

استخراج مدل رقومی زمین از ابرنقاط

با ارائه یک روش پیش‌رونده مورفولوژی مبنا

حامد امینی امیرکلانی^۱

حمید عنایتی^۲

مریم ویسی^۳

تاریخ دریافت مقاله: ۹۵/۱۰/۰۶

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۵/۰۲/۰۷

چکیده

مدل رقومی زمین (DTM) نمایش آماری از سطح پیوسته زمین با استفاده از تعدادی نقطه با مختصات مشخص می‌باشد. استخراج مدل رقومی زمین به‌عنوان یکی از مهم‌ترین محصولات فتوگرامتری و سنجش‌ازدور که پایه بسیاری از پروژه‌های کاربردی است، همواره مدنظر کارشناسان بوده است. با فراهم شدن امکان تهیه نقاط با مختصات سه‌بعدی و دقت بالا از سطح زمین با استفاده از لیدار و یا تناظریابی چگال از تصاویر رقومی هوایی، زمینه دستیابی به مدل رقومی سطحی (DSM) با دقت مکانی بالا فراهم گشت. با این حال رسیدن از مدل رقومی سطحی به مدل رقومی زمین همچنان موضوعی پرچالش در نظر محققان است. در این مقاله روشی کاربردی در راستای استخراج مدل رقومی زمین با استفاده از ابرنقاط طراحی و پیاده‌سازی شد. در این روش طی دو روند مجزا و با در نظرگیری خصوصیات ساختاری محیط، عوارض غیرزمینی استخراج شده و پس از تلفیق آن‌ها نتیجه نهایی حاصل گشته است. به‌طوری‌که ابتدا یک روند مورفولوژی مبنای پیش‌رونده طراحی شد که در آن طی افزایش تدریجی ابعاد المان ساختاری عوارض غیرزمینی شناسایی شدند. روند دوم بر مبنای ژئودزیک مورفولوژی و افزایش تدریجی المان ارتفاعی بوده است. بهره‌گیری از دو روند به دلیل پوشش‌های متنوع، ناهمواری‌های متفاوت و عوارض بسیار متنوع مناطق مختلف صورت گرفت تا عملکرد روش پیشنهادی افزایش یابد. پس از حذف عوارض شناسایی شده و بازیابی مناطق ازدست‌رفته از طریق درون‌یابی مکعبی، مدل رقومی نهایی حاصل گشت. جهت ارزیابی از ابرنقاط حاصل از تناظریابی متراکم تصاویر هوایی رقومی و همین‌طور ابرنقاط لیدار بهره گرفته شد. نتایج ارزیابی در ۷ ناحیه مطالعاتی نشان از خطای RMSE متوسط ۰/۶۸ متر در استخراج مدل رقومی زمین و متوسط ۴/۸۵٪ در شناسایی عوارض غیرزمینی داشت.

واژه‌های کلیدی: مدل رقومی زمین، ابرنقطه، مورفولوژی، المان ساختاری

۱- دانشجوی دکتری فتوگرامتری دانشکده مهندسی نقشه برداری و اطلاعات مکانی، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران (نویسنده مسئول) hamedamini@ut.ac.ir

۲- کارشناس ارشد فتوگرامتری، دانشکده نقشه‌برداری، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، enayati_hamid@yahoo.com

۳- کارشناس ارشد فتوگرامتری، دانشکده نقشه‌برداری، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، v_mary1390@yahoo.com

۱- مقدمه

موجود چه نوع داده‌هایی بوده و اینکه از ابرنقاط نامنظم استفاده نموده‌اند و یا پس از شبکه‌بندی^۳ و درون‌یابی^۴ از داده‌های منظم بهره برده‌اند. اکسلسون (۲۰۰۰: ۱۱۰-۱۱۷) شبکه مثلث‌بندی نامنظم^۵ تطابق پذیر^۶ را پیشنهاد نمود. در این روش به‌جای استفاده از ابرنقاط درون‌یابی شده به‌صورت مستقیم از ابرنقاط نامنظم استفاده شده است. به‌طوری‌که ابتدا با چند نقطه اولیه یک شبکه ایجاد گشته و برای هر نقطه میزان زاویه فضایی مابین نقطه مذکور و نقاط گوشه‌ای شبکه موجود محاسبه شد. با بررسی میزان زوایا، در صورتی‌که زاویه محاسبه‌شده از حدآستانه‌ای کمتر بود به‌عنوان نقطه زمینی به شبکه اضافه شد و در غیر این صورت به‌عنوان نقطه غیرزمینی حذف گردید. (سومن و دومن؛ ۲۰۰۲: ۳۳۲-۳۴۴) ابتدا چهار طرف ناحیه مورد بررسی نقطه انتخاب شد و طی مثلث‌بندی نقاط با کمترین ارتفاع به‌عنوان نقطه زمینی در نظر گرفته‌شده و دوباره مثلث‌بندی صورت گرفت. با تکرار روند مذکور سعی گردید تا تمام نقاطی که به‌احتمال زیاد به زمین تعلق دارند، انتخاب شوند. در مرحله بعد و با در نظرگیری یک حدآستانه ارتفاعی، نقاطی که دارای اختلاف ارتفاع موردقبول نسبت به نقاط انتخاب‌شده در مرحله قبل بودند به‌عنوان نقطه زمینی انتخاب شدند. ولسمن (۲۰۰۰: ۹۳۵-۹۴۲) یک عملگر^۷ مورفولوژیک شیب مبنا برای استخراج و شناسایی عوارض غیرزمینی طراحی نمود. در این عملگر با محاسبه میزان شیب نقاط و بهره‌گیری از یک المان ساختاری، در صورت از حدی بیشتر نبودن میزان تغییر شیب در نقاط مجاور، نقطه مورد نظر به‌عنوان نقطه زمینی انتخاب می‌گشت. جهرمی و همکاران (۲۰۱۱: ۸۴۳-۸۳۶) روشی بر مبنای شبکه‌های عصبی برای استخراج مدل رقومی زمین استفاده نمود. کیلیان و همکاران (۱۹۹۶: ۳۸۱-۳۸۳) از عملگر گشایش^۸ مورفولوژی برای حذف عوارض

یکی از کاربردهای مهم ابرنقاط، تولید مدل رقومی زمین^۱ با دقت مکانی بسیار بالا است که شکل سطح زمین را با جزئیات بسیار بالا در اختیار کاربر قرار می‌دهد. مدل‌های رقومی برای اهداف متنوعی به کار گرفته می‌شوند که اخیراً با ایجاد امکان استخراج آن با سرعت و دقت بالاتر بیشتر مورد توجه کارشناسان قرار گرفته است. در واقع مدل‌های رقومی بزرگ‌مقیاس مانند مدل‌های SRTM^۲ جهت بررسی محیط زمین در یک منظر با وسعت زیاد مناسب می‌باشند. در حالی‌که بررسی دقیق‌تر نیاز به یک مدل دقیق‌تر دارد که تمام تغییرات محلی کوچک را نمایش دهد. امروزه با ایجاد امکان بدست آوردن ابرنقاط با دقت بالا با استفاده از لیدار و یا تناظریابی چگال تصاویر رقومی هوایی، روند دسترسی به مدل رقومی دقیق با جزئیات بالای سطح زمین هموارتر گشته است. ابرنقاط لیدار حاوی داده‌های شدت سیگنال بوده و ابرنقاط حاصل از تناظریابی چگال دارای مقادیر طیفی در باندهای مختلف می‌باشند. اهمیت و کاربرد داده‌های شدت سیگنال و مقادیر طیفی بیشتر در زمینه شناسایی عوارض است.

یکی از چالش‌های مهم در شناسایی عوارضی نظیر ساختمان‌ها و درختان، استخراج مدل رقومی زمین است. در واقع این کار باعث تفکیک نقاط زمینی و غیرزمینی می‌شود که روند شناسایی را بسیار دقیق‌تر می‌نماید. مقالات متنوعی برای استخراج مدل رقومی زمین از ابرنقاط به ویژه داده‌های لیدار ارائه گشته است (Vosselman & Maas, 2010; Shan & Toth, 2008).

