

مدل‌سازی الگوی کرنل در تشخیص لندفرم‌های زمین (با تأکید بر لندفرم‌های یخچالی و مجاور یخچالی) در محدوده کمر بند کوهستانی البرز

سینا صلیحی - دکترای ژئومورفولوژی، اصفهان، ایران

عبدالله سیف* - دانشیار، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم جغرافیایی و برنامه‌ریزی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۱/۲۰

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۲/۰۵

چکیده

مورفولوژی زمین اطلاعات زیادی برای محققان علوم محیطی فراهم می‌آورد. یکی از اهداف علم ژئومورفولوژی شناسایی، طبقه‌بندی، و آنالیز لندفرم‌های زمین است. در گذشته، تشخیص و شناسایی لندفرم‌های زمین براساس کارهای میدانی یا با استفاده از نقشه‌های توپوگرافیکی به صورت دستی انجام می‌گرفت که بسیار وقت‌گیر بود و البته در مواردی با مسائل زیادی روبه‌رو می‌شد. در این بخش لندفرم‌های یخچالی و مجاور یخچالی شامل سیرک‌های یخچالی، دریاچه‌های یخچالی تارن، قله، گردنه‌ها، خط‌الرأس‌ها و خط‌القعرها، و مخروط‌های رسوبی، با استفاده از مدل ارتفاعی به‌طور خودکار شناسایی شد. بدین منظور، دو رویکرد، شامل مدل‌سازی مفهومی و شیء‌گرا، مدنظر قرار گرفت. در رویکرد نخست، شرایطی برای قیاس مورفولوژی زمین با الگوی کرنل مرجع فراهم آمد. دومین رویکرد مدل‌سازی شیء‌محور است که از شیئی مرجع برای تشخیص لندفرم‌ها استفاده می‌کند. ارزیابی نتایج نشان می‌دهد که صحت تشخیص لندفرم‌های موردنظر در این پژوهش به‌طور متوسط ۶۰ درصد بوده که با توجه به پیچیدگی لندفرم‌های موردنظر مانند سیرک‌های یخچالی و مخروط‌های رسوبی عملکرد قابل قبولی است. صحت مدل آنالیز مفهومی الگوی کرنل ۵۸/۵۱ درصد و مدل شیء‌گرا، ۵۰/۵۰ درصد برآورد شد که به‌طور کلی عملکرد مدل شیء‌گرا بهتر از مدل مفهومی بود.

واژگان کلیدی: الگوی کرنل، تشخیص لندفرم، لندفرم زمین، لندفرم یخچالی و مجاور یخچالی، مدل‌سازی شیء‌گرا.

مقدمه

ژئومورفولوژی علم مرتبط با فرم چشم‌اندازها و فرایندهایی است که آن‌ها را ایجاد کرده است (سامفیلد، ۱۹۹۱). واژه ژئومتری به معنی اندازه‌گیری سطوح است، اما به‌طور گسترده از آن درباره سطوح ریاضی و هموار مانند کره و مکعب استفاده شده است. ژئومورفومتری به معنی اصلی ژئومتری ارجاع داشته و علم آنالیزهای کمی سطح زمین شناخته می‌شود (مک میلان و شری، ۲۰۰۹).

با توجه به رشد روزافزون استفاده از رایانه‌ها در خودکارسازی و تسریع اجرای الگوریتم‌ها و مدل‌ها، بسیاری از شاخه‌های علمی به‌طور گسترده یا کاربر این نوع مدل‌ها هستند یا آنکه در جهت توسعه و گسترش آن‌ها در حال فعالیت‌اند. بسیاری از محیط‌شناسان همچون جغرافی‌دانان، زمین‌شناسان، یخچال‌شناسان، محققان علوم خاک، هیدرولوژیست‌ها، و اقلیم‌شناسان نیاز به اطلاعاتی درباره ویژگی‌های سطح پوسته زمین دارند. این ویژگی‌ها دربردارنده اطلاعاتی در مورد مورفولوژی زمین و فرایندها و مکانیسم‌هایی است که آن‌ها را ایجاد کرده‌اند و می‌توانند لندفرم‌ها را شکل دهند، کنترل کنند، و تغییر حالت دهند.

در گذشته، ژئومورفومتری شاخه‌ای از ژئومورفولوژی بوده، اما امروزه یک رشته علمی مجزا در نظر گرفته می‌شود (مک میلان و شری، ۲۰۰۹). ایوانس (۱۹۷۳) دو رویکرد در ژئومورفومتری را مطرح می‌کند که شامل ژئومورفومتری خاص و عام می‌شود. ژئومورفومتری خاص بر روی آنالیز لندفرم‌های ناپیوسته یا گسسته متمرکز است؛ در صورتی که ژئومورفومتری عام لندفرم‌های پیوسته زمین را کمی‌سازی و تفسیر می‌کند. در ژئومورفومتری، موضوع مورد بحث اندازه‌گیری و شناسایی لندفرم‌هاست. لندفرم عارضه فیزیکی سطح زمین در نظر گرفته می‌شود که دارای ویژگی‌ها و مشخصات فرمی است (بیتز و جکسون، ۲۰۰۵).

در زمینه ژئومورفوتری خاص، یک لندفرم واحدی از زمین است که به وسیله فرایندهای طبیعی ایجاد شده باشد. در نتیجه، ممکن است به صورت حالات مشخصی که در هر جایی می‌تواند حادث شود شناسایی و تفسیر شود. لندفرم‌ها از نظر ویژگی‌هایی همچون شکل، اندازه، ابعاد، جهت قرارگیری، ناهمواری، و موقعیت قرارگیری متفاوت‌اند. آن‌ها همچنین از نظر فرایندهای فیزیکی که آن‌ها را به وجود آورده دارای اختلاف‌اند (اتزلمولر و سولباک، ۲۰۰۰).

شکل و ابعاد لندفرم‌ها تابعی از فرایندهای به وجود آورنده آن‌هاست (مک میلان و شری، ۲۰۰۹). زمین دارای سطحی پیوسته است که دارای چشم‌اندازها و لندفرم‌های مختلفی است. طبقه‌بندی و قطعه‌بندی لندفرم‌های زمین به چندین طبقه و کلاس به هنگام مطالعه و بررسی آن‌ها ضروری است. چشم‌اندازها و لندفرم‌ها معمولاً با سلسله‌مراتبی از مقیاس‌ها و ابعاد شناسایی و تعیین می‌شوند (هاموند، ۱۹۶۴؛ میجرینک، ۱۹۸۸؛ مولا، ۱۹۸۸؛ پایک، ۱۹۸۸، و بیل و دلوتو، ۱۹۸۸، دیکائو، ۱۹۸۹ و ۱۹۹۰؛ گوزتی و ریچنباچ، ۱۹۹۴؛ سوریانا و دی هوپ، ۱۹۹۴؛ فلز و ماتسون، ۱۹۹۶؛ لیوید و آتکینسون، ۱۹۹۸؛ اشمیت و همکاران، ۱۹۹۸؛ اتزلمولر و سولباک، ۲۰۰۰؛ لیتی، ۲۰۰۱؛ لوسیر و همکاران، ۲۰۰۳).

یک مدل شیء یا مفهومی است که از آن برای نشان دادن چیز دیگری استفاده می‌شود. سه نوع مدل وجود دارد که شامل مدل مفهومی، فیزیکی، و ریاضی می‌شود (لی و همکاران، ۱۹۶۰). مدل مفهومی از ذهن یک فرد منشأ می‌گیرد و به شدت تحت تأثیر زمینه‌های فکری و نگرش و دانش آن فرد است. این نوع مدل‌ها بعدها به مدل‌های ریاضی یا فیزیکی منتهی می‌شوند. یک مدل فیزیکی مدلی آنالوگ است و مدل‌های ریاضی شرایط، اشیاء، یا پدیده‌ها را در غالب مفاهیم ریاضی نمایش می‌دهند و تحلیل می‌کنند. مدل‌های ریاضی گاهی به دو نوع مدل دیگر شامل مدل‌های کمی و کیفی تقسیم می‌شوند (ساعتی و الکساندر، ۱۹۸۱).

مدل‌های ریاضی به مدل‌های تابع‌محور و مدل‌های تصادفی (براساس جبری بودن یا احتمالی بودنشان) تقسیم می‌شوند. مدل رقومی ارتفاعی (DEM) و مدل رقومی زمین (DTM) به عنوان مفهومی عام‌تر به عنوان منبعی برای داده‌های ارتفاعی استفاده می‌شوند تا توپوگرافی شکل زمین را شبیه‌سازی کنند و مورد استفاده قرار دهند. DEM یا داده‌های رستری شبکه‌ای‌اند که از آن‌ها برای مدل‌سازی سطح زمین استفاده می‌شود. DEM به طور گسترده در مطالعات ژئومورفومتریکی و ژئومورفولوژیکی سطح زمین، مدل‌سازی، طبقه‌بندی، تشخیص و شناسایی لندفرم‌ها، و نیز نقشه‌کشی مورد استفاده قرار گرفته است (درات و بلاشکی، ۲۰۰۶؛ درات و ایسانک، ۲۰۱۲؛ گرسک و همکاران، ۲۰۱۱؛ جسیویکز و استپینسکی، ۲۰۱۳؛ کاراگولا و همکاران، ۲۰۱۷؛ لیندسی و همکاران، ۲۰۱۵؛ مک میلان و شری، ۲۰۰۰؛ دنگ و ویلسون، ۲۰۰۸؛ ریگول سانچز و همکاران، ۲۰۱۵؛ اشمیت و هویت، ۲۰۰۴؛ ترب، ۱۹۹۲؛ رامستد و اتزلمولر، ۲۰۱۲؛ پریمو و همکاران، ۲۰۰۶؛ پیلویان و کونسینی، ۲۰۱۷؛ مکرم و حجتی، ۲۰۱۶؛ ایواشی و پایک، ۲۰۰۷).

به رغم محبوبیت و عمومیت در استفاده از DTM در زمینه شناسایی و تشخیص لندفرم‌ها و طبقه‌بندی آن‌ها، منابع دیگر مانند داده‌های سنجش از دوری (سعادت و همکاران، ۲۰۰۸؛ اشنیویت و همکاران، ۲۰۰۸)، عکس‌های هوایی، و نقشه‌های توپوگرافیکی (بنایی، ۱۹۹۳) نیز مدنظر قرار گرفته است.

بیشتر طبقه‌بندی‌های خودکار لندفرم‌ها، که از طبقه‌بندی مفهومی شیب استفاده می‌کنند، مانند روشی که راثول (۱۹۶۰) استفاده نمود و اراضی شیب‌دار را به پنج واحد (قله، گردنه، دیواره بالایی، میانی، و پاشنه شیب) تقسیم کرد، از مفاهیم ارئه‌شده توسط مایلن (۱۹۳۵)، ارتقایافته توسط راثول و والکر (۱۹۶۸) و نیز هاگت (۱۹۷۵) بهره برده‌اند.

روش‌های طبقه‌بندی بسیاری نیز ارائه شده‌اند، مانند روش اسکیدمور و همکاران (۱۹۹۱)، که با استفاده از اندازه‌گیری فاصله افقی و عمودی بین خط‌الرأس‌ها و کانال‌ها لندفرم‌ها را طبقه‌بندی می‌کنند یا اشمیت و دیکائو (۱۹۹۹) که براساس موقعیت نسبی چشم‌انداز به نسبت رتبه آبراهه کانالی که اراضی بدان زهکش می‌شوند طبقه‌بندی‌ها را انجام می‌دهد. کوناچر و دالریمیل (۱۹۷۷) و اسپایت (۱۹۹۰) نیز سطوح شیب‌دار را براساس دامنه‌ها و ویژگی‌های کانال به نه واحد طبقه‌بندی کردند.

دن و همکاران (۲۰۰۱) رویکردی معنایی برای تشخیص و توصیف لندفرم‌ها ارائه می‌کنند که فرم هندسی، توپوگرافی، و تعاریف معنایی را دربر می‌گیرد. مکی و همکاران (۲۰۰۳) استفاده از اشیای جغرافیایی با درجه بالاتر را به نسبت استفاده از سلول‌ها در پیکربندی و شناسایی ویژگی‌های توپوگرافیک زمین توصیه کردند. آن‌ها همچنین یک استدلال غیرجبری برای نشان‌دادن سطح عدم قطعیت فازی نتایج به کار بردند.

مک میلان و شری (۲۰۰۹) لندفرم‌ها را به‌عنوان اشیای طبیعی قابل تشخیص توصیف می‌کنند که از نظر فرایندهای فیزیکی که در شکل‌گیری آن‌ها دخالت داشته یا یکدیگر متفاوت‌اند. قطعه‌بندی اراضی با استفاده از نرخ انحنای زمین نیز مدنظر قرار گرفته است (رامسند و اتزلمولر، ۲۰۰۹ و ۲۰۱۲). مک میلان و شری (۲۰۰۹) بر آن‌اند که بیشتر رویکردهای طبقه‌بندی اراضی به‌طور خودکار به دنبال تکرار سیستم‌ها و روش‌های پذیرفته‌شده دستی و قدیمی طبقه‌بندی و نقشه‌کشی لندفرم‌ها هستند. این منابع مطابق با این توضیح‌اند: دیکائو و همکاران، ۱۹۹۱؛ دیکائو و همکاران، ۱۹۹۵؛ گلانت و همکاران، ۲۰۰۵؛ هروتین و پرکو، ۲۰۰۹؛ درات و آیسنک، ۲۰۱۲؛ کاراگولا و همکاران، ۲۰۱۷.

