

ارائه روشی چندعامله به منظور استخراج و قطعه‌بندی همزمان ساختمان‌ها از ابر نقاط لیدار

مریم سجادیان^{۱*}، حسین عارفی^۲

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد فتوگرامتری - گروه مهندسی نقشه‌برداری - پردیس دانشکده‌های فنی - دانشگاه تهران
m.sajadian@ut.ac.ir

^۲ استادیار گروه مهندسی نقشه‌برداری - پردیس دانشکده‌های فنی - دانشگاه تهران
hossein.arefi@ut.ac.ir

(تاریخ دریافت مهر ۱۳۹۲، تاریخ تصویب مرداد ۱۳۹۳)

چکیده

امروزه پردازش‌های خودکار و استخراج اشیا از سنجنده‌های هوابرد به یکی از موضوعات تحقیقاتی مهم در فتوگرامتری تبدیل شده است. سیستم لیزراسکنر هوایی که معمولاً از آن به عنوان لیدار یاد می‌شود، یک تکنولوژی برتر برای اکتساب داده‌های سه‌بعدی مکانی با سرعت و چگالی بالا از سطح زمین است. یکی از مهمترین کاربردهای سیستم لیدار، تولید مدل‌های سه‌بعدی شهری است. گام اولیه و مهم برای بازسازی ساختمان‌ها به عنوان یکی از مهمترین اجزای مدل‌های شهری، شناسایی و تفکیک داده‌های ساختمانی از دیگر داده‌ها نظیر زمین، درختان و پوشش گیاهی است. علاوه بر این، قطعه‌بندی سقف ساختمان یک گام مهم دیگر در پردازش ابر نقاط ساختمان می‌باشد. در این تحقیق استخراج ابرنقاط ساختمانی و قطعه‌بندی سقف ساختمان به صورت همزمان و با استفاده از یک استراتژی چند عامله بر مبنای استفاده از ابرنقاط نامنظم لیدار صورت گرفته است. ابتدا با استفاده از معیارهای ارتفاعی و پالس‌های برگشتی، نقاط کاندیدای زمینی و گیاهی از نقاط ساختمانی جدا شده‌اند. سپس با آنالیز طول مثلث‌های ایجاد شده بر روی نقاط باقیمانده و با استفاده از روش گسترش ناحیه بر مبنای بردار نرمال، قطعات مختلف استخراج می‌شوند. پس از آنالیز مساحت برای تفکیک قطعات ساختمانی، به منظور شناسایی قطعات متعلق به ساختمان‌های واحد روشی ابتکاری به نام "گسترش شبکه" پیشنهاد شده است. جهت ارزیابی دقت از تفسیر بصری و مقایسه کمی نتایج با اطلاعات استخراج شده توسط اپراتور انسانی استفاده گردیده است. در این ارزیابی که بر روی داده‌های مربوط به شهر فایهینجن آلمان انجام شده، روش پیشنهادی در استخراج نقاط سقف ساختمانی به دقت متوسط ۹۳٪ رسیده است. به طور کلی نتایج موفقیت روش پیشنهادی را در استخراج و قطعه‌بندی ساختمان‌ها بدون نیاز به منابع کمکی نظیر نقشه‌های کاداستر و تصاویر هوایی نشان می‌دهند. مزیت ویژه روش مطرح، در ساختمان‌های چندلایه‌ای با سطوح سقفی موازی است که قطعات حتی با اختلاف ارتفاع خیلی کم (نظیر ۱۰ سانتی‌متری) به درستی از یکدیگر تفکیک شده‌اند.

واژگان کلیدی: لیدار، ابرنقاط، مثلث‌بندی دلونی، بردار نرمال، قطعه‌بندی، استخراج ساختمان، قطعات ساختمانی

* نویسنده رابط

۱- مقدمه

کاربرد لیزرها برای اندازه‌گیری زمین از سال ۱۹۷۰ میلادی آغاز شد، سیستم‌های لیزری بر روی هواپیماها نصب گردیدند و سیستم لیزراسکنر هوایی بوجود آمد که معمولاً از آن به عنوان لیدار^۱ یاد می‌شود. با توجه به اینکه لیدار یک سیستم فعال است نیازی به نور خورشید نداشته و قادر است حتی در شب به جمع‌آوری اطلاعات مکانی بپردازد. عدم تاثیر پذیری از سایه و جابجایی ارتفاعی، تولید مستقیم مدل رقومی سطح (DSM)^۲ استفاده از داده‌ها در فرایند زمانی کوتاه‌مدت، تراکم بالای نقاط برداشت شده در سطح وسیع و هزینه نسبتاً پائین از جمله مزایای سیستم لیدار در مقایسه با تصاویر هوایی می‌باشند. مهمترین مشکل سیستم لیدار دقت پایین‌تر در لبه‌ها نسبت به تصاویر هوایی است.

لیزراسکنرها معمولاً سطح زمین را به صورت خطی اسکن می‌کنند و از ترکیب این اسکن‌ها هزاران نقطه تشکیل می‌گردد که اصطلاحاً به آن ابر نقطه^۳ می‌گویند. این نقاط نامنظم هستند و می‌توان آن‌ها را با روش‌های مختلف درونیایی به شبکه‌های منظم تبدیل کرد و یک تصویر عمق^۴ ساخت. بدین معنی که هر یک از پیکسل‌های موجود در تصویر عمق حاصل دارای مختصات ارتفاعی هستند. مزیت استفاده از تصویر عمق این است که می‌توان از تکنیک‌های پردازش تصویری استفاده کرد که کار را ساده‌تر و سریع‌تر می‌کند. اما از سوی دیگر درونیایی باعث کاهش دقت و کیفیت کار می‌شود، چرا که تمام نقاط همسایگی صرف نظر از نوع شی متعلق به آن در تخمین ارتفاعی نقاط شبکه دخیل هستند. به‌طور مثال نقاط مربوط به ساختمان و زمین در تخمین ارتفاعی یک نقطه سهمیم می‌شوند و نقطه‌ی حاصل از این درونیایی در بسیاری از موارد با واقعیت اختلاف خواهد داشت. ابر نقاط شامل عوارضی نظیر ساختمان‌ها، راه و جاده، ماشین، درختان و پوشش گیاهی هستند. در کاربردهای مانند بازسازی سه‌بعدی ساختمان‌ها، مسئله مهم استخراج داده‌های ساختمانی از میان داده‌های متعلق به عوارض دیگر است، که در واقع یک مرحله‌ی پیش پردازش محسوب

