

طبقه‌بندی خودکار لندفرم‌های حوضه آبخیز با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی (مطالعه موردی: حوضه آبخیز بروجن در استان چهارمحال و بختیاری)

حسین بهرامی* - دانشجوی دکترای بیابان‌زدایی، دانشگاه هرمزگان
احمد نوحه‌گر - دانشیار دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه هرمزگان
وفا محمودی - کارشناس ارشد سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشگاه شهید بهشتی

پذیرش مقاله: ۱۳۹۲/۰۴/۲۰ تأیید نهایی: ۱۳۹۲/۰۹/۱۶

چکیده

لندفرم یک عارضه ژئومورفیک از سطح زمین است که خصوصیات ظاهری خاص داشته و شکل آن را می‌توان تشخیص داد. بنیان و اساس شناسایی و طبقه‌بندی لندفرم‌ها برپایه ژئومورفومتری است. ژئومورفومتری به کمیت عناصر اصلی ریخت‌شناسی زمین، از جمله شیب، جهت شیب، ارتفاع و اختلاف ارتفاع نسبی عناصر، موقعیت مکانی عناصر نسبت به هم، وضعیت شبکه زهکشی و میزان تحدب یا تقعر عناصر می‌پردازد. در حال حاضر طبقه‌بندی لندفرم‌ها عموماً مبتنی بر تشخیص کارشناسی است که به طریق دستی و با استفاده از عکس‌های هوایی، نقشه‌های توپوگرافی و برداشت‌های صحرایی انجام می‌گیرد که روشی زمان‌بر، پرهزینه، کم‌دقت و تکرارنشده است. در این پژوهش با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی و سه معیار شاخص TPI، شیب و موقعیت مکانی عوارض سطح زمین، به طبقه‌بندی خودکار لندفرم‌های حوضه آبخیز بروجن اقدام شده است. نتایج نشان داد که این روش توانایی خوبی در جداسازی و طبقه‌بندی لندفرم‌ها دارد؛ به‌گونه‌ای که ۹ لندفرم در حوضه آبخیز بروجن شناسایی و طبقه‌بندی شد و بدین ترتیب رهیافتی برای طبقه‌بندی خودکار لندفرم‌های یک حوضه آبخیز ارائه شده تا زمینه انجام مطالعات جامع برای روش‌های کمی و دقیق، به‌منظور شناسایی و طبقه‌بندی خودکار لندفرم‌ها در حوضه‌های آبخیز فراهم شود.

کلیدواژه‌ها: حوضه آبخیز بروجن، سیستم اطلاعات جغرافیایی، شاخص TPI، طبقه‌بندی خودکار، لندفرم.

مقدمه

لندفرم‌ها^۱ بیانگر فرآیندهای تأثیرگذار بر عوارض سطح زمین در گذشته و حال هستند و اطلاعات مهمی در مورد ویژگی‌ها و پتانسیل‌های زمین فراهم می‌کنند (ایتزلمولر و سولبک، ۲۰۰۰). لندفرم‌ها، حاصل اثرات متقابل اقلیم و زمین‌شناسی است و بر جریان آب سطحی، انتقال رسوب، خصوصیات خاک و اقلیم در مقیاس محلی تا منطقه‌ای تأثیرگذارند، به‌علاوه پدیده‌هایی همچون پوشش گیاهی نیز به‌طور مستقیم از الگوهای لندفرم تأثیر می‌پذیرند (کوپس و همکاران، ۱۹۹۸). محققان برحسب تخصص خود و هدفی که از طبقه‌بندی عوارض سطح زمین داشته‌اند، تعاریف متفاوتی از لندفرم ارائه کرده‌اند. برای نمونه، یک جغرافیای طبیعی به نام ویدوو (۱۹۸۴) در تعریف لندفرم‌ها به خصوصیات ظاهری و ریخت‌شناسی سطح زمین تمرکز کرده، اما هامر (۱۹۹۷) که یک خاک‌شناس است در تعریف لندفرم، علاوه بر شکل ظاهری، به ارتباط آن با سایر لندفرم‌ها و خصوصیات زمین‌شناسی و ویژگی‌های خاک نیز توجه داشته است، یا پیکه (۲۰۰۹) لندفرم را بخشی از سطح زمین توصیف می‌کند که با ویژگی‌های توپوگرافیک خاص از لندفرم‌های دیگر جدا شده و مورفومتری همگنی دارد. به باور بتس و جکسون (۱۹۸۷) با وجودی که در دایره‌المعارف زمین‌شناسی تعاریف مختلفی از لندفرم ارائه شده، اما وجه مشترک همه این تعاریف آن است که لندفرم یک عارضه فیزیکی از سطح زمین است که خصوصیات ظاهری خاص داشته و شکل آن را می‌توان تشخیص داد.

به‌دلیل پیچیدگی سطح زمین، ابداع روش‌هایی کمی برای تقسیم‌بندی این سطح پیچیده به چند واحد کوچک‌تر و یکنواخت‌تر، ضرورت دارد، طبقه‌بندی سطح زمین به لندفرم‌ها، علاوه بر بیان سریع خصوصیات سطح زمین، اطلاعات سودمندی برای متخصصان فراهم می‌کند. به‌دلیل همگنی لندفرم‌ها، نتیجه نهایی شناسایی و طبقه‌بندی لندفرم، فراهم شدن امکان برنامه‌ریزی و مدیریت مؤثر و کارا برای این واحدها خواهد بود، به همین دلیل طبقه‌بندی لندفرم‌ها در مواردی مانند پهنه‌بندی واحدهای ژئومورفولوژی، تهیه نقشه زمین‌شناسی و سنگ‌شناسی، تهیه نقشه خصوصیات خاک (مانند کارهای گسler، مور، مک‌کنزی و ریان، ۱۹۹۵ و فلورینسکی و همکاران، ۲۰۰۲)، مطالعات اکولوژی و نقشه پوشش گیاهی (مانند کارهای فرانکلین، مک‌کولاف و گری، ۲۰۰۰)، برنامه‌ریزی کشاورزی و نقشه زمین‌لغزش (مانند کارهای کارارا و همکاران، ۱۹۹۱) کاربردهای گسترده‌ای دارد.

بنیان و اساس شناسایی و طبقه‌بندی لندفرم‌ها بر پایه ژئومورفومتری^۲ است. ژئومورفومتری به کمیت عناصر اصلی ریخت‌شناسی زمین، از جمله شیب، جهت شیب، ارتفاع و اختلاف ارتفاع نسبی عناصر، موقعیت مکانی عناصر نسبت به هم، وضعیت شبکه زهکشی و میزان تحدب یا تقعر عناصر می‌پردازد (گرسک، ۲۰۱۰).

پیشرفت روش‌های طبقه‌بندی خودکار^۳ لندفرم‌ها در دو مرحله مهم انجام گرفته است؛ مرحله اول پیشرفت همزمان با پیدایش رایانه‌ها بوده و مرحله دوم پس از ابداع سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی (گرکد، ۲۰۱۰) انجام گرفته است. ظهور GIS و روش پردازش تصاویر رقومی، سبب پیشرفت بسیاری در فرآیندهای کمی‌سازی زمین شده است. حدود دو

1. Landform
2. Geomorphometry
3. Automatic

دهه است که ژئومورفومتری کمی با استفاده از تحلیل و پردازش خطوط تراز رقومی که طبقه‌بندی لندفرم را نیز شامل می‌شود، به موضوع پژوهشی تبدیل شده است که از آن دسته می‌توان به کارهای زونبرگن و تورن (۱۹۸۷)، وود (۱۹۹۶) و سعادت و همکاران (۲۰۰۸) اشاره کرد.

