بالای ژئودایورسیتی منطقه مکران را نمایان ساخته و دستورالعمل‌هایی جهت حفاظت ارائه کرده‌اند. این پژوهش با بهره‌گیری همزمان از داده‌های دقیق دیجیتال ارتفاعی SRTM و تکنیک‌های نوین GIS، رویکردی جامع و چندبعدی برای ارزیابی ژئومورفودایورسیتی ارائه داده است که با ترکیب هفت عامل کلیدی زمین‌شناسی، شیب، خاک، لندفرم، ارتفاع نسبی، تراکم زهکشی و زبری ناهمواری، نمایی کامل‌تر و دقیق‌تر از تنوع زمینی منطقه ارائه می‌کند.

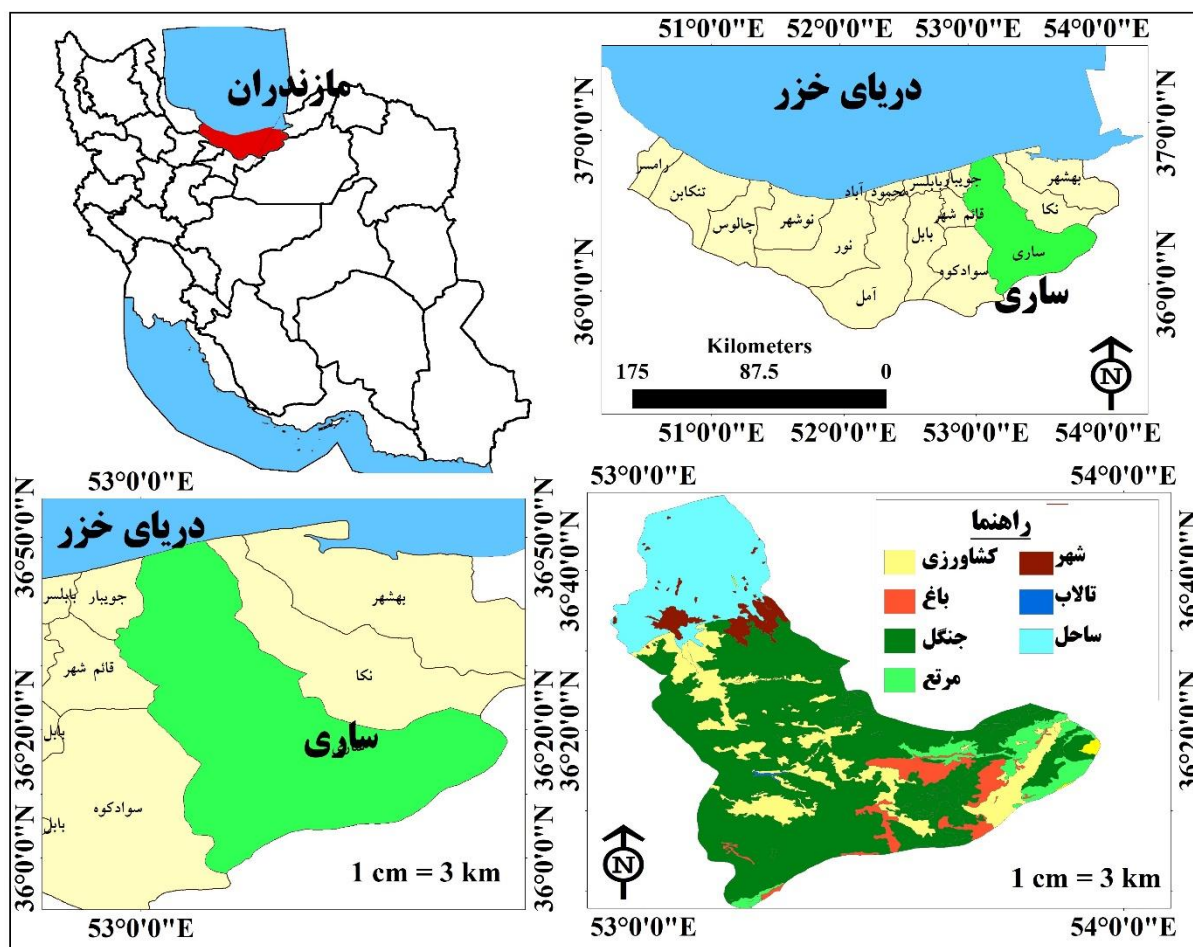
یکی از مهم‌ترین نوآوری‌های این مطالعه، استفاده از روش خوشه‌بندی مبتنی بر یادگیری ماشین برای دسته‌بندی و تحلیل الگوهای فضایی تنوع ژئومورفودایورسیتی است. این رویکرد باعث افزایش دقت در شناسایی مناطق همگن با ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی مشابه شده و امکان تعریف دقیق‌تر مناطق هدف برای مدیریت و حفاظت را فراهم می‌کند. برخلاف مطالعات گذشته که عمدتاً بر شاخص‌های منفرد تمرکز داشتند، این تحقیق با تلفیق چندین شاخص و تحلیل خوشه‌ای، تصویر واقع‌بینانه‌تر و کاربردی‌تری ارائه داده است.

علاوه بر این، هم‌پوشانی داده‌های ژئومورفولوژیکی با الگوریتم‌های یادگیری ماشین، امکان تحلیل بهتر و تصمیم‌گیری هدفمندتر برای توسعه پایدار ژئوتوریسم و حفاظت از میراث ژئومورفولوژیکی را فراهم ساخته است. این روش می‌تواند به عنوان یک الگوی موفق در مطالعات مشابه مناطق دیگر کشور یا جهان مورد استفاده قرار گیرد.

در نهایت، نتایج این تحقیق می‌تواند به تصمیم‌گیرندگان و مدیران محیط زیست و منابع طبیعی کمک کند تا با شناخت دقیق‌تر از پتانسیل‌ها و تنوع زمین‌شناسی منطقه، برنامه‌ریزی مؤثرتری در زمینه حفاظت، توسعه ژئوتوریسم و بهره‌برداری پایدار از منابع ژئومورفولوژیکی داشته باشند.

موقعیت منطقه مورد مطالعه

شهر ساری مرکز استان مازندران و شهرستان ساری است. از لحاظ موقعیت جغرافیایی این شهر در طول شرقی ۵۳ درجه و ۳ دقیقه و عرض شمالی ۳۶ درجه و ۳۴ دقیقه واقع شده و ارتفاع متوسط آن از سطح دریای آزاد حدود ۴۰ متر می‌باشد. ساری به عنوان مرکز استان مازندران دارای ۶ بخش، ۴ شهر و ۱۵ دهستان می‌باشد. (شکل ۱) بر اساس نتایج سرشماری عمومی نفوس و مسکن در سال ۱۳۹۵، این شهرستان دارای ۵۰۴۲۹۸ نفر جمعیت که ۲۵۳۴۵۱ نفر مرد و ۲۵۰۸۴۷ نفر زن می‌باشد. شهر ساری به دلیل نزدیکی به تهران و قرار گرفتن در مسیر ارتباطی خراسان رضوی از موقعیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشد. از نزدیکترین شهرهای اطراف ساری می‌توان به شهرهای قائمشهر در غرب، نکا در شرق، جویبار در شمال و کیاسر در جنوب اشاره نمود. ارتفاع ساری از سطح دریا ۴۰ متر است فاصله شهر ساری تا تهران ۲۵۰ کیلومتر است و خط آهن سراسری ایران از این شهر عبور می‌کند رودخانه تجن نیز از این شهر می‌گذرد. از بهم پیوستن رودهای زارم رود و سفید رود و شیرین رود تشکیل شده است. در فاصله کمی از شهر سواحل دریای خزر قرار دارد که به راحتی قابل دسترسی می‌باشد. شهرستان ساری همانند دیگر شهرستان‌های جلگه‌ای استان دارای آب و هوای معتدل خزری است. حرارت حداقل مطلق زیر صفر نیز گزارش شده است، همچنین متوسط درجه سالانه این شهر بالاتر از ۱۶ درجه سانتیگراد است (رئیس‌یان و همکاران. ۱۴۰۰).



شکل ۱: موقعیت منطقه مورد مطالعه

روش تحقیق

داده‌های مورد نیاز

هفت عامل برای ارزیابی تنوع ژئومورفودایورسیتی در نظر گرفته شده است. این عوامل از توماس^۶ (۲۰۱۲)، ناژور، زولینسکی^۷ (۲۰۱۴) و مللی و همکاران^۸ (۲۰۱۷) استخراج شده‌اند. این عوامل عبارتند از هیدرولوژی، زمین‌شناسی، خاک، وضعیت شیب، لندفرم، زبری ناهمواری و ارتفاع نسبی. به جز لایه خاک، لندفرم و زمین‌شناسی، چهار عامل دیگر از اندازه رستری ۳۰ متری SRTM DEM به دست آمده از اطلاعات ملی جغرافیایی-مکانی (NGI) استخراج شده‌اند. این لایه‌ها در محیط نرم‌افزار SAGA GIS تهیه شدند. برای محاسبه تراکم زهکشی از DEM استفاده شد. کانال‌های رودخانه‌ای از طریق محاسبات نیمه خودکار در SAGA GIS استخراج شدند و طبقه‌بندی سلسله مراتبی کانال‌های Strahler در سطح هفت اعمال شد. داده‌های زمین‌شناسی از پایگاه داده آنلاین علوم زمین دانلود شد. لایه پایگاه داده جهانی خاک (HWSD v 1.21) از پایگاه داده آنلاین موسسه بین‌المللی تحلیل سیستم‌های کاربردی

