

طبقه‌بندی خودکار لندفرم‌ها (ACL) با دو مدل ویژگی‌های زمین (TA) و شاخص موقعیت توپوگرافی (TPI) در دامنه‌های شمال شرقی ارتفاعات کرکس کوه نظنز و کاشان

علی شکاری بادی* - دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، دانشگاه حکیم سبزواری.
ابوالقاسم امیراحمدی - استاد ژئومورفولوژی، دانشگاه حکیم سبزواری.
لیلی گلی مختاری - استادیار ژئومورفولوژی، دانشگاه حکیم سبزواری.
جواد جمال آبادی - دکتری ژئومورفولوژی، دانشگاه حکیم سبزواری.

پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۲/۰۱ تأیید نهایی: ۱۴۰۲/۰۵/۱۲

چکیده

عوارض سطح زمین یک مبنای در مطالعات ژئومورفیک در نظر گرفته می‌شوند که شناسایی و نقشه‌برداری آن‌ها به‌عنوان یک مرکز مشخص برای فرآیندهای عملیاتی، امکان شناخت عمیق‌تر از محیط طبیعی، انجام مطالعات پایدار، ارزیابی، پیش‌بینی و برنامه‌ریزی را در سطح یک چشم‌انداز فراهم می‌کند. با توجه به مزایای روش‌های شناسایی خودکار عوارض نسبت به متدهای سنتی بصری، هدف تحقیق حاضر طبقه‌بندی اتوماتیک لندفرم‌های دامنه‌های شمال شرقی ارتفاعات کرکس کوه نظنز و کاشان با مساحتی به گستردگی ۴۷۳۹ کیلومترمربع می‌باشد. در این راستا، از دو مدل ویژگی‌های زمین (TA) و شاخص موقعیت توپوگرافی (TPI) که هر دو مبتنی بر مدل رقومی ارتفاعی (DEM) هستند، بهره گرفته شد. در مدل TA که از ارتفاع، شیب، انحنا و شدت برجستگی به‌عنوان ورودی استفاده می‌شود، لندفرم‌ها به پنج کلاس قله، شانه دامنه، پشت دامنه، پای دامنه و پنجه دامنه طبقه‌بندی شدند و در مدل TPI به شش کلاس ستیخ، شیب‌های بالایی، شیب‌های میانی، شیب‌های مسطح، شیب‌های پایینی و دره‌ها دسته‌بندی شدند. نتایج حاصل از طبقه‌بندی مورفولوژیکی منطقه مطالعاتی با مدل ویژگی‌های زمین نشان می‌دهد که فرم پادگانه‌های بالایی یا شانه دامنه با مساحت ۱۸۱۰ کیلومترمربع که حدود ۳۸ درصد مساحت منطقه مورد مطالعه را در برمی‌گیرد، فرم غالب چشم‌انداز محدوده مطالعاتی می‌باشد. طبقه‌بندی لندفرم‌ها با شاخص موقعیت توپوگرافی (TPI) نیز نشان می‌دهد که لندفرم دره با مساحت ۱۸۷۲ کیلومترمربع معادل حدود ۴۰ درصد مساحت منطقه مورد مطالعه، به‌عنوان لندفرم غالب محدوده مطالعاتی محسوب می‌شود. استفاده از چهار ورودی در مدل ویژگی‌های زمین و امکان طبقه‌بندی گسترده‌تر در شاخص موقعیت توپوگرافی از جمله مزایایی این مدل‌ها هستند. از نتایج حاصل از طبقه‌بندی لندفرم‌ها در این دو مدل می‌توان برای مطالعات بعدی به‌خصوص در زمینه ژئومورفولوژی خاک استفاده کرد.

واژگان کلیدی: شناسایی عوارض، طبقه‌بندی خودکار لندفرم، مدل ویژگی‌های زمین، شاخص موقعیت توپوگرافی، کرکس کوه.

مقدمه

در یک تعریف کلی، ژئومورفولوژی علم مطالعه لندفرم‌ها و فرآیندهایی است که آن‌ها را ایجاد کرده است. ژئومورفولوژی مطالعه ویژگی‌های فیزیکی سطح زمین و لندفرم‌های آن از جمله رودخانه‌ها، تپه‌ها، دشت‌ها، سواحل، تپه‌های ماسه‌ای و سطوح بی‌شمار دیگر به همراه پهنه‌های آبی است (هاگت و شاتل‌ورث^۱، ۲۰۲۲: ۳). از آنجا که عوارض سطح زمین، یک مرز مشخص برای فرآیندهای عملیاتی در زمینه‌های ژئومورفولوژی، هیدرولوژی، اکولوژی، پدولوژی و غیره مشخص می‌کنند (مک‌میلان و شری^۲، ۲۰۰۹: ۲۲۹)، مطالعات ژئومورفیک، امکان شناخت عمیق‌تری از محیط طبیعی را فراهم می‌کند (مارتینز^۳ و همکاران، ۲۰۱۶: ۴۲۲). کسب اطلاعات و نقشه‌برداری در مورد لندفرم‌ها از عوارض بزرگ‌مقیاس مثل دشت‌ها و رشته‌کوه‌ها گرفته تا عوارض جزئی مثل تپه‌های منفرد و دره‌ها، نه تنها به‌عنوان یک مبنا برای انواع تحقیقات ژئومورفولوژیکی مختلف در نظر گرفته می‌شوند بلکه برای ارزیابی چشم‌انداز، مطالعات پایدار، مطالعات فرسایش، پیش‌بینی خطر، برنامه‌ریزی در زمینه‌های مختلف در سطح منطقه‌ای یا یک چشم‌انداز و یا شناخت توانمندی‌های سیستم‌های زمین ضروری می‌باشد (اشنایدر و کلین، ۲۰۰۹: ۳۷؛ دراگوت و بلاشکه، ۲۰۰۶: ۳۳۰؛ تاگیل و جنس^۴، ۲۰۰۸: ۹۱۰). یکی از توانمندی‌های متخصصان علم زمین‌شکل‌شناسی، تهیه و ترسیم نقشه‌های ژئومورفولوژی به مثابه یک روش تحقیق، ابزاری کاربردی و یک زیربنای علمی برای سایر علوم می‌باشد (شایان و همکاران، ۱۳۹۰: ۳۷). گرچه ژئومورفولوژی در ساختار یک علم، واژه‌ای نوین محسوب می‌شود اما سابقه‌ای کهن در تاریخ بشر دارد. نخستین نقشه‌ها را ماب مارکس ۴۵۰۰ سال پیش از میلاد به روش برآمدگی از منطقه بابل تهیه کرده و در قرن هجدهم از روش هاشورزنی برای توصیف چشم‌اندازها و برآمدگی استفاده شده است. در قرن نوزدهم نمایش منظره جغرافیایی با روش خطوط منحنی میزان رایج شد (شهماری اردجانی، ۱۳۹۴: ۸۷). اما امروزه شناسایی خودکار عوارض به‌عنوان یکی از مهم‌ترین روش‌ها برای طبقه‌بندی لندفرم‌ها و تعمیق درک مورفولوژی زمین در نظر گرفته می‌شود (ژائو^۵، ۲۰۱۷: ۸۸۵). شناسایی و استخراج لندفرم‌ها با استفاده از روش‌های سنتی امری زمان‌بر، هزینه‌بر و تحت‌تأثیر تصمیمات غیرشفاف و حتی غالباً غیرقابل تکرار مفسر است (عادلی و همکاران، ۱۴۰۰، ۱۰۷). لذا، برای توصیف دقیق ساختار توپوگرافی نیاز بود روش‌ها و مدل‌های جدید تحلیل فضایی توسعه پیدا کنند (بیشاپ^۶ و همکاران، ۲۰۰۳: ۳۴۶). دسترسی به مدل‌های رقومی ارتفاع، توسعه نرم‌افزارها و افزایش قدرت محاسباتی رایانه‌ها چنین امری را برای ژئومورفولوژیست‌ها فراهم می‌کند که ممکن است انقلابی در این رشته ایجاد کند (ویچورک و میگون^۷، ۲۰۱۴: ۱۳۳).

پیشینه تحقیق

برخی از مطالعات پیشین که در زمینه طبقه‌بندی خودکار لندفرم‌ها انجام گرفته‌اند، بدین شرح می‌باشد: مکرم و حجتی (۲۰۱۶) به طبقه‌بندی خودکار لندفرم‌ها در جنوب بجنورد با استفاده از دو روش دو مدل ویژگی‌های زمین (TA) و شاخص موقعیت توپوگرافی (TPI) پرداختند و این دو روش را با یکدیگر مقایسه کردند و نتیجه گرفتند روش TPI از دقت بالاتری برخوردار است چرا که جزئیات بیشتری را نمایش می‌دهد اما نتایج تحقیقات محمد^۸ و همکاران (۲۰۱۸) در مقایسه دو مدل ویژگی‌های زمین (TA) و شاخص موقعیت توپوگرافی (TPI) برای طبقه‌بندی خودکار عوارض در حوضه‌های آبریز منطقه

