



نسخ از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی (سال سیزدهم / شماره اول) بهار ۱۴۰۱

نمایه شده در سایت: پایگاه استنادی علوم جهان اسلام، جهاد دانشگاهی، مگ ایران، نورمگز، سیولیکا، گوگل اسکولار
آدرس وب سایت: <http://girs.iaubushehr.ac.ir>



تشخیص خودکار خط الرأس‌ها با استفاده از تحلیل الگوی همسایگی کرنل

مقاله پژوهشی

کوروش شیرانی، سینا صلحی، فاطمه نعمت‌اللهی

دریافت: ۱۴ فروردین ۱۴۰۰ / بازنگری: ۲۸ اردیبهشت ۱۴۰۰ / پذیرش: ۴ مرداد ۱۴۰۰

دسترسی اینترنتی: ۱۲ مرداد ۱۴۰۰

چکیده

از اهداف توسعه دهندگان GIS، محققین علوم زمین و ژئومورفولوژیست‌ها است. در این مسیر، انتظار می‌رود که استخراج این واحدها با سرعت و دقت بیشتری انجام گرفته و نتایج به صورت نقشه‌های برداری و رستری ارائه گردد. رویکردهای موجود عمدتاً بر اساس ارتفاع، مشتق سطح زمین، گرادیان، انحنای جهت جریان، موقعیت شیب، نمایه‌های مورفومتریک و مواردی از این قبیل قرار دارد. همچنین به چالش تناسب مقیاس تشخیصی با مقیاس لندفرمی کمتر توجه شده و بیشتر مدل‌ها دارای این نقیصه هستند. از طرف دیگر به امکان برداری‌سازی نتایج خروجی از مدل‌ها و همچنین به تحلیل حساسیت و پاسخ زمانی الگوریتم‌ها به پردازش‌های ماشینی کمتر توجه شده است. در این پژوهش با استفاده از الگوریتم‌های پایه‌ای آنالیز رستری و کدنویسی، روش‌ها و الگوریتم‌های جدیدی در تشخیص خودکار عوارض زمین ارائه گردیده‌است. همچنین آنالیزهای رستری از نوع کانونی (Focal) مورد تأکید قرار گرفته است و از تکنیک پنجره متحرک به منظور پیاده‌سازی الگوریتم‌ها استفاده شده است. مواجهه با چالش مقیاس، آنالیز حساسیت و پاسخ الگوریتم‌ها به تغییرات ورودی و نیز ارزیابی صحت نیز از جنبه‌های دیگری است که در این پژوهش به آن پرداخته شده است.

مواد و روش‌ها در این پژوهش از داده‌های ارتفاعی سطحی (DSM) منتشر شده توسط آژانس فضایی ژاپن در ماه می و اکتبر ۲۰۱۵ با رزولوشن افقی در حدود ۳۰ متر برای بررسی توپوگرافی

پیشینه و هدف لندفرم به هر عارضه فیزیکی سطح زمین با ساختار و شکل قابل تشخیص اطلاق می‌شود. عناصر لندفرمی و ساختارهای وابسته به فرم که بر روی سطح زمین قرار دارند، به صورت مستقیم و یا غیر مستقیم بسیاری از متغیرهای محیطی دیگر را کنترل می‌کنند. نمایش عددی سطح و الگوی ناهموار زمین، موضوعی مشترک در مطالعات جغرافیایی، ژئومورفولوژیکی، نقشه‌کشی مخاطرات زمین و ژئوفیزیک و همچنین اکتشافات کف دریا است. ترکیب علوم زمین و کامپیوتر به همراه ریاضیات و مهندسی ژئومورفومتری در تعامل با لندفرم‌های گسسته و پیوسته قرار دارد. ژئومورفومتری به حدود ۱۵۰ سال قبل و کارهای الکساندر فون همبلت و زمین‌ریخت‌شناسان برمی‌گردد و امروزه با انقلاب در علوم کامپیوتر و خصوصاً مدل‌های رقومی کامپیوتری به شدت در حال توسعه است. تشخیص و طبقه‌بندی لندفرم‌ها یکی

کوروش شیرانی^۱، سینا صلحی^۲، فاطمه نعمت‌اللهی^۳

۱. استادیار، بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان اصفهان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اصفهان، ایران
۲. دانش‌آموخته دکتری ژئومورفولوژی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم جغرافیایی و برنامه‌ریزی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران
۳. پژوهشگر پسادکتری ژئومورفولوژی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم جغرافیایی و برنامه‌ریزی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

پست الکترونیکی مسئول مکاتبات: KouroshShirani@gmail.com

<http://dorl.net/dor.20.1001.1.26767082.1401.13.1.4.2>

باینری داشته، در صورتی که الگوریتم‌های CMLSR و SPSR اینگونه عمل نمی‌کنند. در تمامی الگوریتم‌ها، افزایش ابعاد پنجره متحرک باعث کلی‌سازی نتایج و حذف جزئیات می‌گردد. الگوریتم‌های CMLSR و SPSR به دلیل درجه استدرج بیشتر در تفکیک عوارض، برای مقاصد کارتوگرافیکی و نمایشی مناسب‌تر هستند. از لحاظ عملکرد زمانی یا حساسیت به تغییرات ورودی، الگوریتم SPSR عملکرد بهتری از خود نشان می‌دهد. این موضوع خصوصاً در مواردی که حجم فایل ورودی پر حجم و تعداد سطر و ستون‌ها زیاد باشد، اهمیت بیشتری خواهد داشت. با توجه به نتایج اعتبارسنجی و ارزیابی صحت، الگوریتم MLMSR و سپس SPSR عملکرد بهتری داشته‌اند و الگوریتم CMLSR به نسبت سایر روش‌ها عملکرد ضعیف‌تری از خود نشان داده است. در طراحی و اجرای تمامی الگوریتم‌ها و نیز در بخش حساسیت‌سنجی و اعتبارسنجی، به طور گسترده از زبان برنامه‌نویسی پایتون استفاده شده است و مجموعاً بیش از ۵۰۰ خط کدنویسی بدین منظور انجام گرفت. تمامی الگوریتم‌ها به طور خودکار بوده و با استفاده از پردازش ماشینی قادر به اجرا و ذخیره‌سازی نتایج به فرمت رستر و بردار می‌باشند.

نتیجه‌گیری نتایج نشان می‌دهد که الگوریتم MLMSR، در ابعاد پائین‌تر پنجره متحرک تمایل به تفکیک باینری داشته، در صورتی که الگوریتم‌های CMLSR و SPSR این‌گونه عمل نمی‌کنند. در تمامی الگوریتم‌ها، افزایش ابعاد پنجره متحرک باعث کلی‌سازی نتایج و حذف جزئیات می‌گردد. الگوریتم‌های CMLSR و SPSR به دلیل درجه استدرج بیشتر در تفکیک عوارض، برای مقاصد کارتوگرافیکی و نمایشی مناسب‌تر هستند. از لحاظ عملکرد زمانی یا حساسیت به تغییرات ورودی، الگوریتم SPSR عملکرد بهتری از خود نشان می‌دهد. خصوصاً در مواردی که حجم فایل ورودی پر حجم و تعداد سطر و ستون‌ها زیاد باشد، اهمیت بیشتری خواهد داشت. با توجه به نتایج اعتبارسنجی و ارزیابی صحت، الگوریتم MLMSR و سپس SPSR عملکرد بهتری داشته‌اند و الگوریتم CMLSR به نسبت سایر روش‌ها عملکرد ضعیف‌تری از خود نشان داده است.

واژه‌های کلیدی: کرنل، الگوی همسایگی، تشخیص خودکار، خط‌الرأس

منطقه، مورد استفاده قرار گرفت. این داده‌ها از تصاویر ماهواره ALOS به دست آمده است. این پایگاه بر اساس داده‌های DSM (نسخه شبکه ۵ متری) توپوگرافی سه بعدی از جمله دقیق‌ترین داده‌های ارتفاعی در مقیاس جهانی به دست آمده است. مدل رقومی ارتفاعی در محیط کدنویسی پایتون به ساختار ماتریسی تبدیل شد. سپس ساختار آنالیز رستری با استفاده از تکنیک پنجره متحرک پیاده‌سازی گردید. الگوریتم پنجره متحرک به صورتی کدنویسی شد که ابعاد پنجره متحرک به صورت آزاد قابل تعیین و تغییر باشد. متناسب با اندازه پنجره متحرک، الگوریتم مواجهه با اثر حاشیه‌ای کدنویسی گردید تا تصحیح و سازماندهی اثر حاشیه‌ای متناسب با اندازه پنجره متحرک، به صورت خودکار انجام گیرد. در گام بعدی سه الگوریتم تشخیص درجه شباهت به قتل در ساختارهای شبکه رستری تک باند با استفاده از مدل‌سازی الگوهای کرنلی انجام گرفت. هر سه الگوریتم قابلیت انطباق با تغییرات اندازه پنجره متحرک را داراست که از نقاط قوت این سه الگوریتم به حساب می‌آید. ابعاد سلول‌های شبکه رستری و اندازه پنجره متحرک، فاکتورهای تغییر مقیاس در هر یک از این سه الگوریتم هستند. در نهایت حساسیت‌سنجی زمانی هر یک از این سه الگوریتم به نسبت تغییرات اندازه پنجره متحرک، تغییرات دقت مکانی شبکه رستری و تغییرات وسعت شبکه رستری انجام گرفت. تمامی پروسه به صورتی طراحی گردید که به سادگی قابلیت به کارگیری در یک نرم افزار رسمی را داشته باشد و به طور کامل با ساختار پردازش ماشینی هماهنگی و سازگاری داشته باشد در ضمن اتوماتیک بودن و قابلیت اجرا بر روی پلاتفرم‌های مختلف نیز از اولویت‌های ما در این بخش مورد نظر قرار داشت.

نتایج و بحث در تشخیص خودکار قتل و خط‌الرأس‌ها با استفاده از مدل رقومی زمین، از آنالیز الگوی مکانی کرنل استفاده شد. در این راستا سه الگوریتم پیشنهادی در این زمینه طراحی، طرح‌بندی، کدنویسی و اجرا گردید. نتایج خروجی از هر یک از الگوریتم‌ها به صورت ساختارهای رستری و برداری ارائه شد. ارزیابی صحت و حساسیت‌سنجی به نسبت تغییرات اندازه پنجره متحرک، رزولوشن و وسعت شبکه رستری برای هر یک از الگوریتم‌ها انجام گرفت.

الگوریتم MLMSR، در ابعاد پائین‌تر پنجره متحرک تمایل به تفکیک

مقدمه

لندفرم به هر عارضه فیزیکی سطح زمین با ساختار و شکل قابل تشخیص اطلاق می‌شود (۴). یک تیپ لندفرم، الگوی ایجاد شده بر روی سطح زمین همراه با تغییراتی در ابعاد، مقیاس، شکل و موقعیت نسبی با عوارض ژئومورفیک مجاور است (۶ و ۵۰). تیپ‌های لندفرم (Landform type) (۱۲)، به عنوان فرم‌های ناهمواری زمین (Relief form)، پیوندهای مزوفرم (Mesoform association) (۱۰) و الگوی لندفرم (Landform patterns) (۴۵) نیز شناخته می‌شوند. تیپ‌های لندفرم‌ها شامل سطوح هموار یا دشت‌ها، تپه‌ها، کوه‌ها، قله‌ها، دره‌ها و جلگه‌ها در مقیاس‌های مختلف قابل رویت هستند (۵). نمایش عددی سطح و الگوی ناهموار زمین، موضوعی مشترک در مطالعات جغرافیایی، ژئومورفولوژیکی، نقشه‌کشی مخاطرات زمین و ژئوفیزیک و همچنین اکتشافات کف دریا است. ترکیب علوم زمین و کامپیوتر به همراه ریاضیات و مهندسی ژئومورفومتری در تعامل با لندفرم‌های گسسته و پیوسته قرار دارد. این رشته مطالعاتی به طور گسترده‌ای به نام آنالیز زمین (Terrain analysis) و یا ژئومورفولوژی کمی شناخته شده است. در حالیکه واژه جدیدتر، مدل‌سازی رقومی زمین (Digital Terrain Modeling) به طور فزاینده‌ای در حال استفاده است (۳۰ و ۴۲).

ژئومورفومتری به حدود ۱۵۰ سال قبل و کارهای الکساندر فون همبلت و زمین‌ریخت‌شناسان برمی‌گردد و امروزه با انقلاب در علوم کامپیوتر و خصوصاً مدل‌های رقومی کامپیوتری به شدت در حال توسعه است (۴۳). مورفومتری منبع بسیاری از روش‌های قابل اطمینان در محاسبات هیدروگراف حوضه‌ها، برآورد فرسایش خاک، نقشه‌های حساسیت زمین‌لغزش، پیش‌بینی حرکت آب‌های زیرزمینی، نمایش توپوگرافی و بسیاری از کاربردهای دیگر در علوم زمین و زمینه‌های مهندسی است (۲۳ و ۲۷). این تکامل و بلوغ در ظرفیت و توانایی‌های جدید مدل‌سازی زمین (Terrain Modeling)، در سیستم اطلاعات جغرافیایی و استفاده از مورفومتری برای تحلیل چشم‌اندازها مشخص است (۲ و ۹).

تکنیک‌ها و ابزارهای بسیاری در ژئومورفومتری به مانند اصول مفهومی این شاخه علمی مورد نظر قرار گرفته است (۱۰، ۲۳ و ۴۲). در این راستا امروزه سامانه‌های اطلاعات مکانی با بکارگیری زبان برنامه‌نویسی پیشرفته و محاسبات ریاضی، برای شناسایی خودکار عوارض زمین در خدمت علم ژئومورفومتری قرار گرفته است. در این پژوهش هدف آن است تا با تحلیل‌های ماتریسی بر روی داده‌های رستری از نوع داده‌های رقومی زمین به عنوان مبنای‌ترین شکل برداشت شده از سطح زمین و همچنین بکارگیری الگوریتم‌های آنالیز رستری جدید از طریق کدنویسی، به تشخیص خودکار عوارض زمین دست یافت.