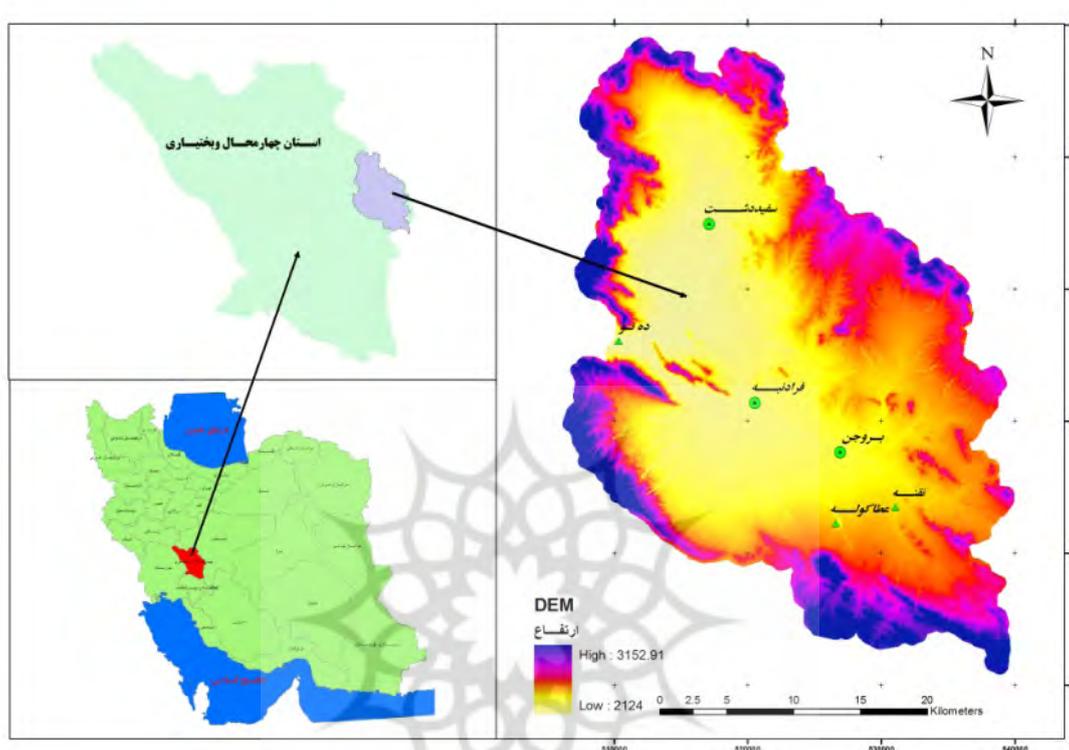
بنا به گفته گرکد (۲۰۱۰)، دیکائو، براب و مارک در سال ۱۹۹۱ اولین طبقه‌بندی خودکار لندفرم‌ها را انجام دادند. سپس این نوع طبقه‌بندی با کارهای افرادی چون بوروغ، کاتر و مک‌میلان (۲۰۰۰)، شینا (۲۰۰۸)، مک‌میلان، کیت جونز و مک‌ناب (۲۰۰۴) ادامه یافت. هرچند که کمی‌سازی و طبقه‌بندی خودکار لندفرم‌ها، هنوز یک موضوع نظری همراه با پیچیدگی و ابهام است، اما نتیجه آن داده‌هایی را تولید می‌کند که قابلیت آزمایش دوباره و بازتولید داشته، از اعتماد بالاتری برخوردارند و در مقایسه با واقعیت، سازگاری بیشتری از خود نشان می‌دهند (گرکد، ۲۰۱۰).

از آنجایی که هر واحد ژئومورفولوژی در یک منطقه مطالعاتی، محدوده‌ای نسبتاً همگن با بسیاری خصوصیات فیزیومتری یکسان است، بنابراین برنامه‌ریزی‌ها و اقدامات توسعه‌ای یکسانی را ایجاب می‌کند. به همین دلیل شناسایی و طبقه‌بندی لندفرم‌ها اهمیت و کاربرد فراوانی در مطالعات حوزه علوم منابع طبیعی دارد، از جمله در جریان انجام مطالعات تفصیلی - اجرایی آبخیزداری و شناسایی و طبقه‌بندی واحدهای ژئومورفولوژی حوضه آبخیز، پایه و اساس مطالعاتی مانند خاک‌شناسی، فرسایش و رسوب، پوشش گیاهی و زمین‌شناسی را تشکیل می‌دهد. در حال حاضر، طبقه‌بندی لندفرم‌ها در این مطالعات مبتنی بر تشخیص کارشناسی است که به طریق دستی و به صورت تفسیر چشمی عکس‌های هوایی، نقشه‌های توپوگرافی، یا برداشت‌های صحرایی انجام می‌شود که روشی است زمان‌بر، پرهزینه، کم‌دقت و تکرارناپذیر، اما در این مطالعه با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی و نقشه‌های رقومی توپوگرافی، لندفرم‌های یک منطقه نسبتاً وسیع با اقلیم نیمه‌خشک، به روش خودکار شناسایی و طبقه‌بندی می‌شود، تا بدین وسیله رهیافتی برای طبقه‌بندی اتوماتیک لندفرم‌ها و در نتیجه، افزایش سرعت و دقت در تدوین مطالعات منابع طبیعی و آبخیزداری در کشور ارائه کرده و زمینه تحقیقات بیشتری را فراهم آورد و در تکمیل و بومی‌سازی تحقیقات محدودی که در ارتباط با این موضوع در کشور انجام شده است، یاری رساند.

الف) منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه، حوضه آبخیز بروجن به مساحت ۹۲۵۶۵ هکتار، واقع در استان چهارمحال و بختیاری است که بین ۵۱ درجه و ۳ دقیقه و ۵۴ ثانیه تا ۵۱ درجه و ۲۵ دقیقه و ۴۸ ثانیه طول شرقی و ۳۱ درجه و ۴۹ دقیقه و ۲۴ ثانیه تا ۳۲ درجه و ۱۵ دقیقه و ۲۷ ثانیه شمالی قرار گرفته است (شکل ۱). براساس تقسیم‌بندی‌هایی که مؤسسه تحقیقات منابع آب کشور (تماب) در مورد حوضه‌های آبخیز کشور انجام داده، حوضه آبخیز بروجن از زیرحوضه‌های آبخیز کارون شمالی است. حداکثر ارتفاع حوضه برابر با ۳۱۵۳ متر در ارتفاعات غرب حوضه و حداقل ارتفاع منطقه برابر با ۲۱۲۴ در محل خروجی حوضه، در مجاورت روستای دهنو و در ضلع غربی حوضه قرار دارد و میانگین شیب آن نیز، برابر با ۳/۵ درصد است. با توجه به اطلاعات ایستگاه هواشناسی سینوپتیک بروجن، میانگین بارش سالانه حوضه آبخیز بروجن برابر با ۲۵۴ میلی‌متر است. میانگین سالانه حداکثر، حداقل و متوسط دما در آن به ترتیب برابر با ۱۸/۵، ۲/۹ و ۹/۷ درجه سانتی‌گراد

است و اقلیم این منطقه بر اساس روش دومارتن نیمه‌خشک گزارش شده است (اداره کل هواشناسی استان چهارمحال و بختیاری و بختیاری، ۱۳۹۱؛ معاونت آبخیزداری اداره کل منابع طبیعی استان چهارمحال و بختیاری، ۱۳۸۸).



