

## ارائه یک روش مورفولوژی مبنا جهت فیلترینگ ابرنقاط برای استخراج مدل رقومی زمین

بهناز بیگدلی<sup>۱\*</sup>، حامد امینی امیرکلائی<sup>۲</sup>، پریام پهلوانی<sup>۳</sup>

استادیار دانشکده مهندسی عمران-دانشگاه صنعتی شاهرود -۱

دانشجوی دکترا فتوگرامتری دانشکده مهندسی نقشه برداری و اطلاعات مکانی-پردیس دانشکده‌های فنی-دانشگاه تهران -۲

استادیار دانشکده مهندسی نقشه برداری و اطلاعات مکانی-پردیس دانشکده‌های فنی-دانشگاه تهران -۳

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۱۱/۱۳ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۱۲/۱۶

### چکیده

مدل رقومی زمین از جمله مهم‌ترین محصولات مکانی است که از دیرباز پایه بسیاری از پروژه‌های کاربردی مرتبط با اطلاعات مکانی باشد. امروزه می‌توان با استفاده از تکنولوژی سنجنده لایدار به ابرنقاطه‌ای متراکم از سطح زمین دست یافت. درواقع ابرنقاطه حاصل، یک مدل رقومی سطحی است که حاوی عوارض زمینی و غیرزمینی است. هدف از این مقاله، ارائه روشی کارآمد برای استخراج مدل رقومی زمین از مدل سطحی به دست آمده از ابرنقاط می‌باشد. در این راستا، ابتدا با انجام پیش‌پردازش، نویز موجود در داده‌ها حذف گشته و سپس داده‌های نامنظم ابرنقاط به داده‌ای منظم و رستری تبدیل شدند. در مرحله بعد با پیشنهاد روش تورم ژئودزیک تدریجی به‌همراه روش جستجو و برچسب‌زنی، به شناسایی و حذف عوارض غیرزمینی پرداخته شد. اساس این روش افزایش المان ساختاری به‌صورت مرحله‌ای، بررسی میزان ناهمگنی ارتفاعی و حذف تدریجی عوارض غیرزمینی است. همچنین بهره‌گیری از روش ابتکاری جستجو برچسب‌زنی که براساس میزان تغییر شیب عمل می‌نماید، به حذف بهتر و دقیق‌تر عوارض غیرزمینی کمک شایان توجهی نمود. در نهایت با حذف عوارض غیرزمینی و درونیابی مناطق ازدست‌رفته، مدل رقومی زمین به دست می‌آید. جهت ارزیابی الگوریتم پیشنهادی از داده‌های مرجع ارائه شده توسط سازمان بین‌المللی فتوگرامتری و سنجش از دور (ISPRS) استفاده شد. با ارزیابی در ۵ ناحیه مطالعاتی به ترتیب مقادیر ۰٪، ۸٪، ۳٪، ۶٪ و ۸٪ برای میانگین خطای نوع اول، خطای نوع دوم، خطای کلی و خطای کاپا به دست آمد که نشان از توانایی الگوریتم پیشنهادی در حذف عوارض غیرزمینی داشت.

کلیدواژه‌ها: مدل رقومی زمین، ابرنقاط، تورم ژئودزیک، برچسب‌گذاری، عوارض غیرزمینی

## ۱- مقدمه

تนาظریابی چگال و دست‌یابی به ابرنقاط با تراکم بالا، دقت مناسب و هزینه پایین را فراهم نموده‌اند. با دسترسی به ابرنقاط، تولید DTM با استفاده از مدل رقومی سطحی<sup>۲</sup> (DSM) که می‌تواند حاصل از تناظریابی و یا اخذ مستقیم سنجنده لایدار باشد، از جمله چالش‌های مهم تحقیقات است [۳]. مدل رقومی سطحی نمایش دهنده مدل سطحی درختان، ساختمان‌ها، و دیگر عوارض بالای سطح زمین می‌باشد. عوارض طبیعی و مصنوعی زمین عامل جداکننده DTM و DSM از یکدیگر می‌باشند. از این‌رو، با در اختیار داشتن DSM، ساخت DTM مطرح می‌شود که پایه بسیاری از فرآیندها نظیر شناسایی و طبقه‌بندی عوارض روی سطح زمین می‌باشد [۴]. زیرا از تفاضل این دو، موقعیت و ارتفاع عوارض طبیعی و مصنوعی زمین نظیر درختان و ساختمان‌ها استخراج می‌گردد که جهت شناسایی عوارض مختلف بسیار حائز اهمیت می‌باشد. انجام دستی استخراج DTM زمان‌بر و خسته‌کننده بوده و درصد اشتباه در آن زیاد می‌باشد. در انجام دستی باید کل منطقه به دقت مورد بررسی و تفسیر قرار گرفته و نقاط حساس به درستی انتخاب گردند.

از جمله اولین تحقیقات برای جداسازی عوارض غیرزمینی و فیلتر کردن آن‌ها از داده‌های ابرنقاط توسط کیلیان و همکاران [۴] صورت گرفت که در آن از توابع مورفولوژی برای حذف عوارض غیرزمینی بهره برده است. توابع مورفولوژی برای اعمال نیازمند تعیین المان ساختاری با شکل و اندازه مشخص می‌باشند. در این روش، پس از اعمال فیلتر گشایش مورفولوژی یک پنجره جستجو با ابعاد مشخص استفاده گردید تا در هر اسکن کمینه ارتفاع را شناسایی نماید. سپس با درون‌یابی<sup>۳</sup> نقاط حاصله DTM منطقه استخراج گردید. این تحقیق نشان داد که اندازه ابعاد

سطح زمین یک سطح پیوسته است و داشتن یک مدل کامل از این سطح نیازمند تعداد نامحدودی نقطه است که در عمل ممکن نیست. از این‌رو نمونه‌برداری نقاط زمینی می‌تواند اطلاعات موردنیاز را فراهم سازد. نمونه‌برداری درواقع به معنای انتخاب مجموعه‌ای از نقاط زمینی با دقت بالا است. مدل رقومی زمین (DTM)<sup>۱</sup> توسط تابعی ریاضی فاصله بین این نقاط را پر کرده و از حالت گسسته به صورت پیوسته در می‌آورد [۱]. در حقیقت تابع نمایش دهنده سطح و نقاط نمونه‌برداری، اجزای تشکیل دهنده DTM می‌باشند. آنچاکه در مدل رقومی زمین مختصات ارتفاعی تابعی از دو مؤلفه مسطحاتی است، فضای DTM را می‌توان یک فضای ۲.۵ بعدی نامید ( $z = f(x,y)$ ) [۱].

DTM دارای کاربردهای متعدد و گسترده‌ای در علوم و حوزه‌های مختلف اطلاعات مکانی است که از آن جمله می‌توان به برنامه‌ریزی و طراحی عمرانی، سه‌بعدی سازی برای اهداف نظامی، طراحی و برنامه‌ریزی شهری، تجزیه و تحلیل‌ها و شبیه‌سازی‌های هیدرولیکی، تجزیه و تحلیل‌ها دید بین اشیا روی سطح زمین، تجزیه و تحلیل‌های ژئومورفولوژی و فرسایش خاک و تجزیه و تحلیل‌های زمین آمار اشاره نمود [۲]. از این‌رو استخراج DTM با استفاده از داده‌های حاصل از سنجنده‌های مختلف بسیار حائز اهمیت است. در این راستا، سنجنده‌های غیرفعال نوری به صورت گسترده جهت محاسبه مختصات سه‌بعدی پس از تناظریابی زوج تصویر استفاده گشته‌اند [۲]. با ظهور سنجنده لایدار و اخذ مستقیم داده‌های سه‌بعدی از سطح زمین با تراکم و دقت بالا، استفاده از این داده‌ها در جهت به دست آوردن DTM مورد بررسی قرار گرفت. امروزه پهپادهای سنجش از دوری با توانایی اخذ تصاویر زیاد و با قدرت تفکیک بالا از یک ناحیه، امکان

<sup>2</sup> Digital Surface model (DSM)

<sup>3</sup> Interpolation

<sup>1</sup> Digital Terrain Model (DTM)

لایدار یک سطح شبکه‌بندی منظم<sup>۳</sup> اولیه و کمینه ایجاد شد. سپس با استفاده از عملگر مورفولوژی نقاط به دو گروه زمینی و غیرزمینی طبقه‌بندی شدند. در مرحله بعد با در نظر گیری نقاط غیرزمینی و افزایش ابعاد المان ساختاری و حدآستانه مربوط به ارتفاع، شناسایی و حذف عوارض غیرزمینی انجام گردید. این روند تا جایی ادامه یافت که اندازه المان ساختاری از حدآستانه تعیین شده، بزرگ‌تر شود. ووسلمن [۷] ساختار هندسی سطح زمین را با استفاده از یک المان ساختاری شبیه به مخروط وارونه با شعاع قاعده معین تقریب زد. در این روش، فرض اساسی اختلاف ارتفاع کم، بین دو نقطه زمینی نزدیک به یکدیگر است. برای هر نقطه یک مخروط وارونه در نظر گرفته شده و نقطه متناظر با هر مخروطی که هیچ نقطه‌ای در زیر آن قرار نگرفت، به عنوان نقطه زمینی در نظر گرفته شد. سیتوول و ووسلمن [۸] با تعریف حدآستانه‌ای متغیر و متناسب با میزان شیب، به شناسایی و حذف نقاط غیرزمینی پرداختند. به طوریکه در مناطق شیبدار، اختلاف ارتفاع بیشتری قابل قبول است. اکسلسون [۹] ابتدا با چند نقطه اولیه یک شبکه را ایجاد نمود، سپس برای هر نقطه سه زاویه فضایی - که هر یک میان نقطه مورد نظر و سه نقطه از شبکه ایجاد شده بود - محاسبه گردید. اگر مقادیر این زوایا از حدآستانه‌ای کمتر بود، نقطه موردنظر مربوط به DTM در نظر گرفته شده و به شبکه اضافه می‌گردد، در غیر این صورت، نقطه موردنظر به عنوان نقاط غیرزمینی حذف می‌گردد. کراس و همکاران [۱۰] تقریب اولیه‌ای از DTM را برای شروع الگوریتم استفاده نمودند و با اندازه‌گیری فاصله نقاط از صفحه اولیه به آن‌ها وزن دادند. سپس از نقاط دارای وزن برای تخمین مدل توسط یک مدل تخمین خطی<sup>۴</sup> بهره برdenد. اگر فاصله نقطه‌ای از صفحه تخمین زده شده از حدآستانه

المان ساختاری عملگر گشايش مورفولوژی تأثير بسیار زیادی بر روی مناطقی دارد که نقطه‌ای در آن مناطق وجود ندارد. کوچک بودن ابعاد فیلتر باعث می‌شود که عارضه مصنوعی حذف نشود و اگر ابعاد فیلتر خیلی زیاد گردد، قسمتی از سطح زمین به عنوان عارضه مصنوعی حذف می‌گردد. در این روش به هر نقطه ورنی داده شده و طبق آن ابعاد پنجره گشايش<sup>۱</sup> انتخاب شدند. سوهن و دومن [۵] تولید DTM را با یک روند شناسایی دو مرحله‌ای متراکم‌سازی روبه‌بالا و روبه‌پایین انجام دادند. در متراکم‌سازی رو به پائین چهار نقطه زمینی در چهار طرف ابرنقطاط درنظر گرفته شد و مستطیلی تشکیل داده شد که تمام نقاط را دربر داشت. سپس این نقاط به روش دلوئی<sup>۲</sup> مثلثبندی شدند تا تحلیل پردازش آن‌ها ممکن پذیر باشد. در داخل هر یک از مثلث‌ها کم ارتفاع‌ترین نقطه به عنوان نقطه زمینی در نظر گرفته شد و مثلثبندی با نقاط جدید تکرار گشت. روند شناسایی کم ارتفاع‌ترین نقطه و مثلثبندی باقی نقاط تا جایی ادامه می‌یابد که دیگر هیچ نقطه‌ای پائین سطح مثلثبندی شده، قرار نگیرد [۵]. در متراکم‌سازی روبه‌بالا سطح مثلثبندی تولیدشده در مرحله قبل به عنوان تقریب اولیه‌ای از سطح زمین مورد استفاده قرار گرفته و طی روندی بهینه گردید. بدین صورت که یک آستانه ارتفاعی برروی سطح در نظر گرفته و یک سطح فرضی مشابه در بالای آن ایجاد شد. سپس تمامی نقاط محصور بین این دو سطح به عنوان نقاط زمینی در نظر گرفته شدند. این روند تا زمانی ادامه یافت که دیگر هیچ نقطه‌ای بین سطح اولیه و سطح فرضی بالای آن قرار نگیرد. درنهایت سطح به دست آمده بهترین تقریب از DTM است. زانگ و همکاران [۶] از یک روند پیش رونده برای حذف عوارض غیرزمینی و رسیدن به سطح زمین بهره گرفتند. به طوری که در ابتدا با استفاده از داده‌های

<sup>3</sup> Grid Surface

<sup>4</sup> Linear Prediction Model

<sup>1</sup> Opening

<sup>2</sup> Delaunay

گرادیان بر سطح، درون‌یابی اسپلاین صفحه باریک<sup>۵</sup> به کار گرفته شد. درنهایت جهت افزودن جزئیات به نتایج درون‌یابی از یک فیلتر بالاگذر مولوفوژی مبنا استفاده گردید. به‌طوری‌که در هر مرحله مقادیر باقیمانده‌های سطح درون‌یابی شده محاسبه گشت و با در نظر گیری یک حد آستانه مناسب مقادیر غیرزمینی حذف شدند. یوانا و همکاران [۱۶] بیان نمودند که استفاده تنها از شبیب برای شناسایی عوارض غیرزمینی ایراداتی دارد. به‌طوری‌که در شناسایی ساختمان‌های بزرگ با سقف مسطح استفاده از شبیب کارآمد نبوده و مقایسه شبیب نقاط همسایه تغییری را مبنی بر وجود عارضه غیرزمینی نشان نمی‌دهد. علاوه‌براین به دلیل پیچیدگی بالای سطح زمین استفاده از یک حد آستانه برای شناسایی عوارض غیرزمینی امکان پذیر نمی‌باشد. به همین دلیل با در نظر گرفتن نقاط همسایه هر نقطه در یک پنجره  $3 \times 3$ ، یک صفحه ایجاد گشته و اختلاف ارتفاع نقاط از صفحه مذکور محاسبه گردید. نقاط نزدیک‌تر از حدی به صفحه به عنوان نقاط زمینی انتخاب گشتند. برای جلوگیری از محدود کردن الگوریتم، با در نظر گرفتن یک حد آستانه برای شبیب از یک روش خود تطبیقی<sup>۶</sup> که شبیب محلی را در نظر می‌گیرد، استفاده شد. یونفی و همکاران [۱۷] میزان خمیدگی<sup>۷</sup> و کشیدگی<sup>۸</sup> داده‌های شدت سیگنال لایدار را محاسبه نمودند. سپس نقاط قله<sup>۹</sup> مربوط به مقادیر محاسبه، انتخاب و حذف گشتند و دوباره مقادیر کشیدگی و خمیدگی محاسبه گردید تا تمام نقاط بررسی شوند. این دو پارامتر در مناطق گیاهی و زمین دارای مقادیر متفاوتی می‌باشند. در واقع مقادیر این دو پارامتر در مناطق مسطح کم و در مناطق دارای ناهمواری، زیاد می‌باشد. بلیغ جهرمی و همکاران [۱۸]