در زمینه آنالیز رقومی زمین، در پژوهش‌های متعددی، از روش‌های زمین‌آماری استفاده شده است. به طور مثال سمی‌واریوگرام (Semi variogram)، برای تشخیص مورفولوژی سطح زمین (۳۸) و روش‌های کریگینگ برای برآورد ارتفاع، مورد استفاده قرار گرفته است (۳۳). بنابراین برخی محققان از اطلاعات به دست‌آمده از روش‌های آماری و زمین‌آماری انجام شده بر روی مدل‌های رقومی ارتفاعی، اقدام به طبقه‌بندی سطح زمین (Terrain classification) کرده‌اند (۳). طبقه‌بندی لندفرم‌ها یکی از شاخه‌های اصلی ژئومورفومتری یا علم کمی آنالیز سطح زمین است. لندفرم‌ها به عنوان واحدهای همگن از لحاظ پارامترهای سطح زمین (Land Surface Parameter, LSP) همچون گرادیان شیب، ارتفاع و انحنا، شناخته می‌شوند. طبقه‌بندی لندفرم‌ها به عنوان واحدهای مکانی گسسته (آنالوگ و دیجیتال) شرایط قطعه‌بندی برای کاربردهای هیدرولوژی، ژئومورفولوژی، خاک‌شناسی و زمینه‌های مرتبط را فراهم می‌آورد (۲۶).

بر اساس مقیاس‌های فضایی مختلفی، لندفرم‌ها قابل تشخیص هستند. فرم‌های کلی مانند ارتفاعات و دشت‌ها در مقیاس بزرگ تشخیص داده می‌شوند. این در حالی است که لندفرم‌های جزئی‌تر مانند خندق‌ها، قله و یا سطوح شیب‌دار در مقیاس کوچک، به صورت زیرگروهی از فرم‌های با مقیاس بزرگ‌تر تشخیص داده می‌شوند. بنابراین سطح زمین

تشخیص لندفرم‌ها هستند که بسته به کیفیت و توانایی هر تفسیر متفاوت خواهد بود (۱۴).

فرایند تشخیص لندفرم‌ها در ابتدا مشکل و زمان بر بود اما اخیراً پژوهش‌هایی بر روی ژئومورفومتری عمومی منتشر شده‌اند که در ارتباط با اندازه‌گیری شکل سطح زمین می‌باشند. به طور مثال مجموعه‌ای از ۱۵ لندفرم اصلی بر اساس ویژگی‌های هندسی همچون ارتفاع، شیب و انحنا توسط دیکاو تشخیص داده شده است (۱۰). روش‌های جدید طبقه‌بندی، همچون روش فنمن که ایالات متحده آمریکا را از لحاظ فیزیکی تقسیم‌بندی می‌کند، دارای مقیاس وسیع بوده و بیشتر به صورت کیفی تعریف می‌شود (۲۲). هاموند (۲۴) اولین کسی بود که ساز و کاری عددی را به کار برد. اگرچه به صورت دستی، نقشه انواع واحدهای زمین را از طریق آستانه‌های ژئومورفیکی شامل گرادیان شیب، ناهمواری نسبی، الگو و نیمرخ سطح زمین تهیه نمود. مورفی (۳۹) مناطق توپوگرافیک جهان را طبقه‌بندی کرده است که به شدت کلی شده (Generalized) است. نقشه وی به صورت دستی از ارتفاع و ناهمواری نسبی از نقشه منحنی میزان با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰۰ به دست آمده است.

سیستم اطلاعات جغرافیایی و علوم کامپیوتر، بسیاری از موانع طبقه‌بندی سطح زمین، با استفاده از هندسه سطح پوسته زمین برای اراضی وسیع و در قدرت تفکیک‌های مختلف را برطرف کرده است. توپوگرافی به طور خودکار از طریق ذخیره‌سازی ارتفاع سطح زمین به صورت یک آرایه شبکه‌ای از سلول‌ها به صورت مدل رقومی ارتفاعی، قابلیت آنالیز و تحلیل دارد. توپولوژی منطقه‌ای سطح زمین، از ترکیب ناهمواری، شیب و فواصل عوارض و سایر مشتقات ارتفاع و موقعیت‌های جغرافیایی به دست می‌آید (۲۹). در بسیاری پژوهش‌های پیشین، روش‌های مختلف طبقه‌بندی، با فرم سطح زمین و داده‌های مکانی دیگر ترکیب شده و در برآورد ناپایداری شیب‌ها و استخراج واحدهای ژئومورفیک زمین مورد استفاده قرار گرفته‌اند (۷، ۱۹، ۳۵، ۴۰، ۴۱ و ۴۵).

نمایش‌دهنده ساختار سلسله‌مراتبی از لندفرم‌های مختلف است (۱۱). امروزه ایجاد یک سیستم خودکار که توانایی تشخیص و ترسیم لندفرم‌ها را در مقیاس‌های مختلف داشته باشد، هنوز چالش بزرگی است (۳۱). استخراج واحدهای لندفرمی می‌تواند با استفاده از رویکردهای مختلفی انجام شود که شامل طبقه‌بندی پارامترهای مورفومتری، روش‌های فیلترینگ، آنالیز خوشه‌بندی، روش‌های آماری چند متغیره و رویکردهای مختلف دیگر می‌شود (۱، ۱۰، ۱۲، ۱۷ و ۴۶). مطالعات مورفومتریکی معمولاً با استخراج مؤلفه‌های ناهمواری زمین همانند ارتفاع، شیب و جهت شیب آغاز می‌گردد. توصیف پیچیده‌تر لندفرم‌ها ممکن است از طریق استفاده از مشتق مکانی این مؤلفه‌های مورفومتریکی به دست آید که شاخص‌های مفیدی هستند. به طور مثال شاخص رطوبت توپوگرافیکی (Topographic Wetness Index, TWI)، شاخص توان جریان (Stream Power Index, SPI) و شاخص رسوب‌گذاری و برداشت رسوب (Aggradation and Degradation index) را می‌توان نام برد (۳۴، ۳۶ و ۴۹). در حال حاضر ژئومورفومتری به طور گسترده از مدل رقومی ارتفاعی به عنوان اطلاعات پایه برای استخراج مؤلفه‌های پایه و نیز استخراج نمایه‌ها و شاخص‌ها استفاده می‌کند. وود (۴۹) مجموعه الگوریتم‌هایی را برای تشریح عددی لندفرم‌ها پیشنهاد کرد و تعداد محدود شده‌ای از کلاس‌های فرمی و یا مورفومتریکی را مد نظر داشت. قواعد تعریف شده برای هر کلاس مورفومتریکی بر اساس مقدار شیب و تحدب محاسبه شده از مدل رقومی ارتفاعی تعیین می‌شود. رویکرد وود بر اساس فرضیه ایونس قرار داشت اما سطح زمین می‌تواند به صورت سطحی پیوسته فرض شود و در نتیجه می‌تواند به طور ریاضی از طریق توابع چندجمله‌ای درجه دوم نمایش داده شود. کلاس‌های مورفومتریکی پیشنهاد شده توسط وود شامل خط‌الرأس، کانال، سطوح مسطح، قله، چاله و گردنه است (۱۸). برخی فرم‌های عددی دیگر همچون پرتگاه و رمپ‌ها نیز توسط فلیسیمو ارائه شده است (۲۰). تفسیر عکس‌های هوایی و مطالعات میدانی، روش‌های قدیمی

دادند. در مدل آنها، انحناى زمین، مد نظر قرار نگرفته است. مک میلان و همکاران (۳۲) یک سیستم ترکیبی طبقه‌بندی را بر اساس ۱۰ مؤلفه ژئومورفومتریک توسعه دادند. این مؤلفه‌ها شامل انحناى زمین، فاصله از خطوط تقسیم آب و قواعد مجموعه‌های فازی بود که منتهی به تشخیص پانزده عنصر لندفرمی گردید. مدل آنها نیاز به مؤلفه‌ها و آستانه‌های زیادی دارد. همچنین مراحل اجرای مدل در الگوریتم‌های مختلف و پارامترهایی که مورد استفاده قرار می‌گیرند، متغیر است. بنابراین فرمت و دامنه واحدهای تشخیصی نیز متفاوت خواهد بود. عامل مهم دیگر آن است که آنها مسئله مقیاس لندفرم‌ها را به طور کامل مورد نظر قرار نداده‌اند.

در برخی منابع از روش‌های طبقه‌بندی واحدهای فرمی TPI استفاده شده است، در این الگوریتم‌ها از تکنیک پنجره متحرک استفاده می‌شود و اختلاف ارتفاع بین پیکسل مرکزی با میانگین پیکسل‌های مجاور محاسبه می‌گردد. از نتایج به دست آمده از TPI لندفرم‌های زمین طبقه‌بندی و به نقشه تبدیل می‌شوند. در برخی رویکردهای دیگر از الگوریتم‌های یادگیری عمیق و یادگیری ماشین برای تشخیص لندفرم‌ها استفاده شده است. این مجموعه روش‌ها به دنبال تشخیص نظارت شده یا نظارت نشده عوارض سطح زمین با استفاده از داده‌های آموزشی و اخذ الگوها و روابط بین آنها می‌باشند. از جمله رویکردهای دیگر در تشخیص خودکار لندفرم‌های زمین با استفاده از مدل رقومی زمین، استفاده از شبکه‌های عصبی کانولوشن است. در این روش‌ها با استفاده از مدل یادگیری ماشین شبکه عصبی و با استفاده از داده‌های آموزشی عملیات یادگیری تکمیل و سپس تشخیص و استخراج و طبقه‌بندی لندفرم‌های زمین انجام می‌پذیرد. رویکردهای موجود عمدتاً بر اساس ارتفاع، مشتق سطح زمین، گرادیان، انحنا، جهت جریان، موقعیت شیب، نمایه‌های مورفومتریکی و مواردی از این قبیل قرار دارد. همچنین به چالش تناسب مقیاس تشخیصی با مقیاس لندفرمی کمتر توجه شده و بیشتر مدل‌ها دارای این نقیصه هستند. از طرف دیگر به امکان برداری‌سازی نتایج خروجی از مدل‌ها و همچنین به تحلیل حساسیت و پاسخ

روش تیپ‌شناسی هاموند (۲۵) برای اولین بار توسط دیکائو و همکاران خودکارسازی شد (۱۳). سپس توسط برابین (۶) اصلاح و ویرایش گردید. در مرحله بعد توسط مورگان و همکاران (۳۷) مجدداً برنامه‌نویسی شد. پریما و همکاران (۴۴) هفت تیپ سطح زمین را در هانشو واقع در شمال شرق ژاپن با استفاده از چهار پارامتر مورفومتریک تهیه کردند. برخی از طبقه‌بندی‌ها نظارت شده هستند که برای ترسیم تیپ‌های توپوگرافی زمین از داده‌های آموزشی، استفاده می‌کنند (۲۵). در حالیکه برخی دیگر، نظارت نشده، غیر جبری و کنترلی بوده و اجازه می‌دهند که خود داده‌ها بهترین طبقه‌بندی را تعریف کنند (۲۸ و ۳۲). بیشتر این طبقه‌بندی‌ها، تلاشی تجربی در ژئومورفومتری عمومی هستند (۱۸). این طبقه‌بندی‌ها، لندفرم‌ها را بر اساس ویژگی‌های سیستمی و قوانین فیزیکی و مدل‌های تکامل چشم‌انداز و قوانین حمل رسوب و معادلات توزیع رسوب و مسائل احتمالاتی، آماری طبقه‌بندی و تقسیم‌بندی می‌کنند (۲۹).

تلاش‌های زیادی در سال‌های اخیر برای ایجاد ساز و کاری برای استخراج خودکار عناصر لندفرم‌های زمینی از مدل‌های رقومی ارتفاعی انجام گرفته است. دایموند و هارمسورس (۱۵)، رویکردی جدیدی در مدل‌سازی واحدهای اراضی با استفاده از شیب زمین و آنالیز نیمرخ برای تعیین شکستگی‌های گرادیانی، ارائه کردند. این روش، بر اساس روش تعیین بیشترین شیب قرار دارد و ویژگی‌های دوبعدی سطحی زمین مانند تغییرات کانتوری را تشخیص نمی‌دهد. دایموند و همکاران (۱۶) از یک طبقه‌بندی ترکیبی شامل ارتفاع، شیب و جهت شیب برای استخراج عناصر فرمی استفاده کردند. این الگوریتم شامل یک طبقه‌بندی اختیاری از ۹ کلاس جهت شیب زمین و روش‌های فیلترینگ تکرار شونده پیچیده و ترکیبی برای حذف نویزهای داده‌های ورودی است. این روش‌ها، به طور غیرمستقیم ویژگی‌های مقیاس و انحناى زمین در چشم‌اندازها را مدنظر قرار می‌دهد. فلز و ماتسون (۲۱) پارامتر مقیاس‌پذیر موقعیت چشم‌اندازها را معرفی کردند و مدلی بر اساس ترکیب موقعیت شیب و چشم‌انداز توسعه