با توجه به اهمیت موضوع و آنالیز محیط‌ها با ناهمواری‌های متفاوت برای پیاده‌سازی، اثبات شده که موضوع استخراج مدل رقومی از مناطق شهری و محیط‌های پیچیده و ناهموار بسیار مشکل است (Sithole & Vosselman, 2004: 85-101; Lui, 2008: 31-49). همکاران (۲۰۱۰: ۸۶۰-۸۳۳) به صورت تفکیکی بر روی الگوریتم‌ها و روند کار هر یک کار کردند.

به‌طوری‌که مشخص نمودند که ورودی روش‌های

3- Grid Partitioning

4- Interpolation

5- Triangulated Irregular Network (TIN)

6- Adaptive

7- Filter

8- Opening

1- Digital Terrain Model

2- Shuttle Radar Topography Mission

شد. از شیب محاسبه شده و مقایسه آن با شیب محلی برای شناسایی عارضه غیرزمینی بهره گرفته شد. یونفی و همکاران (۲۰۰۸: ۳۱۱-۳۱۳) از میزان خمیدگی^۳ و کشیدگی^۴ برای تفکیک نقاط زمینی و غیرزمینی استفاده گردید. در واقع از این ویژگی استفاده شد که مقادیر کشیدگی و خمیدگی برای مناطق دارای ناهمواری حاصل از پوشش گیاهی بیشتر از مناطق دارای ناهمواری‌های ملایم است.

از خطوط اسکن جهت اسکن داده‌ها از جهت‌های مختلف و استخراج نتیجه از کنار هم گذاشتن نتایج استفاده شده است. (Wang & Zhang, 2016; Sithole & Voselman, 2005)

در این مقاله الگوریتمی متفاوت برای استخراج مدل رقومی زمین با استفاده از ابرنقاط ارائه گشته است. این روش در دو روند کلی و مجزا عوارض غیرزمینی را شناسایی می‌نماید. در نهایت نیز از تلفیق نتایج آن‌ها نتیجه نهایی حاصل می‌گردد. روند اول با بهره‌گیری از فیلتر تورم^۵ ژئودزیک مورفولوژی و افزایش تدریجی ارتفاع المان ساختاری عمل می‌نماید. روند دوم از عملگرهای مورفولوژی براساس میزان شیب منطقه و افزایش مرحله‌ای ابعاد المان ساختاری جهت استخراج عوارض غیرزمینی استفاده می‌نماید. در نهایت با بهره‌گیری از نتایج دو روند، حذف عوارض غیرزمینی و درون‌یابی مناطق از دست‌رفته نتیجه نهایی استخراج مدل رقومی زمین حاصل می‌گردد. در ادامه ساختار مقاله به این صورت است که در بخش ۲ روند پیشنهادی مطرح شده است. در بخش ۳ روند پیشنهادی پیاده‌سازی شده و مورد ارزیابی قرار می‌گیرد و در نهایت در بخش ۴ نتایج حاصل شده از این مقاله ارائه گشته و مورد بحث قرار می‌گیرد.

۲- روش پیشنهادی

روند پیشنهادی برای شناسایی و حذف عوارض غیرزمینی از ابرنقاط به دو بخش اصلی تقسیم می‌شود. در هر بخش به صورت جداگانه و با در نظرگیری ویژگی‌های

غیرزمینی استفاده نموده‌اند. در این تحقیق نشان داده شد که ابعاد المان ساختاری عملگرهای مورفولوژی تأثیر به‌سزایی در نحوه شناسایی عوارض غیرزمینی دارد. به طوری که ابعاد کوچک المان ساختاری سبب عدم شناسایی عوارض با وسعت زیاد و ابعاد بزرگ باعث حذف قسمتی از زمین به‌عنوان عارضه غیرزمینی می‌گردد. این روش با ارائه روشی مبتنی بر تغییر تدریجی ابعاد المان ساختاری تا حدودی بهبود داده شد (Zhang et al., 2003: 872-882). چن و همکاران (۲۰۰۷: ۱۷۵-۱۸۵) روشی بر مبنای شیب ارائه نمودند که با اضافه نمودن شرطی که به وسیله آن لبه‌های استخراج‌شده از عوارض بزرگ به‌عنوان مناطق دارای پتانسیل جهت حذف به‌عنوان عوارض غیرزمینی در نظر می‌گرفت. به طوری که اگر میزان تغییرات ارتفاعی در مناطق مرزی به صورت تدریجی باشد نقاط زمینی بوده و اگر تغییرات به صورت ناگهانی باشند، مناطق مورد بررسی به‌عنوان عارضه غیرزمینی حذف می‌گشتند. کوبلر و همکاران (۲۰۰۷: ۹-۲۳) از عملگرهای مورفولوژی برای حذف خطاهای فاحش و همین‌طور عوارض غیرزمینی استفاده نمود. به طوری که با اعمال پیاپی عملگرهای گشایش و بسته‌شدن^۱ به ترتیب برای حذف عوارض بزرگ و کوچک استفاده شد. در مرحله بعد برای کاهش تأثیر گرادیان بر سطح و ایجاد یک سطح نرم و بدون نوسان از درون‌یابی^۲ TPS بهره گرفته شد. در هر مرحله از درون‌یابی مقادیر باقیمانده سطح محاسبه شده و با در نظرگیری یک حد‌آستانه مقادیر غیرزمینی شناسایی و حذف گشتند. مونگاس و ژالیک (۲۰۱۲: ۱-۱۲) به دلیل وجود نقص در استفاده تنها از شیب برای شناسایی عوارض غیرزمینی نظیر ساختمان‌های بزرگ با سقف مسطح که محاسبه شیب نقاط همسایه وجود عارضه را نشان نمی‌دهد، اصلاحاتی در نظر گرفتند. به طوری که یک پنجره جستجو ۳×۳ در نظر گرفته شد که در آن کمینه به‌عنوان نقطه غیرزمینی در نظر گرفته می‌شد. برای آنکه الگوریتم دچار خطای محلی نشود، یک شیب کلی بادر نظرگیری تعدادی نقطه در منطقه محاسبه

