



## ارائه فیلتری محلی جهت بهبود مدل رقومی ارتفاعی زمین

مقاله  
پژوهشی

محمدامین قنادی<sup>۱\*</sup>، متین شهری<sup>۲</sup>

دریافت: ۱۴۰۱/۰۴/۱۰ / پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰/۱۰ / دسترسی اینترنتی: ۱۴۰۳/۱۲/۱۶

زمین اجرا می‌شود. روش پیشنهادی و چند روش رقابتی معمول بر روی یک مدل رقومی ارتفاعی شبیه‌سازی شده و یک مدل رقومی ارتفاعی یک متري مستخرج از تصاویر استریو ماهواره‌ای از جنوب غرب شهرستان مشهد اجرا شده‌اند و مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. خطای جذر میانگین مربعات مدل رقومی تصحیح شده مستخرج از تصاویر ماهواره‌ای با استفاده از روش پیشنهادی ۱.۸۹ متر است و این در حالی است که این شاخص برای روش فیلتر وزن‌دهی با استفاده از معکوس فاصله معمول ۲.۴۳ متر می‌باشد. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که روش پیشنهادی علیرغم افزایش ۱۹٪ هزینه زمانی می‌تواند دقت مدل رقومی ارتفاعی اصلاح شده را در قیاس با روش وزن‌دهی با استفاده از معکوس فاصله معمول حداقل ٪۲۲ بهبود دهد. بنابراین می‌توان از فیلتر پیشنهادشده در این مطالعه در حذف نویز و بهبود مدل رقومی ارتفاعی زمین در شرایطی که افزایش دقت در اولویت است استفاده نمود.

**مواد و روش‌ها:** روش پیشنهادی بر روی دو سری داده آزمایش می‌شود. داده اول مدل رقومی شبیه ساز شده با استفاده ازتابع ریاضی پیکز می‌باشد. یک شبکه  $100 \times 100$  نقطه‌ای با مختصه‌های معلوم از این تابع استخراج شده است. مختصه  $Z$  تعداد  $1000$  نقطه که  $10\%$  از کل این نقاط می‌باشد، با استفاده

چکیده  
مدل رقومی ارتفاعی دقیق و با کیفیت از سطح زمین برای بسیاری از کاربردها ضروری می‌باشد. به علت وجود برخی مشکلات در برداشت داده و همچنین ضعف در تکنیک‌های تولید مدل رقومی ارتفاعی از جمله روش‌های درون‌یابی، این مدل‌ها با خطاهایی بعض‌اً بزرگ همراه می‌باشند که می‌بایست به صورت دستی و یا خودکار ویرایش شوند. در این مطالعه یک روش جهت حذف خطاهای بزرگ و همچنین بازسازی مدل رقومی ارتفاعی زمین پیشنهاد شده است. در این روش دو مرحله‌ای ابتدا با استفاده از انحراف معیار فیلتر کوتاه شده آلفا، نقاط با خطای بزرگ شناسایی و حذف می‌شوند. در ادامه یک فیلتر وزن‌دهی با استفاده از معکوس فاصله که انطباق پذیر است با هدف حذف اشتباهات و بازسازی مدل رقومی ارتفاعی

محمدامین قنادی (✉)، متین شهری<sup>۲</sup>

۱- استادیار گروه مهندسی نقشه برداری، دانشکده مهندسی علوم زمین، دانشگاه صنعتی اراک

۲- استادیار گروه مهندسی نقشه برداری، دانشکده مهندسی علوم زمین، دانشگاه صنعتی اراک

DOI: 10.30495/girs.2022.1962282.1992

پست الکترونیکی مشغول مکاتبات: m.ghannadi@arakut.ac.ir

فرآیند درونیابی را انجام میدهند و این در حالی می‌باشد که این مقدار می‌تواند در مناطق کوهستانی مقداری بزرگتر و در مناطق هموار مقدار کوچکتری انتخاب شود. از این رو روش IDW انطباق پذیر به عنوان روش پیشنهادی در این مطالعه، ضمن حفظ مزایای روش IDW از جمله سادگی و حجم کم پردازش، با محاسبه انحراف معیار محلی که نشان دهنده شدت توپوگرافی محلی منطقه می‌باشد، مقدار توان فرمول فاصله را تعیین می‌کند. جهت ارزیابی عملکرد روش پیشنهادی و روش‌های رقابتی از معیار RMSE استفاده شده است. مدل‌های رقومی ارتفاعی پس از اصلاح با روش‌های مختلف به همراه مدل رقومی ارتفاعی نویزی، با مدل ارتفاعی اصلی مقایسه می‌شوند و دقت آنها تخمین زده می‌شود.

**نتایج و بحث:** روش پیشنهادی به همراه روش‌های رقابتی KNN، IDW معمول و روش MRBF بر روی مدل رقومی ارتفاعی شبیه‌سازی شده و همچنین روش پیشنهادی به همراه روش رقابتی IDW معمول بر روی مدل رقومی ارتفاعی مستخرج از تصاویر استریو Pleiades پیاده‌سازی شده‌اند و نتایج این آزمون‌ها در این بخش ارائه خواهند شد. در آزمون اول چهار روش ذکر شده بر روی مدل رقومی ارتفاعی شبیه‌سازی شده که ۱۰٪ از تعداد ۱۰۰۰ نقطه ارتفاعی از شبکه نقاط (یعنی ۱۰۰۰ نقطه) خطای بزرگ می‌باشند، اجرا شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که، روش IDW انطباق پذیر به خوبی روش MRBF عمل کرده است (دقت روش MRBF تنها به اندازه ۹٪ بهتر می‌باشد) و این در حالی است که هزینه زمانی بسیار کمتری نسبت به آن دارد. از طرفی مشاهده می‌شود که روش پیشنهادی به مراتب بهتر از روش IDW معمول عمل کرده است. در آزمون دوم تنها دو روش IDW معمول و IDW انطباق‌پذیر بر روی داده‌های واقعی تست شده‌اند. در آزمون دوم روش‌های مذکور بر روی مدل رقومی ارتفاعی مستخرج از تصاویر ماهواره‌ای که ۵٪ از تعداد ۳۴۸۶۰ نقطه ارتفاعی از شبکه نقاط (یعنی ۱۷۴۳۰ نقطه) خطای بزرگ می‌باشند، اجرا شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که روش پیشنهادی اگرچه حدود ۱۹٪ به لحاظ زمان پردازش هزینه بیشتری را تحمیل می‌کند اما

از نویز رندوم (محدوده این نویز حداقل و حداً کثر ارتفاع منطقه تنظیم شده است) مخدوش می‌شود و جهت اجرای روش پیشنهادی و سایر روش‌های رقابتی مورد استفاده قرار می‌گیرد. داده دوم مورد استفاده در این مطالعه، مدل رقومی ارتفاعی تولید شده از تصاویر ماهواره‌ای Pleiades از جنوب غرب مشهد می‌باشد. این منطقه به مساحت ۹۵۵۶ هکتار از جنوب غرب مشهد انتخاب شده است و شامل مناطق هموار، شهری و کوهستانی است. حداقل ارتفاع در این منطقه ۹۶۰ متر و حداً کثر آن ۱۴۷۰ متر است. مختصات UTM برای این منطقه (۴۰ شمالی) از شمال شرقی (X: ۷۴۰۴۹۰، Y: ۴۰۱۶۲۰۰) به سمت جنوب غربی (X: ۷۲۹۳۰۰، Y: ۴۰۰۷۸۰۰) می‌باشد. رزولوشن مدل رقومی مورد مطالعه یک متر و دقت ارتفاعی آن بهتر از یک متر می‌باشد. از این مدل رقومی نیز یک شبکه ۸۳۰×۴۲۰ نقطه‌ای با مختصه‌های معلوم استخراج شده است و ارتفاع ۵٪ از آنها با استفاده از نویز رندوم مخدوش شده است و جهت انجام آزمون‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد.

روش پیشنهادی از دو مرحله اصلی تشکیل می‌شود. مرحله اول شناسایی و حذف خطاهای بزرگ موجود در مدل رقومی است و مرحله دوم نیز بازسازی نقاط نویزی با استفاده از درونیابی به کمک مقادیر همسایگی‌های محلی می‌باشد. در ادامه این مراحل توضیح داده می‌شوند.