^۶ - Thomas

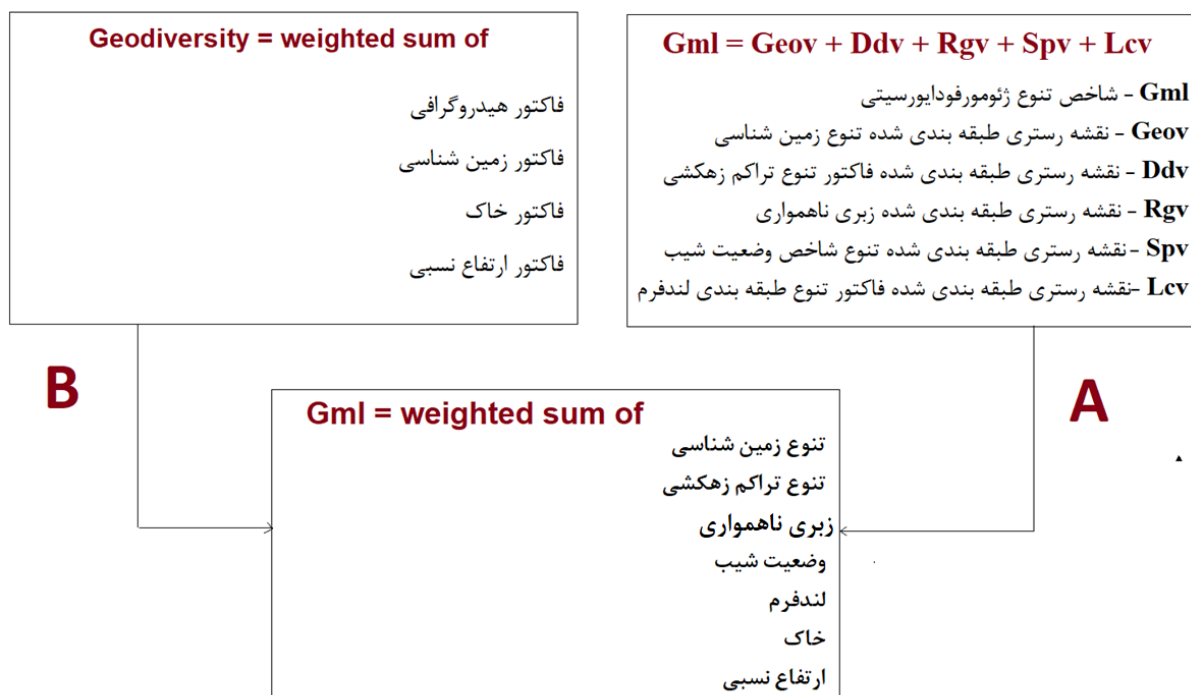
^۷ - Najwer, Zwoliński

^۸ - Melelli

(IIAS) به دست آمده است. نقشه لندفرم در محیط نرم افزار گوگل ارث انجین با استفاده از مجموعه داده ALOS Landform تهیه شد.

روش پردازش و تحلیل داده‌ها

متغیرهای ورودی با شاخص تنوع ژئومورفودایورسیتی (Gml) (مللی و همکاران ۲۰۱۷) و معیارهای ارزیابی تنوع جغرافیایی پیشنهاد شده توسط ناژور، زولینسکی (۲۰۱۴) همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده، مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت. چگالی زهکشی از Gml در فاکتور هیدروگرافیکی گنجانده شده است زیرا آنها به یکدیگر مرتبط هستند اما به روش‌های مختلف به روش مشابهی تهیه نمی‌شوند. ادغام این دو کیفیت نمایش هیدروگرافی را بهبود می‌بخشد. عامل ژئومورفولوژیکی در ضریب رده شکل زمین گنجانده شده است. تغییر کاربری و پوشش زمین در Gml نهایی مستثنی شده است زیرا تمرکز این مقاله فقط بر عوامل طبیعی است. بنابراین، یک مجموع وزنی از هفت عامل، تنوع ژئومورفودایورسیتی را تجزیه و تحلیل می‌کند.



شکل ۲: روش انتخاب متغیرها (مللی و همکاران ۲۰۱۷) و (ناژور و زولینسکی ۲۰۱۴)

افزودن الگوریتم‌های خوشه‌بندی یادگیری ماشین^۹

برای تقویت جنبه نوآورانه تحقیق و ارائه تحلیل دقیق‌تری از تنوع ژئومورفولوژیکی، از الگوریتم‌های یادگیری ماشین غیرنظارتی^{۱۰} با رویکرد خوشه‌بندی استفاده شد. این مرحله با هدف شناسایی واحدهای همگن فرم زمین و مقایسه آن با نتایج شاخص Gml طراحی گردید.

^۹ - Machine Learning Clustering

^{۱۰} - unsupervised learning

در این مرحله، شاخص‌های مورفومتریک استخراج‌شده از DEM شامل ارتفاع، شیب، جهت، انحنا^{۱۱} زمین، شاخص موقعیت توپوگرافی (TPI) و شاخص رطوبتی توپوگرافی (TWI) به عنوان ورودی به الگوریتم‌های خوشه‌بندی معرفی شدند. داده‌ها پس از استانداردسازی (با استفاده از z-score normalization)، در محیط Python و با استفاده از کتابخانه‌های scikit-learn و PySAL مورد پردازش قرار گرفتند. سه الگوریتم برای خوشه‌بندی به کار گرفته شد:

K-Means: برای طبقه‌بندی اولیه و شناسایی الگوهای تکرارشونده.

DBSCAN: برای شناسایی خوشه‌های مبتنی بر چگالی، به ویژه در مناطق با ساختار پیچیده زمین‌ریخت.

Hierarchical Clustering: برای نمایش ساختار سلسله‌مراتبی تنوع فرم‌های زمین.

برای تعیین تعداد بهینه خوشه‌ها در K-Means، از روش Elbow و Silhouette Score استفاده شد. نتایج حاصل از خوشه‌بندی با لایه‌های تنوع ژئومورفودایورسیتی به‌دست‌آمده از شاخص‌های کلاسیک مقایسه و تفسیر گردید.

طبقه‌بندی نهایی

نقشه نهایی تنوع ژئومورفودایورسیتی در پنج طبقه شامل:

• V1: خیلی کم

• V2: کم

• V3: متوسط

• V4: زیاد

• V5: خیلی زیاد

طبقه‌بندی و تولید شد.

ترکیب روش سنتی GmI با روش‌های خوشه‌بندی یادگیری ماشین، توانست دیدگاه جامع‌تری از تنوع زمین‌ریخت‌شناختی منطقه مورد مطالعه فراهم آورد و امکان تحلیل ترکیبی - کمی و کیفی - را فراهم سازد.

یافته‌های پژوهش

در این مطالعه، به‌منظور ارزیابی تنوع ژئومورفودایورسیتی در شهرستان ساری، ابتدا هفت لایه تنوع شامل زمین‌شناسی، تراکم زهکشی، وضعیت شیب، لندفرم، ارتفاع نسبی، زبری ناهمواری و خاک تهیه شد. درصد پوشش هر طبقه در هر لایه مشخص گردید و بر اساس آن تحلیل نهایی انجام شد.

فاکتور تنوع زمین‌شناسی^{۱۲} (Geo_v)

از نظر زمین‌شناسی بخش شمالی شهرستان ساری در زون ساختمانی گرگان-رشت و بخش جنوبی آن در زون البرز استقرار دارد. زون گرگان - رشت شامل مناطقی است که حاشیه دریای خزر را در سواحل ایران محدود کرده و در شمال گسل البرز قرار دارد. بخش اعظم آن به وسیله رسوبات عهد حاضر (رودخانه‌ای، دلتایی، ساحلی) و مرز شرقی آن به وسیله لایه‌های ضخیمی از لس پوشیده شده است. قسمت اعظم زون

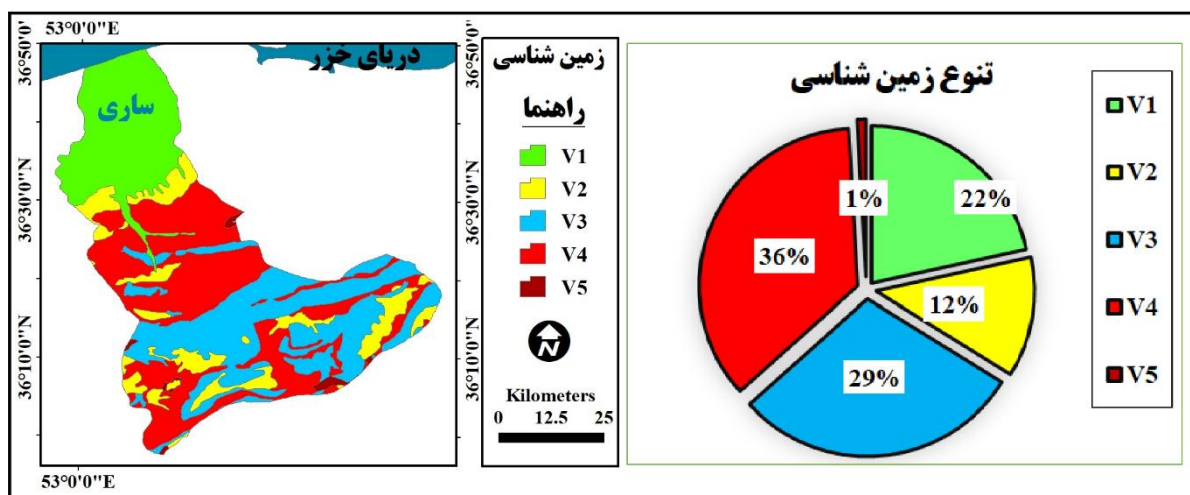
^{۱۱} - curvature

^{۱۲} - Geological diversity factor

مزبور به نام منطقه فرونشست دریای خزر ذکر شده است. زون گرگان- رشت از روند سینوسی البرز پیروی کرده و هرجا که کوهستان از دریا فاصله گرفته است، گسترش پیدا نموده و در نواحی که کوهستان به دریا نزدیک شده است، دارای گسترش محدود و مقطع می‌باشد. دشت‌ها در مناطقی که واحدهای مارنی، ماسه سنگی و کنگولومرایی میوسن و کنگولومرا و مارن‌های پلیوسن گسترش دارند به دلیل مقاومت کم آنها در مقابل فرسایش به داخل کوهستان نفوذ کرده‌اند. در حالی که زون البرز از واحدهای میوسن و پلیوسن پوشیده و در قسمت‌های مرکزی و جنوبی به طور وسیعی گسترش دارند. به این ترتیب ده طبقه به دست آمد که به ترتیب از ۱ دارای کمترین تا ۵ دارای بیشترین شرایط پاسخ توپوگرافیکی هستند. (جدول ۱). لایه نهایی در نرم‌افزار Arc/Map تهیه گردید و سپس ارزش تنوع محاسبه گردید و در نهایت بر اساس الگوریتم شکست‌های طبیعی (Gneiss, 1967) به ۵ طبقه تقسیم گردید که در شکل (۳) نشان داده شده است. همانطور که شکل (۳) و جدول (۱) نشان می‌دهد طبقه (V4) با مساحت ۱۳۰۲ کیلومتر مربع حدود ۳۶ درصد منطقه را در برمی‌گیرد. به لحاظ مکانی بیشتر مناطق جنوبی و مرکزی منطقه را شامل این طبقه می‌شود. مناطق شمالی به لحاظ تنوع طبقه (V1) یعنی کم را شامل می‌شوند که ۲۲ منطقه را پوشانده‌اند. منطقه با تنوع خیلی زیاد تنها ۱ درصد منطقه را شامل می‌شود که در جنوب منطقه واقع شده‌اند. همانطور که از نقشه تنوع زمین‌شناسی مشخص است منطقه به لحاظ زمین‌شناسی از تنوع زیادی برخوردار است. و تمامی سنگ‌ها و سازندها از آذرین، رسوبی، دگرگونی، تراس‌های ابرفتی را دربرمی‌گیرد.