در این میان، تومر و آندرسون (۱۹۹۵)، کلارک (۱۹۸۸)، و شری و همکاران (۲۰۰۲) بر آن‌اند که سطح زمین ترکیبی از مؤلفه‌های جبری است که هدف ژئومورفومتری استخراج لندفرم‌های جبری از بسترهای متغیر و مختلف است (مک میلان و شری، ۲۰۰۹). مک میلان و شری (۲۰۰۹) لندفرم‌ها را آن بخشی از چشم‌اندازها تعریف می‌کنند که نسبتاً از نظر شکل (انحنای پلان و پروفیلی)، شیب (گرادیان شیب)، جهت قرارگیری یا برون‌زد (جهت یا تابش خورشیدی)، رژیم رطوبتی، و موقعیت نسبی قرارگیری لندفرم‌ها همگن‌اند. استفاده از پارامترهای سطح زمین به‌منظور قطعه‌بندی چشم‌اندازها به عناصر لندفرمی را می‌توان در کارهای پیشین اسپایت (۱۹۶۸) و دیکاو (۱۹۸۹) یافت.

پیشرفت‌های اخیر استفاده از الگوریتم‌های طبقه‌بندی فازی خودکار را برای تشخیص عناصر لندفرمی مدنظر قرار داده است (بروگ و همکاران، ۲۰۰۰ و ۲۰۰۱؛ اشمیت و هویت، ۲۰۰۴). تمرکز روش‌های فازی بر روی شناسایی لندفرم‌های خاص (مانند کوه‌ها، دره‌ها، حوضه رودخانه‌ها، و شبکه‌های زهکشی)، عناصر و اجزای لندفرم‌ها (اشکال هندسی که در شکل‌گیری بخشی یا همه شیب‌ها یا برخی لندفرم‌های خاص دیگر دخالت دارند)، و انواع لندفرم‌های دارای تکرار (یک سری از تپه‌ها و دره‌های پشته-ناوهای) است. تمرکز اصلی در این گونه مطالعات بر روی تکنیک‌های فازی در تشخیص و شناسایی اجزای چشم‌اندازهاست. تقریباً همه رویکردهای طبقه‌بندی و تشخیص لندفرم‌ها براساس نمایش موقعیت چشم‌انداز یا شکل و سطح اراضی است (پنوک و همکاران، ۱۹۸۷؛ دیکائو، ۱۹۸۹؛ اسکیدمور و همکاران، ۱۹۹۱؛ ایروین و همکاران، ۱۹۹۷؛ اشمیت و دیکائو، ۱۹۹۸؛ اشمیت و دیکائو، ۱۹۹۹؛ شری و همکاران، ۲۰۰۲)

به هر حال، شاید بیشترین رویکرد منتشر شده در پژوهش‌های علمی این بخش استفاده از انحناى زمین در طبقه‌بندی لندفرم‌ها باشد. به‌عنوان مثال، دیکائو (۱۹۸۹) چشم‌اندازها را به ترکیبی از انحناهای پلان مقعر، مستقیم، و محدب از یک طرف تقسیم می‌کند و از جهت دیگر آن‌ها را به انحناهای پروفیلی مقعر، مستقیم، و محدب طبقه‌بندی می‌کند. این رویکرد (همچون بسیاری روش‌های زیرشاخه آن) براساس روابط بین شکل سطوح (انحنای محلی) و تراکم جریان سطحی استوار است و رسوب‌گذاری در این چنین سطوحی بر پایه دو مکانیسم تجمعی انجام می‌گیرد: مکانیسم نخست، نماینده همگرایی و واگرایی جریان در امتداد شیب است؛ درحالی‌که مکانیسم دوم منعکس‌کننده کاهش سرعت نسبی جریان در جهت پایین شیب است که ناشی از تغییرات نرخ انحناى پروفیلی در این بخش است (مور و همکاران، ۱۹۹۱؛ مک میلان و شری، ۲۰۰۹).

شری و همکاران از روش اولیه دیکائو (۱۹۸۹)، که دارای دو سطح بود، انتقاد کردند و روش طبقه‌بندی قوی‌تر و قابل اعتمادتری براساس انحناى زمین پیشنهاد کردند. اولین پیشنهاد استفاده از انحناى تانژانتی به جای انحناى پلان در طبقه‌بندی اجزای لندفرم‌های بیسیک بود، زیرا انحناى پروفیلی و تانژانتی هر دو انحناى مقاطع عمودی‌اند که دارای توزیع‌های آماری مشابهی‌اند که این موضوع برخلاف انحناى پلان است (مک میلان و شری، ۲۰۰۹). دومین انتقاد در برابر دیکائو آن بود که این رویکرد عناصر شکلی را با انحناى پروفیلی و پلان متمایز می‌کرد، زیرا این عوامل همواره شامل اشکال همگن‌تر با گرادیان شیب، جهت، و انحناى مشابهی می‌شوند.

شری (۱۹۹۵) و شری و همکاران (۲۰۰۵)، در مقابل، روشی شیء‌گرا، محلی، حساس به مقیاس در طبقه‌بندی اجزای لندفرم‌ها و عوارض زمین براساس دخالت تأثیرات انحناى دیفرانسیلی، متوسط، پروفیلی، تانژانتی، و گوسی کل ارائه کردند که از بروز این نوع مشکلات جلوگیری کند.

واژه ژئومورفومتری دربردارنده مطالعات کمی است. ژئومورفومتری از مدل‌ها برای اندازه‌گیری و آنالیز عوارض سطح زمین استفاده می‌کند. بنابراین، بسیاری از مطالعات ژئومورفومتریکی براساس مدل‌سازی‌ها قرار دارند؛ به‌طوری‌که لی و همکاران (۱۹۶۰) انواع مدل‌ها را تعریف و تبیین می‌کنند. در این بخش مدل‌سازی ریاضی و مفهومی به‌طور ترکیبی استفاده می‌شود. در نتیجه مدل‌سازی مفهومی، که با مدل‌سازی‌های تابع‌محور و کمی و ریاضی در فضای جبری ترکیب شده است، مدنظر قرار دارد. براساس ایده ایوانس (۱۹۷۲)، درباره ژئومورفومتری، از ژئومورفومتری خاص با تمرکز بر آنالیز لندفرم‌های یخچالی و مجاور یخچالی استفاده شد.

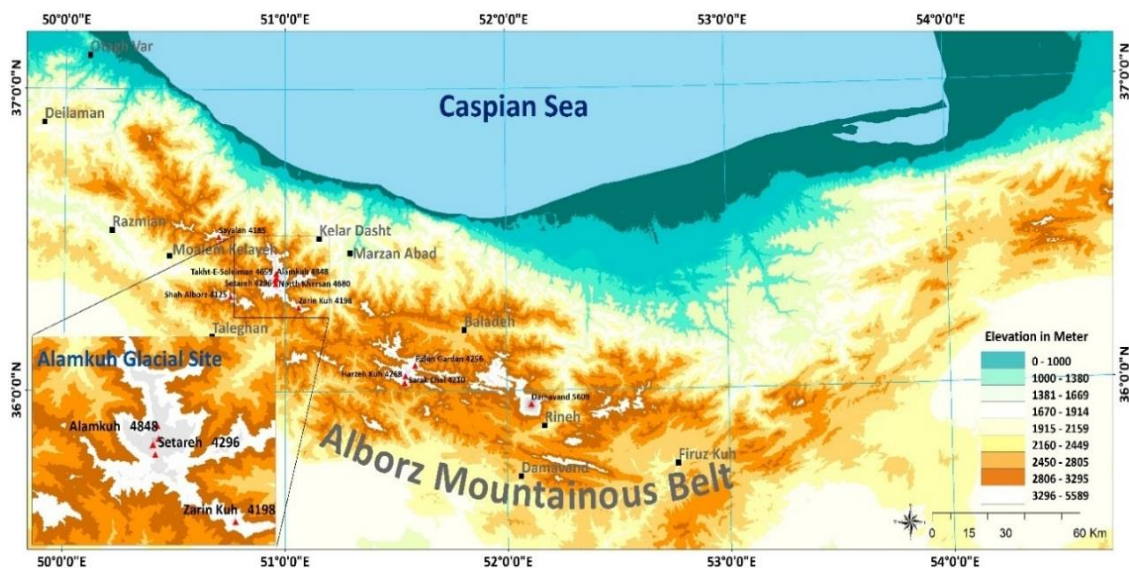
به‌طور کلی، در مطالعات پیشین، رویکرد شیء‌گرا، که فاکتور مقیاس را مدنظر داشته باشد، کمتر مدنظر قرار گرفته بود؛ عمدتاً وضعیت انحناى زمین و شیب مؤلفه‌های غالب در تشخیص لندفرم‌ها بود. بسیاری از روش‌ها از نظر ساختار اجرای ماشینی با محدودیت‌ها و مشکلاتی روبه‌رو بوده‌اند و همچنین به‌دلیل پیچیدگی‌های اشکال مرکبی همچون سیرک یخچالی و مخروط رسوبی این اشکال کمتر بررسی شده‌اند. علاوه بر موارد فوق، تشخیص جهتی در عمده مطالعات موردتوجه قرار نگرفته و نیز در ساختار مدل‌سازی‌ها، الگوریتم‌ها، و روش‌های ارائه‌شده به این موضوع مهم کمتر پرداخته شده است.

هدف اصلی در این پژوهش تشخیص و طبقه‌بندی لندفرم‌های یخچالی و مجاور یخچالی با استفاده از مدل‌سازی‌های رستری و به کمک الگوریتم‌های خودکار پایتون است تا اینکه مراحل مدل‌سازی دقیق‌تر و با سرعت و کارایی بهتری انجام گیرد. برای تشخیص و طبقه‌بندی لندفرم‌های موردنظر از دو رویکرد مدل‌سازی مفهومی و شیء‌گرا استفاده

می‌شود. طیف بیشتری از لندفرم‌ها از ساده تا پیچیده مدنظر قرار دارد. در صورت امکان، تشخیص جهتی مدنظر قرار گرفته و همه مدل‌ها براساس عملکرد خودکار و متناسب با پردازش ماشینی طراحی، اجرا و ارزیابی می‌شوند.