1- Huggett & Shuttleworth

2- MacMillan and Shary

3- Martins

4- Schneider and Klein; Drăguț and Blaschke; Tağıl and Jenness

5- Zhao

6- Bishop

7- Wiczorek and Migón

8- Mohamed

العمین در استان مطروح در شمال کشور مصر نشان داد که استفاده از روش ویژگی‌های زمین در طبقه‌بندی عوارض با جزئیات بیشتری همراه است. دو^۱ و همکاران (۲۰۱۹) با یادگیری عمیق ماشینی و استفاده از داده‌های ژئومورفولوژی چندوجهی از جمله مدل رقومی ارتفاعی، شیب توپوگرافی و برجستگی‌های سایه‌دار، به شناسایی لندفرم‌های مرکز چین با ضریب صحت‌سنجی ۹۰ درصد پرداختند. لین^۲ و همکاران (۲۰۲۱) شناسایی خودکار لندفرم‌ها را برای نخستین بار از منظر ساختار فضایی حوضه آبریز و مبتنی بر مدل‌های رقومی ارتفاعی در فلات لس چین انجام دادند. شایان و همکاران (۱۳۹۱) با استفاده از پارامترهای ژئومورفومتریک به طبقه‌بندی نظارت شده لندفرم‌های ژئومورفولوژیکی مناطق خشک منطقه کویر مرنجاب به روش حداکثر شباهت (MLC) با دقت کلی ۸۱ درصد پرداختند. نگهبان و مکرم (۱۳۹۴) به طبقه‌بندی لندفرم‌ها بر اساس شاخص موقعیت توپوگرافی (TPI) و ارتباط آن با ویژگی‌های زمین‌شناسی در حوضه آبخیز حکان در شهرستان جهرم پرداختند. بهشتی جاوید و همکاران (۱۳۹۷) با استفاده از روش شی‌گرا و سه لایه انحنا پلان، انحنا میانگین و انحنا پروفایل به استخراج و شناسایی خودکار سیرک‌های یخچالی دامنه‌های شمالی سیلان پرداختند. احمدآبادی و هاشمی (۱۳۹۸) بر اساس رویکرد ژئومورفومتری و با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی ASTERGDDEM، شاخص‌های انحاء و شاخص Rtp انواع دشت‌سر در منطقه اشکذر یزد را شناسایی کردند. محمدزاده و همکاران (۱۴۰۰) در شهرستان ماکو در آذربایجان غربی، با استفاده از روش فازی شی‌گرا، مشتقات لایه رقومی ارتفاع (شیب، بافت انحنا حداکثر، حداقل، مسطح و انحنا پروفیل)، تصاویر ماهواره سنتینل A2 و ۱۶۰ نمونه زمینی، ۱۴ نوع لندفرم را با دقت کلی ۸۷ درصد استخراج کردند.

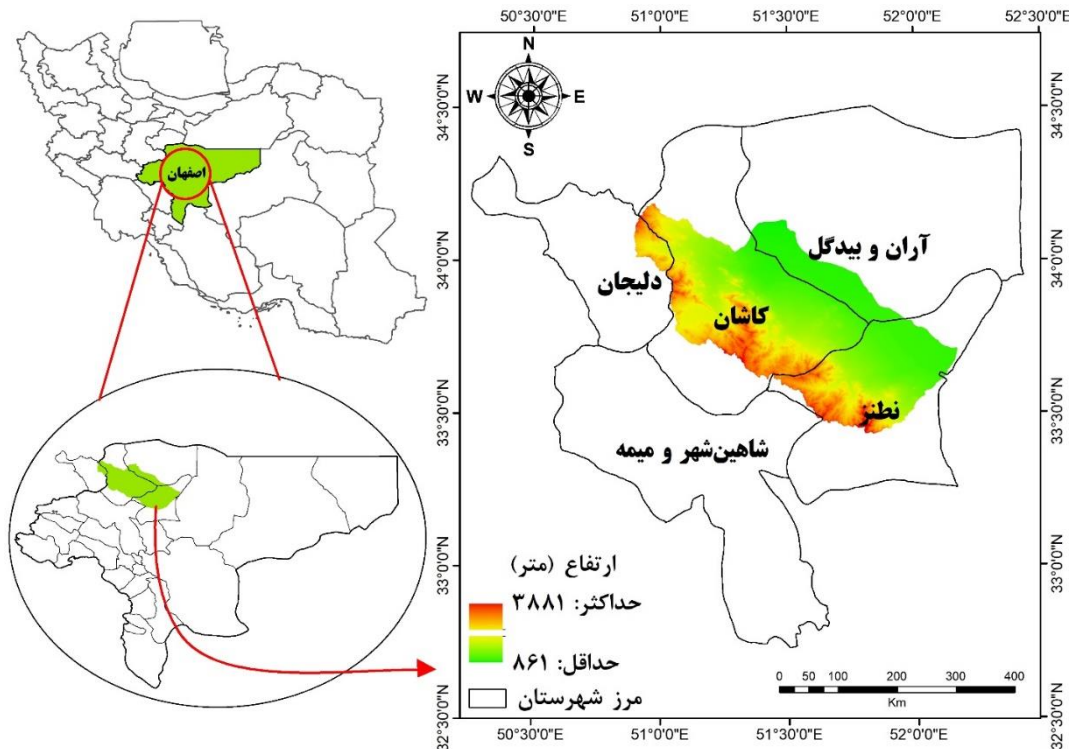
هدف پژوهش حاضر، شناسایی خودکار لندفرم‌ها و تفکیک چشم‌انداز دامنه‌های شمال شرقی ارتفاعات کرکس کوه نطنز و کاشان به طبقات لندفرم با استفاده از دو روش طبقه‌بندی ویژگی‌های زمین (TA) و شاخص موقعیت توپوگرافی (TPI) است.

منطقه مورد مطالعه

محدوده مطالعاتی تحقیق، دامنه‌های شمال شرقی رشته‌کوه‌های کرکس نطنز و کاشان است که از نظر مختصات جغرافیایی، در عرض شمالی ۳۳° ۲۵' ۵۱" تا ۳۴° ۱۱' ۱۶" و در طول شرقی ۵۰° ۵۴' ۱۹" تا ۵۲° ۹' ۴۹" واقع شده است. منطقه مورد مطالعه با ۴۷۳۹ کیلومتر مربع مساحت در قسمت شمال غربی استان اصفهان و جنوب شرقی استان مرکزی قرار گرفته است. منطقه مطالعاتی در ۵ شهرستان کاشان، آران و بیدگل، نطنز و شاهین‌شهر و میمه در استان اصفهان و شهرستان دلیجان در استان مرکزی گسترش پیدا کرده است. ارتفاعات کرکس در امتداد شمال غربی-جنوب شرقی شکل گرفته و بلندترین نقطه ارتفاعی آن کوه کرکس است. در شکل ۱ موقعیت جغرافیایی محدوده مورد مطالعه نشان داده شده است.

¹- Du

²- Lin



شکل ۱: نقشه موقعیت منطقه مورد مطالعه

روش تحقیق

معرفی مدل ویژگی‌های زمین

امروزه طبقه‌بندی خودکار لندفرم‌ها (ACL) یک زمینه تحقیقاتی در حال رشد است و الگوریتم‌ها و متدهای مختلفی با هدف ارائه روش‌های مناسب استخراج یا طبقه‌بندی عوارض سطح زمین به صورت خودکار در نرم‌افزار GIS گنجانده شده‌اند (جیویا^۱ و همکاران، ۲۰۲۱: ۱). در این راستا، مدل‌های رقومی ارتفاع (DEM) که نمایشگر سطح زمین به صورت شبکه‌ای منظم از نقاط ارتفاعی هستند (ویلسون و گلنت^۲، ۲۰۰۰: ۵۰)، ابزاری حیاتی در شناسایی الگوها در یک محیط با مجموعه‌ای از لندفرم‌ها می‌باشند (ناپیرالسکی^۳ و همکاران، ۲۰۱۰: ۲۲۲). تا پیش از معرفی DEMها در دوره بین جنگ جهانی اول تا اواخر قرن بیستم، شناسایی فرم‌های ژئومورفولوژی تنها به صورت دستی و از طریق تفسیر عکس‌های هوایی در دسترس، امکان‌پذیر بود (اسکیلاچی^۴ و همکاران، ۲۰۱۵: ۱) اما به تدریج از دهه شصت میلادی، به‌کارگیری روش‌های کمی در شناسایی خودکار عوارض سطح زمین مبتنی بر پارامترهای مورفولوژیک، نظریه سلسله مراتبی و تحت تأثیر مقیاس، در قالب ژئومورفومتری^۵ به‌عنوان زیررشته‌ای از علم ژئومورفولوژی رواج یافته است (شایان و همکاران، ۱۳۹۱: ۱۰۷-۱۰۶). طی دهه‌های گذشته، روش‌های متعددی برای طبقه‌بندی، تفکیک پدیده‌های موضوعی و استخراج دقیق‌تر اطلاعات توسعه پیدا کرده که با توجه به هدف پژوهش، نتایج متفاوتی حاصل خواهد شد (مختاری و نجفی، ۱۳۹۴: ۳۶). هدف بسیاری از

^۱- Automatic Classification of Landform

^۲- Gioia

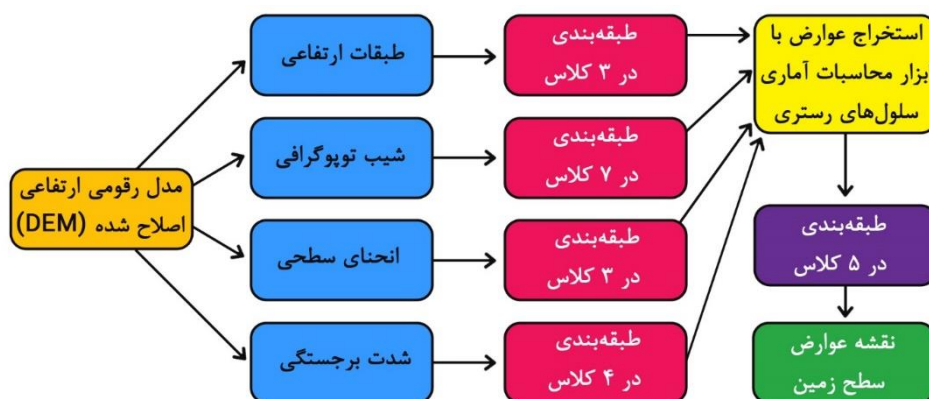
^۳- Wilson and Gallant

^۴- Napieralski

^۵- Schillaci

^۶- Geomorphometry

مدل‌ها برای استخراج و طبقه‌بندی لندفرم‌ها، مشخص کردن اشکال شیب تپه است. مدل ویژگی‌های زمین (TA) نیز از جمله همین مدل‌ها می‌باشد. چابالا^۲ و همکاران (۲۰۱۳) نخستین بار این مدل را برای طبقه‌بندی عوارض منطقه چونگوه-روفونسا^۳ در کشور زامبیا با هدف تهیه نقشه خاک به کار گرفتند. داده‌های ورودی شامل ارتفاع از سطح دریا، شیب، انحنای سطح^۴ و شدت برجستگی^۵ می‌باشد. فرایند استخراج عوارض سطح زمین با استفاده از مدل TA به شرح شکل ۲ است.