در اینجا تمامی نقاط یک مدل رقومی ارتفاعی مورد پردازش قرار می‌گیرد. ابتدا حول هر نقطه یک همسایگی محلی تعیین می‌شود. سپس ارتفاع نقاط همسایگی محلی بصورت یک دنباله صعودی مرتب می‌شوند. آلفا درصد از ابتدا و انتهای این دنباله حذف می‌گردد. در ادامه انحراف معیار مقادیر باقی‌مانده محاسبه می‌شود. علت حذف این بخش از دنباله ارتفاع نقاط همسایگی این می‌باشد که چنانچه خطای بزرگی در ارتفاع یک یا چند نقطه از همسایگی محلی قرار داشت باعث مخدوش شدن مقدار انحراف معیار نشود. یکی از نقاط ضعف روش‌های درونیابی مانند IDW در تعیین ارتفاع نقاط در بازسازی مدل‌های رقومی ارتفاعی این است که بدون در نظر گرفتن توپوگرافی منطقه و با ثابت فرض کردن مقدار توان فاصله

گردید. سپس در مرحله بعد با استفاده از یک فیلتر IDW انطباق پذیر مقادیر جدید بازیابی شدند. این فیلتر کمک می‌کند که تاثیرپذیری همسایه‌های نزدیکتر به نقطه هدف مناسب با میزان کوهستانی بودن منطقه تنظیم شود. در این پژوهش، عملکرد روش پیشنهادی با چند روش رقابتی از جمله IDW معمول مقایسه شده است. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که روش پیشنهادی می‌تواند دقت مدل رقومی ارتفاعی اصلاح شده را تا ۲۲٪ در مقایسه با IDW معمول بهبود بخشید و این در حالی است که تنها ۱۹٪ زمان پردازش آن بیشتر می‌باشد.

**وازگان کلیدی:** مدل رقومی ارتفاعی، حذف اشتباهات، بهبود DEM، فیلتر انطباق پذیر

موجب بهبود ۲۲٪ در دقت مدل رقومی ارتفاعی بهبود یافته می‌شود. بنابراین استفاده از IDW انطباق پذیر در مواردی که دقت مدل رقومی ارتفاعی از اهمیت بیشتری در قیاس با زمان پردازش قرار دارد، پیشنهاد می‌شود.

**نتیجه گیری:** کاربرد مدل‌های رقومی ارتفاعی برای بسیاری از علوم از حائز اهمیت می‌باشد لذا تولید این مدل‌ها با دقت بالا امری ضروری می‌باشد. دقت مدل‌های رقومی ارتفاعی تحت تاثیر عوامل مختلف دچار مشکل می‌شود. از این رو ارائه روش‌های کارآمد با هدف شناسایی و حذف نویز و بازسازی مدل رقومی ارتفاعی امری مهم جهت انجام پژوهش محضوب می‌شود. در این مطالعه یک روش دو مرحله‌ای با هدف حذف نویز و بازسازی مدل رقومی ارتفاعی زمین پیشنهاد شده است. در مرحله اول از روش پیشنهادی با استفاده از انحراف معیار فیلتر کوتاه شده آلفا، نقاط با خطای بزرگ شناسایی و حذف

لطفاً به این مقاله استناد کنید: قنادی، م.، ا. شهری، م. ارائه فیلتری محلی جهت بهبود مدل رقومی ارتفاعی زمین. نشریه سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی، ۱۵ (۴): ۶۸-۸۴.

**مقدمه**

مدل‌های رقومی ارتفاعی در معرض انواع مختلفی از خطاهای قرار دارند. از جمله این خطاهای عبارتند از خطای بزرگ<sup>۱</sup> در طول جمع آوری داده‌ها (۳۵)، خطای سیستماتیک از جمله خطای جهت‌دار در تصویربرداری تصاویر استریو و خطاهای تصادفی که اجتناب ناپذیر می‌باشند. این خطاهای از نظر جغرافیایی بسته به شرایط زمین نیز می‌توانند متفاوت باشند (۳۶).

در کنار خطاهای موجود در جمع آوری اطلاعات با هدف تولید مدل رقومی ارتفاعی، فرآیند تولید مدل رقومی و تکنیک‌های درون‌یابی نیز با خطا همراه می‌باشند. به عنوان مثال، خطای موجود در تناظریابی تصویری در تولید مدل رقومی از تصاویر استریو هوایی و یا ماهواره‌ای در فتوگرامتری، و یا خطاهای موجود در تولید اینترفروگرام در تداخل سنجی راداری از جمله خطاهای موجود در تکنیک‌های تولید مدل رقومی ارتفاعی می‌باشند. بنابراین رسیدن به یک مدل رقومی با کیفیت بالا یک چالش جدی محسوب می‌شود (۳۳). از این رو مطالعاتی پیرامون منابع خطا در مدل‌های رقومی ارتفاعی، حذف اشتباهات و بهبود آنها صورت گرفته است (۳۷). در برخی مطالعات صورت گرفته در گذشته، نقش تکنیک‌های درون‌یابی در تولید مدل‌های رقومی مورد ارزیابی قرار گرفته است (۳۴). در این مطالعات روش‌های K نزدیکترین همسایه (KNN) (۳۸-۲۷)، وزن‌دهی با استفاده از معکوس فاصله (IDW) (۳۰-۲۴)، Kriging و روش‌های بهبود یافته آن (۳۰-۲۸)، Spline، (۳۸، ۳۲، ۳۰)، (۳۰-۲۸)، ا نوع توابع پایه شعاعی (RBF) (۲۵، ۳۱)، (۳۸، ۳۰)، RST، (۲۵، ۳۱)، Triangular و Minimum curvature، linear interpolation در این بین روش‌های KNN، IDW و توابع پایه شعاعی مولتی کوادریک (MRBF) سه مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند، که هر کدام از روش‌های ذکر شده دارای مزايا و معایي می‌باشند. که از منظر دقیق روش و حجم محاسبات قابل مقایسه می‌باشند. مطالعاتی که به ارزیابی دقیق تکنیک‌های درون‌یابی در

مدل رقومی ارتفاعی زمین (DEM) نشان‌دهنده سطح توپوگرافی زمین طبیعی به استثنای درختان، ساختمان‌ها و سایر اشیاء سطحی است که یک نمایش گرافیکی کامپیوتری سه‌بعدی از داده‌های ارتفاع می‌باشد (۳-۱). مدل‌های رقومی ارتفاعی برای بسیاری از علوم از جمله مهندسی عمران (۴)، برنامه‌ریزی کشاورزی و مدیریت منابع طبیعی (۵، ۶)، زمین‌شناسی (۷)، کاربردهای نظامی (۸)، نقشه‌برداری (۹)، فتوگرامتری (۱۰) و سیستم اطلاعات مکانی (۱۱) نقشی اساسی دارد. از شاخص‌ترین این کاربردها می‌توان محاسبات مربوط به خاک‌برداری و خاک‌ریزی (۱۲)، نقشه‌برداری زمین (۱۳)، محاسبات حجم در ساخت سدها و مخازن آب (۱۴)، توصیف و توسعه شبکه‌های زهکشی و مدل کردن جریان‌های آبی (هیدرولوژی)، شبیه‌سازی و طبقه‌بندی ژئومورفولوژیکی و مدل‌سازی زمین‌شناسی، (۱۵-۱۸)، تهیه نقشه‌های شبیه و منظر، تهیه پروفیل‌های شبیه برای تولید نقشه‌های ارتفاعی (۱۹)، استفاده در تصحیحات هندسی و رادیومتریکی تصاویر سنجش‌از دور (۲۰)، استفاده در تعیین مدل‌های پتانسیل فرسایش خاک (۲۱)، مطالعات شرایط محصولات کشاورزی (۲۲)، مدل‌های انتشار جریان باد و آلودگی هوا (۲۳) را نام برد. مدل‌های رقومی به روش‌های مختلفی تهیه می‌شوند. این مدل‌ها با استفاده از نقشه‌های توپوگرافی (۲۴، ۲۵)، برداشت مستقیم نقشه‌برداری با استفاده از تجهیزات زمینی، سامانه‌های ماهواره‌ای از جمله سیستم موقعیت‌یابی جهانی (GPS) (۲۶)، تصاویر هوایی (۲۷)، سیستم‌های لیدار هوایی (۲۹-۳۱) زمینی (۳۲) و یا تصاویر ماهواره‌ای (۳۳-۳۵) تولید می‌شوند. روش‌های قدیمی‌تر تولید مدل‌های رقومی اغلب شامل استفاده از نقشه‌های منحنی تراز دیجیتال بوده است (۲۴). این روش هنوز در مناطق کوهستانی که استفاده از روش‌های دیگر با چالش مواجه است (به عنوان مثال استفاده از تداخل سنجی ماهواره‌ای)، استفاده می‌شود. مدل رقومی ارتفاعی را می‌توان به صورت رستر (شبکه‌ای از مربع‌ها) یا به صورت یک شبکه نامنظم متشی مبتنی بر پایه بردار (TIN) نمایش داد.