<sup>5</sup> Thin plate Spline<sup>6</sup> Self-Adaptive<sup>7</sup> Skewness<sup>8</sup> Kurtosis<sup>9</sup> Peak

مورد قبول بیشتر باشد، آن نقطه به عنوان نقطه غیرزمینی حذف گشته و صفحه دوباره برآش داده می‌شود. باندara و همکاران [۱۱] برای حل مشکل شناسایی نقاط غیرزمینی مربوط به DSM از شبکه عصبی مصنوعی<sup>۱</sup> بهره گرفت. یک شبکه عصبی مصنوعی پس انتشار<sup>۲</sup> چند لایه<sup>۳</sup> به دلیل توانایی مناسب در شناسایی الگو انتخاب شد. کوبلر [۱۲] روندی با عنوان درونیابی تکراری ارائه داد و بر روی نواحی دارای پوشش گیاهی مرکز نمود. به‌طوری‌که در یک روند تکراری نقاط غیرزمینی شناسایی و حذف گشته و مدل رقومی در هر مرتبه به روزرسانی گردید تا نتیجه نهایی به دست آید. درواقع در هر مرحله تعدادی از نقاط حذف و با استفاده از مابقی نقاط درون‌یابی انجام گردید تا به صورت تدریجی دقت مدل بهبود یابد. تیان و همکاران [۱۳] ابتدا کلاس‌بندی روی داده‌ها انجام داد و داده‌ها در چهار کلاس زمین، ساختمان، مناطق جنگلی با ارتفاع کم و با ارتفاع زیاد طبقه‌بندی شدند. سپس با استفاده از نقاط موجود در کلاس زمین یک مدل اولیه از داده‌ها ایجاد گردید و هر کلاس به صورت جداگانه موردنبررسی قرار گرفته و نتایج استخراج DTM بهبود داده شد. پرکو و همکاران [۱۴] با طراحی نواههای اسکنی در جهات مختلف و بهره‌گیری از پارامتر شبیب به شناسایی عوارض غیرزمینی پرداختند. مونگاس و زالیک [۱۵] از فیلترهای مورفوولوژی برای حذف خطاهای فاحش استفاده نمود. به‌طوری‌که عملگر گشايش سبب حذف داده‌های بسیار بزرگ و همارتفاع شدن آن قسمت‌ها با مقادیر اطراف آن و عملگر انسداد<sup>۴</sup> باعث حذف مقادیر کوچک و هم ترازی آن‌ها با مقادیر اطراف گردید. در مرحله بعد جهت کاهش تأثیر

<sup>1</sup> Artificial Neural Networks (ANN)<sup>2</sup> Back Propagation<sup>3</sup> Multi-Layer<sup>4</sup> Closing

- یک المان ساختاری مشخص در فرآیند استخراج DTM موفق نبوده و تحقیقات رو به استفاده از فیلترهای پیشرونده باشند به این معنا که اندازه المان ساختاری مطابق با برخی پارامترها که متناسب با ماهیت و نوع ناهمواری منطقه می‌باشد، تعیین گردد [۱۲، ۲۱].
- **عملگرهای اسکن جهت‌دار:** به استثنای تعدادی از عملگرهای استخراج DTM، بیشتر آن‌ها در دو راستا جستجو و محاسبات را انجام می‌دهند. به‌طوری‌که با بررسی و برچسب‌گذاری عوارض غیرزمینی در دو راستا به استخراج هر چه بهتر این عوارض کمک می‌نمایند [۶، ۷ و ۲۲].
  - **عملگرهای منحنی مبنای:** مدل تطابقی پویا از روش‌هایی است که برای نقشه‌برداری منحنی میزان استفاده می‌شوند. این الگوریتم‌ها از یک مدل شی‌ای پویا برای نمایش مدل سه‌بعدی منحنی‌ها استفاده می‌نمایند بدین صورت که شبکه نقاط غیرزمینی را با در اندازه‌گیری میزان گراپش<sup>۳</sup> تدریجی حذف می‌نماید [۲۳، ۲۴، ۲۵ و ۲۶].
  - **عملگرهای TIN مبنای:** این روش‌ها به جای کار برروی داده‌های منظم، برروی ابرنقاط نامنظم کار می‌نمایند. به‌طوری‌که با مثلث‌بندی این نقاط و یافتن نقاط همسایه براساس اضلاع مشترک و بررسی شرایط نقاط موجود، در صورت فراهم بودن شرایط مرسوط به نقاط غیرزمینی، نقطه مورد حذف می‌گردد. شرایط در نظر گرفته شده برای شناسایی نقاط غیرزمینی نظیر داشتن شبیه بالا، تغییر ارتفاع ناگهانی زیاد، عدم وجود همسایه در فاصله‌ای مشخص می‌باشند [۹ و ۲۷].

<sup>3</sup> Gravitation

روشی بر مبنای کلاسه‌بندی شبکه عصبی با عنوان BVMS ارائه نمودند. در این روش ابتدا یک کلاسه‌بندی اولیه از طریق بررسی مجزای نقاط، برآش یک صفحه به نقطه موردنظر با درنظرگیری تعدادی همسایه و بررسی میزان زبری نقطه در رابطه با زمینی یا غیرزمینی بودن نقطه تصمیم‌گیری می‌شود. نقاط انتخاب شده در این مرحله به عنوان نقاط آموزشی شبکه عصبی برای تعیین ماهیت دیگر نقاط استفاده می‌شود. برای تحلیل بهتر روش‌های موجود استخراج DTM می‌توان آن‌ها در شش گروه مورد بررسی قرار داد که در ادامه به تشریح می‌گردد:

- **عملگرهای قطعه‌بندی مبنای:** روش‌های قطعه‌بندی و خوشه‌بندی از روش‌های رایج در طبقه‌بندی عوارض سطح زمین می‌باشند و در این راستا، تلاش‌های بسیاری در راستای جداسازی و تفکیک ابرنقاط لایدار صورت گرفته است [۱۹ و ۲۰]. در واقع هدف این روش‌ها در ابتدا قطعه‌بندی کردن تمام عوارض سطح زمین و بررسی قطعات شناسایی شده به جای نقاط به صورت مجزا می‌باشد. به عبارت بهتر با این کار سعی دارند با تصمیم‌گیری در مورد ماهیت قطعه‌هایی که از نقاط با ویژگی‌های ساختاری مختلف تشکیل شده‌اند، دقت فرآیند شناسایی عوارض غیرزمینی را بهبود بخشنند.

- **عملگرهای مورفولوژی مبنای:** فیلترهای مورفولوژی این را اثبات نموده‌اند که توانایی شناسایی عوارض غیرزمینی را دارا می‌باشند، به‌طوری‌که استفاده مناسب از فیلترهای تورم<sup>۱</sup>، فرسایش<sup>۲</sup>، انسداد و گشايش می‌تواند به دستیابی DTM با دقت مناسب، کمک شایان توجهی نماید [۱۲]. تنوع بالای عوارض غیرزمینی سبب شده است که استفاده از این عملگرهای با

<sup>1</sup> Dilation

<sup>2</sup> Erosion

اسکن جهت دار قرار می‌گیرد. مطابق آنچه در بخش آتی بیان می‌گردد، تلفیق این دو روش باعث به دست آوردن نتایج با دقت و صحت بیشتر می‌گردد. در ادامه ساختار مقاله به این صورت است که در بخش ۲ روند پیشنهادی مطرح شده است. در بخش ۳ روند پیشنهادی پیاده سازی شده و مورد ارزیابی قرار می‌گیرد و در نهایت در بخش ۴ نتایج حاصل شده از این مقاله ارائه شده و مورد بحث قرار می‌گیرد.

## ۲- روش پیشنهادی

مراحل روند پیشنهادی این مقاله جهت استخراج DTM با استفاده از ابرنقاط در شکل (۱) آورده شده است. در راستای شرح کامل روند پیشنهادی، در بخش ۱-۲، روندی برای پیش پردازش و حذف داده های اشتباه و نیز منظم و رستر سازی ابرنقاط ارائه می شود. سپس در بخش ۲-۲، الگوریتم تورم ژئودزیک تدریجی پیشنهاد شده برای جداسازی داده های زمینی و غیرزمینی ارائه می‌گردد. همچنین یک الگوریتم جستجو و برچسب گذاری نیز پیشنهاد گردید تا با ترکیب نتایج این دو الگوریتم، کلاس نهایی عوارض غیرزمینی به دست آید.

### ۲-۱- پیش پردازش و رستر سازی داده ها

بر اساس گزارش ISPRS دو نوع داده پرت و اشتباه در ابرنقاط وجود دارد که در نوع اول، نقاط در ارتفاع بالاتری نسبت به ارتفاع پایین تری نسبت به ارتفاع حقیقی دوم نقاط در ارتفاع پایین تری نسبت به ارتفاع حقیقی قرار می‌گیرد [۳۲]. حالت اول مختص داده های لایدار می باشد که پرتوهای ارسالی در برخورد به موادی نظیر هواپیما یا پرنده گان در حال پرواز پیش از برخورد به زمین بازتاب پیدا می نمایند که این باعث ثبت نقطه در ارتفاعی بالاتر از مختصات حقیقی می‌گردد. حالت دوم می تواند ناشی از برخورد پرتوهای ارسالی لایدار به عوارض براق و شیشه ای باشد که باعث ایجاد خطای بازگشت چندگانه شده و به دلیل صرف زمان طولانی تر، نقطه در ارتفاع پایین تری نسبت به ارتفاع حقیقی ثبت

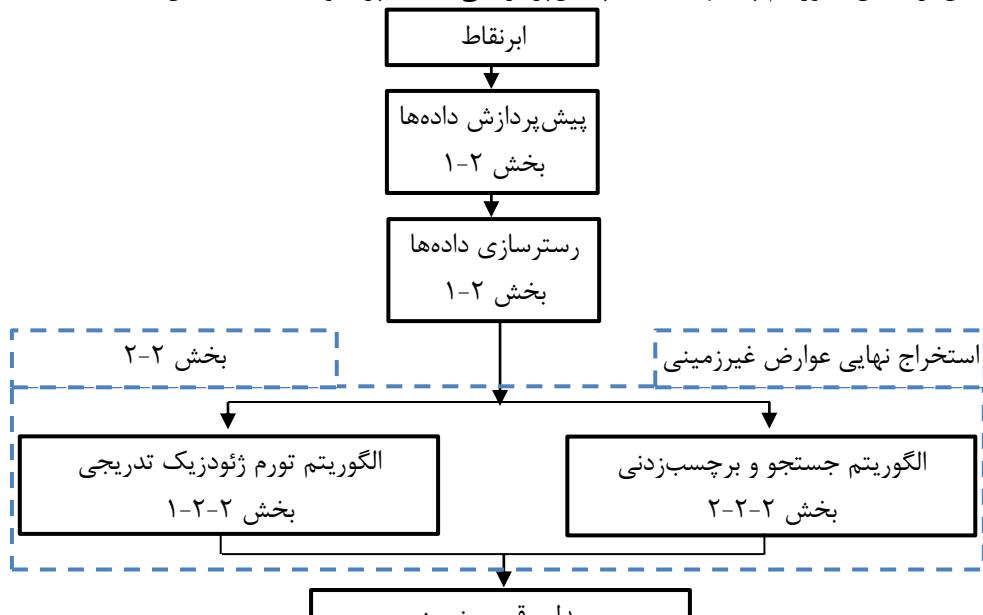
- عملگرهای درون یابی مبنا: هدف اصلی درون یابی مقایسه ارتفاع نقطه با مقادیر تخمین زده شده برای نقطه با استفاده از روش های دیگر است. محققانی که از درون یابی خطی استفاده نمودند، نیاز به استفاده از یک روند پردازش تکراری برای کمینه نمودن تأثیر نقاط غیرزمینی دارند [۲۸ و ۲۹]. برخی افراد از یک روش درون یابی بر اساس کمترین مربعات و توابع تطبیقی وزن دهی بهره برند. به طوری که به کارگیری مفهوم وزن دهی باعث تقویت کارآمدی این عملگرها در شرایط مختلف گردید [۳۰ و ۳۱].

به طور کلی هر یک از روش های ارائه شده دارای نقاط قوت و ضعف مخصوص به خود می باشند و هیچ کدام فراهم کننده دقت و صحت موردنیاز برای نواحی دارای ناهمواری ها و پوشش های متفاوت و متنوع نمی باشند. در این تحقیق هدف ارائه روشی کارآمد در راستای شناسایی و استخراج عوارض غیرزمینی از ابرنقاط می باشد. به طوری که اعمال آن بتواند با دقت و صحت بالایی عوارض غیرزمینی را حذف و مسیر را برای استخراج DTM هموار سازد. از این رو در این مقاله دو روند متفاوت طراحی و پیشنهاد گشته است که نتیجه نهایی از تلفیق نتایج آنها به دست می آید. روند اول تورم ژئودزیک تدریجی<sup>۱</sup> است که در آن طی افزایش تدریجی المان ارتفاعی تصویر بازسازی شده محاسبه می گردد. سپس با استفاده از برخی مشخصات هندسی و ساختاری، عوارض غیرزمینی شناسایی می گردد. روند دوم با عنوان جستجو و برچسب زنی به گونه ای طراحی شده است که با جستجو در چهار راستا و مطابق با تغییرات ارتفاعی به برچسب گذاری عوارض غیرزمینی می پردازد. به طور کلی می توان گفت که روند اول یک روند مورفو لوزی مبنا بوده و روند دوم در زمرة عملگرهای

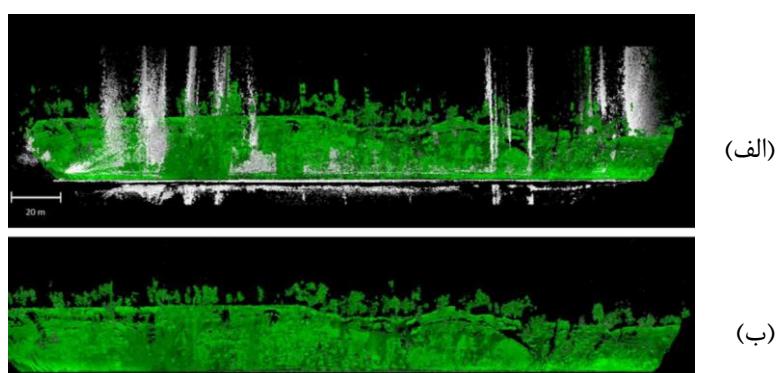
<sup>۱</sup> Progressive geodesic dilation

بر روی داده‌ها صورت گیرد و داده‌های اشتباه و نویزی موجود حذف گرددند. داده اشتباه داده‌ای است که با دیگر داده‌ها، به ویژه در مقایسه با همسایه‌هایش سازگار نمی‌باشد. در شکل (۲) نمونه‌ای از داده‌های اخذشده پرت و یا اشتباه نمایش داده شده است.