می‌گردد. ازسوی دیگر، ساختمان‌ها به عنوان عوارض دست‌ساز بشر اغلب از ترکیب صفحات ساده شکل گرفته‌اند، بنابراین علاوه بر استخراج نقاط ساختمانی، برای مدلسازی ساختمان لازم است نقاط متعلق به صفحات یکسان شناسایی و برجسب‌گذاری شوند، که از آن به عنوان قطعه‌بندی یاد می‌شود. البته نقاط سقف ساختمانی مدنظر هستند، زیرا که داده‌های لیدار از بالا اخذ می‌شوند و غالب نقاطی که از ساختمان‌ها برداشت می‌شوند مربوط به سقف ساختمان هستند. استخراج داده‌های ساختمانی و قطعه‌بندی گام‌های مهم و اساسی در پردازش ابر نقاط و بازسازی سه‌بعدی ساختمان‌ها هستند که در این تحقیق به آن پرداخته شده‌است. صحت، جامعیت، کیفیت و دقت مدل تولید شده به نتایج حاصل از این دو مرحله شدیداً وابسته است. نتایج روش پیشنهادی می‌تواند به عنوان مقادیر اولیه در بسیاری از تحقیقات در زمینه بازسازی ساختمان نظیر [۱] که فرض بر این بوده است که ساختمان‌ها از قبل استخراج شده‌اند یا استفاده از نقشه کاداستر الزامی بوده است (نظیر [۲])؛ مورد استفاده قرار گیرد.

در مرجع [۳] ابتدا نقاط لبه از تصویر عمق تولید شده از ابر نقاط لیدار، استخراج شده‌اند. این لبه‌ها به منظور جداسازی ساختمان از دیگر عوارض، بر پایه‌ی هندسه‌ی شکلشان نظیر قائم بودن، موازی بودن، مدور بودن و تقارن طبقه‌بندی شده‌اند. [۴] برای استخراج نقاط گیاهی و غیر گیاهی از روشی ابتکاری بر پایه‌ی خصوصیات هندسی اختلافات محلی نقاط استفاده کرده است. استفاده از تکنیک‌های پردازش تصویری بر روی تصویر عمق ایجاد شده از ابر نقاط نامنظم لیدار در [۵] دیده می‌شود، معیارهایی نظیر شاخص گیاهی و واریانس نرمال‌های سطح برای استخراج نقاط ساختمانی بکار برده شده است. [۶] از روش‌های فیلترینگ ابر نقاط لیزر برای جداسازی نقاط زمینی و غیرزمینی و از پارامتر ناهمواری سطح برای جداسازی گیاهان و درختان از ساختمان‌ها بهره برده است. تلفیق داده‌های ارتفاعی و اطلاعات شدت [۷] نیز برای طبقه‌بندی عوارض درختی و ساختمانی بکار برده شده است. [۸] از مقادیر بدست آمده برای لبه‌های پرش از رابطه بعد همسایگی، برای شناسایی ابرنقاط ساختمانی استفاده کرده است. روش‌هایی مانند خوشه‌بندی K-Means و Fuzzy C-Means نظیر [۹،۲۰،۱]، روش

^۱ LiDAR (Light Detection And Ranging)

^۲ Digital Surface Model

^۳ Point cloud

^۴ Range image

مهمترین عوارض موجود در بین داده‌ها که باید از ساختمان‌ها جدا گردند، زمین، درختان و پوشش گیاهی هستند. در مرحله اول برای استخراج نقاط مربوط به این عوارض از دو معیار ارتفاع و تعداد پالس‌های برگشتی ابر نقاط نامنظم لیدار استفاده شده است.

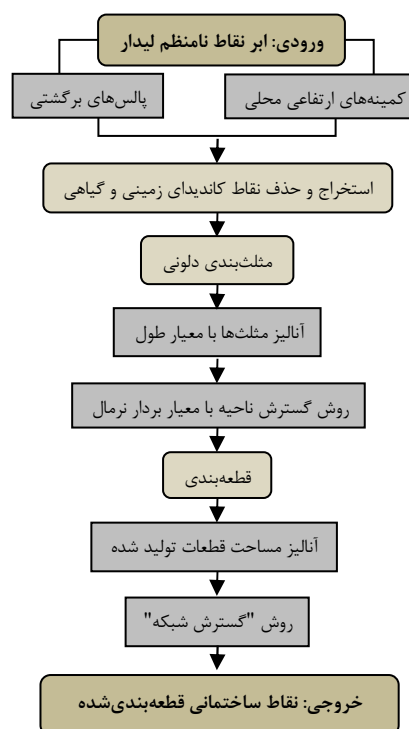
نقاط کاندیدای زمینی کمترین ارتفاع را در میان نقاط اندازه‌گیری شده دارند. از این‌رو برای استخراج این نقاط از حد‌آستانه‌ای بر اساس کمینه‌های محلی نقاط^۴ استفاده می‌شود و نقاط کاندیدای زمینی یا در واقع نقاط مربوط به کمترین ارتفاعات از داده‌های ساختمانی جدا می‌گردند. برای جلوگیری از اثرات شیب بر تعیین نقطه کمینه، کل منطقه به شبکه‌های کوچکتر تقسیم‌بندی شده و در هر شبکه نقطه کمینه تعیین می‌شود. نقاط هر شبکه نسبت به همان کمینه محلی مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. مقدار ارتفاعی ثابتی به ارتفاع نقطه کمینه هر شبکه اضافه می‌گردد و نقاط با ارتفاع کمتر از آن به عنوان نقاط کاندیدای زمینی شناخته می‌شوند. در این مرحله عوارضی با ارتفاع کم نظیر پوشش‌های گیاهی کم ارتفاع، ماشین‌ها، راه و جاده و نقاط کم ارتفاع موجود بر دیوار ساختمان نیز از نقاط سقف ساختمانی تفکیک می‌شوند. به همین دلیل نام نقاط کاندیدای زمینی به آن‌ها نسبت داده شده است، زیرا این‌ها لزوماً نقاط زمینی نیستند، بلکه نقاط کم ارتفاع نسبت به سقف ساختمان هستند. نکته قابل ذکر اینکه، اکثر نقاط برداشت شده توسط سیستم لیدار از ساختمان‌ها مربوط به نقاط سقف ساختمانی هستند، به همین دلیل تنها نقاطی که قصد داریم استخراج کنیم نقاط سقف ساختمان‌ها هستند. برای جلوگیری از تاثیر نقاط اشتباه^۵ حداقل تعداد نقاط نزدیک به نقطه کمینه به عنوان شرط در نظر گرفته می‌شود. در صورت عدم برقراری شرط مورد نظر فرایند برای تعیین نقطه کمینه بعدی تکرار می‌شود. نکته‌ی دیگر این‌که روش ۳۵ برای حذف نقاط اشتباه در اینجا کارآمد نیست، چون داده‌ها بسیار متنوع و پراکندگی آن‌ها زیاد است.

