

بازسازی سه بعدی ساختمان‌های دارای سقف‌های مسطح با استفاده از داده‌های لیدار و تصاویر رقومی هوایی

پرهام پهلوانی^{۱*}، حامد امینی امیرکلائی^۲

^۱ استادیار دانشکده مهندسی نقشه برداری و اطلاعات مکانی - پردیس دانشکده‌های فنی - دانشگاه تهران
pahlavani@ut.ac.ir

^۲ دانشجوی دکتری فتوگرامتری - دانشکده مهندسی نقشه برداری و اطلاعات مکانی - پردیس دانشکده‌های فنی - دانشگاه تهران
hamed.amini@ut.ac.ir

(تاریخ دریافت دی ۱۳۹۳، تاریخ تصویب خرداد ۱۳۹۴)

چکیده

در این مقاله روندی برای بازسازی ساختمان‌های مسطح از داده‌های لیدار و تصاویر رقومی هوایی ارائه شده است. زیرا از یک سو، این نوع ساختمان‌ها، بافت اصلی شهرهای بزرگ ایران را تشکیل می‌دهند. از سوی دیگر، تفکیک صفحات و بازسازی آن‌ها به دلیل یکسان بودن بردار نرمال برای تمام صفحات و عدم تقاطع صفحات به دلیل موازی بودن، موضوعی پرچالش است. در این راستا، ابتدا با تولید ۱۶ توصیفگر اولیه بالقوه و استفاده از الگوریتم ژنتیک و الگوریتم خوشه‌بندی KNN، توصیفگرهای بهینه برای شناسایی ساختمان‌ها مشخص شده و ساختمان‌ها شناسایی گشتند. در مرحله بعد با ارائه روندی، مناطق به اشتباه شناسایی شده، حذف گشته و نتایج شناسایی بهبود داده شد. روند بازسازی به گونه‌ای طراحی شده است که هر بلوک ساختمانی را به صورت مجزا بررسی کند تا از افزونگی داده جلوگیری شود و دقت نیز افزایش یابد. پس از انتخاب بلوک مورد نظر، با استفاده از پارامتر تغییرات شیب، یک کلاس اولیه از صفحات سقف ساختمان بدست آمد. با آنالیز ارتفاعی و بافتی، صفحات سقفی به طور کامل شناسایی شده و معادله آن‌ها محاسبه شد. در مرحله بعد، مرز هر یک از صفحات به صورت برداری استخراج گردید و با بررسی اطراف هر نقطه مرزی، نقطه زمینی متناظر آن نیز بدست آمد. در نهایت با استفاده از معادله صفحات و مرز آن‌ها و همچنین نقاط کف استخراج شده، مدل نهایی ساختمان بازسازی شد. روند پیشنهادی بر روی چند بلوک ساختمان با ساختار متفاوت پیاده‌سازی شد و دقت هر یک از صفحات بازسازی شده به دو صورت مسطحاتی و ارتفاعی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج ارزیابی به طور متوسط ۸۴/۵۶٪ دقت کلی در شناسایی مسطحاتی صفحات سقفی، ۰/۲۱۲ متر خطای مسطحاتی در مختصات گوشه‌های صفحات و ۰/۱۴۵ متر خطا در راستای ارتفاعی را نشان داد که تصریح کننده عملکرد مناسب روند پیشنهادی در بازسازی ساختمان‌های دارای سقف‌های مسطح است.

واژگان کلیدی: شناسایی، بازسازی، توصیفگر، سقف مسطح، لیدار، تصویر رقومی هوایی

۱- مقدمه

مبحث شناسایی و بازسازی مدل سه بعدی ساختمان‌های شهری با استفاده از تصاویر هوایی، فضایی و داده‌های لیدار از موضوعات مهم و پرچالش در فتوگرامتری و سنجش از دور می‌باشد. با توجه به قدرت بالای لیدار در اخذ اطلاعات سه بعدی از سطح زمین، داده‌های این منبع می‌توانند برای سه بعدی سازی ساختمان‌های شهری بسیار کارآمد باشند. تصاویر رقومی هوایی اخذ شده از طریق روش فتوگرامتری نیز به خاطر قدرت رادیومتریکی بالا همواره می‌توانند در بهبود نتایج شناسایی موثر باشند. در واقع این دو تکنولوژی مکمل یکدیگرند و هر کدام جایگاه خاص خود را دارا می‌باشند.

همانطور که مشخص است، بازسازی سه بعدی ساختمان‌ها نیازمند شناسایی آن‌ها می‌باشد و روش‌های مختلفی برای شناسایی ساختمان‌ها با استفاده داده‌های عکسی [۲۰]، داده‌های لیدار [۴۳] و تلفیق تصاویر هوایی و داده‌های لیدار [۵-۷] مطرح شده است.

معمولاً یک مدل ساختمانی به وسیله لبه‌ها، خطوط و صفحات ساخته می‌شود. مدل سازی ساختمان به دو صورت داده‌مبنا و مدل‌مبنا می‌باشد [۸]. در مدل سازی مدل‌مبنا منظور یک توضیح پارامتریک از شکل عمومی ساختمان است که معمولاً با پارامترهایی نظیر موقعیت، ارتفاع، عرض، زاویه توجیه بیان می‌گردد. این مدل ساده بوده و از نظر هزینه محاسباتی ارزان است، اما معمولاً به نتایجی با دقت بالا دست نمی‌یابد. در واقع الگوریتم‌های این گروه سعی در برآزش یک مدل مشخص به کل داده دارند. این الگوریتم‌ها در مناطقی که شکل سقف‌ها مشابه است و می‌توان یک مدل عمومی برای ساختمان‌ها پیشنهاد کرد، مناسب می‌باشند، ولی در غیر این صورت عملکرد مناسبی ندارند. روش‌های مدل سازی داده‌مبنا عموماً شامل دو مرحله‌اند: در مرحله اول، اشیاء پایه مانند خطوط یا صفحات ساختمان‌ها استخراج می‌گردند و در مرحله دوم این اشیاء با شناسایی مناطق صحیح اتصال با یکدیگر ترکیب شده و مدل نهایی ساخته می‌شود. حسن این روش‌ها مدل سازی ساختمان‌هایی با اشکال پیچیده‌تر و عدم وابستگی مدل سازی به مدل‌های از پیش تعیین شده برای ساختمان‌ها می‌باشد. روش‌های داده‌مبنا به دقت‌های

بالتری می‌رسند اما در اجرا نیز پیچیده‌تر بوده و هزینه محاسباتی بالایی دارند.

در تحقیقات انجام شده در زمینه بازسازی سه بعدی ساختمان‌ها از منابع مختلف داده استفاده گشته است. مهم‌ترین این منابع، داده‌های عکسی و داده‌های لیدار می‌باشند که در برخی موارد به صورت تک سنجنده‌ای و در برخی دیگر به صورت ترکیبی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. با وجود آنکه برخی محققان از تک تصویر برای بازسازی سه بعدی استفاده کرده‌اند [۹]، بازسازی سه بعدی ساختمان‌ها با استفاده از داده‌های عکسی عموماً در مناطق همپوشانی تصاویر و با استفاده از پارامترهای توجیه داخلی و خارجی امکان‌پذیر است. در [۱۰] یک روش فیلترینگ مرحله به مرحله مطرح شد که به صورت مدل مبنا، مدل سه بعدی ساختمان‌ها با استفاده از زوج تصویر هوایی استخراج گردید. در [۱۱] بازسازی از یک ناحیه مشخص به انتخاب اپراتور آغاز گشته و خطوط از تصاویر استخراج شدند. صفحات پیش فرض، تشکیل گشته و یک گروه بندی براساس بیشترین شباهت روی آن‌ها صورت گرفت. سرانجام با اضافه شدن مدل رقومی زمین دیوارهای ساختمان‌ها تولید گشت.

در بسیاری از تحقیقات انجام گرفته، داده‌های لیدار به عنوان تنها منبع اطلاعاتی مورد استفاده جهت بازسازی مدل ساختمان، مد نظر می‌باشد. در [۱۲] مدل سازی سقف‌ها با استفاده از قطعات صفحه‌ای و بهره‌گیری از الگوریتم RANSAC و شروط خاص هندسی برای ساخت مدل انجام شد. در [۱۳] ابر نقطه اسکنر لیزری هر ساختمان به صورت جداگانه مورد آنالیز قرار گرفته و یک مدل ساختار مثلث بندی دلونی ۲/۵ بعدی از روی داده‌های اسکنر هوایی محاسبه شد. برای هر مثلث پارامترهای توجیه در فضا شامل توجیه امتداد، فاصله شیب‌دار و مایل نسبت به مرکز ثقل ابر نقطه داده‌های لیزر اسکنر محاسبه گردید. در نهایت با خوشه بندی مثلث‌ها بر اساس پارامترها، صفحات تفکیک شده، معادله آنها محاسبه گشته و با یافتن تقاطع صفحات مدل نهایی ایجاد شد. در [۱۴]، ابتدا نقاط زمینی و غیر زمینی به وسیله فیلتر مورفولوژی افزایشی تفکیک گشتند و سپس نقاط ساختمانی و غیر ساختمانی با استفاده از تحلیل زبری از هم تفکیک شدند. الگوریتم ساده سازی Doglus-Peucker نیز جهت کاهش نویز لبه‌ها به کار گرفته شد. در نهایت با تقاطع سطوح

بزرگ استخراج شده، لبه‌ها و نقاط گرهی ساختار بام‌ها تعیین گشته و مدل سه بعدی ساختمان‌ها بازسازی گردید. همچنین از الگوریتم خوشه‌بندی FCM [۱۵] و ساختار شبکه مثلثی نامنظم [۱۶] برای تفکیک صفحات در ابرنقاط لیدار و از الگوریتم ژنتیک برای یافتن بهترین مدل در روش‌های مدل‌مبنا [۱۷] نیز استفاده شد.