مواد و روش‌ها

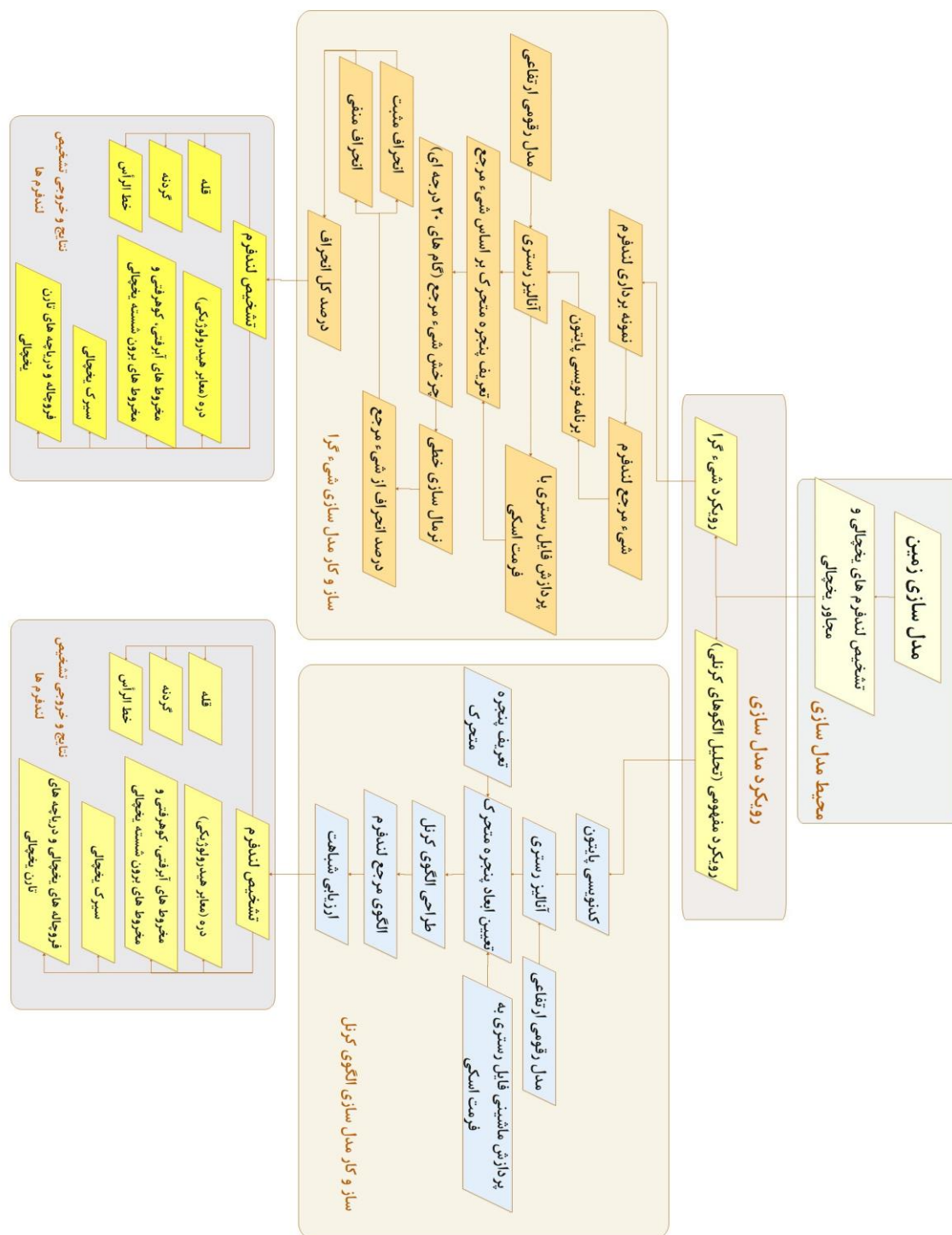
داده‌های رقومی سطحی^۱ منتشرشده توسط آژانس فضایی ژاپن در ماه می و اکتبر ۲۰۱۵ با رزولوشن افقی در حدود ۳۳ متر به‌منظور مبنای مدل‌سازی در تشخیص عوارض و لندفرم‌های سطح زمین استفاده شد. این داده‌ها از تصاویر ماهواره ALOS به‌دست آمده (تاکاکو و همکاران، ۲۰۱۴) که از شبکه داده‌های رقومی سطحی با قدرت تفکیک مکانی پنج متر و با پوشش جهانی استخراج شده که در حال حاضر دقیق‌ترین داده‌های ارتفاعی در مقیاس بزرگ‌اند (تادونو و همکاران، ۲۰۱۴). محدوده رشته‌کوه‌های البرز به‌عنوان مطالعه موردی به‌گونه‌ای مدنظر قرار گرفت که امکان دسترسی به طیف متنوعی از لندفرم‌ها و عوارض سطح توپوگرافیکی زمین وجود داشته باشد. محدوده موردنظر، که شامل بدنه ارتفاعات این واحد کوهستانی به همراه دشت‌سرها و اراضی کم‌شیب و زمین‌های اطراف می‌شود، در بین طول جغرافیایی ۵۰ تا ۵۵ درجه شرقی و بین عرض جغرافیایی ۳۵ تا ۳۷ درجه شمالی واقع شده است. شکل ۱ موقعیت محدوده موردپژوهش را نشان می‌دهد.



شکل ۱. منطقه مطالعاتی، واحد کوهستانی البرز

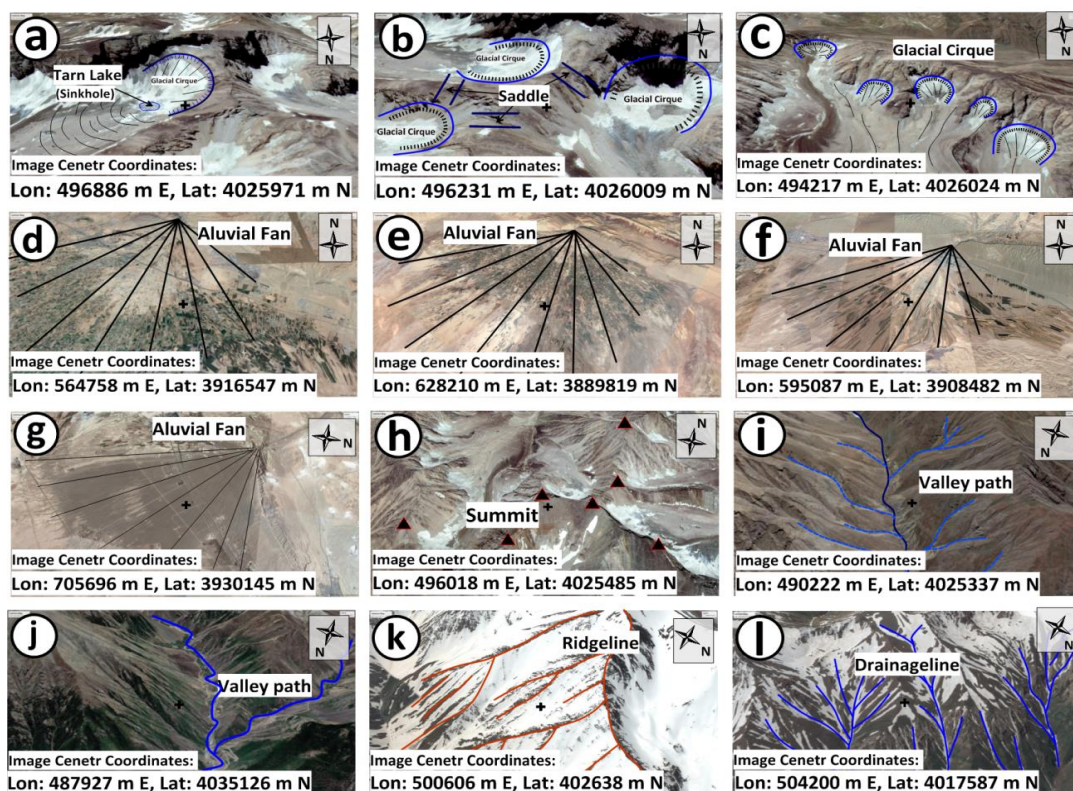
هفت نوع لندفرم یخچالی و مجاور یخچالی رایج مدنظر قرار گرفت که در زمینه ژئومورفولوژی یخچالی دارای اهمیت‌اند. این لندفرم‌ها شامل سیرک‌های یخچالی، دریاچه‌های تارن یخچالی، گردنه‌ها، قلل، خط‌الرأس‌ها، خط‌القعرها، دره‌ها، و مخروط‌های برون‌شسته یخچالی و مجاور یخچالی‌اند. مدل‌سازی تشخیص و تفکیک لندفرم‌های نام‌برده از طریق دو نوع رویکرد مختلف انجام گرفت که به‌صورت شماتیک مراحل و نحوه ارتباط آن در شکل ۲ نشان داده شده است.

1. Digital Surface Model (DSM)



شکل ۲. فلوجارت مراحل مدل‌سازی تشخیص لندفرم‌ها

لندفرم‌هایی که به صورت موردی مدنظر قرار گرفتند در شکل ۳ نشان داده شده‌اند. این لندفرم‌ها شامل گروهی از لندفرم‌های ساده و پیچیده‌اند که شامل هشت نوع لندفرم مختلف زمین می‌شوند. در برخی از این لندفرم‌ها جهت بدون معناست (مانند قله) و در برخی دیگر جهت قرارگیری نیز دارای اهمیت است (خط‌الرأس، سیرک یخچالی، و مخروط‌افکنه).



شکل ۳. لندفرم‌های در نظر گرفته شده برای مدل‌سازی: a- فرورفتگی کف سیرک‌های یخچالی که توسط آب پُر شده و دریاچه‌های تارن را تشکیل می‌دهند؛ b- گردنه‌ها؛ c- سیرک‌های یخچالی؛ d، e، f و g- مخروط‌های رسوبی؛ h- قله؛ I و j- دره؛ k- خط‌الرأس؛ l- شبکه زهکشی

محیط و فضای مدل‌سازی

محیط مدل‌سازی در این پژوهش در حیطه مدل‌سازی رقومی زمین است. مفاهیم آنالیز رستری که در ارتباط با ساختارهای شبکه‌ای است به‌طور بنیادین مدنظر قرار گرفته شد. طبقه‌بندی، تشخیص، و شناسایی و تفکیک لندفرم‌ها فضای فرعی مدل‌سازی رقومی زمین است. لندفرم‌های یخچالی و مجاور یخچالی زمینه مدل‌سازی‌های این پژوهش‌اند.

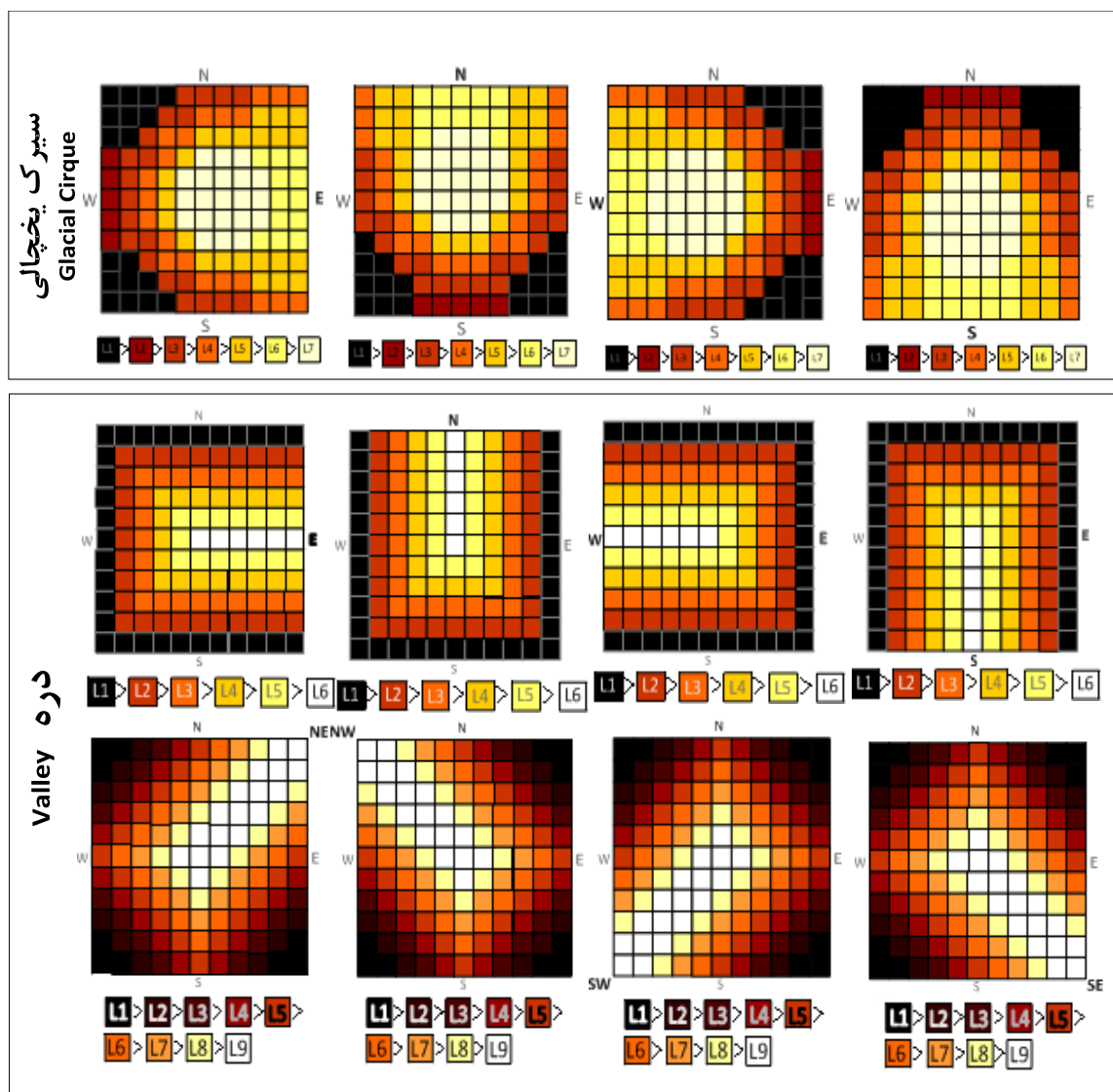
رویکردهای مدل‌سازی

از دو نوع رویکرد مختلف برای شناسایی و تفکیک لندفرم‌های شاخص استفاده شد. هشت گروه مختلف از لندفرم‌های زمین در مناطق یخچالی و مجاور یخچالی انتخاب شد که شامل دره‌ها، خط‌الرأس‌ها، خط‌القعرها، گردنه‌های یخچالی، سیرک‌های یخچالی، فرورفتگی‌های کف سیرک‌های یخچالی، قله، و مخروط‌های رسوبی می‌شود. همه این عوارض با دو رویکرد مدل‌سازی شیء‌گرا و مفهومی، که بر پایه آنالیز الگوی کرنل قرار دارد، مدل‌سازی و اجرا شد. مراحل و نحوه عملکرد این دو نوع مدل‌سازی در ادامه با تفسیر بیشتری آمده است.