می‌شوند. همچنین عمل تناظریابی در تصاویر اخذ شده از سنجنده‌های هوایی و فضایی در نواحی شیشه‌ای و برآق دچار خطا شده و نقاط به اشتباه تناظریابی می‌گرددند که این عامل هم سبب بروز اشتباه می‌گردد. پیش از اعمال الگوریتم پیشنهادی باید پیش‌پردازشی



شکل ۱: روندکلی الگوریتم پیشنهادی



شکل ۲: (الف) ابرنقاط حاوی داده‌های اشتباه، (ب) و پس از حذف آن‌ها [۲۱]

داده‌ها را به چهار چارک تقسیم نموده و تفاصل بین کمترین ( $q(0.1)$ ) ناحیه و بالاترین ( $q(0.9)$ ) ناحیه را محاسبه می‌نماید. برای محاسبه  $IQR$  از رابطه (۱) بهره گرفته شده است [۳۴]:

$$U_{IQR} = q(0.9) - q(0.1). \quad \text{رابطه (۱)}$$

برای شناسایی و حذف داده‌های اشتباه و پرت از روش آماری محدوده چهارقسمتی داخلی ( $IQR^1$ ) استفاده می‌گردد. این معیار یک اندازه‌گیری آماری است که

<sup>1</sup> Inter Quartile Range

یکی از روش‌های قدرتمند درونیابی آورده شده است. همان‌طور که در شکل (۳) نیز مشخص است، در روش IDW سطح ایجاد شده در مناطق مرزی تا حدودی نرم می‌گردد که مدنظر نمی‌باشد. درنتیجه پس از شناسایی و حذف داده‌های اشتباه و پرت مطابق روند زیر مناطق ازدست‌رفته بازیابی می‌گردد [۳۷].

۱. پیکسل‌های مربوط به گپ‌ها استخراج می‌شوند.
۲. نواحی با استفاده از آنالیز مؤلفه‌های متصل<sup>۵</sup> [۳۹] برچسب‌گذاری می‌شوند.
۳. مرز خارجی هر ناحیه با محاسبه تفاصل تصویر باینری موجود با تصویر متورم شده توسط فیلترهای مورفولوژی به دست می‌آید.
۴. برای هر ناحیه برچسب خوده مقادیر اصلی از روی تصویر اصلی مربوط به ابرنقاط اولیه با استفاده از مختصات مناطق موربدرسی، استخراج می‌شود.
۵. میزان میانه نقاط مربوط به مرز محاسبه گشته و از این مقدار برای پر کردن گپ موجود استفاده می‌شود.

## ۲-۲- شناسایی عوارض غیرزمینی

در این مرحله روند پیشنهادی برای شناسایی و استخراج عوارض غیرزمینی از ابرنقاط ارائه می‌گردد. روش پیشنهادی شامل دو الگوریتم متفاوت برای شناسایی عوارض و سپس تلفیق نتایج مربوط به آن‌ها می‌باشد. درواقع با این روند سعی شده است تا تمامی عوامل مؤثر در شناسایی عوارض غیرزمینی در نظر گرفته شوند. از این‌رو با استفاده از الگوریتم تورم ژئودزیک تدریجی (بخش ۱-۲-۲) و جستجو و برچسب‌گذاری (بخش ۲-۲-۲) عوارض غیرزمینی مربوط به ناحیه مطالعاتی استخراج می‌شوند.

دو پارامتر محدود کننده برای تعیین محدوده مورد پذیرش  $IQR$  تعریف گشته است که این دو پارامتر با عناوین کمترین حد ( $X_{\min}$ ) و بیشترین حد ( $X_{\max}$ ) مطابق روابط زیر محاسبه می‌گردند [۳۴]:

$$X_{\min} = q(0.1) - 1.5 \times U_{IQR}, \quad (2)$$

$$X_{\max} = q(0.9) + 1.5 \times U_{IQR}, \quad (3)$$

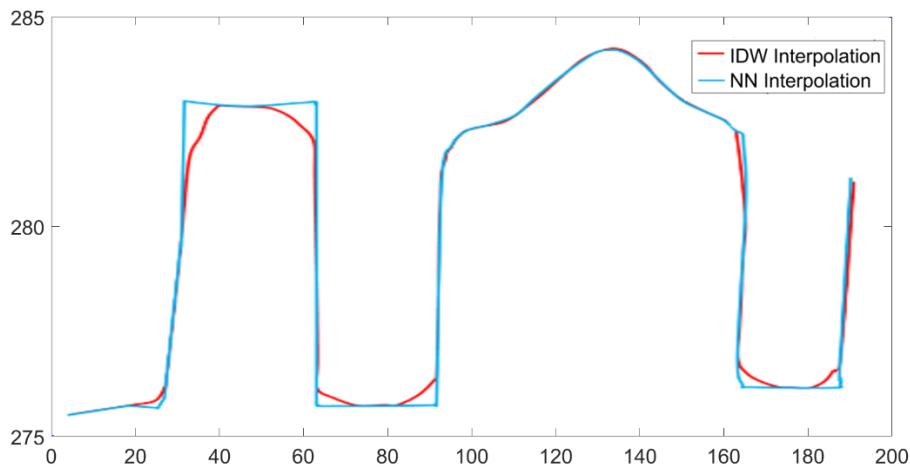
در نتیجه مشاهداتی که مقدار  $IQR$  آنها از  $X_{\min}$  کمتر و از  $X_{\max}$  بیشتر باشد، به عنوان داده‌های پرت و یا اشتباه شناسایی می‌شوند. روش‌های زیادی برای درونیابی مکانی وجود دارد که از آن جمله می‌توان به کریجینگ<sup>۱</sup> [۳۵]، وزنده‌ی برمبنای معکوس فاصله<sup>۲</sup> (IDW) [۳۶]، نزدیکترین همسایه<sup>۳</sup> (NN) [۳۷] و اسپیلاین<sup>۴</sup> [۳۸] اشاره نمود. برخی از این الگوریتم‌ها متناسب با نوع سطح، عملکرد متفاوتی دارند و معمولاً هر کدام برای درونیابی در شرایط خاصی مناسب می‌باشند. اغلب الگوریتم‌های مطرح شده با استفاده از ارتفاع پیکسل‌های همسایه به بازیابی گپ‌ها و درونیابی می‌پردازند. همانطور که پیش‌تر نیز ذکر گردید، هدف نهایی جداسازی پیکسل‌های زمینی از پیکسل‌های غیرزمینی و تولید DTM است. برای هر عارضه سه‌بعدی نظیر ساختمان‌ها و درختان، تنها پایین‌ترین نقطه آن‌ها مورد نظر می‌باشد و نقاط موجود بر روی دیوارها و بدنه عوارض به هیچ عنوان مد نظر نمی‌باشد. از این‌رو درونیابی که باعث نرم شدن نواحی در مناطق لبه‌ها شود، مناسب نمی‌باشد. با توجه به موارد مطرح شده در میان روش‌های موجود روش NN به بهترین وجه ممکن تغییرات ارتفاعی ناگهانی را حفظ کرده و مناسب اهداف تعیین شده است [۳۷]. در شکل (۳) نمونه‌ای از عملکرد روش NN در مقایسه با روش IDW به عنوان

<sup>1</sup> Kriging

<sup>2</sup> Inverse Distance Weighting

<sup>3</sup> Nearest Neighbor

<sup>4</sup> Spline



شکل ۳: مقایسه روش‌های درونیابی با بررسی پروفیل طولی در یک مقطع (قرمز: IDW، آبی: NN) [۳۷]

می‌شود. از علامت‌گذار جهت محدود کردن عمل تورم در هر مرحله استفاده می‌شود. فرآیند تورم و محدود کردن تا جایی که شکل به حالت ایستا<sup>۳</sup> برسد، ادامه پیدا می‌کند [۳۹].

رابطه (۶)

$$\left. \begin{array}{l} F_{M_S}^{(2)}(M_R) = (F_{M_S}^{(1)}(M_R) \oplus B) \wedge M_S \\ F_{M_S}^{(3)}(M_R) = (F_{M_S}^{(2)}(M_R) \oplus B) \wedge M_S \\ \vdots \\ F_{M_S}^{(n)}(M_R) = (F_{M_S}^{(n-1)}(M_R) \oplus B) \wedge M_S \end{array} \right\} \forall n \in [1, \infty),$$

که  $B$  المان ساختاری و  $F_{M_S}^{(n)}(M_R)$  تصویر بازسازی شده در هر مرحله می‌باشد.  $\wedge$  نشانگر عملیات محاسبه نقطه‌ای<sup>۴</sup> کمینه بین تصویر تورم یافته علامت‌گذار و  $\oplus$  تصویر ماسک است و نشان‌گر عملیات تورم می‌باشد. شکل (۴) مراحل انجام این عملگر را نمایش می‌دهد.

## ۲-۱-۱- الگوریتم تورم ژئودزیک تدریجی

ابتدا به طور کلی روند اجرای فیلتر ژئودزیک مورفولوژی توضیح داده می‌شود. در قدم اول باید تصاویر ماسک<sup>۱</sup> و مارکر<sup>۲</sup> ایجاد شوند. تصویر ماسک، تصویر مرجع و اصلی است که گسترش تصویر مارکر را محدود می‌سازد. تصویر ماسک برابر با تصویر به دست آمده از عملیات حذف داده‌های اشتباه و رسترسازی آن‌ها در نظر گرفته می‌شود. بر اساس تعریف، تصویر مارکر باید همان‌دمازه تصویر ماسک بوده و مقادیر پیکسل‌های آن نیز برابر و یا کمتر از مقادیر پیکسل‌های تصویر ماسک باشد. به طور کلی، تصویر مارکری مناسب است که متناسب با دانش در رابطه با خصوصیات فیزیکی محیط و عوارض موجود در آن تعیین گردد [۴۰]. رایج‌ترین راه ایجاد تصویر مارکر کم کردن یک مقدار ثابت از تصویر ماسک می‌باشد [۴۱].

$$M_S = P_t, \quad (4)$$

$$M_R = M_S - h, \quad (5)$$

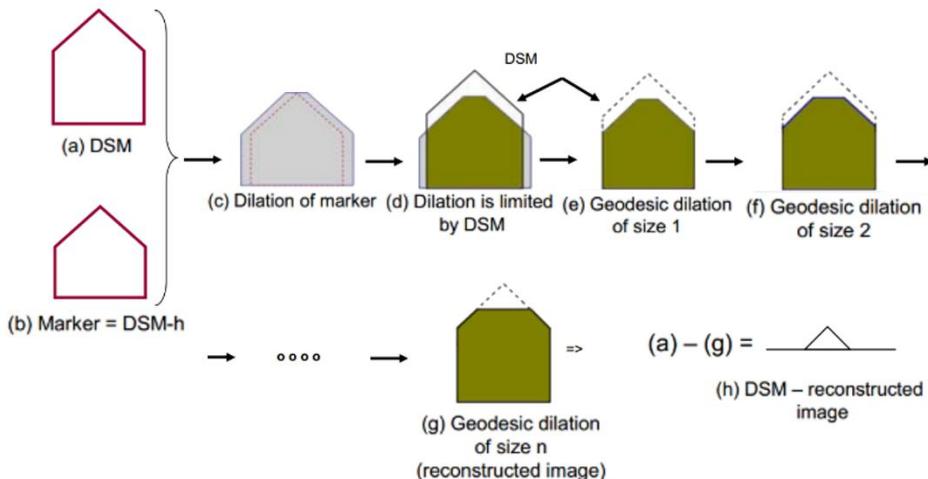
که  $P_t$  نشان‌دهنده ابرنقاط موجود و  $h$  همان مقدار ثابتی است که برای ایجاد تصویر مارکر در نظر گرفته

<sup>3</sup> Stable

<sup>4</sup> Point-Wise

<sup>1</sup> Mask

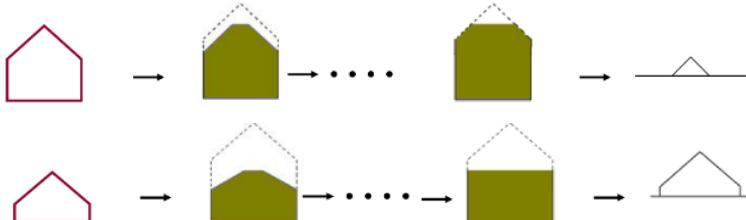
<sup>2</sup> Marker



شکل ۴: نحوه کار عملگر تورم ژئودزیک [۴۲]

باعث می‌شود مقداری از زمین نیز به عنوان عارضه انتخاب شود. شکل (۵) تأثیر تغییر نشان‌گر که وابسته به تغییر  $h$  است را در شناسایی عوارض غیرزمینی نشان می‌دهد.

همان‌طور که گفته شد برای بازسازی مناسب و کارآمد تصویر، انتخاب دقیق  $h$  بسیار مهم و حیاتی است. باید در انتخاب  $h$  دقت نمود، زیرا با مقادیر کوچک  $h$  تنها خط الرأس‌ها استخراج می‌شوند و مقادیر بزرگ  $h$



شکل ۵: تأثیر اندازه نشان‌گر در شناسایی عوارض غیرزمینی [۴۲]

استفاده می‌شود. مطابق همین روند برای محاسبه کمینه استفاده می‌گردد. میزان درصدی از داده‌ها که برای این کار مورد استفاده قرار می‌گیرد، متناسب با تعداد نقاط موجود در ابرنقطاً و یا تعداد پیکسل‌های ناحیه مورد مطالعه تعیین می‌گردد:

$$C_{CountDigit} = 1 + \text{floor}\left(\frac{\log K}{\log_{10}}\right), \quad (8)$$

$$N_{PercentData} = 10^{-(C_{CountDigit}-2)}, \quad (9)$$

که  $K$  تعداد پیکسل‌های منطقه مطالعاتی،  $C_{CountDigit}$  تعیین کننده چندرقمی بودن تعداد پیکسل‌های موجود در ناحیه مطالعاتی بوده و  $N_{PercentData}$  میزان درصد مورد قبول برای انتخاب نقاط ابتدایی و انتهایی داده‌ها است. حال، نوبت به تعیین محدوده  $h$  می‌باشد که

مطابق روند پیشنهادی در این تحقیق، برای غلبه بر این معضل از یک روند تکراری برای انتخاب مقدار  $h$  بهره گرفته شده است. به طوریکه مقدار  $h$  در این روند در یک محدوده مشخص تغییر می‌نماید. برای تعیین محدوده  $h$  ابتدا یک میانگین ارتفاعی از عوارض موجود در منطقه مطابق رابطه (۷) محاسبه می‌شود:

$$\bar{h} = \frac{\max(P_i) - \min(P_t)}{2}, \quad (7)$$

لازم به ذکر است که در روند پیشنهادی برای از بین بردن وجود احتمالی خطا در داده به جای استفاده از بیشینه داده‌ها، ابتدا داده‌ها را به صورت صعودی مرتب کرده و سپس از داده‌ای که در چند درصد انتهایی داده‌ها حضور دارد به عنوان بیشینه

تشکیل تصویر مارکر، روند تشکیل تصویر بازسازی شده اصلاح گشته و از استخراج قسمتی از زمین به عنوان عارضه غیرزمینی جلوگیری می‌گردد (شکل ۶).