برخی محققان از تلفیق داده‌های لیدار با داده‌های عکسی (مربوط به ماهواره و یا هواپیما) برای بازسازی سه‌بعدی ساختمان‌ها استفاده نمودند. در [۱۸] یک روش تطابق خطوط چند تصویری برای بازسازی مدل سه‌بعدی مطرح شد. به طوریکه مناطق همگن^۱ با استفاده از الگوریتم split-and-merge در هر تصویر شناسایی گشت و کلاسه‌بندی مناطق بر اساس اندازه، شکل و مقادیر شدت انجام شد. حاشیه ساختمان‌ها با استفاده از تبدیل Hough بدست آمده و سقف‌ها در میان چند تصویر منطبق شدند. به طور کلی، الگوریتم‌هایی نظیر Hough و RANSAC جهت شناسایی مرزها بسیار مورد توجه کارشناسان قرار دارند [۱۹-۲۳]. این الگوریتم‌ها توانایی برازش یک خط اصلی به مجموعه داده‌های دارای آشفتگی و پراکندگی را دارند. اما مشکل عمده این الگوریتم‌ها عدم کارایی در شناسایی درست خط اصلی در مرزهایی با آشفتگی بالاست. در [۲۴] ابتدا یک DSM از طریق یک جفت تصویر IKONOS تولید شد و سپس یک عملگر تطابقی میانه برای محاسبه DTM استفاده شد. در مرحله بعد، مدل رقومی نرمال شده^۲ (nDSM) ناحیه استخراج شده و اورتوفتوی منطقه با توان تفکیک مکانی بالا توسط ضرایب رشنال (RPC) بدست آمد. پس از کلاسه‌بندی تصاویر استریو با استفاده از اورتوفتو، NDVI و nDSM، از یک روش مدل مبنا برای بازسازی سه‌بعدی ساختمان‌ها، درختان و زمین بهره گرفته شد. در [۲۵] خطوط مرزی بین صفحات و مرز بیرونی ساختمان با استفاده از تصاویر هوایی و یا داده‌های لیدار به صورت دستی استخراج گشت. جهت استخراج ماتریس همسایگی و یا روابط توپولوژی میان صفحات، داده‌های لیدار به صورت دلونی مثلث‌بندی شدند. سپس ضلع مشترک صفحات همسایه بررسی گردید تا در صورتی که ضلع مورد نظر قسمتی از خطوط اصلی

بدست آمده از لبه‌ها باشد، باقی بماند و در غیر این صورت حذف شود. این روند تا بررسی تمام مثلث‌های ایجاد شده ادامه یافت و در نهایت خطوط مشترک بین صفحات شناسایی شده و صفحات مطابق آن‌ها بازسازی شدند. در [۲۶] از لبه‌های استخراج شده از تصاویر تصحیح قائم شده Worldview-2 به عنوان داده‌های اضافی استفاده گشت. بلوک ساختمان متناسب با خط‌الراس‌های استخراج شده حاصل از اعمال فیلتر تورم ژئودزیک به داده‌های لیدار به قطعات کوچکتر تقسیم گشته و مدل سه‌بعدی هر یک ایجاد گردید. با اتصال مدل‌های ایجاد شده به مدل منشوری ساختمان که دارای سقف مسطح است، مدل نهایی ساختمان بدست آمد. در [۲۷] ابتدا داده‌های لیدار به دو گروه زمینی و غیرزمینی تفکیک شدند و خطوط ساختاری از تصویر درجه خاکستری قائم منطقه استخراج گردید. سپس این داده‌ها با استفاده از ماسک زمینی، NDVI و آنتروپی تصویر درجه خاکستری قائم به چهار گروه زمین، درخت، لبه‌های مرز و خط‌الراس سقف کلاسه‌بندی شدند. خطوط مربوط به دو کلاس آخر برای برازش صفحه بر روی داده‌های لیدار استفاده شدند و از میان خطوط استخراج شده، آن‌هایی که به صفحات نزدیک‌تر بودند، انتخاب گشته و مابقی حذف شدند. در نهایت، صفحات با استفاده از خطوط باقیمانده بازسازی شدند. در [۲۸] از فیلتر آشکارساز لبه Canny برای شناسایی نقاط گوشه‌ای ساختمان‌ها استفاده شد. همچنین توسط DSM منطقه و آنالیز پروفیل طولی عارضه با محاسبه اختلاف ارتفاع، صفحات ساختمان را از یکدیگر تفکیک نمود. در نهایت برای از بین بردن برآمدگی‌های حاصل از گیاهان، یک روش قطعه‌بندی گیاه بر اساس محاسبه خصوصیات نقاط در یک همسایگی محلی مطرح شد. در [۲۹] با اعمال حد آستانه بر روی nDSM، مدل عوارض مرتفع تعیین گردید و سپس قطعه‌بندی بر روی عوارض مرتفع انجام شد. بردار ویژگی مورد استفاده در روش خوشه‌بندی از مشخصه‌های بافتی بدست آمد. این مشخصه‌ها به وسیله داده‌های نقطه‌ای و شدت لیدار محاسبه گشت. درواقع بر اساس ویژگی‌های انتخاب‌شده، طبقه‌بندی پیکسل‌مبنای نظارت‌شده بر روی تصویر عوارض مرتفع صورت پذیرفت تا کلاس ساختمان‌ها و درختان از هم تفکیک شوند. پس از استخراج مرزهای بیرونی ساختمان، ساختار سقف ساختمان بازسازی گردید.

^۱ Homogeneous

^۲ normalized Digital Surface Model

جهت بازسازی ساختار سقفی از ویژگی بردار نرمال استفاده گشت. با کمک این ویژگی خوشه‌بندی نقاط ساختمانی انجام شد و نتایج آن توسط پس پردازش‌های انجام گرفته بهبود بخشید. با وجود صحت نسبتاً بالا، سطح اتوماسیون پایین این روش از معایب آن به حساب می‌آید. در [۳۰] روشی پویا بر اساس پردازش داده‌های لیدار و خوشه‌بندی K-Means برای شناسایی و تفکیک نقاط مرزی و غیرمرزی مطرح شد. سپس معادله سه‌بعدی خطوط بر اساس خطوط دوبعدی استخراج شده بدست آمد و با بازیابی خطوط ازدست‌رفته، مدل سه‌بعدی نهایی استخراج گردید. در [۳۱] از داده‌های چندطیفی^۱ و لیدار برای شناسایی گیاهان و ساختمان‌ها استفاده شد و از داده‌های لیدار و نقشه زمینی ساختمان‌ها برای بازسازی مدل سه‌بعدی ساختمان‌ها بهره گرفته شد. در [۳۲] نیز از نقشه زمینی در کنار داده‌های لیدار برای بازسازی سه‌بعدی ساختمان‌ها استفاده شد. منتها در این روش، مدل سه‌بعدی سقف‌ها که با استفاده از محدوده ساختمان‌ها قابل بازسازی نبود، بازسازی شد. در [۳۳] دو الگوریتم برای تولید مدل ساختمانی با استفاده از لیدار هوایی ارائه گشت که در آن‌ها نقاط ساختمان با استفاده از ترکیب پایگاه داده GIS دوبعدی و برخی تکنیک‌های فیلترینگ استخراج گشتند. الگوریتم اول، پارامترهای مدل ساختمانی را با استفاده از روش گشتاورهای ناورداء^۲ استخراج نمود. الگوریتم دوم، با استفاده از تقاطع سطوح تخت سقف، پی به ساختار سقف موردنظر برد. شایان ذکر است هر دو الگوریتم فقط بر روی سقف‌های شیروانی تست شده‌اند و نتایجی برای سقف‌هایی با ساختارهای متفاوت ارائه نشده است. همچنین در [۳۴] یک روش نیمه‌خودکار در زمینه تلفیق اطلاعات نقشه دوبعدی GIS و داده‌های لیدار ارائه شد که از الگوریتم K-Means برای خوشه‌بندی داده لیدار استفاده می‌نمود. عیب این روش معرفی تعداد کلاس اولیه به الگوریتم خوشه‌بندی است که باعث شد از این روش به عنوان یک روش نیمه‌خودکار یاد گردد.

در این مقاله، روندی جهت شناسایی ساختمان‌ها با استفاده از داده‌های لیدار و تصاویر هوایی و همچنین

بازسازی سه‌بعدی ساختمان‌های دارای سقف‌های مسطح به صورت داده‌مبنای ارائه شده است. زیرا این ساختمان‌ها در ایران (به ویژه تهران) به صورت گسترده وجود دارد، در نتیجه بازسازی اینگونه ساختمان کاربردهای بومی بسیاری دارد. 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 شده و مورد بحث قرار می‌گیرد.

۲- روند پیشنهادی

مراحل روند پیشنهادی برای شناسایی ساختمان‌ها و بازسازی سه‌بعدی ساختمان‌های دارای سقف مسطح به صورت نمودار در شکل ۱ آورده شده است.



شکل ۱- روند پیشنهادی برای شناسایی و بازسازی سه‌بعدی ساختمان‌ها

در راستای شرح کامل روند پیشنهادی ابتدا در بخش ۲-۱ مراحل انتخاب توصیف‌گرهای بهینه و شناسایی ساختمان‌ها آورده شده است. سپس در بخش ۲-۲ نتایج شناسایی بهبود داده می‌شوند تا تفکیک صفحات به خوبی صورت پذیرد (بخش ۲-۳). در نهایت در بخش ۲-۴ نقاط

^۱ Multi-Spectral
^۲ Invariant

گوشه‌ای صفحات شناسایی گشته و مدل نهایی ساختمان ایجاد می‌گردد.

۲-۱- شناسایی ساختمان‌ها

شناسایی ساختمان‌ها نیازمند تولید توصیف-گرهایی با توانایی تفکیک ساختمان‌ها از دیگر عوارض می‌باشد. توصیف‌گرها باید با توجه به ویژگی‌های هندسی، بافتی و ساختاری ساختمان‌ها ایجاد شوند. در این راستا، ۱۶ توصیف‌گر اولیه بالقوه که انتظار می‌رود در شناسایی ساختمان‌ها موثر واقع شوند، انتخاب و تولید می‌گردند. جهت تولید این توصیف‌گرها هم از تصاویر رقومی هوایی دارای باند مادون قرمز و هم از داده‌های فاصله‌سنجی و شدت سیگنال لیدار استفاده می‌شود. به طوریکه شاخص‌های گیاهی NDVI [۳۵] و MSAVI2 [۳۶] و همچنین سه باند فضای رنگی YIQ [۳۷] با استفاده از سه باند قرمز، سبز و مادون قرمز تصاویر رقومی هوایی تولید می‌گردند. شاخص‌های گیاهی MSAVI2 و NDVI نسبت به کلروفیل گیاهی حساس بوده و برای ساختمان‌ها و دیگر عوارض شهری مقدار این توصیف‌گر ناچیز می‌باشد. فضای رنگی YIQ در سیستم NTSC برای نمایش در تلویزیون‌های رنگی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در تبدیل به این فضای رنگی به جای مولفه آبی از مولفه مادون قرمز نزدیک تصاویر بهره گرفته شد. مولفه رنگ I در مناطق دارای پوشش گیاهی دارای مقادیر منفی و در سایر مناطق حاوی مقادیر مثبت می‌باشد. همچنین مولفه‌های مکمل I شامل مولفه رنگ (Q) و مولفه روشنایی (Y) مربوط به فضای YIQ می‌توانند در شناسایی موثر باشند.