<sup>1</sup> Blunders

پیکر می‌باشد. یک شبکه  $100 \times 100$  نقطه‌ای با مختصه‌های (x,y,z) معلوم از این تابع استخراج شده است. مختصه z تعداد ۱۰۰۰ نقطه که ۱۰٪ از کل این نقاط می‌باشد، با استفاده از نویز رندوم (محدوده‌ی این نویز حداقل و حداکثر ارتفاع منطقه تنظیم شده است) مخدوش می‌شود و جهت اجرای روش پیشنهادی و سایر روش‌های رقابتی مورد استفاده قرار می‌گیرد. تصویر این تابع ریاضی در شکل (۲) نشان داده شده است. در برخی مطالعات صورت گرفته در این موضوع نیز از داده‌های شبیه‌سازی شده استفاده شده است (۳۱).

داده دوم مورد استفاده در این مطالعه، مدل رقومی ارتفاعی تولید شده از تصاویر ماهواره‌ای Pleiades از جنوب غرب مشهد می‌باشد. این منطقه به مساحت ۹۵۵۶ هکتار از جنوب غرب مشهد انتخاب شده است و شامل مناطق هموار، شهری و کوهستانی است. حداقل ارتفاع در این منطقه ۹۶۰ متر و حداکثر آن ۱۴۷۰ متر است. مختصات UTM برای این منطقه (زون ۴۰ شمالی) از شمال شرقی (X: ۷۴۰۴۹۰، Y: ۴۰۱۶۲۰۰) به سمت جنوب غربی (X: ۷۲۹۳۰۰، Y: ۴۰۰۷۸۰۰) می‌باشد. قدرت تفکیک مکانی مدل رقومی ارتفاعی مورد مطالعه یک متر و دقت ارتفاعی آن بهتر از یک متر می‌باشد و در شکل ۱ نشان داده شده است. از این مدل رقومی نیز یک شبکه  $830 \times 420$  نقطه‌ای با مختصه‌های (x,y,z) معلوم استخراج شده است و ارتفاع ۵٪ از آنها با استفاده از نویز تصادفی مخدوش شده است و جهت انجام آزمون‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد.

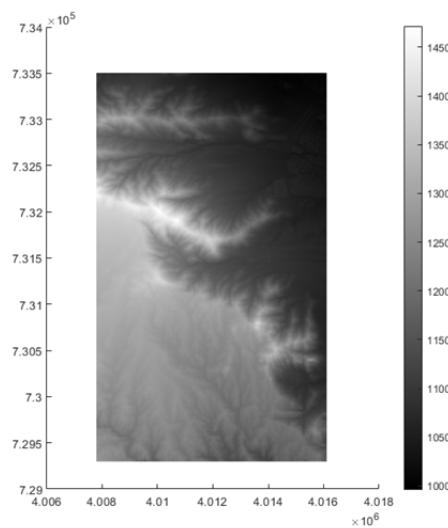
تولید مدل‌های رقومی پرداخته‌اند، از منابع مختلفی تولید شده‌اند. در اکثر مطالعات صورت گرفته از معیار جذر میانگین مربعات خطأ (RMSE) و میانگین مربعات خطأ (MAE) جهت ارزیابی دقت مدل رقومی ارتفاعی استفاده شده است (۲۵، ۲۷، ۲۹-۳۴). در چند مطالعه از روش IDW برای بهبود مدل رقومی ارتفاعی استفاده گردیده است. همچنین از شاخص RMSE برای ارزیابی دقت استفاده شده است (۲، ۳۹). در مطالعه دیگری از فیلتر کالمن برای حذف نویز مدل‌های رقومی مستخرج از تصاویر ستینل - ۱ با هدف بهبود کیفیت آن استفاده شده است و این روش با فیلتر میانه مقایسه شده است (۳۵). در این مطالعه یک فیلتر محلی انطباق پذیر بر پایه روش IDW با هدف شناسایی اشتباها، حذف آنها و بازسازی مدل رقومی ارتفاعی زمین پیشنهاد می‌شود. بخش‌های بعدی در این مقاله شامل روش پیشنهادی، محدوده مورد مطالعه، نتایج و جمع‌بندی می‌باشد.

## مواد و روش‌ها

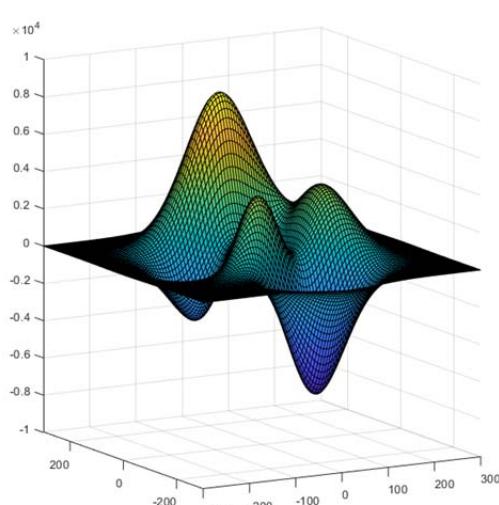
این بخش از دو زیربخش، محدوده مورد مطالعه و روش‌ها تشکیل شده است که در ادامه توضیح داده خواهد شد.

## محدوده مورد مطالعه

روش پیشنهادی بر روی دو سری داده آزمایش می‌شود. داده اول مدل رقومی شبیه ساز شده با استفاده از تابع ریاضی



(ب)



(الف)

شکل ۱. مدل رقومی ارتفاعی شبیه‌سازی شده با تابع ریاضی پیکر (الف) و استخراج شده از تصاویر ماهواره‌ای Pleiades (ب)  
Fig 1. Simulated DEM with the Peaks function (a) and extracted DEM from Pleiades satellite images (b)

در این روش با استفاده از رابطه (۱)، نقاطی از مدل رقومی ارتفاعی خطای بزرگ محسوب می‌شوند که اختلاف آن از میانگین ارتفاع نقاط همسایگی در سطح اطمینان ۹۵٪ قرار نداشته باشد.

$$|Z_i - \mu| > 1.96 \times S \quad [1]$$

اگر رابطه [۱] صدق کند آنگاه نقطه  $i$  با ارتفاع  $Z_i$  خطای بزرگ تشخیص داده می‌شود و از نقاط مدل رقومی حذف می‌گردد.

بازسازی مدل رقومی ارتفاعی با استفاده از روش‌های درونیابی

پس از شناسایی و حذف خطاهای بزرگ، حال ضروری می‌باشد که نقاط حذف شده با استفاده از همسایگی نقاط باسازی شوند. دو چالش اصلی در این مرحله وجود دارد. اول اینکه از چه تکنیک درونیابی برای بازسازی نقاط حذف شده استفاده شود و دوم اینکه تاثیر همسایگی برای انجام فرآیند درونیابی چه میزانی در نظر گرفته شود.

همانگونه که در بخش مقدمه بیان شد، روش‌های KNN، MRBF و IDW از جمله معمول‌ترین روش‌های درونیابی در تولید مدل رقومی می‌باشند. در اینجا نیز ابتدا دو روش ذکر

## روش‌ها

روش پیشنهادی از دو مرحله اصلی تشکیل می‌شود. مرحله اول شناسایی و حذف خطاهای بزرگ موجود در مدل رقومی است و مرحله دوم نیز بازسازی نقاط اشتباہ با استفاده از درونیابی به کمک مقادیر همسایگی‌های محلی می‌باشد. در ادامه این مراحل توضیح داده می‌شوند.

روش پیشنهادی ارائه شده در این مطالعه بصورت فلوچارت در شکل ۲ نشان داده شده است.

**شناسایی و حذف خطاهای بزرگ با استفاده از انحراف**

### معیار فیلتر کوتاه شده آلفا:

در اینجا تمامی نقاط یک مدل رقومی ارتفاعی مورد پردازش قرار می‌گیرد. ابتدا حول هر نقطه یک همسایگی محلی تعیین می‌شود. سپس ارتفاع نقاط همسایگی محلی بصورت یک دنباله صعودی مرتب می‌شوند. آلفا درصد از ابتدا و انتهای این دنباله حذف می‌گردد. در ادامه انحراف معیار مقادیر باقی-مانده محاسبه می‌شود. علت حذف این بخش از دنباله ارتفاع نقاط همسایگی این می‌باشد که چنانچه خطای بزرگی در ارتفاع یک یا چند نقطه از همسایگی محلی قرار داشت باعث مخدوش شدن مقدار انحراف معیار نشود (۴۰).

نیز فاصله نقطه هدف تا نقاط همسایگی می‌باشد که به توان  $\alpha$ -می‌باشند. طبیعتاً هرچه مقدار  $\alpha$  بزرگتر باشد تاثیر ارتفاع نقاط همسایگی نزدیکتر در تعیین ارتفاع مجهول نقطه هدف بیشتر می‌شود.