مدل‌سازی مفهومی (مدل‌سازی الگوی کرنل)

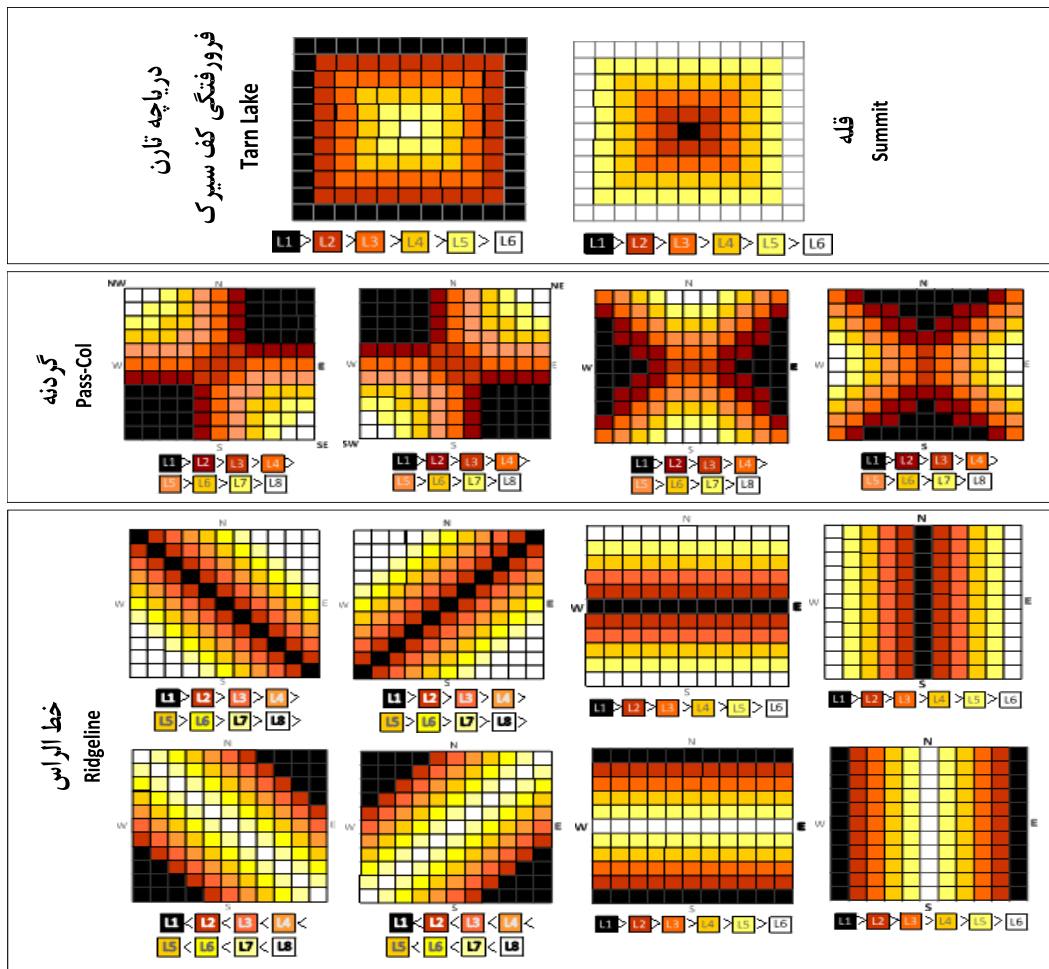
خلاصه‌ای از مراحل این نوع مدل‌سازی در ادامه آورده شده است.

ساخت الگوی کرنل لندفرم‌های منتخب براساس ویژگی‌ها و مشخصات خاص آن‌ها درحقیقت، هر یک از الگوهای طراحی شده بر روی پنجره متحرک قرار گرفته و همه سطر و ستون‌های شبکه رستری را پیمایش (اسکن) می‌کند و الگوریتم حامل درجه شباهت توپوگرافی زمین با این الگوها را بررسی و سپس نتایج را به وسیله یک معادل عددی در لایه رستر خروجی درج می‌کند. هر الگو از سطوحی^۱ تشکیل شده که در شکل‌های ۴ تا ۱۰ به صورت سطوح مختلف یا L_n با رنگ‌های مختلف نمایش داده شده‌اند.

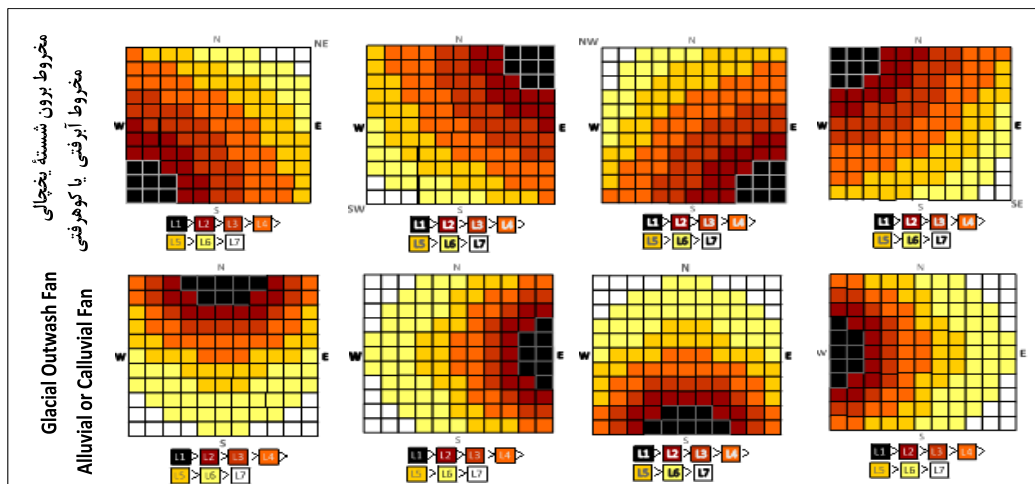


شکل ۴. الگوی کرنلی طراحی شده برای تشخیص دره و سیرک یخچالی در جهات مختلف جغرافیایی

1. Level



شکل ۵. الگوی کرنلی طراحی شده برای تشخیص قله، فرورفتگی کف سیرک (دریاچه تارن)، گردنه، و خط‌الرأس

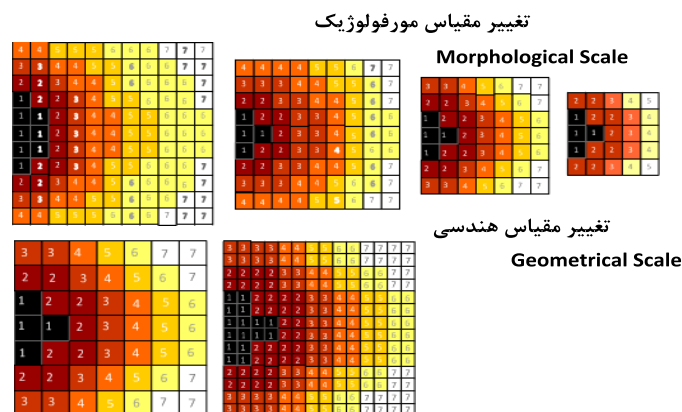


شکل ۶. الگوی کرنل طراحی شده برای تشخیص مخروط‌های رسوبی (مخروط‌افکنه، مخروط آبرفتی و واریزه‌ای، مخروط‌های برون شسته یخچالی - بعد از یخچالی) در جهات مختلف جغرافیایی

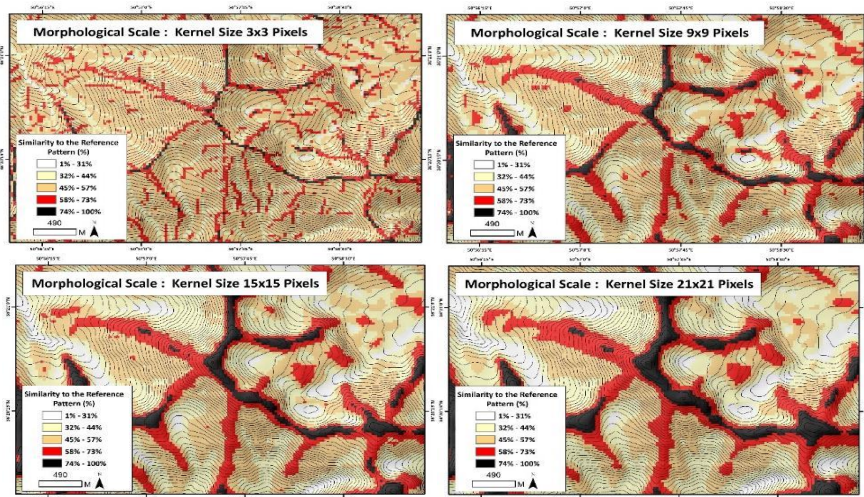
تنظیم مقیاس براساس ویژگی‌های هندسی و مورفولوژیکی لندفرم‌ها

تنظیم مقیاس را می‌توان با تعیین ابعاد الگوی کرنل طراحی‌شده تعیین کرد. دو نوع مقیاس در این بخش مدنظر قرار گرفت که شامل مقیاس هندسی و مورفولوژیکی است. مقیاس مورفولوژیکی براساس الگوی کرنل و ابعاد آن تغییر می‌کند و مقیاس هندسی براساس سایز کرنل (تعداد سطر و ستون آن) تغییر می‌کند. شکل‌های ۱۱ و ۱۲ مفهوم مقیاس مورفولوژیکی و هندسی را به ترتیب نشان می‌دهند.

مقیاس الگوی کرنل را می‌توان با استفاده از ویژگی‌ها و مشخصات آلومتریک لندفرم‌های زمین تعیین کرد. در این بخش از مقیاس هندسی الگوی کرنل با ابعاد ۱۱ در ۱۱ سلول به‌طور پیش‌فرض استفاده شد. همچنین، الگوریتم خودکار تغییر و تعیین مقیاس هندسی نیز طراحی شد. در کل، سایز بزرگ‌تر کرنل منتهی به رزولوشن پایین‌تر و در نتیجه حذف بیشتر جزئیات یا سطح بالاتر کلی‌سازی^۱ خواهد شد. در گام بعد، کرنل تهیه‌شده در قاب پنجره متحرک بر روی همه پیکسل‌های شبکه رستری تکرار می‌شود و الگوریتم حامل خود را بر روی همه پیکسل‌ها اجرا و محاسبه می‌کند. شکل ۸ تأثیر مقیاس مورفولوژیکی بر روی تشخیص قله را به‌طور نمونه نمایش می‌دهد.



شکل ۷. مقیاس مورفولوژیک و هندسی الگوی کرنل (به‌طور نمونه الگوی مربوط به مخروط رسوبی)



شکل ۸. تأثیر مقیاس مورفولوژیکی بر روی نتایج تشخیص لندفرم‌ها (تشخیص قله به‌طور نمونه) بخشی از ارتفاعات علم‌کوه در البرز مرکزی

طراحی الگوریتم تشخیص لندفرم و قراردادن آن بر روی کرنل

الگوریتم تشخیص‌دهنده لندفرم‌های منتخب تهیه و آماده‌سازی شد و بر روی کرنلی که در مرحله قبل طراحی شده بود قرار داده شد تا اینکه درجه شباهت سطح زمین با الگوی کرنل مرجع محاسبه شود. برای محاسبه شباهت بین الگوی کرنل مرجع و فرم مورفولوژیکی سطح زمین از مفاهیم منطقی و مفهومی استفاده شد. الگوی مرجع مربوط به هر لندفرم به چندین سطح تفکیک شد؛ به‌گونه‌ای که در شکل ۱۴ نشان داده شده است. در این بخش از یک نوع اپراتور مقایسه‌ای برای مقایسه مقادیر ارتفاعی هر پیکسل در سطح اول با همه پیکسل‌های سطوح بعدی استفاده شد. در صورت صحیح بودن شروط بررسی‌شده، الگوریتم‌های شمارنده تعداد این رخدادها را شمارش و به درصد تبدیل می‌کند و از آن به‌عنوان شاخصی برای تعیین درصد شباهت به مدل کرنل مرجع استفاده می‌کند. الگوریتم به‌کارگرفته‌شده در این بخش در رابطه ۱ ارائه شده است.

$$KPD = \left(\frac{\sum_{i=1}^{L-1} \{ [L_i] > [L_{i+1}] \}}{\sum_{i=1}^{L-1} (N_{L_i} \times N_{L_{i+1}})} \right) \times 100 \quad (1)$$

که در این رابطه KP الگوی کرنل طراحی‌شده برای شناسایی یک لندفرم خاص است. D مربوط به جهت جغرافیایی لندفرم موردنظر (شامل جهات اصلی جغرافیایی N ، S ، و \dots) و L شامل سطوح الگوی کرنلی طراحی شده است؛ به‌طوری‌که هر سطح دربرگیرنده تعدادی پیکسل می‌شود. N تعداد پیکسل‌هایی است که در هر سطح (L) قرار دارند (شکل ۱۴ را ببینید) که بسته به نوع طراحی هر الگو و با توجه به مقیاس تعریف‌شده و نیز نوع لندفرم شاخص متغیر و متفاوت خواهد بود. الگوریتم تهیه‌شده ارزش ارتفاعی هر پیکسل در هر سطح را با ارزش‌های پیکسلی قرارگرفته در سطوح بعدی مقایسه می‌کند. الگوریتم شمارنده تعداد پیکسل‌هایی را که مقادیر بیشتری در هر زوج مقایسه دارند محاسبه می‌کند و مجموع این رخداد را به‌دست می‌آورد. مجموع رخدادهای محاسبه‌شده توسط الگوریتم شمارنده بر کل حالات ممکن تقسیم و در مقدار ۱۰۰ ضرب می‌شود تا مقدار عددی بر مبنای درصد به‌دست آید. این عدد شاخصی برای ارزیابی درصد شباهت مورفولوژی محلی زمین با الگوی کرنل مرجع است.