یکی از خصوصیات مهم سیستم‌های لیزری قابلیت نفوذ آن‌ها در پوشش گیاهی است. پرتوهای لیزر در برخورد با پوشش گیاهی از آن‌ها عبور کرده و به زمین برهنه و یا اشیاء موجود در زیر پوشش گیاهی می‌رسند.

گسترش سطح [۱۰] و همچنین روش گسترش ناحیه بر مبنای معیارهایی نظیر پارامترهای سطح مانند شیب در جهت x و y [۱۱]، معیارهای توزیع احتمال دوبعدی عمق و توزیع احتمال سه‌بعدی نرمال نقاط [۱۲] و بردار نرمال [۱۳، ۱۴، ۱۵] نیز برای قطعه‌بندی بکارگرفته شده‌اند. [۱۶] از آنالیز مقادیر ویژه که با استفاده از PCA^۱ بدست می‌آیند، برای طبقه‌بندی نقاط بهره برده است. فرایند تفکیک و تلفیق بر اساس گستره ساختار داده‌ای سه‌گانه در فضای سه‌بعدی بر اساس شرط هم‌صفحه بودن مجموعه نقاط، برای پیدا کردن نقاط هم‌صفحه بکار برده شده است [۱۷]. [۱۸] از اطلاعات پالس اولیه^۲ و ثانویه^۳ و مقادیر RMSE هر نقطه مطابق با صفحه برازشی در همسایگی مشخص برای استخراج ساختمان‌ها استفاده کرده است.

۲- روش پیشنهادی

روند کلی کار برای استخراج و قطعه‌بندی ساختمان در شکل (۱) نمایش داده شده است.



شکل ۱- چارچوب بکار رفته در استخراج و قطعه‌بندی ساختمان‌ها

۲-۱- استخراج نقاط کاندیدای زمینی و گیاهی

^۱ Principal Component Analyze

^۲ First pulse

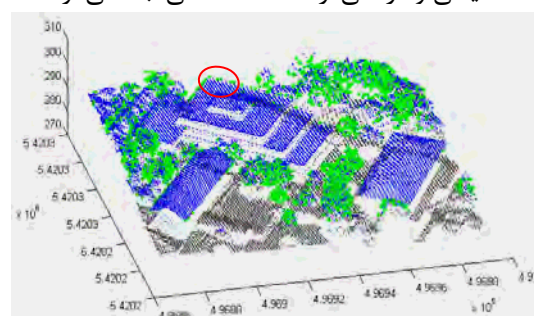
^۳ Last pulse

^۴ Local minimum points

^۵ Blunder points

در واقع در این موارد دو پالس وجود دارد: یکی پالس اولیه و دیگری پالس ثانویه. این مورد، گاها در مورد لبه‌های اشیا نظیر ساختمان نیز اتفاق می‌افتد (نظیر نقاط سبز رنگ در داخل دایره در شکل ۲)، اما تعداد آن اندک است. از این خاصیت می‌توان برای استخراج برخی نقاط گیاهی استفاده کرد (شکل ۲).

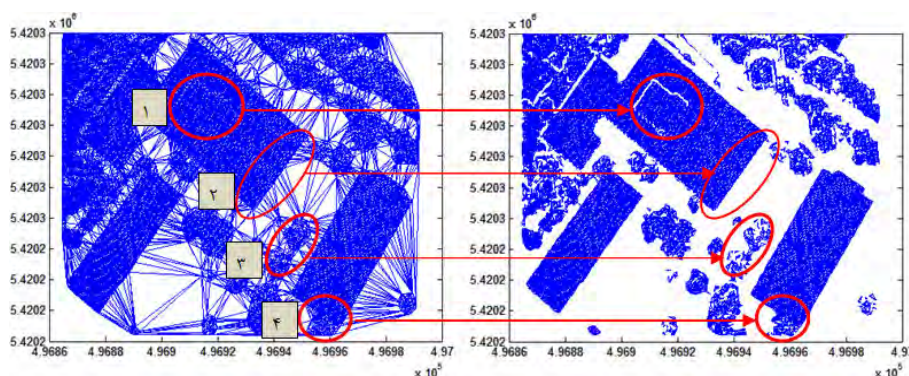
شایان ذکر است که همه پوشش گیاهی را نمی‌توان با این روش استخراج کرد، تراکم بالای پوشش گیاهی مانع از رسیدن تمام پالس‌های لیزری به زمین برهنه و یا اشیا موجود در زیر پوشش گیاهی می‌شود. در مراحل بعدی باقی نقاط گیاهی و درختی از نقاط ساختمانی جدا می‌گردند.