جدول ۱: مساحت هر طبقه تنوع در لایه تنوع زمین‌شناسی در منطقه به کیلومتر مربع

طبقه تنوع	زمین‌شناسی	درصد
V1	۷۸۴/۴	۲۲
V2	۴۴۹/۹	۱۲
V3	۱۰۷۱/۲	۲۹
V4	۱۳۰۲/۸	۳۶
V5	۳۳/۹	۱



شکل ۳: نقشه تنوع زمین شناسی در منطقه

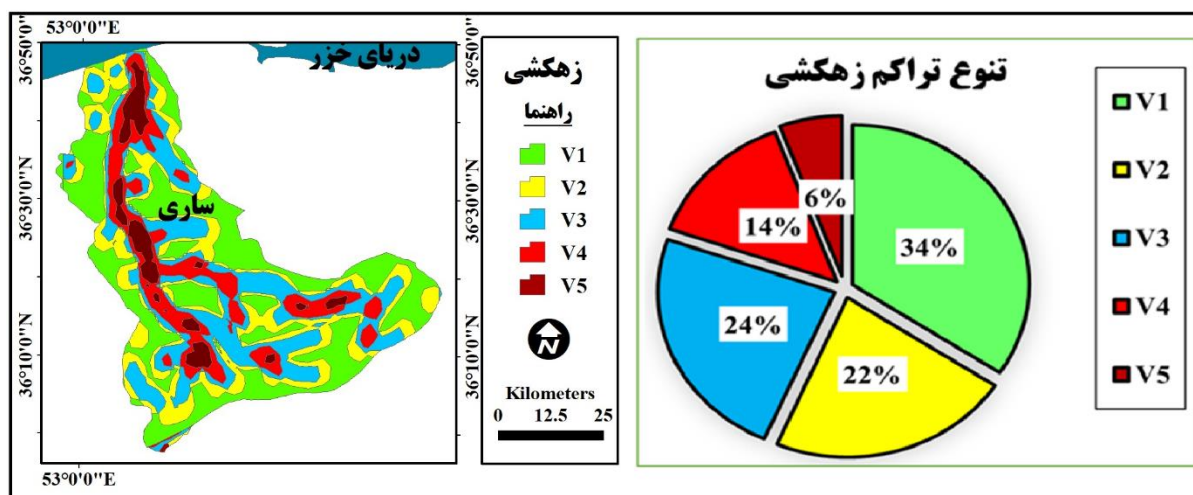
فاکتور تنوع تراکم زهکشی^{۱۳} (Dd_v)

نقشه تراکم زهکشی از نقشه DEM ۱۰ متر منطقه در محیط نرم افزار Arc/Map تهیه گردید. کانال‌های رودخانه‌ای از طریق محاسبات نیمه خودکار در SAGA GIS استخراج شدند. مقدار در هر واحد سطح از ویژگی‌های لایه خطی (رودخانه‌ها که در اطراف هر یک از سلول‌های رستری خروجی قرار دارد، به عنوان خروجی، داده‌ای شبکه‌ای، به دست آمد. تراکم در واحدهای طول در واحد سطح محاسبه شد. در نهایت به پنج کلاس شامل V1 (۰ - ۰/۴۵)، V2 (۰/۴۵ - ۰/۹۰)، V3 (۰/۹۰ - ۱/۵۰)، V4 (۱/۵۰ - ۲) و V4 (۲ - ۱/۵۰) به پنج کلاس شامل V5 (۲/۵۰ - ۲/۹۰) طبقه‌بندی شدند. همانطور که در شکل (۴) مشخص هست فاکتور تراکم زهکشی تأثیر متقابل مناطق مرتفع، آبراهه‌ها و دره‌های باز را نشان می‌دهد. تراکم زهکشی بالا نشان دهنده توده‌های آبی است که در رشته کوه یافت می‌شوند. رود تجن از کوه‌های چهاردانگه، دودانگه و هزارجریب از جنوب منطقه سرچشمه می‌گیرد و به سمت شمال منطقه حرکت می‌کند و پس عبور از شهر ساری در منطقه فرح‌آباد به دریای خزر می‌ریزد. همانطور که یافته‌ها نشان می‌دهند ۳۴ درصد منطقه شامل طبقه (V1) می‌شود که به دور از آبراهه‌ها و کانال‌های اصلی رودخانه می‌باشند. طبقه (V1) ۳۴ درصد، طبقه (V2) ۲۲ درصد، طبقه (V3) ۲۴ درصد، طبقه (V4) ۱۴ درصد و طبقه (V5) ۶ درصد منطقه را دربر گرفته‌اند. (جدول ۲)

جدول ۲: مساحت هر طبقه تنوع در لایه تنوع تراکم زهکشی در منطقه به کیلومتر مربع

طبقه تنوع	تراکم زهکشی	درصد
V1	۱۲۳۹	۳۴
V2	۸۰۳	۲۲
V3	۸۶۱	۲۴
V4	۵۰۴	۱۴
V5	۲۰۶	۶

^{۱۳} - Drainage Density Variation Factor



شکل ۴: نقشه تنوع تراکم زهکشی در منطقه

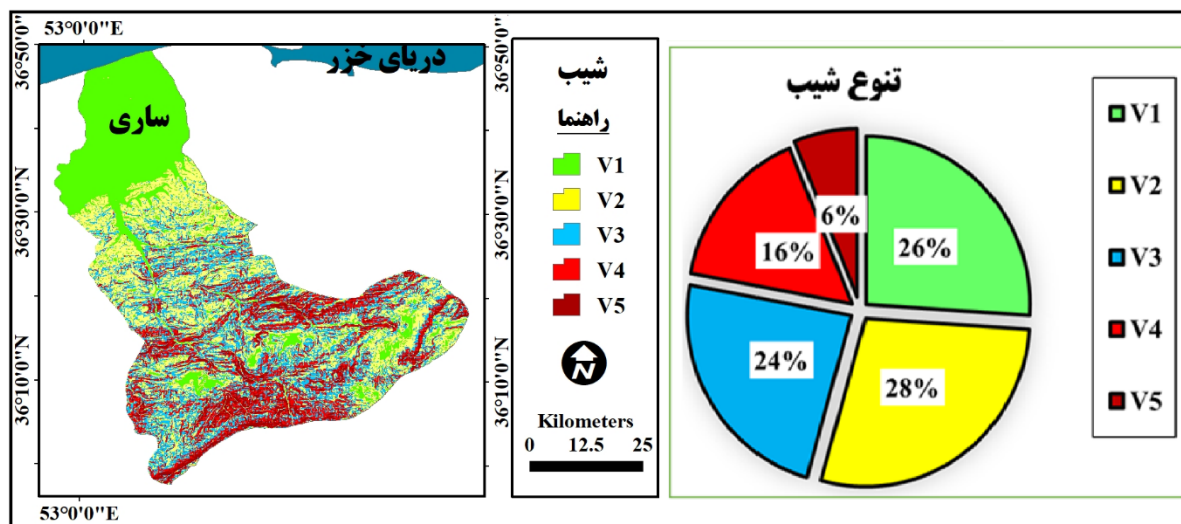
فاکتور تنوع شاخص وضعیت شیب^{۱۴} (Scv)

فاکتور وضعیت شیب، چشم‌انداز را به صخره‌ها، شیب‌های حاشیه، شیب‌های میانی، شیب‌های پایکوهی و دره‌های باز طبقه‌بندی می‌کند. نقشه شیب با استفاده از شاخص موقعیت توپوگرافی (TPI) در SAGA GIS به دست آمدند. TPI به عنوان تفاوت بین مقدار ارتفاع سلول و میانگین ارتفاع در ناحیه همسایه اطراف سلول تعریف می‌شود. TPI با در نظر گرفتن همسایگی دایره‌ای با شعاع ۳۰۰ متری با وضوح ۳۰ متری DEM محاسبه می‌شود. همانطور که شکل (۵) و جدول (۳) نشان می‌دهند طبقه (V1) ۲۶ درصد، طبقه (V2) ۲۸ درصد، طبقه (V3) ۲۴ درصد، طبقه (V4) ۱۶ درصد و طبقه (V5) ۶ درصد منطقه را دربرگرفته‌اند. بدین ترتیب بیشترین درصد منطقه را طبقه (V2) در بر گرفته است. مناطق جنوبی شیب بیشتری نسبت به مناطق شمالی دارند. موقعیت شیب نشان دهنده تسلط دره‌های باز و جلگه‌ها است.