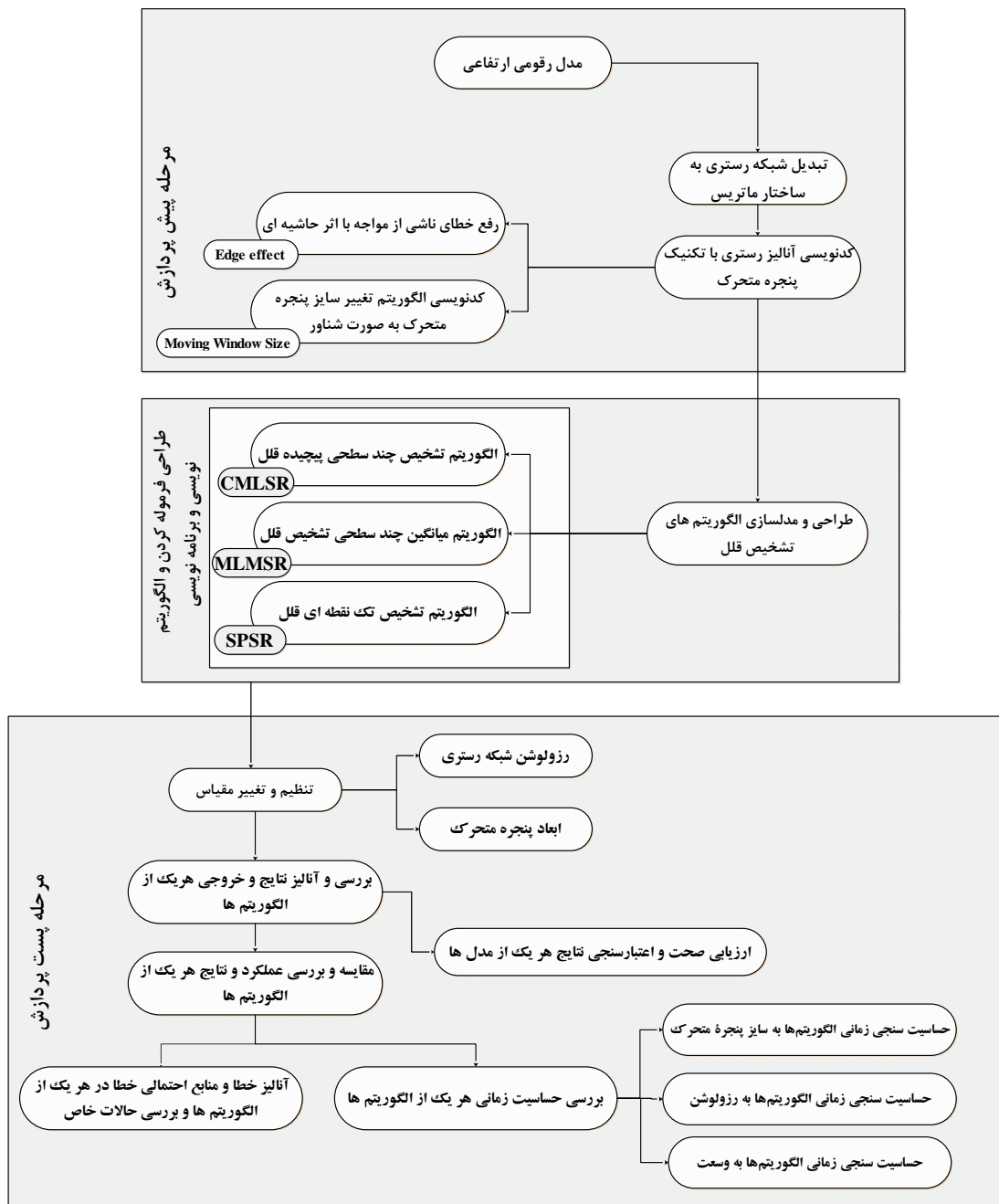
است (۴۷). مدل رقومی ارتفاعی در محیط کدنویسی پایتون به ساختار ماتریسی تبدیل شد. سپس ساختار آنالیز رستری با استفاده از تکنیک پنجره متحرک پیاده‌سازی گردید. الگوریتم پنجره متحرک به صورتی کدنویسی شد که ابعاد پنجره متحرک به صورت آزاد قابل تعیین و تغییر باشد. متناسب با اندازه پنجره متحرک، الگوریتم مواجهه با اثر حاشیه‌ای (Edge Effect) کدنویسی گردید تا تصحیح و سازماندهی اثر حاشیه‌ای متناسب با اندازه پنجره متحرک، به صورت خودکار انجام گیرد. در گام بعدی سه الگوریتم تشخیص درجه شباهت به قتل در ساختارهای شبکه رستری تک باندها با استفاده از مدل‌سازی الگوهای کرنلی انجام گرفت. هر سه الگوریتم قابلیت انطباق با تغییرات اندازه پنجره متحرک را داراست که از نقاط قوت این سه الگوریتم به حساب می‌آید. ابعاد سلول‌های شبکه رستری و اندازه پنجره متحرک، فاکتورهای تغییر مقیاس در هر یک از این سه الگوریتم هستند. در نهایت حساسیت‌سنجی زمانی هر یک از این سه الگوریتم به نسبت تغییرات اندازه پنجره متحرک، تغییرات دقت مکانی شبکه رستری و تغییرات وسعت شبکه رستری انجام گرفت. شکل ۱ مراحل انجام پژوهش را به صورت خلاصه نمایش می‌دهد.

زمانی الگوریتم‌ها به پردازش‌های ماشینی کمتر توجه شده است.

در این پژوهش با استفاده از الگوریتم‌های پایه‌ای آنالیز رستری و کدنویسی، روش‌ها و الگوریتم‌های جدیدی در تشخیص خودکار عوارض زمین ارائه گردیده‌است. همچنین آنالیزهای رستری از نوع کانونی (Focal) مورد تأکید قرار گرفته است و از تکنیک پنجره متحرک به منظور پیاده‌سازی الگوریتم‌ها استفاده شده است. مواجهه با چالش مقیاس، آنالیز حساسیت و پاسخ الگوریتم‌ها به تغییرات ورودی و نیز ارزیابی صحت نیز از جنبه‌های دیگری است که در این پژوهش به آن پرداخته شده است.

روش تحقیق

در این پژوهش از داده‌های ارتفاعی سطحی (DSM) منتشر شده توسط آژانس فضایی ژاپن در ماه می و اکتبر ۲۰۱۵ با رزولوشن افقی در حدود ۳۰ متر برای بررسی توپوگرافی منطقه، مورد استفاده قرار گرفت. این داده‌ها از تصاویر ماهواره ALOS به دست آمده است (۴۸). این پایگاه بر اساس داده‌های DSM (نسخه شبکه ۵ متری) توپوگرافی سه بعدی از جمله دقیق‌ترین داده‌های ارتفاعی در مقیاس جهانی به دست آمده



شکل ۱. نمودار گردشگری مسیر مفهومی پژوهش

Fig. 1. Flowchart diagram of the conceptual path of research

تبدیل شبکه‌های رستری به ساختار ماتریسی (data model) زبان برنامه‌نویسی پایتون بوده که در راستای تبدیل شبکه‌های رستری به ساختارهای ماتریسی از این نوع مدل داده استفاده شد.

تبدیل شبکه رستری به ساختار ماتریسی شبکه‌های رستری بایستی به منظور آنالیزهای ماشینی به ساختارهای ماتریسی تبدیل گردند. شبیه‌ترین مدل مجموعه‌ای داده (Data collection model) به ماتریس‌ها در زبان برنامه‌نویسی پایتون لیست‌ها هستند. لیست‌ها مدل داده استاندارد (Standard data model) و درون ساخت Built-in

آنالیز شبکه رستری با ساختار ماتریسی

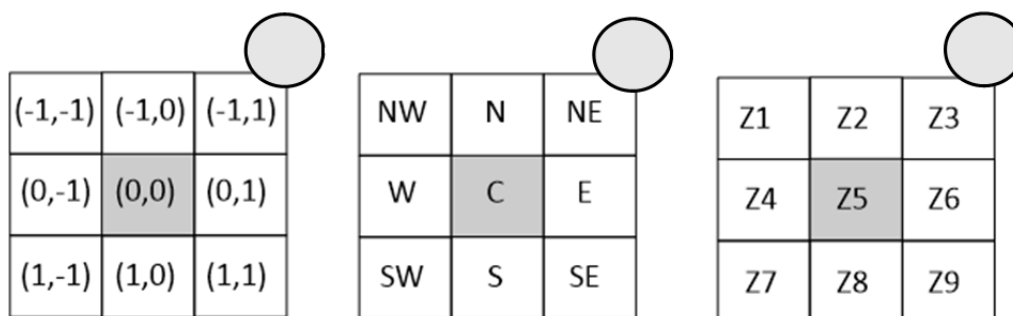
در سیستم اطلاعات جغرافیایی چهار حالت کلی برای آنالیز شبکه‌های رستری وجود دارد که شامل آنالیزهای محلی، کانونی، منطقه‌ای و سراسری می‌شوند (۸). یکی از رایج‌ترین تکنیک‌های مورد استفاده در آنالیزهای کانونی، تکنیک پنجره متحرک (Moving Window) است. در این پژوهش از این تکنیک استفاده شده است.

تعریف پنجره متحرک

اگر پنجره متحرک را mw و تعداد سطر و ستون آن را (r,c) در نظر بگیریم، پنجره متحرک مربعی با سطر و ستون فرد در فرد دارای تعریف ریاضی مطابق با رابطه ۱ است.

$$mw_{(r,c)} \Rightarrow \begin{cases} (r \bmod 2) \neq 0 \\ (c \bmod 2) \neq 0 \\ r = c \text{ and } r,c > 2 \end{cases} \quad [1]$$

در این رابطه؛ r تعداد ردیف‌های پنجره متحرک و c تعداد ستون‌های آن است. شروط $r \bmod 2$ و $c \bmod 2$ نامساوی صفر، به ترتیب فرد بودن تعداد سطر و ستون پنجره را مدنظر دارد. در صورتی که سطر و ستون پنجره متحرک غیر فرد در نظر گرفته می‌شد، تعیین مرکز هندسی آن با مشکل روبه‌رو بود در نهایت شرط $r=c$ برای مربعی بودن پنجره متحرک و $r,c > 2$ تعیین حداقل ابعاد پنجره، یعنی بزرگتر یا مساوی ۳ در ۳ را تعیین می‌کند. بعد از تعریف پنجره متحرک بایستی هر یک از درآیه‌های پنجره‌های متحرک با استفاده از یک سیستم نام‌گذاری یا کدگذاری تعیین حدود گردند. روش‌های متفاوتی در آدرس‌دهی به درآیه‌های پنجره‌های متحرک وجود دارد که در شکل ۲ چند نمونه از آن نشان داده شده‌اند. در این پژوهش از روش کدگذاری مختصاتی با مبدأ مرکزی استفاده شده است.



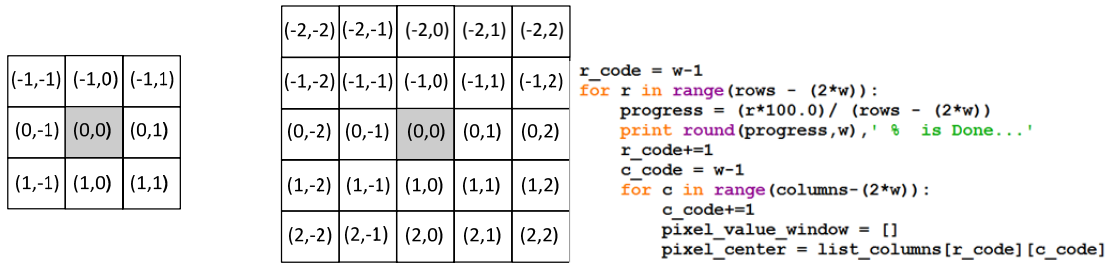
شکل ۲. روش‌های آدرس‌دهی مکانی به درآیه‌های پنجره‌های متحرک الف) روش کدگذاری سطری، ب) روش کدگذاری

جغرافیایی ج) روش کدگذاری مختصاتی (با مبدأ مرکزی)

Fig. 2. Spatial addressing methods for moving window frames a) Line coding method, b) Geographic coding method c) Coordinate coding method (with central origin)

متحرک را با هر عدد صحیح فرد مثبت غیر ۱ بازسازی کند. بخشی از قطعه کد تهیه شده برای اجرای این الگوریتم در شکل ۳ ملاحظه می‌شود.

الگوریتم شناور تغییر مقیاس با تغییر اندازه پنجره متحرک برای انعطاف بیشتر در مدل‌سازی الگوهای کرنلی، اندازه پنجره متحرک در روند اجرا با یک الگوریتم خودکار کامپیوتری بهینه‌سازی شد. این الگوریتم می‌تواند اندازه پنجره



شکل ۳. استخراج ایندکس پنجره متحرک متناسب با اندازه پنجره متحرک

Fig. 3. Extract the moving window index to related to the size of the kernel

چپ و راست شبکه رستری تحت تأثیر اثر حاشیه‌ای قرار می‌گیرند.

طراحی الگوریتم‌های تشخیص قتل با استفاده از آنالیز مکانی الگوهای کرنلی

در ادامه، الگوهای مکانی کرنل‌ها با استفاده از سه مدل مختلف، مدل‌سازی، الگوریتم‌سازی و اجرا گردید. این سه مدل که در تشخیص قتل قابل استفاده می‌باشند، شامل مدل‌های MLMSR یا میانگین چندسطحی و CMLSR یا تشخیص چندسطحی پیچیده و SPSR یا تشخیص تک‌نقطه‌ای قتل $p(r,c)$ الگوریتم هر یک از این سه مدل به طور تفصیلی شرح داده می‌شود:

الگوریتم میانگین چند سطحی تشخیص قتل (MLMSR)

در این الگوریتم پنجره متحرک با ابعاد فرد در فرد در نظر گرفته شده و با توجه به ابعاد پنجره متحرک، تعداد سطوح (L) با استفاده از رابطه ۳ محاسبه شد. نحوه سطح‌بندی و پیکربندی پنجره متحرک در این الگوریتم در شکل ۴ نشان داده شده است.

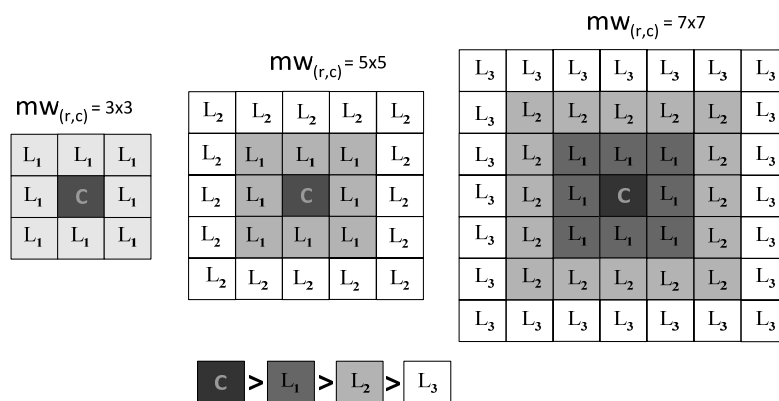
مواجهه با اثر حاشیه‌ای متناسب با اندازه پنجره متحرک

در آنالیزهای رستری که از تکنیک پنجره متحرک استفاده می‌کنند، بخشی از حاشیه ساختارهای رستری بسته با ابعاد پنجره متحرک درگیر اثر حاشیه‌ای می‌گردد. در کدنویسی الگوریتم‌های وابسته به پنجره متحرک بایستی توجه گردد. رابطه ۲ اثر حاشیه‌ای ایجاد شده به نسبت ابعاد سطر و ستون پنجره متحرک را نشان می‌دهد.

[۲]

$$\left\{ \begin{array}{l} r_{up} = \frac{(mw_r - 1)}{2}, r_{down} = \frac{(mw_r - 1)}{2}, r_{Total} = mw_r - 1 \\ c_{up} = \frac{(mw_c - 1)}{2}, c_{down} = \frac{(mw_c - 1)}{2}, c_{Total} = mw_c - 1 \end{array} \right.$$

در این رابطه؛ $EE.mw(r,c)$ اثر حاشیه‌ای است که برای پنجره متحرک mw با اندازه سطر و ستون (r,c) ایجاد می‌شود. r_{up} و r_{down} به ترتیب تعداد سطرهایی است که در بالا و پائین شبکه رستری تحت تأثیر اثر حاشیه‌ای قرار می‌گیرند. به همین ترتیب c_{down} و c_{up} تعداد ستون‌هایی است که در سمت



شکل ۴. نحوه سطح بندی پیکسل ها در الگوریتم میانگین چند سطحی تشخیص قله (Multi-Level Mean Summit Recognition, MLMSR)

Fig. 4. Leveling pixels in multi-level mean summit recognition (MLMSR) algorithm

دست آمد به طوری که تعداد پیکسل هایی که در سطح i -ام قرار گرفته اند یا $|L_i|$ از رابطه $i \times 8$ به دست می آید. حال اگر متوسط ارزش پیکسلی هر سطح از متوسط ارزش پیکسلی سطح بعد از خود بیشتر باشد به مقدار m یک واحد اضافه خواهد شد و کل حالات محتمل در هر پنجره متحرک یا n برابر با تعداد سطوح یا L است. سپس با استفاده از رابطه ۴ درصد شباهت به عارضه قله به دست آمد.