داده‌های شدت سیگنال لیدار و میزان واریانس این داده‌ها [۳۷]، هر یک به عنوان یک توصیف‌گر استفاده شدند. توصیف‌گرهایی شامل nDSM [۳۸]، شیب [۳۹]، تغییرات شیب [۳۹]، خم پروفیل^۱ [۳۹]، خم سطح^۲ [۳۹]، میزان زبری^۳ با استفاده از میانه [۳۹]، میزان زبری با استفاده از میانگین [۳۹]، واریانس [۳۷] و میزان همواری^۴ [۳۷] با استفاده از داده‌ها فاصله سنجی لیدار ایجاد شدند. مقادیر داده‌های شدت سیگنال متناسب با

جنس عوارض سطح زمین می‌باشند. از اینرو عوارض با جنس یکسان دارای مقادیر مشابهی هستند و می‌توان از این ویژگی جهت شناسایی عوارض بهره برد. مدل رقومی نرمال شده زمین که از تفاضل مدل سطحی زمین و مدل رقومی زمین بدست می‌آید، تنها شامل ارتفاع عوارض غیرزمینی (مانند ساختمان‌ها و درختان) می‌باشد. میزان شیب در محدوده ساختمان‌ها معمولاً از حد مشخصی بیشتر نمی‌شود؛ اما شیب در درختان به صورت نامنظم و متغیر بوده و می‌تواند هر مقداری داشته باشد. میزان تغییرات شیب در سقف ساختمان‌های مسطح و شیب‌دار به جز در مرز صفحات مشاهده نمی‌شود. در حالیکه در گیاهان تغییرات شیب بسیار زیاد می‌باشد. توصیف‌گر خم پروفیل، انحنا را در راستای جریان نشان می‌دهد و مقادیر مثبت آن نشان‌دهنده سطوح محدب، مقادیر منفی بیانگر سطوح مقعر و مقدار صفر نشان‌دهنده سطوح خطی می‌باشد. خم سطح، سرعت تغییرات جهت شیب را در راستای مسیر منحنی میزان محاسبه می‌نماید و مقادیر منفی آن نشانگر مناطق مقعر، مقادیر مثبت تعیین کننده مناطق محدب و مقدار صفر نشان‌دهنده سطوح خطی در راستای عرضی می‌باشند. دو توصیف‌گر خم سطح و خم پروفیل به دلیل غیرخمیده بودن صفحات سقفی در اکثر ساختمان‌ها، دارای مقدار صفر می‌باشند ولی در مناطق دارای پوشش گیاهی مقادیر غیرصفر دارند. زبری میزانی برای تعیین بافت سطح است و با تعیین میزان تغییرات عمودی بر سطح نسبت به سطح صاف واقعی تعیین می‌شود. در صورتی که این تغییرات زیاد باشد؛ سطح، زبر و در صورت کم بودن نرم است. از این رو میزان زبری سطح می‌تواند در تفکیک عوارض از هم بسیار کارآمد باشد، زیرا عوارضی نظیر درخت دارای سطوحی زبر بوده در صورتی که ساختمان‌ها سطوح نرم‌تری داشته و خیابان‌ها دارای سطوح کاملاً نرمی می‌باشند. واریانس، مقیاسی است که نشان می‌دهد که داده‌ها حول میانگین چگونه پخش شده‌اند. هر قدر مقدار واریانس کمتر باشد به این معناست که داده‌ها به میانگین جامعه نزدیک می‌باشند و پراکندگی کمتری دارند. به عبارت دیگر، مقدار واریانس برای مناطق دارای ارتفاع یکسان کمتر و برای دیگر مناطق بیشتر است. مقدار توصیف‌گر میزان همواری برای یک ناحیه با مقادیر ثابت برابر با صفر بوده و برای یک ناحیه با مقادیر متغیر برابر با یک می‌باشد.

^۱ Profile curvature

^۲ Plane Curvature

^۳ Roughness

^۴ Smoothness

در این میان، انتخاب موثرترین توصیفگرها و یا به عبارت دیگر توصیفگرهای بهینه موضوعی با اهمیت است که در راستای تحقق آن از الگوریتم ژنتیک ارائه شده در [۴۱] استفاده شد. از مقادیر توصیفگرهای تولید شده جهت اخذ داده‌های آموزشی بهره گرفته می‌شود. برای این منظور ۳۰٪ از مقادیر بردارهای توصیفگر متناظر با داده‌های واقعیته زمینی به عنوان داده‌های آموزشی و مابقی (۷۰٪) به عنوان داده‌های تست و ارزیابی در نظر گرفته شدند. بدین ترتیب از دقت کلی (OA) ^۱ بدست آمده برای داده‌های تست از الگوریتم کلاسه‌بندی نظارت شده KNN (K=1)؛ [۴۰]؛ برای محاسبه میزان برازندگی هر کروموزوم (ترکیبی از توصیفگرها) الگوریتم ژنتیک استفاده گشت. مقادیر پارامترها و عملگرهای الگوریتم ژنتیک به کار گرفته شده در این تحقیق، همانند روش ارائه شده در [۴۱] می‌باشد. بدین ترتیب شناسایی ساختمان‌ها با استفاده از توصیفگرهای بهینه حاصل شده از الگوریتم ژنتیک با استفاده از الگوریتم کلاسه‌بندی KNN (K=1) انجام گشت. به طور کلی شناسایی توصیفگرهای بهینه با استفاده از واقعیت زمینی این امکان را فراهم می‌سازد که در صورت استفاده از داده‌های ورودی یکسان با این مقاله جهت شناسایی ساختمان‌ها و عدم وجود واقعیت زمینی، دیگر نیازی به انتخاب دوباره توصیفگرهای بهینه نباشد و بدین ترتیب می‌توان با توصیفگرهای بهینه انتخاب شده به دقت شناسایی بالایی رسید.

۲-۲- بهبود نتایج شناسایی

نتایج مرحله شناسایی به صورت تصاویر باینری می‌باشد که در این بخش سعی می‌گردد بهبود داده شوند. در این راستا، ابتدا قطعات شناسایی شده مورد بررسی قرار گرفته و قطعاتی که دارای مساحتی کمتر از یک حدآستانه می‌باشند، حذف می‌گردند. رابطه (۱)

$$S_1 = \{P_k \in A \mid \text{area}(P_k) < A_{\min}\}, \quad (1)$$

$$k = \{1, 2, \dots, \text{NumPar}\},$$

که A مجموعه قطعات شناسایی شده، $A_{\min}$ حدآستانه موردنظر، NumPar تعداد قطعات شناسایی شده و S_1 مجموعه قطعات بهبود داده شده است.

در مرحله بعد قطعات شناسایی شده مطابق الگوریتم استخراج مؤلفه‌های متصل [۳۷] برچسب‌گذاری می‌شود تا امکان انتخاب یکی از قطعات جهت مدل‌سازی فراهم شود. زیرا بهبود و اصلاح قطعه شناسایی شده با محدود کردن منطقه موردبررسی، بسیار آسان‌تر می‌گردد. در روند شناسایی برخی درختان به اشتباه در کلاس ساختمان قرار گرفته‌اند و یا قسمت‌هایی از یک ساختمان به اشتباه شناسایی نشده است. در اکثر موارد، این اشتباهات در مناطقی رخ می‌دهد که درختانی با ارتفاع تقریباً برابر با ارتفاع ساختمان، در مجاورت با ساختمان قرار گرفته و سایه ساختمان روی درختان افتاده است. عدم شناسایی صحیح ساختمان سبب می‌گردد که مرزها به خوبی استخراج نگردند. از این رو باید با ارائه روندی این دو عارضه را به خوبی از هم تفکیک نمود، به طوری که ساختمان‌ها به طور کامل شناسایی شوند. در راستای تفکیک صحیح درختان و ساختمان‌ها از دو توصیفگر استفاده می‌شود.

توصیفگر اول، میزان شیب است که در بخش شناسایی هم به عنوان توصیفگر مورد استفاده قرار گرفت. سقف‌های مسطح دارای شیب بسیار ناچیزی می‌باشند و میزان شیب در سقف‌های شیبدار هم معمولاً از حدی متجاوز نمی‌باشد. به عبارت دیگر، سقف یک ساختمان هیچ‌گاه در مقاطع کوتاه دارای شیب زیاد نمی‌باشد. برای اعمال پارامتر شیب، ابتدا توصیفگر میزان شیب تولید شده و سپس با ضرب نقطه‌ای در تصویر باینری ساختمان موردنظر (رابطه (۳)) منطقه مورد بررسی محدود می‌گردد. از این رو مطابق رابطه زیر مناطقی که دارای تغییرات شیب بیشتر از یک حدآستانه می‌باشند، حذف می‌گردند.

$$SLP_k = \text{Slope}[P_k], \quad (2)$$

$$P_k \in S_1, \quad k = \{1, 2, \dots, \text{NumPar}\}$$

$$S_2 = \{SLP_k < \text{Threshold1}\}, \quad (3)$$

که Slope توصیفگر تغییرات شیب، P_k قطعه شناسایی و برچسب‌گذاری شده و SLP_k نتیجه ضرب نقطه‌ای میان قطعات موردنظر و توصیفگر تغییرات شیب است. همچنین Threshold1 حدآستانه موردقبول برای ساختمان می‌باشد.

^۱ Overall accuracy

مجزای شناسایی شده، بهره گیری از چند توصیفگر مناسب منجر به رفع اشتباهات رخ داده در هر قطعه می شود.

۳-۲- تفکیک صفحات سقف

تفکیک صفحات سقفی در ساختمان های دارای سقف های مسطح با تفکیک صفحات شیبدار متفاوت است. در ساختمان های شیبدار محل تغییر شیب در سقف ساختمان ها برای جداسازی صفحات سقفی مناسب است. اما تفکیک صفحات در ساختمان های دارای سقف های مسطح حاوی پیچیدگی های بیشتری است. صفحات در این نوع ساختمان ها با تغییر ارتفاع ناگهانی از یکدیگر تفکیک می شوند و دیگر تغییر جهت شیب رخ نمی دهد.

زمانی که عارضه مورد بررسی دارای ارتفاع زیادی باشد، داده های لیدار الزاماً یک نقطه از لبه و یک نقطه از پای ساختمان برداشت نمی کنند و میان این دو فاصله وجود دارد. در صورتی که در لبه ساختمان ها طی فاصله مسطحاتی کم، اختلاف ارتفاعی زیادی وجود دارد. از این رو، فاصله مسطحاتی میان نقاط برداشت شده از بالای ساختمان و پای ساختمان سبب می گردد که در طی انجام انترپولاسیون، تغییر ارتفاع به صورت تدریجی درآید (شکل ۲). علاوه بر این، داده های لیدار همانند داده های عکسی قدرت بالایی در شناسایی لبه ها ندارند، زیرا نقاط برداشت شده لزوماً از گوشه ها برداشت نمی گردد. این عوامل سبب می گردد که روند تفکیک صفحات و مدل سازی بسیار دشوار شود.

در شکل ۳ یک نمونه ساختمان با سقف های مسطح نشان داده شده است و برخی مناطق با دایره آبی رنگ مشخص شده اند. در مناطق مشخص شده برخی عوامل کاهش دقت شناسایی صفحات تشکیل دهنده سقف نظیر شیب مایل دیوارها به جای قائم بودن، مرز بسیار نامشخص میان صفحات و از بین رفتن نقاط گوشه ای نشان داده شده است. برای نمایش بهتر از تصویر هوایی ساختمان مذکور و مشخص نمودن مناطق مورد نظر در آن بهره برده شده است.