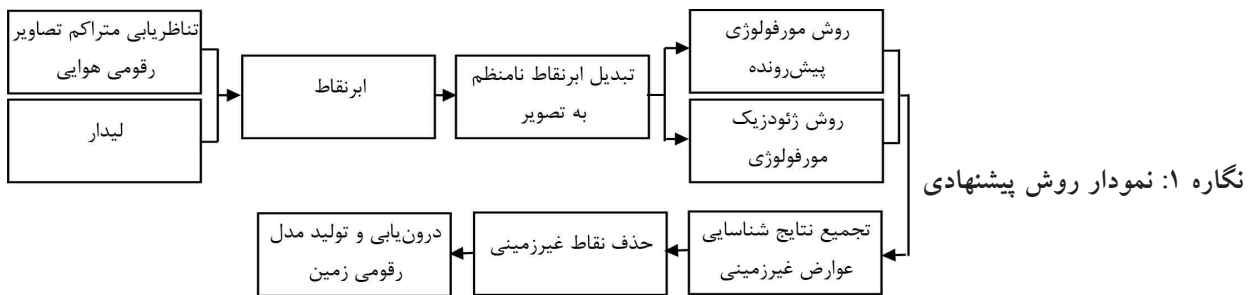
3- Skewness

4- Kurtosis

5- Dilation

1- Closing

2- Thin Plate Spline

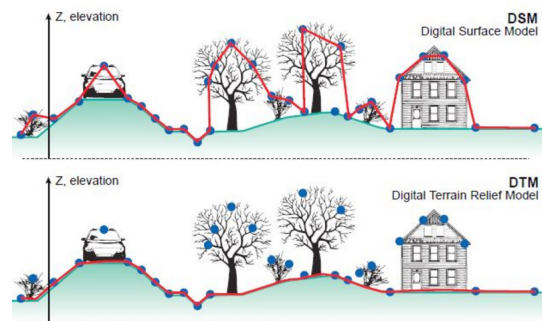


الگوریتم‌های موجود در این زمینه به دلیل بررسی تمام نقاط موجود به صورت جداگانه و منفرد، در مدت زمان طولانی به جواب می‌رسند. از آنجاکه هدف ارائه روشی کاربردی بوده است؛ به طوری که توانایی پردازش نقاط و دستیابی به مدل رقومی زمین با دقت بالا در مدت زمانی کوتاه را داشته باشد، ابرنقاط نامنظم با شبکه‌بندی و درون‌یابی به تصویری که در آن مقدار درجه خاکستری نشان‌دهنده مقادیر ارتفاعی است، تبدیل گشت. چراکه کار با داده‌های تصویری ساده‌تر بوده و همین‌طور الگوریتم‌های وسیع‌تری در زمینه پردازش تصویر ارائه گشته که می‌توانند راه‌گشای کار در روند پردازش باشند (Rafael et al., 2010). برای درون‌یابی در روند تبدیل ابرنقاط به داده‌های تصویری از روش نزدیک‌ترین همسایه ۲ استفاده شد. این روش برخلاف روش‌های دیگر سعی در نرم‌سازی سطح بازسازی شده را ندارد و این کار سبب می‌گردد که نقاط و مناطق دارای تغییر ارتفاعی ناگهانی با نرم شدن دچار تغییر شکل نشوند. به عبارت دیگر تغییرات ارتفاعی ناگهانی به تغییرات ارتفاعی تدریجی تبدیل نشوند (Arefi, 2009). در راستای توضیح کامل روش پیشنهادی در بخش ۲-۱ روش مورفولوژی پیش‌رونده و در بخش ۲-۲ روشی بر مبنای ژئودزیک مورفولوژی ارائه شده است.

۲-۱- مورفولوژی پیش‌رونده

این روش شامل چهار مرحله کلی است که طی آن سعی گشته با بهره‌گیری ساده از عملگرهای مورفولوژی عوارض غیرزمینی شناسایی و حذف گردند. در مرحله اول یک سطح کمینه ارتفاعی با استفاده از نقاط ایجاد می‌شود. برای این کار

ساختاری عوارض غیرزمینی شناسایی می‌گردند. در نهایت با محاسبه اجتماع نتایج الگوریتم‌های مطرح شده نتیجه نهایی حاصل می‌گردد. هر یک از روش‌ها ویژگی‌ها و نقاط قوت و ضعف منحصربه‌فردی دارند که سبب می‌گردد تا استفاده از هر دوی آن‌ها به نتیجه مطلوب‌تری برسد. در نگاره ۱ نمودار کلی روش پیشنهادی آورده شده است.



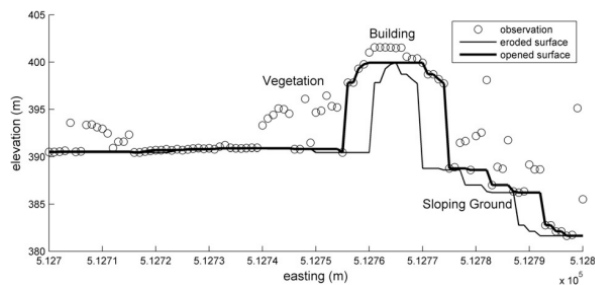
نگاره ۲: تفاوت مدل سطحی و مدل رقومی زمین

(<http://www.charim.net/datamanagement/32>)

همان‌طور که گفته شد، هدف این مقاله ارائه روشی برای استخراج مدل رقومی سطح زمین از ابرنقاط می‌باشد. ابرنقاط حاصل از لیدار یا تناظریابی چگال تصاویر رقومی هوایی به صورت تقریبی مدل سطحی زمین^۱ را در اختیار کاربر قرار می‌دهد. تفاوت مدل سطحی با مدل رقومی زمین، حضور عوارض طبیعی و مصنوعی بر روی زمین در مدل سطحی است. در واقع برای رسیدن به سطح زمین باید این نقاط از ابرنقاط موجود حذف گردند. در نگاره ۲ تفاوت مدل سطحی و مدل رقومی زمین آورده شده است. پردازش ابرنقاط نامنظم بسیار وقت‌گیر بوده و گروهی از

2- Nearest Neighbor

1- Digital Surface Model



نگاره ۳: نحوه کار عملگر گشایش

(Sithole & Voselman, 2003: 71-78)

در ادامه مراحل روند پیش‌رونده مذکور به ازای اندازه المان ساختاری بر اساس بردار تشکیل شده در مرحله اول، به تفصیل در ادامه آورده شده است:

تعیین حدآستانه ارتفاعی برای حذف عوارضی که در هر مرحله اعمال عملگر گشایش شناسایی می‌شوند. برای محاسبه یک حدآستانه شیب جهت شناسایی عوارض غیرزمینی در نظر گرفته و با ضرب آن در ابعاد المان ساختاری، حدنصاب ارتفاع بدست می‌آید.

عملگر گشایش مورفولوژی با المان ساختاری دایره‌ای شکل با ابعاد موردنظر بر روی سطح ایجادشده، اعمال می‌گردد و نتایج محاسبه می‌گردند.

با محاسبه تفاضل سطح ایجادشده در محله قبل و سطح ایجادشده در این مرحله، عوارض دارای پتانسیل انتخاب به‌عنوان عارضه غیرزمینی در این مرحله استخراج می‌گردند. در میان آن‌ها قطعاتی که دارای ارتفاعی بیشتر از حدتعیین شده در مرحله دوم هستند، به‌عنوان عارضه غیرزمینی شناسایی می‌شوند.

سطح ایجادشده جدید در این مرحله جایگزین سطح قبلی می‌گردد.

در مرحله چهارم تفاضل سطح اولیه موجود از داده‌های ابرنقاط از سطح نهایی ایجادشده در مرحله سوم، محاسبه می‌گردد و نواحی‌ای که دارای ارتفاعی بیشتر از یک حدآستانه می‌باشند، به‌عنوان عارضه غیرزمینی نهایی انتخاب می‌شوند. این حدآستانه برای کل ناحیه یکسان در نظر گرفته

یک پنجره جستجو بر اساس نظر کاربر تعیین می‌گردد که باید مطابق آن تصویر اسکن و جستجو شود. طی روند جستجو و با هر بارقراری پنجره بر روی تصویر کمترین مقدار ارتفاعی در نظر گرفته می‌شود. لازم به ذکر است که روش‌های دیگری نیز برای ایجاد سطح کمینه مطرح شده است (Hollaus et al., 2010: 221-226)، منتها از آن‌جا که هدف دوری از پیچیدگی زیاد و دستیابی به دقت مناسب است، استفاده از پنجره جستجو پیشنهاد شده است.

عملگرهای مورفولوژی براساس المان‌های ساختاری کار می‌نمایند. از این رو در مرحله دوم از ابعاد موردنظر برای المان ساختاری ایجاد می‌گردد. مقادیر این بردار از یک پیکسل تا اندازه‌ای که توسط کاربر تعیین می‌شود، ادامه می‌یابد. لازم به ذکر است که ابعاد المان ساختاری توسط کاربر براساس واحد متر بیان گشته و با ضرب این مقدار در ابعاد پیکسل و گرد کردن به بالا به تعداد پیکسل تبدیل می‌گردد.