جدول ۳: مساحت هر طبقه تنوع در لایه تنوع وضعیت شیب در منطقه به کیلومتر مربع

طبقه تنوع	شیب	درصد
V1	۹۴۵	۲۶
V2	۱۰۲۹	۲۸
V3	۸۵۴۶	۲۴
V4	۵۷۵	۱۶
V5	۲۲۷	۶

^{۱۴} - Slope condition index diversity factor



شکل ۵: نقشه تنوع وضعیت شیب در منطقه

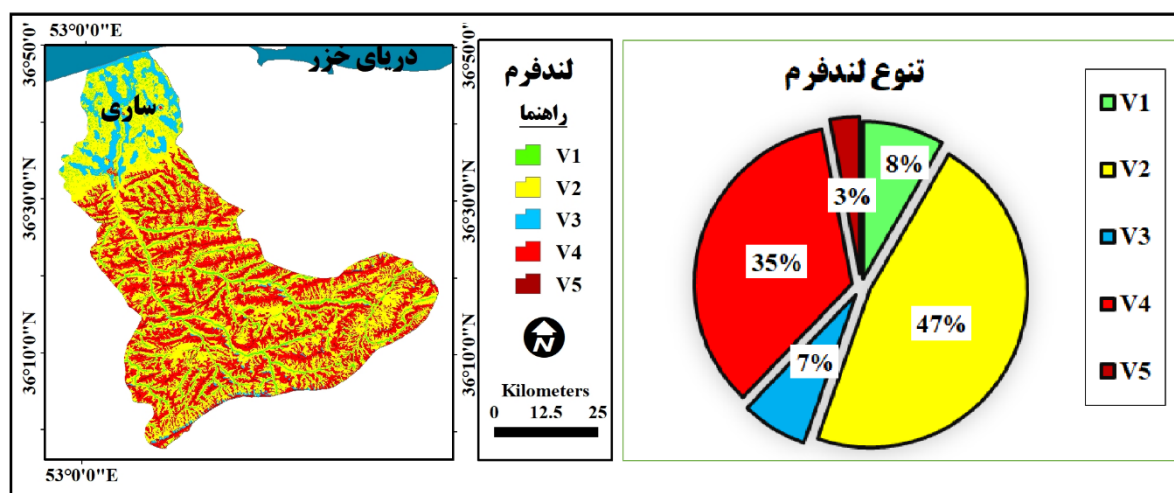
فاکتور تنوع طبقه‌بندی لندفرم^{۱۵} (Lc)

نقشه لندفرم‌های منطقه در محیط نرم‌افزار آنلاین گوگل ارث انجین تهیه گردید. عمده لندفرم‌های منطقه دره‌های U.V شکل، خط الراس / قله، کوه‌ها، صخره و پرتگاه، اراضی تپه‌ای و جلگه‌ای، دامنه‌های باز، بسترهای آبرفتی کنار رودخانه و ساحل می‌باشند. همانطور که شکل (۶) و جدول (۴) نشان می‌دهند طبقه (V1) ۸ درصد، طبقه (V2) ۴۷ درصد، طبقه (V3) ۷ درصد، طبقه (V4) ۳۵ درصد و طبقه (V5) ۳ درصد منطقه را دربرگرفته‌اند. بدین ترتیب بیشترین مساحت منطقه به عبارتی نزدیک نیمی از منطقه طبقه (V2) برابر با ۱۷۱۱ کیلومتر مربع یعنی حدود ۴۷ درصد را در بر گرفته است که عمدتاً بر دامنه‌های باز، تپه‌ای و ساحل تسلط دارد. اما طبقه زیاد و خیلی نیز در مجموع ۳۸ درصد مساحت منطقه را دربرگرفته‌اند که به این معناست که منطقه از تنوع ژئومورفولوژیکی بالایی برخوردار است.

جدول ۴: مساحت هر طبقه تنوع در لایه تنوع لندفرم در منطقه به کیلومتر مربع

طبقه تنوع	لندفرم	درصد
V1	۳۰۴	۸
V2	۱۷۱۱	۴۷
V3	۲۴۷	۷
V4	۱۲۶۶	۳۵
V5	۱۱۱	۳

^{۱۵} - landform classification diversity factor



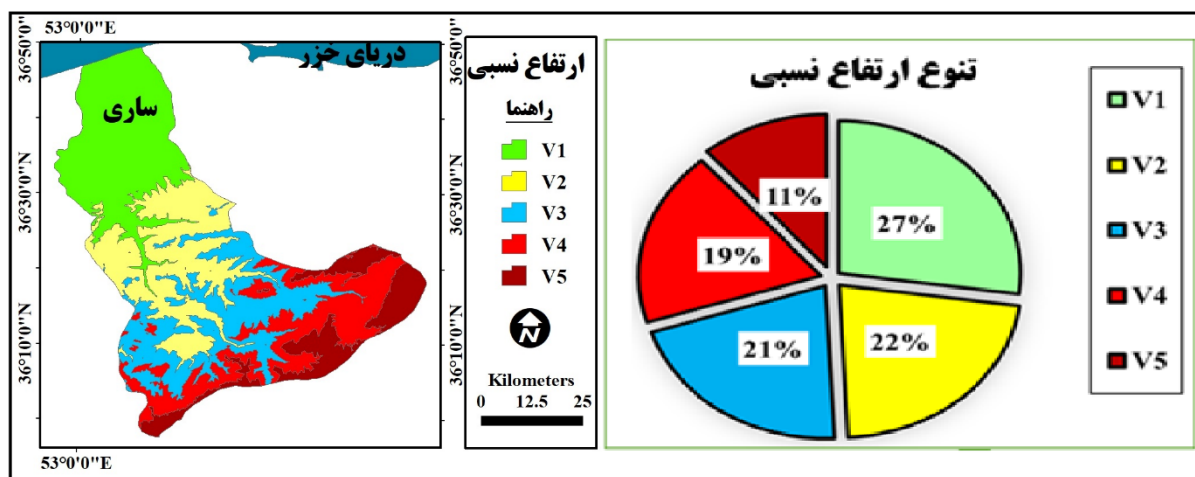
شکل ۶: نقشه تنوع لندفرم در منطقه

فاکتور ارتفاع نسبی

عامل پنجم ارتفاعات نسبی است که تنوع ارتفاعات نسبی (محلی) را نشان می‌دهد که نشان دهنده انرژی نقش برجسته است (Zwoliński 2009). ارتفاع نسبی اندازه‌گیری ارتفاع یک مکان در رابطه است به اطرافش، نه سطح دریا. بنابراین، ارتفاع نسبی، ناچیز بودن یک نقطه ارتفاعی را در مقایسه با سایر نقاط جهان از بین می‌برد. این مرحله نقاط را از نظر اهمیت در منظر محلی مشخص می‌کند. همانطور که شکل (۷) و جدول (۵) نشان می‌دهند طبقه (V1) ۲۷ درصد، طبقه (V2) ۲۲ درصد، طبقه (V3) ۲۱ درصد، طبقه (V4) ۱۹ درصد و طبقه (V5) ۱۱ درصد منطقه را دربرگرفته‌اند.

جدول ۵: مساحت هر طبقه تنوع در لایه تنوع ارتفاع نسبی در منطقه به کیلومتر مربع

طبقه تنوع	ارتفاع	درصد
V1	۹۸۹	۲۷
V2	۸۰۲	۲۲
V3	۷۵۹	۲۱
V4	۶۷۷	۱۹
V5	۴۱۲	۱۱



شکل ۷: نقشه تنوع ارتفاع نسبی در منطقه

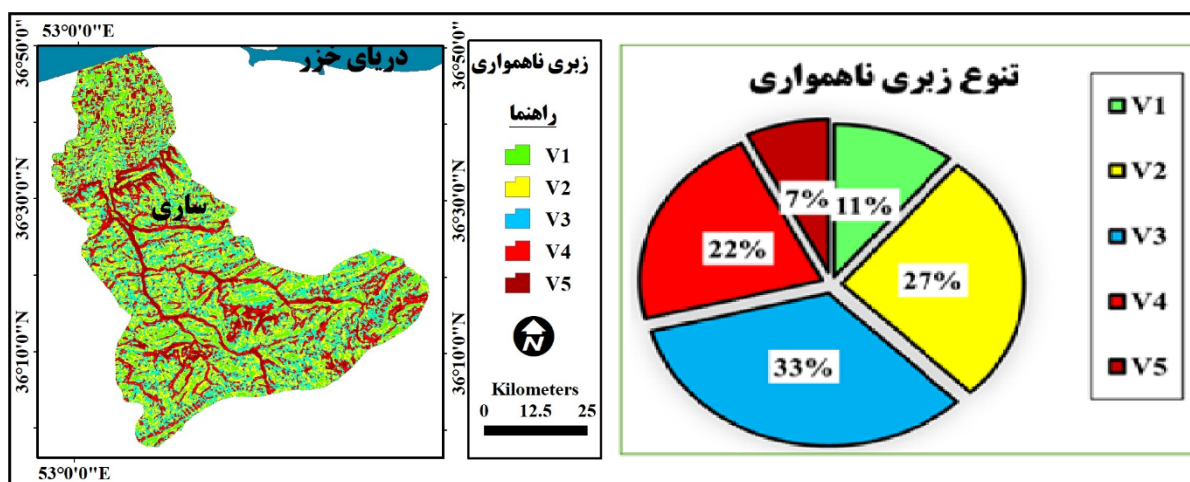
فاکتور زبری ناهمواری^{۱۶}

نقشه تنوع زبری ناهمواری شکل (۸) نشان می‌دهد که نواحی زیر ۳۰ متر ارتفاع ناهمواری در طبقه کم تا خیلی کم قرار دارند. این مناطق در امتداد دریا و دره‌های رودخانه‌ها و بخش‌های شمالی منطقه یافت می‌شوند. بخش قابل توجهی از شمال منطقه را سکونتگاه‌ها و فعالیت‌های انسانی اشغال کرده‌اند. در دامنه‌های رو به شمال فعالیت‌های باغداری و جدیداً توریستی غالب است. اکنون بسیاری از خانه‌ها در شیب‌های بیش از ۱۵ درجه ساخته شده‌اند. همانطور که شکل (۸) و جدول (۶) نشان می‌دهند طبقه (V1) ۱۱ درصد، طبقه (V2) ۲۷ درصد، طبقه (V3) ۳۳ درصد، طبقه (V4) ۲۲ درصد و طبقه (V5) ۷ درصد منطقه را دربرگرفته‌اند.