تنها افزایش مرحله‌ای و پلکانی  $h$  نمی‌تواند منجر به استخراج عوارض غیرزمینی گردد. در [۴۲ و ۳۷] در هر مرحله از اعمال عملگر تورم ژئودزیک تنها با آستانه-گذاری مستقیم بر روی میزان ارتفاع و تغییرات محلی ارتفاع عوارض غیرزمینی شناسایی شدند. پارامتر تغییرات محلی ارتفاع مشابه میزان گرادیان است، منتها با دقت کمتری مرزها و یا مناطق دارای تغییرات ارتفاعی در آن شناسایی می‌شوند که همین موضوع عامل کاهش دقت در این روش‌ها می‌باشد. در روش ارائه شده در این مقاله از تعدادی پارامتر هندسی و ساختاری در کنار این افزایش مرحله‌ای  $h$  بهره گرفته می‌شود. همچنین قطعاتی که در هر مرحله استخراج می‌شوند، بر چسب‌گذاری شده و به صورت مجزا مورد بررسی قرار می‌گیرند که این کار در کنار استفاده از المان‌های هندسی و ساختاری به طور چشمگیری در دقت شناسایی عوارض تأثیرگذار است. در این راستا، با در نظر گرفتن یک حد آستانه، قطعاتی که در استخراج مرحله‌ای دارای ارتفاعی بیشتر از حد تعیین شده می‌باشند و در مراحل قبلی استخراج نشده‌اند، به عنوان عارضه غیرزمینی در نظر گرفته می‌شوند. لازم به ذکر است برای بررسی مجزای قطعاتی که در هر مرحله شناسایی می‌شوند، از الگوریتم مؤلفه‌های متصل برای چسب‌گذاری استفاده گردید:

$$O_{Obj} = \{Z_i > T1\}, \quad (12)$$

که  $Z_i$  مقدار میانگین ارتفاعی قطعه شناسایی شده،  $T1$  حد آستانه ارتفاعی انتخابی و  $O_{Obj}$  مجموعه مناطقی است که دارای ارتفاعی کمتر از مقدار تعیین شده‌اند. در روند پیشنهادی برای آن که انتخاب عارضه مورد نظر با درصد اطمینان بالاتری صورت گیرد، از دو پارامتر مساحت قطعه شناسایی شده و مرز نسبی برای ارزیابی

در روند پیشنهادی مطابق مقدار  $\bar{h}$  و به صورت قراردادی مطابق رابطه (۱۰) محاسبه می‌گردد:

$$h = \bar{h} / 3 : I_C : 3\bar{h} / 2 \quad (10)$$

درواقع مطابق رابطه (۱۰) مقدار  $h$  به صورت تدریجی و به‌اندازه مقدار  $I_C$  (معمولًاً یک در نظر گرفته می‌شود) افزایش می‌یابد. در هر مرحله مطابق با مقدار  $h$  جدید تصویر بازسازی می‌گردد.

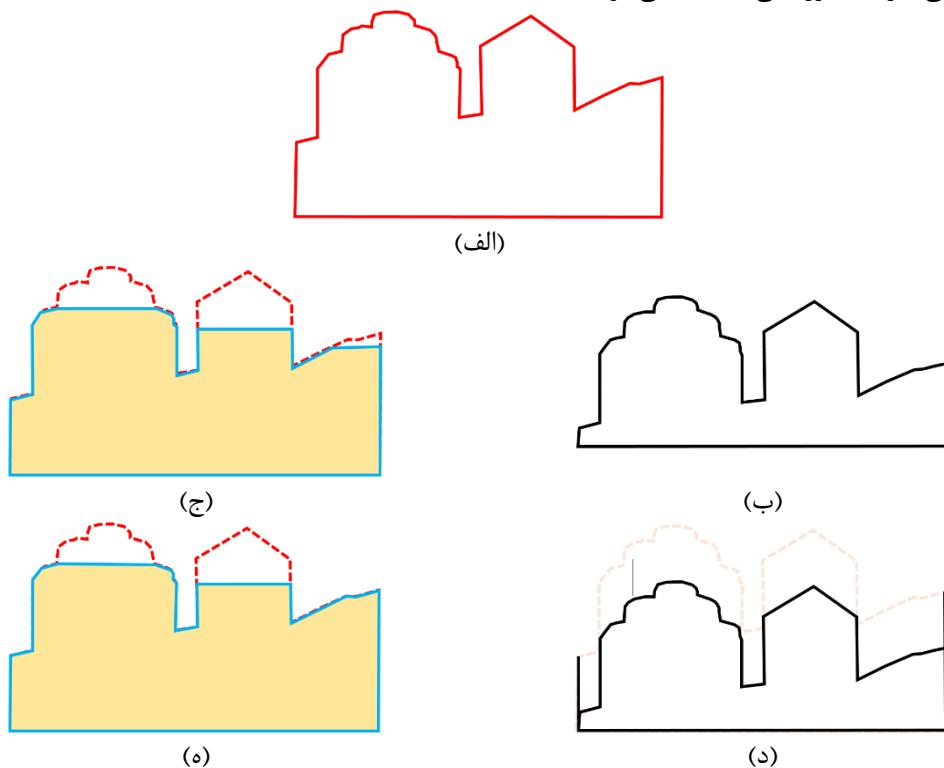
یکی از مشکلاتی که در استخراج با استفاده از روش ژئودزیک مورفولوژی وجود دارد، در نواحی مرزی منطقه موردمطالعه رخ می‌دهد. به طوری که اگر تغییرات زمین در نواحی مرزی ناحیه زیاد باشد، آن قسمت به عنوان عارضه غیرزمینی انتخاب می‌گردد. برای حل این معضل باید در طراحی و ایجاد تصویر مارکر بازنگری صورت گرفته و اصلاحات انجام شود. در روند پیشنهادی برای انجام اصلاحات در نقاط مرزی تصویر مارکر با تصویر ماسک برابر در نظر گرفته می‌شود. به عبارت دیگر فاصله  $h$  به تمامی نقاط مربوط به تصویر مارکر به جز مناطق مرزی اعمال می‌شود. با این کار از استخراج نواحی مرزی دارای شیب زیاد به عنوان عارضه غیرزمینی جلوگیری به عمل می‌آید [۴۲]:

$$\text{رابطه (11)}$$

$$M_R(i, j) = \begin{cases} M_S - h, h = h_1 : I_C : h_2 \text{ for } (i \neq 1, m) \& (j \neq 1, n) \\ M_S(i, j) & \text{for } (i = 1, m) \& (j = 1, n) \end{cases}$$

که  $I_C$  مقدار عددی ثابتی است که در هر مرحله به  $h$  اضافه می‌شود. در شکل (۶) نحوه تأثیر مناطق مرزی بر روی استخراج عوارض غیرزمینی آورده شده است. در شکل (۶) به‌وضوح می‌توان علت عدم عملکرد فیلتر ژئودزیک مورفولوژی را در مناطق مرزی که در شیب قرار گرفته‌اند را دریافت (سمت راست شکل (۶-الف)). در واقع با قطع شدن ناگهانی تصویر در نقاط مرزی، تغییر ناگهانی ایجاد شده در ارتفاع به اشتباہ، ناشی از وجود عارضه غیرزمینی در نظر گرفته شده و روند شناسایی دچار خطا می‌شود. در واقع این خطا باعث استخراج قسمتی از زمین به عنوان عارضه غیرزمینی می‌شود. با اعمال تصحیحات مربوطه در

و تائید نهایی عارضه غیرزمینی استفاده می‌شود.



شکل ۶: نحوه عملکرد تورم ژئودزیک اصلاح شده در مناطق مرزی، (الف) تصویر ماسک، (ب) تعريف تصویر مارکر اولیه، (ج) تصویر بازسازی شده اولیه، (د) تعريف تصویر مارکر اصلاح شده در مرزها، (ه) تصویر بازسازی شده متناسب با مارکر اصلاح شده.

رابطه (۱۳)

$$S1 = \left\{ \frac{\text{area}(O_{Obj}(i))}{\text{area}(R_{region})} < T2 \right\}, i = \{1, 2, \dots, n\},$$

که  $T2$  حدآستانه در نظر گرفته شده برای مساحت نسبی،  $R_{region}$  منطقه مطالعاتی،  $n$  تعداد قطعاتی که برای بررسی استخراج گشته‌اند و  $S1$  نشان‌دهنده مجموعه مناطق انتخاب شده است.

پارامتر مرز نسبی: معیار دیگری که می‌تواند در تعیین هر چه بهتر ماهیت قطعه شناسایی شده مؤثر باشد، بررسی میزان تغییرات هندسی مرز قطعه مورد نظر است. برای این کار از گرادیان توصیف‌گری استفاده شده است. توصیف‌گر گرادیان، توصیف‌گری بسیار مفید و کارآمد است که با تعیین یک پنجره جستجو و اسکن تصویر حاصل می‌شود. به طوری که در هر بار قرارگیری پنجره تعیین شده بر روی پیکسل موردنظری، مقادیر پیکسل‌های تصویر که در زیر پنجره

پارامتر مساحت نسبی قطعه شناسایی شده:

منظور از بررسی پارامتر مساحت این است که مساحت قطعه‌ای که در مرحله‌ای به عنوان عارضه غیرزمینی انتخاب شده است، نباید از حدی بیشتر باشد. انتخاب محدوده این حدآستانه می‌باید متناسب با نوع ناحیه انتخاب شود. به طوری که در نواحی دارای ساختمان و درخت با فواصل متناسب نسبت به هم این پارامتر کوچک در نظر گرفته می‌شود؛ ولی در مناطق شهری با تراکم بالا که ساختمان‌ها به هم متصل بوده و پیوسته‌اند، این پارامتر بزرگ در نظر گرفته می‌شود، زیرا ممکن است جزئی از راه‌های ارتباطی و یا دیگر مناطق حاوی عوارض غیرزمینی باشند. اما از مساحت نسبی برای بررسی این پارامتر استفاده شده است و حدآستانه‌ای برای نسبت مساحت قطعه موردنظر به مساحت کل ناحیه مطالعاتی در نظر گرفته شده است به گونه‌ای که:

و نسبت مقادیر مرزی دارای ناهمواری ارتفاعی به کل نقاط مرزی است. لازم به ذکر است که این دو حد آستانه متناسب با نوع منطقه مورد مطالعاتی تعیین می‌شود، اما به طور کلی تغییرات محسوسی در آن رخ نمی‌دهد و برای اکثر نواحی دارای مقادیر تقریباً یکسانی است. معرفی برخی پارامترهای هندسی که در بالا ذکر شد (رابطه‌های ۱۳ و ۱۵) و بررسی این پارامترها به صورت تک به تک بر روی قطعات شناسایی شده، سبب تمایز روش پیشنهادی و بهبود نتایج آن نسبت به دیگر روش‌های موجود شده است. به طور کلی روش تورم ژئودزیک در مقابل عوارضی که در آن‌ها تغییرات ارتفاعی به صورت ناگهانی بروهد و تدریجی صورت می‌گیرد، عملکرد مناسبی ندارد. بهویژه زمانی که این عوارض در مناطق کوهستانی و دارای شب تند قرار می‌گیرند. از این‌رو نیاز به ارائه روشی است که بتواند این ضعف را پوشش داده و بهبود بخشد. روش‌هایی که بر مبنای عملکرگشایش مورفولوژی تدریجی می‌باشند [۴ و ۱۲]، از آنجا که از الگانی ساختاری برای تفکیک عوارض زمینی و غیرزمینی بهره نمی‌برند، در مواردی که سطح زمین دارای ناهمواری‌های ناگهانی است، عملکرد مناسبی نداشته و قسمتی از سطح زمین را به عنوان عارضه غیرزمینی استخراج می‌نمایند (شکل ۷-ب). با آن‌که در روش‌های مبنی بر استفاده از عملکرگ تورم ژئودزیک [۳۷ و ۴۲] با اعمال تصحیحات مربوط به تولید تصویر مارکر نقاط زمینی موجود در ناهمواری‌های شدید به استثناء به عنوان نقطه غیرزمینی انتخاب نمی‌شوند، برخی نقاط غیرزمینی موجود در دامنه‌های شیب‌دار که تغییرات تدریجی ارتفاعی ایجاد می‌نمایند (مانند درختچه‌ها) شناسایی نمی‌شوند (شکل ۷-ج). همچنین صرفاً استفاده از پارامتر تغییرات محلی بازه<sup>۱</sup> نیز نمی‌تواند منجر به حاصل شدن نتیجه‌ای دقیق گردد [۳۷ و ۴۲]. بهره‌گیری از میزان

تعیین شده قرار گرفته شده‌اند، در نظر گرفته می‌شوند. با فرض آن که مقدار پیکسل مرکزی ( $f(x,y)$  باشد، مقدار گرادیان مطابق رابطه (۱۴) محاسبه می‌شود.