در مرحله سوم یک روند پیش‌رونده برای شناسایی نقاط مربوط به سطح زمین ارائه شد. این روند با اعمال عملگر گشایش بر روی نقاط کمینه بدست آمده از مرحله پیش آغاز می‌شود. عملگر گشایش از ترکیب عملگر فرسایش ۱ و تورم مورفولوژی به‌صورت پی‌پی بدست می‌آید.

$$A \circ B = (A \oplus B) \oplus B, \quad (1)$$

که \oplus نشان‌دهنده عملگر تورم و \ominus نشان‌دهنده عملگر فرسایش است. عملگر فرسایش باعث کاهش مقادیر ارتفاعی به‌تناسب با مناطق کم ارتفاع گشته و عملگر تورم باعث افزایش مقادیر ارتفاعی متناسب با نقاط مرتبط در محدوده المان ساختاری می‌گردد. المان ساختاری می‌تواند دارای اشکال و ابعاد مختلف باشد. در واقع اعمال عملگر گشایش تاحدودی باعث حذف مناطق دارای تغییر ارتفاعات ناگهانی (که عموماً ناشی از حضور عارضه غیرزمینی است) می‌شود. در نگاره ۳ نحوه کار عملگر گشایش نشان داده شده است.

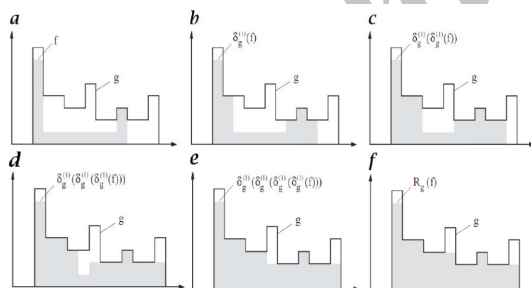
منطقه به عنوان ماسک در نظر گرفته شده و تصویر حاوی مقادیر ارتفاعی به میزان h کوچک تر از ماسک به عنوان نشانگر ایجاد می گردد. انتخاب تصویر اصلی به عنوان ماسک سبب عدم گسترش بیش از حد تصویر نشانه طی روند بازسازی می شود. جهت دستیابی تصویر بازسازی شده ابتدا عملگر تورم به تصویر نشانگر اعمال می شود. (Vincent, 1993: 176-201)

$$\delta_I^{(1)}(J) = (J \oplus B) \wedge I, \quad (4)$$

که I تصویر ماسک، J تصویر نشانگر، \oplus عملگر تورم، B المان ساختاری و \wedge به معنای کمینه نقطه به نقطه مابین تصویر نشانگر و ماسک می باشد. همان طور که گفته شد پس از هر مرحله تورم، نتیجه حاصله متناسب با ماسک محدود می شود و این روند تا رسیدن به ثبات ادامه می یابد (Gozalez et al., 2004).

$$\delta_I^{(n)}(J) = \underbrace{\delta_I^{(1)}(J) \circ \delta_I^{(1)}(J) \circ \dots \circ \delta_I^{(1)}(J)}_{n \text{ times}}, \quad (5)$$

در نگاره ۴ نحوه عملکرد تورم ژئودزیک مورفولوژی برای بازسازی تابع سیگنال g با استفاده از تابع سیگنال f نشان داده شده است.



نگاره ۴: نحوه عملکرد تورم ژئودزیک مورفولوژی جهت

بازسازی یک سیگنال (Janež et al., 1999: 423-450)

تنها مقدار متغیر h در میزان استخراج عوارض و نحوه بازسازی تصویر مؤثر است. به طوری که مقدار کم h باعث استخراج خط الرأس ساختمان ها و مقدار زیاد آن سبب کردن مقداری از سطح زمین می گردد (Arefi, 2009).

مقدار صحیح h بستگی به ارتفاع عوارض ارتفاعی منطقه

نمی شود. چراکه شیب منطقه در میزان ارتفاع مناسب جهت استخراج عوارض غیرزمینی مؤثر است. از این رو با تعریف یک مقیاس، حد آستانه ای وابسته به شیب مطابق رابطه زیر تعریف می گردد. در این رابطه ارتفاع مناسب (Elvi) در هر نقطه برابر با ارتفاع ثابت (Elvfix) در نظر گرفته شده به اضافه حاصل ضرب مقیاس تعیین شده (ScElv) در شیب (Sli) نقطه مورد نظر می باشد.

$$Elv_i = Elv_{fix} + Sli_i \times ScElv, \quad i = \{1, 2, \dots, n\}, \quad (2)$$

که در این رابطه n تعداد پیکسل های مورد بررسی است.

۲-۲- ژئودزیک مورفولوژی

ژئودزیک مورفولوژی به نوعی ترکیبی از عملگرهای مرسوم مورفولوژی می باشند. عملگرهای مورفولوژی غالباً با توجه به تصویر و المان ساختاری عمل می نمایند، در حالی که عملگر مورفولوژی بر مبنای فاصله ژئودزیک با در نظر گیری یک تصویر به عنوان نشانگر^۱ و یک تصویر به عنوان ماسک^۲ عمل می نماید. در واقع این عملگرها با کار بر روی دو تصویر نشانگر و ماسک، ویژگی های شاخص تصویر را استخراج می نمایند. بازسازی تصویر با استفاده ژئودزیک مورفولوژی از طریق اعمال پیاپی عملگر فرسایش و یا تورم بر روی تصویر نشانه تا دستیابی به ثبات^۳ حاصل می گردد. ماسک به عنوان محدود کننده روند گسترش و فرسایش دائمی تصویر نشانگر عمل می نماید. از آنجاکه در این مقاله هدف استخراج عوارض غیرزمینی است، از عملگر تورم ژئودزیک مورفولوژی استفاده می گردد. در ابتدا باید ذکر شود که ابعاد تصویر نشانگر و ماسک باید یکسان باشد و مقادیر درجه خاکستری نشانگر باید کوچک تر و نهایتاً برابر تصویر ماسک باشد.

$$Marker = Mask - h, \quad (3)$$

که h مقدار ارتفاعی که بر اساس مقادیر درجه خاکستری تعیین می شود. به طور کلی می توان گفت که تصویر ارتفاعی

1- Marker

2- Mask

3- Stability

درون‌یابی مناطق از دست‌رفته مطابق نقاط باقیمانده صورت می‌گیرد.

پس از بازیابی مقادیر ارتفاعی مناطق از دست‌رفته مطابق روش درون‌یابی مکعبی ۲، مدل رقومی زمین ایجاد می‌گردد. استفاده از روش درون‌یابی مکعبی به سبب توانایی ایجاد یک سطح پیوسته، نرم و پیوسته توسط آن است. همچنین این روش درون‌یابی هزینه محاسباتی کمی دارد که باعث رسیدن به جواب در مدت زمان کوتاه می‌گردد.

۳- پیاده‌سازی و ارزیابی نتایج

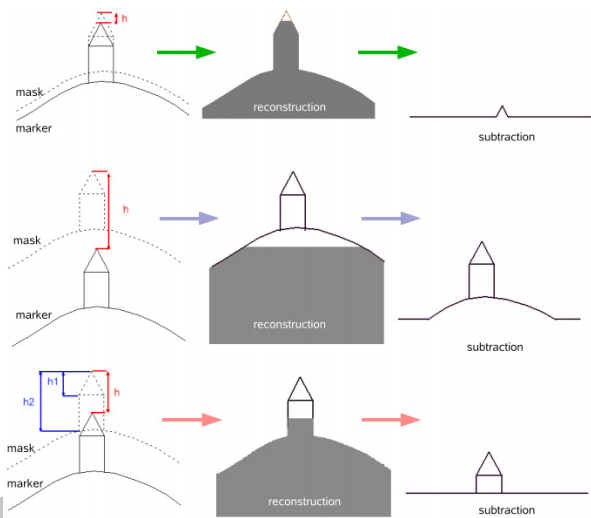
نتایج پیاده‌سازی هر یک از مراحل روند پیشنهادی در ادامه به تفصیل ارائه گشته است.

۳-۱- منطقه و داده‌های مطالعاتی

در این مقاله برای ارزیابی روش‌های ارائه شده هم از ابرنقاط حاصل از تناظریابی متراکم تصاویر هوایی رقومی و هم از ابرنقاط حاصل از لیدار استفاده شده است.