جدول ۶: مساحت هر طبقه تنوع در لایه تنوع زبری ناهمواری در منطقه به کیلومتر مربع

طبقه تنوع	زبری ناهمواری	درصد
V1	۴۱۱	۱۱
V2	۱۰۱۱	۲۷
V3	۱۲۶۴	۳۳
V4	۸۲۴	۲۲
V5	۲۷۴	۷

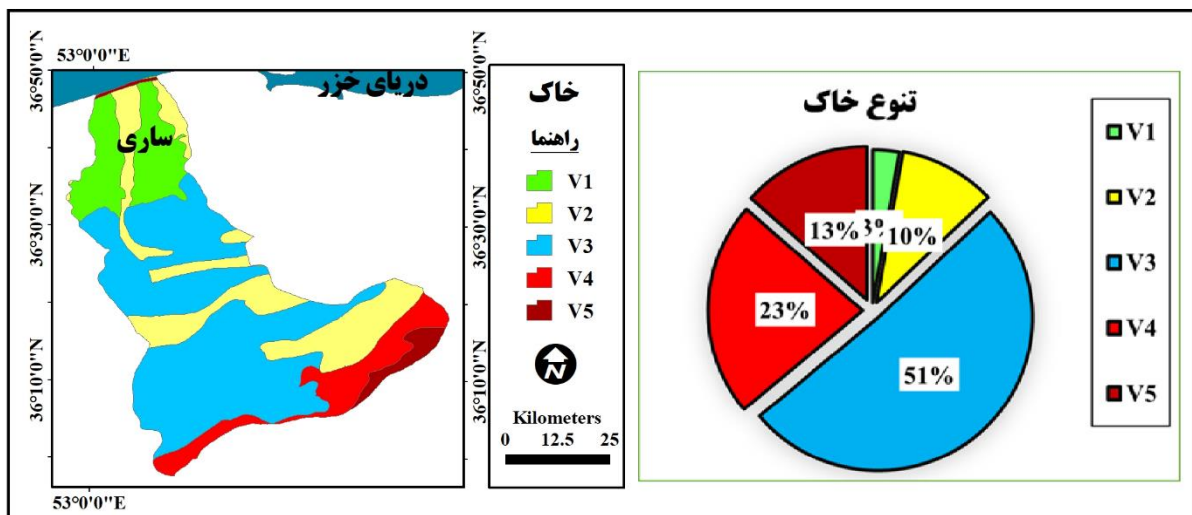
^{۱۶} - Relative height factor



شکل ۸: نقشه تنوع زبری ناهمواری در منطقه

فاکتور خاک^{۱۷}

از نظر خاک‌شناسی، بستر شهر ساری بر روی دشت‌های آبرفتی دامنه‌ای استقرار یافته است. این ناحیه شامل اراضی نسبتاً مسطح دامنه ارتفاعات بوده که منتهی به آبرفت‌ها و واریزه‌های بادبزی شکل سنگریزه‌دار می‌گردد و با شیب ملایم به طرف مرکز دشت کشیده می‌شود. این تیپ اراضی متشکل از مواد آبرفتی قدیمی است که به وسیله رودخانه‌های موقت و سیلاب‌ها حمل شده و به موازات کوه‌ها و در جهت عمود به آنها رسوبگذاری شده است. دشت‌های دامنه‌ای برحسب نوع خاک، پستی و بلندی، شوری و قلیائیت، شیب و مواد تشکیل‌دهنده و قدمت مواد رسوب‌گذاری شده به واحدهای مختلف تقسیم می‌شود. در محدوده شهر ساری، دشت‌های کوچک و بزرگ تشکیل شده از رسوبات رودخانه یا اراضی پست ساحلی تقریباً مقعر بوده و قسمتی از اراضی پست و گود که اکثراً مسطح یا کمی گود به نظر می‌رسد، دارای شوری و در بعضی مواقع قلیائی نیز می‌باشد. پوشش خاکی اراضی مذکور عمیق به رنگ قهوه‌ای مایل به خاکستری با بافت سنگین تا خیلی سنگین رسی است که در لایه‌های زیرین دارای مقدار متوسط پودر آهک می‌باشد. همانطور که شکل (۹) و جدول (۷) نشان می‌دهند طبقه (V1) ۳ درصد، طبقه (V2) ۱۰ درصد، طبقه (V3) ۵۱ درصد، طبقه (V4) ۲۳ درصد و طبقه (V5) ۱۳ درصد منطقه را دربرگرفته‌اند. قسمت‌های جنوبی منطقه نسبت شمال منطقه از تنوع خاک بیشتری برخوردار می‌باشند. بیشتر مساحت منطقه را طبقه (V3) با ۵۱ درصد در بر گرفته است.



شکل ۹: نقشه تنوع خاک در منطقه

جدول ۷: مساحت هر طبقه تنوع در لایه تنوع خاک در منطقه به کیلومتر مربع

طبقه تنوع	خاک	درصد
V1	۴۹۱	۳
V2	۸۲۳	۱۰
V3	۱۸۵۴	۵۱
V4	۳۶۹	۲۳
V5	۱۰۱	۱۳

شکل (۱۰)، تنوع ژئومورفودایورسیتی شهرستان ساری را بر پایه جمع‌وزنی شاخص‌های مطرح‌شده توسط مللی و همکاران (۲۰۱۷) و ناژور و زولینسکی (۲۰۱۴) نمایش می‌دهد. در این نقشه پنج طبقه (V1 تا V5) جهت نشان دادن دامنه تغییرات و میزان تنوع لندفرم‌ها و اشکال ژئومورفولوژی در سطح شهرستان استفاده شده است.

۱. بخش‌های شمالی (V1 و V2) - کمترین تنوع

ناحیه شمالی شهرستان ساری، که عمدتاً با رنگ سبز (V1) و زرد (V2) مشخص است، پایین‌ترین میزان تنوع ژئومورفودایورسیتی را دارا می‌باشد. این مناطق شامل دشت‌های کم‌ارتفاع ساحلی تا حاشیه دریای خزر بوده و به دلیل شرایط جغرافیایی خاص، رسوبات آبرفتی، همواری شدید و نبود ناهمواری‌های برجسته، تنوع اشکال زمین در آنها محدود است. این بخش‌ها بیشتر میزبان فعالیت‌های کشاورزی، سکونتگاه‌ها و زیرساخت‌های شهری هستند، که خود نشان‌دهنده اثرات انسان‌ساخت بر روند طبیعی کاهش تنوع ژئومورفولوژیک است.

۲. مناطق میانی (V3) - تنوع متوسط

طبقه سوم (V3) با رنگ آبی عمدتاً در نواحی میانی شهرستان پراکنده است و معرف مناطقی است که ویژگی‌های فیزیوگرافی، ساختارهای زمین‌شناسی، و فرسایش یا ته‌نشست رودخانه‌ای موجب ایجاد ناهمواری و شکل‌گیری تنوع متوسط ژئومورفولوژیکی شده است. وجود دامنه‌های ملایم، تپه‌های پراکنده و برخی دره‌ها در این ناحیه، نشان‌دهنده تاثیر ترکیبی فرآیندهای طبیعی و نیمه‌انسان‌ساخت بر تنوع محیط است.

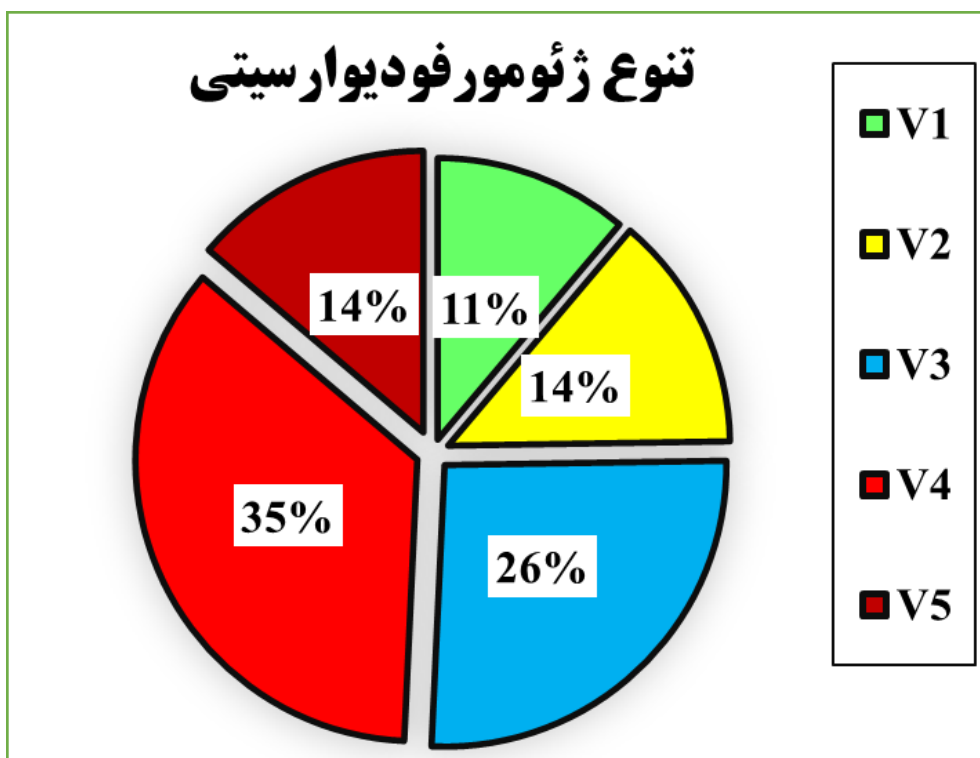
۳. بخش‌های مرکزی، جنوبی و جنوب‌شرقی (V4 و V5) - بیشترین تنوع قسمت اعظم و گسترده‌ای از شهرستان با رنگ‌های قرمز (V4) و قهوه‌ای (V5) نمایش داده شده که بالاترین درجات تنوع ژئومورفودیورسیتی متعلق به آن است. این نواحی غالباً کوهستانی و نیمه‌کوهستانی هستند، وجود ارتفاعات پیچیده، گسل‌ها، دامنه‌های شیب‌دار، صخره‌ها، و کارستی بودن برخی بخش‌ها باعث شده است که تنوع زمین‌شناسی، لندفرم، شیب، زبری ناهمواری و ارتفاع نسبی به حداکثر برسد.

در این مناطق، فرآیندهای زمین‌ساختی فعال، فرسایش شدید، تفاوت بارز ارتفاعی، رودخانه‌ها و آبراهه‌های پرشیب و پیچ‌درپیچ، و لایه‌های زمین‌شناسی متفاوت، همگی موجب ایجاد چشم‌اندازهای متنوع و پتانسیل‌های منحصربفرد زمین‌گردشگری و زیست‌محیطی شده‌اند. این طبقات بهترین مناطق برای توسعه ژئوتوریسم، تحقیق علوم زمین و حفاظت از میراث ژئومورفولوژیکی شهرستان محسوب می‌شوند.