توصیفگر دوم، NDVI است که این توصیفگر هم در قسمت شناسایی مورد استفاده گرفته است. ساختمان ها هیچ گاه دارای مقادیر زیاد NDVI نمی باشند، مگر در مواردی بسیار نادر و خاص که در سقف ساختمان ها گیاه وجود داشته باشد که مورد بحث این مقاله نمی باشد. مطابق روابط زیر ابتدا توصیفگر NDVI در تصویر باینری قطعه شناسایی شده ضرب گشته و سپس مناطقی که دارای مقادیر NDVI بیشتر از یک حد آستانه می باشند، حذف می گردند.

$$NDP_k = NDVI \square P_k, \quad (4)$$

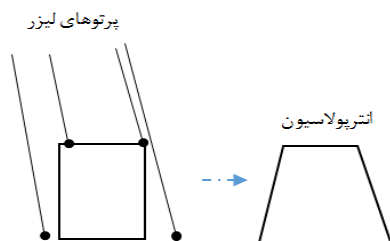
$$P_k \in S_2, \quad k = \{1, 2, \dots, NumPar\}$$

$$S_3 = \{NDP_k < Threshold2\}, \quad (5)$$

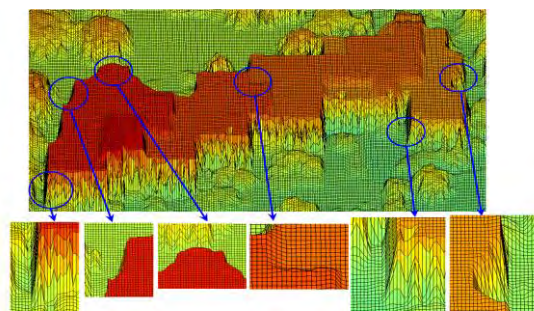
که NDVI شاخص گیاهی و NDP_k نتیجه ضرب نقطه ای میان قطعات مورد نظر و شاخص NDVI است. همچنین $Threshold2$ حد آستانه مورد قبول برای ساختمان می باشد. در مرحله بعد SLP_k و NDP_k در یکدیگر ضرب نقطه ای می شوند (رابطه (۶)) تا مناطقی که در هر دو رابطه صدق می کنند، استخراج شوند.

$$S_4 = SLP_k \square NDP_k, \quad (6)$$

که S_4 نتیجه نهایی بهبود شناسایی است. اما سؤالی که امکان دارد پیش بیاید این است که چرا بالینکه از این توصیفگرها در فرآیند شناسایی نیز استفاده شده است، ساختمان ها به درستی شناسایی نشده اند؟ همچنین چرا از ابتدا به جای شناسایی توسط الگوریتم KNN، از آستانه گذاری استفاده نشد؟ در پاسخ باید گفت که آستانه گذاری روی این توصیفگرها تنها برای بهبود شناسایی مناسب می باشد. به طور مثال علاوه بر ساختمان ها، عوارض زیادی نظیر راه ها نیز دارای تغییرات شیب و NDVI بسیار کم می باشند. بنابراین صرفاً با آستانه گذاری روی دو توصیفگر، نمی توان به نتیجه ای مناسب در شناسایی رسید و نیاز به توصیفگرهای بیشتر و بررسی حالت های مختلف می باشد که بررسی بیش از ۳ پارامتر به صورت همزمان از توان استنتاجی انسان خارج بوده و نیاز به یک سیستم استنتاج می باشد. اما در صورت محدود کردن منطقه مورد بررسی با استفاده از قطعات



شکل ۲- نحوه عملکرد انتریپولاسیون و ایجاد شیب تدریجی در ساختمان‌های بلند



شکل ۳- بررسی عوامل کاهش دقت صفحات مسطح در داده‌های لیدار

انتریپولاسیون مزایایی هم دارد. به طور مثال ابرنقاط لیدار در برخی مناطق دارای داده نمی‌باشد و به اصطلاح دارای گپ می‌باشد که به دلیل عدم بازگشت سیگنال ارسالی در آن مناطق می‌باشد. انجام انتریپولاسیون سبب می‌گردد که مقادیر در تمام مناطق بازیابی شود و مناطق بدون داده از بین برود. گستردگی الگوریتم‌های موجود در فضای رستری جهت پردازش تصویر و امکان تلفیق و کمک گرفتن از تصاویر هوایی نیز از جمله مزایای استفاده از داده‌های لیدار به صورت رستری می‌باشد.

جهت تفکیک صفحات ساختمان‌های دارای سقف‌های مسطح ابتدا توصیفگر میزان تغییرات شیب به دلیل توانایی بالا در شناسایی مناطقی که دارای تغییر شیب ناگهانی می‌باشد، تولید می‌گردد. تصویر حاصله از این تصویر در قطعه موردنظر جهت بازسازی به صورت نقطه‌ای ضرب می‌شود تا مقادیر تغییرات شیب تنها در محدوده موردنظر بدست آید.

$$DSIP_k = P_k \square DSL, \quad (7)$$

$$P_k \in S_4, \quad k = \{1, 2, \dots, NumPar\},$$

که S_4 مجموعه قطعات شناسایی شده (رابطه ۶)، DSL تصویر تغییرات شیب منطقه و $DSIP_k$ میزان شیب در قطعه شناسایی شده است. با تعیین یک حد آستانه، مناطقی که دارای تغییرات شیب کمتر از آن می‌باشند به عنوان صفحات سقفی انتخاب شده و مابقی حذف می‌شوند (رابطه ۸).

$$SepPl = \{Pi_i \in DSIP_k \mid DSIP_k(Pi_i) < Tr\}, \quad (8)$$

$$i = \{1, 2, \dots, NumPl\}$$

که Pi_i پیکسل مورد بررسی، $NumPl$ تعداد صفحات سقفی شناسایی شده، Tr حد آستانه مشخص شده، $SepPl$ مجموعه صفحات تفکیک شده و $SDIP_k$ میزان تغییرات شیب در قطعه مورد بررسی است. بدین ترتیب یک تقریب اولیه از صفحات سقفی ایجاد می‌گردد که جهت بهبود مرز نیاز به پردازش دارد.

در راستای بهبود و تکمیل شناسایی صفحات، ابتدا صفحه مورد بررسی را انتخاب کرده و با اعمال فیلتر فرسایش مورفولوژی با المان ساختاری مشخص سعی می‌شود تا تمام اتصالات اضافی حذف شوند. سپس صفحات سقف برجسب گذاری می‌شوند و به صورت مجزا مورد بررسی قرار می‌گیرند. یکی از صفحات فراخوانی گشته و محدوده مورد بررسی آن با اعمال فیلتر تورم مورفولوژی با المان ساختاری مشخص بزرگ می‌شود تا مناطق از دست رفته در مرحله شناسایی اولیه دوباره مورد بررسی قرار گیرند. سپس با ضرب صفحه شناسایی شده در تصویر بازگشت آخر فاصله سنجی لیدار مقادیر ارتفاعی صفحه بدست می‌آید (رابطه ۹).

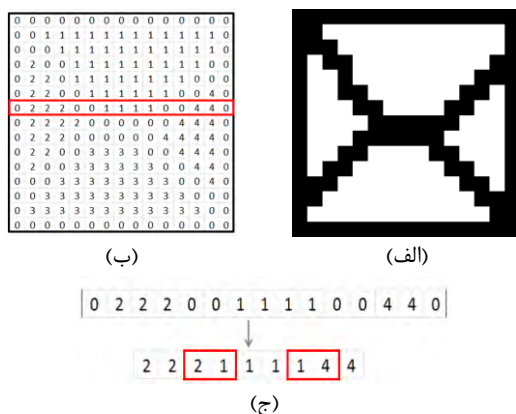
$$E_i = PL_i \square LRP, \quad PL_i \in SepPl, \quad (9)$$

که $SepPl$ مجموعه صفحات تفکیک شده، LRP تصویر بازگشت آخر فاصله سنجی لیدار، PL_i صفحه انتخاب شده و E_i مقادیر ارتفاعی در صفحه مورد بررسی است. مقدار واریانس و میانه داده‌های لیدار در محدوده صفحه مورد بررسی محاسبه می‌گردد. در نهایت پیکسل‌هایی که در رابطه زیر صدق می‌نمایند به عنوان مناطق مربوط به صفحه انتخاب می‌گردند.

$$Med(E_i) - Var(E_i) < e_{ij} < Med(E_i) + Var(E_i), \quad (10)$$

۴-۲- استخراج نقاط گوشه‌ای صفحات سقفی و ایجاد مدل نهایی

در این بخش، ابتدا صفحات سقفی شناسایی شده (شکل ۴-الف) برچسب‌گذاری می‌شوند (شکل ۴-ب)، سپس در هر سطر، پیکسل‌های بزرگ‌تر از صفر به همراه مختصات آن‌ها استخراج گشته و مورد بررسی قرار می‌گیرند (شکل ۴-ج). به‌طوری‌که اگر مقدار پیکسل - نشان‌دهنده برچسب صفحه است - در آن سطر تغییر نموده و فاصله برچسب‌ها مورد بررسی زیاد نباشد، به معنای همسایه بودن صفحات است. ماتریس همسایگی مطابق با صفحات همسایه شناسایی شده تشکیل می‌شود.



شکل ۴- (الف) نتیجه فرآیند تفکیک صفحات، (ب) ماتریس صفحات برچسب‌خورده، (ج) بررسی همسایگی در یک سطر

در مرحله بعد یکی از صفحات برچسب‌گذاری شده انتخاب می‌گردد. تصویر صفحه انتخاب‌شده به‌صورت باینری می‌باشد؛ از این‌رو شناسایی نقاط مرزی مطابق روش ردیابی مرز با رمزهای زنجیره‌ای [۳۷] صورت می‌گیرد. مختصات تمام نقاط با استفاده از کد زنجیره‌ای به‌دست‌آمده محاسبه می‌گردد. در نتیجه برای هر صفحه مجموعه‌ای از نقاط حاصل می‌شود که نشان‌دهنده محدوده صفحه می‌باشد. مرز صفحات دارای شکستگی‌های زیادی در مقیاس پیکسل می‌باشد. استخراج مختصات نقاط مرزی مطابق روند روش رمزهای زنجیره‌ای برای تمام شکستگی‌ها نقطه‌ای را در نظر می‌گیرد که نتیجه آن افزونگی داده است. بنابراین باید نقاط اضافی حذف شده و همزمان با کاهش حجم اطلاعات مورد پردازش، دقت مرز را نیز افزایش داد. در این راستا، دو شرط برای حذف و بهبود نقاط مرزی هر صفحه در نظر گرفته شده است:

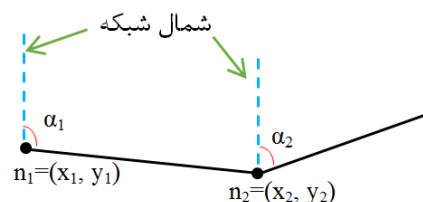
که e_{ij} مقدار پیکسل در مختصات موردنظر است. استفاده از میانه در رابطه (۱۰) به این خاطر است که در صفحات مسطح تغییر شیب وجود ندارد و مقادیر ارتفاعی نقاط بسیار به هم نزدیک است. به همین خاطر هنگامی که تمام نقاط به یک صفحه متعلق‌اند، مقدار میانه و میانگین تفاوت چندانی ندارد. ولی در صورت وجود نقاطی که متعلق به صفحه مورد بررسی نیستند، مقدار میانگین اصلاً دارای اعتبار نمی‌باشد. در روند مطرح‌شده، از یک‌سو به دلیل بزرگ‌تر کردن ناحیه مورد بررسی و از سوی دیگر وجود عوارض جانبی و حتی نویز در داده‌ها، استفاده از میانگین مناسب نبوده و میانه مورد استفاده قرار گرفته است. این روند برای تمام صفحات به‌صورت مجزا تکرار می‌گردد.