در گروه اول از تصاویر هوایی UltracamX با قدرت تفکیک ۶ میکرون که با مقیاس ۱/۸۰۰۰ برداشت شده‌اند. این تصاویر توسط سازمان جغرافیایی نیروهای مسلح تهیه شده‌اند. با استفاده از نقاط کنترل زمینی و در نظرگیری اطلاعات GPS و IMU مثلث‌بندی انجام شده و ابرنقاط با تراکم مناسب استخراج می‌شوند. برای ارزیابی دقت نیاز به داده‌های مرجع است که در این راستا به صورت دستی نقاط غیرزمینی شناسایی و حذف شده‌اند عملیات حذف نقاط چندین مرتبه توسط کارشناسان سازمان جغرافیایی بررسی شد تا به صورت کامل نقاط غیرزمینی حذف شوند. در نتیجه تنها خطایی که امکان دارد در مدل قومی وجود داشته باشد، خطای جزئی مربوط به عملیات مثلث‌بندی است. لازم به ذکر است که خطای مثلث‌بندی مستقل از هدف الگوریتم شناسایی نقاط غیرزمینی است. به عبارت دیگر در الگوریتم ارائه شده موقعیت نقاط تغییر نکرده و تنها

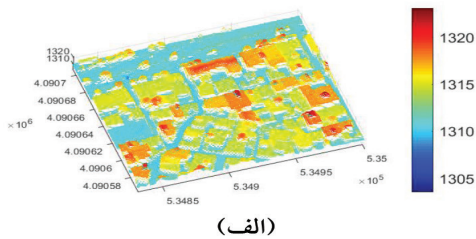
مورد مطالعه دارد. از این رو برای دستیابی به بهترین نتایج به طوری که شیب و میزان تغییرات ارتفاعی منطقه کمترین تأثیر را بر روی نتایج بگذارند، مقدار h به صورت تدریجی افزایش می‌یابد. اما محدوده تغییرات h به صورت $[3hm/2, hm/2]$ است که در آن hm برابر نصف تفاضل بیشینه ارتفاعی از کمینه ارتفاعی است.



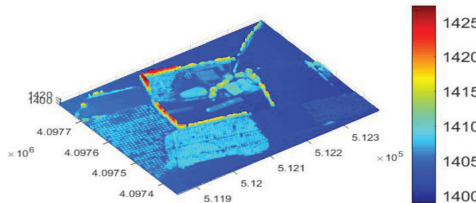
نگاره ۵: تأثیر تغییر h بر استخراج عوارض (Arefi, 2009)

با تغییر h در محدوده تعیین شده، در هر مرحله قسمتی به عنوان عارضه غیرزمینی استخراج می‌گردد. برای آنکه تشخیص داده شود که قطعه استخراج شده مربوط به سطح زمین یا عارضه غیرزمینی است، از پارامتر محدوده تغییرات محلی (LRV) استفاده می‌شود. در صورتی که میزان LRV قطعه استخراج شده از حد آستانه‌ای بیشتر باشد، آن قطعه به عنوان عارضه غیرزمینی انتخاب می‌شود. برای محاسبه LRV از یک پنجره جستجو 3×3 برای اسکن و جستجو در تصویر استفاده می‌شود. در هر بار قرارگیری این پنجره بر روی تصویر مقدار بیشینه از کمینه ارتفاعی کم شده و به پیکسل مرکزی پنجره جستجو نسبت داده می‌شود.

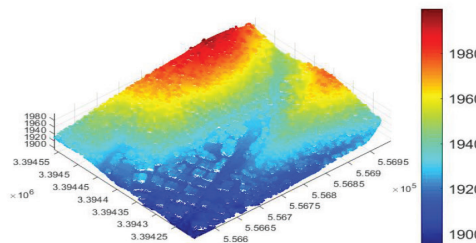
همان‌طور که پیش‌تر نیز گفته شد، با محاسبه اجتماع نتایج شناسایی و حذف عوارض غیرزمینی مطابق روش‌ها مذکور،



(الف)



(ب)



(ج)

نگاره ۶: ابرنقاط حاصل از تناظریابی متراکم تصاویر رقومی هوایی

ناحیه ۶: مربوط به یک منطقه روستایی شیب دار دارای پوشش گیاهی، راه، ترانشه و خاکریز است. فاصله نقاط در این ناحیه حدود ۲/۵ متر است.
 ناحیه ۷: مربوط به یک منطقه روستایی دارای روگذر و زیرگذر و فاصله تقریبی نقاط ۳ متر است.
 در نگاره ۷ نواحی مطالعاتی ISPRS آورده شده است.

۳-۲- استخراج مدل رقومی زمین

برای استخراج مدل رقومی زمین مطابق روند پیشنهادی، ابتدا باید عوارض غیرزمینی با استفاده از روش مورفولوژی پیش‌رونده پیشنهاد شده، استخراج شوند. از این رو حد آستانه‌های مربوط به میزان شیب، ابعاد پنجره جستجو، ارتفاع و فاکتور مقیاس به ترتیب ۰/۱۵ رادیان، ۱۸ متر، ۰/۵ متر و ۱/۲۵ در نظر گرفته شد.

نقاط غیرزمینی شناسایی و حذف می‌شوند. جهت بررسی و ارزیابی الگوریتم پیشنهادی از نواحی مطالعاتی با پوشش و ناهمواری‌های متنوع استفاده شده است. فاصله نقاط در ابرنقاط تهیه‌شده، حدود ۱ متر در نظر گرفته شده است. در این راستا، سه ناحیه مطالعاتی در نظر گرفته شده است که دارای خصوصیات زیر می‌باشند:

ناحیه ۱: مربوط به منطقه‌ای شهری با ساختمان‌های متراکم با سقف‌های متنوع است.

ناحیه ۲: مربوط به منطقه‌ای با ناهمواری‌های کم و دارای ساختمان و پوشش گیاهی متنوع است.

ناحیه ۳: مربوط به منطقه‌ای کوهستانی با پوشش گیاهی و درختان با ارتفاع‌های مختلف است.

در نگاره ۶ نواحی مطالعاتی مربوط به ابرنقاط حاصل از تناظریابی متراکم تصاویر رقومی هوایی تهیه شده توسط سازمان جغرافیایی نیروهای مسلح، نشان داده شده است.

برای آن‌که عملکرد الگوریتم پیشنهادی در مقابل دیگر الگوریتم‌های موجود در این زمینه مقایسه گردد، از ابرنقاط لیدار و داده‌های مرجع تهیه‌شده توسط ISPRS^۱ نیز استفاده شد. داده‌های لیدار مربوط به شهرهای وایهینگن^۲ و اشتوتگارت^۳ در کشور آلمان بوده و توسط FOTONOR AS تهیه شده است. در واقع طی پروژه PEEPE از شرکت‌های دارای لیزراسکن برای پرواز و اخذ ابرنقطه از شهرهای مذکور دعوت به عمل آمد. تراکم نقاط اخذ شده در نواحی مطالعاتی بین ۱ تا ۳ نقطه در هر مترمربع است. در این راستا چهار ناحیه مطالعاتی در نظر گرفته شد که دارای ویژگی‌های زیر می‌باشند.

ناحیه ۴: مربوط به یک منطقه شهری است دارای شیب تند است. در این ناحیه ترکیبی از دامنه کوه، ساختمان و پوشش گیاهی بوده و فاصله تقریبی نقاط حدود ۳ متر است.
 ناحیه ۵: مربوط به یک منطقه شهری با ساختمان‌های متراکم دارای سقف‌های متفاوت و پوشش گیاهی مابین آن‌ها است. تراکم نقاط در این ناحیه حدود ۱ نقطه در هر متر است.