شکل ۲- استخراج نقاط کاندیدای گیاهی (سبز رنگ) و کاندیدای زمینی (خاکستری رنگ)

۲-۲- مثلث‌بندی دلونی قیددار

پس از شناسایی نقاط کاندیدای گیاهی و زمینی این نقاط از بین داده‌های اولیه حذف می‌گردند. برای ایجاد ارتباط همسایگی بین نقاط از مثلث‌بندی دلونی^۱ استفاده می‌شود. اما بر روی مثلث‌های ایجاد شده قیدی برای حذف یکسری از مثلث‌هایی که ارتباط دهنده بین لبه‌های اشیا



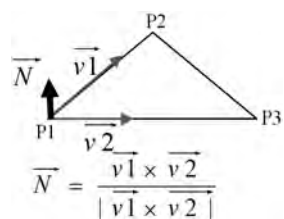
شکل ۳- اعمال قید طولی بر روی مثلث‌بندی دلونی

اتصال دهنده دو سطح ارتفاعی از ساختمان چند لایه‌ای موجود (رجوع به شکل ۴) حذف گردیده است. حذف این مثلث‌ها بسیار مهم است، از یک سو باعث سهولت فرایند

همان طور که در شکل ۳ نشان داده شده است، مثلث‌های بزرگ حذف شده‌اند. در منطقه‌ی یک مثلث‌های

^۱ Delaunay triangulation

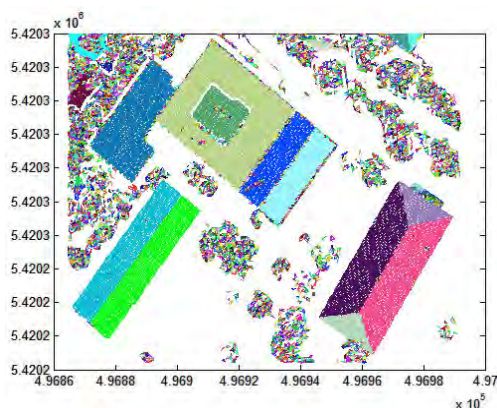
بردار نرمال واحد هر مثلث ($\vec{N}$) با استفاده از ضرب خارجی دو بردار v_1 و v_2 مطابق معادله ۲ محاسبه می-شود:

$$\vec{N} = \frac{\vec{v}_1 \times \vec{v}_2}{|\vec{v}_1 \times \vec{v}_2|} \quad (2)$$


ابتدا برای هر مثلث سه همسایگی با توجه به سه ضلع آن تعریف می-شود. سپس روش گسترش ناحیه با مثلثی که به صورت تصادفی انتخاب شده است شروع بکار می-کند. سه مثلث همسایه مربوط به این مثلث در نظر گرفته می-شود، و زاویه بین بردار نرمال این مثلثها ($\vec{N}_{ct}$) با مثلث مورد نظر ($\vec{N}_{st}$)، از ضرب داخلی این دو بردار مطابق معادله ۳ محاسبه می شود:

$$\theta = \cos^{-1}(\vec{N}_{st} \cdot \vec{N}_{ct}) \quad (3)$$

اگر این زاویه کمتر از حدآستانه‌ای از پیش تعیین شده باشد، به قطعه مربوط به مثلث فعلی اضافه می-گردد و همسایگان این مثلثها نیز مورد ارزیابی قرار می-گیرند. این مراحل ادامه پیدا می-کند تا تمام مثلثهای همسایگی که در شرایط مورد نظر صدق می-کنند در قطعه یکسانی قرار داده شوند. سپس مراحل فوق با انتخاب مثلثهای تصادفی دیگری از بین مثلثهای باقیمانده ادامه پیدا می-کند تا جایی که تمامی مثلثها قطعه‌بندی شوند (شکل ۵). معمولاً برای رسیدن به قطعات مجزا، حدآستانه‌ای بین ۱۵-۱۸ درجه مناسب است.

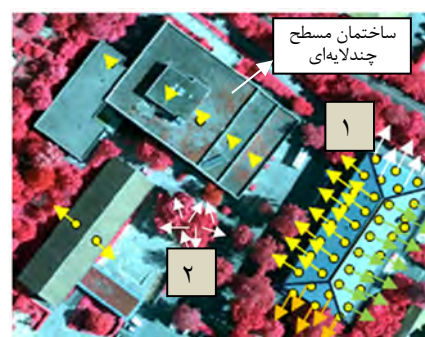


شکل ۵- نتایج قطعه‌بندی

قطعه‌بندی در مراحل بعدی و تفکیک صحیح سطوح موازی اما با اختلاف ارتفاعات متفاوت می‌شود و از سوی دیگر ارتباط همسایگی بین سطوحهای مختلف ارتفاعی را از بین می‌برد و از استخراج سطوح ناخواسته بین دو سطح ارتفاعی جلوگیری می‌کند. در منطقه‌ی دو مثلثهای ارتباط دهنده‌ی بین لبه ساختمان و زمین و درختان مجاور حذف گردیده است. در منطقه‌ی سه به دلیل اختلاف ارتفاعی بین نقاط درختی مثلثهایی زیادی حذف گردیده‌اند. این مورد باعث کاهش زمان مورد نیاز در فرایند قطعه‌بندی در مراحل بعدی و تولید قطعات کوچکتر می‌شود که به شناسایی نواحی درختی کمک می‌کند. در این خصوص در مراحل بعدی بیشتر توضیح داده می‌شود. در منطقه‌ی چهار درختان بلند قامت که تا سقف ساختمان بالا آمده‌اند مانع از ایجاد اختلاف ارتفاعی زیاد و در نتیجه عدم حذف مثلثهای همسایگی شده‌اند. در مراحل بعدی با در نظر گرفتن معیار بردار نرمال، همزمان با قطعه‌بندی ساختمانها این نقاط درختی از داده‌های ساختمانی جدا می‌گردند.

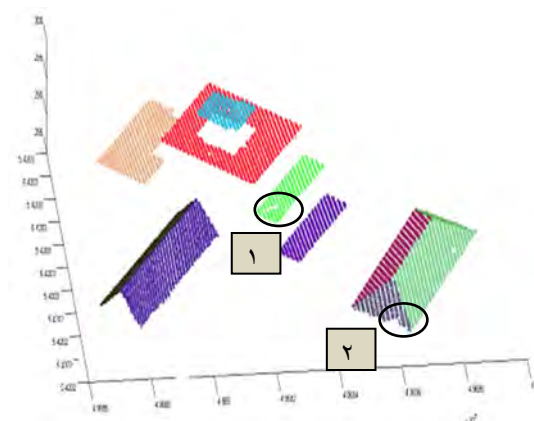
۳-۲- قطعه‌بندی

در اینجا هدف از مرحله‌ی قطعه‌بندی برچسب گذاری نقاط متعلق به صفحات یکسان، استخراج و حذف نقاط باقیمانده‌ی غیر ساختمانی مخصوصاً نقاط درختی و شناسایی نقاط ساختمانی است. در این مرحله از روش گسترش ناحیه با معیار توجیه بردار نرمال برای شناسایی صفحات مختلف استفاده شده است، زیرا مثلثهای قرار گرفته بر روی سطوح یکسان بردار نرمال مشابه‌ای دارند (شکل ۴).