[۳۹]

رابطه (۱۴)

$$F_{gradient} = \sqrt{\left(\frac{f(x,y+1)-f(x,y-1)}{2d}\right)^2 + \left(\frac{f(x+1,y)-f(x-1,y)}{2d}\right)^2},$$

که  $d$  براساس فاصله نمونه برداری ابرنقاط تعیین می‌گردد. همان‌طور که مشخص است، پارامتر گرادیان، مشخص کننده تغییرات ارتفاعی در یک همسایگی مشخص است. به طوری که هر چه مقدار گرادیان برای پیکسلی بیشتر باشد، آن پیکسل در محلی با تغییرات ارتفاعی زیاد واقع شده است. حال برای بهره‌گیری از توصیف‌گر گرادیان برای تعیین میزان تغییرات هندسی و ارتفاعی در مرزهای قطعه برچسب‌گذاری شده مورد نظر فراخوانده می‌شود. سپس با ضرب نقطه‌ای میزان توصیف‌گر گرادیان در محدوده قطعه شناسایی شده و در نظر گرفتن یک حد آستانه برای گرادیان، می‌توان پیکسل‌هایی که دارای تغییرات ارتفاعی زیادی می‌باشند را استخراج نمود. حال با در نظر گرفتن نسبت پیکسل‌هایی که معیار موردنظر را برآورده نموده‌اند به کل پیکسل‌های مرزی عارضه مورد بررسی، پارامتری برای تضمیم‌گیری برای زمینی و یا غیرزمینی بودن عارضه به دست می‌آید. در واقع از این واقعیت استفاده شده است که در صورت غیرزمینی بودن، عارضه دارای تغییرات ارتفاعی ناگهانی نسبت به اطراف خود است. درنهایت با در نظر گرفتن حد آستانه‌ای برای این تناسب مربوط به پیکسل‌های مرزی، در مورد ماهیت پیکسل مورد نظر تضمیم‌گیری می‌شود:

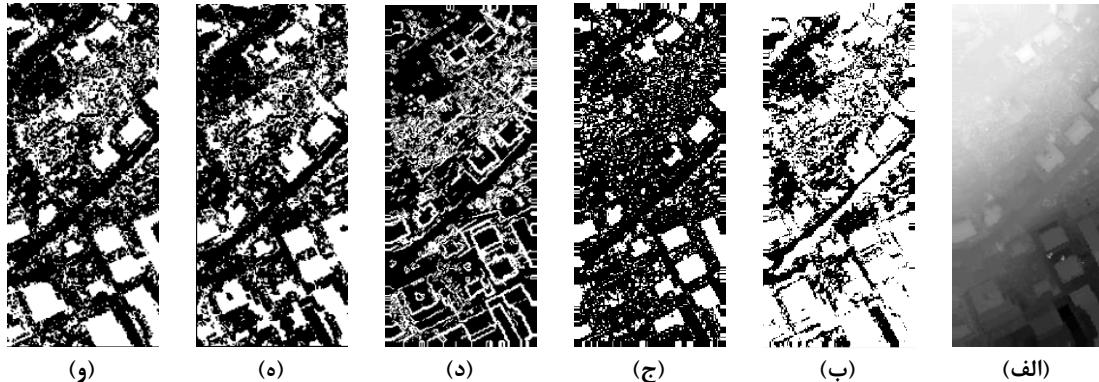
رابطه (۱۵)

$$S2 = \left\{ \begin{array}{l} \frac{\sum(S1_i \cdot (F_{gradient}(i) > T3))}{\sum(S1(i))} > T4 \\ i = \{1, 2, \dots, m\} \end{array} \right\}$$

که  $S2$  مجموعه نهایی عارض غیرزمینی،  $m$  تعداد عارض شناسایی شده در  $S1$ ،  $T3$  و  $T4$  به ترتیب حد آستانه‌های در نظر گرفته شده برای پذیرش  $F_{gradient}$

<sup>۱</sup> Local Range Variation (LRV)

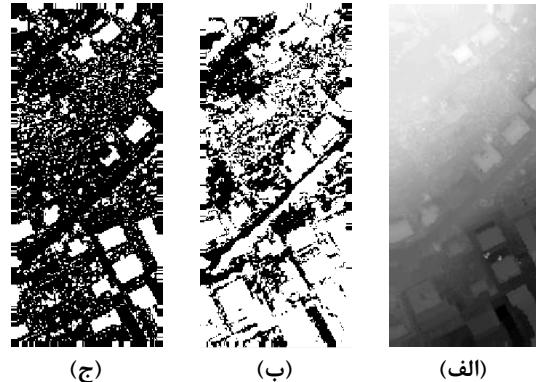
داخل مراحل تعبیین شده (شکل ۷-د) قرار گرفته و به عنوان عارضه غیرزمینی انتخاب شوند (شکل ۷-ه)). با مقایسه نتایج حاصل شده طبق روش پیشنهادی با داده های مرجع (شکل ۷-و) به خوبی عملکرد بهتر روش پیشنهادی مشهود است.



شکل ۷: عملکرد روش پیشنهادی در مقایسه با روش های مورفولوژی مبنای تدریجی، (الف) داده های لایدار منطقه، (ب) نحوه عملکرد روش ژئودزیک تدریجی، (ج) نحوه عملکرد روش تورم ژئودزیک تدریجی، (د) میزان گرادیان، (ه) نتیجه روش پیشنهادی، (و) داده های مرجع.

- ابرنقاط در چهار جهت: راست به چپ، چپ به راست، پایین به بالا و بالا به پایین اسکن و بررسی می شوند که این کار باعث افزایش دقت عملکرد و افزایش اطمینان آن می گردد. در مرحله اول، الگوریتم در طول یک اسکن از چپ به راست کار می کند، به طوری که:
- در اولین نقطه در اسکن فرض می شود که زمین عاری از عارضه باشد و مقدار عددی یک می گیرد.
  - نقشه اول و دوم با یکدیگر مقایسه می شوند و اگر میزان تغییر شیب مثبت بوده و از حد آستانه تعیین شده بیشتر باشد، آنگاه نقطه دوم مقدار عددی صفر می گیرد.
  - اگر میزان تغییر شیب منفی بوده و اندازه آن از حد آستانه تعیین شده کمتر باشد، آنگاه نقطه دوم مقدار عددی یک می گیرد.
  - در حالتی غیر از دو مورد ذکر شده نیز مقدار پیکسلی نقطه دوم صفر می شود.
- همان طور که پیشتر گفته شد، روند پیشنهادشده در راستای راست به چپ ( $L_2$ )، بالا به پایین ( $L_3$ ) و

گرادیان منطقه (شکل ۷-د)) به همراه پارامترهای هندسی معرفی شده نظیر مساحت نسبی، مراز نسبی و تعیین حد آستانه ارتفاع منطبق بر شیب منطقه در این مقاله و همچنین استفاده از روش جستجو و برچسب زنی باعث شده اند تا نواحی به طرز مناسبی



(الف) (ب) (ج)

## ۲-۲-۲- الگوریتم جستجو و برچسب گذاری

پیشنهاد این روش در راستای تکمیل روش تورم ژئودزیک تدریجی و بهبود عملکرد و کارایی الگوریتم در نواحی دارای ناهمواری های متفاوت و پوشش های گوناگون نظیر شهری و جنگلی می باشد. برای این منظور، روندی طراحی گشته است که طی آن با برچسب گذاری ارتفاعی، عوارض غیرزمینی شناسایی می گرددند. الگوریتم جستجو و برچسب گذاری جهت تولید DTM از روی ابرنقاط می باشد و سرعت عمل بسیار بالایی دارد [۴۳]. در این روش داده های ارتفاعی به صورت نواری (سطر به سطر و ستون به ستون) مورد بررسی قرار می گیرند. فرض بر این است که با حرکت در طول نوار اسکن، مجموعه نقاط قرار گرفته بین ناپیوستگی ها، مربوط به یک عارضه هستند؛ البته به شرط آنکه این مجموعه از نقاط، ارتفاع بیشتری را نسبت به نقاط همسایه داشته باشند. در روش های موجود معمولاً از اسکن در دو راستا استفاده شده است [۴۳] در حالی که در روش ارائه شده در این تحقیق،

حال نقاط استخراج شده از مجموعه نقاط حذف گشته و مقادیر ارتفاعی مناطق ازدست رفته با استفاده از درون یابی بازیابی می گرددند. سپس میزان گرادیان سطح ساخته شده مطابق رابطه (۱۴) محاسبه می گردد. با محاسبه تفاضل DSM اولیه از سطح ایجاد شده، نقاطی که ارتفاع آنها از مجموع  $T1$  و میزان گرادیان نقطه مذکور بیشتر باشد در کلاس نهایی عوارض غیرزمینی در نظر گرفته می شوند. با این کار، سعی شده است تا شبیب منطقه در انتخاب عوارض غیرزمینی تأثیر داده شود تا از انتخاب مناطق مربوط به سطح زمین در مناطق شبیب دار جلوگیری شده و دقت نتایج نهایی افزایش یابد. درنهایت با حذف این نقاط از مجموعه نقاط و درون یابی سطح با استفاده از نقاط غیرزمینی موجود، DTM منطقه استخراج می گردد.

### ۳- پیاده سازی و ارزیابی نتایج

در این بخش روند استخراج DTM با استفاده از روند پیشنهادی به صورت مرحله به مرحله آورده شده است. نتایج پیاده سازی هر یک از مراحل روند پیشنهادی در ادامه ارائه می گردد.

#### ۳-۱- منطقه و داده های مطالعاتی

برای پیاده سازی الگوریتم پیشنهادی از ابرنقاط به دست آمده از داده های لایدار ارائه شده توسط ISPRS استفاده شده است. این داده ها توسط کمپانی فتونور و با استفاده از اسکنر ALTM Optech تهیه شده است. از آنجا که داده های تهیه شده دارای تراکم نقاط متفاوت بوده و شامل مناطق مختلف با ویژگی های متفاوت می باشند، برای ارزیابی الگوریتم های پیشنهاد شده توسط محققان بسیار مناسباند. از این رو ۵ ناحیه مطالعاتی برای ارزیابی الگوریتم پیشنهادی مورد استفاده قرار گرفته است که دارای ویژگی های زیر می باشند:

- ناحیه ۱: حاوی گیاهان و ساختمان ها متراکم در یک منطقه شبیه دار بوده و فاصله نقاط

پایین به بالا ( $L_4$ ) نیز تکرار می شود. بعد از اسکن ابرنقاط در هر چهار جهت، نقاط زمینی از اشتراک نقاط زمینی برچسب گذاری شده در تمام جهت ها به دست می آید؛ نقاط غیرزمینی از اجتماع نقاط غیرزمینی برچسب گذاری شده در جهت ها به دست می آید. در روند پیشنهادی تابع برچسب گذاری نقاط به صورت رابطه (۱۶) مطرح گردید:

$$S3(i) = \begin{cases} 1 & \text{if } L_1 + L_2 + L_3 + L_4 = 4 \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (16)$$

که  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $L_3$  و  $L_4$  به ترتیب برچسب نقطه  $i$  در اسکن چپ به راست، راست به چپ، بالا به پایین و پایین به بالا می باشند.  $S3$  یک تصویر باینری است که نشان دهنده مجموعه نهایی برچسب گذاری شده نقاط با استفاده از رابطه مذکور می باشد. با آن که روش برچسب گذاری برخلاف روش تورم ژئودزیک در مقابل عوارضی با تغییرات تدریجی ارتفاعی که در مناطق شبیه دار قرار دارند، عملکرد مناسبی دارد؛ در مناطق شهری که حاوی ساختمان هایی با سقف مسطح بوده و صورت پلکانی می باشند، دچار خطا می شود. چراکه برچسب گذاری هنگام رسیدن به یک ساختمان آغاز می گردد و پس از گذر از سقف ساختمان و هنگامی که شبیب با جهت مخالف نسبت به شبیب اولیه رؤیت شد، نشان از کاهش ارتفاع و قرار گیری نقطه بر سطح زمین در نظر گرفته می شود، در حالی که نقطه می تواند مربوط به سقف ساختمانی با ارتفاعی کمتر و در مجاورت ساختمان قبلی باشد. از این رو تلفیق نتایج مربوط به این دو روش می تواند سبب افزایش دقت شناسایی عوارض غیرزمینی گردد. درنتیجه برای برچسب گذاری نهایی مناطق غیرزمینی از اعمال اجتماع بین نتایج باینری به دست آمده از دو روش تورم ژئودزیک تدریجی و جستجو و برچسب گذاری استفاده می شود. با این کار تمامی مناطقی که شرایط علائم وجود عارضه غیرزمینی را دارند، شناسایی می شوند.

$$S_T = S2 \cup S3. \quad (17)$$

خطا متناسب با ۴ حالت ( $a, b, c$  و  $d$ ) متفاوتی که برای هر نقطه شناسایی شده رخ می‌دهد، محاسبه می‌گردد. در ادامه حالت‌های متفاوتی که برای هر نقطه پس از شناسایی عوارض غیرزمینی رخ می‌دهد، آورده شده است:

$$TI = \frac{b}{a+b}, \quad (18)$$

$$TII = \frac{c}{c+d}, \quad (19)$$

$$TE = \frac{b+c}{a+b+c+d}, \quad (20)$$

که در آن  $a$  نماینده نقاط غیرزمینی اند که به درستی شناسایی شده‌اند.  $b$  نماینده نقاط غیرزمینی است، که به اشتباہ به عنوان نقاط زمینی شناسایی شده‌اند.  $c$  نماینده نقاط زمینی است که به اشتباہ به عنوان نقاط غیرزمینی شناسایی شده‌اند. درنهایت  $d$  مربوط به نقاط زمینی است که به درستی شناسایی شده‌اند. علاوه بر معیارهای تعریف شده از معیار دقت کاپا<sup>۲</sup> برای ارزیابی کامل‌تر بهره گرفته شده است [۴۵].

نمونه‌برداری حدود ۲ متر می‌باشد.

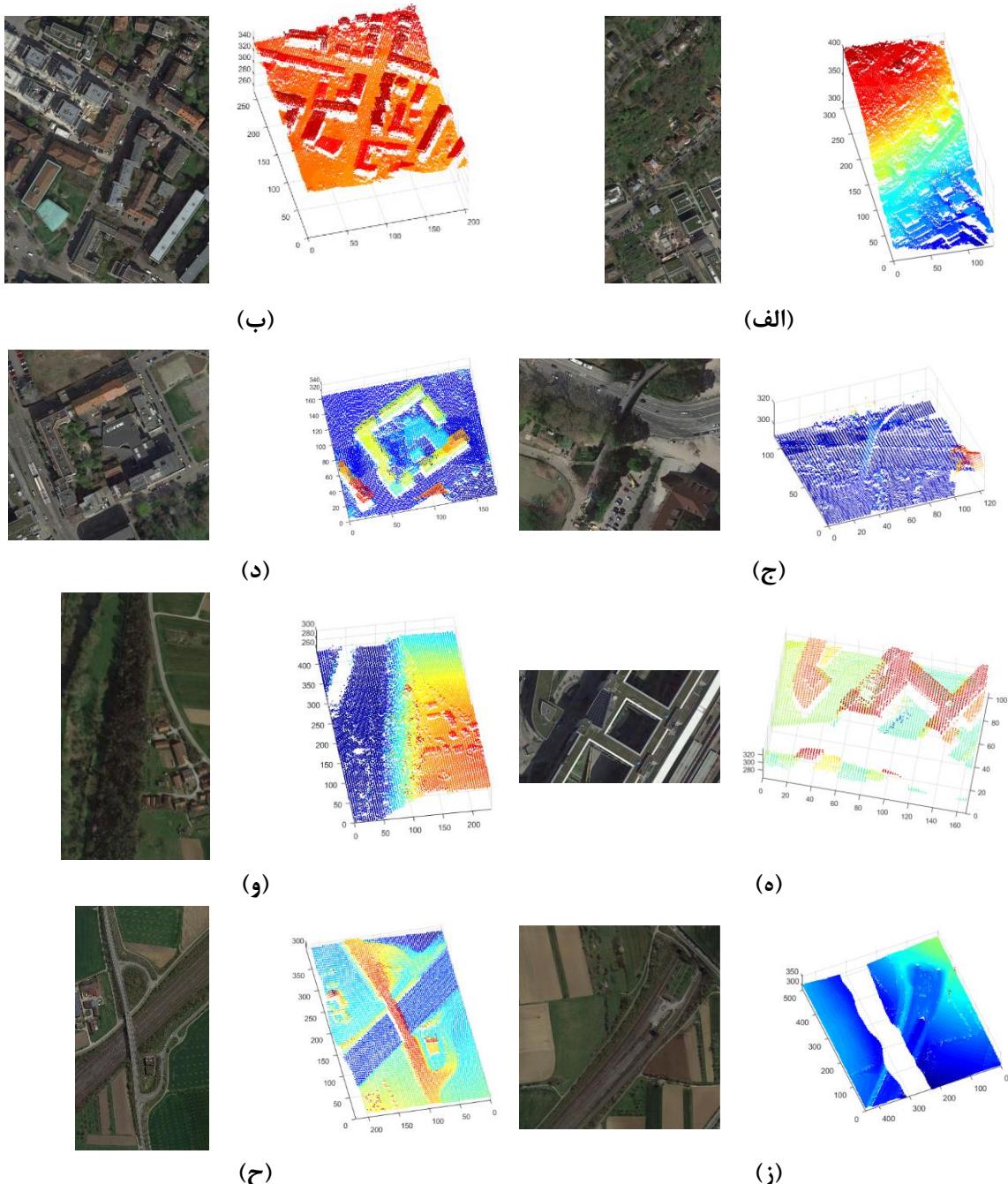
- ناحیه ۲: مربوط به یک منطقه مسکونی با تراکم بالای ساختمان و فاصله نمونه‌برداری ۲ متر است.
- ناحیه ۳: مربوط به یک منطقه شهری می‌باشد که دارای روگذر است. در این ناحیه، فاصله نقاط نمونه‌برداری حدود ۱ متر است.
- ناحیه ۴: مربوط به یک منطقه شهری دارای بلوک‌های بزرگ ساختمانی است و فاصله نقاط نمونه‌برداری حدود ۱ متر است.
- ناحیه ۵: مربوط به یک منطقه با عوارض پیوسته و کم ارتفاع است. همچنین گپ میان ابرنقاط است چندگذری<sup>۱</sup> و همچنین گپ میان ابرنقاط است که روند شناسایی را دشوار می‌نماید. در این ناحیه، فاصله نقاط نمونه‌برداری حدود ۱ متر است.
- ناحیه ۶: مربوط به یک منطقه شبیدار قرارگرفته در دامنه کوه با پوشش گیاهی می‌باشد و فاصله نقاط نمونه‌برداری در این ناحیه حدود ۲ متر است.
- ناحیه ۷: مربوط به یک منطقه کشاورزی دارای گپ میان داده‌ها با فاصله نمونه‌برداری حدود ۳ متر است.