### روش توابع پایه شعاعی مولتی کوادریک

در روش RBF سطح تخمین از مقادیر مشاهده‌ای عبور می‌کند. این روش حالتی از شبکه عصبی مصنوعی است. تابع شعاعی تابعی به صورت رابطه [۳] است که وابسته به فاصله اقلیدسی بین نقطه هدف با ارتفاع مجهول  $p_i$  و نقاط ثابت و معلوم  $p$  است (۴۱).

$$\varphi_i(p) = \varphi(||p - p_i||) \quad [۳]$$

در رابطه [۳]،  $\varphi$  تابعی پیوسته و وابسته به فاصله نقاط می‌باشد. به لحاظ جبری روش MRBF با استفاده از روابط [۴] تا محاسبه می‌شود (۴۲):

$$\begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \vdots \\ z_n \\ z \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} r_{11} & r_{21} & \dots & r_{n1} \\ r_{12} & r_{22} & \vdots & r_{n2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{1n} & r_{2n} & \dots & r_{nn} \end{bmatrix}}_R \cdot \underbrace{\begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \vdots \\ \lambda_n \end{bmatrix}}_\lambda \quad [۴]$$

در رابطه [۴]،  $Z$  ارتفاع  $n$  نقطه معلوم،  $R$  فاصله  $n$  نقطه معلوم از یکدیگر و  $\lambda$  ضرایب معادله می‌باشد. در روش MRBF فاصله  $r$  بر اساس رابطه [۵] محاسبه می‌شود:

$$r = \sqrt{d^2 + C^2} \quad [۵]$$

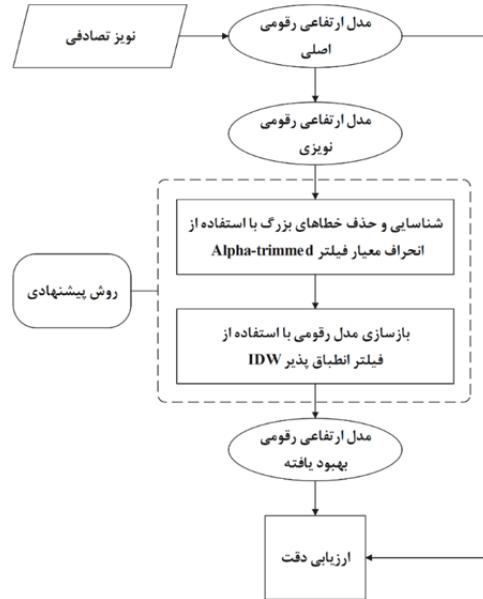
که  $d$  فاصله مسطحاتی دو نقطه در فضای اقلیدسی و  $C$  مقدار ثابت است. برای تعیین بردار  $\lambda$  از روش سرشکنی کمترین مربعات براساس رابطه [۶] استفاده می‌شود.

$$\lambda = (R^t \cdot R)^{-1} \cdot R^t \cdot Z \quad [۶]$$

در ادامه با استفاده از رابطه [۷] می‌توان ارتفاع  $m$  نقطه هدف (مجهول) را با داشتن ارتفاع  $n$  نقطه معلوم تعیین نمود.

$$\begin{bmatrix} z'_1 \\ z'_2 \\ \vdots \\ z'_m \\ z' \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} r'_{11} & r'_{21} & \dots & r'_{n1} \\ r'_{12} & r'_{22} & \vdots & r'_{n2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r'_{1m} & r'_{2m} & \dots & r'_{mn} \end{bmatrix}}_{R'} \cdot \underbrace{\begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \vdots \\ \lambda_n \end{bmatrix}}_\lambda \quad [۷]$$

شده توضیح داده می‌شوند، سپس روش پیشنهادی معرفی می‌شود.



شکل ۲. مراحل اجرای روش پیشنهادی

Fig 2. Steps of the proposed method

### روش K نزدیکترین همسایه

در این روش  $k$  نقطه با ارتفاع معلوم نزدیک به نقطه با ارتفاع مجهول انتخاب می‌شود و میانگین ارتفاع نقاط معلوم برای ارتفاع نقطه مجهول در نظر گرفته می‌شود. انتخاب  $k$  نقطه همسایه نیز با استفاده از دو استراتژی تعداد نقاط نزدیک و یا نقاط درون شعاع همسایگی صورت می‌پذیرد.

### روش وزن دهنی با استفاده از فاصله معکوس

در روش درونیابی IDW فرض بر این است که میزان همبستگی و تشابه میان همسایه‌ها با فاصله بین آنها متناسب است که می‌توان آن را به صورت تابعی با توان معکوس از فاصله هر نقطه از نقاط همسایه تعریف کرد. در این روش ارتفاع نقطه هدف با استفاده از رابطه [۲] محاسبه می‌شود (۴۱):

$$Z_U = \frac{\sum_{i=1}^n (r_i^{-\alpha} \cdot Z_i)}{\sum_{i=1}^n r_i^{-\alpha}} \quad [۲]$$

در رابطه [۲]،  $Z_U$  ارتفاع مجهول نقطه هدف می‌باشد که می‌باشد ارتفاع آن برآورد شود،  $Z_i$  ارتفاع نقاط همسایگی و  $r_i$

پس از اصلاح (بهبود یافته) با روش‌های مختلف و مدل رقومی ارتفاعی نویزی، با مدل ارتفاعی اصلی مقایسه می‌شوند و دقت آنها تخمین زده می‌شود. معیار RMSE در رابطه [۹] نشان داده شده است.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n ((Z_i - z_i) - \mu)^2}{n}} \quad [9]$$

در این رابطه  $Z_i$  ارتفاع نقطه  $i$  از مدل رقومی ارتفاعی مرجع و  $z_i$  متضاد آن از مدل رقومی ارتفاعی مورد ارزیابی می‌باشد.  $\mu$  میانگین اختلاف ارتفاع نقاط دو مدل رقومی و  $n$  تعداد کل نقاط می‌باشد.

### نتایج و بحث

روش پیشنهادی به همراه روش‌های رقابتی KNN، IDW، MRGBF بر روی مدل رقومی ارتفاعی شبیه-معمول و روشناسازی شده‌اند و نتایج این آزمون‌ها در این استریووپیاده‌سازی Pleiades معمول بر روی مدل رقومی ارتفاعی مستخرج از تصاویر IDW گذشته با هدف درونیابی و بازسازی مدل‌های رقومی ارتفاعی موردنیاز است. همانگونه که در بخش مقدمه مرور بخش ارائه خواهند شد. همانگونه که در بخش مقدمه مرور شد، روش‌های KNN، IDW و MRGBF در بسیاری از مطالعات گذشته با هدف درونیابی و بازسازی مدل‌های رقومی ارتفاعی موردنیاز استفاده قرار گرفته‌اند.

در آزمون اول چهار روش ذکر شده بر روی مدل رقومی ارتفاعی شبیه‌سازی شده که ۱۰٪ از تعداد ۱۰۰۰۰ نقطه ارتفاعی از شبکه نقاط (یعنی ۱۰۰۰ نقطه) خطای بزرگ می-باشند، اجرا شده‌اند و نتایج آنها در جدول ۱ گزارش شده است. دقت (RMSE) مدل رقومی نویزی ۱۴.۴۶۰ واحد می-باشد. همچنین شعاع همسایگی فیلتر جهت اجرای روش‌های مذکور ۳ واحد در نظر گرفته شده است.

در رابطه (۷)  $R'$  فاصله  $m$  نقطه با ارتفاع مجهول از  $n$  نقطه با ارتفاع معلوم می‌باشد.

### روش پیشنهادی IDW (انطباق‌پذیر)

یکی از نقاط ضعف روش‌های درونیابی مانند IDW در تعیین ارتفاع نقاط در بازسازی مدل‌های رقومی ارتفاعی این است که بدون در نظر گرفتن توپوگرافی منطقه و با ثابت فرض کردن مقدار  $\alpha$  در رابطه (۱) فرآیند درونیابی را انجام میدهند و این در حالی می‌باشد که این مقدار می‌تواند در مناطق کوهستانی مقداری بزرگ‌تر و در مناطق هموار مقدار کوچک‌تری انتخاب شود. از این رو روش IDW انطباق‌پذیر به عنوان روش پیشنهادی در این مطالعه، ضمن حفظ مزایای روش IDW از جمله سادگی و حجم کم پردازش، با محاسبه انحراف معیار محلی که نشان دهنده شدت توپوگرافی محلی منطقه می-باشد، وزن  $\alpha$  را تعیین می‌کند. رابطه [۸] چگونگی این محاسبات را نشان می‌دهد.

$$\alpha_l = \left[ \frac{\sigma_l - \sigma_{min}}{\sigma_{max} - \sigma_{min}} \cdot (\alpha_{max} - \alpha_{min}) \right] + \alpha_{min} \quad [8]$$

براساس رابطه (۷)، مقدار  $\alpha_l$  در هر موقعیت و متناسب با توپوگرافی منطقه تعیین می‌شود. در این رابطه مقادیر  $\sigma_l$ ،  $\sigma_{min}$ ،  $\sigma_{max}$  و  $\alpha_{min}$  و  $\alpha_{max}$  به ترتیب انحراف معیار محلی، انحراف معیار حداقل در منطقه، انحراف معیار حداکثر در منطقه، حداکثر ضریب تعیین شده  $\alpha$  توسط اپراتور و حداقل آن مقدار که توسط اپراتور تعیین می‌شود. نقطه قوت این روش این است که متناسب با میزان زبری توپوگرافی زمین عمل می‌کند و وزن  $\alpha$  متناسب با توپوگرافی تعیین می‌شود.