شکل ۲: مدل مفهومی معادله ویژگی‌های زمین

یک شاخصه فرعی برای توصیف واحدهای شیب تپه، موقعیت آن در توالی توپوگرافی شیب تپه می‌باشد (گودی^۶ و همکاران، ۲۰۰۴: ۵۱۸). موقعیت شیب تپه به‌عنوان واحدهای اساسی در فرایندهای هیدرولژیکی از دیرباز در ژئومورفولوژی خاک اهمیت داشته و بر فرسایش خاک و رواناب، تشکیل جریان آبراهه‌ها و جابه‌جایی رسوبات به‌طور گسترده اثر می‌گذارد (چن و همکاران، ۲۰۲۱: ۲۹۸؛ میلر و شائیتزل^۷: ۲۰۱۵: ۱۳۲). بر اساس طبقه‌بندی روچه و والکر^۸ (۱۹۶۸)، اشکال شیب تپه از رأس تا کف به ترتیب به پنج بخش تقسیم می‌شوند: قله^۹، شانه دامنه^{۱۰}، پشت دامنه^{۱۱}، پای دامنه^{۱۲} و پنجه دامنه^{۱۳} (مکرم و ساتیامورتی^{۱۴}: ۲۰۱۸: ۶۵۴). موقعیت این بخش‌ها در شکل ۳ نمایش داده شده است. همانطور که دیده می‌شود، قله و شانه دامنه در بالاترین قسمت یک تپه قرار دارند. واحد پشت دامنه، نواحی انتقالی هستند که در آن رسوبات برداشته می‌شوند و به بخش پای دامنه و پنجه دامنه منتقل می‌گردند (مارکس^{۱۵} و همکاران، ۲۰۱۸: ۲). در مدل ویژگی‌های زمین، لندفرم قله نسبتاً هموار و از نظر ژئومورفیک پایدارترین بخش دامنه است که کمترین میزان فرسایش در آن رخ می‌دهد.

1- Terrain Attributes

2- Chabala

3- Chongwe-Rufunsa

4- Curvature

5- Relief Intensity

6- Goudie

7- Chen; Miller and Schaetzl

8- Ruhe and Walker

9- Summit

10- Shoulder

11- Back Slope

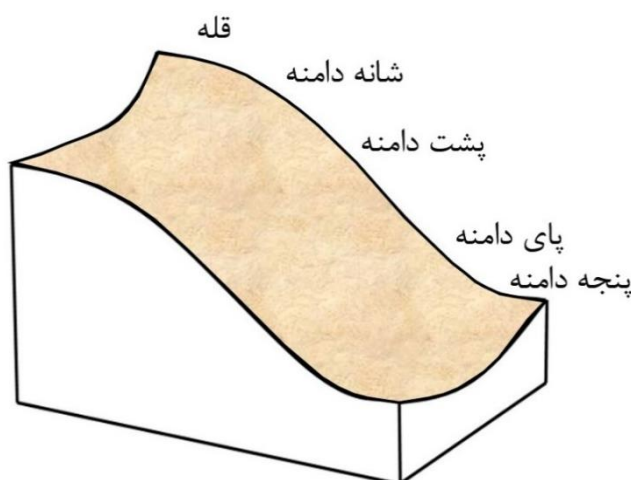
12- Foot Slope

13- Toe Slope

14- Mokarram and Sathyamoorthy

15- Marques

خاک در این واحد بیشترین درجه توسعه پروفیل را نشان می‌دهد. شانه دامنه یا دشت مرتفع، قسمت محدب دامنه در ساختار تپه و در زیر قسمت قله است که مرز آن‌ها از طریق افزایش شیب مشخص می‌شود. اگر چه خاک شانه دامنه به خاک قله شباهت دارد اما ضخامت کمتری داشته و بریده یا فشرده به نظر می‌رسد. پشت دامنه، تندترین شیب را در بین بخش‌های یک تپه دارد؛ جایی که بیشترین میزان رواناب سطحی و حمل رسوبات را تجربه می‌کند. پس از آن، بخش مقعر تپه که پای دامنه یا شیب‌های میانی نامیده می‌شود، قرار گرفته است. پای دامنه محل تجمع رسوبات می‌باشد و با یک سرایشی به بخش انتهایی تپه یعنی پنجه دامنه یا اراضی پست متصل می‌شود. در این واحد فرایندهای آبرفتی تسلط داشته و شیب آن عموماً مسطح تا حدودی مقعر است. نیمرخ خاک این واحد عمیق، نسبتاً مرطوب و متشکل از رسوبات آبرفتی می‌باشد (هوانگ^۱ و همکاران، ۲۰۱۱: ۱۴). در ادامه به مراحل اجرای مدل ویژگی‌های زمین پرداخته می‌شود.



شکل ۳: نمای شماتیک از طبقه‌بندی اجزای شیب تپه (Chen et al., 2020: 2)

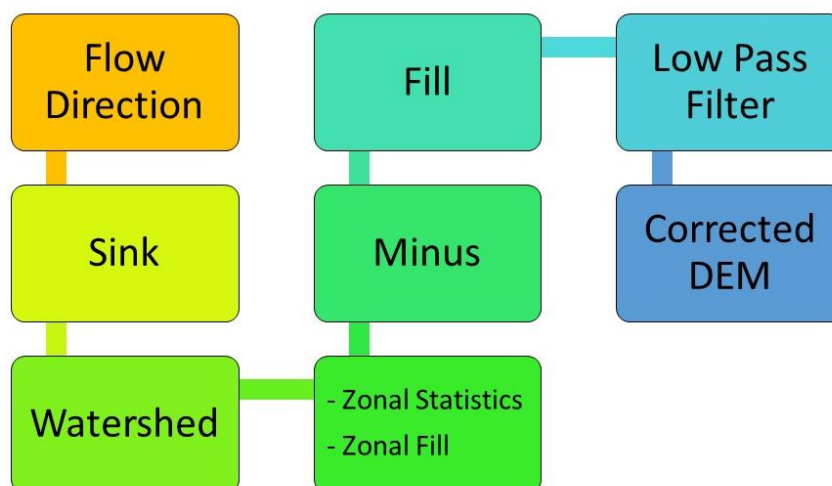
پیش پردازش مدل رقومی ارتفاع برای اجرای مدل TA

قبل از پردازش روی داده‌های DEM، باید هرگونه نقص احتمالی بررسی و اصلاح شود. این نقایص که تحت‌عنوان حفره یا چاله شناخته می‌شوند، شامل مجموعه‌ای از سلول‌ها است که چاله‌های بسته را شکل داده و باعث بروز خطا در اجرای مدل‌ها و الگوریتم‌ها می‌شود (حسین‌زاده و نداف سنگانی، ۱۳۹۲: ۱۹۴). بدین منظور ابتدا با استفاده از داده DEM ۱۰ متر، لایه جهت جریان آبراهه به وسیله ابزار Flow Direction استخراج شده تا به‌عنوان داده ورودی در ابزار Sink معرفی شود. با این تابع، سلول‌های حفره‌ای مشخص شده و از آن برای تشخیص مناطق حفره‌دار توسط ابزار Watershed استفاده شد. در مرحله بعد، این داده به‌عنوان ورودی دو ابزار Zonal Statistics و Zonal Fill معرفی شد تا به ترتیب داده حداقل و حداکثر حفره‌ها استخراج شود. سپس از ابزار Minus استفاده شد تا با تفریق داده حداکثر حفره‌ها از لایه حداقل حفره‌ها، عمق حفره به محاسبه گردد که برای داده حاضر عدد ۳۰ حاصل شد. در نهایت، برای پر کردن حفره‌ها از داده DEM و به دست آوردن مدل رقومی ارتفاعی اصلاح شده (Corrected DEM)، از ابزار Fill و عدد ۳۰ به‌عنوان شاخص Z limit در این تابع استفاده شد و در مرحله آخر پیش پردازش، به‌منظور صاف کردن سلول‌های غیرعادی، فیلتر پایین‌گذر^۲ روی DEM اصلاح شده اعمال شد. مراحل انجام پیش پردازش DEM در شکل ۴ به نمایش

^۱ Huang

^۲ Low Pass Filter

درآمده است. لازم به ذکر می‌باشد که تمامی محاسبات و پردازش‌های نرم‌افزاری در محیط ArcMap 10.5 انجام شده است.



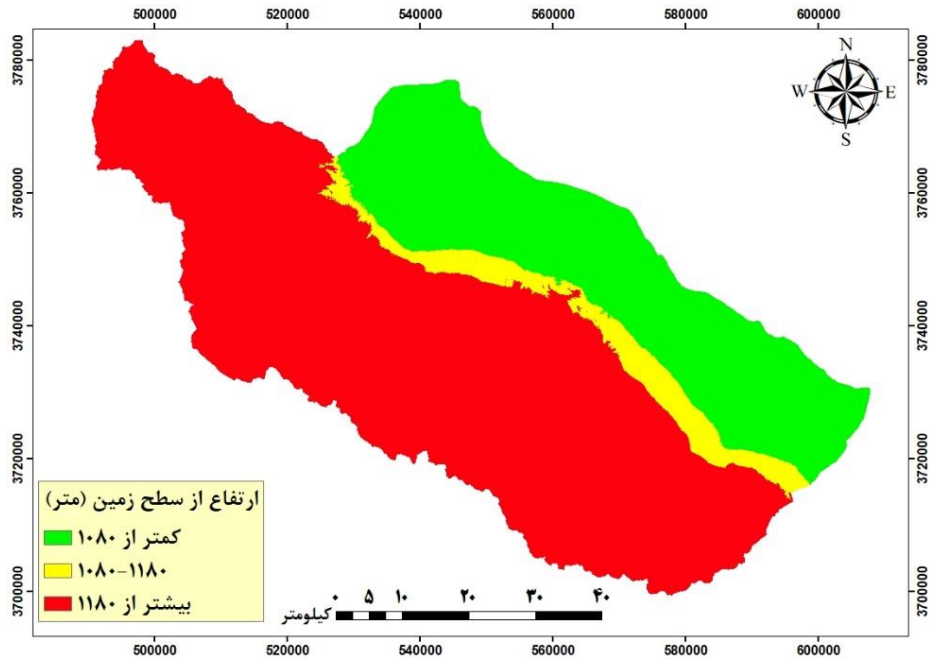
شکل ۴: مدل مفهومی مراحل انجام پیش پردازش مدل رقومی ارتفاع

ارتفاع از سطح دریا

برای طبقه‌بندی ارتفاع منطقه مورد مطالعه از داده مدل رقومی ارتفاعی اصلاح شده ۱۰ متر (Corrected DEM) که در بخش پیش پردازش به آن اشاره شد، استفاده گردید. لایه ارتفاع به ۳ طبقه تقسیم شد که در جدول ۱ به آن‌ها پرداخته شده و نقشه لایه طبقات ارتفاعی در شکل ۵ نشان داده شده است. مبنای انتخاب این کلاس‌ها، طبقه‌بندی ارائه شده توسط چابالا و همکاران (۲۰۱۳) می‌باشد.