علاوه بر داده‌های لیدار می‌توان از تصاویر رقومی هوایی قائم منطقه جهت تفکیک صفحات بهره برد. در بسیاری موارد پوشش سقف‌های مسطح، از مواد تیره‌رنگی مانند آسفالت می‌باشد. اما دیوارها از پوشش روشن سنگی ساخته شده‌اند. بنابراین از این ویژگی و تمایز رنگ، بافت و جنس دیوارهایی که مرز صفحات سقف را تشکیل می‌دهند و موادی که داخل محدوده سقف را تشکیل می‌دهند، جهت تفکیک صفحات استفاده می‌گردد. در این راستا، در رابطه (۹) به‌جای داده‌های فاصله‌سنجی لیدار از تصویر درجه خاکستری قائم منطقه استفاده می‌شود و سپس صفحات مطابق رابطه (۱۰) استخراج می‌شوند. اشکال استفاده از تصاویر هوایی، عدم کارکرد مناسب در مناطق سایه‌دار است که برای رفع آن از باند I در فضای رنگی YIQ (رابطه (۱۱)) استفاده می‌گردد [۴۲].

$$I = 0.596R - 0.275G - 0.321B, \quad (11)$$

که R باند قرمز، G باند سبز و B باند آبی تصویر است. لازم به ذکر است در تبدیلات مربوط به استخراج فضای تصویر YIQ به‌جای باند آبی از باند مادون‌قرمز نزدیک استفاده شده است و این سبب گشته که باند I تولیدشده تنها در مناطق سایه‌دار دارای مقادیر مثبت باشد. بنابراین با اضافه کردن مناطق شناسایی‌شده توسط این توصیفگر به نتایج قبلی می‌توان محدوده صفحه را با دقت بیشتری شناسایی نمود.

در **شرط اول**، ابتدا راستای پایین به بالا به عنوان شمال شبکه در نظر گرفته می‌گردد، سپس یک نقطه به عنوان نقطه شروع بررسی نقاط انتخاب می‌شود و ژیزمان هر یک از خطوط نسبت به شمال شبکه محاسبه می‌شود (رابطه (۱۲)). اگر اختلاف دو ژیزمان متوالی از حد آستانه‌ای کمتر باشد، نقطه مشترک در دو زاویه حذف می‌شود (شکل ۵).



شکل ۵- میزان ژیزمان دو خط متوالی

$$\alpha_i = \tan^{-1} \left(\frac{x_i - x_i}{y_i - y_i} \right), \quad i = \{1, 2, \dots, NumN\} \quad (12)$$

$$PIB1 = \{n_i \in BoundS \mid \alpha_2 - \alpha_1 < BTresh1\}, \quad (13)$$

$$n_i = (x_i, y_i),$$

که $NumN$ تعداد نقاط مربوط به مرز یک صفحه، n_i مختصات نقاط مرزی، $BoundS$ مجموعه نقاط مرزی اولیه، $PIB1$ مجموعه نقاط مرزی بهبود داده شده و $BTresh$ حداکثر زاویه مورد قبول می‌باشد.

شرط دوم میزان فاصله در دو نقطه متوالی را بررسی می‌نماید. بسیاری از نقاط استخراج شده بسیار به هم نزدیک می‌باشند و حضور تمام آن‌ها ضروری نمی‌باشد. بنابراین طی روندی نقاطی که فاصله آن‌ها از حد آستانه‌ای به هم نزدیک‌تر می‌باشند، شناسایی شده و با نقطه‌ای که دارای مختصات میانگین نقاط مورد نظر است، جایگزین می‌شود (رابطه (۱۵)).

$$distnode_i = \sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2}, \quad (14)$$

$$PIB2 = \{n_i \in PIB1 \mid distnode_i < BTresh2\}, \quad (15)$$

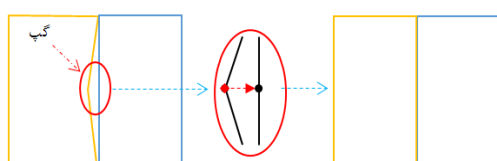
$$n_i = (x_i, y_i),$$

که $distnode_i$ فاصله دو نقطه مورد نظر، $BTresh2$ حداکثر فاصله قابل قبول و $PIB2$ مجموعه نقاط بهبود یافته در این مرحله می‌باشد.

پس از بهبود مرزهای یک صفحه، باید صفحات در کنار یکدیگر قرار گیرند و نقاط مشترک بین آن‌ها بدست آورده شود. همچنین از ایجاد تقاطع ناخواسته و اشتباه، روی هم قرار گرفتن صفحات و ایجاد گپ مابین صفحات جلوگیری نمود. جهت تصحیح و رفع این اختلالات سه مرحله پردازش طراحی شده است:

در مرحله اول، نقاطی که در مجموعه نقاط مرزی دو صفحه وجود دارد و در فاصله بسیار کمی از هم واقع‌اند، حذف می‌گردند. درواقع با حذف این نقاط و جایگزینی با نقطه‌ای که دارای مختصاتی برابر با میانگین مختصات نقاط مذکور است، می‌توان از ایجاد گپ میان صفحات و یا قطع کردن صفحات جلوگیری نمود.

در مرحله دوم، برای جلوگیری از ایجاد گپ و روی هم قرارگیری صفحات، مجموعه نقاط هر صفحه مورد بررسی قرار می‌گیرد. به‌طوری‌که یک دایره جستجو با شعاع مشخص تعیین می‌شود و با قرار دادن آن روی هر نقطه، تقاطع یا عدم تقاطع آن با صفحه مجاور بررسی می‌شود. در صورتی‌که دایره رسم شده روی یکی از نقاط، صفحه دیگر را قطع نماید، نشان‌دهنده فاصله بسیار نزدیک نقطه مورد بررسی با مرز صفحه مجاور می‌باشد. در نتیجه نقطه مورد نظر حذف شده و به روی مرز صفحه مجاور تصویر می‌شود تا گپ موجود به‌طور کامل برطرف گردد. شکل ۶ طریقه قرارگیری نقاط برای ایجاد گپ و برطرف کردن آن را نمایش می‌دهد.

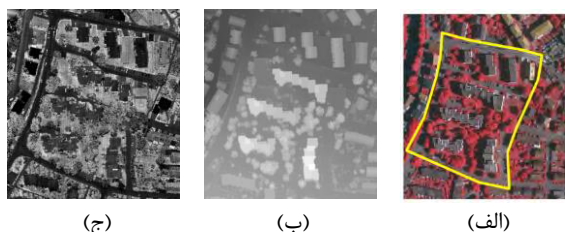


شکل ۶- روند از بین بردن گپ به صورت شماتیک

برخی مواقع یک نقطه مرزی مربوط به یک صفحه در داخل محدوده صفحه مجاور قرار می‌گیرد و باعث می‌شود که صفحات یکدیگر را قطع نمایند. در این حالت هم با تعیین یک دایره جستجو با شعاع مشخص، نقطه قرار گرفته در داخل صفحه مجاور روی مرز آن صفحه تصویر می‌شود. شکل ۷ تقاطع صفحات مجاور به دلیل قرارگیری نقطه مرزی مربوط به یک صفحه در داخل صفحه دیگر را نشان می‌دهد.

۳-۱- منطقه و داده‌های مطالعاتی

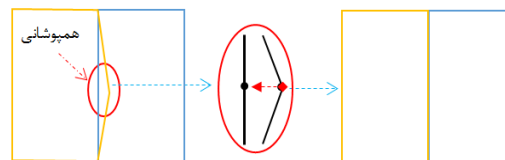
جهت پیاده‌سازی روند پیشنهادی برای شناسایی و بازسازی سه‌بعدی از داده‌های لیدار و تصاویر هوایی رقومی مربوط به شهر Vaihingen آلمان استفاده شده است. داده‌های لیدار دارای همپوشانی حداکثر ۳۰ درصد بوده و تراکم نقاط ۶ تا ۷ نقطه در هر مترمربع در مناطق همپوشانی می‌باشد، ولی در مناطقی که در یک نوار حضور دارند تراکم، ۴ نقطه در هر مترمربع است. تصاویر هوایی رقومی منطقه شامل سه باند سبز، قرمز و مادون قرمز نزدیک بوده و دارای قدرت تفکیک مکانی ۸ سانتی‌متر و همچنین قدرت تفکیک رادیومتریکی ۱۱ بیت می‌باشند. این مجموعه داده دارای سه ناحیه مطالعاتی می‌باشد که ناحیه ۲ به جهت وجود ساختمان‌های دارای سقف‌های مسطح در این مقاله مورد استفاده قرار گرفت. شکل ۹ داده‌های فاصله‌سنجی و شدت سیگنال لیدار و تصویر رقومی هوایی به همراه ناحیه موردنظر مطالعاتی را نشان می‌دهد.



شکل ۹- داده‌های مطالعاتی، (الف) تصویر رقومی هوایی منطقه، (ب) داده‌های فاصله‌سنجی لیدار، (ج) داده‌های شدت سیگنال لیدار

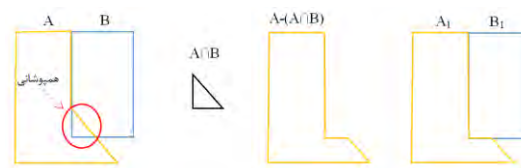
۳-۲- شناسایی ساختمان‌ها

بر اساس الگوریتم ژنتیک مورداستفاده [۴۱] میزان جمعیت اولیه ۵۰، احتمال آمیزش ۰/۸، احتمال جهش ۰/۰۱ و تعداد نسل (تکرار) ۵۰ مرتبه در نظر گرفته شد. همان‌طور که پیشتر هم ذکر شد به میزان ۳۰٪ از داده‌های زمینی (مرجع) ناحیه مورد مطالعه به‌عنوان داده‌های آموزشی و مابقی به‌عنوان داده‌های تست مورداستفاده قرار گرفت. در نتیجه اجرای الگوریتم ژنتیک ۵ توصیفگر شامل NDVI، nDSM، میزان شیب، میزان همواری و شدت سیگنال لیدار به‌عنوان توصیفگرهای بهینه انتخاب گشتند. شکل ۱۰ توصیفگرهای بهینه انتخاب‌شده را نشان می‌دهد.



شکل ۷- روند تصحیح تقاطع صفحات به‌صورت شماتیک

در مرحله سوم، نیز رفع همپوشانی صفحات مدنظر است. درواقع روی هم قرار گرفتن صفحات همواره با حضور یک نقطه در داخل صفحه مقابل روی نمی‌دهد و گاهی بدون حضور نقطه‌ای در صفحه مقابل، صفحات مجاور روی هم قرار می‌گیرند (شکل ۸). در این حالت نمی‌توان با پیدا کردن نقطه‌ای که ایجادکننده این اتفاق است مشکل را حل نمود. بنابراین از اپراتورهای اشتراک و تفاضل بولین جهت حذف مناطق همپوشانی بهره گرفته شد. به‌طوری‌که تقاطع صفحات مجاور موردبررسی قرار می‌گیرد و در صورت وجود تقاطع میان صفحات، یک صفحه به‌عنوان صفحه مرجع در نظر گرفته‌شده و با تفاضل ناحیه مشترک از صفحه دیگر منطقه همپوشانی رفع می‌گردد (شکل ۸).