1- International Society for Photogrammetry and Remote Sensing

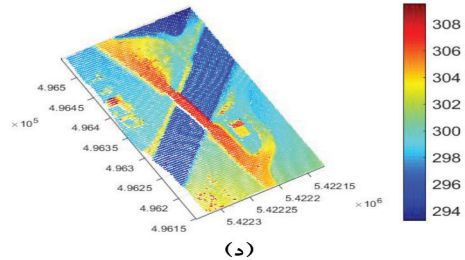
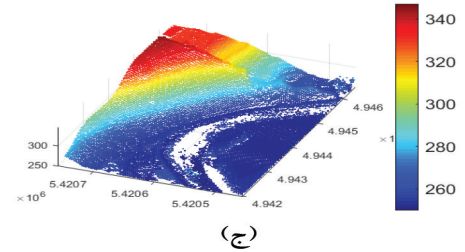
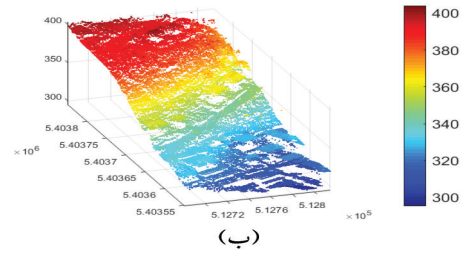
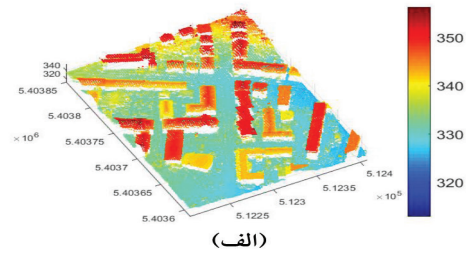
2- Vaihingen

3- Stuttgart

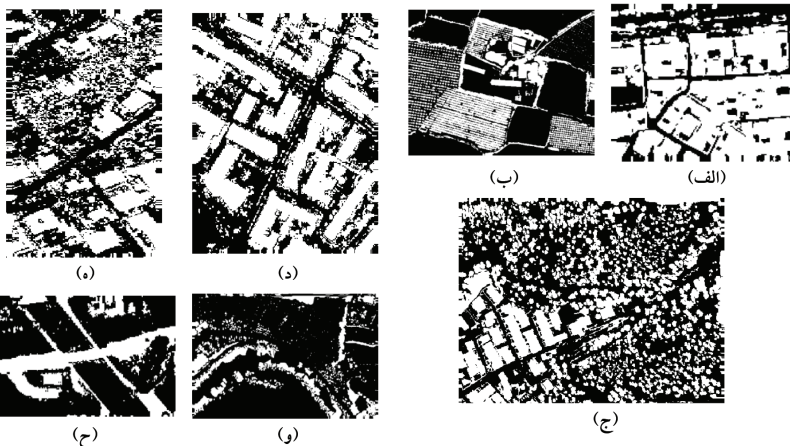
تنها پارامتر موردنیاز الگوریتم پیشنهادی ژئودزیک مورفولوژی که میزان LRV است، برابر با ۰/۵ متر در نظر گرفته شد. طبیعی است که با توجه به پوشش‌های بسیار متفاوت مناطق مطالعاتی که هم از لحاظ ساختار زمین و هم از لحاظ نوع و ساختار عوارض غیرزمینی موجود در منطقه دارای تفاوت‌های چشمگیری می‌باشند، مقادیر بهینه پارامترها برای نواحی مختلف متفاوت شود. باین‌حال از یک مجموعه پارامتر برای تمامی نواحی استفاده شد. چراکه نشان داده شود که الگوریتم پیشنهادی وابستگی زیادی به مقادیر پارامترها نبوده و می‌تواند با دقت و قدرت بالایی عوارض غیرزمینی را استخراج نماید. در نگاره ۸ نتیجه اعمال الگوریتم پیشنهادی جهت شناسایی عوارض غیرزمینی در ۷ ناحیه مطالعاتی (۳ ناحیه مربوط به ابرنقاط حاصل از تناظریابی متراکم تصاویر رقومی هوایی و ۴ ناحیه مربوط به داده‌های لیدار) نشان داده شده است. پس از انجام شناسایی عوارض غیرزمینی و حذف این مناطق از ابرنقاط موجود، مناطق از دست‌رفته با استفاده از روش درون‌یابی مکعبی بازیابی گشتند. در نگاره ۹ نتایج نهایی ایجاد مدل رقومی زمین مطابق روش پیشنهادی در مناطق مطالعاتی آورده شده است.

۳-۳- ارزیابی نتایج

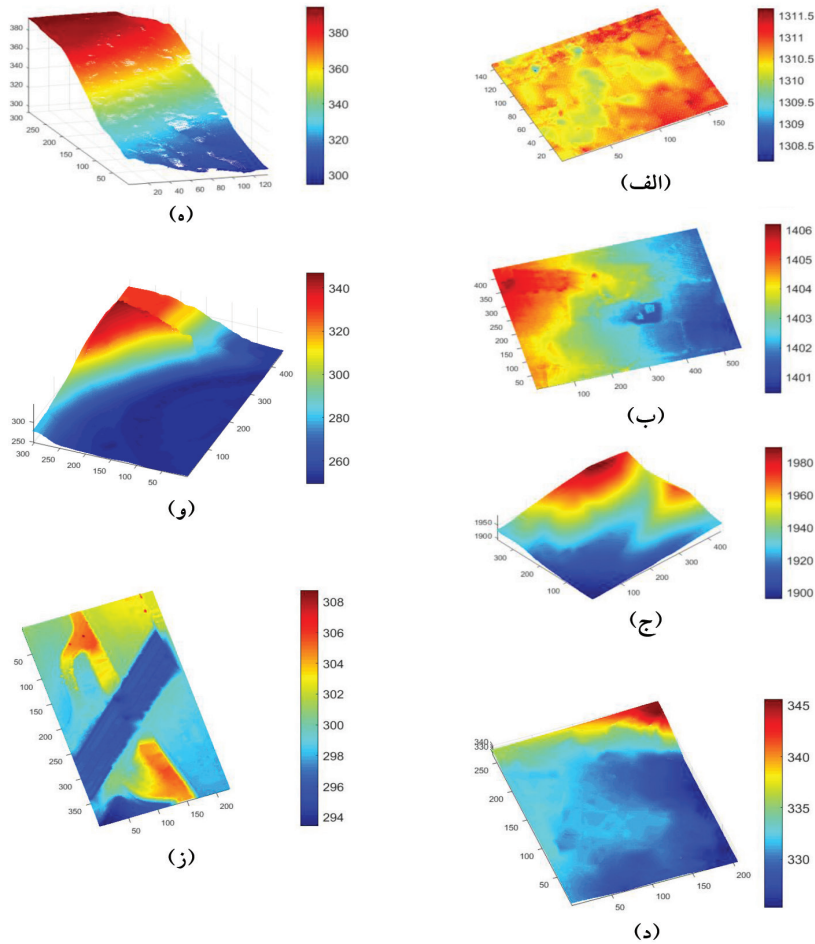
برای ارزیابی مدل رقومی استخراج شده توسط روش پیشنهادی، نیاز به مدل رقومی مرجع می‌باشد. مدل رقومی



نگاره ۷: نواحی مطالعاتی JSPRS (الف) ناحیه ۴، (ب) ناحیه ۵، (ج) ناحیه ۶، (د) ناحیه ۷.



نگاره ۸: 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.



نگاره ۹: مدل رقومی نهایی، (الف) ناحیه ۱، (ب) ناحیه ۲، (ج) ناحیه ۳، (د) ناحیه ۴، (ه) ناحیه ۵، (و) ناحیه ۶، (ز) ناحیه ۷.

که n تعداد نقاط کل منطقه مطالعاتی می‌باشد. در جدول ۱ نتایج ارزیابی میزان خطا برای ۷ ناحیه مطالعاتی آورده شده است. لازم به ذکر بیشینه اختلاف ارتفاع محاسبه شده در هر ناحیه نیز آورده شده است.