### معیار ارزیابی

جهت ارزیابی عملکرد روش پیشنهادی و روش‌های رقابتی از معیار RMSE استفاده شده است. مدل‌های رقومی ارتفاعی

جدول ۱. نتایج اجرای روش پیشنهادی و روش‌های رقابتی بر روی مدل رقومی ارتفاعی شبیه‌سازی شده

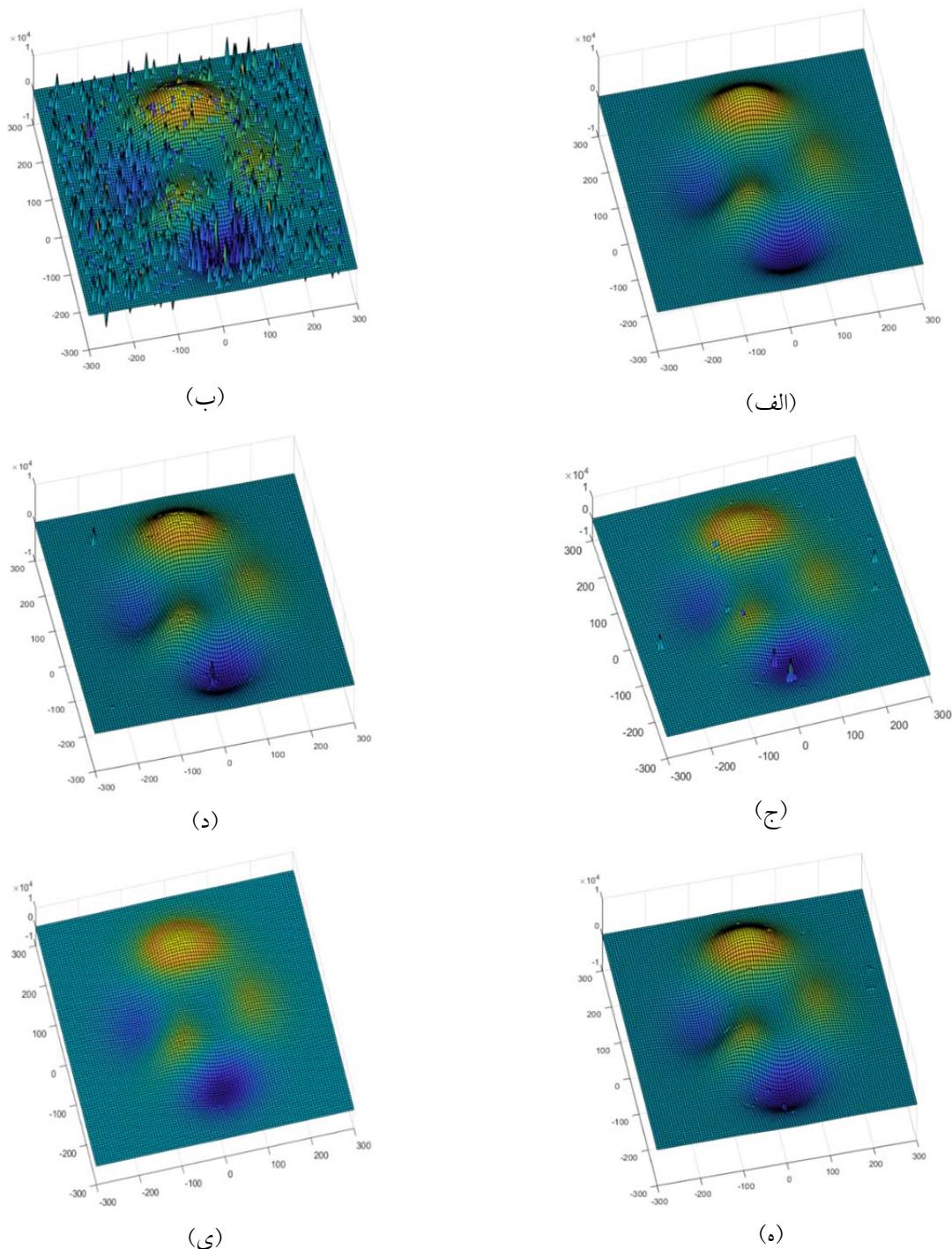
Table 1. Results of the proposed and competitive methods on the simulated DEM

روش	IDW انطباق‌پذیر	KNN	IDW	MRBF	روزگار پیدا کرد
روش	RMSE مدل رقومی ارتفاعی بهبود یافته	روزگار پیدا کرد	روزگار پیدا کرد	روزگار پیدا کرد	روزگار پیدا کرد
KNN	۲۱۷ واحد	۳۰.۷ واحد	۸۹.۵ واحد	۳۰.۷ واحد	۳۴.۸ واحد
IDW	۳۰.۷ واحد	۲۱۷ واحد	۸۹.۵ واحد	۳۰.۷ واحد	۳۴.۸ واحد
MRBF	۳۰.۷ واحد	۸۹.۵ واحد	۳۰.۷ واحد	۳۰.۷ واحد	۳۴.۸ واحد
روزگار پیدا کرد	۳۴.۸ واحد	۲۱۷ واحد	۸۹.۵ واحد	۳۰.۷ واحد	۳۰.۷ واحد

معمول همچنان خطاها بزرگ دیده می‌شود و این در حالی است که در مدل‌های رقومی ارتفاعی بازسازی شده بوسیله روش MRBF و IDW انطباق‌پذیر خطاها بزرگ کمتر دیده می‌شود و یا اصلاً وجود ندارد.

با توجه به نتایج آزمون اول و دقت پایین روش KNN و هزینه زمانی بسیار بالای روش MRBF از اجرای این روش‌ها در آزمون دوم صرف نظر شده است و تنها دو روش IDW معمول و IDW انطباق‌پذیر بر روی داده‌های واقعی تست شده‌اند. در آزمون دوم روش‌های مذکور بر روی مدل رقومی ارتفاعی مستخرج از تصاویر ماهواره‌ای که ۵٪ از تعداد نقاطه ارتفاعی از شبکه نقاط (یعنی ۱۷۴۳۰ نقطه) خطای بزرگ می‌باشند، اجرا شده‌اند و نتایج آنها در جدول (۲) گزارش شده است. دقت مدل رقومی ارتفاعی نویزی ۳۸.۳ متر می‌باشد. شعاع همسایگی در این آزمون ۷ متر تنظیم شده است.

نتایج جدول ۱ نشان می‌دهد که، دقت روش IDW انطباق‌پذیر ۳۴.۸ واحد می‌باشد و در مقایسه با روش MRBF که دقت ۳۰.۷ واحد دارد، عملکرد نسبتاً خوبی از خود نشان داده است (دقت روش MRBF تنها به اندازه ۹٪ بهتر می‌باشد) و این در حالی است که هزینه زمانی بسیار کمتری نسبت به آن دارد. روش IDW انطباق‌پذیر تنها ۱ ثانیه برای پردازش به زمان احتیاج دارد از طرفی روش MRBF زمان ۳۰.۲۱ ثانیه برای پردازش هزینه می‌کند. همچنین مشاهده می‌شود که روش پیشنهادی به مرتبه بهتر از روش IDW معمول عمل کرده است. روش پیشنهادی بهبود ۶۱٪ از نظر دقت در مقایسه با روش IDW معمول دارد و این بهبود بدون هزینه زمانی می‌باشد. در شکل ۳ مدل‌های رقومی ارتفاعی اصلاح شده در آزمون اول با استفاده از روش‌های پیشنهادی و رقابتی نمایش داده شده‌اند. شکل ۳ نشان می‌دهد که در مدل‌های رقومی ارتفاعی بازسازی شده به وسیله روش‌های KNN و IDW



شکل ۳- مدل‌های رقومی ارتفاعی شبیه سازی شده اصلی (الف)، نویزی (ب)، اصلاح شده با استفاده از روش‌های درونیابی kNN (ج)، IDW معمول (د)، MRBF (ه) و IDW انطباق‌پذیر (و)

Fig. 3- Simulated DEMs: original (a), noisy (b), modified using KNN (c), standard IDW (d), MRBF (e) and adaptable IDW (f) interpolation methods