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی و نقشه مدل رقمی ارتفاعی حوزه آبخیز بروجن

مواد و روش‌ها

پردازش داده‌ها

نقشه‌های رقمی توپوگرافی در مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ و فرمت shp با فاصله خطوط تراز ۱۰ متر، اطلاعات پایه‌ای هستند که در این پژوهش از آنها استفاده شده است (سازمان نقشه‌برداری کشور، ۱۳۷۲). با توجه به وسعت زیاد منطقه مورد مطالعه، برای پایه پردازش، از ۱۴ شیت نقشه توپوگرافی (لایه‌های آبراهه‌ها، نقاط ارتفاعی و خطوط تراز ارتفاعی) استفاده شد و به کمک نرم‌افزار ArcGIS 9.3 تحلیل‌ها و پردازش‌های مورد نیاز روی آنها انجام گرفت. در مرحله اول تمام ۱۴ شیت تبدیل به نقشه واحدی شدند. مرز حوضه مورد مطالعه، با انجام ادغام و اجتماع^۱ تقسیمات تماب در مورد زیرحوضه‌ها، در سطح ۵ استخراج شد. بعد از تعیین مرز حوضه، یک حریم^۲ پانصد متری نیز برای آن در نظر گرفته شد. بنابراین محدوده نهایی، شامل مرز حوضه و یک حریم ۵۰۰ متری بوده است. ایجاد این حریم ۵۰۰ متری به دلیل مشکل عمومی در پردازش‌های رستری است؛ زیرا توابع مخصوص این نوع پردازش، بر اساس اطلاعات سلول‌های همسایه است؛ بنابراین

1. Merge

2. Buffer

وقتی پردازش به مرز واقعی ختم شود، آنالیز خصوصیات سلول‌های واقع بر مرز حوضه با اشکال و خطا همراه خواهد شد. اما این بافر ۵۰۰ متری، سلول‌های همسایه کافی برای محاسبات همسایگی^۱ سلول‌های واقع بر مرز حوضه فراهم خواهد خواهد کرد (سعادت و همکاران، ۲۰۰۸).

در ادامه با استفاده از محدوده حوضه (مرز واقعی حوضه به اضافه حریم ۵۰۰ متری) خطوط تراز، آبراهه‌ها و نقاط ارتفاعی درون این محدوده از نقشه اصلی جدا شدند، سپس با استفاده از تابع Topo to Raster در ArcGIS9.3 مدل رقومی ارتفاعی (DEM) با اندازه پیکسل ۱۰ متر تولید شد. انتخاب اندازه پیکسل در مدل رقومی ارتفاعی به هدف و نوع داده‌های ورودی بستگی دارد، بر اساس دیاگرام مک‌میلان (۲۰۰۴) (شکل ۲) و تحقیق سعادت و همکاران (۲۰۰۸) و تاجیل و جنیز (۲۰۰۸)، در این مطالعه اندازه پیکسل نقشه DEM برابر با ۱۰ متر انتخاب شده است. نقشه رستری شیب و نقشه رستری TPI با آنالیز همسایگی به شعاع ۲۵۰ متری و نقشه رستری TPI با آنالیز همسایگی به شعاع ۵۰ متری از نقشه DEM تولید شدند. شکل ۳ تمامی مراحل انجام این پژوهش را نمایش داده است.

مقیاس نقشه ورودی	وضوح DEM	هدف (نقشه خروجی)
1:5 Million to 1:10 Million	10 x 10 km (ETOPO5)	Physiographic Province
1:1 Million to 1:5 Million	1 x 1 km (GTOPO30)	Physiographic Region
1:500,000 to 1:1 Million	500 x 500 m (DTED)	Physiographic District
1:125,000 to 1:500,000	100 x 100 m (DTED)	Physiographic System
1:50,000 to 1:125,000	25 x 25 m (SRTM)	Landform Type
1:10,000 to 1:50,000	10 x 10 m	Unnamed and undefined
1:5,000 to 1:10,000	5 x 5 m	Landform Element
1:1,000 to 1:5,000	1 x 1 m	Unnamed and undefined

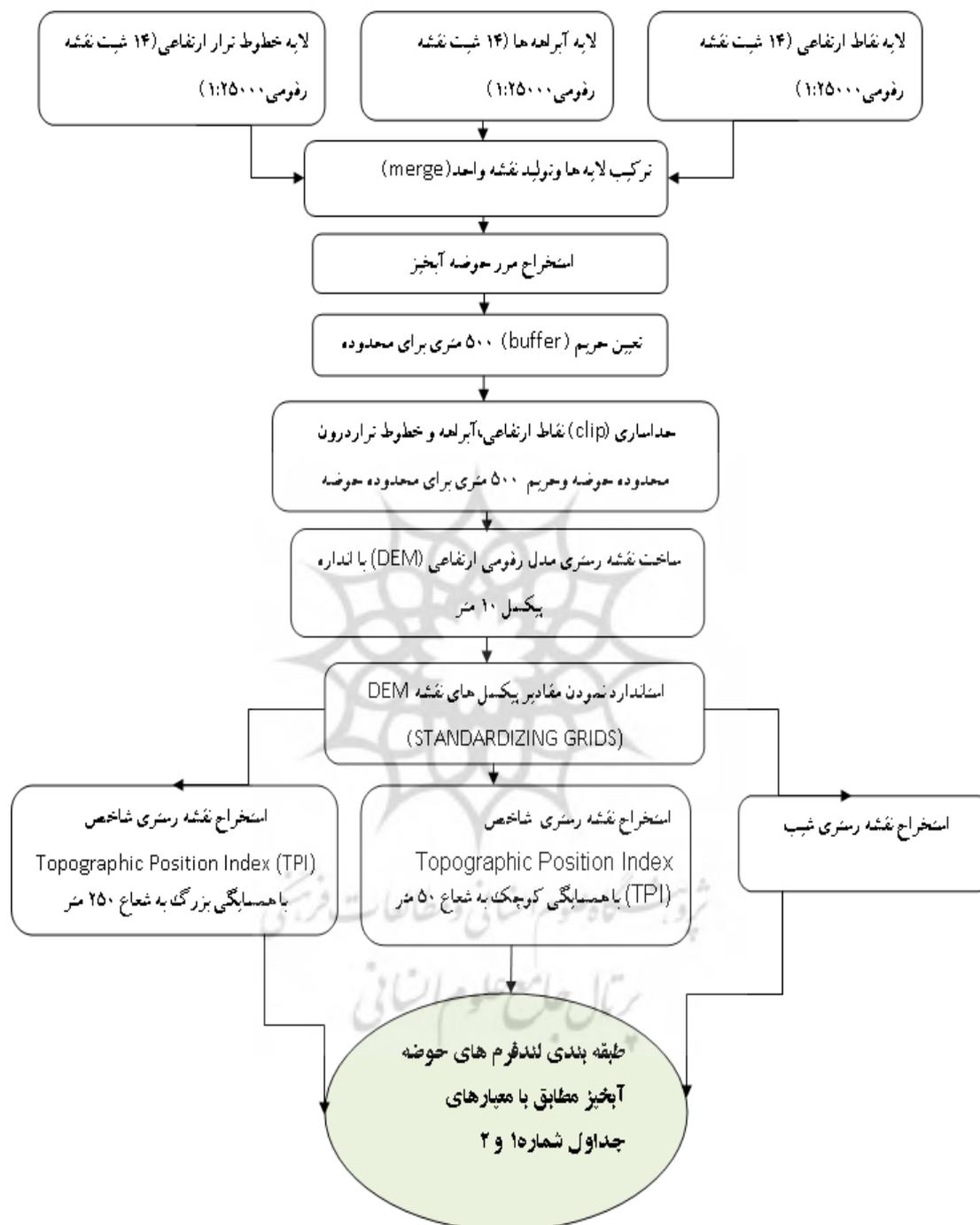
شکل ۲. دیاگرام مک‌میلان برای انتخاب اندازه مناسب پیکسل در نقشه DEM