شکل ۴ - نمایش بردار نرمال

پس از اعمال روش ذکرشده، قطعات زیادی بوجود می‌آیند. قطعات بزرگ‌تر مربوط به ساختمان‌ها هستند زیرا ساختمان‌ها معمولا از ترکیب صفحات ساده‌ای بوجود می‌آیند و بردار نرمال مثلث‌های تشکیل دهنده‌ی صفحات آن‌ها در یک جهت قرار می‌گیرند (شکل ۴ منطقه ۱). اما نواحی مربوط به درختان و پوشش گیاهی و اشیاء مصنوعی دیگر باعث ایجاد نواحی کوچک می‌شوند (شکل ۴ منطقه ۲)، چون تغییرات بردار نرمال این عوارض به دلیل ماهیت شکل آن‌ها زیاد خواهد بود. از این رو با توجه به ابعاد قطعات ایجاد شده حدآستانه‌ای تعریف و قطعات کوچک حذف می‌گردند. به جای محاسبه‌ی مستقیم مساحت قطعات بر اساس مساحت مثلث‌ها، می‌توان از تعداد مثلث‌ها برای اعمال حدآستانه بهره برد. این کار باعث صرفه جویی در زمان محاسبات می‌شود.



شکل ۶- استخراج و قطعه‌بندی ساختمان‌ها

بدین‌صورت همزمان با حذف نقاط غیرساختمانی، نقاط ساختمانی شناسایی و قطعه‌بندی می‌شوند (شکل ۶). این کار با حذف عوارض خارجی موجود بر سقف ساختمان نظیر منطقه ۱ در شکل ۶ و حذف درختان بلندی که تا سقف ساختمان بالا آمده‌اند و حتی بر روی سقف قرار گرفته‌اند نظیر منطقه ۲ در شکل ۶، همراه است. همچنین نویزهای موجود در داده‌ها در طی مرحله‌ی قطعه‌بندی حذف گردیده‌اند، زیرا نویزها تشکیل مثلث‌هایی می‌دهند که طول آن‌ها بزرگ است و قطعات کوچکی تولید می‌کنند و با اعمال حدآستانه‌هایی در طی مراحل مختلف قطعه‌بندی (بر اساس معادله ۱، بردار نرمال و مساحت) حذف می‌شوند. در مورد عوارض خارجی روی سقف نیز چنین حالتی بوجود می‌آید. با حذف نویزها و عوارض خارجی، داده‌های ساختمانی استخراج شده،

مناسب برای پردازش‌های بعدی نظیر برازش صفحه برای تولید مدل سه‌بعدی سقف هستند.

۲-۴- شناسایی قطعات متعلق به ساختمان‌های واحد

در مرحله‌ی قبل قطعات ساختمانی شناسایی شدند، اما تشخیص تعلق هر قطعه به ساختمان مربوط به خودش گام ضروری برای پردازش‌های بعدی است. رابطه‌ی همسایگی قطعات با یکدیگر در این زمینه به ما کمک می‌کند. در این راستا از روشی ابتکاری که "گسترش شبکه" نامگذاری شده استفاده شده است.

گسترش شبکه: این فرایند به دلیل استفاده از عملگر مورفولوژی گسترش^۱ بر روی شبکه^۲ منظمی که از نقاط نامنظم قطعه‌بندی شده ایجاد می‌شود، گسترش شبکه نامگذاری شده است. عملگر مورفولوژی گسترش^۱ با عضو ساختاری^۳ B به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\delta(J) = J \oplus B$$

سمبل $\oplus$ برای عملگر گسترش استفاده می‌شود. از نظر محاسباتی اعضای ساختاری با یک ماتریس از صفر و یک‌ها ارائه می‌شوند. ابتدا هر قطعه به صورت مجزا در فضای سه‌بعدی در نظر گرفته می‌شوند و به صورت فرضی شبکه‌ای به ابعاد ۰.۵ متر بر روی هر یک از قطعات ایجاد می‌گردد. برای تمام نقاط این شبکه، با درونیایی به روش نزدیک‌ترین فاصله، مختصات ارتفاعی محاسبه می‌گردد. بدین صورت قطعات از فضای برداری به رستری می‌روند و می‌توان از تکنیک‌های پردازش تصویری بهره برد. سپس گپ‌ها پر و از عملگر مورفولوژی گسترش استفاده می‌شود با انجام اینکار شبکه به سمت بیرون کشیده شده یا در واقع گسترش می‌یابد. درگام بعدی نقاط لبه‌ی شبکه‌ی گسترش یافته استخراج می‌شوند (نقاط سبز رنگ در شکل ۷). نقاطی از قطعات دیگر ساختمان که در محدوده‌ی داخلی این لبه‌ها قرار گیرند (نظیر نقاط قرمز رنگ در شکل ۷)، به عنوان قطعه‌ی همسایگی شناخته می‌شود. تمامی قطعات همسایگی با یکدیگر متحد می‌شوند تا یک

^۱ Dilation

^۲ Grid

^۳ Structuring element

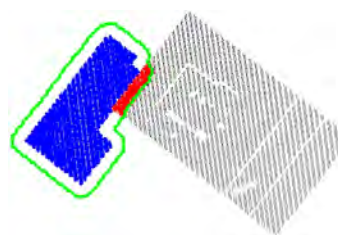
(رجوع به جدول ۱)، به عنوان نقاط کاندیدای زمینی شناخته می‌شوند. هرچقدر ارتفاع ساختمان‌ها بزرگتر باشد این مقدار ارتفاعی ثابت می‌تواند بزرگتر انتخاب شود. البته نیازی به دانش اولیه در مورد ارتفاع ساختمان‌ها نیست و این مقدار ارتفاعی می‌تواند به صورت پیش‌فرض بین ۳-۴ متر انتخاب شود چون قصد داریم فقط برخی از نقاط غیر ساختمانی را حذف کنیم. باقی نقاط در مراحل بعدی استخراج می‌شوند. برای حذف نقاط کاندیدای گیاهی نیز از معیار تعداد پالس‌های برگشتی استفاده می‌شود. سپس مثلث‌بندی دلونی بر روی نقاط انجام می‌شود و مطابق آنچه در بخش قبل در ارائه روش پیشنهادی توضیح داده شد، نقاط ساختمانی قطعه‌بندی می‌شوند. پارامترهای تنظیمی در این منطقه در دو دسته در جدول (۱) نمایش داده شده است.