[۳]

$$mw_{(r,c)} = \begin{cases} L = \left\lfloor \frac{(mw_{(r,c)} - 1)}{2} \right\rfloor & (r \bmod c) \neq 0 ; r = c ; (r,c) \geq 3 \\ P_{L_i} \mid i \in \mathbb{Z} ; i \geq 1 \\ \text{if } \left(\frac{\sum_{i=1}^L P_{L_i}}{|L_i|} > \frac{\sum_{i=2}^L P_{L_{i+1}}}{|L_{i+1}|} \right) \Rightarrow m+ = 1 \\ n = L \end{cases}$$

$$S.S_{MLMSR} = \left(\frac{m}{n} \right) \times 100 \quad [4]$$

در این رابطه؛ $S.S_{MLMSR}$ درصد شباهت به عارضه قله و خط الرأس بر اساس الگوریتم طراحی شده MLMSR است به طوری که m, n با استفاده از رابطه ۳ محاسبه می شوند. الگوریتم پیشنهادی MLMSR توسط زبان برنامه نویسی پایتون پیاده سازی شد در شکل ۵ قطعه ای از کدهای مربوطه نشان داده شده است.

در این رابطه؛ L تعداد سطوح بر اساس ابعاد پنجره متحرک $mw_{(r,c)}$ است. برای محاسبه تعداد سطوح از رابطه $\frac{(mw_{(r,c)}-1)}{2}$ استفاده شد که متناسب با اندازه پنجره متحرک محاسبه می شود. سه شرط در این رابطه وجود دارد یکی فرد در فرد بودن ابعاد پنجره متحرک و دیگر آنکه اندازه سطری و ستونی پنجره متحرک با هم برابر بوده (مربعی بودن پنجره متحرک و داشتن مرکز هندسی) و دیگری حداقل اندازه سطر و ستونی پنجره متحرک بزرگتر و یا مساوی ۳ باشد. P_{L_i} پیکسل-هایی که در سطح L قرار گرفته و با ایندکس i -ام نامگذاری شده اند. با توجه به توضیحات فوق متوسط ارزش پیکسلی (Z -value - Pixel Value) هر سطح از طریق رابطه $\frac{\sum_{i=1}^L P_{L_i}}{|L_i|}$ به

```
def MLMSR(winsize,DEM,inPutRaster,outputRaster):
    headerOrganizer(winsize,inPutRaster,outputRaster)
    rows = DEM.shape[0]
    columns = DEM.shape[1]
    bigWindow = []
    for winsize in range(3,winsize+2,2):
        windowIndexList = []
        for i in range(-1*((winsize-1)/2),((winsize-1)/2)+1):
            for j in range(-1*((winsize-1)/2),((winsize-1)/2)+1):
                windowIndexList.append([i,j])
        bigWindow.append(windowIndexList)
    bigWindow_new = []
    for Levels in range(1,len(bigWindow)):
        Levels = Levels*-1
        listNew = []
        for i in bigWindow[Levels]:
            if i not in bigWindow[Levels-1]:
                listNew.append(i)
        bigWindow_new.append(listNew)
```

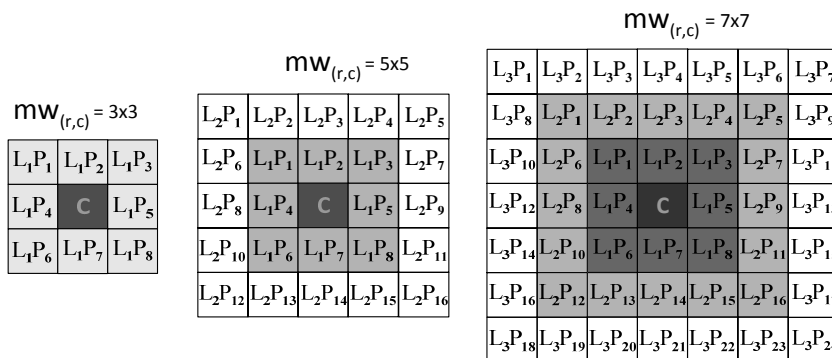
شکل ۵. بخشی از کدهای اجرایی الگوریتم پیشنهادی MLMSR

Fig. 5. Part of Python Code related to the MLMSR suggested algorithm

می‌گردد که از L_1 تا L_i متناسب با اندازه پنجره متحرک تغییر می‌کند. شکل ۶ نحوه سطح‌بندی و توزیع پیکسل‌های هر سطح در این الگوریتم را نشان می‌دهد.

الگوریتم تشخیص چند سطحی پیچیده قتل (CMLSR)

در این نوع الگوریتم که تا حدودی به الگوریتم (Complex Multi-Level Summit Recognition, MLMSR) شباهت دارد، تعداد سطوح بر اساس ابعاد پنجره متحرک تعیین



شکل ۶. نحوه سطح‌بندی و توزیع پیکسل‌های هر سطح در الگوریتم تشخیص چند سطحی پیچیده قتل

Fig. 6. leveling and distributing pixels on the levels in Complex Multi-level summit recognition

$$mw_{(r,c)} = \begin{cases} L = \frac{(mw_{(r,c)} - 1)}{2} \left\{ (r \bmod 2 \neq 0) \text{ and } (c \bmod 2 \neq 0), r = c \right. \\ |P_{L_i}| = (i \times 8) \\ m = \sum_{i,j=1}^{|L_i|} L_i P_j > L_{i+1} P_{j+1} \\ n = \sum_{i=1}^L |L_i| \times |L_{i+1}| \end{cases}$$

[۵]

در مرحله بعد، مقدار عددی هر پیکسل که در سطح L_i قرار گرفته با تمامی پیکسل‌هایی که در سطح بعدی یا L_{i+1} قرار گرفته به صورت زوجی مقایسه شده و در صورتی که دارای ارزش ارتفاعی (Z-value) بیشتری باشد به مقدار m یک واحد اضافه می‌شود رابطه ۵ این شرایط را به زبان ریاضی بیان می‌کند.

است محاسبه کرده و معادل n در نظر گرفته شد. بعد از محاسبه مقدار عددی m, n که از رابطه ۵ محاسبه شده‌اند به کمک رابطه ۶، درصد شباهت به عارضه قله و خط الرأس محاسبه شد.

$$S.S_{CMLSR} = \left(\frac{m}{n}\right) \times 100 \quad [6]$$

در این رابطه؛ $S.S_{CMLSR}$ درصد شباهت به عارضه قله بر اساس الگوریتم CMLSR است. الگوریتم پیشنهادی CMLSR توسط زبان برنامه‌نویسی پایتون پیاده‌سازی شد در شکل ۷ قطعه‌ای از کدهای مربوطه نشان داده شده است.

```
def CMLSR(winsize, DEM, inPutRaster, outputRaster):
    headerOrganizer(winsize, inPutRaster, outputRaster)
    rows = DEM.shape[0]
    columns = DEM.shape[1]
    bigWindow = []
    for winsize in range(3, winsize+2, 2):
        windowIndexList = []
        for i in range(-1 * ((winsize-1)/2), ((winsize-1)/2)+1):
            for j in range(-1 * ((winsize-1)/2), ((winsize-1)/2)+1):
                windowIndexList.append([i, j])
            bigWindow.append(windowIndexList)
        bigWindow_new = []
        for Levels in range(1, len(bigWindow)):
            Levels = Levels*1
            listNew = []
            for i in bigWindow[Levels]:
                if i not in bigWindow[Levels-1]:
                    listNew.append(i)
            bigWindow_new.append(listNew)
        bigWindow_new.append([[ -1, -1], [-1, 0], [-1, 1], [0, -1], [0, 1], [1, -1], [1, 0], [1, 1]])
        bigWindow_new.append([[0, 0]])
        rows = DEM.shape[0]
        columns = DEM.shape[1]
        r code = ((winsize-1)/2)-1
```

شکل ۷. بخشی از کدهای اجرایی الگوریتم پیشنهادی CMLSR

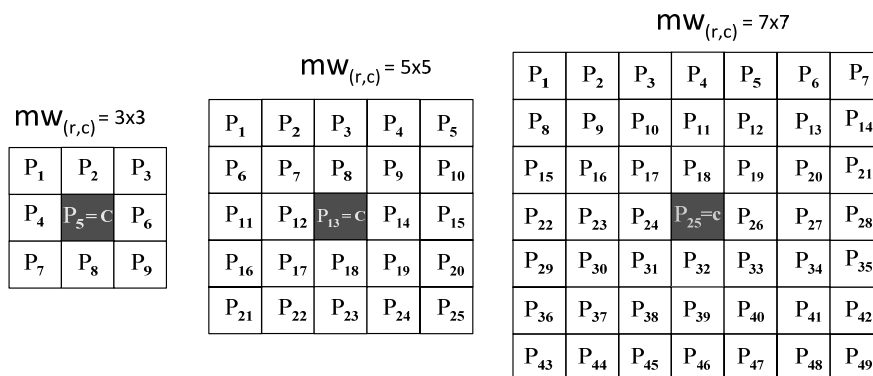
Fig. 7. Part of Python Code related to the CMLSR suggested algorithm

ارزش پیکسل مرکزی مقدار ارتفاعی بیشتری را دارا باشد به مقدار m یک واحد اضافه خواهد شد. شکل ۸ نحوه توزیع پیکسل‌ها در الگوریتم تشخیص تک‌نقطه‌ای قله را نشان می‌دهد.

در این رابطه؛ L تعداد سطوح واقع شده در یک پنجره متحرک با ابعاد I, C است و I, C هر دو اعدادی فرد و برابر هستند. P_{L_i} مجموعه پیکسل‌هایی است که در سطح L_i قرار گرفته‌اند. برای محاسبه m تمامی حالاتی در نظر گرفته می‌شود که پیکسل‌های موجود در سطح L_i که با P_j نمایش داده می‌شوند، با تمامی پیکسل‌های موجود در سطح L_{i+1} که با P_{j+1} نمایش داده می‌شوند، به صورت دو به دو مقایسه شده و در صورتی که ارزش بیشتری داشته باشند به مقدار m یک واحد اضافه خواهد شد. n تعداد کل حالات ممکن در مقایسه دو به دو است. بدین منظور مجموع ضرب تعداد اعضای مجموعه L_i را که با $|L_i|$ نشان داده شده در تعداد اعضای مجموعه سطح بعدی یا L_{i+1} که با $|L_{i+1}|$ نمایش داده شده

الگوریتم تشخیص تک نقطه ای قله

در الگوریتم تشخیص تک نقطه ای قله (Single Point Summit Recognition, SPSR)، سطح‌بندی وجود نداشته و تمامی پیکسل‌های موجود در پنجره متحرک mw با ابعاد سطر و ستونی I, C به طور زوجی مقایسه شده و در صورتی که



شکل ۸. نحوه توزیع پیکسل‌ها در الگوریتم تشخیص تک‌نقطه‌ای قتل (SPSR)

Fig. 8. How to distribute the pixels in the single-point summit recognition algorithm

ستون پنجره متحرک منهای یک واحد است. بعد از محاسبه مقدار m و n با استفاده از رابطه ۸ درصد شباهت به عارضه قله و خط‌الرأس بر اساس الگوریتم تشخیص تک‌نقطه‌ای قتل (SPSR) به دست آمد.

$$S.S_{SPSR} = \left(\frac{m}{n}\right) \times 100 \quad [A]$$

الگوریتم پیشنهادی SPSR توسط زبان برنامه‌نویسی پایتون پیاده‌سازی شد. در شکل ۹ قطعه‌ای از کدهای مربوطه نشان داده شده است.

الگوریتم تشخیص تک‌نقطه‌ای قتل با استفاده از رابطه ۷ پیاده‌سازی و با نماد ریاضی نشان داده شده است.

$$mw_{(r,c)} = \begin{cases} m = \sum_{i=1}^n C > P_i \\ n = (r \times c) - 1 \end{cases} \quad [V]$$

در این رابطه در صورتی که ارزش ارتفاعی پیکسل مرکزی (C) در هر زوج مقایسه بیشتر از ارزش ارتفاعی سایر پیکسل‌های پنجره متحرک با ابعاد سطر و ستونی (r, c) باشد، یک واحد به مقدار m اضافه می‌شود. تعداد کل حالات مقایسه‌ای محتمل (n) برابر با ضرب تعداد سطر و

```
def SPSR(winsizes, DEM, inPutRaster, outputRaster):
    headerOrganizer(winsizes, inPutRaster, outputRaster)
    rows = DEM.shape[0]
    columns = DEM.shape[1]
    winIndex = indexGenerator(winsizes)
    r_code = (winsizes-1)/2-1
    for r in range(rows-(winsizes-1)):
        r_code += 1
        c_code = (winsizes-1)/2-1
        for c in range(columns-(winsizes-1)):
            c_code += 1
            winValue = []
            for pixels in winIndex:
                winValue.append(DEM[r_code+pixels[0], c_code+pixels[1]])
            # SPSR Algorithm
            counter = 0.0
            for i in winValue:
                if i != DEM[r_code, c_code]:
                    if DEM[r_code, c_code] > i:
                        counter += 1
            SPSRValue = (counter/((winsizes*winsizes)-1))*100.0
            outputRaster.write(str(SPSRValue)+' ')
```

شکل ۹. بخشی از کدهای اجرایی الگوریتم پیشنهادی SPSR

Fig 9. Part of Python Code related to the SPSR suggested algorithm

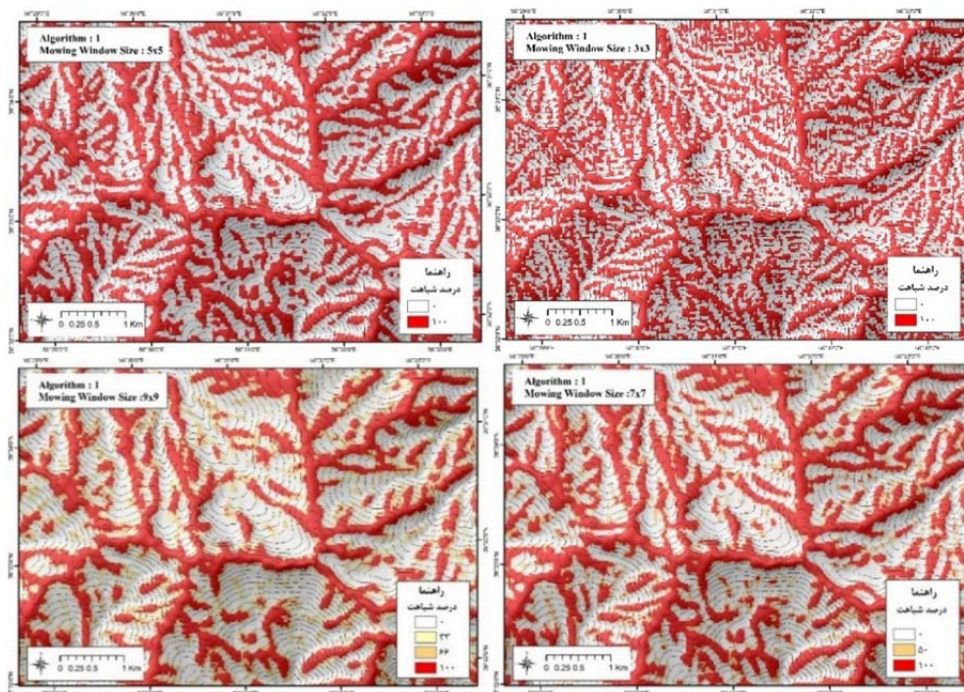
شد تا نتایج به صورت فایل‌های برداری نقطه‌ای تهیه و فرآوری گردند.