شاخص TPI^۲ شاخصی است از وضعیت چشم‌انداز زمین. این شاخص را زویل و فلز در سال ۱۹۹۵ ارائه کردند و سپس ویس آن را در سال ۲۰۰۱ توسعه داد. شاخص TPI عبارت است از اختلاف ارتفاع هر سلول نسبت به ارتفاع متوسط سلول‌های همسایه. مقادیر مثبت حاصل از این شاخص، نشان می‌دهد که سلول از سلول‌های مجاور بلندتر است و مقادیر منفی به این معناست که سلول در ارتفاع پایین‌تری قرار دارد (جنیز، ۲۰۰۵). مقادیر TPI با استفاده از مقادیر استاندارد شده^۳ هر پیکسل محاسبه شد. در حالتی که اعداد دامنه وسیعی دارند، استاندارد کردن مقادیر نتیجه مناسبی به دست می‌دهد. در این حالت مقادیر پیکسل‌های نقشه DEM به گونه‌ای تغییر می‌یابند که میانگین آنها برابر با صفر و انحراف معیار اعداد برابر با ۱ خواهد شد (ویس، ۲۰۰۱ و جنیز، ۲۰۰۵).

1. Neighborhood

2. Topographic Position Index (TPI)

3. Standardized



شکل ۳. مراحل انجام پردازش‌های اجرا شده با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی برای طبقه‌بندی لندفرم‌ها

استاندارد کردن مقدار هر پیکسل از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\text{رابطه (۱)} \quad \text{میانگین - مقدار سلول} = \frac{\text{مقدار استاندارد شده}}{\text{انحراف معیار}}$$

در ادامه کار برای طبقه‌بندی لندفرم‌ها، روش گروه احیای مناطق خشک و کوهستانی دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران (احمدی، ۱۳۷۴) مد نظر قرار گرفت و در دو مرحله انجام شد:

۱. شناسایی و طبقه‌بندی خودکار حوضه آبخیز به سه واحد ژئومورفولوژی کوهستان، دشت و دشت‌سر؛
۲. شناسایی و طبقه‌بندی خودکار لندفرم‌های درون هر یک از سه واحد کوهستان، دشت‌سر و دشت که این اجزای کوچک‌تر یا لندفرم‌ها ریخت‌شناسی همگنی دارند.

برای شناسایی و طبقه‌بندی سه واحد ژئومورفولوژی کوه، دشت‌سر و دشت، از ترکیب دو عامل شیب و شاخص TPI با همسایگی دایره‌ای به شعاع ۲۵۰ متر انجام شد، این معیارها که برگرفته از کار جنیز (۲۰۰۵) است در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱. معیارهای استفاده شده برای طبقه‌بندی واحدهای ژئومورفولوژی

معیار	واحد ژئومورفولوژی	ردیف
$or -8 < TPI \leq 8, Slope \geq 5^\circ or TPI \geq 8 TPI \leq -8$	کوه	۱
$-8 < TPI \leq 8, 2^\circ \leq Slope \leq 5^\circ$	دشت‌سر	۲
$-8 < TPI \leq 8, Slope < 2^\circ$	دشت	۳

پس از شناسایی سه واحد ژئومورفولوژی کوهستان، دشت و دشت‌سر، برای طبقه‌بندی لندفرم‌های درون هر واحد از ترکیب دوشاخ TPI به فواصل همسایگی دایره‌ای شکل، به شعاع ۵۰ و ۲۵۰ متر استفاده شد، معیار این طبقه‌بندی بر اساس جدول ۲ بوده است. ترکیب حالات مختلف مقادیر استاندارد شده شاخص TPI در دو همسایگی ۵۰ متر و ۲۵۰ متر، معیار پایه برای طبقه‌بندی لندفرم‌ها در نظر گرفته می‌شود؛ چنانچه همپوشانی وجود داشته باشد، معیار شیب برای تمایز لندفرم‌ها به کار می‌رود. برای مثال چون مقادیر آستانه برای لندفرم دشت و لندفرم دامنه، یکسان است، از معیار درجه برای جداسازی این دو لندفرم استفاده شد؛ به طوری که اگر شیب کمتر از ۵ درجه باشد، دشت یا دشت‌سر و اگر بیشتر از ۵ درجه باشد، دامنه طبقه‌بندی می‌شود. در ادامه شرح کامل این نوع روش طبقه‌بندی لندفرم که ویس (۲۰۰۱) و جنیز (۲۰۰۵) ارائه کرده‌اند، آمده است (جدول ۲).

جدول ۲. معیار طبقه‌بندی لندفرم‌ها با استفاده از ترکیب دو شاخص TPI و شیب

شیب	شاخص TPI		طبقه‌بندی لندفرم	واحد ژئومورفولوژی
	مقدار استاندارد شده برای همسایگی ۲۵۰ متر	مقدار استاندارد شده برای همسایگی ۵۰ متر		
	$-1 < TPI < 1$ or $TPI \geq 1$ or $TPI \leq -1$	$TPI \leq -1$	دره‌ها و بریدگی‌های واقع بر ارتفاعات و دامنه‌ها	کوه
		$-1 < TPI < 1$	دره‌های U شکل	کوه
$Slope > 5^\circ$	$-1 < TPI < 1$	$-1 < TPI < 1$	دامنه‌ها	کوه
	$TPI \geq 1$	$-1 < TPI < 1$	فلات‌های بالایی (سطوح مسطح واقع بر ارتفاعات)	کوه
	$-1 < TPI < 1$ or $TPI \leq -1$	$TPI \geq 1$	تپه	کوه
	$TPI \geq 1$	$TPI \geq 1$	قلل و خط‌الرأس‌ها	کوه
$5 < slope \leq 10$	$-1 < TPI < 1$	$-1 < TPI < 1$	دشت‌سر	دشت سر
$Slope < 1$	$-1 < TPI < 1$	$-1 < TPI < 1$	اراضی پست ^۱	دشت
$1 \leq slope \leq 5$	$-1 < TPI < 1$	$-1 < TPI < 1$	دشت	دشت