جدول ۱- پارامترهای تنظیمی منطقه مطالعاتی اول

پارامتر گروه	n^m	e^m	t	$d\theta^d$	nt
۱	۲۵	۶	۰,۳	۳۰	۵۰
۲	۲۵	۶	۰,۳	۱۵	۳۰

n ابعاد شبکه برای تعیین کمینه‌های محلی برحسب متر است. این مقدار نباید بیش از اندازه کوچک شود زیرا منجر به حذف نقاط ساختمانی می‌شود. e آنچنان که ذکر شد مقدار ثابتی بر حسب متر است که به کمینه محلی اضافه می‌گردد. t ضریب واریانس در معادله ۱ است. $d\theta$ حد آستانه‌ی زاویه مجاز میان بردار نرمال مثلث‌ها در روش گسترش ناحیه بر حسب درجه است. تعیین این پارامتر برای شناسایی مثلث‌های مربوط به قطعات یکسان، تاثیر بسزایی در نتایج حاصله می‌گذارد. هرقدر این پارامتر کوچک‌تر انتخاب شود، قطعات موجود بیشتر از یکدیگر تفکیک می‌شوند. به طور مثال با اعمال حدآستانه‌ی ۱۵ درجه در گروه ۲ پنجره‌های قرار گرفته روی سقف ساختمان نیز به‌صورت مجزا از قطعه اصلی سقف تفکیک شده‌اند (شکل ۹ گروه ۲)، اما با حدآستانه‌ی ۳۰ درجه این قطعات به همراه قطعات سقفی اصلی در یک قطعه جای می‌گیرند.

ساختمان واحد شکل بگیرد. بدین‌صورت بدون نیاز به نقشه دوبعدی و به صورت خودکار تمامی قطعات متعلق به ساختمان‌های واحد شناسایی می‌شوند.



شکل ۷- اعمال روش گسترش شبکه در شناسایی قطعات همسایگی

۳- پیاده سازی

کمیته‌ی علمی ISPRS در سال ۲۰۱۲ میلادی، سه منطقه مختلف با ویژگی‌های متفاوت از شهر فاهینجن آلمان را برای اجرای روش‌های پیشنهادی محققین در زمینه‌ی طبقه‌بندی اشیاء شهری و بازسازی ساختمان‌ها انتخاب کرده است. در این تحقیق علاوه بر منطقه‌ی قبلی، این مناطق نیز برای ارزیابی جامع‌تر روش پیشنهادی استفاده شده‌اند. داده‌های ورودی ابرنقاط مناطق مربوطه با چگالی متوسط ۴ نقطه در واحد متر هستند. تعداد پالس‌های برگشتی نقاط نیز در دسترس هستند.

۳-۱- منطقه مطالعاتی اول

این ناحیه، یک منطقه‌ی مسکونی با ساختمان‌های منفصل، حاوی پوشش گیاهی کم ارتفاع و درختان بلند قامت، راه و جاده و عوارض مصنوع دیگر است (شکل ۸).



شکل ۸- تصویر هوایی منطقه مطالعاتی اول

همان‌طور که ذکر شد برای جلوگیری از اثرات شیب در تعیین نقطه کمینه، منطقه شبکه‌بندی می‌شود. سپس نقاط با ارتفاع کمتر از نقطه کمینه به‌علاوه مقدار ثابت e

در این صورت پنجره‌های قرار گرفته بر روی سقف ساختمان چون ابعاد کوچکی دارند حذف می‌شوند و فقط قطعات اصلی باقی می‌مانند. مثال دیگر همان‌طور که گفته شد قابلیت الحاق و یا تفکیک پنجره‌های قرار گرفته بر روی سقف ساختمان از قطعات اصلی سقف ساختمان با تنظیم $d\theta$ است.

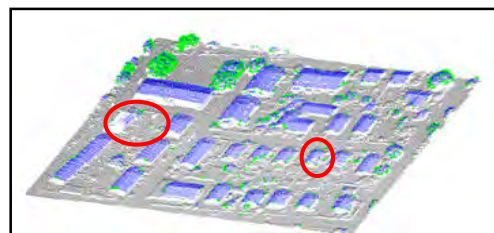
نتایج حاصل از پیاده سازی روش مطرح شده با دو گروه پارامتر متفاوت مطابق با جدول ۱ در شکل ۹ آورده شده است. تصویر اولیه مربوط به استخراج نقاط کاندیدای زمینی (خاکستری رنگ) و کاندیدای گیاهی (سبز رنگ) است، دوایر قرمز رنگ نشان دهنده‌ی مناطقی هستند که داده‌های سه‌بعدی اولیه موجود نبوده است، این یک نوع نقص در داده‌های لیدار می‌باشد. در این موارد قطعه‌بندی صحیح قطعات امکان‌پذیر نیست. این نقص از طریق ترکیب لیدار با منابعی دیگری مانند تصاویر هوایی قابل جبران است. در گروه اول تصاویر الف و ب نتایج استخراج و قطعه‌بندی هستند که به ترتیب در فضای سه‌بعدی و دوبعدی نمایش داده شده‌اند. در گروه دوم نیز مطابق با پارامترهای تنظیمی جدول (۱) در گروه دوم، نتایج قطعه‌بندی در فضای سه‌بعدی و دوبعدی به ترتیب در تصاویر الف و ب ارائه شده است.