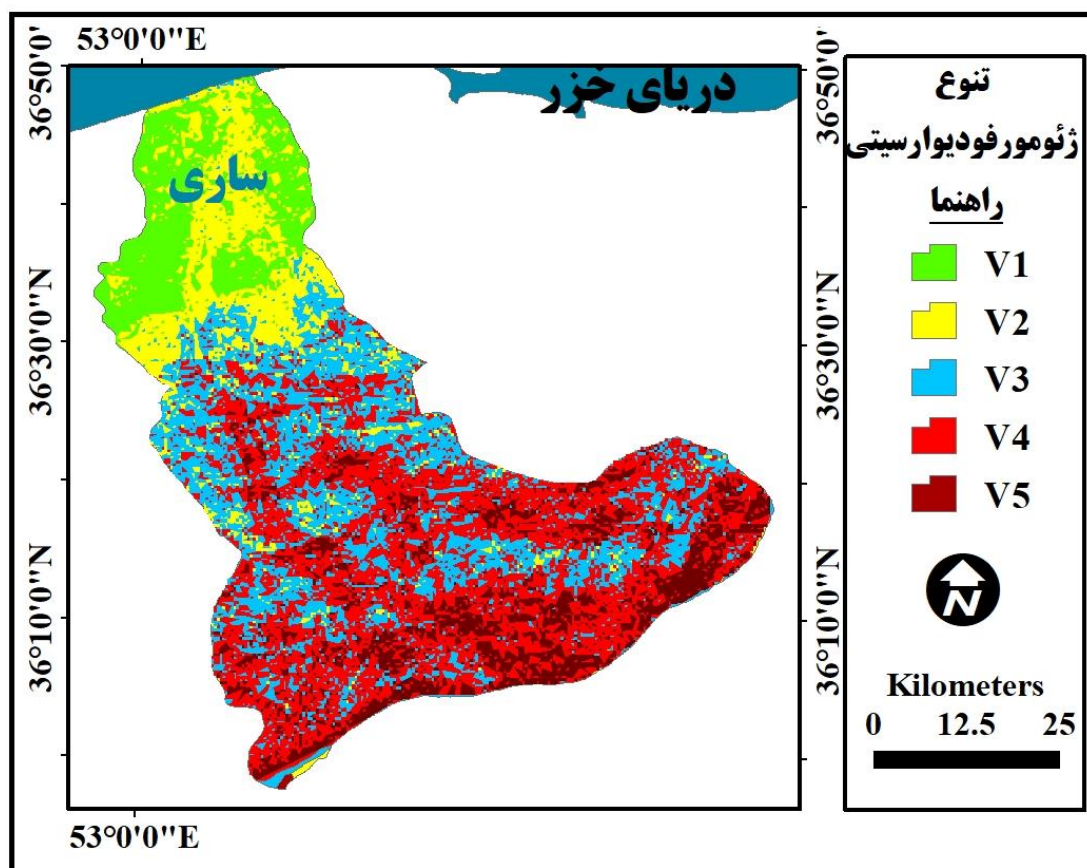
جدول (۸) مساحت هر طبقه تنوع در لایه تنوع خاک در منطقه به کیلومتر مربع نشان می‌دهد. بر اساس این داده‌ها، بیشترین سهم مساحت مربوط به طبقه V4 است که ۱۲۷۱ کیلومتر مربع را پوشش داده و معادل ۳۵ درصد از کل منطقه است. این نشان می‌دهد که بخش وسیعی از منطقه دارای سطح بالای تنوع خاک است و احتمالاً پراکنش یکنواختی ندارد. طبقه V1 با مساحت ۴۰۰ کیلومتر مربع و سهم ۱۱ درصدی کمترین میزان پوشش را دارد و به نظر می‌رسد مناطق با کمترین تنوع خاک در بخش‌های محدودی از منطقه متمرکز شده‌اند. به طور کلی، داده‌ها نشان می‌دهند که بیشتر منطقه در طبقات میانی و بالای تنوع خاک قرار دارد و بخش‌های کم تنوع نسبتاً کوچک هستند.

جدول ۸: مساحت هر طبقه تنوع در لایه تنوع خاک در منطقه به کیلومتر مربع

طبقه تنوع	تنوع ژئومورفودیورسیتی	درصد
V1	۴۰۰	۱۱
V2	۴۸۷	۱۴
V3	۹۳۱	۲۶
V4	۱۲۷۱	۳۵
V5	۴۹۴	۱۴



شکل ۹: نمودار درصد مساحت هر طبقه تنوع ژئومورفودیوار سیتی در شهرستان ساری



شکل ۱۰: نقشه تنوع ژئومورفودیوار سیتی در شهرستان ساری

یافته‌های ناشی از خوشه‌بندی مبتنی بر یادگیری ماشین

برای تحلیل دقیق‌تر الگوهای فضایی تنوع ژئومورفودایورسیتی در شهرستان ساری، از الگوریتم‌های خوشه‌بندی مبتنی بر یادگیری ماشین استفاده شد. **جدول (۹) مقایسه ویژگی‌های خوشه‌های ژئومورفودایورسیتی شهرستان ساری را نشان می‌دهد.** در این راستا، هفت لایه اطلاعاتی شامل زمین‌شناسی، تراکم زهکشی، شیب، لندفرم، ارتفاع نسبی، زبری ناهمواری و خاک که پیش‌تر تهیه و نرمال‌سازی شده بودند، به‌عنوان ورودی به الگوریتم‌های خوشه‌بندی داده شدند. هدف از این بخش، گروه‌بندی نواحی همگن بر اساس ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی و شناسایی الگوهای پنهان در داده‌ها بود.

در این مطالعه، از الگوریتم‌های K-Means و DBSCAN به‌عنوان دو روش پرکاربرد خوشه‌بندی بهره گرفته شد. الگوریتم K-Means با تعیین مقدار بهینه خوشه‌ها از طریق شاخص‌هایی مانند معیار سیلوئت (Silhouette) و ویرانس درون‌خوشه‌ای، اجرا شد. نتایج نشان داد که تقسیم‌بندی منطقه به چهار خوشه اصلی، تعادل مناسبی میان فشردگی درون‌خوشه‌ای و جدایی بین خوشه‌ها ایجاد می‌کند. الگوریتم DBSCAN نیز با تنظیم مناسب پارامترهای ϵ و MinPts، توانست نواحی پرت و غیرنرمال را از نواحی ساختاریافته تفکیک کند.

بر اساس نقشه خوشه‌بندی ارائه شده، شهرستان ساری به لحاظ ژئومورفودایورسیتی به چهار خوشه یا طبقه (V_1, V_2, V_3, V_4) تقسیم‌بندی شده است که هرکدام بیانگر میزان متفاوتی از تنوع زمین‌شناسی و ژئومورفولوژیکی در منطقه هستند. این خوشه‌بندی، بر مبنای شاخص‌ها و معیارهای انتخاب‌شده (مانند زمین‌شناسی، شیب، زبری ناهمواری، لندفرم، ارتفاع نسبی و ...) انجام گرفته و وضعیت پراکنش فضایی عوامل را به‌خوبی نشان می‌دهد.

طبقه V_1 (سبز)، نمایانگر کمترین میزان ژئومورفودایورسیتی بوده و عمدتاً در بخش‌های شمالی شهرستان قرار گرفته است؛ این نواحی نزدیک به دریای خزر، شامل دشت‌های هموار، اراضی آبرفتی و کشت‌پذیر و سکونتگاه‌های جمعیتی است. کم بودن تنوع اشکال زمین در این قسمت، ارتباط مستقیمی با فرایندهای رسوب‌گذاری و نبود پستی و بلندی غالب دارد. همین ویژگی باعث شده که این نواحی اغلب به عنوان مراکز توسعه شهری، فعالیت‌های کشاورزی و گردشگری ساحلی مورد استفاده قرار گیرند.

طبقه V_2 (زرد)، بیانگر سطح تنوع پایین تا متوسط بوده و به‌صورت پراکنده در مرز مناطق دشتی و نیمه‌کوهستانی رویت می‌شود. این مناطق دارای ناهمواری‌های ملایم‌تر و اشکال ترکیبی از فرایندهای فرسایشی، ته‌نشست رسوبات رودخانه‌ها و تغییرات جزئی در ارتفاع هستند. این خوشه به منزله یک منطقه گذار محسوب می‌شود که بین دشت‌های شمالی و نواحی مرتفع‌تر جنوب و مرکز شهرستان قرار گرفته است. طبقه V_3 (قرمز)، بیشترین سطح پوششی را در مناطق میانی و جنوبی نقشه به خود اختصاص داده و معرف مناطق با ژئومورفودایورسیتی متوسط تا زیاد است. در این نواحی تنوع اشکال زمین افزایش می‌یابد و فرایندهای متنوعی نظیر گسل‌خوردگی، فرسایش آبراهه‌ها، وجود دامنه‌ها و تپه‌های متعدد دیده می‌شود. چنین مناطقی اغلب گذرگاه رودخانه‌ها و دارای فراخوراک پیچیده‌ای از پهنه‌های مرتفع، شیب‌ها و دره‌ها هستند. این طبقه از لحاظ علمی دارای اهمیتی ویژه است زیرا مناطق مستعد مطالعات بیشتر ژئومورفولوژی و ژئوتوریسم در آن‌ها قرار دارند.