نتایج و بحث

الگوریتم‌های سه‌گانه مطرح شده به طور نمونه بر روی مدل رقومی ارتفاعی اجرا شد که نتایج آن در شکل‌های ۱۰ تا ۱۲ نشان داده شده است. هر یک از الگوریتم‌ها بر روی پنجره‌های متحرک با ابعاد ۳، ۵، ۷، و ۹ اجرا شده‌اند.

بردارسازی (Vectorize) نتایج الگوریتم‌ها و استخراج نقطه‌ای قله

در مرحله نهایی با استفاده از یک آستانه عددی بر روی مقدار S.S که توسط هر یک از الگوریتم‌های سه‌گانه، محاسبه شده‌اند، عملیات برداری‌سازی نقطه‌ای انجام گرفت. این بخش با استفاده از زبان برنامه‌نویسی پایتون پیاده‌سازی و برنامه‌نویسی

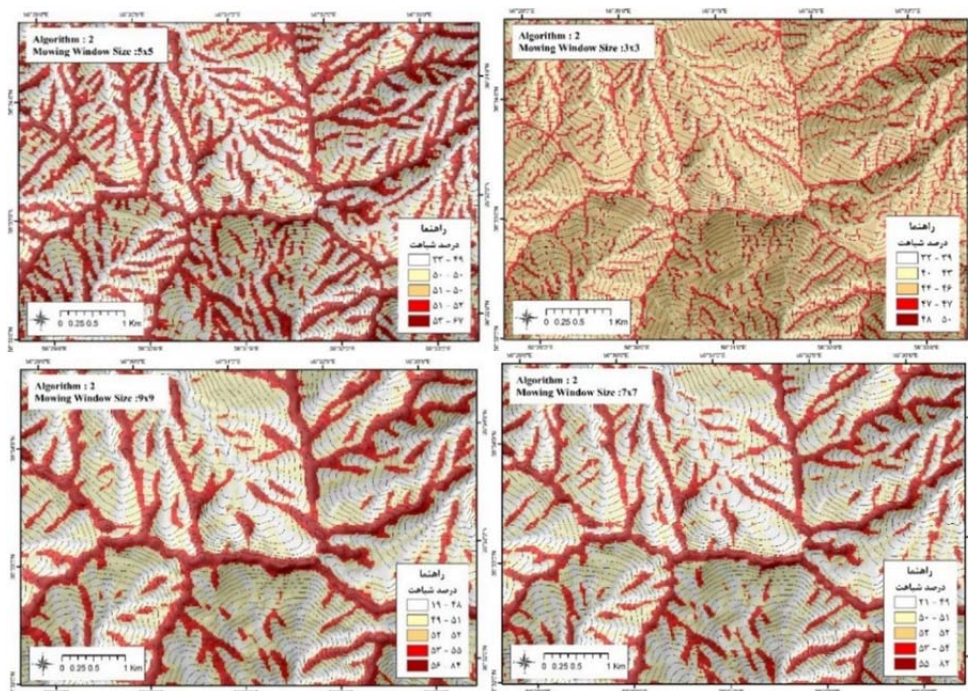


شکل ۱۰. نتایج خروجی الگوریتم MLMSR

Fig. 10. The results of MLMSR algorithm

حدودی ۷ پیکسلی، نتایج، تمایل به تفکیک باینری داشته ولی از ابعاد ۷ پیکسل به بالاتر شروع به تغییر کرده و هر قدر ابعاد پنجره متحرک بزرگ‌تر می‌شود، مقیاس کلی‌سازی و تفکیک غیر باینریک، افزایش می‌یابد.

نتایج خروجی الگوریتم MLMSR در ابعاد پنجره متحرک کوچک‌تر، تمایل به تفکیک باینری داشته و استدرج کمتری در نتایج دیده می‌شود که البته با افزایش اندازه پنجره متحرک این وضعیت بهبود می‌یابد. در پنجره‌های متحرک ۳، ۵ و تا

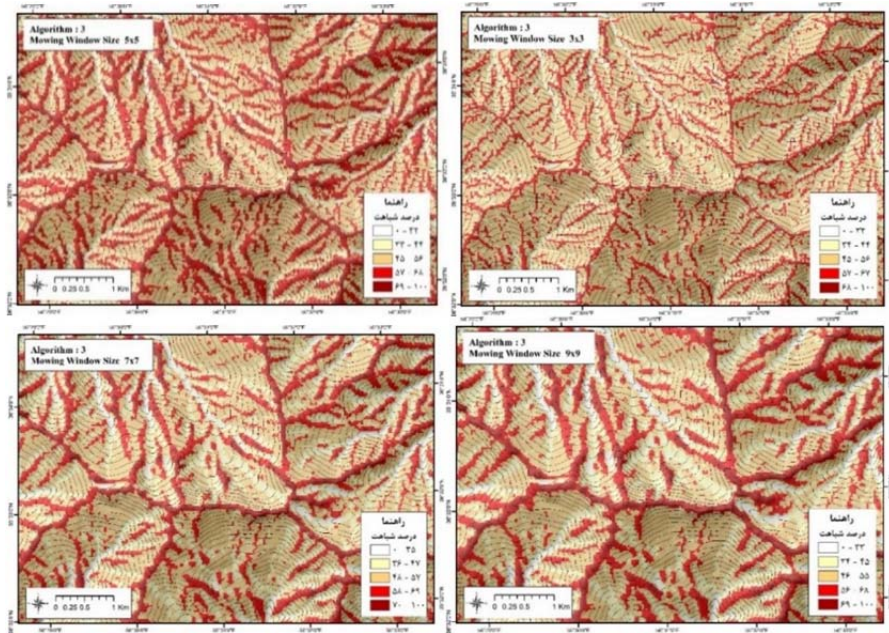


شکل ۱۱. نتایج خروجی الگوریتم CMLSR

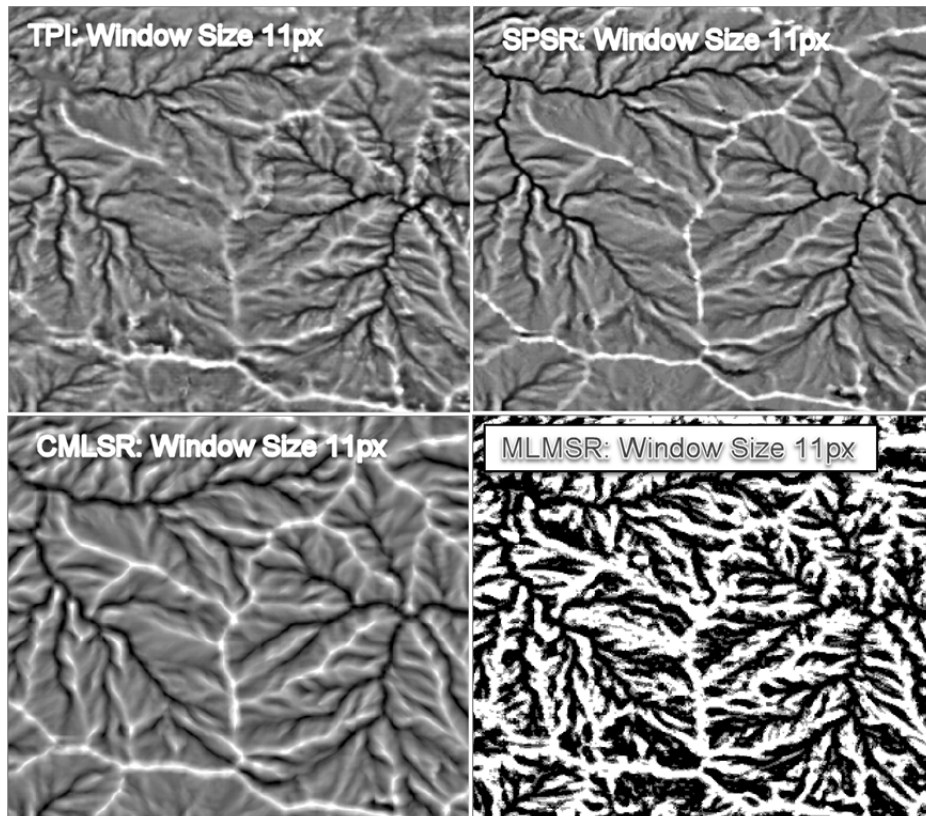
Fig. 11. The results of CMLSR algorithm

بوده، تصویر خروجی، حالت غیر باینری داشته و در تفکیکی عوارض، عملکرد خوبی از خود نشان داده است. افزایش ابعاد پنجره متحرک منجر به درجه کلی سازی یا جنرالیزاسیون شده و نتایج از نرمی و تطابق بصری با منحنی های تراز به دست آمده از مدل رقومی ارتفاعی برخوردار است. به لحاظ مفهومی الگوریتم *TPI* بیشترین شباهت را به مدل های پیشنهادی دارد در نتیجه نتایج به دست آمده از سه مدل پیشنهادی در این پژوهش با مدل *TPI* مقایسه می شوند. به طوری که در شکل ۱۳ نشان داده شده است، مدل پیشنهادی *SPSR* و به خصوص *CMLSR* عملکرد بصری بهتری به نسبت مدل *TPI* نشان می دهد. مدل *MLMSR* دارای الگوی تشخیصی و بافت متفاوتی است و در کل عملکرد بصری ضعیف تری به نسبت *TPI* و مدل های *SPSR* و *CMLSR* نشان می دهد.

نتایج خروجی الگوریتم *CMLSR* که در شکل ۱۱ ملاحظه شد، تقریباً در تمامی ابعاد پنجره متحرک، تفکیک غیر باینری داشته و بر خلاف مدل *MLMSR* تفکیک تدریجی در نتایج آن به خوبی ملاحظه می گردد. به طور مشابه با افزایش ابعاد پنجره متحرک، درجه جنرالیزاسیون نتایج افزایش می یابد. از لحاظ بصری و گرافیکی نتایج قابل قبول داشته و از همواری و تطابق بصری با وضعیت و فرم منحنی های تراز به دست آمده از مدل رقومی ارتفاعی برخوردار است. نتایج این الگوریتم از ظرافت بیشتری نسبت به الگوریتم *MLMSR* برخوردار بوده و نسبت به مدل *MLMSR* از لحاظ نمایشی و گرافیکی عملکرد بهتری از خود نشان می دهد. در ضمن به دلیل استدرج بهتر مقادیر در نتایج خروجی این مدل، طبقه بندی و نمایش کارتوگرافیکی عملکرد بهتری دارد. نتایج الگوریتم *SPSR* تا حدودی شبیه به الگوریتم *CMLSR* است. درجه استدرج، قابل قبول و مناسب



شکل ۱۲. نتایج خروجی الگوریتم SPSR
 Fig 12. The results of SPSR algorithm



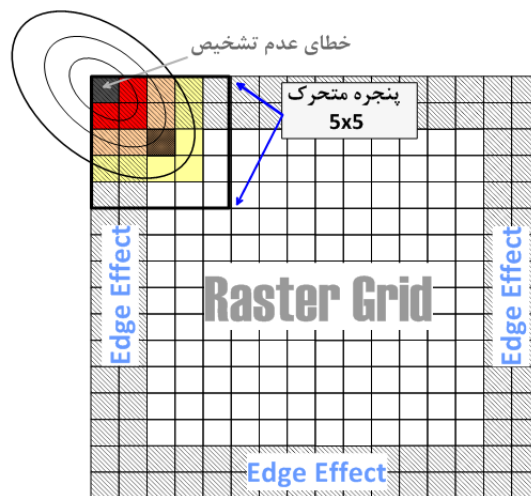
شکل ۱۳. مقایسه مدل‌های پیشنهادی با مدل TPI
 Fig 13. Comparing the results of suggested models with TPI

بررسی منابع خطا و حالات خاص

منابع خطا در سه بخش خطای ناشی از اثر حاشیه‌ای پنجره متحرک، خطای ناشی از ابعاد پنجره متحرک و موقعیت محلی آن در سطوح توپوگرافیک و در نهایت خطای ناشی از برداری‌سازی نتایج و تبدیل به الگوهای نقطه‌ای مورد توجه قرار گرفته که در ادامه به بررسی این منابع و حالات خاص آن در عملکرد سه الگوریتم پیشنهادی پرداخته می‌شود.

خطای ناشی از Ignore کردن اثر حاشیه‌ای

این نوع خطا زمانی اتفاق خواهد افتاد که قله در حاشیه شبکه رستری قرار گرفته باشد و با توجه به ابعاد پنجره متحرک می‌تواند از برد تشخیصی الگوریتم‌ها خارج شده و باعث خطای عدم تشخیص این عارضه در موقعیت حاشیه‌ای شبکه رستری گردد. شکل ۱۴ به طور مفهومی این نوع خطا را نشان می‌دهد.