شکل ۸- نمایش تصحیح مناطق همپوشانی به‌صورت شماتیک

درنهایت با برازش صفحه بر روی نقاط سقفی و محدود کردن آن با نقاط مرزی استخراج‌شده برای هر صفحه، مدل نهایی صفحات سقف ساختمان ایجاد می‌گردند. جهت مدل‌سازی دیوارها از یک محدوده جستجو استفاده می‌شود که با هر بار قرارگیری روی نقاط گوشه‌ای ارتفاع کمینه که نشان‌دهنده ارتفاع کف ساختمان است را استخراج می‌نماید. درنهایت هم با اضافه کردن نقاط کف به مدل ایجادشده سقف، دیوارها مدل‌سازی شده و مدل نهایی ساختمان ایجاد می‌گردد.

۳- پیاده‌سازی و ارزیابی نتایج

نتایج پیاده‌سازی هر یک از مراحل روند پیشنهادی در ادامه ارائه می‌گردد.

۳-۳- بهبود نتایج شناسایی

در این بخش نتایج شناسایی ساختمان‌ها طی چند مرحله پردازش بهبود داده شده‌اند. ابتدا در رابطه (۱)، حد آستانه ۵۰ پیکسل برای مساحت ساختمان‌ها در نظر گرفته شده و ساختمان‌های دارای مساحتی کمتر از میزان مشخص شده و حذف گردیدند. شکل ۱۲ نتایج حذف مناطق غیرساختمانی را با در نظر گرفتن مساحت هر یک نشان می‌دهد.

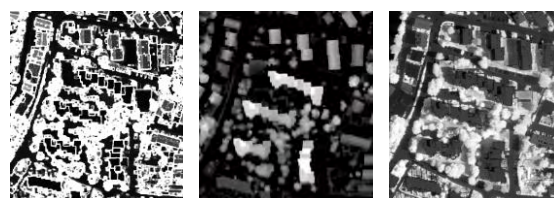


شکل ۱۲- حذف مناطق کم مساحت

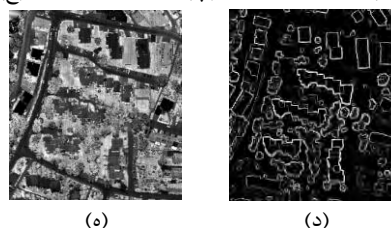
همانطور که مشاهده شد، حذف مناطق کم مساحت در کل تصویر صورت گرفته است. با این کار علاوه بر حذف مناطق که به اشتباه به عنوان ساختمان شناسایی شده‌اند، برچسب‌گذاری و فراخوانی قطعات مختلف ساختمانی نیز آسان می‌گردد. زیرا برچسب‌گذاری در صورت وجود مناطق کم مساحتی که به اشتباه شناسایی شده‌اند، باعث افزایش بیش از اندازه قطعات برچسب خورده می‌شود.

در مرحله بعد، با ضرب نقطه‌ای هر یک از توصیفگرهای تغییرات شیب و NDVI در قطعات مذکور، منطقه موردبررسی کوچک می‌شود. سپس حد آستانه‌های ذکر شده برای شیب و NDVI به ترتیب ۶۰ درجه و ۰/۱۵ در نظر گرفته شده است. در نهایت با اعمال روابط (۳) و (۵) محدوده دقیق ساختمان موردبررسی شناسایی می‌گردد. شکل ۱۳ نتایج نهایی شناسایی محدوده دقیق ساختمان‌های موردنظر را به همراه تصاویر هوایی یا ترکیب رنگ کاذب هر یک نشان می‌دهد.

در نهایت برای ارزیابی نتایج شناسایی از سه پارامتر تمامیت [۴۲]، صحت [۴۲] و دقت کلی استفاده شد. محاسبه دقت کلی (OA) نیازمند تشکیل ماتریس خطا می‌باشد که مقادیر ستونی آن تعداد نمونه‌های معلوم در واقعیت و مقادیر سطری آن تعداد نمونه‌های موجود در کلاس را نشان می‌دهد [۴۳]. در جدول ۱ نتایج ارزیابی شناسایی ساختمان‌ها در ناحیه مطالعاتی آورده شده است. شکل ۱۱ نتایج شناسایی به صورت شماتیک آورده شده است که TP مربوط به پیکسل‌هایی می‌باشد که به درستی شناسایی شده‌اند، FP مربوط به پیکسل‌هایی می‌باشد که به اشتباه شناسایی شده‌اند و PN مربوط به پیکسل‌هایی می‌باشد که اصلاً شناسایی نشده‌اند.



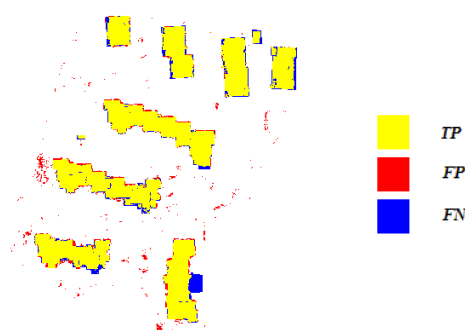
شکل ۱۰- توصیفگرهای بهینه، (الف) NDVI، (ب) DSM، (ج) شیب، (د) میزان همواری، (ه) شدت سیگنال لیدار



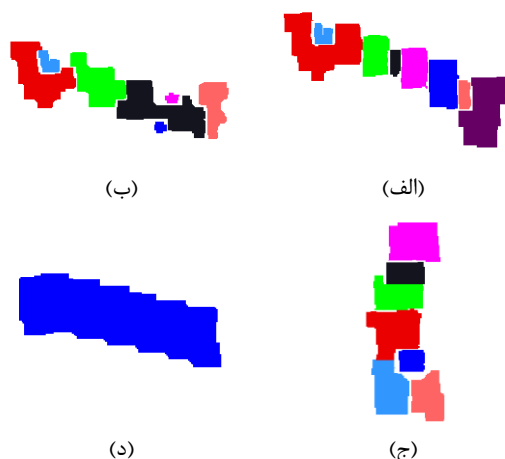
شکل ۱۰- توصیفگرهای بهینه، (الف) NDVI، (ب) DSM، (ج) شیب، (د) میزان همواری، (ه) شدت سیگنال لیدار

جدول ۱- نتایج ارزیابی پارامترهای تمامیت، صحت و دقت کلی برای شناسایی ساختمان‌ها

	Completeness	Correctness	OA
Test area	87.01%	85.67%	84.44%

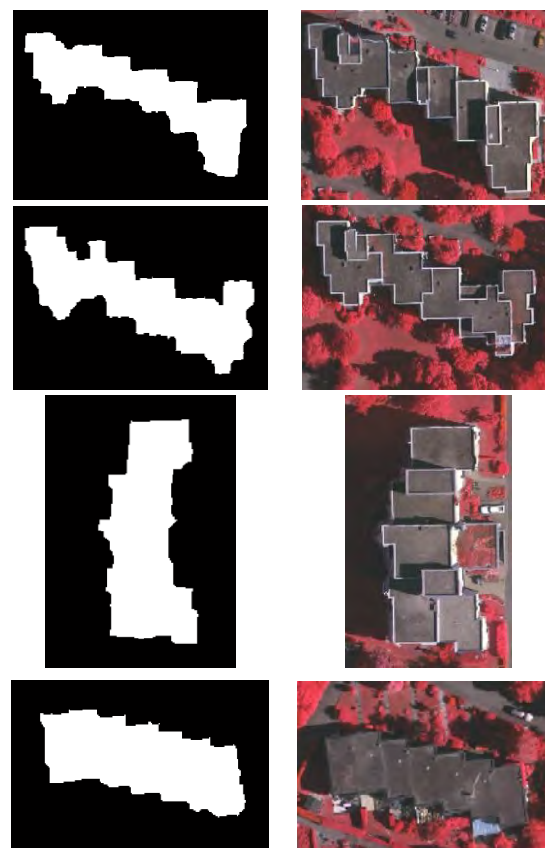


شکل ۱۱- نمایش شماتیک ارزیابی شناسایی ساختمان‌ها



شکل ۱۴- نتایج اولیه تفکیک صفحات سقف، (الف) ساختمان ۱، (ب) ساختمان ۲، (ج) ساختمان ۳، (د) ساختمان ۴

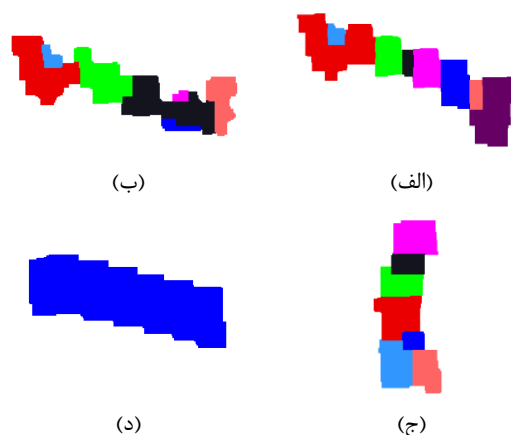
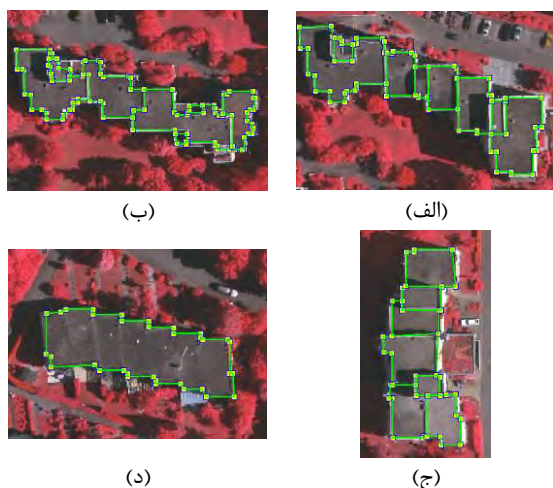
برای بهبود نتایج شناسایی، ابتدا صفحات شناسایی شده برچسب‌گذاری شده و با در نظر گرفتن المان ساختاری مربع شکل به ضلع ۵ پیکسل محدوده موردبررسی بزرگ‌تر می‌شود. سپس مطابق روابط ۹-۱۱ محدوده بزرگ‌شده صفحات بررسی شده و مرز صفحات استخراج می‌گردد. درواقع پس از شناسایی اولیه صفحات، با بزرگ کردن محدوده صفحه و بررسی دقیق‌تر آن (مطابق روابط ۹-۱۱) سعی می‌گردد تا مرز صفحات با دقت بالایی استخراج گردند. در واقع علاوه بر شناسایی نقاطی که در مرحله تفکیک اولیه صفحات استخراج نشده‌اند، نقاط غیرساختمانی که در لبه‌ها و پس از اعمال تورم به محدوده اضافه شده‌اند، حذف می‌گردند. در ساختمان‌های ۱، ۲ و ۳ به دلیل تمایز رنگ زیاد پوشش سقف و دیواره ساختمان از تصاویر درجه خاکستری بهره گرفته شده است. اما در ساختمان ۴ به دلیل عدم تمایز رنگ از تصویر بازگشت آخر فاصله‌سنجی لیدار استفاده شد. در شکل ۱۵ نتایج شناسایی صفحات آورده شده است.