جدول ۱: نتایج ارزیابی خطا در مناطق مطالعاتی

Δh_{max} (m)	دقت (RMSE) (m)	ناحیه
۲/۵۸	۰/۴۲	ناحیه ۱
۵/۵۱	۰/۷۱	ناحیه ۲
۱/۶۴	۰/۴۱	ناحیه ۳
۳/۳۷	۱/۰۲	ناحیه ۴
۲/۸۷	۰/۶۴	ناحیه ۵
۳/۷۴	۰/۸۷	ناحیه ۶
۵/۸۹	۰/۷۴	ناحیه ۷

مرجع با حذف عوارض غیرزمینی و درونیابی با استفاده از نقاط زمینی حاصل می‌شود.

برای ابرنقاط حاصل از تناظریابی متراکم، نقاط غیرزمینی با بررسی چندباره مدل سه‌بعدی به دقت شناسایی و حذف شدند. در واقع سعی شد عمل حذف نقاط غیرزمینی هیچ گونه خطایی نداشته باشد. در مورد ابرنقاط مربوط به داده‌های لیدار، ISPRS مجموعه نقاط غیرزمینی را مشخص کرده و در اختیار کاربران و محققان قرار داده است. برای محاسبه میزان خطا مقادیر ارتفاعی داده‌های مرجع (Z_i^{Ref}) با مقادیر مربوط به خروجی الگوریتم پیشنهادی (Z_i^{ob}) مقایسه گشت و نتایج ارزیابی به صورت RMSE محاسبه گشت.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Z_i^{Ref} - Z_i^{ob})^2}, \quad (6)$$

$$TypeI = \frac{b}{a+b},$$

$$TypeII = \frac{c}{c+d},$$

$$Total = \frac{b+c}{a+b+c+d},$$

(۷) مناطق مطالعاتی ISPRS حاوی داده‌های مرجعی که نقاط غیرزمینی را به صورت کامل مشخص می‌نمایند، می‌باشد.

(۸) از این رو از معیارهای دیگری برای ارزیابی الگوریتم پیشنهادی در این مناطق و مقایسه با دیگر روش‌ها استفاده

شده است در این مقاله از معیارهای در نظر گرفته شده توسط

ISPRS برای محاسبه میزان دقت عملکرد روند پیشنهادی استفاده شده است. خطای نوع اول از تقسیم تعداد نقاطی

که به اشتباه به عنوان عارضه غیرزمینی شناسایی شده‌اند به کل نقاط غیرزمینی بدست می‌آید. خطای نوع دوم از تقسیم

تعداد نقاطی که به اشتباه به عنوان نقطه زمینی شناسایی شده‌اند به تعداد کل نقاط بدست می‌آید (Chen et al., 2007):

(175-185). طی روند محاسبه خطا چهار حالت متفاوت برای نقاط پیش می‌آید:

حالت a: نقاطی هستند که به درستی به عنوان نقطه زمینی شناسایی شده‌اند.

حالت b: نقاط زمینی که به اشتباه به عنوان نقطه غیرزمینی شناسایی شده‌اند.

حالت c: نقاط غیرزمینی که به اشتباه به عنوان نقطه زمینی شناسایی شده‌اند.

حالت d: نقاطی که به درستی به عنوان نقطه غیرزمینی شناسایی شده‌اند.

با در نظر گرفتن حالت‌های مختلف پیش آمده، میزان خطای نوع اول، دوم و کلی مطابق روابط زیر محاسبه می‌گردند.

در جدول ۲ نتایج ارزیابی الگوریتم پیشنهادی به همراه نتایج دیگر الگوریتم‌های ارائه شده در این زمینه ارائه گشته است. لازم به ذکر است این نتایج مربوط به داده‌های ISPRS است که به ترتیب نواحی مطالعاتی ۴ تا ۷ می‌باشند.

همان‌طور که در جدول مشاهده می‌شود، الگوریتم پیشنهادی در مقابل دیگر الگوریتم‌های موجود عملکرد بسیار مناسبی دارد. به طوری که تنهای الگوریتم ارائه شده توسط اکسلسون (۲۰۰۰: ۱۱۸-۱۱۱) دارای نتایج نزدیکی با روند پیشنهادی می‌باشد. روش اکسلسون به طور مستقیم بر روی ابرنقاط کار می‌کند و برای عمل نیاز به تعیین ۷ پارامتر دارد که این عوامل از سرعت پردازش می‌کاهد. همچنین تعداد زیاد پارامتر سبب افزایش پیچیدگی تعیین حد آستانه‌ها و وابستگی بیشتر الگوریتم به عامل انسانی برای تعیین پارامترها می‌شود. روش پیشنهادی دارای سرعت پردازش بسیار مناسبی بوده است. به طوری که در ۴ ناحیه مذکور به ترتیب در مدل زمان ۱۲، ۱۴، ۱۱ و ۱۶ ثانیه مدل رقومی زمین تولید گشته است. در حالی که با پیاده‌سازی روش اکسلسون این زمان به ترتیب ۵۷، ۷۱، ۶۴ و ۸۵ ثانیه

جدول ۲: نتایج ارزیابی خطا در مناطق مطالعاتی ISPRS و مقایسه با دیگر روش‌ها

نوع و میزان خطا	ناحیه ۴			ناحیه ۵			ناحیه ۶			ناحیه ۷		
	نوع اول (%)	نوع دوم (%)	کلی (%)	نوع اول (%)	نوع دوم (%)	کلی (%)	نوع اول (%)	نوع دوم (%)	کلی (%)	نوع اول (%)	نوع دوم (%)	کلی (%)
Axelsson	۱۵/۹۶	۳/۶۵	۱۰/۷۶	۴/۸۹	۱/۴۸	۳/۲۵	۱/۷۸	۱۴/۲۱	۳/۰۷	۰/۱۴	۱۳/۲۵	۱/۶۳
Elmqvist	۳۳/۶۳	۴/۳۸	۲۲/۴۰	۱۲/۳۶	۳/۳۰	۸/۱۸	۸۵/۰۵	۱/۲۷	۵۷/۹۵	۷۵/۱۹	۰/۲۲	۳۴/۲۲
Pfeifer	۲۸/۲۶	۲/۴۱	۱۷/۳۵	۷/۲۹	۱/۵۲	۴/۵۰	۲۱/۲۷	۵/۶۸	۱۹/۶۴	۹/۷۸	۱/۵۹	۸/۸۵
Wack	۳۹/۱۲	۳/۳۸	۲۴/۰۲	۱۱/۹۴	۰/۸۹	۶/۶۱	۲۱/۴۹	۱/۰۴	۲۳/۸۳	۱۸/۸۸	۱/۹۸	۱۶/۹۷
Brovelli	۶۲/۰۰	۲/۵۳	۳۶/۹۶	۲۹/۶۳	۲/۰۴	۱۶/۲۸	۵۰/۴۳	۳/۸۴	۴۵/۵۶	۳۹/۴۱	۰/۸۰	۳۴/۹۸
Sohn	۲۶/۵۶	۱۲/۱۷	۲۰/۴۹	۸/۸۷	۷/۸۷	۸/۳۹	۱۲/۳۴	۹/۴۸	۱۲/۰۴	۱/۲۶	۹/۵۱	۲/۲۰
Sithile	۳۷/۶۹	۳/۴۹	۲۳/۲۵	۱۹/۱۹	۰/۵۷	۱۰/۲۱	۳۰/۴۱	۳/۵۷	۲۷/۵۳	۲۴/۵۷	۰/۳۴	۲۱/۸۳
Roggero	۳۳/۱۶	۳/۸۸	۲۰/۸۰	۱۱/۹۲	۰/۹۱	۶/۶۱	۹/۸۰	۹/۶۶	۹/۷۸	۵/۴۱	۲/۷۷	۵/۱۱
روش پیشنهادی	۹/۲۵	۹/۸۱	۹/۴۵	۵/۵۳	۵/۶۹	۵/۶۱	۱۱/۰۸	۳/۵۴	۴/۱۷	۱/۵۲	۴/۶۷	۱/۷۰

مدل رقومی با دقت بسیار بالا استخراج نماید. برای ارزیابی روش پیشنهادی هم از برنقاط حاصل از تناظریابی متراکم تصاویر رقومی هوایی و هم از داده‌های لیدار استفاده شد تا توانایی‌های الگوریتم پیشنهادی به صورت کامل ارزیابی شوند. نتایج ارزیابی نشان داد که خطای RMSE در نواحی مطالعاتی ۰/۶۸ متر بوده و الگوریتم پیشنهادی به طور متوسط با ۴/۸۵٪ خطا موفق به شناسایی عوارض غیرزمینی شده است. میزان خطای کم روش پیشنهادی با توجه به تراکم نقاط، نوع پوشش منطقه و پیچیدگی‌های عوارض موجود در منطقه، نشان از عملکرد موفقیت‌آمیز آن است.