۲-۳- منطقه مطالعاتی دوم

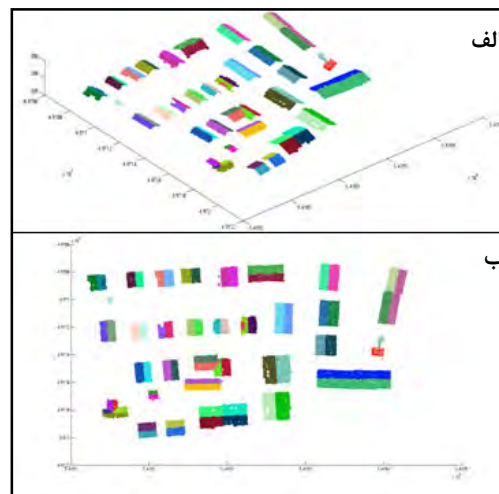
این ناحیه، دارای ساختمان‌هایی مسطح چندلایه‌ای و شیبدار است، که با درختان بلند قامت انبوه پوشیده شده‌اند (شکل ۱۰). نتایج حاصل از روش پیشنهادی مطابق با پارامترهای تنظیمی جدول ۲ در شکل ۱۱ نشان داده شده است. تصویر الف مربوط به استخراج نقاط کاندیدای زمینی (خاکستری رنگ) و گیاهی (سبز رنگ) است. تصویر ب نتایج قطعه‌بندی را نشان می‌دهد.



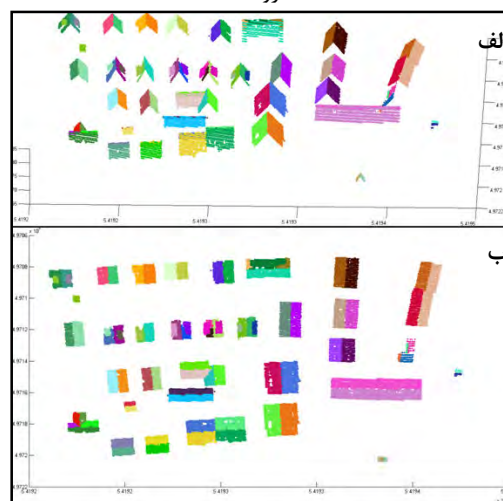
شکل ۱۰- تصویر هوایی منطقه مطالعاتی دوم



گروه ۱



گروه ۲



شکل ۹- استخراج و قطعه‌بندی ساختمان‌ها در منطقه مطالعاتی اول

معمولا برای رسیدن به قطعات مجزا حدآستانه بین ۱۵-۱۸ درجه مناسب است. nt تعداد حداقل مثلث‌ها برای حذف قطعات کوچک است که بر اساس چگالی داده‌ها تعیین می‌شود. نکته مهم اینکه تنظیمی بودن پارامترها، برای دادن قدرت انتخاب به کاربر در کاربردها و خواسته‌های گوناگون است. به طور مثال اگر هدف استخراج قطعات اصلی سقف ساختمان است، تعداد حداقل مثلث‌ها برای حذف قطعات کوچک می‌تواند بزرگتر انتخاب شود.

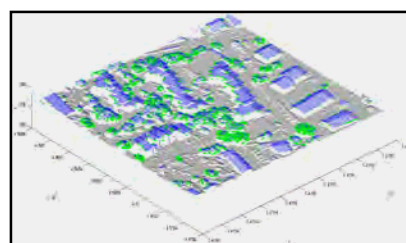
بین دو سطح ارتفاعی مختلف حاصل می‌شود که حتی با اعمال قید مساحت قابل حذف نیستند. اعمال همسایگی از طریق مثلث‌بندی نیز نقش مهمی ایفا می‌کند. می‌توان گفت اگر همسایگی از طریق دیگری مثلاً به صورت شعاعی حول هر نقطه انجام می‌گرفت، نتایج صحیح در مورد ساختمان‌هایی با سطوح موازی حاصل نمی‌شد. زیرا اعمال همسایگی به صورت شعاعی حول هر نقطه، باعث می‌شود نقاط مربوط به لایه‌های ارتفاعی مختلف با یکدیگر مقایسه شوند و چون بردار نرمال یکسان دارند در یک گروه، قطعه‌بندی شوند. نکته مهم دیگر این است که برخلاف الگوریتم‌های k -means و Fuzzy C-means که برخی نقاط یک قطعه در قطعه دیگر طبقه‌بندی می‌شوند، این مشکل در اینجا وجود ندارد، به عبارتی خطای $Over$ -Segmentation و $Under$ -Segmentation در اینجا وجود ندارد. این خطاها زمانی بوجود می‌آید که برای خودکارسازی الگوریتم از یک تعداد خوشه انتخابی بیشینه استفاده می‌شود، سپس برای حل آن از فرایند تکراری تفکیک و تلفیق استفاده می‌کنند. در اینجا اصولاً این مشکل وجود ندارد تا درصدد حل آن باشیم. همچنین استفاده از بردار ویژگی بردار نرمال در این الگوریتم‌ها منجر به قرار گرفتن سطوح موازی در یک خوشه می‌شود که معمولاً برای حل آن از راه حل ثانوی بر اساس ارتفاع خوشه‌ها استفاده می‌شود [۲]، اما این راه حل نیز در صورتی که سطوح ارتفاعی یکسان اما مجزا از یکدیگر داشته باشیم با شکست روبرو می‌شود. نکته مهم دیگر معمولاً این روش‌ها معمولاً بر روی یک ساختمان اجرا می‌شود چون تعیین تعداد خوشه‌ها در یک منطقه بزرگ مشکل‌ساز می‌شود، اما روش پیشنهادی قادر است همزمان چندین ساختمان را قطعه‌بندی کند.