یافته‌های پژوهش

با توجه به نتایج حاصل از انجام مرحله اول پژوهش، یعنی شناسایی و طبقه‌بندی واحدهای ژئومورفولوژی (جدول ۳)، حدود ۴۴ درصد از مساحت حوضه به واحد کوهستان اختصاص دارد و واحدهای دشت‌سر و دشت به ترتیب ۳۷ درصد و ۱۹ درصد از کل مساحت حوضه را دربر گرفته‌اند. سه دشت مهم حوضه آبخیز کارون شمالی، شامل دشت‌های سفیددشت، بروجن و فرادنبه و همچنین تالاب و مرغزار دهنو، در محدوده مطالعاتی واقع شده‌اند؛ بنابراین بخش بزرگی از مساحت منطقه را اراضی با پستی و بلندی کم و تغییرات اندک شیب پوشانده است، طبقه‌بندی خودکار واحدهای ژئومورفولوژی حوضه مطالعاتی نیز نشان داد که ۵۳ درصد حوضه را اراضی با شیب کمتر از ۵ درجه و تغییرات نسبی ارتفاع (تا همسایگی به شعاع ۲۵۰ متر) کمتر از ۵۰ متر دربر گرفته است.

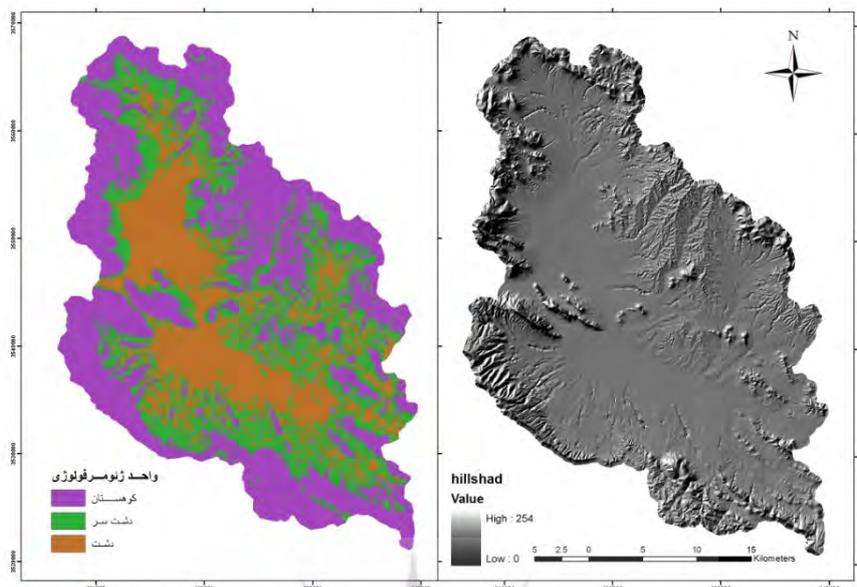
جدول ۳. مساحت واحدهای ژئومورفولوژی حوضه آبخیز بروجن

ردیف	تیب ژئومورفولوژی	مساحت (هکتار)	درصد مساحت
۱	کوه	۴۰۹۸۳	۴۴
۲	دشت‌سر	۳۴۶۷۷	۳۷
۳	دشت	۱۶۹۱۲	۱۹
	جمع	۹۲۵۶۶	۱۰۰

سمت راست شکل ۴ یک نقشه سایه روشن^۲ از حوضه و سمت چپ، طبقه‌بندی واحدهای ژئومورفولوژی حوضه را

نشان می‌دهد.

1. Lowland
2. Hillshade



شکل ۴. سمت راست نقشه سایه روشن حوضه، سمت چپ طبقه‌بندی واحدهای ژئومورفولوژی حوضه

اراضی با شیب بیش از ۱۰ درصد و تغییرات نسبی ارتفاع بیش از ۵۰ متر، گستره‌ای افزون بر ۳۹۰۰۰ هکتار از حوضه را دربرمی‌گیرد که ۴۲ درصد از کل مساحت حوضه است. کلیه اراضی شیب‌دار که نسبت به اراضی مجاور تغییرات ارتفاعی شدید دارند، در این گروه قرار گرفته‌اند. این واحد خود شامل دره‌ها و بریدگی‌ها، سطوح هموار واقع بر ارتفاعات، تپه‌ها و قله مرتفع است.

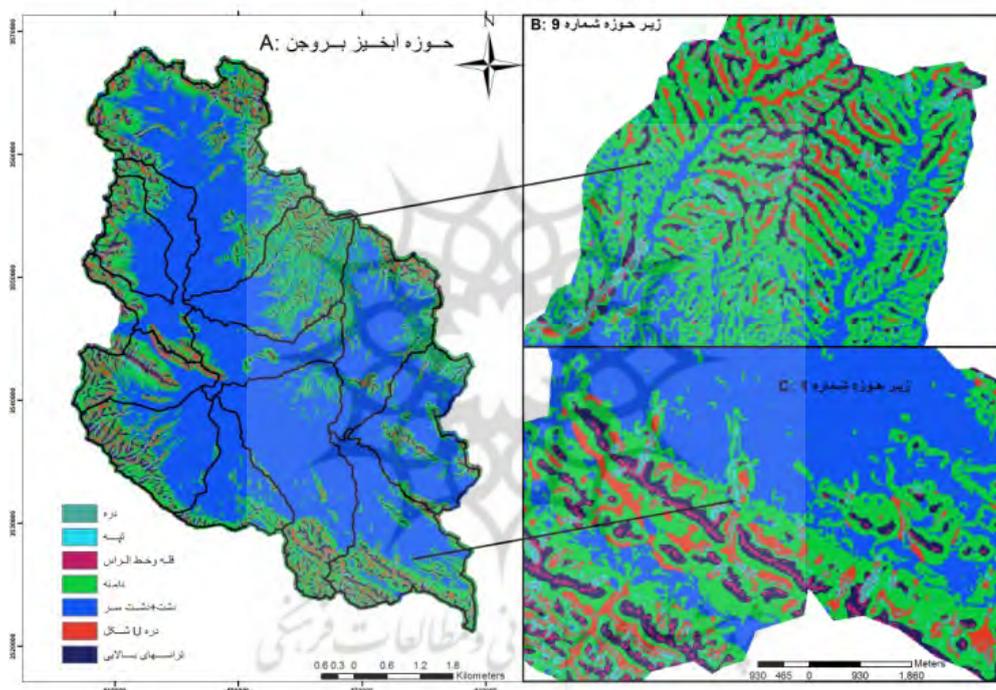
در مرحله دوم با توجه به معیارهای مندرج در جدول ۲، لندفرم‌های درون هر یک از واحدها شناسایی و طبقه‌بندی شدند. شش لندفرم در واحد کوهستان شناسایی و طبقه‌بندی شد که عبارتند از: ۱. لندفرم دره‌ها و بریدگی‌های عمیق و نیمه‌عمیق در ارتفاعات؛ ۲. دره‌های U شکل؛ ۳. فلات‌های واقع بر ارتفاعات (تراس‌های بالایی)؛ ۴. دامنه‌ها؛ ۵. تپه و ۶. قله و خط‌الرأس کوه‌ها.