شکل ۱۳- ساختمان‌های دارای سقف‌های مسطح جهت بازسازی سه‌بعدی، (الف) تصویر هوایی با ترکیب رنگ کاذب، (ب) قطعه شناسایی شده

۳-۴- تفکیک صفحات سقف

در ساختمان‌های مسطح، صفحات با تغییر ناگهانی ارتفاع از یکدیگر جدا می‌شوند. ازاین‌رو، مطابق روند ارائه‌شده در بخش ۲-۳، ابتدا یک قطعه ساختمانی موردنظر جهت بازسازی انتخاب گشته و در توصیف‌گر تغییرات شیب - به دلیل قابلیت بالای در نمایش مناطق دارای تغییر شیب ناگهانی - ضرب گردید. سپس با در نظر گرفتن حدآستانه تغییرات شیب برابر ۳۰ درجه (رابطه ۸) و اعمال فیلتر فرسایش با المان ساختاری مربع شکل به ضلع ۴ پیکسل اتصالات ضعیف قطع شده و صفحات به‌صورت تقریبی تفکیک شدند. شکل ۱۴، نتایج تفکیک تقریبی صفحات را برای هر یک از ساختمان‌های موردبررسی نشان می‌دهد.



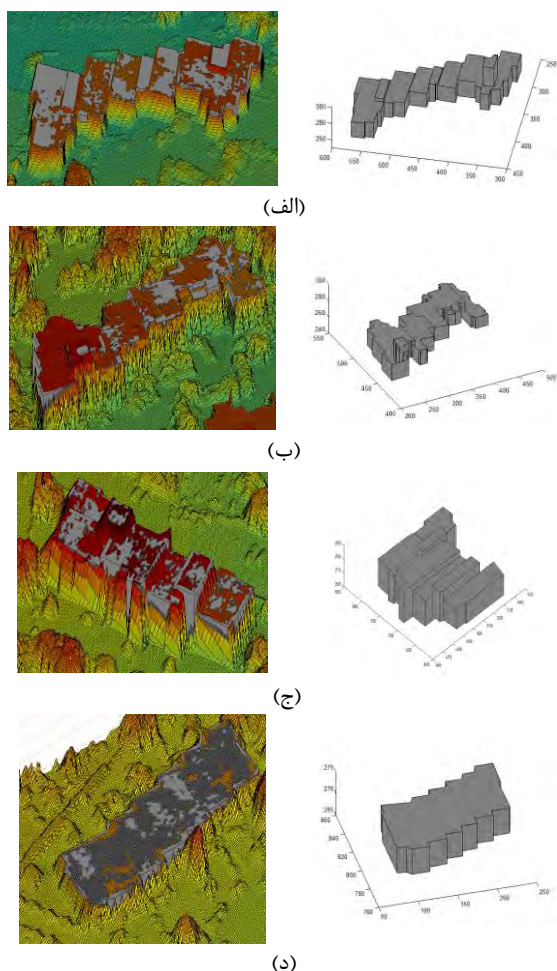
شکل ۱۵- نتایج شناسایی دقیق صفحات سقف، (الف) ساختمان ۱، (ب) ساختمان ۲، (ج) ساختمان ۳، (د) ساختمان ۴

شکل ۱۶- نقاط گوشه‌ای استخراج شده برای صفحات، (الف) ساختمان ۱، (ب) ساختمان ۲، (ج) ساختمان ۳، (د) ساختمان ۴

۳-۵- استخراج نقاط گوشه‌ای صفحات و ایجاد مدل نهایی

برای استخراج نقاط گوشه‌ای بهینه هر صفحه مطابق روند ارائه شده در بخش ۲-۴، با استفاده از روش رمزهای زنجیره‌ای مرز صفحه موردنظر به صورت برداری بدست آمد. سپس با در نظر گرفتن حداکثر تغییر زاویه و حداکثر فاصله موردپذیرش به ترتیب ۱۰ درجه و ۲ پیکسل، نقاط اضافی صفحه موردبررسی حذف شدند برای بدست آوردن نقاط گوشه‌ای نهایی، ماتریس همسایگی صفحات تشکیل شد. سپس با در نظر گرفتن فاصله ۳ پیکسل برای حذف نقاط نزدیک در دو صفحه مجاور و همچنین حذف گپ و همپوشانی میان صفحات، مختصات نقاط گوشه‌ای بدست آمدند. شکل ۱۶ نتایج محاسبه مختصات نقاط گوشه‌ای را برای هر یک از ساختمان‌های موردبررسی نشان می‌دهد.

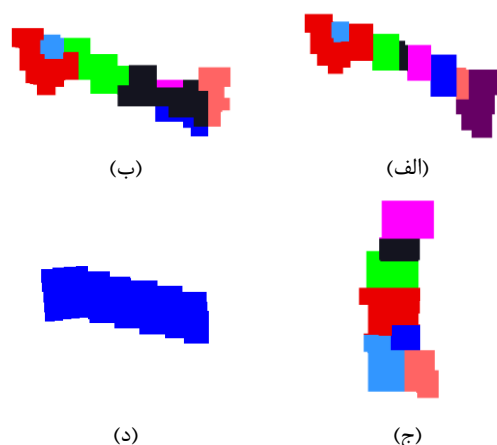
بازسازی دیوارهای ساختمان نیازمند داشتن مختصات نقاط مربوط به کف ساختمان است که یا ایجاد یک محدوده جستجو در اطراف هر نقطه و یافتن ارتفاع کمینه در هر محدوده بدست آمد. مدل نهایی ساختمان با اتصال صفحات مدل شده سقف به دیوارهای ساختمان ایجاد گردید. شکل ۱۷ مدل نهایی بازسازی شده برای ساختمان‌های دارای سقف مسطح را نشان می‌دهد.



شکل ۱۷- مدل سه بعدی نهایی، (الف) ساختمان ۱، (ب) ساختمان ۲، (ج) ساختمان ۳، (د) ساختمان ۴

ارزیابی نتایج بازسازی سه بعدی با استفاده از روند پیشنهادی به دو صورت مسطحاتی و ارتفاعی صورت می‌گیرد [۴۲]. به منظور ارزیابی مسطحاتی، از داده‌های

می‌باشند، میزان $RMSE_z$ ارتفاعی نقاط محاسبه شد. در جدول ۳ نتایج ارزیابی مسطحاتی و ارتفاعی برای هر یک از صفحات سقف آورده شده است. لازم به ذکر است که جدول زیر مطابق با تعداد صفحات هر سقف تکمیل شده است.



شکل ۱۸- داده‌های مرجع برای ارزیابی مسطحاتی صفحات سقف ساختمان‌ها، (الف) ساختمان ۱، (ب) ساختمان ۲، (ج) ساختمان ۳، (د) ساختمان ۴

مرجع ISPRS استفاده شد (شکل ۱۸). سپس از معیار دقت کلی (OA) برای ارزیابی مسطحاتی صفحات شناسایی شده استفاده شد (جدول ۲). همچنین جهت ارزیابی مرز استخراج شده برای هر یک از صفحات، مطابق روند ارائه شده توسط ISPRS [۴۴]، برای هر یک از نقاط گوشه‌ای در داده‌های مرجع، نزدیک‌ترین نقاط متناظر در مجموعه نقاط بدست آمده، جستجو می‌شوند. سپس نقاطی که فاصله اقلیدسی آن‌ها از حد آستانه ۳ متر [۴۴] بیشتر است، کنار گذاشته شده و میزان $RMSE_{xy}$ مطابق رابطه زیر و با استفاده از مابقی نقاط محاسبه می‌شود [۴۴].

$$RMSE_{xy} = \sqrt{\frac{\sum d^2}{N}}, \quad (16)$$

که d فاصله اقلیدسی میان نقاط گوشه‌ای بدست آمده و نقاط مرجع می‌باشد و N تعداد نقاط است [۴۴]. در راستای ارزیابی ارتفاعی، به‌طور تصادفی ۳۰٪ نقاط از میان نقاط مربوط به هر یک از صفحات سقفی انتخاب گشت. سپس با مقایسه مقادیر ارتفاعی این داده‌ها با داده‌های مرجع ارتفاعی که حاوی ارتفاع واقعی نقاط

جدول ۲- نتایج ارزیابی مسطحاتی (OA) و ارتفاعی ($RMSE$) هر یک از صفحات شناسایی شده سقف‌ها

	میانگین	صفحه ۸	صفحه ۷	صفحه ۶	صفحه ۵	صفحه ۴	صفحه ۳	صفحه ۲	صفحه ۱	معیار
ساختمان ۱	83.63%	85.10%	72.52%	95.94%	89.00%	84.14%	82.73%	65.43%	94.25%	OA(XY)
	0.212m	0.033m	0.420m	0.030m	0.038m	0.470m	0.057m	0.630m	0.021m	RMSE(Z)
	0.211m	0.085m	0.180m	0.240m	0.170m	0.484m	0.140m	0.075m	0.321m	RMSE(XY)
ساختمان ۲	71.59%	*	82.86%	34.45%	47.63%	90.51%	90.58%	0.630m	0.080m	OA(XY)
	0.236m	*	0.012m	0.470m	0.340m	0.061m	0.059m	0.630m	0.080m	RMSE(Z)
	0.368m	*	0.695m	0.255m	0.115m	0.585m	0.384m	0.125m	0.421m	RMSE(XY)
ساختمان ۳	89.53%	*	89.65%	86.97%	88.72%	99.06%	84.48%	88.69%	89.19%	OA(XY)
	0.078m	*	0.109m	0.24m	0.095m	0.025m	0.022m	0.050m	0.010m	RMSE(Z)
	0.189m	*	0.346m	0.135m	0.145m	0.415m	0.064m	0.205m	0.015m	RMSE(XY)
ساختمان ۴	93.49%	*	*	*	*	*	*	*	93.49%	OA(XY)
	0.055m	*	*	*	*	*	*	*	0.055m	RMSE(Z)
	0.082m	*	*	*	*	*	*	*	0.082m	RMSE(XY)

۴- نتیجه‌گیری

الگوریتم ژنتیک و الگوریتم کلاسه‌بندی KNN توصیفگرهای بهینه شناسایی شده و برای شناسایی ساختمان‌ها مورد استفاده قرار گرفتند. نتایج شناسایی دستیابی به دقت بهتر مورد پردازش قرار گرفت تا مناطقی که به اشتباه به عنوان ساختمان استخراج شده‌اند، حذف گردند. در روند پیشنهادی، هر از بلوک‌های ساختمانی به‌طور مجزا برای بازسازی سه‌بعدی بررسی گردید تا هم از حجم محاسبات کاسته شود و هم به دقت نتایج افزوده

در این مقاله روندی جهت بازسازی ساختمان‌های دارای سقف‌های مسطح با استفاده از داده‌های لیدار و تصاویر رقومی هوایی ارائه شد. به‌طوری‌که ابتدا با استفاده از داده‌های لیدار و تصاویر رقومی هوایی ۱۶ توصیفگر اولیه بالقوه که انتظار می‌رفت برای شناسایی ساختمان‌ها مؤثر باشند، انتخاب و تولید گشتند. سپس با استفاده از

شود. به همین دلیل قطعات شناسایی شده برچسب‌گذاری شدند تا امکان فراخوانی قطعه موردنظر جهت بازسازی فراهم گردد. از پارامتر میزان تغییر شیب در محدوده قطعه موردنظر برای تفکیک تقریبی صفحات استفاده گشت و با بررسی دقیق‌تر اطراف هر یک از صفحات به صورت جداگانه، صفحات به صورت دقیق‌تر شناسایی شدند. در مرحله بعد، نقاط گوشه‌ای هر یک از صفحات به صورت برداری استخراج گردید و طی چند مرحله پردازش، بهترین نقاط بدست آمدند. با بدست آوردن معادله هر صفحه شناسایی شده و برش آن با استفاده از نقاط گوشه‌ای صفحات، مدل سه بعدی هر صفحه بدست آمد. در نهایت با مدل‌سازی دیوارها از طریق پیدا کردن تعدادی نقطه در کف ساختمان و اتصال آن به مدل بازسازی شده صفحات سقفی، بازسازی سه بعدی ساختمان تکمیل گشت.