ناحیه ۸: مربوط به یک منطقه کشاورزی دارای ساختمان، راه و روگذر با فاصله نمونه‌برداری ۳ متر است. شکل (۸) ابر نقاط نواحی مطالعاتی به همراه تصویر هوایی مناطق مطالعاتی (برای دید بصری) آورده شده است.

همان‌طور که در شکل (۸) مشخص است، نواحی ۵، ۶ و ۷ دارای گپ هستند. در واقع وجود گپ در داده‌ها خود به عنوان یک چالش مطرح بوده و هدف ارائه روشی است که در حضور گپ میان داده‌ها باز هم توانایی استخراج DTM داشته باشد. برخی ISPRS برای ارزیابی نتایج فیلترینگ نقاط و شناسایی نقاط غیرزمینی سه خطای نوع اول ( $TI$ )، خطای نوع دوم ( $TII$ ) و خطای کلی ( $TE$ ) را معرفی نمود [۴۴]. این سه

<sup>2</sup> Kappa

<sup>1</sup> Multi-path

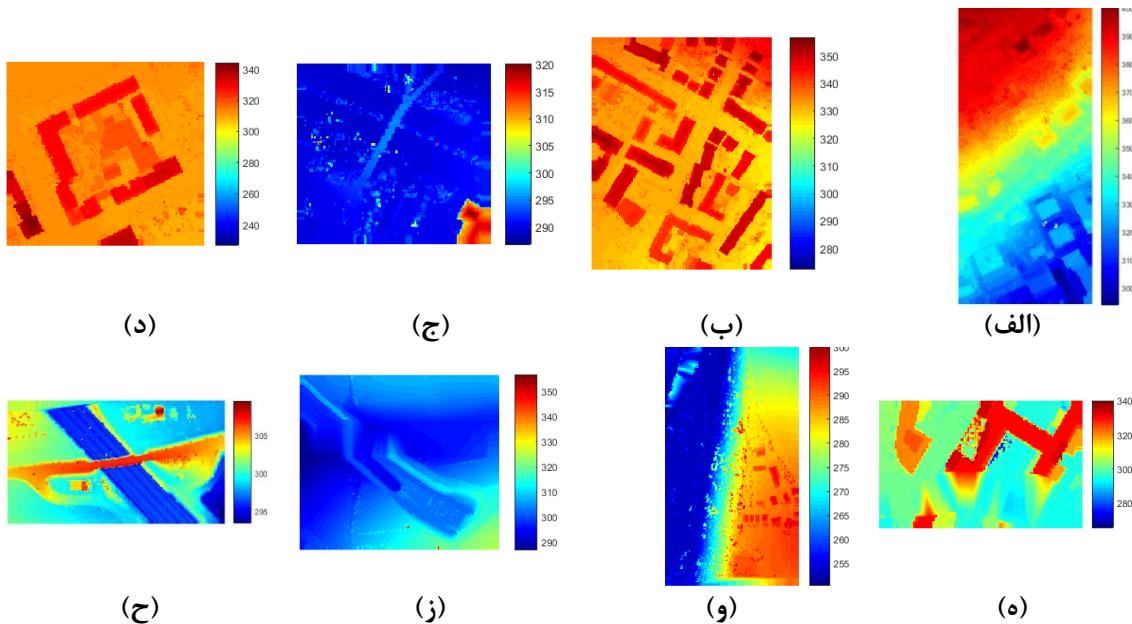


شکل ۸: ابرنقاط نواحی مطالعاتی، (الف) ناحیه ۱، (ب) ناحیه ۲، (ج) ناحیه ۳، (د) ناحیه ۴، (ه) ناحیه ۵، (و) ناحیه ۶، (ز) ناحیه ۷، (س) ناحیه ۸.

سپس با استفاده از روش NN درون‌یابی نقاط صورت پذیرفته و ابر نقاط نامنظم به تصویر رستری تبدیل شدند. در شکل (۹) نتایج رسترسازی ابر نقاط موجود آورده شده است.

### ۲-۳- شناسایی عوارض غیرزمینی

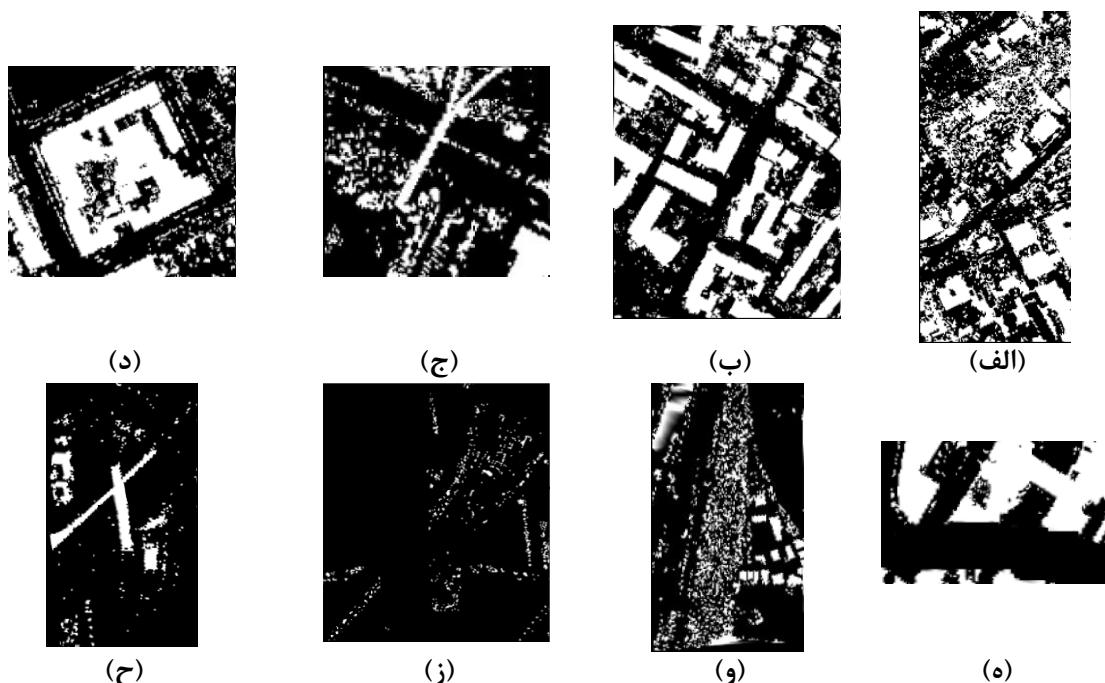
همان‌طور که در بخش اول آورده شده است، ابتدا داده‌های ابر نقاط مورد پیش‌پردازش قرار گرفته و داده‌های اشتباه و پرت موجود در آن‌ها حذف شدند.



شکل ۹: نتیجه حاصله پس از حذف نویز و رسترسازی ابرنقطا، (الف) ناحیه ۱، (ب) ناحیه ۲، (ج) ناحیه ۳، (د) ناحیه ۴، (ه) ناحیه ۵، (و) ناحیه ۶، (ز) ناحیه ۷، (ح) ناحیه ۸.

شدید می‌باشد، ۴۵ درجه در نظر گرفته شد. مقدار مساحت نسبی برای ناحیه ۴ که درصد بیشتری از آن حاوی نقاط غیرزمینی است، ۰,۶ و برای مابقی نواحی برابر با ۰,۳ در نظر گرفته شد. لازم به ذکر است که میزان حد آستانه مربوط به بیشینه مساحت برای نواحی که دارای پوشش متراکم گیاهی (مناطق جنگلی) و یا شهری (ساختمان‌های بهم چسبیده) می‌باشد، بیشتر از دیگر نواحی است. از این‌رو این مقدار برای ناحیه ۴ که مربوط به یک ناحیه متراکم دارای عوارض کم ارتفاع و به هم چسبیده است بیشتر از دیگر مناطق است. با انتخاب مقدار بیشتر برای مساحت نسبی طی روند تورم ژئودزیک تدریجی امکان شناسایی یک مقطع بزرگ و به هم متصل به وجود می‌آید. در حالی که در نواحی دارای پوشش پراکنده، قطعات شناسایی شده دارای مساحت بسیار زیادی نمی‌باشند. در شکل (۱۰) نتایج مربوط به شناسایی عوارض غیرزمینی در هر یک از نواحی آورده شده است. نتایج به صورت تصویری باینری که در آن عوارض غیرزمینی دارای مقدار ۱ می‌باشند، نشان داده شده است.

پس از رسترسازی ابرنقطا مربوط به ناحیه‌های مطالعاتی، مطابق روند پیشنهادی در بخش ۲-۲ به شناسایی عوارض غیرزمینی پرداخته می‌شود. در این راستا، حدآستانه‌های مربوط به شناسایی عوارض در هر یک از نواحی باید تعیین گردد. از آنجایی که مقدادر ارتفاع قابل قبول ( $T1$ )، مرز نسبی ( $T2$ ) و گرادیان ( $T3$ ) وابسته به ناهمواری و نوع پوشش منطقه نمی‌باشند، برای تمام نواحی به ترتیب ۰,۵ و ۰,۵ متر در نظر گرفته شده است. درواقع این سه پارامتر دارای ماهیتی هندسی بوده و تعیین مقدار آن‌ها وابسته به تراکم نقاط و یا میزان پیچیدگی منطقه مطالعاتی نمی‌باشد. برای مثال، برای عوارض غیرزمینی حداقل ارتفاع ۰,۵ متر در نظر گرفته شده است و یا به عبارت دیگر عارضه‌ای که حداقل ۰,۵ متر از زمین ارتفاع داشته باشد، به عنوان عارضه غیرزمینی استخراج می‌شود. حداکثر شیب قابل قبول در روش جستجو و برچسب‌گذاری برای نواحی ۱ و ۶ که کوهستانی و شیبدار می‌باشند، ۶۰ درجه و برای مابقی نواحی (نواحی ۲، ۳، ۴، ۵، ۷ و ۸) که بدون ناهمواری‌های



شکل ۱۰: نتایج شناسایی عوارض غیرزمینی، (الف) ناحیه ۱، (ب) ناحیه ۲، (ج) ناحیه ۳، (د) ناحیه ۴، (ه) ناحیه ۵، (و) ناحیه ۶، (ز) ناحیه ۷، (ئ) ناحیه ۸.

خطای کلی استفاده شد. در جدول (۱) نتایج ارزیابی روند پیشنهادی در کنار دیگر روش‌های موجود جهت شناسایی عوارض غیرزمینی آورده شده است.