جدول ۴ درصد و مساحت هر یک از لندفرم‌های شش‌گانه نامبرده را در حوضه آبخیز بروجن نشان می‌دهد. کل مساحت واحد ژئومورفولوژی کوهستان در این حوضه برابر با ۴۰۹۸۳ هکتار به دست آمد.

جدول ۴. طبقه‌بندی لندفرم‌های واحد کوهستان

ردیف	لندفرم	مساحت (هکتار)	درصد از کل مساحت حوضه
۱	دره‌های و بریدگی‌های	۳۵۲۵	۴
۲	دره‌های U شکل	۴۳۴۱	۵
۳	دامنه‌ها	۲۳۳۴۸	۲۵
۴	فلات‌ها و تراس‌های بالایی	۵۶۰۵	۶
۵	تپه	۱۷۵۷	۲
۶	قله و خط‌الرأس کوه‌ها	۲۴۰۷	۳
	جمع	۴۰۹۸۳	۴۴

شکل ۵ طبقه‌بندی لندفرم‌ها را درون واحد کوهستان نشان می‌دهد. در این شکل واحدهای دشت و دشت‌سر با برچسب یکسان (رنگ آبی) مشخص شده است. به دلیل وسعت زیاد حوضه مطالعاتی، طبقه‌بندی لندفرم‌ها درون زیرحوضه‌های شماره ۱ و ۹ و زیرحوضه شماره ۹ با بزرگ‌نمایی و وضوح بیشتر در قسمت‌های B و C نمایش داده شده است. زیرحوضه‌های ۱ و ۹ به ترتیب برابر با ۹۰۰۰ و ۸۰۰۰ هکتار مساحت دارند و تصویر B و C فقط مربوط به قسمتی از زیرحوضه‌های مذکور است. گفتنی است که هیچ نوع فیلتری در این نقشه‌های رستری اجرا نشده، بنابراین در ماهیت پیکسل‌ها هیچ نوع تغییر یا تبدیلی انجام نگرفته است.



شکل ۵. طبقه‌بندی لندفرم‌های حوضه؛ سمت راست بالا: بزرگ‌نمایی طبقه‌بندی لندفرم در زیرحوضه شماره ۹؛ سمت راست پایین: بزرگ‌نمایی طبقه‌بندی در زیرحوضه شماره ۱

کل مساحت واحد دشت و دشت‌سر در حوضه آبخیز بروجن برابر با ۵۱۵۸۹ هکتار محاسبه شد که برابر با ۵۶ درصد کل مساحت حوضه است (جدول ۵). واحد دشت‌سر که خود ۳۸ درصد مساحت حوضه را دربرگرفته به دو لندفرم مخروط‌افکنه و دشت‌سر تقسیم شده است. لندفرم دشت‌سر ۲۷ درصد حوضه را اشغال کرده است. مخروط‌افکنه‌ها لندفرم‌های بسیار مهمی در مناطق خشک و نیمه‌خشک هستند که شناسایی و جداسازی آنها در یک حوضه آبخیز از اهمیت خاصی برخوردار است. با در نظر داشتن شکل خاص مخروط‌افکنه‌ها، اجرای شاخص TPI، اختلاف ارتفاع نسبی عوارض، شکل قوسی و بادبزی شکل مخروط‌افکنه‌ها را به خوبی برجسته و نمایان می‌کند و به این ترتیب شناسایی و جداسازی محدوده مخروط‌افکنه‌ها از سایر لندفرم‌های حوضه آبخیز به‌سادگی امکان‌پذیر می‌شود. مساحت مخروط‌افکنه‌های حوضه به کمک رسم پلیگون، برابر با ۱۱ درصد مساحت حوضه به دست آمد (شکل ۵).

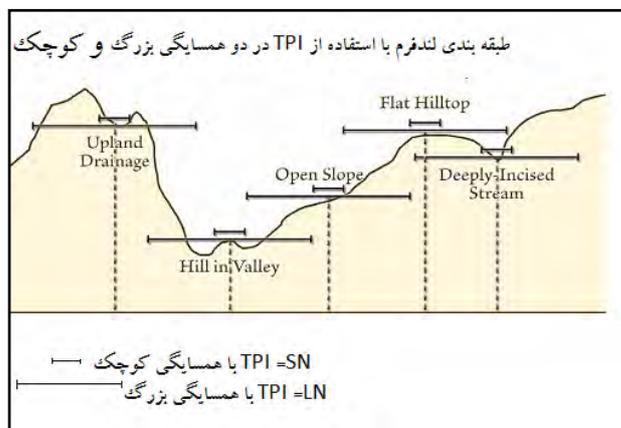
جدول ۵. مساحت لندفرم‌های واقع در محدوده واحدهای دشت‌سر و دشت حوضه آبخیز بروجن

واحد	لندفرم	مساحت (هکتار)	درصد از کل مساحت حوضه
دشت سر	مخروط‌افکنه	۹۷۳۲	۱۱
	دشت‌سر	۲۴۹۴۵	۲۷
دشت	دشت	۱۳۷۹۷	۱۵
	اراضی پست	۳۱۱۵	۳
	جمع	۵۱۵۸۹	۵۶

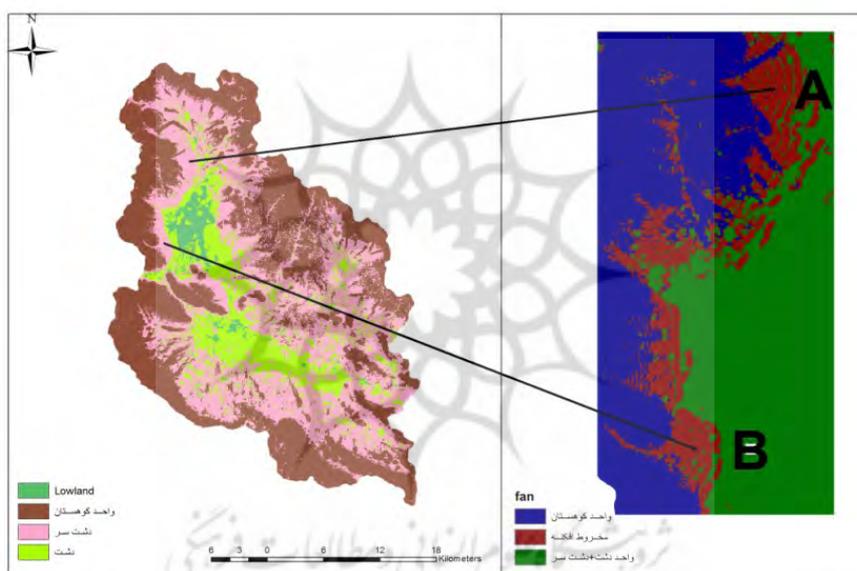
مساحت لندفرم اراضی پست حوضه بروجن ۳ درصد از کل مساحت حوضه را شامل می‌شود. این لندفرم شیبی کمتر از ۱ درصد دارد و محل تجمع و تمرکز رواناب‌ها است. به دلیل زهکشی ضعیف سطحی و عمقی حالت ماندابی دارد. در حوضه آبخیز بروجن این محدوده از اراضی پست مربوط به تالاب دهنو و اراضی اطراف آن است که البته در چند سال اخیر، به دلیل برداشت‌های بی‌رویه آبهای زیرزمینی و خشکسالی از حالت ماندابی و مرغزار خارج شده است. لندفرم دشت که سطحی هموار با شیبی بین ۱ تا ۵ درصد است و حداقل پستی و بلندی را دارد، ۱۵ درصد سطح حوضه را اشغال کرده است.