Kernel Pattern

3	3	4	5	6	7	7
2	2	3	4	5	6	7
1	2	2	3	4	5	6
1	1	2	3	4	5	6
1	2	2	3	4	5	6
2	2	3	4	5	6	7
3	3	4	5	6	7	7

L_1	L_2	L_3	L_4	L_5	L_6	L_7
-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

L = Level N = Number of Pixels in each Level

$$NL_1 = 4 \quad NL_3 = 9 \quad NL_5 = 7 \quad NL_7 = 6$$

$$NL_2 = 9 \quad NL_4 = 7 \quad NL_6 = 7$$

شکل ۹. الگوی کرنل شامل سطوح (L) و پیکسل‌های (N) قرارگرفته در هر سطح

ذخیره‌سازی نتایج در ساختار فایل شبکه‌ای

نرخ شباهت محاسبه‌شده به ازای هر پیکسل از مدل رقومی ارتفاعی در ساختار شبکه‌ای یک فایل رستری با فرمت ASCII سازمان‌دهی و درج می‌شود. همهٔ مراحل شامل آماده‌سازی و سازمان‌دهی در فایل شبکه‌ای در محیط برنامه‌نویسی پایتون طراحی و اجرا شد.

فرآوری نتایج به صورت نقشه

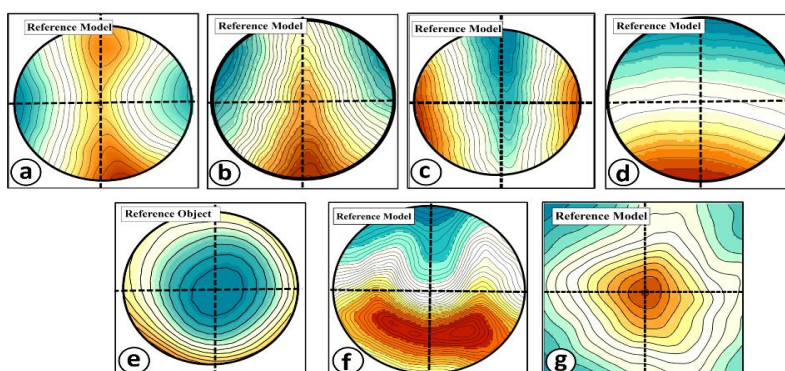
نقشه‌کشی نتایج به دست‌آمده و فرآوری آن‌ها در قالب لایه‌های رستری که درصد شباهت لندفرم‌ها با لندفرم مرجع (لندفرم موردنظر) را نشان می‌دهند.

مدل‌سازی شیء‌گرا

در این رویکرد مدل‌سازی، از شیئی مرجع برای تشخیص لندفرم‌ها استفاده شد. مراحل این بخش به‌طور خلاصه در ادامه آورده شده است.

نمونه‌برداری از لندفرم

به منظور تهیه شیء مرجع مربوط به هر لندفرم، نیاز به جمع‌آوری تعدادی از لندفرم‌های نمونه است. هر مقدار تعداد لندفرم‌های نمونه بیشتر باشد، مدل مرجع بهتری به دست می‌آید. نمونه‌برداری از لندفرم‌ها ویژگی‌های مورفولوژیکی و ملزومات مقیاس را توجیه می‌کند. حالت بهینه استفاده از نمونه‌های لندفرم موجود در منطقه مطالعاتی است. بعد از تهیه چندین نمونه از لندفرم موردنظر در یک منطقه، همگی آن‌ها در یک جهت قرار داده می‌شوند و با یکدیگر تلفیق و تجمیع می‌شوند تا اینکه شیء مرجع لندفرم تهیه و برای اجرای مدل از آن استفاده شود. شکل ۱۵ اشیای مرجع تهیه‌شده برای لندفرم‌های موردنظر در فرایند پژوهش را نشان می‌دهد.



شکل ۱۰. شیء مرجع لندفرم‌های منتخب: a- گردنه‌های یخچالی؛ b- خط‌الرأس‌ها؛ d- مخروط‌های رسوبی؛ e- فرورفتگی‌های کف سبک یا دریاچه‌های یخچالی تارن؛ f- سبک‌های یخچالی؛ g- قله‌ها

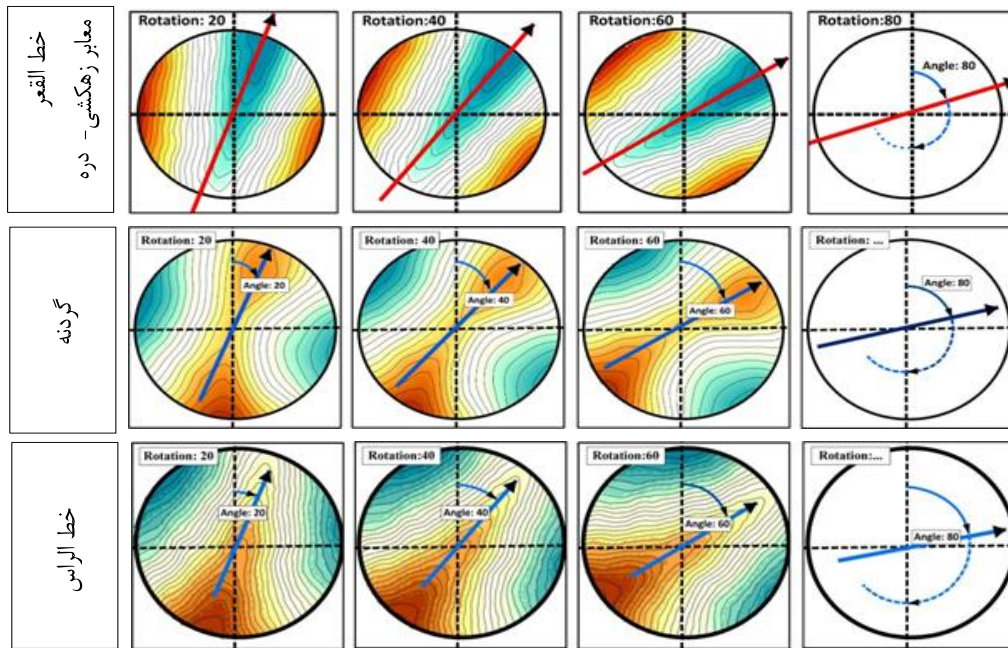
با استفاده از رابطه ۲ نمونه‌های لندفرم تهیه و با هم ترکیب شد تا شیء مرجع نماینده آن لندفرم خاص ایجاد شود.

$$RO = \sum_{i=1}^n LS_i \quad (2)$$

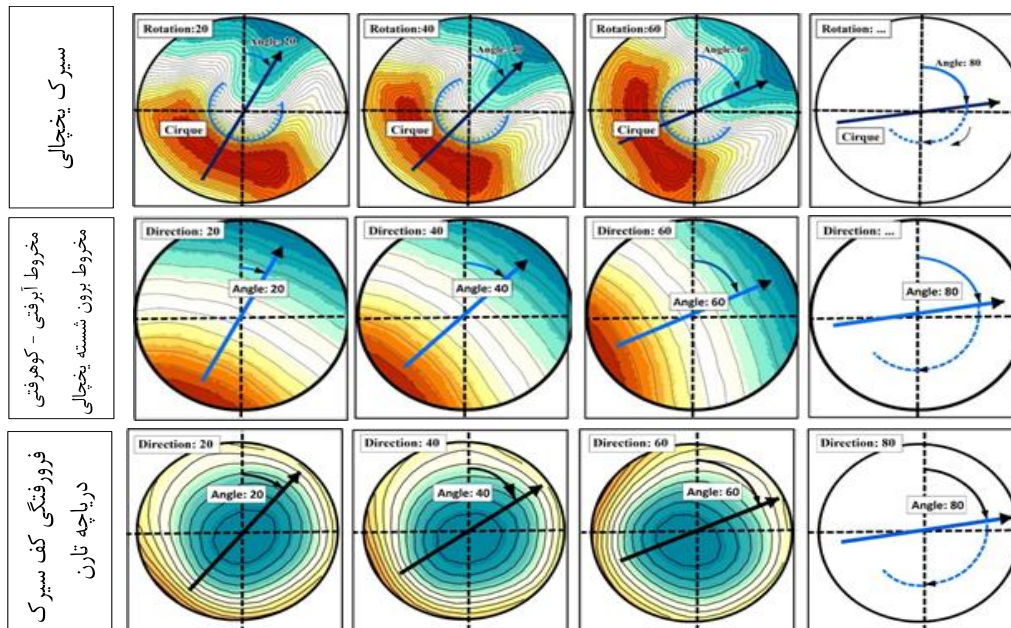
که در این رابطه، RO شیء مرجع برای تشخیص لندفرم شاخص است، LS لندفرم شاخص نمونه‌برداری شده است که با یکدیگر ترکیب می‌شوند تا شیء مرجع را به‌وجود آورند.

چرخش شیء مرجع

در مرحله بعد، شیء مرجع در جهات جغرافیایی مختلف چرخانده می‌شود (به‌طور مثال، گام‌های ۲۰ درجه‌ای). چرخش شیء مرجع به‌منظور تشخیص لندفرم‌ها در جهات مختلف اعمال می‌شود. شکل‌های ۱۱ و ۱۲ چرخش شیء مرجع لندفرم‌ها با گام‌های ۲۰ درجه‌ای (آزیموت شمالی ساعتگرد) را نشان می‌دهند.



شکل ۱۱. چرخش شیء مرجع، عوارض خط القعر، گردنه، و خط الرأس



شکل ۱۲. چرخش شیء مرجع، سیرک یخچالی، مخروط رسوبی، فرورفتگی کف سیرک

تکرار شیء مرجع بر روی همه پیکسل‌های مدل رقومی ارتفاعی

در این مرحله شیء مرجع به دست آمده در مرحله قبلی، به صورت پنجره متحرک بر روی همه پیکسل‌های مدل رقومی ارتفاعی حرکت می‌کند.

قراردادن الگوریتم‌ها بر روی پنجره متحرک

در این مرحله، شیء مرجع به دست آمده با استفاده از مبدل خطی نرمال‌سازی شد (رابطه‌های ۳ و ۴). اختلاف شیء مرجع نرمال شده و سطح توپوگرافی نرمال (در محدوده شیء مرجع) به طور محلی محاسبه می‌شود و نقشه انحراف به دست می‌آید. نقشه انحراف دارای مقادیر منفی و مثبت است که این انحرافات شامل انحرافات منفی، انحرافات مثبت، و مجموع قدر مطلق انحرافات است (رابطه‌های ۵، ۶ و ۷).

$$RO_{Norm} = (P_i - P_{min}) / (P_{max} - P_{min}) \quad (3)$$

که در این رابطه، RO شیء مرجع به دست آمده از لندفرم مورد نظر است. P_i مقدار عددی پیکسل i در شیء مرجع است. P_{max} و P_{min} به ترتیب مقادیر حداقل و حداکثر شیء مرجع‌اند. و در نهایت RO_{Norm} مقادیر نرمال شده شیء مرجع برای لندفرم مورد نظر است.

$$K_{Norm} = (P_i - P_{min}) / (P_{max} - P_{min}) \quad (4)$$

که در این رابطه، K سطح توپوگرافی زمین (مدل رقومی ارتفاع) است، K_{Norm} مقادیر نرمال شده سطح توپوگرافی زمین در محدوده شیء مرجع است. P_i مقادیر ارتفاعی پیکسل i در سطح توپوگرافی زمین (مدل رقومی ارتفاعی) است. P_{min} و P_{max} به ترتیب حداقل و حداکثر مقدار ارتفاعی سطح توپوگرافی زمین را نشان می‌دهند.