جدول ۱: طبقات ارتفاعی

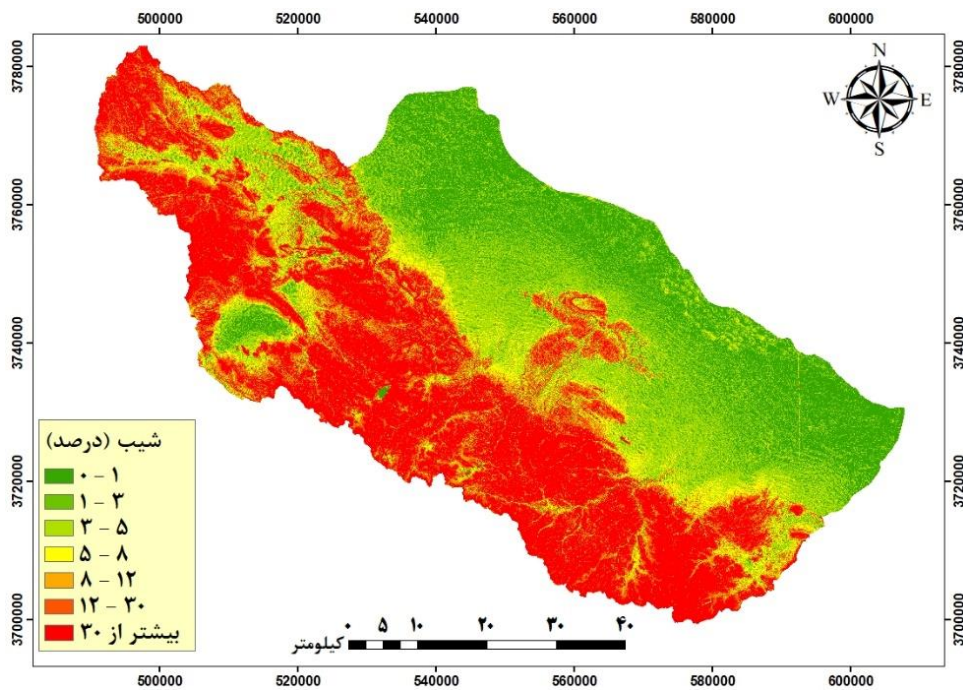
محدوده ارتفاعی (متر)	توصیف کلاس	طبقه
کمتر از ۱۰۸۰	زمین تقریباً هموار	۱
بین ۱۰۸۰ تا ۱۱۸۰	زمین شیب‌دار	۲
بیشتر از ۱۱۸۰	زمین با شیب تند	۳



شکل ۵: نقشه طبقات ارتفاعی منطقه مطالعاتی

شیب توپوگرافی

برای طبقه‌بندی شیب، ابتدا با استفاده از داده DEM به‌عنوان ورودی و ابزار Slope در نرم‌افزار ArcMap، شیب به صورت درصد به دست آمد، سپس به ۷ کلاس تقسیم شد. طبقات نقشه شیب توپوگرافی منطقه در شکل ۶ قابل مشاهده است.



شکل ۶: نقشه شیب توپوگرافی منطقه مطالعاتی

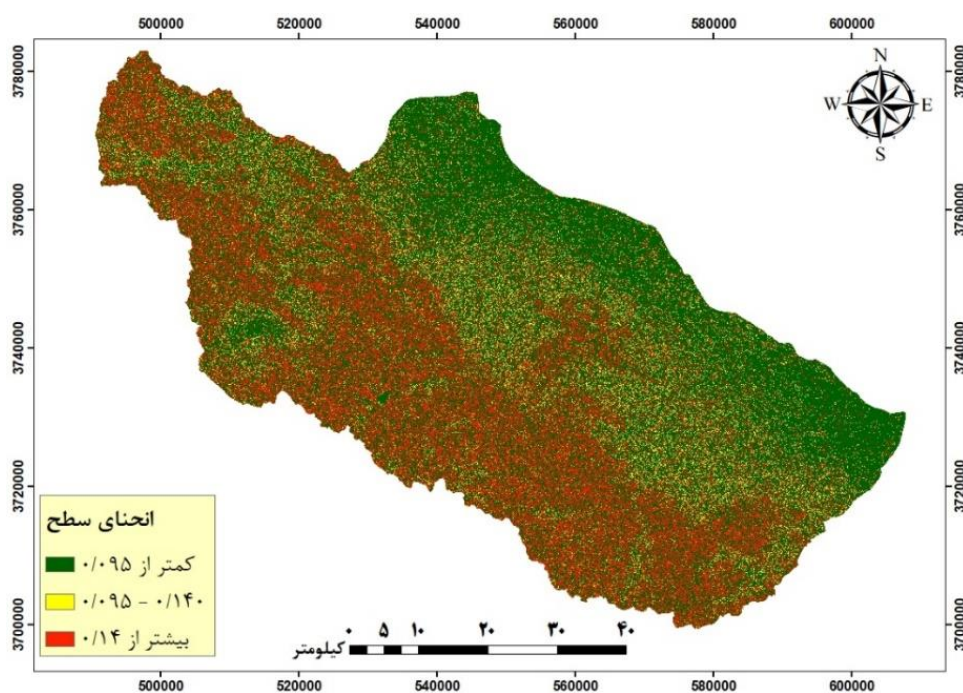
انحنای سطح

انحنای سطح به صورت خمیدگی یک خط تراز که از تقاطع سطح زمین با یک صفحه افقی شکل گرفته و نشان دهنده میزان تغییر جهت شیب در طول یک خط می‌باشد، تعریف شده است (حمزه و امیری، ۱۳۹۹: ۱۲۲-۱۲۱). لایه انحنای کلی

با استفاده از ابزار Curvature در نرم‌افزار ArcMap و داده مدل رقومی ارتفاعی اصلاح شده (Corrected DEM) محاسبه شد. در جدول ۲ کلاس‌ها و در شکل ۷ نقشه انحنای سطح منطقه مورد مطالعه بیان شده است.

جدول ۲: طبقات انحنای سطح

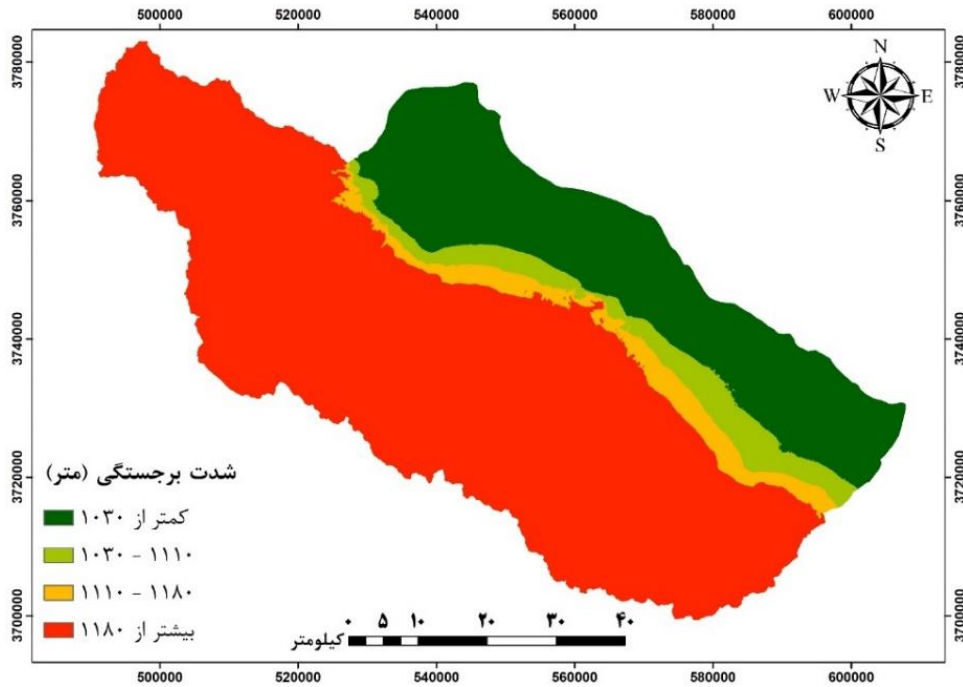
طبقه	توصیف کلاس	محدوده
۱	فرورفتگی (مقعر)	کمتر از ۰,۰۹۵
۲	سطوح تخت و مسطح	بین ۰,۰۹۵ تا ۰,۱۴۰
۳	برآمدگی (محدب)	بیشتر از ۰,۱۴۰



شکل ۷: نقشه انحنای سطح منطقه مطالعاتی

شدت برجستگی

شدت برجستگی (RI) به‌عنوان محدوده ارتفاعی در یک فاصله مشخص از هر سلول تعریف می‌شود؛ یعنی اختلاف ارتفاع بین بالاترین و پایین‌ترین نقطه در آن فاصله (Dobos et al., 2005: 16). شدت برجستگی با استفاده از Focal Statistics در محیط نرم‌افزاری ArcMap محاسبه شد و لایه خروجی به ۴ طبقه تقسیم گردید که در شکل ۸ نمایش داده شده است.