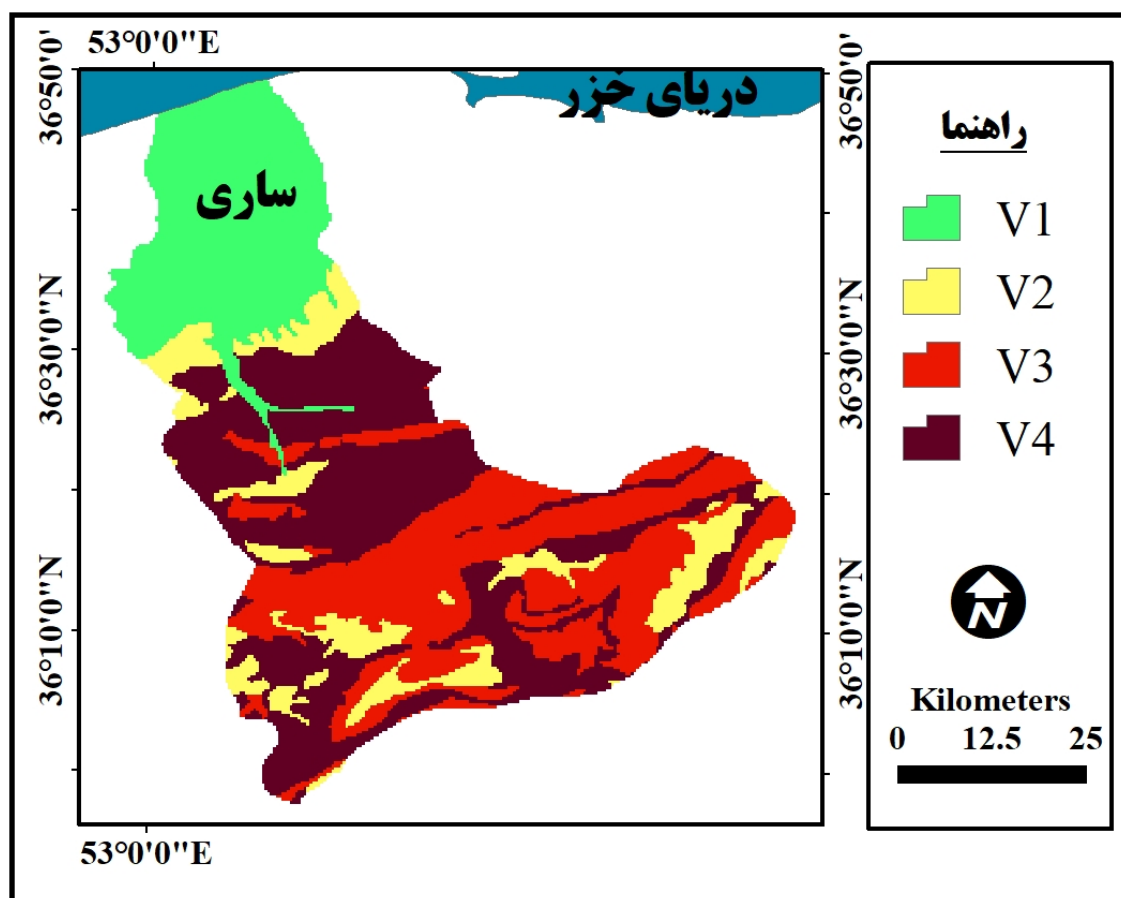
در نهایت، طبقه V4 (بنفش/قهوه‌ای تیره)، بالاترین میزان ژئومورفودایورسیتی را نشان می‌دهد و عمدتاً به‌صورت کانونی و پیوسته در مناطق جنوبی و جنوب‌شرقی شهرستان برجسته شده است یا در بخش‌های مرکزی پهنه‌هایی از آن دیده می‌شود. این نواحی معمولاً دارای ناهمواری‌های تند، دامنه‌ها و یال‌های بلند، ارتفاعات و گسل‌های فعال، صخره‌ها و اشکال منحصر به فرد طبیعی هستند. ژئومورفولوژی بسیار متنوع این منطقه بیانگر فعالیت شدید فرآیندهای زمین‌ساختی، فرسایشی و رسوبی می‌باشد که باعث شکل‌گیری پتانسیل‌های کم‌نظیر ژئوهریتیج و ژئوتوریسم در این بخش از شهرستان شده است.

جدول ۹: مقایسه ویژگی‌های خوشه‌های ژئومورفودایورسیتی شهرستان ساری

ویژگی / خوشه‌ها	خوشه ۱ (دشت شمالی)	خوشه ۲ (میانه)	خوشه ۳ (دامنه‌ای/شرقی)	خوشه ۴ (کوهستانی جنوب)
میانگین ارتفاع (متر)	۳۵	۲۴۰	۶۸۰	۱۳۸۰
میانگین شیب (%)	۱/۵	۷/۸	۱۸/۴	۳۵/۶
تراکم زهکشی (km/km ²)	۰/۴۵	۱/۲	۲/۴	۳/۱
درجه زبری ناهمواری	پایین	متوسط	بالا	بسیار بالا
تنوع زمین‌شناسی	بسیار کم	متوسط	زیاد	بسیار زیاد
نوع خاک غالب	آبرفتی	لوم و رسی	رس‌های قرمز و سنگ‌ریزه‌ای	خاک‌های کوهستانی سنگین
لندفرم غالب	دشت، جلگه	تپه‌های ملایم	دامنه‌های شرقی	قله‌ها، دره‌های تند
پویایی ژئومورفولوژیک	پایین	متوسط	بالا	بسیار بالا
درصد پوشش خوشه از منطقه	٪۲۲	٪۱۲	٪۲۹	٪۳۷

نقشه فضایی خوشه‌بندی (شکل ۱۱) نشان داد که با وجود پیوستگی جغرافیایی، تفاوت‌های معناداری در ویژگی‌های مورفولوژیکی بخش‌های مختلف شهرستان ساری وجود دارد. این تفاوت‌ها به‌واسطه عوامل زمین‌شناسی، اقلیمی، فرایندهای ژئومورفیک و همچنین تأثیرات انسانی شکل گرفته‌اند. استفاده از خوشه‌بندی مبتنی بر یادگیری ماشین کمک کرد تا بدون مداخله ذهنی و صرفاً بر اساس شباهت‌های آماری موجود در داده‌ها، نواحی همگن از نظر ژئومورفودایورسیتی استخراج شود. این رویکرد ضمن کاهش

پیچیدگی تحلیل‌های کلاسیک، امکان تصمیم‌گیری مکانی دقیق‌تر برای اهداف مدیریت سرزمین، حفاظت محیطی و برنامه‌ریزی فضایی را فراهم می‌سازد.



شکل ۱۱: نقشه خوشه‌بندی شهرستان ساری

نتیجه‌گیری

ژئومورفودایورسیتی علمی است که با شناسایی و معرفی تنوع‌های زمینی به برنامه‌ریزی و مدیریت حفاظت از طبیعت می‌پردازد. هدف این پژوهش شناسایی، تفسیر و ارزیابی عناصر تنوع زمینی به منظور سازمان‌دهی مناطق خاص و کل زمین و هماهنگی حفاظت یا مدیریت کارآمد است. بدین منظور در ابتدا هفت عامل تراکم زهکشی، زمین‌شناسی، خاک، وضعیت شیب، لندفرم، زبری ناهمواری و ارتفاع نسبی برای ارزیابی تنوع ژئومورفودایورسیتی بر اساس شاخص GmI در نظر گرفته شده است. یافته‌های پژوهش نشان داد که منطقه به لحاظ زمین‌شناسی از تنوع زیادی برخوردار است. و تمامی سنگ‌ها و سازندها از آذرین، رسوبی، دگرگونی، تراس‌های ابرفتی را دربرمی‌گیرد که با نتایج تحقیق مقصودی و همکاران (۱۳۹۸) و Burnelli و همکاران (۲۰۲۵) مطابقت دارد. تنوع زمین‌شناسی در قسمت‌های جنوبی بیش از مناطق شمالی می‌باشد. بیست و یک درصد منطقه در طبقه زیاد و خیلی زیاد قرار دارند که با توجه به مساحت منطقه از تنوع زهکشی خوبی برخوردار می‌باشد که با نتایج تحقیق Burnelli و همکاران (۲۰۲۳) و López Bedoya و همکاران (۲۰۲۵) مطابقت دارد. یافته‌های پژوهش نشان داد که صخره‌ها فقط حدود ۶ درصد از رشته کوه را اشغال می‌کنند. شیب‌های طبقه پنج در مکان‌های مرتفع در قسمت‌های جنوبی محدوده یافت می‌شوند. مناطق

مسکونی در شیب‌های کم و هموار گسترش یافته‌اند به خصوص مناطق شمالی منطقه که عمدتاً شهرهای قرار گرفته‌اند و مراکز توریستی واقع شده‌اند. ۲۲ درصد منطقه در طبقه زیاد و خیلی زیاد تنوع شیب قرار دارند.

که به لحاظ توزیع مکانی در قسمت‌های جنوبی و مرکزی منطقه واقع شده‌اند. این نتایج با مطالعات **Migon**

(۲۰۲۱) مطابقت دارد. نتایج نشان داد که تنوع ارتفاع نسبی از قسمت‌های جنوبی که مرتفع هستند به سمت ساحل که کم ارتفاع هستند کاهش می‌یابد این با نتایج تحقیق مختاری و همکاران (۱۴۰۱) مطابقت دارد. نقشه تنوع زبری ناهمواری نشان داد که بیش از ۳۸ درصد از محدوده در طبقه کم تا بسیار کم قرار دارند که با نتایج تحقیق مقصودی و همکاران (۱۳۹۸) مطابقت دارد و در قسمت‌های شمال منطقه واقع شده‌اند. نقشه نهایی تنوع ژئومورفودایورسیتی نشان داد بیش از نیمی از منطقه در کلاس تنوع زیاد و خیلی زیاد قرار دارد که با نتایج تحقیق مختاری و همکاران (۱۴۰۲)، **Burnelli** و همکاران (۲۰۲۵)، **Bedoya** و همکاران (۲۰۲۵) و سیستانی بدوئی (۱۴۰۰) مطابقت دارد. در این مطالعه هم به مانند مطالعات مختاری و همکاران (۱۴۰۲)، اسفندیاری و همکاران (۱۴۰۲) و سیستانی بدوئی (۱۴۰۰) به این نتیجه رسیده است نتایج حاصل از این پژوهش می‌تواند اهمیت تنوع زمینی را در منطقه نمایش داده و در زمینه مدیریت میراث ژئومورفولوژیک و چگونگی حفاظت بهتر از این منابع مورد استفاده مدیران و تصمیم گیرندگان قرار گیرد.

یافته‌های حاصل از تحلیل خوشه‌بندی مبتنی بر یادگیری ماشین با استفاده از روش‌های طبقه‌بندی بدون نظارت (نظیر ISODATA یا K-means) نیز تأییدی بر نتایج حاصل از شاخص GmI بود. در این تحلیل، لایه‌های منتخب شامل زمین‌شناسی، شیب، زهکشی، لندفرم، ارتفاع نسبی، زبری و خاک به عنوان ورودی الگوریتم‌های خوشه‌بندی وارد شده و با ادغام این متغیرها، مناطق همگن از نظر تنوع ژئومورفولوژیکی شناسایی شدند. نتایج نشان داد که منطقه به چند خوشه مشخص با ویژگی‌های متمایز تفکیک شد؛ به گونه‌ای که خوشه‌های با تنوع بالا عمدتاً در نواحی جنوبی و مرکزی محدوده که دارای شیب‌های تند، ارتفاعات زیاد، ناهمواری شدید و زمین‌شناسی متنوع بودند، تمرکز یافته‌اند. در مقابل، خوشه‌های با تنوع کمتر، در نواحی شمالی و حاشیه‌ای منطقه که خصوصیات زمین‌ریخت‌شناسی ساده‌تر، شیب ملایم و ارتفاع پایین دارند، مشاهده شدند.

این تقسیم‌بندی خوشه‌ای، امکان تحلیل فضایی دقیق‌تر و هدفمندتری از مناطق با اولویت حفاظتی بالاتر را فراهم کرده و به وضوح نشان داد که بسیاری از مناطقی که بر اساس شاخص GmI در طبقه‌های بالا قرار داشتند، در خوشه‌های با بیشترین میزان پیچیدگی ژئومورفولوژیکی نیز قرار گرفتند. این انطباق نشان‌دهنده دقت و اعتبار رویکرد خوشه‌بندی در تحلیل تنوع زمینی است. از این‌رو می‌توان گفت روش خوشه‌بندی در کنار شاخص GmI، ابزاری مکمل و کارآمد برای شناسایی، طبقه‌بندی و مدیریت بهینه مناطق دارای ارزش ژئومورفودایورسیتی محسوب می‌شود.