سپاسگزاری

مجموعه داده‌های استفاده شده در این مقاله توسط سازمان جغرافیایی نیروهای مسلح ایران و همچنین انجمن فتوگرامتری و سنسز ازدور آلمان تهیه شده‌اند.

منابع و مأخذ

- 1- Arefi, H. (2009). From LiDAR point clouds to 3D building models (Doctoral dissertation).
- 2- Axelsson, P. (2000). DEM generation from laser scanner data using adaptive TIN models. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 33(B4/1; PART 4), 111-118.
- 3- Chen, Q., Gong, P., Baldocchi, D., & Xie, G. (2007). Filtering airborne laser scanning data with morphological methods. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 73(2), 175-185.
- 4- Gonzalez, Woods, and Richard E. Woods. "Eddins, Digital Image Processing Using MATLAB." Third New Jersey: Prentice Hall (2004).
- 5- Hollaus, M., Mandlburger, G., Pfeifer, N., & Mücke, W. (2010). Land cover dependent derivation of digital surface models from airborne laser scanning data. *IAPRS*, 38, 1-3.
- 6- Jähne, B., Haussecker, H., & Geissler, P. (Eds.). (1999). *Handbook of computer vision and applications* (Vol. 2, pp. 423-450). San Diego: Academic

بوده است که بسیار کندتر از روش پیشنهادی است. لازم به ذکر است که هر یک از این نواحی مطالعاتی حاوی حدود ۵۰ هزار نقطه بوده‌اند. این نکته حائز اهمیت است که زمان پردازش برای الگوریتم‌هایی که به صورت مستقیم بر روی ابرنقطه کار می‌کنند وابستگی زیادی به تعداد نقطه دارند. به طوریکه با افزایش تعداد نقطه به صورت تصاعدی زمان پردازش بیشتر می‌شود. همین عامل سبب محدودیت الگوریتم‌های پردازش ابرنقطه با حجم بالای نقاط می‌شود. در نتیجه می‌توان گفت که زمان الگوریتم اکسلسون در برخورد با کاربردهای واقعی که تعداد نقطه ممکن است تا چند میلیون نیز باشد، در حدود چندین ساعت خواهد شد. در حالی که روش پیشنهادی توانایی پردازش چندین میلیون نقطه و استخراج مدل رقومی زمین را در زمانی کمتر از ۳ دقیقه دارد.

۴- نتیجه گیری

در این مقاله روشی کاربردی برای استخراج مدل رقومی زمین با استفاده از ابرنقاط مطرح شد. دو مرحله اصلی ساختار روش پیشنهادی را تشکیل داده‌اند. مرحله اول استخراج عوارض غیرزمینی مطابق روش مورفولوژی پیش‌رونده است. در این روش ابتدا یک سطح کمینه تعیین شد و سپس با بهره‌گیری از یک روش پیش‌رونده و با تغییر تدریجی ابعاد المان ساختاری مناطق دارای پتانسیل انتخاب به‌عنوان عارضه غیرزمینی استخراج شدند. در مرحله دوم عوارض غیرزمینی با استفاده از روش ژئودزیک مورفولوژی تدریجی استخراج گشتند. در نهایت با تجمع آن‌ها، نقاط مربوط به عوارض غیرزمینی شناسایی و حذف گشتند. در نهایت از طریق بازیابی مناطق از دست رفته با استفاده از درون‌یابی مکعبی، مدل رقومی زمین استخراج گشت. به جنبه کاربردی بودن الگوریتم بسیار توجه شده است. به‌طوری‌که توانایی استخراج مدل رقومی زمین با تراکم نقاط متفاوت را داشته باشد. همچنین در محیط‌های مختلف با پوشش و ناهمواری‌ها متفاوت قابلیت اجرا داشته و بتواند

Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 36(part 3), W19.

18- Sohn, G., & Dowman, I. J. (2002). 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), 336-344.

19- Vincent, L. (1993). Morphological grayscale reconstruction in image analysis: applications and efficient algorithms. *IEEE transactions on image processing*, 2(2), 176-201.

20- Vosselman, G. (2000). Slope based filtering of laser altimetry data. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 33(B3/2; PART 3), 935-942.

21- Vosselman, G., & Maas, H. G. (Eds.). (2010). *Airborne and terrestrial laser scanning*. Whittles Publishing.

22- <http://www.charim.net/datamanagement/32>.

23- Wang, L., & Zhang, Y. (2016). LiDAR Ground Filtering Algorithm for Urban Areas Using Scan Line Based Segmentation. *arXiv preprint arXiv:1603.00912*.

24- Yunfei, B., Guoping, L., Chunxiang, C., Xiaowen, L., Hao, Z., Qisheng, H. & Chaoyi, C. (2008). 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), 313-318.

25- Zhang, K., Chen, S. C., Whitman, D., Shyu, M. L., Yan, J., & Zhang, C. (2003). A progressive morphological filter for removing nonground measurements from airborne LIDAR data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(4), 872-882.

Press.

7- Jahromi, A. B., Zoej, M. J. V., Mohammadzadeh, A., & Sadeghian, S. (2011). A 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.

8- Kilian, J., Haala, N., & Englich, M. (1996). Capture and evaluation of airborne laser scanner data. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 31, 383-388.

9- Kobler, A., Pfeifer, N., Ogrinc, P., Todorovski, L., Oštir, K., & Džeroski, S. (2007). Repetitive interpolation: A robust algorithm for DTM generation from Aerial Laser Scanner Data in forested terrain. *Remote sensing of environment*, 108(1), 9-23.

10- Liu, X. (2008). Airborne LiDAR for DEM generation: some critical issues. *Progress in Physical Geography*, 32(1), 31-49.

11- Meng, X., Currit, N., & Zhao, K. (2010). Ground filtering algorithms for airborne LiDAR data: A review of critical issues. *Remote Sensing*, 2(3), 833-860.

12- Mongus, D., & Žalik, B. (2012). Parameter-free ground filtering of LiDAR data for automatic DTM generation. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 67, 1-12.

13- Rafael C. Gonzalez, Richard E. Woods, & Steven L. Eddins. (2010). *Digital Image Processing Using MATLAB®*. McGraw Hill Education.

14- Shan, J., & Toth, C. K. (Eds.). (2008). *Topographic laser ranging and scanning: principles and processing*. CRC press.

15- Sithole, G., & Vosselman, G. (2003, October). Comparison of filtering algorithms. In *Proceedings of the ISPRS working group III/3 workshop* (pp. 71-78).

16- Sithole, G., & Vosselman, G. (2004). Experimental comparison of filter algorithms for bare-Earth extraction from airborne laser scanning point clouds. *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*, 59(1), 85-101.

17- Sithole, G., & Vosselman, G. (2005). Filtering of airborne laser scanner data based on segmented point clouds. *International Archives of Photogrammetry*,

Archive of SID