## جدول ۲. نتایج اجرای روش پیشنهادی و روش IDW بر روی مدل رقومی ارتفاعی مستخرج از تصاویر ماهواره‌ای

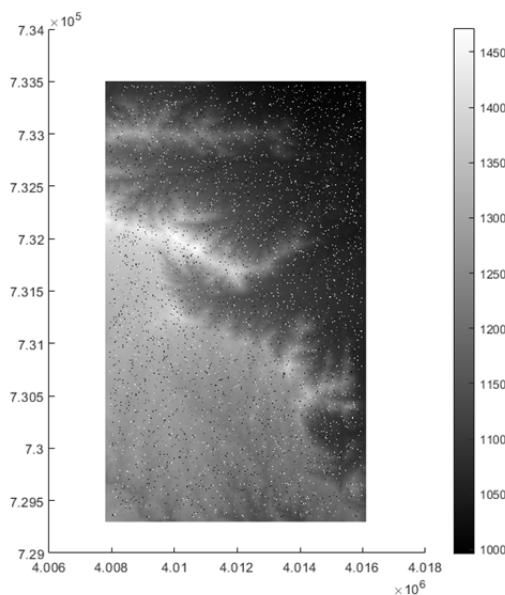
Table 1. Results of the proposed method and IDW method on DEM extracted from satellite images

روش	IDW	انطباق‌پذیر IDW	RMSE مدل رقومی ارتفاعی بهبود یافته	زمان پردازش
IDW	۲.۴۳ متر	۱.۸۹	۱۳۷۶ ثانیه	
انطباق‌پذیر IDW		۱.۸۹	۱۶۸۷ ثانیه	

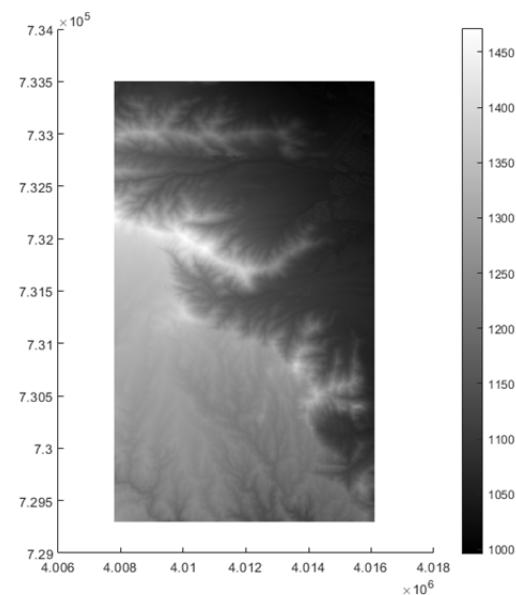
بهتر عمل نموده است و همان چند مورد خطا بزرگی که همچنان در خروجی روش IDW معمول در شکل (۴-ج) دیده می‌شود در شکل (۴-د) مشاهده نمی‌شود. بنابراین می‌توان اینگونه ادعا نمود که روش پیشنهادی در بازسازی مدل رقومی ارتفاعی که خطاها باشد باشد بزرگتر در آنها رخ داده است موفق‌تر می‌باشد. نکته قابل تأمل در این می‌باشد که عملکرد روش پیشنهادی در قیاس با روش IDW معمول در اصلاح مدل رقومی ارتفاعی شبیه‌سازی شده، بهتر نمایش داده شده است و علت آن تغییرات ارتفاعی شدید در مدل رقومی ارتفاعی شبیه‌سازی شده می‌باشد. این نشان می‌دهد که روش پیشنهادی در مناطق کوهستانی عملکرد بهتری از خود در مقایسه با مناطق هموار نشان می‌دهد.

نتایج جدول ۲ نشان می‌دهد که دقت روش IDW معمول و IDW انطباق‌پذیر به ترتیب ۲.۴۳ متر و ۱.۸۹ متر می‌باشد. روش پیشنهادی اگرچه حدود ۱۹٪ به لحاظ زمان پردازش هزینه بیشتری را تحمل می‌کند اما موجب بهبود ۲۲٪ در دقت مدل رقومی ارتفاعی بهبود یافته می‌شود. بنابراین استفاده از IDW انطباق‌پذیر در مواردی که دقت مدل رقومی ارتفاعی از اهمیت بیشتری در قیاس با زمان پردازش قرار دارد، پیشنهاد می‌شود.

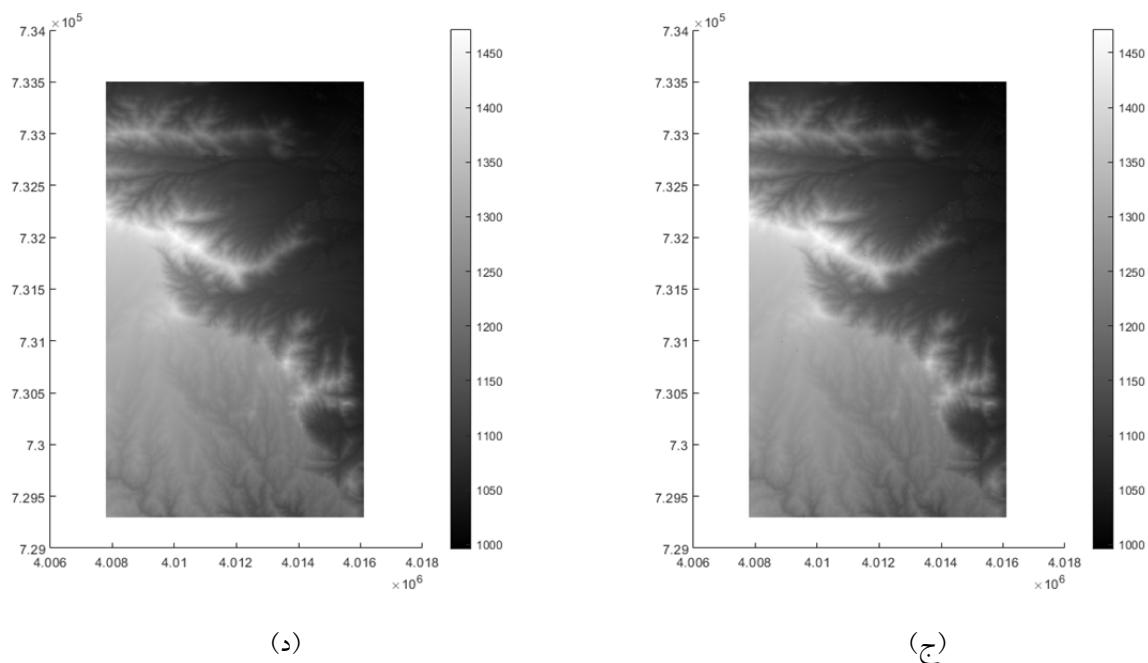
در شکل ۴ مدل‌های رقومی ارتفاعی اصلاح شده در آزمون دوم با استفاده از روش‌های مورد مطالعه، نمایش داده شده‌اند. شکل ۴ نشان می‌دهد که هردو مدل ارتفاعی بهبود یافته به وسیله روش‌های IDW معمول و IDW انطباق‌پذیر نتایج قابل قبولی دارند اگرچه روش پیشنهادی در این مورد



(ب)



(الف)



شکل ۴- مدل‌های رقومی ارتفاعی مستخرج از تصاویر ماهواره‌ای اصلی (الف)، نویزی (ب)، اصلاح شده با استفاده از روش‌های معمول (ج) و IDW انطباق‌پذیر (د)

Fig. 4- DEM derived from satellite images: original (a), noisy (b), modified using standard IDW (c) and adaptable IDW (d) interpolation methods

مذکور توسط نویز رندوم مخدوش شده‌اند و جهت انجام آزمایش‌ها استفاده گردیدند. در این پژوهش، عملکرد روش پیشنهادی با روش‌های رقابتی KNN، IDW معمول و MRBF مقایسه شده است. نتایج آزمایش‌ها بر روی مدل رقومی ارتفاعی شبیه‌سازی شده نشان می‌دهد که روش پیشنهادی می‌تواند به دقیقی نزدیک به روش MRBF که یکی از روش‌های معمول و قدرتمند درونیابی می‌باشد، دست یابد در حالی که به مراتب هزینه زمانی کمتری نسبت به آن داشته باشد. خطای جذر میانگین مربعات مدل رقومی تصحیح شده مستخرج از تصاویر ماهواره‌ای با استفاده از روش پیشنهادی ۱.۸۹ متر است و این شاخص برای روش فیلتر وزن‌دهی با استفاده از معکوس فاصله معمول ۲.۴۳ متر می‌باشد. همچنین نتایج آزمایش‌ها بر روی مدل رقومی یک متری مستخرج از تصاویر ماهواره‌ای نشان داد که مدل رقومی ارتفاعی اصلاح شده با استفاده از روش پیشنهادی می‌تواند دقت را تا ۲۲٪ در مقایسه با روش IDW معمول بهبود بخشد و به شکلی که تنها ۱۹٪ زمان

### نتیجه‌گیری

ارائه روش‌های کارآمد جهت شناسایی و حذف اشتباهات و بازسازی مدل رقومی ارتفاعی برای افزایش دقت و کیفت آنها مسئله‌ای ضروری محسوب می‌شود. در این مطالعه یک روش دو مرحله‌ای با هدف حذف اشتباهات و بازسازی مدل رقومی ارتفاعی زمین پیشنهاد گردید. در مرحله اول از روش پیشنهادی با استفاده از انحراف معیار فیلتر کوتاه شده آلفا، نقاط با خطای بزرگ شناسایی و حذف شدند. سپس در مرحله بعد با استفاده از یک فیلتر IDW انطباق‌پذیر مقادیر جدید بازیابی گردید. این فیلتر کمک می‌کند که تاثیرپذیری همسایه‌های نزدیکتر به نقطه هدف مناسب با میزان کوهستانی بودن منطقه تنظیم شود. جهت انجام آزمون‌ها از دو سری داده استفاده شده است. داده اول، مدل رقومی ارتفاعی شبیه‌سازی شده از تابع ریاضی پیکز و داده دوم مدل رقومی ارتفاعی مستخرج از تصاویر ماهواره‌ای Pleiades است که از جنوب غرب شهرستان مشهد تهیه شده است. مدل‌های رقومی ارتفاعی

نشان می‌دهد و در بازسازی مدل رقومی ارتفاعی که خطاهایی باشد بزرگتر در آن‌ها رخ داده است موثرتر عمل می‌کند.