همان‌طور که گفته شد برای ارزیابی نحوه عملکرد روش فیلترینگ پیشنهادی از داده‌های مرجع ISPRS برای محاسبه میزان خطای نوع اول، خطای نوع دوم و

جدول ۱: نتایج ارزیابی شناسایی عوارض غیرزمینی

ناحیه مطالعاتی	نوع خطای (%)	Axelsson	Pfeifer	Wack	Elmqvist	Sohn	Sithole	Roggero	Hui	BVMS	روش پیشنهادی
ناحیه ۱	TI	۱۵,۹۶	۲۸,۲۶	۳۹,۱۲	۳۳,۶۳	۲۶,۵۶	۳۷,۶۹	۳۳,۱۶	۱۳,۶۳	۲۵,۰۷	۸,۵۵
	TII	۳,۶۵	۲,۴۱	۳,۳۸	۴,۳۸	۱۲,۱۷	۳,۴۹	۳,۸۸	۱۲,۲۹	۳,۵۹	۱۳,۰۰
	TE	۱۰,۷۶	۱۷,۳۵	۲۴,۰۲	۲۲,۴۰	۲۰,۴۹	۲۲,۲۵	۲۰,۸۰	۱۳,۳۴	۱۵,۹۰	۱۰,۴۵
	kappa	۷۸,۴۸	۶۶,۰۹	۵۳,۸۸	۵۶,۶۸	۵۹,۳۴	۸۱,۲۴	۵۹,۶۲	۷۲,۹۲	۶۸,۶۹	۷۸,۶۲
	TI	۴,۸۹	۷,۲۹	۱۱,۹۴	۱۲,۳۶	۸,۸۷	۱۹,۱۹	۱۱,۹۲	۴,۸۶	۶,۳۵	۳,۵۹
	TII	۱,۴۸	۱,۵۲	۰,۸۹	۳,۳۰	۷,۸۷	۰,۵۷	۰,۹۱	۲,۰۸	۲,۱۸	۲,۱۱
	TE	۳,۲۵	۴,۵۰	۶,۶۱	۸,۳۹	۸,۱۸	۱۰,۲۱	۶,۶۱	۳,۵۰	۴,۳۱	۲,۸۴
	kappa	۹۳,۵۱	۹۱,۰۰	۸۵,۷۵	۸۳,۶۶	۸۲,۲۱	۷۹,۷۰	۸۶,۸۲	۹۳,۰۰	۹۱,۳۷	۹۴,۲۹
ناحیه ۲	TI	۰,۴۶	۲,۸۱	۵,۱۵	۲۵,۹۱	۸,۳۸	۹,۶۴	۱۲,۴۶	۰,۰۱	۰,۱۲	۱,۰۲
	TII	۱۸,۵۳	۱,۶۴	۲,۳۱	۱,۷۵	۱۰,۴۰	۰,۶۷	۰,۰۰	۹,۹۵	۱,۳۶	۳,۵۸
	TE	۴,۲۵	۲,۵۷	۴,۵۵	۸,۵۳	۸,۸۰	۷,۷۶	۹,۸۴	۲,۲۱	۰,۴۰	۱,۰۹
	kappa	۸۶,۳۴	۹۲,۵۱	۸۷,۰۶	۷۷,۴۰	۷۵,۳۷	۷۹,۳۲	۷۴,۷۱	۹۳,۳۵	۹۸,۸۳	۹۵,۴۰
ناحیه ۳	TI	۱,۶۴	۱,۶۴	۲,۳۱	۱,۷۵	۱۰,۴۰	۰,۶۷	۰,۰۰	۹,۹۵	۱,۳۶	۳,۵۸
	TII	۱۸,۵۳	۱,۶۴	۲,۳۱	۱,۷۵	۱۰,۴۰	۰,۶۷	۰,۰۰	۹,۹۵	۱,۳۶	۱,۰۲
	TE	۴,۲۵	۲,۵۷	۴,۵۵	۸,۵۳	۸,۸۰	۷,۷۶	۹,۸۴	۲,۲۱	۰,۴۰	۱,۰۹

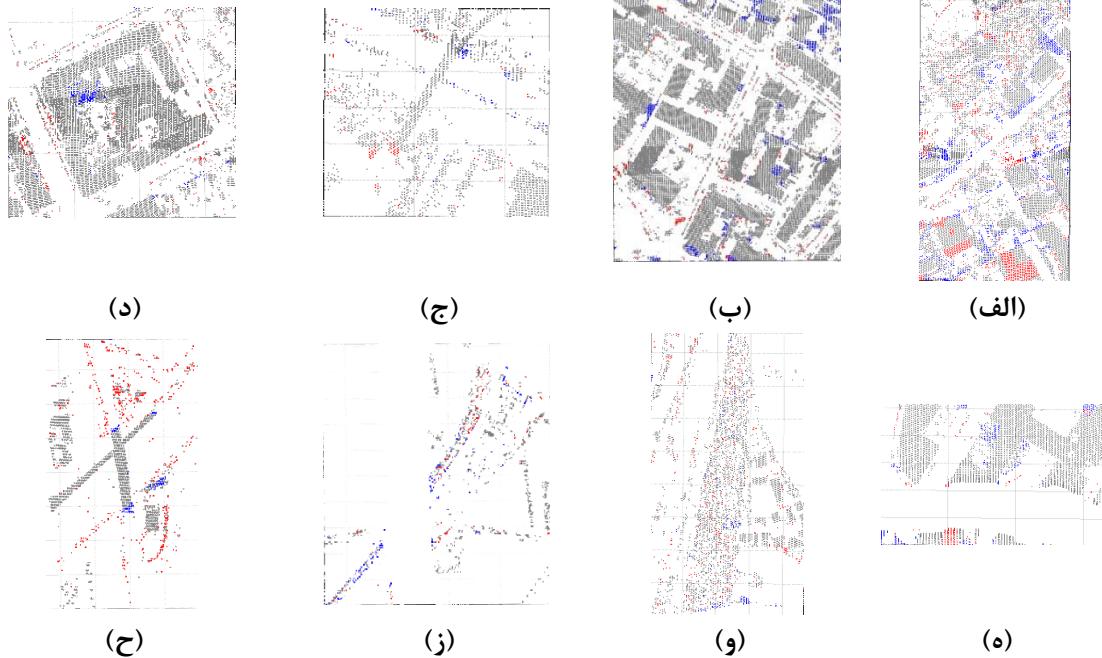
نام مطالعاتی	نوع خطا (%)	Axelsson	Pfeifer	Wack	Elmqvist	Sohn	Sithole	Roggero	Hui	BVMS	روش پیشنهادی	
ناحیه ۴	TI	۷/۹۱	۱/۶۰	۳/۱۵	۸/۴۷	۴/۸۱	۴/۸۵	۳/۰۳	۲/۰۳	۰/۸۷	۱/۵۸	۲/۰۶
	TII	۱/۰۳	۲/۰۴	۱/۰۹	۲/۳۳	۸/۲۸	۱/۱۲	۱/۰۸	۱/۸۶	۱/۰۲	۱/۵۹	۲/۵۹
	TE	۴/۷۸	۱/۸۰	۲/۲۱	۵/۳۴	۶/۳۹	۳/۱۵	۲/۱۴	۱/۳۳	۱/۳۲	۲/۳۰	۲/۳۰
	kappa	۹۰/۴۳	۹۶/۳۷	۹۵/۵۶	۸۹/۳۱	۸۷/۰۹	۹۳/۶۷	۹۶/۳۸	۹۷/۳۳	۹۷/۳۴	۹۵/۳۶	۹۵/۳۶
ناحیه ۵	TI	۲۵/۸۱	۱۹/۸۵	۱۷/۶۳	۱۴/۴۲	۱۹/۲۵	۴/۷۱۳	۲/۱۵	۲/۰۵	-	۶/۰۷	۶/۰۷
	TII	۱/۸۹	۱/۵۷	۰/۴۹	۰/۸۵	۳/۲۰	۱/۶۵	۲/۷۴	۳/۰۷	-	۵/۶۳	۵/۶۳
	TE	۱۳/۹۱	۱۰/۷۵	۹/۰۱	۸/۷۶	۱۱/۲۷	۲۲/۶۷	۱۲/۲۱	۱۰/۶۰	-	۵/۸۵	۵/۸۵
	kappa	۷۲/۲۱	۷۸/۵۱	۸۱/۹۷	۸۲/۴۶	۷۷/۴۸	۵/۱۹۵	۷۵/۶۱	۷۸/۷۸	-	۸۸/۳۰	۸۸/۳۰
ناحیه ۶	TI	۰/۱۳	۴/۲۱	۱۴/۰۳	۴۹/۳۴	۱۰/۳۳	۷/۰۳	۱/۹۰	۱/۴۲	-	۰/۸۹	۰/۸۹
	TII	۱۲/۰۰	۱/۹۳	۲/۲۳	۱/۶۰	۵/۶۸	۶/۹۹	۶/۹۶	۱۷/۲۵	-	۱۰/۰۹	۱۰/۰۹
	TE	۲/۷۲	۳/۷۱	۱۱/۴۵	۲۱/۳۱	۹/۳۱	۷/۰۲	۳/۰۱	۴/۸۸	-	۲/۹۰	۲/۹۰
	kappa	۹۱/۶۸	۸۹/۶۱	۷۱/۴۱	۵۲/۷۴	۷۵/۴۸	۷۰/۶۹	۹۱/۱۸	۸۵/۰۶	-	۹۱/۲۹	۹۱/۲۹
ناحیه ۷	TI	۱/۹۴	۷/۱۵	۱۳/۹۴	۹۱/۲۸	۲/۹۶	۲۲/۳۹	۱۹/۶۴	۱/۵۴	-	۰/۴۲	۰/۴۲
	TII	۶/۲۳	۰/۱۷	۰/۲۵	۰/۰۷	۳/۶۵	۰/۲۵	۰/۵۸	۲۴/۵۴	-	۱۶/۷۵	۱۶/۷۵
	TE	۲/۰۸	۶/۹۱	۱۳/۴۷	۳۵/۸۷	۲/۹۹	۲۱/۶۳	۱۸/۹۹	۲/۳۳	-	۰/۹۸	۰/۹۸
	kappa	۷۴/۵۲	۴۷/۰۹	۲۹/۶۹	۱۰/۳۱	۶۷/۴۹	۱۹/۱۵	۲۱/۸۱	۶۷/۸۲	-	۸۴/۹۸	۸۴/۹۸
ناحیه ۸	TI	۰/۱۴	۷/۱۵	۹/۷۸	۱۸/۸۸	۷/۵۱۹	۲/۲۶	۲۴/۵۷	۵/۴۱	-	۰/۳۸	۰/۳۸
	TII	۱۳/۲۵	۹/۷۸	۱/۵۹	۱/۹۸	۰/۲۲	۰/۳۴	۰/۳۴	۲/۷۷	-	۱۵/۲۰	۱۵/۲۰
	TE	۱/۶۳	۱/۵۹	۸/۸۵	۱۶/۹۷	۳/۲۰	۲/۲۰	۲۱/۸۳	۵/۱۱	-	۲/۰۶	۲/۰۶
	kappa	۹۱/۴۴	۶۶/۷۵	۴۸/۳۷	۲۶/۲۶	۸/۹۰۷	۴۰/۸۱	۷۸/۲۸	۷۹/۸۶	-	۸۹/۲۰	۸۹/۲۰
میانگین	TI	۷/۱۵	۱۰/۱۲	۱۵/۴۸	۳۸/۸۲	۱۰/۳۰	۲۱/۵۶	۱۳/۶۳	۵/۱۸	۸/۲۸	۲/۸۷	۲/۸۷
	TII	۷/۲۵	۱/۶۰	۱/۵۷	۱/۸۱	۹/۵۹	۱/۸۸	۲/۳۶	۱۲/۱۴	۲/۰۳	۸/۶۱	۸/۶۱
	TE	۵/۴۲	۵/۴۲	۷/۰۵	۱۱/۰۳	۱۸/۰۷	۸/۷۳	۹/۸۳	۵/۲۴	۵/۴۸	۳/۶۲	۳/۶۲
	kappa	۸۴/۸۲	۶۷/۲۳	۶۹/۲۱	۶۶/۹۷	۷۶/۸۱	۶۴/۵۶	۷۳/۰۵	۸۳/۵۱	۸۹/۰۵	۸۹/۶۸	۸۹/۶۸

• مراجعه شود به : <http://www.itc.nl/isprswgIII-3/filtertest>

می باشد، در حالیکه این مقدار برای روش اکسلسیون مربوط به هشت ناحیه مطبلياعاتی است. مقدار خطای میانگین نوع اول، نوع دوم، کلی و کاپا مربوط به چهار ناحیه مطالعاتی مورد استفاده BVMS برای روش اکسلسیون به ترتیب ۸/۷۱۹، ۵/۷۶، ۶/۱۷ و ۲/۳۰ بوده و این مقادیر برای روش پیشنهادی به ترتیب ۱/۵۲، ۵/۳۰، ۴/۳۶ و ۹۰/۹۱ می باشند. همان طور که از

مطابق نتایج ارائه شده توسط ISPRS (جدول ۱) روند پیشنهادی کمترین میانگین میزان خطای کلی را دارد که نشان از قدرت عملکرد روش پیشنهادی در شناسایی نقاط غیرزمینی می باشد. پس از روش پیشنهادی روش های اکسلسیون و BVMS کمترین میزان خطای کلی را دارند که خطای کلی مربوط به روش BVMS متعلق به چهار ناحیه مطالعاتی

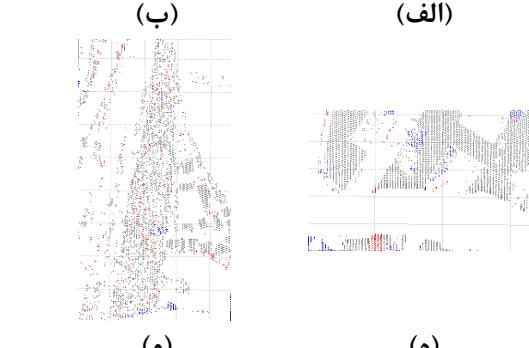
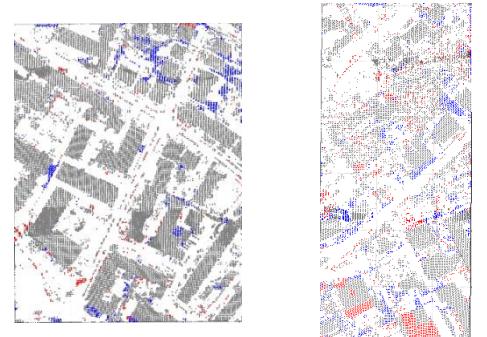
خطای کلی ۹۸٪ است. در بیشتر روش‌های ارائه شده، میزان خطای نوع دوم بسیار کاهش یافته و این کاهش با افزایش چشمگیر میزان خطای نوع اول همراه شده است. در واقع با این کار خطای کلی این روش‌ها نیز افزایش یافته است که کار نامطلوبی می‌باشد. درواقع باید بین خطاهای نوع اول و دوم یک تعادل برقرار باشد تا خطای کلی کاهش یابد. در روش پیشنهادشده، خطای نوع اول به نسبت، کمتر از خطای نوع دوم بوده و تعادلی نسبی میان این دو نوع خطا برقرار است که این عامل سبب کاهش خطای کلی گشته است. در شکل (۱۱) به صورت شماتیک  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$ ,  $e$ ,  $f$ ,  $g$ ,  $h$ ,  $j$ ,  $z$ ,  $w$ ,  $o$  و  $v$  روابط (۱۸)، (۱۹) و (۲۰) به ترتیب با رنگ‌های سفید، قرمز، آبی و خاکستری نمایش داده شده‌اند.