شاخص موقعیت توپوگرافی (TPI)

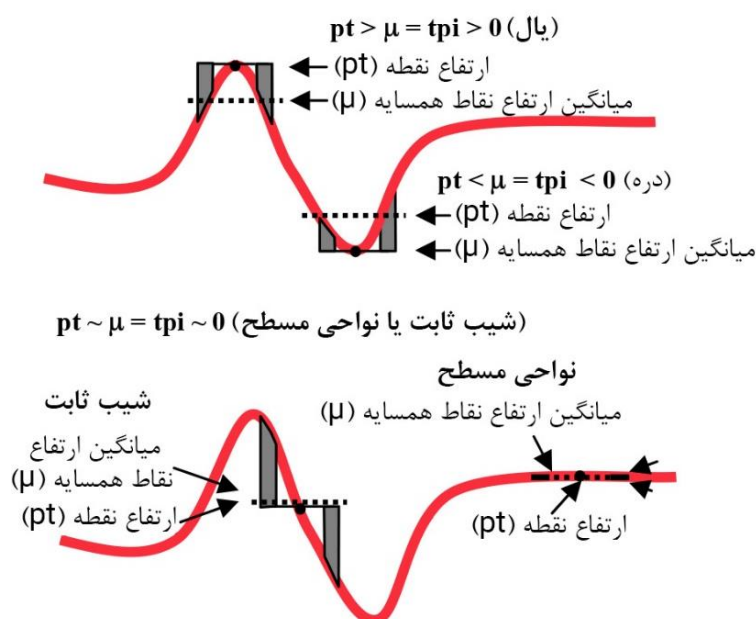
شاخص موقعیت توپوگرافی تنها یکی از مدل‌های متنوع ویژگی‌های مورفومتریک مبتنی بر نواحی مجاور است که چشم‌انداز را بر اساس وضعیت شیب طبقه‌بندی می‌کند (دی رو^۱ و همکاران، ۲۰۱۳: ۳۹). TPI شاخصی از وضعیت چشم‌انداز زمین است که از طریق اختلاف ارتفاع هر سلول نسبت به ارتفاع متوسط سلول‌های همسایه محاسبه می‌شود (تنتین و دی سوزا رباینا^۲، ۲۰۱۸: ۴۲۴). این شاخص نخستین بار توسط زوبل و فلز در سال ۱۹۹۵ ارائه شد و توسط وایز^۳ در سال ۲۰۰۱ توسعه پیدا کرد (بهرامی و همکاران، ۱۳۹۲: ۲۱). عملکرد بسیاری از فرایندهای فیزیکی و زیستی همچون فرسایش و رسوب‌گذاری خاک، تعادل و پاسخ هیدرولوژیکی، فرسایش بادی و زهکش هوای سرد در یک چشم‌انداز، ارتباط بسیار بالایی با موقعیت توپوگرافی دارد (وایز، ۲۰۰۱: ۱). مقادیر منفی TPI نمایانگر سلول‌هایی است که ارتفاع آن‌ها نسبت به سلول‌های اطرافشان ارتفاع کمتری دارند و مقادیر مثبت ارتفاع بالاتری نسبت به سلول‌هایی که آنرا احاطه کرده‌اند، دارند. مقادیر بین منفی ۱ تا مثبت ۱ نیز سطوح مسطح یا با شیب کم که تغییرات ارتفاعی اندکی نسبت به سلول‌های پیرامون خود دارند را نشان می‌دهد (ورهان و سومر^۴، ۲۰۲۱: ۵). این مفهوم در شکل ۹ آمده است.

^۱- De Reu

^۲- Trentin and de Souza Robaina

^۳- Weiss

^۴- Wehrhan and Sommer



شکل ۹: نمایش شاخص موقعیت توپوگرافی (منبع: مکرم و نگهبان: ۱۳۹۳: ۶۲).

برای تعریف طبقات لندفرمها بر اساس شاخص موقعیت توپوگرافی تاکنون چهار الگو معرفی شده که شامل وایز (۲۰۰۱) در ۶ و ۱۰ کلاس، دیکسون و بیر^۱ (۲۰۰۶) در ۴ کلاس و جنز^۲ و همکاران (۲۰۱۱) در سه کلاس می‌باشد (ملکی و همکاران، ۱۳۹۵: ۱۳۳-۱۳۳). در تحقیق حاضر، عوارض سطح زمین در شش طبقه بر اساس الگوی وایز (۲۰۰۱) دسته‌بندی شده‌اند (جدول ۳). در این مدل، شیب بالایی یا تند در واقع همان شیب‌های محدب، شیب‌های میانی نشان دهنده شیب مستقیم و شیب‌های پایینی بیانگر شیب‌های مقعر می‌باشند (سردا^۳، ۱۹۹۸: ۶۶۲).

جدول ۳: طبقه‌بندی لندفرمها بر اساس شاخص موقعیت توپوگرافی

شاخص موقعیت توپوگرافی	نوع لندفرم	#
$TPI \leq -1 SD$	دره‌ها	۱
$-1 SD < TPI \leq -0.5 SD$	شیب‌های پایینی	۲
$-0.5 SD < TPI < 0.5 SD, Slope \leq 5^\circ$	شیب‌های مسطح	۳
$-0.5 SD < TPI < 0.5 SD, Slope > 5^\circ$	شیب‌های میانی	۴
$0.5 SD < TPI \leq 1 SD$	شیب‌های بالایی	۵
$TPI > 1 SD$	ستخ	۶

منبع: Jenness et al., 2013: 62

بحث و یافته‌ها

طبقه‌بندی لندفرمها با استفاده از مدل ویژگی‌های زمین

⁵- Dickson and Beier

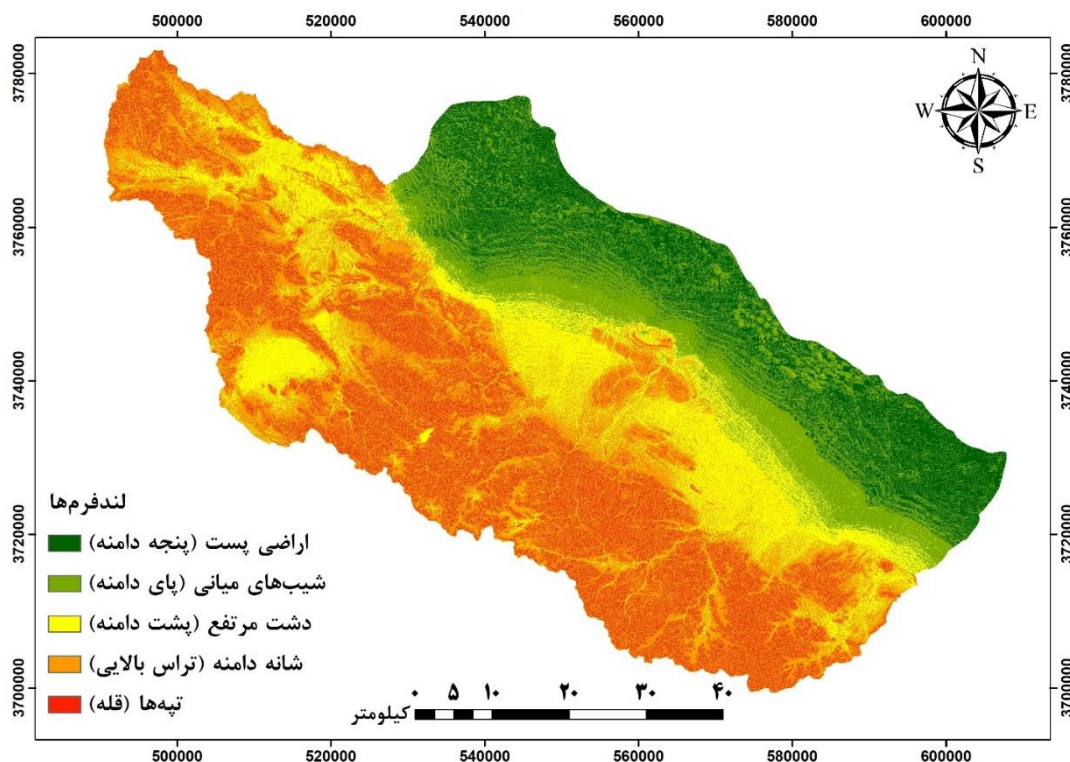
⁶- Jenness

^۳- Cerdà

نقشه لندفرم‌ها از طریق همپوشانی لایه‌های طبقه‌بندی شده ارتفاع، شیب، انحنا و شدت برجستگی با استفاده از ابزار Cell Statistics در نرم‌افزار ArcMap تولید گردید. لایه خروجی به ۵ طبقه تقسیم شد که در جدول ۴ نمایش داده شده و نقشه لندفرم‌ها در شکل ۱۰ قابل مشاهده است.