سعادت و همکاران (۲۰۰۸) نیز طی پژوهشی با عنوان «طبقه‌بندی لندفرم‌ها در حوضه آبخیز سد گلستان» از معیارهای دسانتس و همکاران (۱۹۷۱) استفاده کرده‌اند که براساس آن، لندفرم کوه، لندفرم تپه و اراضی پست با استفاده از اختلاف ارتفاع و شیب تفکیک می‌شوند؛ به‌گونه‌ای که در لندفرم کوه شیب بیش از ۲۵ درصد، در لندفرم تپه شیب بین ۸ تا ۲۵ درصد است. دامنه ارتفاعی در لندفرم کوه (اختلاف بین حداکثر و حداقل) اغلب بیش از ۵۰۰ متر است؛ در حالیکه در تپه دامنه ارتفاعی بین ۵۰ تا ۵۰۰ متر دیده می‌شود. به همین ترتیب اراضی پست، در حالیکه کم‌ارتفاع‌ترین منطقه حوضه را تشکیل می‌دهند، شیبی کمتر از ۱ درصد دارند، ضمن آنکه این اراضی در ادامه و پس از لندفرم دشت قرار می‌گیرند (سعادت و همکاران، ۲۰۰۸ و تاجیل و جنیز، ۲۰۰۸).

ویس نیز در سال ۲۰۰۱ با استفاده از ترکیب ۲ شاخص TPI با میزان همسایگی‌های متفاوت، لندفرم‌ها را طبقه‌بندی کرد. برای مثال آنها بیان کردند که اگر عارضه‌ای در هر دو حالت TPI با همسایگی کوچک و TPI با همسایگی بزرگ دارای مقادیر کوچکی باشد، می‌توان آن را در گروه دشت طبقه‌بندی کرد. یا یک TPI بزرگ در همسایگی کوچک همراه با مقدار TPI کوچک در حالت همسایگی بزرگ، می‌تواند به منزله یک تپه کوچک درون یک دره بزرگ طبقه‌بندی شود. همچنین برعکس آن نیز بیان شده، یعنی یک TPI کوچک‌تر در حالت همسایگی کوچک به‌اضافه یک TPI بزرگ‌تر در حالت همسایگی بزرگ را می‌توان در گروه آبراهه واقع در ارتفاعات طبقه‌بندی کرد. تاجیل و جنیز (۲۰۰۸) نیز با استفاده از ترکیب دو شاخص TPI در همسایگی بزرگ و کوچک، به طبقه‌بندی لندفرم‌ها اقدام کرده است. شکل ۶ روش کار آنها را در طبقه‌بندی لندفرم‌ها با استفاده از شاخص TPI نشان می‌دهد.



شکل ۶. چگونگی طبقه بندی لندفرم‌ها با استفاده از ترکیب دو شاخص TPI
منبع: تاجیل و جنیز، ۲۰۰۸



شکل ۷. سمت چپ بزرگ نمایی مخروط افکنه (رنگ قرمز و حروف A و B)؛
سمت راست طبقه بندی لندفرم‌های واحدهای دشت و دشت سر

مساحت ۹۲۵۶۶ هکتاری حوضه آبخیز بروجن بنا بر تقسیم بندی حوضه های آبخیز کشور که از سوی مؤسسه تحقیقات منابع آب کشور (تماب) ارائه شده، خود متشکل از یازده زیرحوضه است که از میان آنها چهار زیرحوضه در قالب مطالعات تفصیلی - اجرایی آبخیزداری (۱۳۸۸) مطالعه شده و واحدهای اراضی (واحدهای ژئومورفولوژی) و اجزای واحد اراضی (لندفرم‌ها) آنها به روش دستی (استفاده از عکس‌های هوایی و بازدید صحرایی) مشخص شده‌اند. مقایسه نتایج حاصل از این پژوهش و نتایج مطالعات ژئومورفولوژی در چهار زیرحوضه یاد شده، بیانگر همپوشانی بالای نتایج هر دو روش است. نسبت مساحت دشت به دشت سر در مطالعه ژئومورفولوژی چهار زیرحوضه ۰/۵۹ و در این پژوهش برابر با ۰/۵۵ به دست آمده است. همچنین لندفرم تپه در مطالعه ژئومورفولوژی چهار زیرحوضه برابر با ۰/۲۲ درصد از کل مساحت بوده و در این پژوهش نیز تپه‌ها ۰/۲ درصد از کل مساحت حوضه را دربرگرفته‌اند.

بحث و نتیجه‌گیری

منظور از لندفرم‌ها، تقسیماتی از سطح زمین است که در بسیاری خصوصیات یکنواخت و همگن هستند و طبیعی است که واحدهای همگن برنامه‌ریزی و مدیریت یکنواختی را می‌طلبند. به همین دلیل شناسایی و طبقه‌بندی لندفرم‌ها در مطالعات از اهمیت خاصی برخوردار است. اغلب روش‌های شناسایی و طبقه‌بندی لندفرم‌ها در کشور، مبتنی بر بازدیدهای صحرایی، استفاده از نقشه‌های کاغذی توپوگرافی، روش‌های تفسیر چشمی عکس‌های هوایی یا تصاویر ماهواره‌ای است. چنین روش‌هایی متکی بر تجربه، توان و سوابق کارشناسی است و در آن کمتر از معیارها یا محاسبات کمی استاندارد و شاخص‌های فراگیر استفاده می‌شود. شیب و اختلاف ارتفاع نسبی لندفرم‌ها نسبت به هم، دو عامل مهم و اساسی در جداسازی لندفرم‌هاست، ولی اندازه‌گیری این دو شاخص روی عکس‌های هوایی یا نقشه‌های کاغذی، تکرار پذیر نبوده و کاری زمان‌بر و خسته‌کننده است تا آنجا که در بیشتر مواقع کارشناسان از انجام دقیق آن خودداری می‌کنند. به همین سبب، اغلب، تعیین واحدهای ژئومورفولوژی در مطالعات گوناگون کشور از استانداردها و قواعد یکسانی پیروی نمی‌کنند و لزوم استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی، به‌ویژه در مرحله شناسایی و طبقه‌بندی لندفرم ضرورت فراوانی می‌یابد.