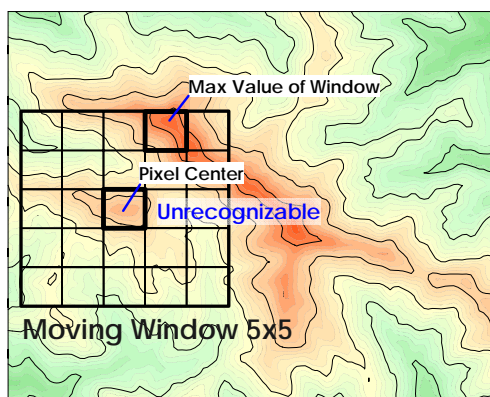
شکل ۱۴. خطای ناشی از Ignore کردن اثر حاشیه‌ای در تکنیک آنالیز رستری با استفاده از پنجره متحرک

Fig. 14. Error resulting from ignoring the edge effect in the raster analysis technique, which is using moving window

خطای ناشی از الگوی کرنل

با توجه به الگوی قرار گرفته در هر فریم کرنل، بعضی مواقع ممکن است یک یا چند قله در محدوده پردازشی پنجره متحرک قرار بگیرد که در آن صورت می‌تواند باعث ایجاد خطای تشخیصی در الگوریتم حامل پنجره متحرک گردد. در صورتی که قله یا قله قرار گرفته در محدوده پردازش پنجره متحرک، بزرگ‌تر از قله قرار گرفته در مرکز پنجره باشد، در

نتیجه خطای ناشی از الگوی کرنل ایجاد خواهد شد. شکل ۱۵ نمونه‌ای از این نوع خطا را نشان می‌دهد. این نوع خطا، به شدت وابسته به ابعاد پنجره متحرک است. در ابعاد کوچک‌تر معمولاً این خطا پیش نخواهد آمد اما در ابعاد بزرگ‌تر این نوع خطا افزایش می‌یابد.

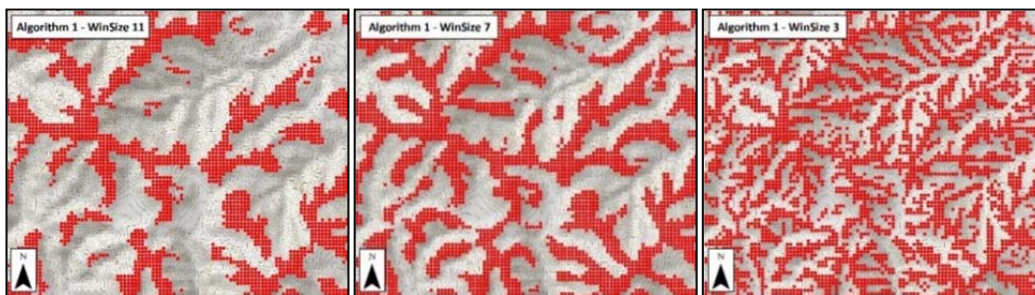


شکل ۱۵. خطای ناشی از الگوی محلی واقع شده در محدوده کرنل

Fig. 15. Error due to the local pattern located inside the kernel

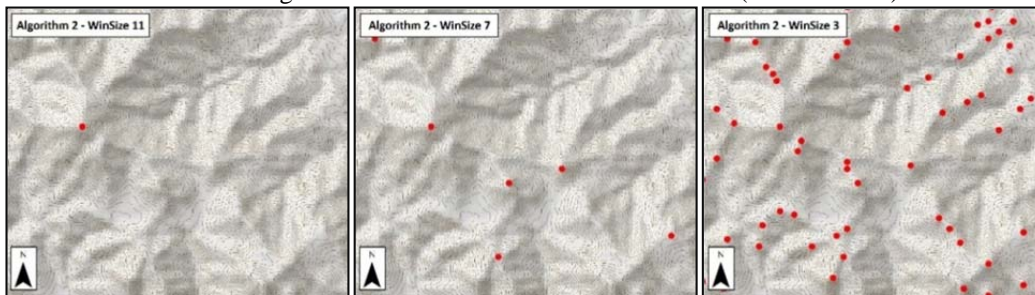
مناسبی نداشته ولی الگوریتم CMLSR و SPSR در این زمینه عملکرد بهتری از خود نشان می‌دهند (شکل‌های ۱۷ و ۱۸). بین الگوریتم CMLSR و SPSR، الگوریتم SPSR عملکرد بهتری از خود نشان می‌دهد. الگوریتم CMLSR با افزایش اندازه پنجره متحرک، سختگیرانه‌تر در تشخیص قله عمل نموده و در نتیجه با تراکم کمتری لایه نقطه‌ای قله را استخراج می‌کند.

ارزیابی خطای ناشی از برداری‌سازی نقطه‌ای قله نتایج خروجی هر یک از الگوریتم‌های سه‌گانه به ساختار برداری با توپولوژی نقطه‌ای تبدیل گردید. آستانه این نوع تبدیل به ساختار برداری (Threshold of Vectorization) شباهت (S.S) ۱۰۰ درصد در نظر گرفته شد. نتایج در شکل ۱۶ نمایش داده شده است که برای پنجره متحرک با ابعاد ۳، ۷ و ۱۱ پیکسل تهیه گردیده‌اند. به طوری که در شکل ۱۶ مشخص است، الگوریتم MLMSR برای استخراج نقطه‌ای قله عملکرد



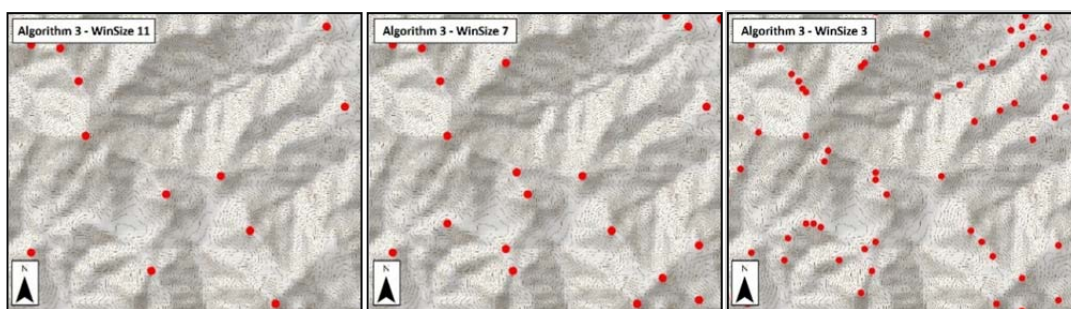
شکل ۱۶. برداری‌سازی نتایج الگوریتم MLMSR (تبدیل به نقطه)

Fig. 16. Vectorization of the MLMSR results (Create Points)



شکل ۱۷. برداری‌سازی نتایج الگوریتم CMLSR (تبدیل به نقطه)

Fig. 17. Vectorization of the CMLSR results (Create Points)



شکل ۱۸. برداری سازی نتایج الگوریتم SPSR (تبدیل به نقطه)

Fig. 18. Vectorization of the SPSR results (Create Points)

آنالیز حساسیت زمانی الگوریتم‌ها

در این بخش، حساسیت هر یک از مدل‌ها و الگوریتم‌های ارائه شده به متغیرهای ورودی سنجیده و بررسی می‌گردد. تا از این طریق عملکرد هر یک از مدل‌ها آنالیز و بررسی گردد. حساسیت سنجی هر یک از مدل‌ها که شامل حساسیت زمان اجرای هر یک از مدل‌ها به تغییرات ابعاد پنجره متحرک، قدرت تفکیک مکانی لایه رستری ورودی و وسعت محدوده مورد پردازش است در سه بخش مورد بررسی قرار گرفت.

حساسیت زمانی الگوریتم‌ها به اندازه پنجره متحرک

به منظور بررسی کارایی هر یک از سه الگوریتم ارائه شده در این پژوهش، ۵۰ مدل رقومی ارتفاعی از مناطق مختلف و با شرایط توپوگرافیک محلی متفاوت انتخاب شد و برای هر یک از این فایل‌ها ابعاد پنجره متحرک ۳، ۵، ۷ و ۹ پیکسلی انتخاب و هر کدام ۵ بار تکرار شده و مدت زمان اجرای هر الگوریتم به طور متوسط در نظر گرفته شد. نتایج این آنالیز در جدول ۱ نمایش داده شده است.

جدول ۱. حساسیت سنجی زمانی الگوریتم‌ها به ابعاد پنجره متحرک

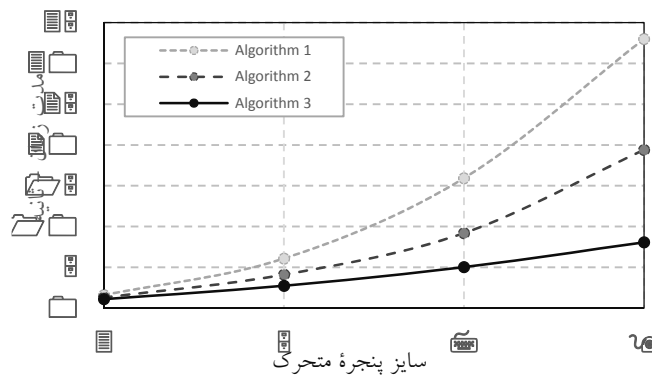
Table 1. Temporal sensitivity of algorithms to the dimensions of the moving window

توضیحات	متوسط زمان اجرا (ثانیه)			اندازه پنجره متحرک
	الگوریتم ۳	الگوریتم ۲	الگوریتم ۱	
	SPSR	CMLSR	MLMSR	
۵۰ فایل مدل رقومی ارتفاعی به عنوان نمونه انتخاب شد.	۱,۱	۱,۲۸۷	۱,۵۹۱	۳
برای هر فایل ابعاد پنجره متحرک ۷,۵,۳ و ۹ در نظر گرفته شد و برای هر اندازه ۵ بار تکرار انجام گردید	۲,۷۳۳	۴,۰۹۶	۶,۰۷۵	۵
	۵,۰۲۱	۹,۱۹۳	۱۵,۹۲۶	۷
	۸,۰۶۴	۱۹,۴	۳۲,۹۹۳	۹

نوع پردازنده‌ای که در این آنالیز مورد استفاده قرار گرفته است Intel Core i7-2630QM CPU- 2.00GHz 2.00GHz است. در ضمن مقدار حافظه موقت سیستم ۸ گیگابایت و از ویندوز ۷ نسخه Ultimate سرویس پک ۱ استفاده شده است.

نسبت الگوریتم‌های MLMSR و CMLSR، شیب بسیار ملایم‌تری دارد. در نتیجه این الگوریتم برای تغییر مقیاس از طریق اندازه پنجره متحرک دارای کارایی بهتری خواهد بود.

نتایج آنالیز زمان اجرای هر یک از الگوریتم‌ها، در شکل‌های ۱۹ تا ۲۱ نشان داده شده است. الگوریتم SPSR از لحاظ اتلاف زمان، کارایی بهتری دارد. به طوری که با افزایش اندازه پنجره متحرک، شیب افزایش زمان اجرای الگوریتم، به



شکل ۱۹. حساسیت زمانی الگوریتم‌های سه گانه به تغییرات ابعاد پنجره متحرک

Fig 19. Time sensitivity of the algorithms to changes in the dimensions of the moving window

حساسیت زمانی الگوریتم‌ها به رزولوشن
در این بخش حساسیت زمان اجرای هر یک از الگوریتم‌ها به تغییرات رزولوشن فایل رستری ورودی بررسی و اندازه‌گیری شد که نتایج آن در جدول ۲ نشان داده شده است.

به طوری که در شکل ۲۰ مشاهده می‌شود، الگوریتم SPSR عملکرد زمانی بهتری به نسبت الگوریتم‌های CMLSR و MLMSR داشته و الگوریتم CMLSR نیز به نسبت الگوریتم MLMSR عملکرد زمانی بهتری دارد. حساسیت زمانی الگوریتم‌های سه گانه به تغییرات رزولوشن تصاعدی بوده و از حدود رزولوشن ۳۰ متر به پائین با شیب تصاعدی زمان اجرای الگوریتم را افزایش می‌دهد.

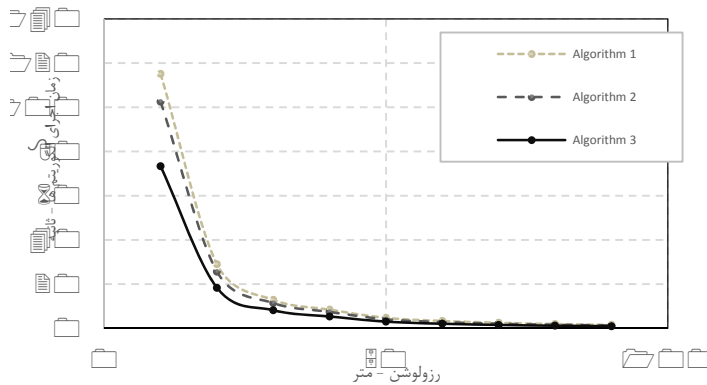
حساسیت زمانی الگوریتم‌ها به رزولوشن
در این بخش حساسیت زمان اجرای هر یک از الگوریتم‌ها به تغییرات رزولوشن فایل رستری ورودی بررسی و اندازه‌گیری شد که نتایج آن در جدول ۲ نشان داده شده است.

به طوری که در شکل ۲۰ مشاهده می‌شود، الگوریتم SPSR عملکرد زمانی بهتری به نسبت الگوریتم‌های CMLSR و MLMSR داشته و الگوریتم CMLSR نیز به نسبت الگوریتم MLMSR عملکرد زمانی بهتری دارد.

جدول ۲. حساسیت سنجی زمانی الگوریتم‌ها به رزولوشن

Table 2. Temporal sensitivity of algorithms to resolution

متوسط زمان اجرا (ثانیه)			رزولوشن - متر
الگوریتم ۳	الگوریتم ۲	الگوریتم ۱	
SPSR	CMLSR	MLMSR	
۷۳,۳۵۲	۱۱۵,۱۳۱	۱۰۲,۵۰۳	۱۰
۱۸,۳۲۴	۲۸,۹۹۲	۲۵,۶۳	۲۰
۸,۱۷۷	۱۲,۸۵۹	۱۱,۴۲۶	۳۰
۵,۳۲۹	۸,۴۱۲	۷,۴۱۲	۴۰
۳,۰۲۶	۴,۷۲۶	۴,۰۶۷	۵۰
۲,۰۴۷	۳,۳۱۴	۲,۸۱۴	۶۰
۱,۵۱۶	۲,۴۹۲	۲,۰۸۸	۷۰
۱,۱۸۹	۱,۹۳۶	۱,۶۰۲	۸۰
۰,۹۲۷	۱,۵۴۲	۱,۲۷۷	۹۰



شکل ۲۰. حساسیت زمانی الگوریتم‌ها به تغییرات رزولوشن شبکه رستری
 Fig 20. Temporal sensitivity of algorithms to changes in raster grid resolution

گردآوری شده‌اند. شکل ۲۱ پاسخ زمانی الگوریتم‌های سه‌گانه به متغیر وسعت شبکه رستری را نشان می‌دهد.