جدول ۴: طبقه‌بندی لندفرم‌ها بر اساس مدل ویژگی‌های زمین

طبقه	نوع لندفرم	توصیف طبقه
۱	پنجه دامنه (اراضی پست)	شیب بین ۱ تا ۳ درصد، سطوح تخت، ارتفاع کمتر از ۱۱۸۰ متر
۲	پای دامنه (شیب‌های میانی)	ارتفاع کمتر از ۱۰۸۰ متر، شیب کمتر از ۱ درصد، سطوح مقعر تا تخت، شدت برجستگی کمتر از ۱۰۳۰ متر
۳	پشت دامنه (دشت مرتفع)	شیب ۳ تا ۸ درصد، غالباً با انحنای مسطح، ارتفاع و شدت برجستگی بین ۱۰۳۰ تا ۱۱۸۰ متر
۴	شانه دامنه (تراس بالایی)	شیب بین ۸ تا ۱۲ درصد، انحنای محدب، ارتفاع بیشتر از ۱۱۸۰ متر و شدت برجستگی بین ۱۱۰۰ تا ۱۱۸۰ متر
۵	تپه‌ها (قله)	شیب بیشتر از ۱۲ درصد، انحنای محدب، ارتفاع بیشتر از ۱۱۸۰ متر و شدت برجستگی بیشتر از ۱۱۸۰ متر

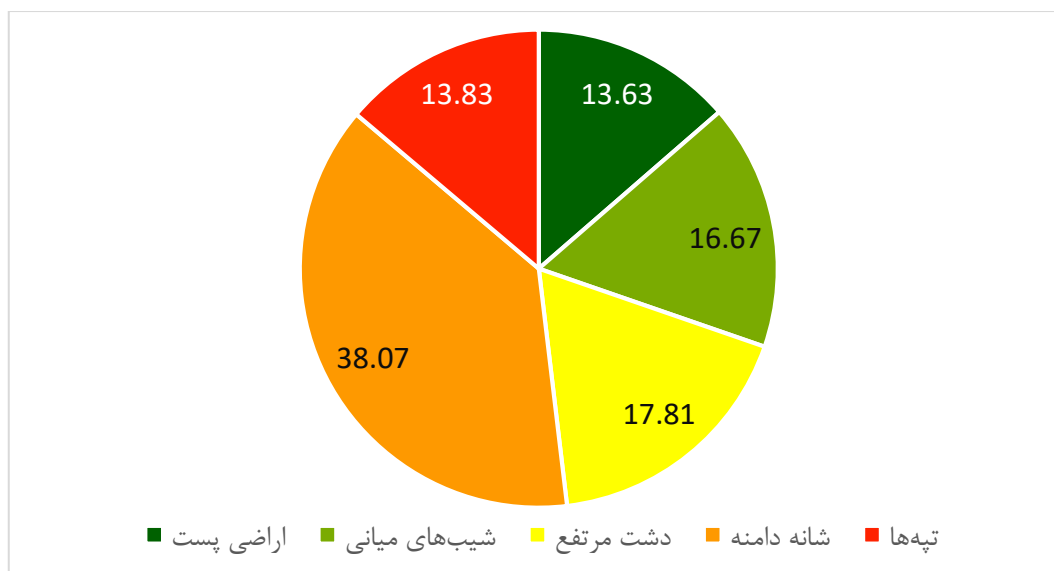


شکل ۱۰: طبقه‌بندی لندفرم‌های منطقه مورد مطالعه بر اساس مدل TI

خصوصیات و درصد مساحت هر یک از طبقات لندفرم‌های ژئومورفولوژی بر اساس مدل ویژگی‌های زمین در جدول ۵ و شکل ۱۱ نمایش داده شده است. لندفرم پادگانه‌های بالایی یا شانه دامنه با مساحت ۱۸۱۰ کیلومترمربع که حدود ۳۸ درصد مساحت منطقه مورد مطالعه را در برمی‌گیرد، فرم غالب چشم‌انداز محدوده مطالعاتی می‌باشد. اراضی پست یا پنجه دامنه با اختلافی ناچیز نسبت به واحد تپه‌ها که نشان دهنده قله‌ها و یال‌ها می‌باشد، با مساحت ۶۴۸ کیلومترمربع (۱۳/۶۳ درصد) کمترین وسعت را در دامنه‌های شمال شرقی ارتفاعات کرکس کوه نطنز و کاشان دارد.

جدول ۵: خصوصیات طبقات لندفرم‌ها بر اساس شاخص ویژگی‌های زمین

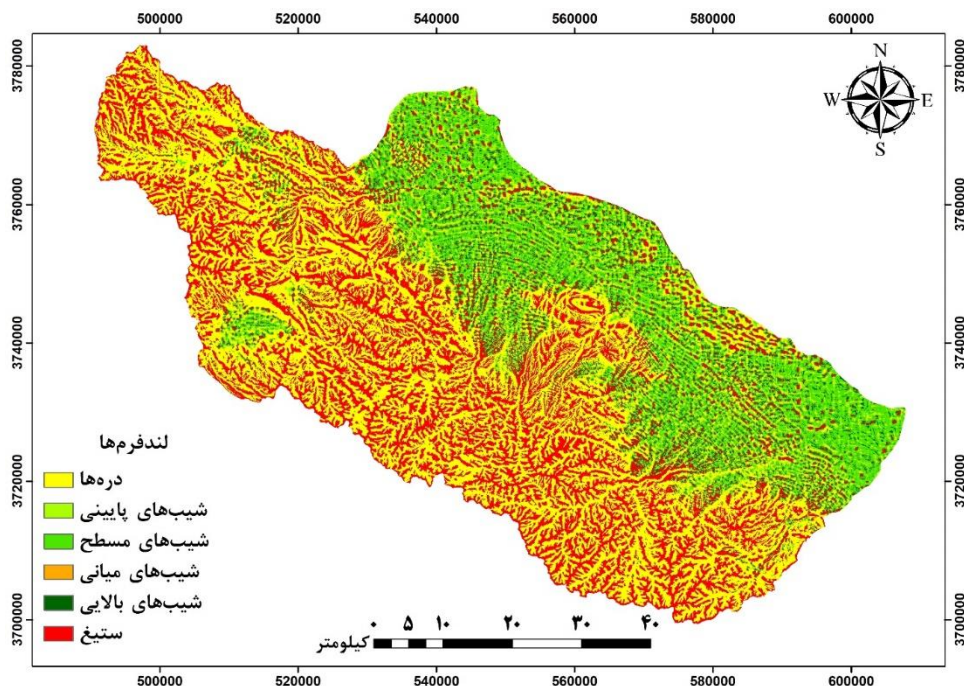
طبقه	نوع لندفرم	مساحت طبقه (کیلومتر مربع)	درصد مساحت طبقه
۱	اراضی پست (پنجه دامنه)	۶۴۷/۸۹	۱۳/۶۳
۲	شیب‌های میانی (پای دامنه)	۷۹۲/۷۱	۱۶/۶۷
۳	دشت مرتفع (پشت دامنه)	۸۴۶/۹	۱۷/۸۱
۴	شانه دامنه (تراس بالایی)	۱۸۱۰/۰۲	۳۸/۰۷
۵	تپه‌ها (قله)	۶۵۷/۴۶	۱۳/۸۳
	مجموع	۴۷۵۴/۹۸	۱۰۰



شکل ۱۱: درصد مساحت هر یک از لندفرم‌ها بر اساس مدل TI

طبقه‌بندی لندفرم‌ها با استفاده از شاخص موقعیت توپوگرافی

برای طبقه‌بندی عوارض سطح زمین با مدل TPI از افزونه Land Facet Corridor که برای نرم‌افزار ArcMap معرفی شده، استفاده گردید. نقشه طبقه‌بندی لندفرم‌های منطقه مورد مطالعه در شکل ۱۲ قرار داده شده است.

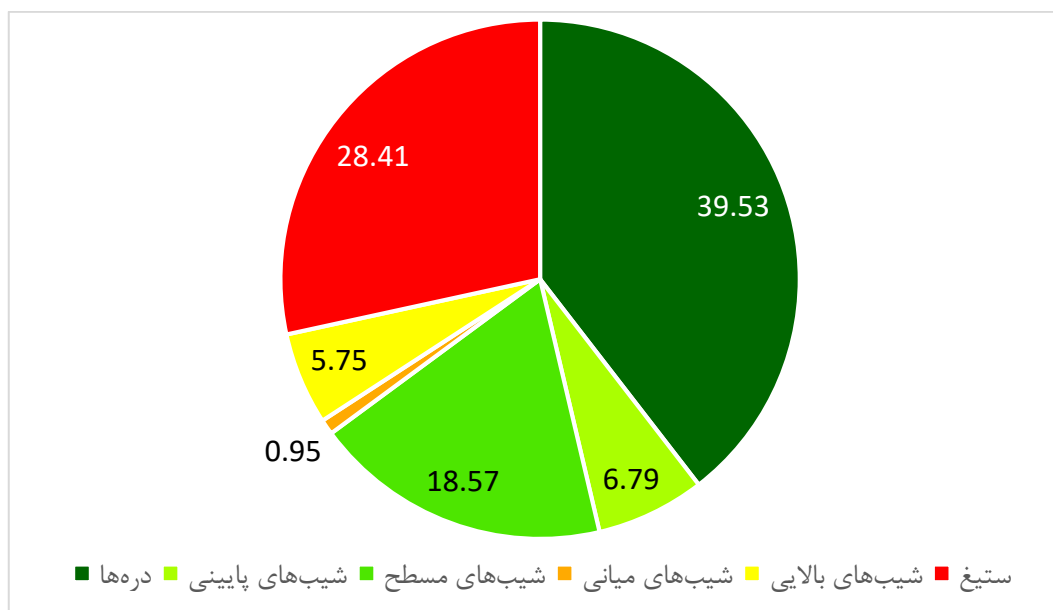


شکل ۱۲: طبقه‌بندی لندفرم‌های منطقه مورد مطالعه بر اساس مدل TPI

خصوصیات و درصد مساحت هر یک از طبقات لندفرم‌های ژئومورفولوژی بر اساس شاخص موقعیت توپوگرافی در جدول ۶ و شکل ۱۳ نمایش داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، لندفرم دره با مساحت ۱۸۷۲ کیلومتر مربع معادل حدود ۴۰ درصد مساحت منطقه مورد مطالعه به‌عنوان لندفرم غالب محدوده مطالعاتی محسوب می‌شود. با توجه به کوهستانی بودن بخش اعظم منطقه، این امر طبیعی به نظر می‌رسد. همانطور که در جدول ۳ ذکر شده، فرم دره در شاخص TPI دارای مقادیر منفی ۱ یا کمتر بوده و مناطقی را در بر می‌گیرد که پایین‌تر از اطرافشان هستند. لندفرم شیب‌های میانی با مساحتی نزدیک به ۱ درصد کمترین پهنا را در منطقه مورد مطالعه در بر گرفته است.