به دلیل دسترسی و فراگیری استفاده از نرم‌افزارهای GIS و داده‌های توپوگرافی رقومی برای سراسر کشور و مزایای فراوانی که تحلیل و پردازش اطلاعات مکانی دیجیتالی فراهم می‌کند، لازم است که طبقه‌بندی واحدهای ژئومورفولوژی از روش‌های دستی و سنتی و به‌ویژه تفسیر چشمی کارشناسان، به طبقه‌بندی از طریق استفاده از داده‌های دیجیتالی و سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی تغییر جهت دهد. به همین دلیل در این پژوهش بر مبنای پردازش پیکسلی و سه معیار شیب، اختلاف ارتفاع نسبی و موقعیت مکانی لندفرم‌ها نسبت به هم، به طبقه‌بندی خودکار لندفرم‌های یک حوضه با مساحت نسبتاً زیاد و اقلیم کم‌بارش اقدام شد. تعیین اختلاف ارتفاع نسبی عوارض نسبت به هم با استفاده از شاخص TPI انجام گرفت. این شاخص اختلاف ارتفاع هر پیکسل را نسبت به سلول‌های مجاور محاسبه می‌کند. با توجه به قابلیت نرم‌افزارهای سیستم اطلاعات جغرافیایی و با تعریف همسایگی‌های متفاوت، اختلاف ارتفاع هر عارضه نسبت به عوارض مجاور مشخص می‌شود. بدین ترتیب، رهیافتی برای طبقه‌بندی خودکار لندفرم‌های حوضه آبخیز ارائه شده است تا زمینه مطالعات جامع‌تر و کامل‌تری را در سایر حوضه‌های آبخیز با ویژگی‌های اقلیمی و زمین‌ریخت‌شناسی متفاوت فراهم کند، بلکه نتیجه نهایی ارائه روش‌های عملی و دقیق برای شناسایی و طبقه‌بندی خودکار لندفرم‌ها باشد.

منابع

- احمدی، ح. (۱۳۷۴). ژئومورفولوژی کاربردی؛ جلد اول: فرسایش آبی، تهران: انتشارات دانشگاه تهران.
- اداره کل هواشناسی استان چهارمحال و بختیاری. (۱۳۹۱). گزارش آماری ایستگاه هواشناسی سینوپتیک بروجن.
- سازمان نقشه‌برداری کشور. (۱۳۷۲). نقشه‌های رقومی ۱:۲۵۰۰۰۰ توپوگرافی بلوک اصفهان و بلوک بروجن.
- معاونت آبخیزداری اداره کل منابع طبیعی استان چهارمحال و بختیاری. (۱۳۸۸). مطالعه تفصیلی - اجرایی حوضه‌های آبخیز بروجن و فرادنبه.

Bates, R.L. and J. Jackson, 1987, **Glossary of Geology**: Alexandria, Virginia. 1st Ed, American Geological Institute, New York.

- Burrough, P.A., Van Gaans, P.F.M., MacMillan, R.A., 2000, **High Resolution Landform Classification Using Fuzzy-k Means**, Fuzzy Sets and Systems, Vol. 113, No. 1, PP. 37-52.
- Carrara, A., Cardinali, M., Detti, R., Guzzetti, F., Pasqui, V., Reichenbach, P., 1991, **GIS Techniques and Statistical Models in Evaluating Landslide Hazard**, Earth Surface Processes and Landforms, Vol. 16, PP. 427-445.
- Coops, N.C., Gallant, J.C., Loughhead, A.N., Mackey, B.J., Ryan, P.J., Mullen, I.C., Austin, M.P., 1998, **Developing and Testing Procedures to Predict Topographic Position from Digital Elevation Models (DEMs) for Species Mapping (Phase 1)**. Client Report, No. 271, Report to Environment Australia, CSIRO Forestry and Forest Products, Canberra.
- Dikau, R., Brabb, E. E., Mark, R.M., 1991, **Landform Classification of New Mexico by Computer**, U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey.
- Etzelmüller, B., Sulebak, J.S., 2000, **Developments in the Use of Digital Elevation Models in Periglacial Geomorphology and Glaciology**, Physische Geographie, Vol. 41, PP. 35-58.
- Florinsky, I.V., Eilers, R.G., Manning, G., Fuller, L.G., 2002, **Prediction of Soil Properties by Digital Terrain Modelling**. Environmental Modelling & Software, Vol. 17, No. 3, PP. 295-311.
- Franklin, J., McCullough, P., Gray, C., 2000. **Terrain Variables used for Predictive Mapping of Vegetation Communities in Southern California**. In: Wilson, J.P., Gallant, J.C., eds. Terrain Analysis:
- Gercked, D., 2010, **Object-based Classification of Landforms Based on Contexttheir Local Geometry and Geomorphometric**, Thesis (Ph.D.), Middle East Technical University, Ankara, Turkey.
- Gessler, P. E., Moore, I. D., Mckenzie, N. J., Ryan, P. J., 1995, **Soil-landscape Modelling and Spatial Prediction of Soil Attibutes**. International Journal of Geographical Information Systems, Vol. 9, No. 4, PP. 421-432.
- Hammer, R.D., 1997. **Space and time in the Soil Landscape: the Ill-defined Ecological Universe**, In: Peterson, D.L., Parker, V. T., eds. Ecological Scale: Theory and Applications. Palisades, NY: Columbia University Press, Columbia.
- Jenness, J., 2005, **Topographic Position Index (tpi_jen.avx) Extension for ArcView 3.x**, Jenness Enterprises, Retrieved from: <http://www.jennessent.com>.
- Macmillan, R.A., Keithjones, R., Mcnabb, D.H., 2004, **Defining a Hierarchy of Spatial Entities for Environmental Analysis and Modelling Using Digital Elevation Models (DEMs)**, Computers, Environment and Urban Systems, Vol. 28.175-200.
- Pike, R.J., 2002, **A Bibliography of Terrain Modelling (Geomorphometry), the Quantitative Representation of Topography - supplement 4.0., Open-File Rep. No. 02-465**, U.S. Geological Survey, Denver.
- Saadat, H., Bonnell, R., Sharifi, F., Mehuys, G., Namdar, M., Ale-Ebrahim, S., 2008, **Landform Classification from a Digital Elevation Model and Satellite Imagery**, Geomorphology, Vol. 100, No. 3-4, PP. 453-464.
- Sinha, G., 2008, **Delineation, Characterization and Classification of Topographic Eminences**, Ph.D. Thesis, University of New York. USA.
- Tagil, S. and Jenness, J., 2008, **GIS-Based Automated Landform Classification and Topographic, Landcover and Geologic Attributes of Landforms Around the Yazoren Polje, Turkey**. Journal of Applied Sciences, doi:10.3923/jas.2008.910.921, Vol. 8, PP. 910-921.
- Weiss, A., 2001, **Topographic Position and Landforms Analysis**, Poster Presentation, ESRI User Conference, San Diego, CA. August 9-13.
- Whittow, J., 1984, **Dictionary of Physical Geography**, Penguin Reference Series, Middlesex, USA.
- Wood, J.D., 1996. **The Geomorphological Characterization of Digital Elevation Models**, Ph.D.Thesis, University of Leicester.
- Zevenbergen, L.W., Thorne, C.R., 1987. **Quantitative Analysis of Land Surface Topography**. Earth Surface Processes and Landforms, Vol. 12, No. 1, PP. 47-56.