محاسبه انحراف کل و نقشه‌کشی نتایج

انحراف کل (رابطه ۷) مجموع قدر مطلق انحرافات مثبت و منفی (رابطه‌های ۵ و ۶) است. درصد انحراف کل میزان شباهت سطح توپوگرافی زمین به شیء مرجع را نشان می‌دهد. در نتیجه، میزان شباهت سطح توپوگرافی زمین به شیء مرجع لندفرم در جهات مختلف جغرافیایی محاسبه و ارزیابی می‌شود.

$$Deviation^- = (RO_{Norm} - K_{Norm}) \quad (5)$$

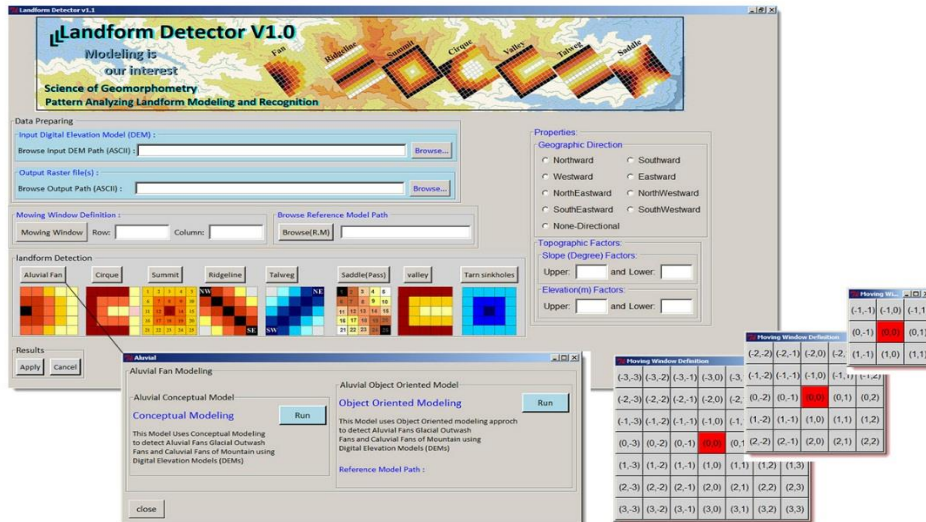
$$Deviation^+ = (RO_{Norm} - K_{Norm}) \quad (6)$$

$$Total Deviation = Abs(Deviation^- + Deviation^+) \quad (7)$$

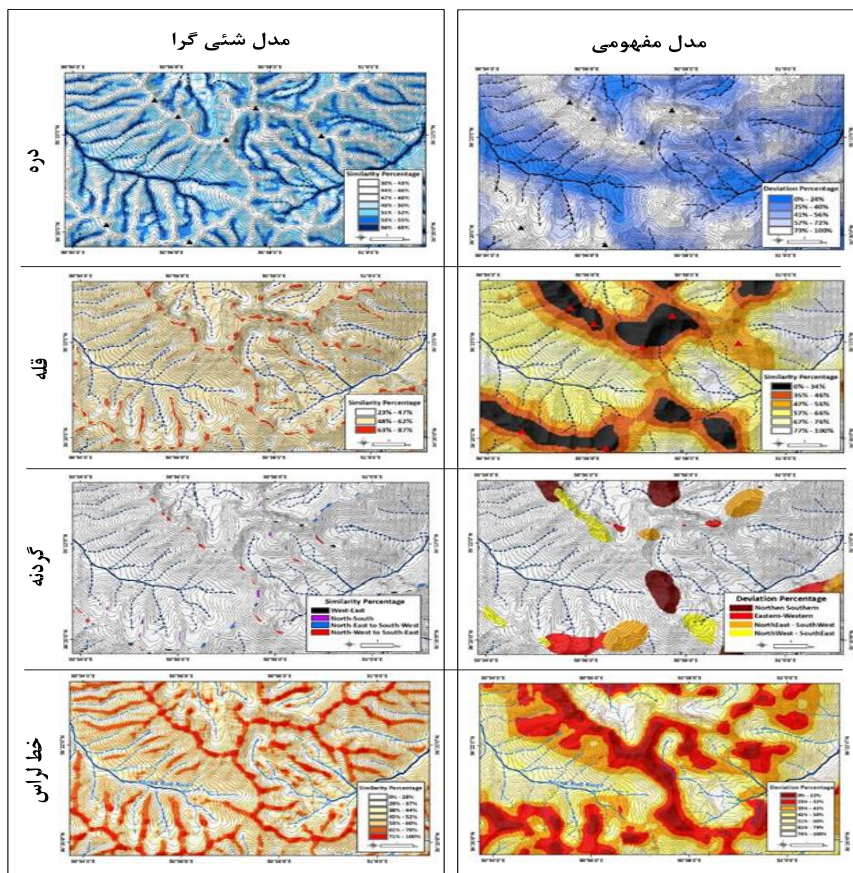
یافته‌های پژوهش

تشخیص لندفرم‌های شاخص شامل قله، خط‌الرأس، دره، گردنه، خط‌القعر، مخروط رسوبی، سیرک یخچالی، و فرورفتگی‌های کف سیرک‌های یخچالی براساس دو رویکرد آنالیز مفهومی الگوی کرنل و رویکرد شیء‌گرا طراحی، فرموله، و اجرا شد که نتایج در شکل‌های ۱۴ تا ۱۸ به طور موردی بر روی بخش‌هایی از رشته‌کوه البرز اجرا شد. همه مدل‌ها با ساختاری که در بخش روش‌شناسی تشریح شد با زبان برنامه‌نویسی پایتون کدنویسی و اجرا شد. سپس، رابط

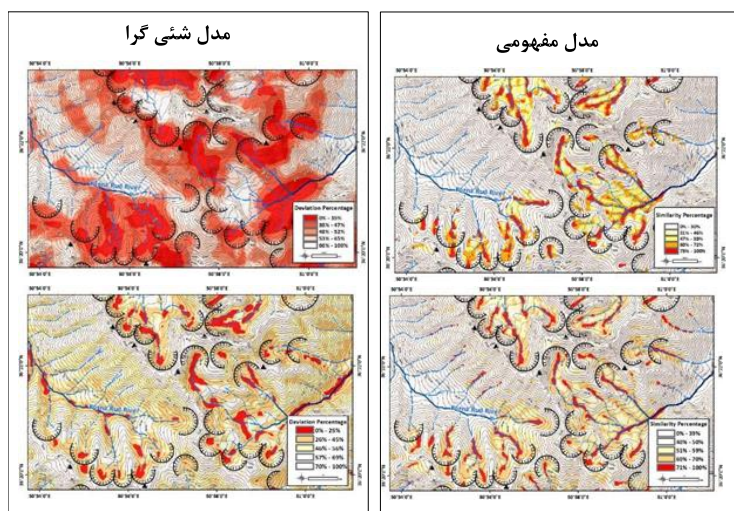
گرافیکی کاربر برای آن طراحی شد. تصویری از نمای گرافیکی این نرم‌افزار، که متناسب با عملکرد آن به نام Landform Detector نامیده شده است، در شکل ۱۳ نمایش داده شده است.



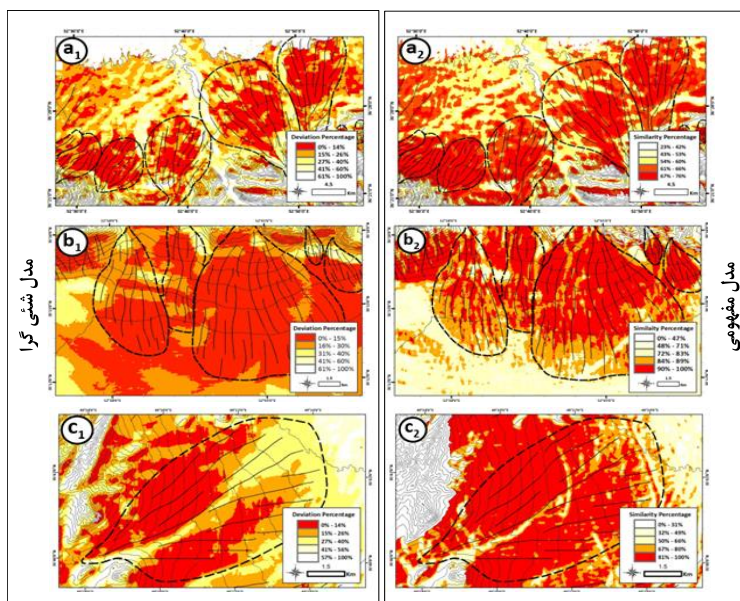
شکل ۱۳. Landform Detector نرم‌افزار تهیه‌شده برای اجرای مدل‌های تشخیص لندفرم‌های زمین



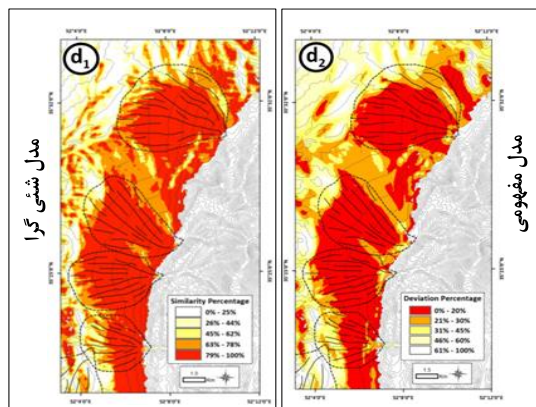
شکل ۱۴. تشخیص دره، قله، گردنه، و خط‌الرأس با استفاده از مدل مفهومی و شیء‌گرا



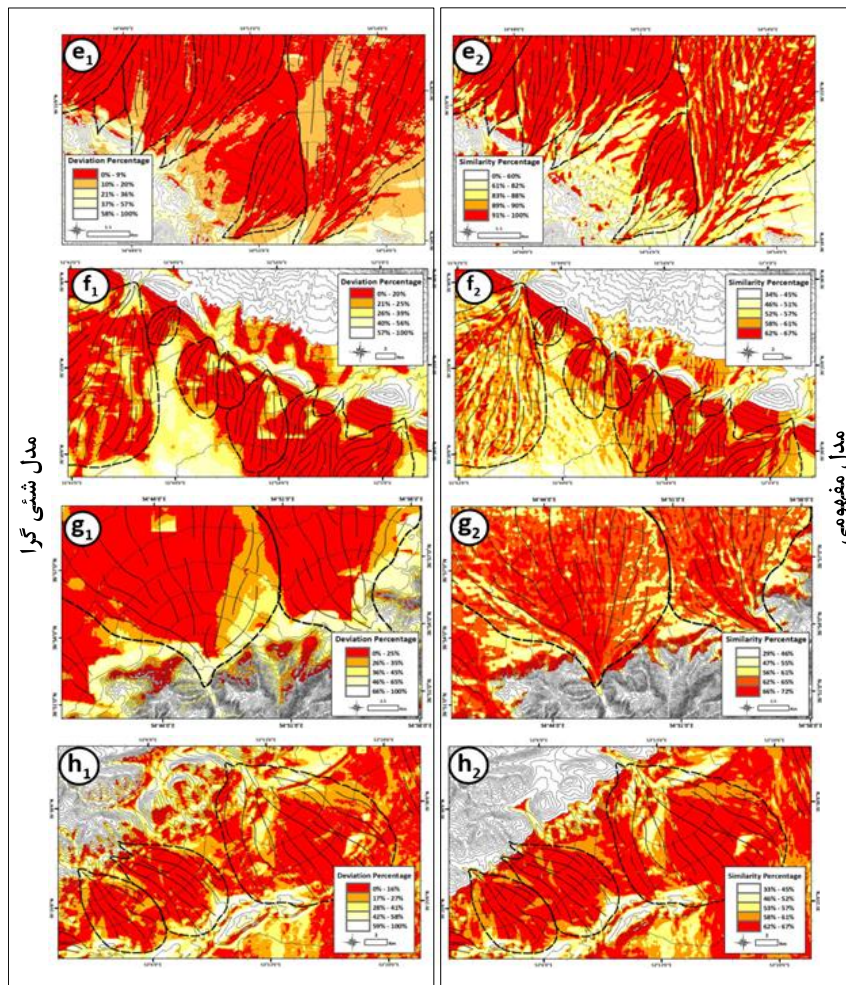
شکل ۱۵. تشخیص سیرک‌های یخچالی و فرورفتگی کف سیرک (دریاچه‌های تارن) با استفاده از مدل مفهومی و شیء‌گرا



شکل ۱۶. تشخیص مخروط‌های رسوبی با جهات شمالی، جنوبی، و شرقی با استفاده از مدل مفهومی و شیء‌گرا



شکل ۱۷. تشخیص مخروط‌های رسوبی با جهت غربی با استفاده از مدل مفهومی و شیء‌گرا



شکل ۱۸. تشخیص مخروط‌های رسوبی با جهات شمال شرقی، جنوب غربی، شمال غربی، و جنوب شرقی با استفاده از مدل مفهومی و شیء‌گرا

ارزیابی صحت

در این بخش با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از تشخیص لندفرم‌های شاخص (مربوط به هر دو رویکرد موردنظر در این پژوهش شامل آنالیز مفهومی الگوی کرنل و آنالیز شیء‌گرای الگوی کرنل)، ارزیابی صحت براساس لندفرم‌های کنترلی انجام پذیرفت. لندفرم‌های کنترلی به‌صورت دستی و با دقت نظارت^۱ و ترسیم شد و سپس ارزیابی صحت به کمک آن‌ها انجام پذیرفت. رابطه^۸ نحوه ارزیابی صحت نتایج را نشان می‌دهد.

$$Ac = \frac{(T_p + (100 - F_p))}{2} \quad (8)$$

به‌طوری‌که در این رابطه Ac درصد اعتبار و صحت مدل، T_p برآورد صحیح وجود^۲، و F_p برآورد غلط وجود^۳ است. با توجه به رابطه^۸ ارزیابی صحت انجام گرفت که نتایج آن در جدول‌های ۱ و ۲ نشان داده شده است.