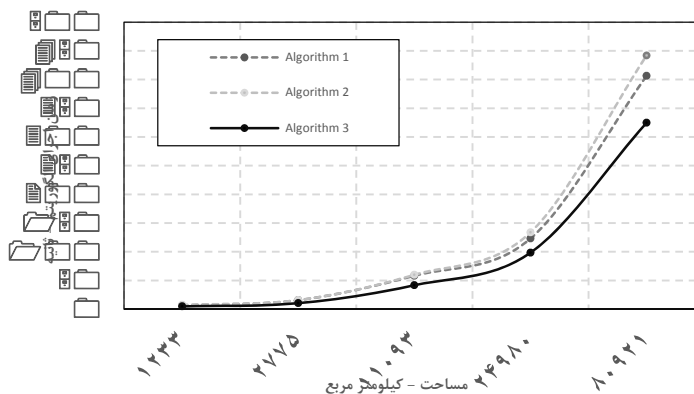
حساسیت زمانی الگوریتم‌ها به وسعت (مساحت شبکه رستری) در بخش دوم از آنالیز حساسیت زمانی، پاسخ زمانی الگوریتم‌های سه‌گانه به تغییرات مساحت شبکه رستری اندازه‌گیری و مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آن در جدول ۳

جدول ۳. حساسیت سنجی زمانی الگوریتم‌ها به وسعت

Table 3. The temporal sensitivity results of algorithms to the area

متوسط زمان اجرا (ثانیه)

الگوریتم ۳	الگوریتم ۲	الگوریتم ۱	مساحت (Km ²)
SPSR	CMLSR	MLMSR	
۴,۸۳	۷,۳۱	۶,۶۶	۱۲۳۳
۱۰,۳۹	۱۵,۶۹	۱۵,۷۰	۲۷۷۵
۴۱,۶۱	۵۹,۸۲	۵۸,۱۳	۱۱۰۹۳
۹۸,۳۷	۱۳۳,۸۰	۱۲۳,۰۳	۲۴۹۸۰
۳۲۴,۷۷	۴۴۲,۱۲	۴۰۶,۳۱	۸۰۹۲۱

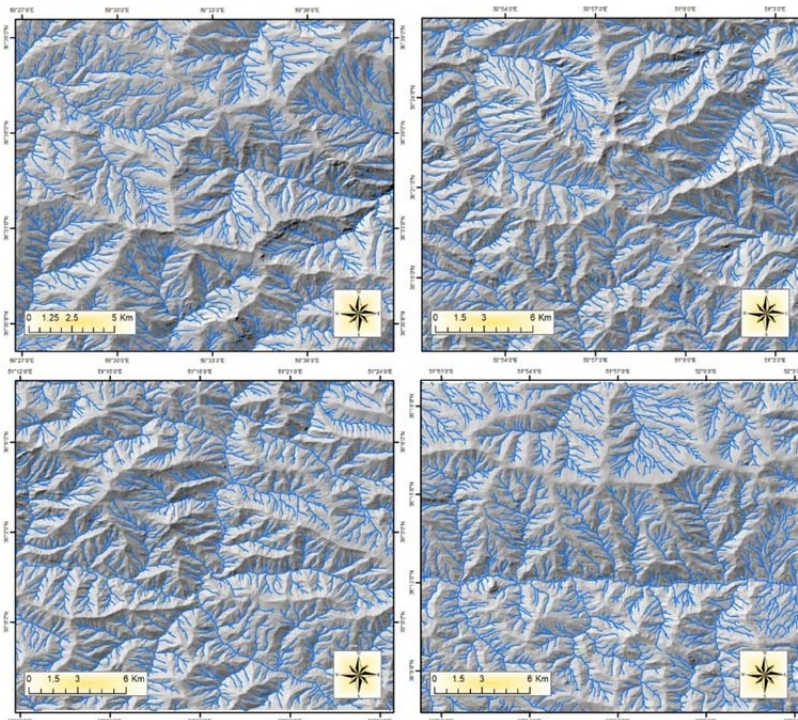


شکل ۲۱. حساسیت زمانی الگوریتم‌ها به تغییرات وسعت (مساحت به کیلومتر مربع)
 Fig 21. The temporal sensitivity of algorithms to the area

ارزیابی دقت و اعتبار سنجی نتایج

برای ارزیابی دقت و اعتبارسنجی نتایج، خطوط خط-الرأس با استفاده از مدل هیدرولوژیکی Arc Hydro در نرم افزار Arc GIS به صورت خودکار ترسیم گردید. خطالقهرا نیز با استفاده از نرم افزار Global Mapper استخراج گردید. نتایج در شکل ۲۲ و ۲۳ نشان داده شده است.

به طوری که در شکل ۲۱ ملاحظه می گردد، حساسیت زمانی تمامی الگوریتمها به تغییرات وسعت شبکه رستری، پاسخهای زمانی تصاعدی را به دنبال دارد که البته الگوریتم SPSR از این نظر بهترین عملکرد زمانی و الگوریتم CMLSR بدترین عملکرد زمانی را از بین سه الگوریتم پیشنهادی نشان می دهند.

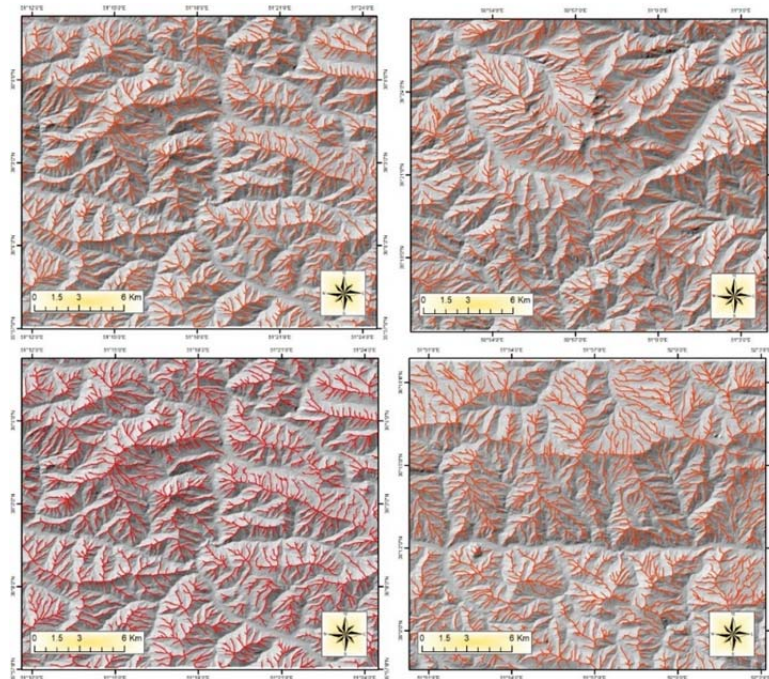


شکل ۲۲. خطالقهراهای ترسیم شده بر اساس مدل هیدرولوژیکی Arc Hydro در نرم افزار Arc GIS

Fig. 22. Drainage line Extraction based on Arc GIS Hydrological Model

محاسبه شد (شکل های ۲۲ و ۲۳) و متوسط مقادیر هر یک از سه الگوریتم در این پهنهها به دست آمد، که نتایج آن در جدول ۴ نشان داده شده اند.

درصد شباهت به خطالرأس در هر یک از سه الگوریتم MLMSR و CMLSR و SPSR در محدوده لایه مرجع خطالرأسها و خطالقهرا در ابعاد کرنلی فرد در فرد ۳ تا ۱۱



شکل ۲۳. خط الرأس های ترسیم شده بر اساس مدل استخراج خط الرأس نرم افزار Global Mapper

Fig. 23. Ridgeline Extraction based on Global Mapper Model

جدول ۴. متوسط برآورد صحیح وجود (TP) و برآورد غلط وجود (FP)

Table 4. True and False Positive Average

متوسط درصد شباهت به خط القعرها False Positive (F_p)	متوسط درصد شباهت به خط الرأس True Positive (T_p)	ابعاد پنجره متحرک	نوع الگوریتم
۹/۹۵	۸۷/۸۵	۳	الگوریتم اول (MLMSR)
۸/۷۲	۸۹/۴۱	۵	
۸/۷۸	۸۹/۵۷	۷	
۹/۵	۸۹/۰۸	۹	
۱۰/۲۵	۸۸/۴۱	۱۱	
متوسط		متوسط	
۹/۴۴	۸۷/۱۷	۳	الگوریتم دوم (CMLSR)
۳۸/۰۳	۶۰/۶۴	۵	
۳۷/۷۴	۶۱/۳۲	۷	
۴۰/۰۵	۵۹/۴۷	۹	
۴۱/۹۶	۵۷/۸۲	۱۱	
متوسط		متوسط	
۵۸/۵۵	۴۰/۲۲	۳	الگوریتم سوم (SPSR)
۳۸/۰۳	۶۰/۶۴	۵	
۳۴/۶۱	۶۳/۹۵	۷	
۳۳/۳۱	۶۵/۴۱	۹	
۳۲/۷۴	۶۶/۱۲	۱۱	
متوسط		متوسط	
۳۴/۲۳	۶۴/۵۲		

در این رابطه؛ Ac درصد اعتبار و صحت مدل، T_p برآورد صحیح وجود و F_p (False Positive) برآورد غلط وجود است. با توجه به رابطه ۹ ارزیابی صحت انجام گرفت که نتایج آن در جدول ۵ نشان داده شده است.

با توجه به اطلاعات جدول ۴ و با استفاده از رابطه ۹ ارزیابی صحت و اعتبارسنجی هر یک از مدلها انجام پذیرفت.

$$Ac = \frac{(T_p + (100 - F_p))}{2} \quad [9]$$

جدول ۵. برآورد و ارزیابی صحت بر اساس لایه خط الرأسها و خط القعرهای مرجع (مراجعه شود به شکل ۱۸ و ۱۹)

Table 8. Estimation and evaluation of accuracy based on the reference layer of ridge and drainage lines (see Figure 18 and 19)

برآورد صحت (Ac)	درصد شباهت به خط الرأس		نوع الگوریتم
	محدوده خط القعرها	محدوده خط الرأسها	
	False Positive (F_p)	True Positive (T_p)	
۸۸/۸۶	۹/۴۴	۸۷/۱۷	الگوریتم اول (MLMSR)
۶۴/۵۲	۳۴/۲۳	۶۳/۲۹	الگوریتم سوم (SPSR)
۵۹/۱۶	۴۰/۲۲	۵۸/۵۵	الگوریتم دوم (CMLSR)

نتیجه گیری

خواهد داشت. نتایج به دست آمده از مدل TPI با نتایج مدل-های سه گانه پیشنهادی در این پژوهش نیز مقایسه شد، نتایج نشان می دهد که به لحاظ بصری مدل های MLMSR و به خصوص CMLSR کیفیت تفکیک و نمایش بصری بهتری به نسبت مدل TPI نشان می دهند. با توجه به نتایج اعتبارسنجی و ارزیابی صحت، الگوریتم MLMSR و سپس SPSR عملکرد بهتری داشته اند و الگوریتم CMLSR به نسبت سایر روشها عملکرد ضعیف تری از خود نشان داده است. در طراحی و اجرای تمامی الگوریتمها و نیز در بخش حساسیتسنجی و اعتبارسنجی، به طور گسترده از زبان برنامه نویسی پایتون استفاده شده است و مجموعاً بیش از ۵۰۰ خط کدنویسی بدین منظور انجام گرفت. تمامی الگوریتمها به طور خودکار بوده و با استفاده از پردازش ماشینی قادر به اجرا و ذخیره سازی نتایج به فرمت رستر و بردار هستند.

در تشخیص خودکار قتل و خط الرأسها با استفاده از مدل رقومی زمین، از آنالیز الگوی مکانی کرنل استفاده شد. در این راستا سه الگوریتم پیشنهادی در این زمینه طراحی، طرح-بندی، کدنویسی و اجرا گردید. نتایج خروجی از هر یک از الگوریتمها به صورت ساختارهای رستری و برداری ارائه شد.

ارزیابی صحت و حساسیتسنجی به نسبت تغییرات اندازه پنجره متحرک، رزولوشن و وسعت شبکه رستری برای هر یک از الگوریتمها انجام گرفت. الگوریتم MLMSR، در ابعاد پائین تر پنجره متحرک تمایل به تفکیک باینری داشته، در صورتی که الگوریتمهای CMLSR و SPSR اینگونه عمل نمی کنند. در تمامی الگوریتمها، افزایش ابعاد پنجره متحرک باعث کلی سازی نتایج و حذف جزئیات می گردد. الگوریتمهای CMLSR و SPSR به دلیل درجه استدرج بیشتر در تفکیک عوارض، برای مقاصد کارتوگرافیکی و نمایشی مناسب تر هستند. از لحاظ عملکرد زمانی یا حساسیت به تغییرات ورودی، الگوریتم SPSR عملکرد بهتری از خود نشان می دهد. این موضوع خصوصاً در مواردی که حجم فایل ورودی پرحجم و تعداد سطر و ستونها زیاد باشد، اهمیت بیشتری

تقدیر و تشکر

این مقاله بخشی از یافته‌های طرح پژوهشی است که در مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان اصفهان به اجرا در آمده است، بنابراین نویسندگان بر خود لازم می‌دانند مراتب سپاس و قدردانی خود را از آن مرکز و پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری کشور به خاطر فراهم آوردن امکان این تحقیق اعلام نمایند.