جدول ۶: خصوصیات طبقات لندفرم‌ها بر اساس شاخص موقعیت توپوگرافی

#	نوع لندفرم	مساحت طبقه (کیلومتر مربع)	درصد مساحت طبقه
۱	دره‌ها	۱۸۷۲/۴۱	۳۹/۵۳
۲	شیب‌های پایینی	۳۲۱/۴۹	۶/۷۹
۳	شیب‌های مسطح	۸۷۹/۳۵	۱۸/۵۷
۴	شیب‌های میانی	۴۴/۸	۰/۹۵
۵	شیب‌های بالایی	۲۷۲/۵۷	۵/۷۵
۶	ستیغ	۱۳۴۵/۷۱	۲۸/۴۱
	مجموع	۴۷۳۶/۳۳	۱۰۰



شکل ۱۳: درصد مساحت هر یک از لندفرم‌ها بر اساس مدل TPI

کاربردهای طبقه‌بندی لندفرم‌ها در ژئومورفولوژی کاربردی

لندفرم‌ها بر نحوه جریان پیدا کردن رواناب‌های سطحی، جابه‌جایی مواد رسوبی، تولید و توسعه خاک و حتی تعیین نوع اقلیم محلی منطقه و پارامترهای وابسته به آن تأثیر می‌گذارند. همچنین سایر پدیده‌های طبیعی چون پوشش گیاهی و جامعه زیستی نیز مستقیماً توسط الگوی لندفرم‌ها و موقعیت نسبی آن‌ها در میان چشم‌اندازها متأثر هستند (رحمتی‌نیا و فیضی‌زاده، ۱۴۰۱: ۱۰۶). همچنین با توجه به وضعیت بیابانی منطقه مورد مطالعه و گسترش فعالیت‌های انسانی، طبقه‌بندی لندفرم‌ها در بازه‌های زمانی مختلف می‌تواند تغییرات را آشکار ساخته و در امر مدیریت محیط مورد استفاده قرار گیرد (رعیتی شوازی و همکاران، ۱۳۹۶: ۵۸). یکی دیگر از موارد کاربردی تهیه نقشه طبقه‌بندی لندفرم‌ها در منطقه مورد مطالعه، استفاده از نتایج آن در مباحث علوم نظامی می‌باشد. از آنجا که تأسیسات هسته‌ای شهید احمدی روشن نظیر در محدوده مطالعاتی مستقر شده، شناسایی عوارض سطح زمین در چگونگی استقرار سامانه‌های پدافند دفاع هوایی و موارد مشابه نظامی می‌تواند کاربرد اساسی داشته باشد. بنابراین طبقه‌بندی لندفرم‌ها و تهیه نقشه عوارض سطح زمین حاوی ارزش اطلاعاتی بسیار زیادی برای برنامه‌ریزی در رشته‌های مختلف از جمله علوم محیطی، مهندسی عمران، کشاورزی، حفاظت منابع طبیعی، پیش‌بینی و پیشگیری از بلایای طبیعی احتمالی می‌باشد (حجتی و مکرّم، ۱۳۹۵: ۴۱).

نتیجه‌گیری

لندفرم‌ها، اشکال ناهمواری‌های سطح زمین با خصوصیات یکنواخت و همگن هستند که برنامه‌ریزی و مدیریت یکنواختی را می‌طلبند. به همین دلیل، شناسایی و طبقه‌بندی عوارض سطح زمین از اهمیت خاصی برخوردار است. بنابراین نقشه ژئومورفولوژی می‌تواند با نمایش لندفرم‌های سطح زمین برای هرگونه تصمیم‌گیری محیطی و کاربری از زمین در باب مخاطرات و منابع طبیعی، نه تنها مفید که ضروری واقع شود. در این بین، تکنیک‌های بررسی و نقشه‌برداری لندفرم‌ها مبتنی بر آنالیزهای ژئومورفولوژیکی در ترکیب با GIS و تکنیک‌های سنجش از راه دور می‌تواند ابزاری مفید برای مدیریت منابع طبیعی باشد. نتایج بسیاری از تحقیقات در این زمینه نشان داده که طبقه‌بندی خودکار لندفرم‌ها نسبت به رویکردهای سنتی بصری از سرعت، دقت، کارایی و جزئیات بیشتری برخوردار است و نتایج حاصل از آن به تفسیر مفسر و پژوهشگر وابسته نیست. در پژوهش حاضر دو مدل شناسایی و طبقه‌بندی خودکار عوارض سطح زمین یعنی متد ویژگی‌های زمین

(TA) و شاخص موقعیت توپوگرافی (TPI) که هر دو مبتنی بر مدل رقومی ارتفاعی (DEM) هستند را برای دامنه‌های شمال شرقی ارتفاعات کرکس کوه نطنز و کاشان اراده کرده است. مهم‌ترین لندفرم‌های منطقه بر اساس مدل TA لندفرم شانه دامنه بوده که در واحد سطحی کوهستان در بخش جنوب و جنوب شرق منطقه مورد مطالعه گسترش پیدا کرده و بر اساس مدل TPI عرضه دره می‌باشد که در آن هم همانند شانه دامنه در واحد کوهستان توسعه پیدا کرده است. نقشه‌های نهایی این دو مدل که در شکل ۱۰ و ۱۲ نمایش داده شده‌اند، منعکس‌کننده ویژگی‌های فیزیکی سطح زمین و تفاوت‌های ساختاری سطوح مختلف در دامنه‌های شمال شرقی ارتفاعات کرکس هستند که می‌توانند در مطالعات بعدی به‌خصوص در زمینه تحقیقات مرتبط با خاک مورد استفاده قرار بگیرند. با توجه به اینکه مدل ویژگی‌های زمین از چهار پارامتر ارتفاع از سطح دریا، شیب توپوگرافی، انحنای سطح و شدت برجستگی به‌عنوان ورودی برای پردازش و طبقه‌بندی لندفرم‌ها استفاده می‌کند، بالقوه می‌تواند دقت بالاتری از مدل TPI داشته باشد که تنها از DEM برای شناسایی عوارض بهره می‌برد. از طرفی اما شاخص موقعیت توپوگرافی توانایی شناسایی طیف گسترده‌تری از عوارض را دارد لذا برخلاف مدل TA که طبقه‌بندی آن بیشتر در ژئومورفولوژی خاک کاربرد دارد، نقشه لندفرم‌ها با متد TPI را می‌توان در بسیاری از حوزه‌ها استفاده کرد.

منابع

- احمدآبادی، ع.، هاشمی، م.، ۱۳۹۸. طبقه‌بندی انواع دشت‌سر مبتنی بر رویکرد ژئومورفومتری در منطقه اشکذر یزد، کاوش‌های جغرافیایی مناطق بیابانی، دوره ۷، شماره ۲، صص ۱۹۲-۱۷۳.
- بهرامی، ح.، نوحه‌گر، ا.، محمودی، و.، ۱۳۹۲. طبقه‌بندی خودکار لندفرم‌های حوضه آبخیز با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی (مطالعه موردی: حوضه آبخیز بروجن در استان چهارمحال و بختیاری)، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، دوره ۲، شماره ۳، صص ۳۰-۱۷.
- بهشتی جاوید، ا.، اسفندیاری، ف.، روستائی، ش.، ۱۳۹۷. استخراج و شناسایی لندفرم‌های یخچالی با استفاده از روش شی‌گرا (مطالعه موردی سیرک‌های یخچالی سبلان)، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، دوره ۶، شماره ۴ (شماره پیاپی ۲۴)، صص ۸۸-۱۰۲.
- حجتی، م.، مکرّم، م.، ۱۳۹۵. استفاده از مدل زیرپیکسل جاذبه (attraction) به‌منظور طبقه‌بندی لندفرم‌ها، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، دوره ۴، شماره ۴، صص ۵۵-۴۰.
- حسین‌زاده، س.، نذاف سنگانی، م.، ۱۳۹۴. ارزیابی دقت مدل‌های رقومی ارتفاع (DEMs) حاصل از نقشه‌های توپوگرافی و مقایسه تطبیقی آن با DEM‌های ماهواره‌ای (مطالعه موردی: DEM‌های توپوگرافی و ASTER منطقه آبغه در خراسان رضوی)، پژوهش‌های جغرافیای طبیعی (پژوهش‌های جغرافیایی)، دوره ۴۵، شماره ۱ (شماره پیاپی ۸۳)، صص ۸۶-۷۱.
- حمزه، س.، امیری، ا.، ۱۳۹۹. پهنه‌بندی خطر رانش زمین با استفاده از روش‌های همپوشانی وزنی و تحلیل شبکه-مطالعه موردی: منطقه نصرآباد استان گلستان، نشریه علمی-پژوهشی اطلاعات جغرافیایی (سپهر)، دوره ۲۹، شماره ۱۱۴، صص ۱۳۲-۱۱۷.
- رحمتی‌نیا، و.، فیضی‌زاده، ب.، ۱۴۰۱. شناسایی نیمه‌خودکار لندفرم‌ها با استفاده از پردازش شی‌گرا، مدل رقومی ارتفاع و تصاویر ماهواره‌ای مطالعه موردی: حوضه آبریز رودخانه دز واقع در دامنه‌های غربی و جنوب‌غربی زاگرس، هیدروژئومورفولوژی، شماره ۳۰، سال نهم، صص ۱۳۳-۱۰۵.
- رعیتی‌شوازی، م.، کرم، ا.، غفاریان‌المیری، ح.، سپهر، ع.، ۱۳۹۶. مقایسه کارایی برخی الگوریتم‌های طبقه‌بندی در مطالعه تغییرات لندفرم‌های بیابانی دشت یزد-اردکان، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، دوره ۶، شماره ۱، صص ۷۳-۵۷.