1. Supervised Recognition
2. True Positive
3. False Positive

جدول ۱. محاسبه متوسط درصد شباهت به عوارض تشخیص داده شده در محدوده داخل و بیرون لندفرم‌های شاخص

نوع لندفرم	نوع مدل	در حریم لندفرم			محدوده خارج از لندفرم		متوسط وزنی
		حداقل	حداکثر	متوسط وزنی	حداقل	حداکثر	
قله	مدل مفهومی	۵۳٫۵	۱۰۰	۷۰٫۵۳	۰٫۰۰	۶۱٫۳۳	۳۳٫۸۳
	مدل شیء گرا	۱۵٫۲	۱۰۰	۵۹٫۹	۰٫۰۰	۷۹٫۹۷	۳۰٫۵۸
خط الرأس	مدل مفهومی	۳۵٫۳۹	۹۳٫۴۳	۵۶٫۶۰	۰٫۰۰	۶۱٫۸۳	۳۷٫۵۹
	مدل شیء گرا	۴۵٫۹۵	۹۹٫۳۶	۷۳٫۸۵	۰٫۰۰	۴۳٫۸۲	۲۱٫۸۵
دره	مدل مفهومی	۶٫۳۳	۱۰۰	۶۱٫۳۹	۰٫۰۰	۹۴٫۷۲	۴۴٫۹۹
	مدل شیء گرا	۳٫۹۴	۱۰۰	۶۰٫۶۸	۰٫۰۰	۹۹٫۰۲	۳۹٫۹۵
سیرک یخچالی	مدل مفهومی	۳٫۸۹	۹۹٫۱۵	۵۸٫۳۵	۰٫۰۰	۱۰۰	۵۰٫۵۲
	مدل شیء گرا	۰٫۵۰	۹۷٫۸۰	۵۱٫۱۹	۰٫۰۰	۱۰۰	۴۸٫۳۱
گردنه	مدل مفهومی	۲۴٫۱۱	۱۰۰	۵۹٫۷۶	۷٫۰۰	۸۲٫۹۲	۴۵٫۰۱
	مدل شیء گرا	۷٫۲۴	۹۹٫۹۹	۶۱٫۱۳	۰٫۰۰	۹۴٫۰۲	۴۶٫۰۷
سیرک یخچالی	مدل مفهومی	۳٫۸۹	۹۹٫۱۵	۵۸٫۳۵	۰٫۰۰	۱۰۰	۵۰٫۵۲
	مدل شیء گرا	۰٫۵۰	۹۷٫۸۰	۵۱٫۱۹	۰٫۰۰	۱۰۰	۴۸٫۳۱
دریاچه تارن یخچالی	مدل مفهومی	۲۹٫۶۳	۹۰٫۶۹	۶۴٫۰۸	۰٫۰۰	۱۰۰	۵۶٫۴۰
	مدل شیء گرا	۰٫۰۰	۱۰۰	۵۳٫۲۶	۵٫۵۴	۷۶٫۰۶	۳۱٫۷۷
مخروط برون شسته یخچالی و مخروط افکنه و مخروط واریزه‌ای	مدل مفهومی	۰٫۰۰	۱۰۰	۶۹٫۹۶	۰٫۰۰	۱۰۰	۵۵٫۰۹
	مدل شیء گرا	۱٫۰۳	۹۷٫۹۰	۳۱٫۸۷	۰٫۰۰	۱۰۰	۲۰٫۹۶
خط القعر - تالوگ	مدل مفهومی	۰٫۰۰	۱۰۰	۵۵٫۴۳	۰٫۰۰	۱۰۰	۲۴٫۱۷
	مدل شیء گرا	۰٫۰۰	۱۰۰	۶۲٫۸۱	۰٫۰۰	۱۰۰	۲۹٫۱۵

جدول ۲. ارزیابی عملکرد و صحت تشخیص عوارض شاخص بر اساس مدل‌های مفهومی و شیء گرا

نوع لندفرم	نوع مدل	درصد شباهت به عارضه		Accuracy (صحت)
		محدوده عارضه	محدوده خارج از عارضه	
		True Positive (T_p)	False Positive (F_p)	
قله	مدل مفهومی	۷۰٫۵۳	۳۳٫۸۳	۶۸٫۳۵
	مدل شیء گرا	۵۹٫۹	۳۰٫۵۸	۶۴٫۶۶
خط الرأس	مدل مفهومی	۵۶٫۶۰	۳۷٫۵۹	۵۹٫۵۰
	مدل شیء گرا	۷۳٫۸۵	۲۱٫۸۵	۷۶٫۰۰
دره	مدل مفهومی	۶۱٫۳۹	۴۷٫۹۹	۵۶٫۷
	مدل شیء گرا	۶۰٫۶۸	۳۹٫۹۵	۶۰٫۳۶
سیرک یخچالی	مدل مفهومی	۵۸٫۳۵	۵۰٫۵۲	۵۳٫۹۱
	مدل شیء گرا	۵۱٫۱۹	۴۸٫۳۱	۵۱٫۴۴
گردنه	مدل مفهومی	۵۹٫۷۶	۴۵٫۰۱	۵۷٫۳۷
	مدل شیء گرا	۶۱٫۱۳	۴۶٫۰۷	۵۷٫۵۳
دریاچه تارن یخچالی	مدل مفهومی	۶۴٫۰۸	۵۶٫۴۰	۵۳٫۸۴
	مدل شیء گرا	۵۳٫۲۶	۳۱٫۷۷	۶۰٫۷۴
مخروط برون شسته یخچالی و مخروط افکنه و مخروط واریزه‌ای	مدل مفهومی	۶۹٫۹۶	۵۵٫۰۹	۵۷٫۴۳
	مدل شیء گرا	۳۱٫۸۷	۲۰٫۹۶	۵۵٫۴۵
خط القعر - تالوگ	مدل مفهومی	۵۵٫۴۳	۲۴٫۱۷	۶۵٫۶۳
	مدل شیء گرا	۶۲٫۸۱	۲۹٫۱۵	۶۶٫۸۳

با توجه به نتایج جدول ۲، لندفرم‌های قله، سیرک یخچالی، و مخروط‌های رسوبی در مدل مفهومی عملکرد بهتری دارند. در مقابل، عوارض خط‌الرأس، دره، گردنه، دریاچه تارن یخچالی، و خط‌القعر در مدل شیء‌گرا دارای عملکرد بهتری بودند. به‌طور کلی، متوسط صحت نتایج در مدل مفهومی ۵۸/۵۱ درصد و در مدل شیء‌گرا ۶۰/۵ درصد است و به‌طور کل عملکرد تشخیص لندفرم‌ها در همه لندفرم‌های شاخص با احتساب نتایج هر دو مدل حدوداً ۶۰ درصد ارزیابی شد.

بحث و نتیجه‌گیری

دو رویکرد مختلف در مدل‌سازی تشخیص لندفرم‌های یخچالی و مجاور یخچالی استفاده شد که شامل مدل مفهومی (استفاده از آنالیز الگوی کرنل لندفرم‌ها) و مدل‌سازی شیء‌محور می‌شود که از اشیای مرجع برای تشخیص لندفرم‌ها استفاده می‌کنند. رویکرد شیء‌گرا شیء مرجع لندفرم‌ها را با سطح توپوگرافی زمین مقایسه می‌کند و درصد انحراف را به‌دست می‌آورد که مسلماً هر قدر درصد انحراف از شیء مرجع مقدار کمتری باشد، شباهت بیشتری بین سطح توپوگرافی محلی زمین و شیء مرجع وجود خواهد داشت. به‌دلیل اینکه در این مدل از نمونه‌برداری واقعی لندفرم‌ها استفاده می‌شود، نسبت‌های مورفومتریک، آلومتریک، و ژئومتریک بین مؤلفه‌ها و عناصر مختلف یک لندفرم به‌خوبی محفوظ می‌ماند و در ایجاد شیء مرجع انعکاس داده می‌شود. در نتیجه، این مدل می‌تواند به‌خوبی بر چالش مقیاس فائق شود. میزان انحراف کمتر از شیء مرجع به افزایش احتمال تشخیص آن عارضه خاص منجر خواهد شد که به عبارت دیگر شانس شباهت به آن لندفرم افزایش می‌یابد. مدل دوم آنالیز الگوی کرنل است که از فضایی مفهومی برای مدل‌سازی تشخیص عوارض فرم-شناسی زمین استفاده می‌کند. این مدل شباهت سطح زمین با الگوی کرنل مرجع را مقایسه و درصد شباهت بین آن‌ها را محاسبه می‌کند، که در واقع درصد شباهت بالاتر به معنی شباهت بیشتر سطح توپوگرافی محلی زمین با الگوی کرنل لندفرم موردنظر است. در این سطح از مدل‌سازی، مفاهیم مقیاس هندسی و مورفولوژیکی تعریف شد تا نیازمندی‌های مربوط به مقیاس تأمین شود. این دو نوع رویکرد امکان شناسایی و تشخیص لندفرم‌های پیچیده و رویارویی با چالش مقیاس را فراهم می‌آورد. ارزیابی صحت نشان داد که به‌طور کلی مدل شیء‌گرا عملکرد بهتری به نسبت مدل مفهومی داشته و با احتساب نتایج هر دو مدل و همه لندفرم‌های شاخص موردبحث در این پژوهش تطابق ۶۰ درصد به‌دست آمد که با توجه به پیچیدگی‌های توپوگرافی زمین و تشخیص لندفرم‌های مرکب و پیچیده نتایج قابل قبولی دارد که البته به ارتقا و توسعه در پژوهش‌های آتی در بهبود عملکرد آن نیاز است. علاوه بر این مورد، پیشنهاد می‌شود که در پژوهش‌های آتی به الگوریتم‌های خودکار تغییردهنده مقیاس هندسی و مورفولوژیک توجه بیشتری شود. در پایان، توسعه و تکامل الگوریتم‌های آنالیز الگو در بخش مدل‌سازی لندفرم‌ها می‌تواند زمینه مطالعه و توسعه پژوهش‌های آتی قرار گیرد.

منابع

بنایی، م.ح. (۱۳۷۲). گزارش نقشه‌برداری خاک، طبقه‌بندی و قابلیت آبیاری در اراضی واقع در جنوب رودخانه گرگان، تهران: مؤسسه تحقیقات آب و خاک ایران.

- Saaty, T. and Alexander, J. 1981. *Thinking with Models*. Pergamon Press, Oxford.
- Banaei, M.H. (1993). A report on soil survey, Land classification and irrigation capability for a region located south of the Gorgan River, Publication No 368, Tehran: Soil and water Research Institute of Iran.
- Bates, R.L. and Jackson, J.A. (Eds.) (2005). *Glossary of Geology*, 5th edition, New York: American Geological Institute.
- Burrough, P.A.; Van Gaans, P.F.M. and MacMillan, R.A. (2000). High-resolution landform classification using fuzzy k-means, *Fuzzy Sets and Systems*, 113(1): 37-52.
- Burrough, P.A.; Wilson, J.P.; Van Gaans, P.F.M. and Hansen, A.J. (2001). Fuzzy k-means classification of topo-climatic data as an aid to forest mapping in the Greater Yellowstone Area, USA, *Landscape Ecology*, 16: 523-546.
- Clarke, K.C. (1988). Scale-based simulation of topographic relief, *American Cartographer*, 15: 173-181.
- Conacher, A.J. and Dalrymple, J.B. (1977). The nine-unit land surface model: An approach to pedogeomorphic research, *Geoderma*, 18: 1-154.
- Dehn, M.; Gartner, H. and Dikau, R. (2001). Principles of semantic modeling of landform structures, *Computers and Geosciences*, 27: 1005-1010.
- Deng, Y. and Wilson, J.P. (2008). Multi-scale and multi-criteria mapping of mountain peaks as fuzzy entities, 2008, *International Journal of Geographical Information Science*, 22(2): 205-218.
- Dikau, R. (1989). The application of a digital relief model to landform analysis. In: Raper, J.F. (Ed.), *Three Dimensional Applications in Geographical Information Systems*, Taylor & Francis, London, PP. 51-77.
- Dikau, R. (1990). Geomorphic landform modeling based on hierarchy theory. In: Brassel, K., Kishimoto, H. (Eds.), *Proceedings of the 4th International Symposium on Spatial Data Handling*, Department of Geography, University of Zürich, Zürich, Switzerland, PP. 230-239.
- Dikau, R.; Brabb, E.E. and Mark, R.M. (1991). *Landform Classification of New Mexico by Computer*, Washington, DC: US Geological Survey Open File Report, PP. 91-364.
- Dikau, R.; Brabb, E.E.; Mark, R.M. and Pike, R.J. (1995). Morphometric landform analysis of New Mexico, *Zeitschrift für Geomorphologie, Suppl-Bd*, 101: 109-126.
- Drăguț, L. and Blaschke, T. (2006). Automated classification of landform elements using object-based image analysis, *Geomorphology*, 81: 330-344.
- Drăguț, L. and Eisank, C. (2012). Automated object-based classification of topography from SRTM data, *Geomorphology*, 141: 21-33.
- Dragut, L. and Eisank, C. (2012). Object representations at multiple scales from digital elevation models, *Geomorphology*, 129(3-4): 183-189.
- Etzelmüller, B. and Sulebak, J.S. (2000). Developments in the use of digital elevation models in periglacial geomorphology and glaciology, *Physische Geographie*, 41: 35-58.
- Evans, I.S. (1972). General geomorphometry, derivatives of altitude, and descriptive statistics. In: Chorley, R.J. (ed.), *Spatial Analysis in Geomorphology*, London, UK: Harper & Row, PP. 17-90.