شکل ۱۱: نمایش شماتیک خطاهای موجود در شناسایی عوارض غیرزمینی توسط روش پیشنهادی (سفید =  $a$ , قرمز =  $b$ , آبی =  $c$  و خاکستری =  $d$ )

سطح زمین را به عنوان عارضه غیرزمینی استخراج می‌نمایند. روش ژئودزیک مورفولوژی بهدلیل ساختار محکم‌تر این ضعف را پوشش داده است، منتها در مقابل در مناطق کوهستانی با عوارض کم ارتفاع

این مقادیر پیداست عملکرد روش ارائه شده توسط اکسلسون در چهار ناحیه ابتدایی ضعیفتر از روش BVMS است. در حالیکه روش پیشنهادی در این چهار ناحیه نیز عملکرد بهتری نسبت به دیگر روش‌ها دارد. با توجه به جدول و بررسی عملکرد روش پیشنهادی در هر یک از نواحی مشخص است و بیشترین میزان خطای کلی مربوط به ناحیه ۱ است که در آن مجموعه‌ای از درختان و ساختمان‌ها در یک منطقه شیبدار قرار دارند. درواقع ناحیه ۱ یک ناحیه بسیار چالش‌برانگیز برای روش‌های فیلترینگ می‌باشد که روش پیشنهادشده در این ناحیه عملکرد بهتری نسبت به دیگر الگوریتم‌ها دارد. کمترین میزان خطای کلی، مربوط به ناحیه ۶ می‌باشد که مربوط به دامنه کوه به همراه ساختمان‌ها و درختان پراکنده است و دارای



روش‌هایی که برمنای عملگر گشایش مورفولوژی کار می‌نمایند، در مناطقی که سطح زمین دارای پیچیدگی نظیر زمین‌های ناهموار کوهستانی و یا شالیزارها دچار مشکل می‌شوند. به طوری که قسمتی از

شناسایی و حذف عوارض غیرزمینی به منظور استخراج DTM مطرح گشته است. روند پیشنهادشده دارای دو الگوریتم اصلی با عنوان‌های تورم ژئودزیک تدریجی و جستجو و برچسبزنی بوده است. استفاده از دو روش به دلیل اهمیت بالای شناسایی عوارض غیرزمینی در استخراج DTM صورت گرفته است. به طوری که تفاوت زیاد هندسه مورداستفاده و روند هر یک از روش‌ها باعث شد، عوارض غیرزمینی با هر هندسه و موقعیتی شناسایی گرددند. در روش تورم ژئودزیک تدریجی با بررسی چهار پارامتر هندسی (روابط ۱۶-۱۲) و افزایش المان ارتفاعی به صورت تدریجی، عوارض غیرزمینی با هر اندازه و ساختاری شناسایی شدند. این روش در نواحی شبیدار موفق به استخراج تمامی نقاط عارضه نبود که این نقصان با طراحی روش جستجو و برچسبزنی مرتفع گردید. روش جستجو و برچسبزنی، محدوده مورد بررسی را در چهار راستا جستجو کرده و با بررسی پارامتر شبیب، نواحی که پتانسیل داشتن عارضه غیرزمینی دارند را استخراج نمود. در نهایت با اجتماع نتایج این دو روش، کلاس نهایی عوارض غیرزمینی به دست آمد. برای ارزیابی روند پیشنهادی از ۵ ناحیه مطالعاتی لایدار تهیه شده توسط ISPRS با پوشش و ناهمواری‌های متفاوت استفاده گردید. روند پیشنهادی قابل اجرا بر روی ابر نقاط بوده و مستقل از نحوه تهیه (لایدار و یا تناظریابی تصاویر) این نقاط است. همچنین با تراکم متفاوت ابر نقاط، الگوریتم پیشنهادی عملکرد بسیار مناسبی داشت. به طوری که میزان میانگین خطای نوع اول، خطای نوع دوم، خطای کلی و خطای کاپا نواحی مطالعاتی به ترتیب ٪۰.۸۷، ٪۰.۳۶ و ٪۰.۸۹ بوده است.

نظیر بوته و یا درختچه نمی‌تواند عملکرد مناسبی داشته باشد و توانایی شناسایی عارضه غیرزمینی را ندارد. البته لازم به ذکر است که با اصلاحات مطرح شده و معرفی المان‌های ساختاری برای شناسایی عوارض غیرزمینی این خطا به حداقل رسید؛ اما استفاده از روش جستجو و برچسب‌گذاری در کنار روش مورفولوژی ما را به حداقل کاراری رساند. در ضمن استفاده از روش جستجو و برچسبزنی به تنها‌ای برای شناسایی نقاط غیرزمینی به دلیل نحوه کار و ساختار این روش، در مناطق شهری با پوشش متراکم و ساختمان‌های چندلایه کارامد نمی‌باشد. به طور کلی می‌توان گفت که روش پیشنهادی با پوشش المان‌های هندسی و ساختاری متفاوت در شناسایی عوارض غیرزمینی با دقت مناسبی عوارض غیرزمینی را شناسایی نموده است. پس از شناسایی عوارض غیرزمینی، برای دستیابی به DTM منطقه باید مقادیر ارتفاعی مناطق ازدست‌رفته با استفاده از درون‌یابی بازیابی شوند. واضح است که هر چه روش فیلترینگ ابر نقاط قدرتمندتر باشد، DTM استخراج شده از منطقه دقیق‌تر می‌گردد. روش پیشنهادی عملکرد بسیار مناسبی جهت فیلترینگ و شناسایی عوارض غیرزمینی از خود نشان داد که طبعاً منجر به استخراج DTM دقیق از منطقه می‌گردد. دلیل اهمیت فیلترینگ از آن جهت است که شناسایی اشتباه هر نقطه می‌تواند در مرحله درون‌یابی منجر به ایجاد خطا در بازیابی مناطق ازدست‌رفته گشته و نقاطی با خطای ارتفاعی زیاد بازیابی شوند که مطلوب نمی‌باشد.

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله روشی نوین برای فیلترینگ ابر نقاط جهت

#### مراجع

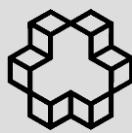
- [1] Z. Li, C. Zhu, and C. Gold. Digital Terrain Modeling: Principles and Methodology. CRC press, 2004.
- [2] V. Krishna Prasad. “Digital Terrain Modeling: Principles and Methodology”.
- The Photogrammetric Record, 24(127), 296-297, 2009.
- [3] F. Leberl, A. Irschara, T. Pock, P. Meixner, M. Gruber, S. Scholz, and A. Wiechert. “Point clouds”. Photogrammetric

- Engineering & Remote Sensing, 76(10), 1123-1134, 2010.
- [4] J. Kilian, N. Haala, and M. Englisch, "Capture and evaluation of airborne laser scanner data", International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 31: p. 383-388, 1996.
- [5] G. Sohn, and I. Dowman, "Terrain surface reconstruction by the use of tetrahedron model with the MDL criterion", International Archives of Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 34(3/A): p. 336-344, 2002.
- [6] K. Zhang, S-C. Chen, D. Whitman, M-L. Shyu, J. Yan, C. Zhang, "A progressive morphological filter for removing nonground measurements from airborne LIDAR data", IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 41(4): p. 872-882, 2003.
- [7] G. Vosselman, "Slope based filtering of laser altimetry data", International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 33(B3/2; PART 3): p. 935-942, 2000.
- [8] G. Sithole, and G. Vosselman, "Filtering of laser altimetry data using a slope adaptive filter", International Archives of Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 34(3/W4): p. 203-210, 2001.
- [9] P. Axelsson, "Processing of laser scanner data-algorithms and applications", ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 54(2): p. 138-147, 1999.
- [10] T. Krauss, M. Lehner, and P. Reinartz, "Modeling of urban areas from high resolution stereo satellite images", in Proceedings of the ISPRS Hannover Workshop: High-Resolution Earth Imaging for Geospatial Information. 2007.
- [11] K.R. Bandara, L. Samarakoon, R.P. Shrestha, and Y. Kamiya. "Automated generation of digital terrain model using point clouds of digital surface model in forest area", Remote Sensing, 3(5): p. 845-858, 2011.
- [12] A. Kobler, N. Pfeifer, P. Ogrinc, L. Todorovski, K. Oštr, and S. Džeroski, "Repetitive interpolation: A robust algorithm for DTM generation from Aerial Laser Scanner Data in forested terrain", Remote sensing of environment, 108(1): p. 9-23, 2007.
- [13] J. Tian, T. Krauss, and P. Reinartz, "DTM generation in forest regions from satellite stereo imagery", The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 40(1): p. 401-405, 2014.
- [14] R. Perko, H. Raggam, K. Gutjahr, M. Schardt, "Advanced DTM generation from very high resolution satellite stereo images", ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2(3): p. 165, 2015.
- [15] D. Mongus, and B. Žalik, "Parameter-free ground filtering of LiDAR data for automatic DTM generation", ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 67: p. 1-12, 2012.
- [16] F. Yuana, J. Zhang, L. Zhang, and J. Gaob, "DEM generation from airborne LIDAR data", The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, p.308-312, 2009.
- [17] B. Yunfei, L. Guoping, C. Chunxiang, Z. Xiaowen, Z. Hao, H. Qisheng, B. Linyan, and C. Chaoyi, "Classification of LiDAR point cloud and generation of DTM from LiDAR height and intensity data in forested area", The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 37(7): p. 313-318, 2008.
- [18] A. B. Jahromi, M. J. V. Zoj, A. Mohammadzadeh, and S. A. Sadeghian. "Novel filtering algorithm for bare-earth extraction from airborne laser scanning data using an artificial neural network", IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 4(4), 836-843, 2011.

- [19] S. Filin, "Surface clustering from airborne laser scanning data", International Archives of Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 34(3/A): p. 119-124, 2002.
- [20] T. Rabbani, F. Van Den Heuvel, and G. Vosselmann, "Segmentation of point clouds using smoothness constraint", International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 36(5): p. 248-253, 2006.
- [21] Q. Chen, P. Gong, D. Baldocchi, and G. Xie, "Filtering airborne laser scanning data with morphological methods", Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 73(2): p. 175-185, 2007.
- [22] K. Zhang. and D. Whitman, "Comparison of three algorithms for filtering airborne lidar data", Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 71(3): p. 313-324, 2005.
- [23] M. Elmqvist, E. Jungert, F. Lantz, A. Persson, and U. Soderman, "Terrain modelling and analysis using laser scanner data", International Archives of Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 34(3/W4): p. 219-226, 2001.
- [24] M. Elmqvist, "Ground surface estimation from airborne laser scanner data using active shape models", International Archives of Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 34(3/A): p. 114-118, 2002.
- [25] L.D. Cohen, and I. Cohen, "Finite-element methods for active contour models and balloons for 2-D and 3-D images", IEEE Transactions on Pattern Analysis and machine intelligence, 15(11): p. 1131-1147, 1993.
- [26] M. Kass, A. Witkin, and D. Terzopoulos, "Snakes: Active contour models", International journal of computer vision, 1(4): p. 321-331, 1988.
- [27] R. A. Haugerud, and D. Harding, "Some algorithms for virtual deforestation (VDF) of LIDAR topographic survey data", International archives of photogrammetry remote sensing and spatial information sciences, 34(3/W4): p. 211-218, 2001.
- [28] K. Krauss, and N. Pfeifer, "Advanced DTM generation from LIDAR data", International Archives Of Photogrammetry Remote Sensing And Spatial Information Sciences, 34(3/W4): p. 23-30, 2001.
- [29] K. Krauss, and W. Rieger, "Processing of laser scanning data for wooded areas", photogrammetric Week, Citeseer, 1993.
- [30] C. Briese, and N. Pfeifer. "Airborne laser scanning and derivation of digital terrain models", Fifth Conference on Optical. 2001.
- [31] W. Schickler, and A. Thorpe. "Surface estimation based on LIDAR", Conference on proceedings of the ASPRS Annual. Citeseer, 2001.
- [32] M. Vaaja, A. Kukko, H. Kaartinen, M. Kurkela, E. Kasvi, C. Flener, and P. Alho. "Data processing and quality evaluation of a boat-based mobile laser scanning system", Sensors, 13(9), 12497-12515, 2013.
- [33] G. Sithole, and G. Vosselman. "Comparison of filtering algorithms", workshop on on proceedings of the ISPRS working group III/3, 2003.
- [34] W.L. Martinez, A.R. Martinez, A. Martinez, and J. Solka, "Exploratory data analysis with MATLAB", 2010: CRC Press.
- [35] A. Almansa, F. Cao, Y. Gousseau, and B. Rougé. "Interpolation of digital elevation models using AMLE and related methods", IEEE Trans. Geosci. Remote Sens, 40, 314–325, 2002.
- [36] E.S. Anderson, J.A. Thompson, and R.E. Austin. "LiDAR density and linear interpolator effects on elevation estimates", Int. J. Remote Sens, 26, 3889–3900, 2005.
- [37] H. Arefi. "From LiDAR point clouds to 3D building models", PHD thesis, 2009.
- [38] W. Wang, H. Pottmann, and Y. Liu. "Fitting B-spline curves to point clouds by curvature-based squared distance minimization", ACM Transactions on

Graphics (ToG), 25(2), 214-238, 2006.

- [39] R.C. Gonzalez, and R. Eugene Woods, "Digital image processing", ISBN number 9780131687288, Publisher: Prentice Hall. 2008.
- [40] B. Jähne, H. Haussecker, and P. Geissler, "Handbook of computer vision and applications", Citeseer, Vol. 2. 1999.
- [41] H. Arefi, P. d'Angelo, H. Mayer, and P. Reinartz. "Iterative approach for efficient digital terrain model production from CARTOSAT-1 stereo images", Journal of Applied Remote Sensing 5, 053527-053527-053519, 2011.
- [42] H. Arefi, and M. Hahn, "A morphological reconstruction algorithm for separating off-terrain points from terrain points in laser scanning data", International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 36(3/W19): p. 120-125, 2005.
- [43] X. Men. "A slope-and elevation-based filter to remove non-ground measurements from airborne LIDAR data", UCGIS Summer Assembly, 28. 2005.
- [44] Z. Hui, Y. Hu, Y. Z. Yevenyo, and X. Yu. "An improved morphological algorithm for filtering airborne LIDAR point cloud based on multi-level kriging interpolation", Remote Sensing 8.1-35, 2016.
- [45] J. Cohen. "A coefficient of agreement for nominal scales", Educational and Psychological Measurement. 20(1): 37–46, 1960.



## Presenting a morphological based approach for filtering the point cloud to extract the digital terrain model

Behnaz Bigdeli<sup>1\*</sup>, Hamed Amini Amirkolaee<sup>2</sup>, Parham Pahlavani<sup>3</sup>

1- Department of Civil Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

2- PHD student, School of Surveying and Geospatial Eng., College of Eng., University of Tehran, Tehran, Iran

3- School of Surveying and Geospatial Eng., College of Eng., University of Tehran, Tehran, Iran

### Abstract

The Digital terrain model is an important geospatial product used as the basis of many practical projects related to geospatial information. Nowadays, a dense point cloud can be generated using the LiDAR data. Actually, the acquired point cloud of the LiDAR, presents a digital surface model that contains ground and non-ground objects. The purpose of this paper is to present a new approach of extracting the digital terrain model from the digital surface model. In the first step, noises were removed by preprocessing; then the irregular point cloud was converted to raster data. In the next step, the proposed gradual geodesic dilation and labeling approaches scan were applied in order to detect and eliminate the non-ground objects. The basis of gradual geodesic dilation approach was to increase the structural element size in each step, investigate the height heterogeneity and remove the non-ground objects, gradually. Also, utilizing the innovative scan labeling approach which operated based on slope differential helped to remove the non-ground objects completely.

Finally, the non-ground objects were removed and the lost regions were retrieved and the digital terrain model was generated by interpolation. For analyzing the proposed approach, the reference data of the ISPRS was employed. The analyzing results in the five test areas indicated 4.61%, 6.97% and 3.17% for Type I, Type II and total errors, respectively. These results clarify the good performance of the proposed approach for detecting the non-ground objects.

**Key words:** Digital Terrain Model, Point Cloud, Geodesic Dilation, Labeling, non-Ground Objects

**Correspondence Address** Department of Civil Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran.  
Tel: +98 233 2300259  
Email: : bigdeli@shahroodut.ac.ir