نتایج بازسازی به دو صورت مسطحاتی و ارتفاعی ارزیابی گشت که نتایج نشان داد روند پیشنهادی به طور

میانگین از دقت کلی ۸۴/۵۶٪ در شناسایی صفحات به صورت مسطحاتی، ۰/۲۱۲ متر دقت در محاسبه مختصات مسطحاتی مرزها و ۰/۱۴۵ متر خطا در راستای ارتفاعی برخوردار است. با توجه به نتایج بدست آمده، روند پیشنهادی توانایی شناسایی، تفکیک و بازسازی صفحات سقف در صورت وجود دیواری کوتاه میان آن‌ها و یا داشتن اختلاف ارتفاع بیشتر از میزان خطای ارتفاعی (۰/۱۴۵ متر) را با دقتی بالا دارد. در کارهای آتی بازسازی ساختمان‌ها با سطح شیبدار مدنظر قرار خواهد گرفت.

سپاسگزاری

مجموعه داده‌های استفاده شده در این مقاله توسط انجمن فتوگرامتری و سنجش‌ازدور آلمان جهت پیاده‌سازی الگوریتم‌های مختلف و شناسایی عوارض تهیه شده است.

مراجع

- [1] Lefevre, S., Weber, J., & Sheeren, D. (2007). Automatic Building Extraction in VHR Images Using Advanced Morphological Operators. Urban Remote Sensing Joint Event, pp. 1–5.
- [2] Sirmacek, B., & Unsalan, C. (2008). Building Detection from Aerial Images Using Invariant Color Features and Shadow Information. In 23rd International Symposium on Computer and Information Sciences, p. 105.
- [3] Niemeyer, J., Mallet, C., Rottensteiner, F., & Sörgel, U. (2013). Classification of urban LiDAR data using conditional random field and random forests. Proceedings of the JURSE. São Paulo – Brazil.
- [4] Mongus, D., Lukac, N., Obrul, D., & Zalik, B. (2013). Detetion of plannar for building extraction from LiDAR data based on differential morphological and attribute profiles. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Regina, Canada.
- [5] Moussa, A., & El-Shemy, N. (2012). A new object based method for automated extraction of urban object from airborne sensors data. Remote Sensing and Spatial Information Sciences (pp. Vol.XXXIX, Part B,). Melbourn, Australia: ISPRS Annals of the Photogrammetry.
- [6] Grigillo, D., & Kanjir, U. (2012). Urban object extraction from digital surface model and digital aerial images. Remote Sensing and Spatial Information Sciences (pp. Volume I-3). Melbourne, Australia: ISPRS Annals of the Photogrammetry.
- [7] Gerke, M., & Xiao, J. (2014). Fusion of airborne laserscanning point clouds and images for supervised and unsupervised scene classification. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 78-92.
- [8] Mass, H., & Vosselman, G. (1999). Two algorithms for extracting building models from raw laser altimetry data. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 54(2-3): 153-163.
- [9] Kim, T., Javzandulam, T., & Lee, T. (2007). Semiautomatic reconstruction of building height and footprints from single satellite images. Proc. Igarss.

- [10] Haala, N. (1997). Gebäuderekonstruktion durch Kombination von Bild- und Höhendaten. In: Univ.
- [11] Henricsson, O., & Baltsavias, E. (1997). 3-D building reconstruction with ARUBA: a qualitative and quantitative evaluation. *Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images(II)*. 65–76.
- [12] Nardinocchi, C., Scaioni, M., & Forlani, G. (2001). Building extraction from LIDAR data. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 79–83.
- [13] Hofmann, A. (2007). An Approach to 3D Building Model Reconstruction from Airborne Laser Scanner Data Using Parameter Space Analysis and Fusion of Primitives. *Geodesy Commission*.
- [14] Zhang, K., Yan, J., & Chen, S. (2009). Automatic 3D Building Reconstruction from Airborne LiDAR Measurements. *Urban Remote Sensing Event*, 1 - 5.
- [15] Sampath, A., & Shan, J. (2010). Segmentation and Reconstruction of Polyhedral Building Roofs From Aerial Lidar Point Clouds. *IEEE Transaction on GeoScience and Remote Sensing* 48, 1554–1567.
- [16] Gorte, B. (2002). Segmentation of TIN-structured surface models. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume 34 (4).
- [17] Kabolizade, M., Ebadi, H., & Mohammadzadeh, A. (2012). Design and implementation of an algorithm for automatic 3d reconstruction of building models using genetic algorithm international. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, Vol. 19, pp.104–114.
- [18] Elaksher, A., Bethel, J., & Mikhail, E. (2002). Building extraction using multiple images. *ACSM-ASPRS*.
- [19] Chen, D., L. Zhang., and et al. (2012). Urban building roof segmentation from airborne lidar point clouds. *International Journal of Remote Sensing* 33(20): 6497-6515.
- [20] Rabbani, T. and Van Den Heuvel, F. (2005). Efficient hough transform for automatic detection of cylinders in point clouds. *ISPRS WG III/3, III/4 3*: 60-65.
- [21] Tarsha-Kurdi, F. and T. Landes. (2008). Extended RANSAC algorithm for automatic detection of building roof planes from LiDAR data. *The photogrammetric journal of Finland* 21(1): 97-109.
- [22] Tarsha-Kurdi, F. and Landes, T. (2007). Hough-transform and extended ransac algorithms for automatic detection of 3d building roof planes from lidar data. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Systems* 36: 407-412.
- [23] Vosselman, G., and Dijkman, S. (2001). 3D building model reconstruction from point clouds and ground plans. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 3/W4, Vol. 34, Annapolis, MA, USA, pp. 37–44.
- [24] Kraus, T., Lehner, M., & Reinartz, P. (2007). Modeling of urban areas from high resolution stereo satellite images. *Proceedings of the ISPRS Hannover Workshop: High-Resolution Earth Imaging for Geospatial Information*.
- [25] Rau, J. (2012). A line-based 3D roof model reconstruction algorithm: TIN-merging and reshapeing (TMR). *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume I-3. Melbourne, Australia: XXII ISPRS Congress.
- [26] Arefi, H., & Reinartz, P. (2013). Building Reconstruction Using DSM and Orthorectified Images. *Remote Sensing*, 1681–1703.
- [27] Awrangjeb, M., Zhang, C., & Fraser, C. (2012). Automatic reconstruction of building roofs through effective. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume I-3. Melbourne, Australia: XXII ISPRS Congress.
- [28] McClue, A., Mille, P., Mills, J., & Holland, D. (2014). Automatic urban 3D building reconstruction from multi-ray photogrammetry. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume XL-3. Zurich, Switzerland.

- [29] Lach, S., Brown, S, and Kerekes, J. (2006). "Semi-automated DIRSIG scene modeling from 3D lidar and passive imaging sources", in Defense and Security Symposium, pp. 62140I-62140I-12
- [30] Cheng, N., Gong, J., Li, M and Liu, Y. (2011). 3D building model reconstruction from multi-view aerial imagery and lidar data, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, vol. 77, pp. 125-139.
- [31] Haala, N and Brenner, C. (1999). Extraction of buildings and trees in urban environments, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. 54, pp. 130-137.
- [32] Stilla, U and Jurkiewicz, K. (1999). Reconstruction of building models from maps and laser altimeter data, in Integrated Spatial Databases, ed: Springer, pp. 34-46.
- [33] Maas, H-G and Vosselman, G. (1999) Two algorithms for extracting building models from raw laser altimetry data, ISPRS Journal of photogrammetry and remote sensing, vol. 54, pp. 153-163.
- [34] Lodha, S. K., K. Kumar, and Kuma, A. (2005). Semi-automatic roof reconstruction from aerial LIDAR data using K-means with refined seeding, in ASPRS Conference.
- [35] Kriegler, F.J., Malila, W.A., Nalepka, R.F., and Richardson, W. (1969). Preprocessing transformations and their effects on multispectral recognition. Proceedings of the Sixth International Symposium on Remote Sensing of Environment, p. 97-131.
- [36] Qi J., Chehbouni A., Huete A.R., Kerr Y.H. (1994). Modified Soil Adjusted Vegetation Index (MSAVI). Remote Sens Environ 48:119-126.
- [37] Gonzalez, R.C, Eugene Woods, R, (2008). Digital image processing, ISBN number 9780131687288, Publisher: Prentice Hall.
- [38] Arefi, H., and Hahn, M. (2005). 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.
- [39] Li, Z., Zhu, Q., Gold, C. (2005). Digital Terrain Modeling: Principles and Methodology, CRC Press. Boca Raton.
- [40] Holland, J. (1975). Adaptation in Natural and Artificial Systems, University of Michigan Press, Ann Arbor.
- [41] Hasanlou, M., Samadzadegan, F. (2012). Comparative Study of Intrinsic Dimensionality Estimation and Dimension Reduction Techniques on Hyperspectral Images Using K-NN Classifier, IEEE Geoscience and remote sensing letter, Vol. 9, No. 6.
- [42] Rottensteiner, F., Sohn, G., Greke, M., Wagner, D.J., Breitkopf, U., and Jung, J. (2013). Results of the ISPRS benchmark on urban object detection and 3D building reconstruction, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing xxx.
- [43] Stephen V, S. (1997). Selecting and interpreting measures of thematic classification accuracy. Remote Sensing of Environment 62 (1): 77-89.
- [44] Rottensteiner, F. (2013). ISPRS Test Project on Urban Classification and 3D Building Reconstruction: Evaluation of Building Reconstruction Results, Technical report.