- شایان، س.، احمدآبادی، ع.، یمانی، م.، فرج‌زاده، م.، کبیر، ا.، ۱۳۹۱. ارزیابی کارایی شاخص‌های ژئومورفومتریک به روش وود در طبقه‌بندی لندفرم‌های مناطق خشک (مطالعه موردی: منطقه مرنجاب)، برنامه‌ریزی و آمایش فضا (مدرس علوم انسانی)، دوره ۱۶، شماره ۱ (شماره پیاپی ۷۳)، صص ۱۲۰-۱۰۵.
- شایان، س.، زارع، غ.، امیری، ش.، ۱۳۹۰. نقشه‌های ژئومورفولوژی، تاریخچه، ضرورت و کاربرد، نشریه علمی-پژوهشی اطلاعات جغرافیایی (سپهر)، دوره ۲۰، شماره ۷۹، صص ۳۷-۴۵.
- شایان، س.، فرج‌زاده، م.، احمدآبادی، ع.، ۱۳۹۱. طبقه‌بندی نظارت شده لندفرم‌های ژئومورفولوژیکی مناطق خشک با استفاده از پارامترهای ژئومورفومتریک (نمونه موردی: منطقه مرنجاب)، نشریه سنجش از دور و GIS ایران، سال چهارم، شماره دوم، صص ۱۹-۲۸.
- شهرداری اردجان، ر.، ۱۳۹۴. جایگاه نقشه ژئومورفولوژی در توسعه فیزیکی سکونتگاه‌های شهرستان آستارا، فصلنامه مطالعات برنامه‌ریزی سکونتگاه‌های انسانی، دوره ۱۰، شماره ۳۰ (شماره پیاپی ۳۰)، صص ۸۵-۹۸.
- عادل، ز.، قهرودی تالی، م.، صدوق، ح.، ۱۴۰۰. کاربرد روش ژئومورفون‌ها در شناسایی عناصر اشکال زمین (مطالعه موردی حوضه حبله رود)، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، دوره ۱۰، شماره ۲، صص ۱۱۹-۱۰۶.
- محمدزاده، ک.، حسینی، س.، صمدی، م.، لعلی نیت، ا.، رحیمی، م.، ۱۴۰۰. شناسایی نیمه‌خودکار لندفرم‌ها با استفاده از پردازش فازی شیء‌گرایی تصاویر ماهواره‌ای - مطالعه موردی: شهرستان ماکو، ۱. نشریه علمی-پژوهشی اطلاعات جغرافیایی (سپهر)، دوره ۳۰، شماره ۱۱۸، صص ۹۱-۷۷.
- مختاری، م.، نجفی، ا.، ۱۳۹۴. مقایسه روش‌های طبقه‌بندی ماشین بردار پشتیبان و شبکه عصبی مصنوعی در استخراج کاربری‌های اراضی از تصاویر ماهواره‌ای لندست TM، مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب و خاک، سال ۱۹، شماره ۷۲، صص ۴۴-۳۵.
- مکرم، م.، نگهبان، س.، ۱۳۹۳. طبقه‌بندی لندفرم‌ها با استفاده از شاخص موقعیت توپوگرافی (TPI) (مطالعه موردی: منطقه جنوبی شهرستان داراب)، فصلنامه علمی-پژوهشی اطلاعات جغرافیایی (سپهر)، ۲۳ (۹۲)، صص ۶۵-۵۷.
- ملکی، ا.، مارابی، ه.، رحیمی، ح.، ۱۳۹۵. ارزیابی شاخص موقعیت توپوگرافی (TPI) در زون سنج-سیرجان و زاگرس شکسته، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، دوره ۵، شماره ۱، صص ۱۴۱-۱۲۹.
- نگهبان، س.، مکرم، م.، ۱۳۹۴. طبقه‌بندی لندفرم‌ها بر اساس شاخص موقعیت توپوگرافی (TPI) و ارتباط آن با ویژگی‌های زمین‌شناسی در حوضه آبخیز حکان (شهرستان جهرم)، مجله پژوهش‌های فرسایش محیطی دانشگاه هرمزگان، سال ۵، شماره ۱، صص ۸۹-۷۵.
- Bishop, M. P., Shroder Jr, J. F., & Colby, J. D. (2003). Remote sensing and geomorphometry for studying relief production in high mountains. *Geomorphology*, 55(1-4), 345-361.
- Cerdà, A. (1998). The influence of geomorphological position and vegetation cover on the erosional and hydrological processes on a Mediterranean hillslope. *Hydrological Processes*, 12(4), 661-671.
- Chen, C., Zou, X., Singh, A. K., Zhu, X., Zhang, W., Yang, B., ... & Liu, W. (2021). Effects of hillslope position on soil water infiltration and preferential flow in tropical forest in southwest China. *Journal of Environmental Management*, 299, 113672.
- Chen, H. E., Chiu, Y. Y., Tsai, T. L., & Yang, J. C. (2020). Effect of rainfall, runoff and infiltration processes on the stability of footslopes. *Water*, 12(5), 1229.
- De Reu, J., Bourgeois, J., Bats, M., Zwertvaegher, A., Gelorini, V., De Smedt, P., ... & Crombé, P. (2013). Application of the topographic position index to heterogeneous landscapes. *Geomorphology*, 186, 39-49.
- Dobos, Endre, Jöel Daroussin, and Luca Montanarella. An SRTM-based procedure to delineate SOTER Terrain Units on 1: 1 and 1: 5 million scales. *European Communities*, 2005.
- Drăguț, L., & Blaschke, T. (2006). Automated classification of landform elements using object-based image analysis. *Geomorphology*, 81(3-4), 330-344.

- Du, L., You, X., Li, K., Meng, L., Cheng, G., Xiong, L., & Wang, G. (2019). Multi-modal deep learning for landform recognition. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 158, 63-75.
- Gioia, D., Danese, M., Corrado, G., Di Leo, P., Minervino Amodio, A., & Schiattarella, M. (2021). Assessing the prediction accuracy of geomorphon-based automated landform classification: An example from the ionian coastal belt of southern Italy. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 10(11), 725.
- Goudie, A. (Ed.). (2004). *Encyclopedia of geomorphology* (Vol. 2). Psychology Press.
- Huang, P. M., Li, Y., & Sumner, M. E. (Eds.). (2011). *Handbook of soil sciences: properties and processes, Section 29: Geomorphology of Soil Landscapes*, CRC Press.
- Huggett, R., & Shuttleworth, E. (2022). *Fundamentals of geomorphology*. Taylor & Francis.
- Jenness, J., Brost, B., & Beier, P. (2013). *Land facet corridor designer*. USDA forest service rocky mountain research station.
- Lin, S., Chen, N., & He, Z. (2021). Automatic Landform Recognition from the Perspective of Watershed Spatial Structure Based on Digital Elevation Models. *Remote Sensing*, 13(19), 3926.
- MacMillan, R. A., & Shary, P. A. (2009). Landforms and landform elements in geomorphometry. *Developments in soil science*, 33, 227-254.
- MacMillan, R. A., & Shary, P. A. (2009). Landforms and landform elements in geomorphometry. *Developments in soil science*, 33, 227-254.
- Marques, K. P., Demattê, J. A., Miller, B. A., & Lepsch, I. F. (2018). Geomorphometric segmentation of complex slope elements for detailed digital soil mapping in southeast Brazil. *Geoderma Regional*, 14, e00175.
- Martins, F. M., Fernandez, H. M., Isidoro, J. M., Jordán, A., & Zavala, L. (2016). Classification of landforms in Southern Portugal (Ria Formosa Basin). *Journal of Maps*, 12(3), 422-430.
- Miller, B. A., & Schaetzl, R. J. (2015). Digital classification of hillslope position. *Soil Science Society of America Journal*, 79(1), 132-145.
- Mohamed, S. Z., Bahnassy, M., Gaber, H., & Darwish, K. M. (2018). Comparative Study of Landform Mapping Using Terrain Attributes and Topographic Position Index (TPI): a Case Study in Al-Alamien–Ras El-Hekma Region, Egypt. *Alexandria science exchange journal*, 39(OCTOBER-DECEMBER), 596-605.
- Mokarram, M., & Hojati, M. (2016). Comparison of landform classifications of elevation, slope, relief and curvature with topographic position index in the South of Bojnord. *Ecopersia*, 4(2), 1343-1357.
- Mokarram, M., & Sathyamoorthy, D. (2018). A review of landform classification methods. *Spatial Information Research*, 26(6), 647-660.
- Napieralski, J., & Nalepa, N. (2010). The application of control charts to determine the effect of grid cell size on landform morphometry. *Computers & geosciences*, 36(2), 222-230.
- Schillaci, C., Braun, A. and Kropáček, J. (2015) *Terrain Analysis and Landform Recognition*. In: *Geomorphological Techniques*, British Society for Geomorphology, London, Chap. 2, Sec. 4. 2.
- Schneider, M., & Klein, R. (2009). Semi-automatic digital landform mapping. In *Landform-Structure, Evolution, Process Control* (pp. 37-51). Springer, Berlin, Heidelberg.
- Tağıl, Ş., & 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*,
- Trentin, R., & de Souza Robaina, L. E. (2018). Study of the landforms of the ibicuí river basin with use of topographic position index. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 19(2).
- Volume 8, Issue 6, pp 910-921.

- Wehrhan, M., & Sommer, M. (2021). A Parsimonious Approach to Estimate Soil Organic Carbon Applying Unmanned Aerial System (UAS) Multispectral Imagery and the Topographic Position Index in a Heterogeneous Soil Landscape. *Remote Sensing*, 13(18), 3557.
- Weiss, A. (2001, July). Topographic position and landforms analysis. In Poster presentation, ESRI user conference, San Diego, CA (Vol. 200).
- Wieczorek, M., & Migoń, P. (2014). Automatic relief classification versus expert and field based landform classification for the medium-altitude mountain range, the Sudetes, SW Poland. *Geomorphology*, 206, 133-146.
- Wilson, J. P., & Gallant, J. C. (Eds.). (2000). *Terrain analysis: principles and applications*. John Wiley & Sons.
- Zhao, W. F., Xiong, L. Y., Ding, H., & Tang, G. A. (2017). Automatic recognition of loess landforms using Random Forest method. *Journal of Mountain Science*, 14(5), 885-897.