References

- Adediran AO, Parcharidis I, Poscolieri M, Pavlopoulos K. 2004. Computer-assisted discrimination of morphological units on north-central Crete (Greece) by applying multivariate statistics to local relief gradients. *Geomorphology*, 58(1): 357-370. doi:<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2003.07.024>.
- Ahnert F. 1996. The point of modelling geomorphological systems. *Geomorphology Sans Frontières*: 91-114.
- Azanon J, Delgado J, Gómez A. 2004. Morphological terrain classification and analysis using geostatistical techniques. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 34(Part XXX).
- Bates RL, Jackson JA. 1987. Glossary of geology, <https://www.osti.gov/biblio/5128638>.
- Böhner J, Selige T. 2006. Spatial prediction of soil attributes using terrain analysis and climate regionalisation. In: *SAGA-Analyses and modelling applications*. Goltze, 45 p.
- Brabyn L. 1997. Classification of macro landforms using GIS. *ITC journal*(1): 26-40.
- Carrara A. 1983. Multivariate models for landslide hazard evaluation. *Journal of the International Association for Mathematical Geology*, 15(3): 403-426. doi:10.1007/BF01031290.
- Chang K-T. 2008. Introduction to geographic information systems, vol 4, . McGraw-Hill Boston, 117-122.
- Clayton K, Shamon N. 1999. A new approach to the relief of Great Britain: III. Derivation of the contribution of neotectonic movements and exceptional regional denudation to the present relief. *Geomorphology*, 27(3): 173-189. doi:[https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(98\)00072-5](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(98)00072-5).
- Dikau R. 1990. Geomorphic landform modelling based on hierarchy theory. In: *Proceedings of the*
- Hammond EH. 1954. Small-scale continental landform maps. *Annals of the Association of American Geographers*, 44(1): 33-42.
- Dobos E, Daroussin J, Montanarella L. 2010. A quantitative procedure for building physiographic units supporting a global SOTER database. *Hungarian Geographical Bulletin*, 59(2): 181-205.
- Dymond J, Derosé R, Harmsworth G. 1995. Automated mapping of land components from digital elevation data. *Earth Surface Processes and Landforms*, 20(2): 131-137. doi:<https://doi.org/10.1002/esp.3290200204>.
- Dymond JR, Harmsworth GR. 1994. Towards automated land resource mapping using digital. *ITC journal*: 2, 129-138.
- Etzelmüller B, Sulebak JR. 2000. Developments in the use of digital elevation models in periglacial geomorphology and glaciology. *Physische Geographie*, 41: 35-58.
- Evans IS. 1980. An integrated system of terrain analysis and slope mapping. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 36: 274-295.
- Evans IS. 2019. General geomorphometry, derivatives of altitude, and descriptive statistics. In: *Spatial analysis in geomorphology*. Routledge, pp 17-90.
- Feliciísimo AM. 1994. Modelos digitales del terreno. Introducción y aplicaciones en las ciencias ambientales Oviedo: Pentalfa Ediciones, 122 p.
- Fels JE, Matson KC. 1996. A cognitively-based approach for hydrogeomorphic land classification using digital terrain models. In: *Proceedings of Third NCGIA International Conference/Workshop on Integrating GIS and Environmental Modeling*. Santa Fe, New Mexico. Available: http://www.ncgia.ucsb.edu/conf/SANTA_FE_CD-ROM/sf_papers/fels_john/fels_and_matson.html.
- Fenneman N, Johnson D. 1946. Physical division of the United States: US geological survey. Physiography Committee Special Map, scale, 1(7,000,000).
- Florinsky IV. 1998. Combined analysis of digital terrain models and remotely sensed data in landscape investigations. *Progress in physical geography*, 22(1): 33-60.
- Dikau R. 2020. The application of a digital relief model to landform analysis in geomorphology. In: *Three dimensional applications in geographical information systems*. CRC Press, pp 51-77.
- Dikau R, Brabb EE, Mark R, Pike R. 1995. Morphometric landform analysis of New Mexico. *Zeitschrift für Geomorphologie Supplementband*(101): 109-126.
- Dikau R, Brabb EE, Mark RM. 1991. Landform classification of New Mexico by computer. US Dept. of the Interior, US Geological Survey, <https://doi.org/10.3133/ofr91634>.

25. Hammond EH. 1964. Analysis of properties in land form geography: an application to broad-scale land form mapping. *Annals of the Association of American Geographers*, 54(1): 11-19. doi:<https://doi.org/10.1111/j.1467-8306.1964.tb00470.x>.
26. Hengl T, Reuter HI. 2008. *Geomorphometry: concepts, software, applications*. Newnes, 796 p.
27. Hodgson ME. 1998. Comparison of angles from surface slope/aspect algorithms. *Cartography and Geographic Information Systems*, 25(3): 173-185. doi:<https://doi.org/10.1559/152304098782383106>.
28. Irvin BJ, Ventura SJ, Slater BK. 1997. Fuzzy and isodata classification of landform elements from digital terrain data in Pleasant Valley, Wisconsin. *Geoderma*, 77(2): 137-154. doi:[https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(97\)00019-0](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(97)00019-0).
29. Iwahashi J, Pike RJ. 2007. Automated classifications of topography from DEMs by an unsupervised nested-means algorithm and a three-part geometric signature. *Geomorphology*, 86(3): 409-440. doi:<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.09.012>.
30. Lane SN, Richards KS, Chandler JH. 1998. *Landform monitoring, modelling and analysis*. John Wiley and Sons Ltd, 480 p.
31. MacMillan RA, Jones RK, McNabb DH. 2004. Defining a hierarchy of spatial entities for environmental analysis and modeling using digital elevation models (DEMs). *Computers, Environment and Urban Systems*, 28(3): 175-200. doi:[https://doi.org/10.1016/S0198-9715\(03\)00019-X](https://doi.org/10.1016/S0198-9715(03)00019-X).
32. MacMillan RA, Pettapiece WW, Nolan SC, Goddard TW. 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. doi:[https://doi.org/10.1016/S0165-0114\(99\)00014-7](https://doi.org/10.1016/S0165-0114(99)00014-7).
33. Moffat A, Catt J, Webster R, Brown E. 1986. A re-examination of the evidence for a Plio-Pleistocene marine transgression on the Chiltern Hills. I. Structures and surfaces. *Earth Surface Processes and Landforms*, 11(1): 95-106. doi:<https://doi.org/10.1002/esp.3290110110>.
34. Moore ID, Gessler PE, Nielsen G, Peterson G. 1993. Soil attribute prediction using terrain analysis. *Soil Science Society of America Journal*, 57(2): 443-452. doi:<https://doi.org/10.2136/sssaj1993.03615995005700020026x>.
35. Moore ID, Grayson R, Ladson A. 1991. Digital terrain modelling: a review of hydrological, geomorphological, and biological applications. *Hydrological processes*, 5(1): 3-30. doi:<https://doi.org/10.1002/hyp.3360050103>.
36. Moore ID, Nieber JL. 1989. Landscape assessment of soil erosion and nonpoint source pollution. *Journal of the Minnesota Academy of Science*, 55(1): 18-25.
37. Morgan JM, Lesh AM. 2005. Developing landform maps using ESRI'S Model-Builder. In: *ESRI International User Conference*.
38. Mulla DJ. 1988. Using geostatistics and spectral analysis to study spatial patterns in the topography of southeastern Washington State, USA. *Earth Surface Processes and Landforms*, 13(5): 389-405. doi:<https://doi.org/10.1002/esp.3290130505>.
39. Murphy RE. 1968. Annals map supplement number nine landforms of the world. *Annals of the Association of American Geographers*, 58(1): 198-200. doi:<https://doi.org/10.1111/j.1467-8306.1968.tb01643.x>.
40. Nogami M. 1995. Geomorphometric measures for digital elevation models. *Z Geomorph, NF, Suppl*, 101: 53-67.
41. Pike RJ. 1988. The geometric signature: Quantifying landslide-terrain types from digital elevation models. *Mathematical Geology*, 20(5): 491-511. doi:10.1007/BF00890333.
42. Pike RJ. 1995. Geomorphometry: progress, practice and prospect. *Zeitschrift fur Geomorphologie NF SupplementBand*, 101: 221-238.
43. Pike RJ. 2000. Geomorphometry-diversity in quantitative surface analysis. *Progress in Physical Geography*, 24(1): 1-20. doi:<https://doi.org/10.1177/030913330002400101>.
44. Prima ODA, Echigo A, Yokoyama R, Yoshida T. 2006. Supervised landform classification of Northeast Honshu from DEM-derived thematic maps. *Geomorphology*, 78(3): 373-386. doi:<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.02.005>.
45. Speight J. 2009. Landform. In 'Australian soil and land survey field handbook'. CSIRO Publishing: Melbourne, 8-43 p.
46. Sulebak JR, Etzelmüller B, Sollid JL. 1997. Landscape regionalization by automatic classification of landform elements. *Norsk Geografisk Tidsskrift-Norwegian Journal of Geography*, 51(1): 35-45. doi:<https://doi.org/10.1080/00291959708552362>.
47. Tadono T, Ishida H, Oda F, Naito S, Minakawa K, Iwamoto H. 2014. Precise global DEM generation by ALOS PRISM. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2(4): 71. doi:<https://doi.org/10.5194/isprsannals-II-4-71-2014>.
48. Takaku J, Tadono T, Tsutsui K. 2014. Generation of High Resolution Global DSM from ALOS

- PRISM. ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences, 2(4). doi:<https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-4-243-2014>.
49. Wood J. 1996. The geomorphological characterisation of digital elevation models. University of Leicester (United Kingdom). Thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy at the University of Leicester, 450 p.
50. Zinck JA, Valenzuela CR. 1990. Soil geographic database: structure and application examples. ITC journal(3): 270-294.



Automated ridgeline recognition, using Kernel neighborhood pattern analysis

Kourosh Shirani, Sina Solhi, Fatemeh Nematollahi

Received: 3 April 2021 / Received in revised form 18 May 2021 / Accepted: 26 July 2021
Available online 3 August 2021

Abstract

Background and Objective Landform refers to any physical feature of the surface with a recognizable structure and shape. Landform elements and structural forms of the terrain surface could, directly and indirectly, drive many other environmental variables. Numerical representation of the surface and uneven pattern of the earth is a common topic in geographical, geomorphological, geological, and geophysical hazard mapping as well as sea-bed exploration. The combination of the earth and computer science with mathematics and geomorphometric engineering interacts with discrete and continuous landforms. Geomorphometry dates back to about 150 years ago and the work of Alexander von Humboldt and geomorphologists, and today with the revolution in computer science and especially digital computer models is developing rapidly.

K. Shirani¹, **S. Solhi**², **F. Nematollahi**³

1. Assistant Professor, Soil Conservation and Watershed Management Research Department, Isfahan Agricultural and Natural Resources, Research and Education Center, AREEO, Isfahan, Iran
2. Ph.D. Graduated of Geomorphology, Department of Physical Geography, Faculty of Geographical Sciences and Planning, University of Isfahan, Isfahan, Iran
3. Postdoctoral Researcher, Department of Physical Geography, Faculty of Geographical Sciences and Planning, University of Isfahan, Isfahan, Iran

e-mail: KouroshShirani@gmail.com

<http://dori.net/dor/20.1001.1.26767082.1401.13.1.4.2>

Detection and classification of landforms are of interest to GIS developers, geoscientists, and geomorphometry researchers. In this way, the desired work units are extracted with higher speed and accuracy and used in the form of vector and raster maps. Existing approaches are mainly based on height, terrain derivative, gradient, curvature, flow direction, slope position, morphometric indices, and the like. Also, less attention has been paid to the challenge of matching the diagnostic scale with the Landform scale, and most models have this shortcoming. On the other hand, less attention has been paid to the possibility of vectorization output results and also to the analysis of sensitivity and temporal response algorithms to machine processing. In this research, we attempted to recover and resolve the mentioned shortcoming and problems in the previous works. In this research, using basic algorithms of raster analysis and coding, new methods and algorithms for the automatic detection of landforms have been developed. Focal raster analysis is also emphasized and the moving window technique is used to implement the algorithms. Facing the scale challenge, sensitivity analysis, and the response algorithms to input changes as well as accuracy assessment are other aspects that have been addressed in this research.

Materials and Methods In this study, the Digital Surface Model (DSM) published by the Japan Space Agency in May and October 2015 with a horizontal resolution of about 30 meters was used to work on the topography of the region. These data are obtained

from ALOS satellite images. This database is based on DSM data (5m network version) 3D topography, one of the most accurate elevation data on a global scale. The digital elevation model was transformed into a matrix structure using a Python coding environment. Then, raster analysis was implemented using the moving window technique. The moving window algorithm was coded in a way that the dimensions of the moving window could be freely determined and changed. In proportion to the size of the moving window, some adaptive algorithms are implemented to automatically correct and organize the edge effect in proportion to the size of the moving window. In this study, automatic landform detection was performed using spatial analysis of kernel patterns in the raster grid of digital elevation models and the results were presented in the form of three algorithms applied in the detection of topographic peaks and ridges. These algorithms include Multilevel Mean Summit Recognition Algorithm (MLMSR), Complex Multilevel Summit Recognition Algorithm (CMLSR), and Single Point Summit Recognition (SPSR). Each of these three algorithms was first conceptually designed and then coded and executed using the Python programming language. In the next step, the sources of error and specific scenarios of the algorithms were examined. The sensitivity of each algorithm related to the dimensions of the moving window, the resolution, and the size of the raster file, was evaluated, and finally, the accuracy and validation of the three models, using reference layers that were manually prepared and plotted, were assessed. All the procedures were designed in a way that could easily be implemented in an official software and were completely compatible with the structure of machinery processing. Also, being automatic and working on different platforms where one of our priorities.

Results and Discussion In the automatic detection of peaks and ridges using a digital terrain model, kernel spatial pattern analysis was used. In this regard, three proposed algorithms in this field were designed, coded, and executed. The output results of each of the

algorithms were presented in the form of a raster and vector data model. Accuracy and sensitivity assessments were performed by considering changes in moving window size, resolution, and raster grid size (row x column) for each of the algorithms. The MLMSR algorithm tends to be in a more binary result in the lower dimensions of the moving window, while the CMLSR and SPSR algorithms do not. In all algorithms, increasing the size of the moving window causes a more generalization ratio. CMLSR and SPSR algorithms are more suitable for cartographic and visual purposes due to the higher degree of grading in the results. Regarding the temporal performance (Runtime) or sensitivity to input changes, the SPSR algorithm performs better. This is especially important when the input file size (number of rows and columns) is large. According to the results of validation and accuracy evaluation, MLMSR and SPSR had better performance than, the CMLSR algorithm. Python programming language has been widely used in the design and implementation of all algorithms, as well as in the field of sensitivity evaluation and validation. Totally more than 500 lines of codes were done for this purpose. All algorithms are automated and are able to execute and store results in raster and vector format using machine processing.

Conclusion The results show that the MLMSR algorithm in smaller dimensions of the moving window is tending to more binary results, which is problematic in some graphical and cartographic applications, but the CMLSR and SPSR algorithms showed more gradual trends in their outputs and so, they performed better in this respect. Researchers who intend to study and develop in this field are advised to focus on adaptive algorithms and optimize the dimensions of the moving window in relation to the volume of input information and so, in this way, they increase the flexibility of algorithms in relation to input changes.

Keywords: Kernel, Neighborhood pattern, Automatic detection, Ridgeline