پردازش آن بیشتر می‌باشد. روش پیشنهادی در مناطق کوهستانی عملکرد بهتری از خود در مقایسه با مناطق هموار

#### منابع مورد استفاده

1. Polidori L, El Hage M. 2020. Digital elevation model quality assessment methods: A critical review. *Remote sensing*, 12(21): 3522.
2. Gharib Bafghi Z, Tian J, d'Angelo P, Reinartz P. 2016. A new algorithm for void filling in a DSM from stereo satellite images in urban areas. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2016, 3: 55-61.
3. Bhushan S, Shean D, Alexandrov O, Henderson S. 2021. Automated digital elevation model (DEM) generation from very-high-resolution Planet SkySat triplet stereo and video imagery. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 173: 151-165.
4. Silva Id. 2020. Geomatics Applied to Civil Engineering State of the Art. In: Applications of Geomatics in Civil Engineering. Springer, pp 31-46.
5. Fijałkowska A. 2021. Analysis of the influence of DTM source data on the LS factors of the soil water erosion model values with the use of GIS technology. *Remote Sensing*, 13(4): 678.
6. Bagheri M, Jelokhani Noaryki M, Bagheri K. 2018. Investigation of the land potential of Kermanshah province for rainfed wheat cultivation using artificial neural network. *Journal of RS and GIS for Natural Resources*, 8(4): 36-48. (In Persian).
7. Scheip CM. 2021. Integrating water-classified returns in DTM generation to increase accuracy of stream delineations and geomorphic analyses. *Geomorphology*, 385: 107722.
8. Erskine J, Oxendine C, Wright W, O'banion M, Philips A. 2022. Evaluating the relationship between data resolution and the accuracy of identified helicopter landing zones (HLZs). *Applied Geography*, 139: 102652.
9. Schreyer J, Walker BB, Lakes T. 2022. Implementing urban canopy height derived from a TanDEM-X-DEM: An expert survey and case study. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 187: 345-361.
10. Polat N, Uysal M. 2018. An experimental analysis of digital elevation models generated with LiDAR Data and UAV photogrammetry. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 46(7): 1135-1142.
11. Sudalaimuthu K, Jesudhas CJ, Ramachandran U, Somanathan AK, Ganapathy S, Jeyakumar RB. 2022. Development of digital elevation model for assessment of flood vulnerable areas using Cartosat- 1 and GIS at Thamirabarani river, Tamilnadu, India. *Environmental Quality Management*, 32(1): 75-85.
12. Jawecki B, Szewrański S, Stodolak R, Wang Z. 2019. The use of digital terrain models to estimate the pace of filling the pit of a central European granite quarry with water. *Water*, 11(11): 2298.
13. Singh S, Vinod Kumar K, Jagannadha Rao M. 2020. Utilization of LiDAR DTM for systematic improvement in mapping and classification of coastal micro-geomorphology. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 48(5): 805-816.
14. Irvem A. 2011. Application of GIS to determine storage volume and surface area of reservoirs: the case study of Buyuk Karacay dam. *Int J Nat Eng Sci*, 5: 39-43.
15. Liu X, Wang N, Shao J, Chu X. 2017. An automated processing algorithm for flat areas resulting from DEM filling and interpolation. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 6(11): 376.
16. Niipele JN, Chen J. 2019. The usefulness of alos-palsar dem data for drainage extraction in semi-arid environments in The Iishana sub-basin. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 21: 57-67.
17. Ibrahim M, Al-Mashaqbah A, Koch B, Datta P. 2020. An evaluation of available digital elevation models (DEMs) for geomorphological feature analysis. *Environmental Earth Sciences*, 79(13): 1-11.
18. Zali M, Solaimani K, Habibnejad Roshan M, Miryaghoubzadeh MH. 2022. Comparison and prioritization of flooding in Nekarood sub-basins using morphometric method in GIS. *Journal of RS and GIS for Natural Resources*, 13(2): 6-10. (In Persian).
19. Guth P, Kane M. 2021. Slope, aspect, and hillshade algorithms for non-square digital elevation models. *Transactions in GIS*, 25(5): 2309-2332.
20. Toutin T. 2011. State-of-the-art of geometric correction of remote sensing data: a data fusion perspective. *International Journal of Image and Data Fusion*, 2(1): 3-35.
21. Depoutis N, Michalopoulou M, Kavoura K, Nikolakopoulos K, Sabatakakis N. 2020. Estimating soil erosion rate changes in areas affected by wildfires. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(10): 562.
22. Handayani HH, Bawasir A, Cahyono AB, Hariyanto T, Hidayat H. 2022. Surface drainage features identification using LiDAR DEM smoothing in agriculture area: a study case of Kebumen Regency, Indonesia. *International Journal of Image and Data Fusion*: 1-22.
23. Zhan D, Kwan M-P, Zhang W, Yu X, Meng B, Liu Q. 2018. The driving factors of air quality index in

- China. *Journal of Cleaner Production*, 197: 1342-1351.
24. Achilleos G. 2011. The Inverse Distance Weighted interpolation method and error propagation mechanism—creating a DEM from an analogue topographical map. *Journal of spatial Science*, 56(2): 283-304.
25. Chaplot V, Darboux F, Bourennane H, Leguédois S, Silvera N, Phachomphon K. 2006. Accuracy of interpolation techniques for the derivation of digital elevation models in relation to landform types and data density. *Geomorphology*, 77(1-2): 126-141.
26. Arun PV. 2013. A comparative analysis of different DEM interpolation methods. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 16(2): 133-139.
27. Salekin S, Burgess JH, Morgenroth J, Mason EG, Meason DF. 2018. A comparative study of three non-geostatistical methods for optimising digital elevation model interpolation. *ISPRS international journal of geo-information*, 7(8): 300.
28. Ajvazi B, Czimber K. 2019. A comparative analysis of different DEM interpolation methods in GIS: case study of Rahovec, Kosovo. *Geodesy and cartography*, 45(1): 43-48.
29. Bater CW, Coops NC. 2009. Evaluating error associated with LiDAR-derived DEM interpolation. *Computers & Geosciences*, 35(2): 289-300.
30. Stereńczak K, Ciesielski M, Balazy R, Zawiła-Niedźwiecki T. 2016. Comparison of various algorithms for DTM interpolation from LiDAR data in dense mountain forests. *European Journal of Remote Sensing*, 49(1): 599-621.
31. Chen C, Li Y, Zhao N, Yan C. 2017. Robust interpolation of DEMs from LiDAR-derived elevation data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 56(2): 1059-1068.
32. Heritage GL, Milan DJ, Large AR, Fuller IC. 2009. Influence of survey strategy and interpolation model on DEM quality. *Geomorphology*, 112(3-4): 334-344.
33. Giribabu D, Rao SS, Murthy YK. 2013. Improving Cartosat-1 DEM accuracy using synthetic stereo pair and triplet. *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*, 77: 31-43.
34. Kim S, Rhee S, Kim T. 2018. Digital surface model interpolation based on 3D mesh models. *Remote Sensing*, 11(1): 24.
35. Ghannadi MA, Alebooye S, Izadi M, Moradi A. 2020. A method for Sentinel-1 DEM outlier removal using 2-D Kalman filter. *Geocarto International*: 1-15.
36. Mukherjee S, Joshi PK, Mukherjee S, Ghosh A, Garg R, Mukhopadhyay A. 2013. Evaluation of vertical accuracy of open source Digital Elevation Model (DEM). *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 21: 205-217.
37. Moradi AR, Ghannadi MA. 2020. Presenting a method for the improvement of Sentinel-1 generated DEM, using SRTM and 2D wavelet transform. *Scientific-Research Quarterly of Geographical Data (SEPEHR)*, 29(115): 35-48.
38. Zhu Y, Liu X, Zhao J, Cao J, Wang X, Li D. 2019. Effect of DEM interpolation neighbourhood on terrain factors. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 8(1): 30.
39. Gharibafghi Z, Tian J, Reinartz P. 2018. Modified superpixel segmentation for digital surface model refinement and building extraction from satellite stereo imagery. *Remote Sensing*, 10(11): 1824.
40. Bednar J, Watt T. 1984. Alpha-trimmed means and their relationship to median filters. *IEEE Transactions on acoustics, speech, and signal processing*, 32(1): 145-153.
41. Esfandiari F, Ghorbani Filabadi R, Nasiri Khiavi A, Mostafazadeh R. 2019. Assessing the accuracy of algebraic and geostatistical techniques to determine the spatial variations of groundwater quality in Boroojen Plain. *Journal of Natural Environmental Hazards*, 8(20): 115-130. (In Persian).
42. Asghari Saraskanroud S, Ghale E, Ebady E. 2021. Investigation of land use changes and its relationship with groundwater level (Case study: Ardabil plain). *Journal of RS and GIS for Natural Resources*, 12(1): 86-106. (In Persian).
43. Ghannadi M, Saadatseresht M, Motagh M. 2015. Sentinel-1 Image Matching Using Strong Scatters. *ISPRS-International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XL-1-W5: 233-235.