- Fels, J.E. and Matson, K.C. (1996). A cognitively based approach for hydro-geomorphic land classification using digital terrain models, In: Proceedings of the 3rd International Conference/Workshop on Integrating GIS and Environmental Modeling, Santa Fe, NM, January 21-25, 1996, National Centre for Geographic Information and Analysis, Santa Barbara, CA, USA.
- Gallant, A.L.; Douglas, D.B. and Hoffer, R.M. (2005). Automated mapping of Hammond's landforms, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2: 384-388.
- Gerçek, D.; Toprak, V. and Strobl, J. (2011). Object-based classification of landforms based on their local geometry and geomorphometric context, *International Journal of Geographical Information Science*, 25(6): 1011-1023.
- Guzzetti, F. and Reichenbach, P. (1994). Toward the definition of topographic divisions for Italy, *Geomorphology*, 11: 57-75.
- Hammond, E.H. (1964). Analysis of properties in land form geography: An application to broad-scale land form mapping, *Annals of the Association of American Geographers*, 54: 11-19.
- Hammond, E.H. (1965). What is a landform? Some further comments, *The Professional Geographer*, 17(3): 12-13.
- Hrvatın, M. and Perko, D. (2009). Suitability of Hammond's method for determining landform units in Slovenia, *Acta Geographica Slovenica*, 49: 343-366.
- Huggett, R. (1975). Soil landscape systems: A model of soil genesis, *Geoderma*, 13: 1-22.
- Irvin, B.J.; Ventura, S.J. and Slater, B.K. (1997). Fuzzy and isodata classification of landform elements from digital terrain data in Pleasant Valley, Wisconsin, *Geoderma*, 77: 137-154.
- Iwahashi, J. and Pike, R.J. (2007). Automated classification of topography from DEMs by an unsupervised nested-means algorithm and a three-part geometric signature, *Geomorphology*, 86(3): 409-440.
- Jasiewicz, J. and Stepinski, T. (2013). Geomorphons - a pattern recognition approach to classification and mapping of landforms, *Geomorphology*, 182: 147-156.
- Karagulle, D.; Frye, C.; Sayre, R.; Breyer, S.; Aniello, P.; Vaughan, R. and Wright D. (2017). Modeling global Hammond landform regions from 250-m elevation data, *Transaction in GIS*, 21(5): 1040-1060.
- Karagulle, D.; Frye, C.; Sayre, R.; Breyer, S.; Aniello, P.; Vaughan, R. and Wright, D. (2017). Modeling global Hammond landform regions from 250 m elevation data, *Transactions in GIS*, 21: 1040-1060.
- Leighty, R.D. (2001). Automated IFSAR Terrain Analysis System: Final Report, U.S. Army Aviation & Missile Command, Defense Advanced Research Projects Agency (DoD) Information Sciences Office, Arlington, VA, 59 pp.
- Lindsay, J.B.; Cockburn, J.M.H. and Russel, H.A.J. (2015). An integral image approach to performing multi-scale topographic position analysis, *Geomorphology*, 245: 51-61.
- Li, Z.; Zhu, Q.; Gold, C. 1960. *Digital Terrain Modeling, Principles and Methodology*, Taylor and Francis London.
- Lloyd, C.D. and Atkinson, P.M. (1998). Scale and the spatial structure of landform: optimizing sampling strategies with geostatistics. In: Proceedings of the 3rd International Conference on GeoComputation, University of Bristol, United Kingdom, 17-19 September 1998, University of Bristol, Bristol, UK, 16 pp.

- Lobeck, A.K. (1939). *Geomorphology: An Introduction to the Study of Landscapes*, New York: McGraw-Hill, 731 pp.
- Lucieer, A.; Fisher, P. and Stein, A. (2003). Texture-based segmentation of high-resolution remotely sensed imagery for identification of fuzzy objects, In: *Proceedings of the Seventh International Conference on Geocomputation*, University of Southampton, Southampton, UK, 9 pp.
- Mackay, D.S.; Samanta, S.; Ahl, D.E.; Ewers, B.E.; Gower, S.T. and Burrows, S.N. (2003). Automated parameterization of land surface process models using fuzzy logic, *Transactions in GIS*, 7: 139-153.
- MacMillan, R.A. and Shary, P.A. (2009). Landforms and landform elements in geomorphometry. In: T. Hengl & H.I. Reuter (eds) *Geomorphometry: Concepts, Software, Applications*, PP. 227-254. Amsterdam, Netherlands: Elsevier.
- MacMillan, R.A. and Shary, P.A. (2009). Landforms and landform elements in geomorphometry. In: T. Hengl., H.I., Reuter (eds) *Geomorphometry: Concepts, Software, Applications*, PP. 227-254. Amsterdam, Netherlands: Elsevier.
- MacMillan., R.A.; Pettapiece, W.W.; Nolan., S.C. and Goddard, T.W. (2000). A generic procedure for automatically segmenting landforms into landform elements using DEMs, heuristic rules and fuzzy logic, *Fuzzy Sets and Systems*, 113(1): 81-109.
- Meijerink, A.M.J. (1988). Data acquisition and data capture through terrain mapping units, *ITC Journal*, 1: 23-44.
- Milne, G. (1935). Some suggested units of classification and mapping particularly for East Africa soils, *Soil Research*, 4: 183-198.
- Mokarram, M. and Hojati, M. (2016). Landform classification using a sub-pixel spatial attraction model to increase spatial resolution of digital elevation model (DEM), *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 21(1): 111-120.
- Moore, D.M.; Lees, B.G. and Davey, S.M. (1991). A new method for predicting vegetation distributions using decision tree analysis in a geographic information system, *Environmental Management*, 15: 59-71.
- Mulla, D.J. (1988). Using geostatistics and spectral analysis to study spatial patterns in the topography of southeastern Washington State, USA, *Earth Surface Processes and Landforms*, 13: 389-405.
- Pennock, D.J.; Zebarth, B.J. and De Jong, E. (1987). Landform classification and soil distribution in hummocky terrain, Saskatchewan, Canada, *Geoderma*, 40: 297-315.
- Pike, R.J. (1988). The geometric signature: quantifying landslide-terrain types from Digital Elevation Models, *Mathematical Geology*, 20: 491-511.
- Piloyan, A. and Konečný, M. (2017). Semi-Automated Classification of Landform Elements in Armenia Based on SRTM DEM using K-Means Unsupervised Classification, *Quaestiones Geographicae (The Journal of Adam Mickiewicz University)*, 36(1): 90-103.
- Prima, O.D.A.; Echigo, A.; Yokoyama, R. and Yoshida, T. (2006). Supervised landform classification of Northeast Honshu from DEM-derived thematic maps, *Geomorphology*, 78(3-4): 373-386.
- Rigol-Sanchez, J.P.; Stuart, N. and Pulido-Bosch, A. (2015). Arc Geomorphometry: A toolbox for geomorphometric characterization of DEMs in the ArcGIS environment, *Computers and Geosciences*, 85(Part A): 155-163.
- Romstad, B. and Etzelmüller, B. (2009). Structuring the digital elevation model into landform elements through watershed segmentation of curvature. In: R. Purves, S., Gruber, R., Straumann & Hengl, T., (eds) *Proceedings of Geomorphometry 2009*, PP. 55-60. Zurich, Switzerland: University of Zurich.

- Romstad, B. and Etzelmuller, B. (2012). Mean-curvature watersheds: A simple method for segmentation of a digital elevation model into terrain units, *Geomorphology*, 139-140: 293-302.
- Ruhl, R.V. (1960). Elements of the soil landscape, In: *Proceedings of the 7th Congress of the International Society of Soil Science*, Madison, WI, PP. 32-40,
- Ruhl, R.V. and Walker, P.H. (1968). Hillslope models and soil formation II: Open systems, In: *Proceedings of the 9th Congress of the International Soil Science Society*, Adelaide, Australia, PP. 551-560.
- Saadat, H.; Robert, B.; Sharifi, F.; Guy, M.; Namdar, M. and Ale-Ebrahim, S. (2008). Landform classification from a digital elevation model and satellite imagery, *Geomorphology*, 100: 453-464.
- Schmidt, J. and Dikau, R. (1999). Extracting geomorphometric attributes and objects from digital elevation models: Semantics, methods, future needs. In: Dikau, R., Saurer, H., (eds) *GIS for Earth Surface Systems: Analysis and Modeling of the Natural Environment*, Berlin, Germany: Schweizbart'sche Verlagbuchhandlung, PP. 153-173.
- Schmidt, J. and Hewitt, A. (2004). Fuzzy land element classification from DTMs based on geometry and terrain position, *Geoderma*, 121(3-4): 243-256.
- Schmidt, J.; Merz, B. and Dikau, R. (1998). Morphological structure and hydrological process modelling, *Zeitschrift für Geomorphologie NF*, 112: 55-66.
- Schmidt, J.; Hennrich, K. and Dikau, R. (1998). Scales and similarities in runoff processes with respect to geomorphometry, In: *Geocomputation 1998: Proceedings of the 3rd International Conference on GeoComputation*, University of Bristol, United Kingdom, 17-19 September 1998, University of Bristol, Bristol, UK, 20 pp.
- Schneevoigt, N.J.; Sebastian, V.D.L.; Thamm, H.P. and Schrott, L. (2008). Detecting Alpine landforms from remotely sensed imagery, a pilot study in the Bavarian Alps, *Geomorphology*, 93: 104-119.
- Shary, P.A. (1995). Land surface in gravity points classification by complete system of curvatures, *Mathematical Geology*, 27: 373-390.
- Shary, P.A.; Sharaya, L.S. and Mitusov, A.V. (2002). Fundamental quantitative methods of land surface analysis, *Geoderma*, 107: 1-32.
- Shary, P.A.; Sharaya, L.S. and Mitusov, A.V. (2005). The problem of scale-specific scale-free approaches in geomorphometry, *Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria*, 28: 81-101.
- Skidmore, A.K.; Ryan, P.J.; Dawes, W.; Short, D. and O'Loughlin, E. (1991). Use of an expert system to map forest soils from a geographical information system, *International Journal of Geographical Information Systems*, 5: 431-444.
- Speight, J.G. (1968). Parametric description of land form, In: Stewart, G.A., (ed.), *Land Evaluation: Papers of a CSIRO Symposium*, Melbourne, Australia, PP. 239-250.
- Speight, J.G. (1990). Landforms, In: MacDonald, R.C., Isbell, R.F., Speight, J.G., Walker, J., Hop, M.S., (eds) *Australian Soil and Land Survey Field Handbook*, PP. 9-57. Melbourne, Australia: Inkata Press.
- Summerfield, M.A. (1991). *Global Geomorphology*. London: Longman.
- Suryana, N. and de Hoop, S. (1994). Hierarchical structuring of terrain mapping units. In: *Proceedings of the Fifth European Conference and Exhibition on Geographic Information Systems, EGIS 94*, EGIS Foundation, Utrecht, The Netherlands, 1: 869-877.

- Tadono, T.; Ishida, H.; Oda, F.; Naito, S.; Minakawa, K. and Iwamoto, H. (2014). Precise Global DEM Generation by ALOS PRISM, ISPRS Annals of the Photogrammetry, Journal of Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2(4): 71-76.
- Takaku, J.; Tadono, T. and Tsutsui, K. (2014). Generation of High Resolution Global DSM from ALOS PRISM, The International Archives of the Photogrammetry, Journal of Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XL(4): 243-248.
- Tomer, M.D. and Anderson, J.L. (1995). Variation in soil water storage across a sand plain hillslope, Soil Science Society of America Proceedings, 54: 1091-1100.
- Tribe, A. (1992). Automated recognition of valley lines and drainage networks from grid digital elevation models: a review and a new method, Journal of Hydrology, 139(1-4): 263-293.
- Weaver, G.D. (1965). What is a landform?, The Professional Geographer, 17(1): 11-13.
- Webster, R. and Oliver, M.A. (2001). Geostatistics for Environmental Scientists, Statistics in Practice, Wiley, Chichester, 265 pp.
- Weibel, R. and DeLotto, J.S. (1988). Automated terrain classification for GIS modeling, In: Proceedings of GIS/LIS, San Antonio, NM, PP. 618-627.