۱. اسفندیاری، مهدیه، مختاری، داوود، رضائی مقدم، محمدحسین، (۱۴۰۲)، کاربرد شاخص‌های ژئومورفومتریک در تعیین کمیت ژئودایورسیتی مناطق کوهستانی مطالعه موردی: کوهستان میشوداغی، شمال غرب ایران، مجله جغرافیا و برنامه ریزی محیطی، دوره ۳۴، شماره ۴، صص ۱-۲۲. [10.22108/gep.2023.135108.1543](https://doi.org/10.22108/gep.2023.135108.1543)

۲. پورخسروانی، محسن، کریمی، صادق، دره کردی، زهرا، (۱۴۰۳)، ارزیابی ژئومورفودایورسیتی حوضه لوت، مجله آمایش جغرافیایی فضا، شماره ۵۳، صص ۶۳-۷۸.

۳. رئیسیان، میثم، ایلانلو، مریم، ابراهیمی، لیلا، بزرگمهر، کیا، (۱۴۰۰)، بررسی میزان تاب‌آوری شهری با استفاده مدل Waspas و WP (نمونه موردی: شهر ساری)، مجله مدیریت جغرافیا و مخاطرات محیطی، دوره ۱۰، شماره ۳۷، صص ۲۴۱-۲۲۵. [10.22067/geoe.2021.69038.1023](https://doi.org/10.22067/geoe.2021.69038.1023)

۴. سیستانی بدوئی، مسعود، فتوحی، صمد، نگارش، حسین، رامشت، محمدحسین، روستایی، مه آسا، (۱۴۰۰)، بررسی تفاوت ژئودایورسیتی و ژئومورفودایورسیتی منطقه ساحلی دریای عمان و زون مکران از دماغه جاسک تا خلیج گواتر، مجله جغرافیا و توسعه، دوره ۱۹، شماره ۶۳، صص ۳۹-۶۶. [10.22111/j10.22111.2021.6169](https://doi.org/10.22111/j10.22111.2021.6169)

۵. مختاری، لیلا گلی، امیراحمدی، ابوالقاسم، زندی، رحمان، گنجی نیا، ملیحه، (۱۴۰۲)، تحلیل تنوع زمینی (ژئودایورسیتی) در محدوده کوه‌های بینالود، مطالعات جغرافیایی مناطق خشک، دوره ۱۴، شماره ۵۲، صص ۲۴-۴۱.

۶. مختاری، داود، رضایی مقدم، محمد حسین، اسفندیاری، مهدیه، (۱۴۰۱)، شاخص ژئومورفودایورسیتی: کمی کردن تنوع چشم انداز طبیعی و لندفرم‌های کوهستان میشو، شمال غرب ایران، مجله پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، دوره ۱۱، شماره ۳، صص ۲۱۹-۲۰۰. [10.22034/gmpj.2022.333913.1338](https://doi.org/10.22034/gmpj.2022.333913.1338)

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

8. Alvioli, M. (2020). Administrative boundaries and urban areas in Italy: A perspective from scaling laws. *Landscape and Urban Planning*, 204, 103906.

<https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2020.103906>

9. Arian, M., et al. (2021). Applying quantitative methods for geodiversity assessment in the Zagros Mountains, Iran. *Geoheritage*, 13, 31.

10. Bedoya, J. L. (2025). Ephemeral geomorphodiversity: Conceptual debate and implications for landscape studies. *Geomorphology*, 471, 109569. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2025.109569>

- 11.Brandolini, P., Cappadonia, C., Luberti, G., Donadio, C., Stamatopoulos, L., Di Maggio, C., Faccini, F., Stanislao, C., Vergari, F., Paliaga, G., Agnesi, V., Alevizos, G., & Del Monte, M. (2020). Geomorphology of the Anthropocene in Mediterranean urban areas. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 44, 461–494. https://doi.org/10.1177/0309133319881108
- 12.Brilha, J., et al. (2022). Geoheritage and geodiversity in Iran: A review. *Geoheritage*, 14(2), 167–184.
- 13.Bucci, F., Santangelo, M., Fongo, L., Alvioli, M., Cardinali, M., Melelli, L., & Marchesini, I. (2022). A new digital lithological map of Italy at the 1:100000 scale for geomechanical modelling. *Earth System Science Data*, 14, 4129–4151. https://doi.org/10.5194/essd-14-4129-2022
- 14.Burnelli, M., Alessia, P., Maurizio Del, M., & Michele, D. (2023). Land surface diversity: A geomorphodiversity index of Italy. *Earth Surface Processes and Landforms*, 48(15), 3025–3040. https://doi.org/10.1002/esp.5679
- 15.Burnelli, M., Alessia, P., Maurizio Del, M., Michele, D., Melelli, L., Reame, F., Vergari, F., & Alvioli, M. (2025). Does anthropogenic morphogenesis contribute to geomorphodiversity in urban environments? *Geomorphology*, 471, 109582. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2024.109582
- 16.Emami, H., et al. (2022). A framework for integrating geodiversity into environmental management in Iran. *Geoheritage*, 14, 120.
- 17.Gneiss, J. (1967). *Geology of the Windsor quadrangle, Massachusetts. Open-File Report 67-170.*
- 18.Gray, M. (2008). Geodiversity: Developing the paradigm. *Proceedings of the Geologists' Association*, 119, 287–298. https://doi.org/10.1016/S0016-7878(08)80307-0
- 19.Hamilton, R., & Rae, A. (2020). Regions from the ground up: A network partitioning approach to regional delineation. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, 47, 775–789. https://doi.org/10.1177/2399808318804226
- 20.Hiwahashi, J., & Yamazaki, D. (2022). Global polygons for terrain classification divided into uniform slopes and basins. *Progress in Earth and Planetary Science*, 9, 33. https://doi.org/10.1186/s40645-022-00487-2

21. López Bedoya, J., Raúl, A., & Mikkan, Valcárcel Díaz, M. (2025). Ephemeral geomorphodiversity: Conceptual debate, valuation, and heritage management. *Geomorphology*, 471, 109569. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2024.109569>
22. Melelli, L., Vergari, F., Liucci, L., & Del Monte, M. (2017). Geomorphodiversity index: Quantifying the diversity of landforms and physical landscape. *Science of the Total Environment*, 584, 701–714.
23. Migon, P. (2021). Assessing regional geodiversity: The Iberian Peninsula. *Geomorphology*, 471, 109569. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2021.109569>
24. Mortezaei, K., et al. (2021). Assessment of geodiversity and geoconservation priorities in the Alborz Mountains, Iran. *Geoheritage*, 13(4), 93.
25. Mosavi, S. J., et al. (2021). Geoconservation and geodiversity potential of the Makran coastal region, SE Iran. *Geoheritage*, 13, 75.
26. Najwer, A., & Zwoliński, Zb. (2014). The landform geodiversity assessment method – A comparative analysis for Polish and Swiss mountainous landscape. *IGU 2014 Book of Abstracts*, 1201.
27. Schiavina, M., Melchiorri, M., Freire, S., Florio, P., Ehrlich, D., Tommasi, P., Pesaresi, M., & Kemper, T. (2022). Land use efficiency of functional urban areas: Global pattern and evolution of development trajectories. *Habitat International*, 123, 102543. <https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2022.102543>
28. Thomas, M. (2012). A geomorphological approach to geodiversity: Its applications to geoconservation and geotourism. *Quaestiones Geographicae*, 31, 81–89.
29. United Nations. (2018). The World's Cities in 2018. Department of Economic and Social Affairs, Population Division. Data booklet, ST/ESA/SER.A/417.
30. Zamani, M., et al. (2020). Mapping geodiversity for geoheritage site management: A case study from the Lut Desert, Iran. *Geoheritage*, 12, 60.
31. Zumpano, V., Ardizzone, F., Bucci, F., Cardinali, M., Fiorucci, F., Parise, M., Pisano, L., Reichenbach, P., Santaloia, F., Santangelo, M., Wasowski, J., & Lollino, P. (2021). The relation of spatio-temporal distribution of landslides to urban development (a case study from the Apulia region, Southern Italy). *Journal of Maps*, 17, 133–140.

<https://doi.org/10.1080/17445647.2020.1746417>

32. Zwoliński, Z., Najwer, A., & Giardino, M. (2018). Chapter 2 – Methods for assessing geodiversity. In E. Reynard & J. Brilha (Eds.), *Geoheritage* (pp. 27–52). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809531-7.00002-2>

Geomorphodiversity Calculation and Analysis (Case Study: Sari County)

Mohsen Eslami Akandi¹, Maryam Ilanlou², Leyla Ebrahimi³

1. Department of Geography, Chalous, Islamic Azad University, Chalus, Iran
Eslami.mohsen58@gmail.com)

2. Department of Geography, Mahs.C. Islamic Azad University, Mahshahr, Iran
(Corresponding Author) m.ilanlou@mhriau.ac.ir

3. Department of Geography, Chalous, Islamic Azad University, Chalus, Iran,
Leyla.ebrahimi@iauc.ac.ir

Abstract:

Knowing the potentials in different regions of the country can lead to the development of geotourism and to sustainable economic and social prosperity and better life and well-being for its residents. Geomorphodiversity is a part of geodiversity that deals with the geomorphological assessment of a territory in terms of the quantity and number of different types of landforms externally and internally. This paper uses SRTM data and GIS techniques to assess the geomorphodiversity of Sari County. Suitable factors for assessing geomorphodiversity diversity were identified as geology, slope condition, soil, landform location, relative elevations, drainage density, and roughness. After preparing the maps and preparing each one, each factor was finally classified into five classes by applying natural breaks, including V1 very low V2, low, V3 medium, V4 and high V5 and very high. The index based on the GmI index was used to evaluate geomorphodiversity. The final map of geomorphodiversity diversity was obtained from the weighted sum overlap of the seven factor maps. The results show that more than half of the region is 35% in the high class (V4) and 14% in the class (V5). These areas are located in the southern and eastern parts of the region. The northern parts of the region have less geomorphodiversity diversity. We conclude that these features are very important from a scientific and aesthetic point of view, so the management of such environments is mandatory in terms of ecotourism.

Keywords: Geological diversity, geomorphology, landform, Sari County