Original paper

## A Local Filter for Improve Digital Elevation Model

Mohammad Amin Ghannadi<sup>1\*</sup>, Matin Shahr<sup>2</sup>

Received: 2022-07-01 / Accepted: 2022-12-31 / Published: 2025-03-06

### Abstract

An accurate, high-quality Digital Elevation Model (DEM) from the ground is essential for many applications. Due to some data collection problems as well as weaknesses in DEM production techniques, including interpolation methods, these models are associated with some blunder errors that must be edited manually or automatically. In this study, a method for removing noise and blunders as well as improving the DEM is proposed. In this two-step method, first, with the standard deviation of the alpha-trimmed filter, points with blunders are identified and removed. Then, an adaptive inverse distance weighted filter is applied to remove blunders and refine the DEM. The proposed method and some common competitive methods have been applied and evaluated on a simulated DEM and a DEM extracted from satellite stereo images from the southwest of Mashhad city. The root means square error of the DEM extracted from satellite images using the proposed method is 1.89 meters, while this criteria for the inverse distance weighted filter method is 2.43 meters. The experimental results show that the proposed method, despite a 20% increase in time cost, can improve the accuracy of the modified DEM by at least 22% compared to the

weighting method using the inverse distance. Therefore, the filter proposed in this study can be used to remove noise and improve DEM when increasing the accuracy is a priority.

### Introduction

Digital Elevation Models (DEMs) represents the topographic surface of the Earth excluding trees, buildings, and other surface objects, which is a three-dimensional computer graphic representation of altitude data. DEMs play a key role in many fields including civil engineering, earth sciences, natural resource planning and management, geology, military applications, surveying, photogrammetry, and spatial information systems. DEMs are prepared in different ways. These models are generated from direct surveying, satellite systems including Global Positioning System (GPS), aerial imagery, LiDAR systems, or satellite imagery. DEMs are subject to a variety of errors. These include blunders during data collection, systematic errors such as directional errors in stereo imaging, and random errors which are unavoidable. These errors can also vary geographically depending on ground conditions. In addition to the errors in data collection to produce a DEMs, the production process and interpolation techniques are also associated with errors. Therefore, achieving a high-quality DEMs is a serious challenge. Thus, studies have been conducted on error sources in DEMs, noise removal, and their improvement. In some previous studies, the role of interpolation techniques in the production of DEMs has been evaluated. Among them,

Mohammad Amin Ghannadi<sup>1</sup>(✉), Matin Shahr<sup>2</sup>

1-Assistant Professor of Surveying Engineering Department, Faculty of Geoscience Engineering, Arak University of Technology

2-Assistant Professor of Surveying Engineering Department, Faculty of Geoscience Engineering, Arak University of Technology

DOI: 10.30495/girs.2022.1962282.1992

e-mail: m.ghannadi@arakut.ac.ir

KNN, IDW methods, and multiquadric radial base functions (MRBF) are three of the most common methods. Most studies have used the root mean square error (RMSE) to evaluate the accuracy of the DEMs. In this study, an adaptive local filter based on the IDW method is proposed to detect noise, remove them, and reconstruct the DEMs.

## Material And Methods

The proposed method is tested on two datasets. The first dataset is a simulated DEM using the Peaks mathematical function. A  $100 \times 100$  grid of points with known coordinates are extracted from this function. The z value of 1000 points, which is 10% of the total points, is distorted using random noise (the range of this noise is set to the minimum and maximum height of the area) and is utilized to implement the proposed method and other competitive methods. The second dataset used in this study is a DEM generated from Pleiades satellite images from southwest of Mashhad. This area of 9556 hectares has been selected from the southwest of Mashhad and includes flat, urban, and mountainous areas. The minimum height in this area is 960 meters and the maximum is 1470 meters. The UTM coordinates for this region (40 north) are from the northeast (740490, 4016200) to the southwest (729300, 4007800). The resolution of the DEM under study is one meter and its height accuracy is better than one meter. From this DEM, a  $430 \times 830$  network of points with known coordinates has been extracted the height of 5% of them has been distorted using random noise and is used to perform tests.

The proposed method consists of two main steps. The first step is to identify and eliminate blunders in the DEM, and the second step is to reconstruct the blunder points using interpolation with the help of local neighborhood values. These steps are explained below. In this method, all the points of a DEM are processed. First, a local neighborhood is determined around each point and then the heights of the local neighborhoods are arranged in ascending order. The alpha percentage is removed from the beginning and end of this sequence. Afterward, the standard deviation of the remaining values is calculated. The reason for removing this part of the neighborhood point elevation sequence is that if there is a blunder in the height of one or more points of the local neighborhood, it does not distort the standard deviation. One of the weaknesses of interpolation methods, such as IDW, is their approach to determining

the height of points in DEMs. These methods perform interpolation without considering the topography of the area. Additionally, they assume a constant value for distance power during the process. However, this amount can be selected as a larger amount in mountainous areas and a smaller amount in flat areas. Therefore, the adaptable IDW method maintains the advantages of the IDW method such as simplicity and low processing volume, as well as determining the value of distance power by calculating the local standard deviation that indicates the intensity of local topography. RMSE criterion has been used to evaluate the performance of the proposed method and competitive methods. Modified DEMs and noisy DEMs are compared to the original DEMs, and their accuracy is assessed.

## Results and discussion

The proposed method along with the competitive methods of KNN, conventional IDW, and MRBF method are implemented on the simulated DEM, and the proposed method along with the competitive IDW method is implemented on DEM extracted from Pleiades stereo images. The results of these tests will be presented in this section. In the first test, the four methods that were mentioned are performed on a simulated DEM, in which 10% of the 10,000 elevation points of the network (i.e., 1000 points) blunders. The results show that the adaptive IDW method works as well as the MRBF method (the accuracy of the MRBF method is 9% better), while it is much less time-consuming. On the other hand, it can be seen that the proposed method has worked much better than the conventional IDW method. In the second test, two conventional and adaptive IDW methods were tested on real data. In the second test, the mentioned methods were performed on a DEM extracted from satellite images, in which 5% of the 348600 elevation points of the network (i.e., 17430 points) are blunders. The results show that the proposed method improves the accuracy of the DEM by 22% although it is about 19% more expensive in terms of processing time. Therefore, using adaptive IDW is recommended in cases where the accuracy of the DEM is more important than processing time.

## Conclusion

The use of DEMs is important in many fields of science; thus, the production of these models with high accuracy

is essential. The accuracy of DEMs is affected by various factors. Therefore, providing efficient methods to identify and eliminate blunders and refine the DEMs is important for researchers. In this study, a two-stage method with the aim of eliminating blunders and reconstructing the DEM is proposed. In the first stage of the proposed method, using the standard deviation of the shortened alpha filter, points with blunders were identified and removed. Then, in the next step, new values were retrieved using an adaptive IDW filter. This filter helps to adjust the influence of the neighbors

closer to the target point according to the mountainous nature of the area. The performance of the proposed method is compared to several competitive methods, including conventional IDW, in this study. The experimental results show that the proposed method can improve the accuracy of the modified DEM by up to 22% compared to conventional IDW, despite having only a 19% longer processing time.

**Keywords:** Digital Elevation Model, Blunder removal, DEM refinement, Adaptive filter

**Please cite this article as:** Ghannadi M, A, Shahr M. A Local Filter for Improve Digital Elevation Model. Journal of RS and GIS for Natural Resources, 15(4): 68-84