۳-۳- منطقه مطالعاتی سوم

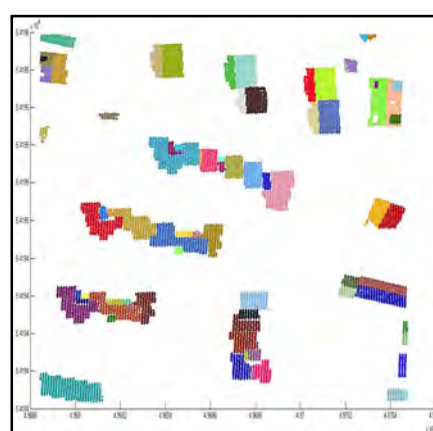
این ناحیه، منطقه‌ای ناهموار، پوشیده از خانه‌های متراکم بهم چسبیده با سقف‌های پیچیده و تراکم پوشش گیاهی نسبتاً کم است (شکل ۱۲). عوارض مصنوعی نظیر ماشین‌ها و راه و خیابان نیز موجود است. پارامترهای تنظیمی در جدول ۳ آمده است. نتایج حاصله در شکل ۱۳ ارائه شده است. تصویر الف مربوط به استخراج نقاط کاندیدای زمینی (خاکستری رنگ) و گیاهی (سبز رنگ) است. تصویر ب نتایج قطعه‌بندی را نشان می‌دهد. به دلیل وجود ناهمواری زیاد در منطقه و ساختمان‌های چسبیده بهم، در برخی مناطق نقاط زمینی باقی مانده‌اند. همچنین

جدول ۲- پارامترهای تنظیمی منطقه مطالعاتی دوم

پارامتر گروه	n^m	e^m	t	$d\theta^d$	nt
-	۲۵	۷	۰٫۳	۱۵	۳۰



(الف)



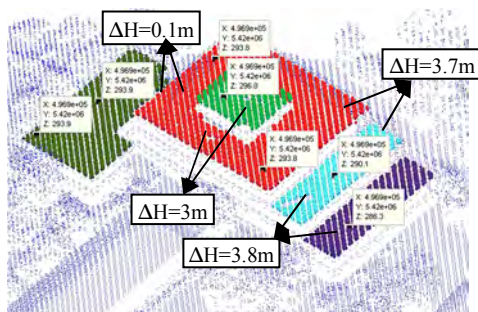
(ب)

شکل ۱۱- استخراج و قطعه‌بندی ساختمان‌ها در منطقه مطالعاتی دوم

همان طور که در شکل ۱۱ نشان داده شده است، روش پیشنهادی به خوبی توانسته است، لایه‌های ارتفاعی مختلف از ساختمان‌های چندلایه‌ای موجود را به طور صحیح شناسایی کند. اکثر روش‌های موجود در جداسازی صفحات موازی با مشکل روبرو هستند، بردار نرمال مشابه و توازی سطوح، قطعه‌بندی این نوع ساختمان‌ها را سخت می‌کند. اما روش پیشنهادی به خوبی توانسته است از عهده این کار برآید. به صراحت می‌توان عنوان کرد موفقیت روش مذکور در زمینه جداسازی صفحات موازی مدیون اعمال قید طولی با استفاده از معادله ۱ و همچنین اعمال همسایگی از طریق مثلث‌بندی است. اعمال قید طولی موجب حذف ارتباط همسایگی بین دو سطح موازی می‌شود که به تفکیک آنها بسیار کمک می‌کند. همان‌طور که قبلاً ذکر شد، با اعمال معادله ۱ مثلث‌های بین دو سطح ارتفاعی مختلف از بین می‌روند. در صورت عدم حذف این مثلث‌ها قطعات ناخواسته‌ای

۴- ارزیابی نتایج

در روش پیشنهادی قطعه‌بندی همزمان با استخراج نقاط ساختمانی صورت می‌گیرد؛ بنابراین در صورت کامل بودن داده‌ها به منابع کمکی نظیر نقشه‌های دوبعدی برای استخراج ابر نقاط ساختمانی احتیاج نیست که یکی از مزایای روش مذکور است. در استفاده از نقشه دوبعدی که در بسیاری از تحقیقات برای جدا کردن ابر نقاط هر ساختمان استفاده می‌شود، مشکلاتی از قبیل در دسترس نبودن، عدم تطابق زمانی، تفاوت مرز حاصل از نقشه دوبعدی و لبه سقف ساختمان و مشکلات هم مرجع سازی وجود دارد. در مورد ساختمان‌های مسطح چندلایه‌ای با وجود موازی بودن صفحات، تمامی قطعات از یکدیگر تفکیک شده‌اند. حتی قطعات با اختلاف ارتفاع متوسط ۱۰ سانتی‌متری نظیر شکل ۱۴ از یکدیگر تفکیک شده‌اند. روش پیشنهادی قادر است ساختمان‌های با سقف شیبدار و مسطح را همزمان قطعه‌بندی کند بدون اینکه خطاهای Over-Segmentation و Under-Segmentation وجود داشته باشد. همچنین دانش اولیه در مورد نوع سقف ساختمان و تعداد قطعه‌ها یا خوشه‌ها لازم نیست.



شکل ۱۴- تفکیک لایه‌های ارتفاعی

برای ارزیابی کمی در زمینه تفکیک نقاط ساختمانی و غیر ساختمانی، مجموعه از نقاط کنترل از بین نقاط لیدار به صورت دستی با ارزیابی بصری تصویر هوایی و مجموعه نقاط اولیه لیدار، در دو گروه نقاط کنترل ساختمانی و غیر ساختمانی در نظر گرفته شده‌اند. از آنجا که هدف استخراج و قطعه‌بندی نقاط سقف ساختمانی بوده‌است، همچنان که اغلب نقاط اندازه‌گیری شده توسط سیستم لیدار نقاط سقفی هستند، نقاط کنترل ساختمانی تعیین شده از سقف ساختمان‌ها برگزیده شده است. در

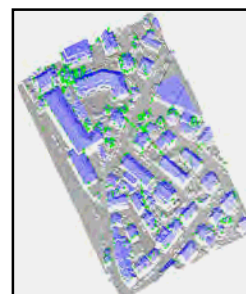
به دلیل پیچیدگی بسیار زیاد سقف‌ها و لبه‌های ناهمگون آن‌ها، مخصوصاً در ساختمان‌های کوچک برخی از نقاط لبه از دست رفته‌اند و در قطعه غیرساختمانی قرار داده شده‌اند. در این گونه مناطق استفاده از داده‌های تصویری برای رسیدن به نتایج بهتر پیشنهاد می‌شود. اگر ابر نقاط نیز با تراکم بالاتر در دست باشند، نتایج بهبود می‌یابند.



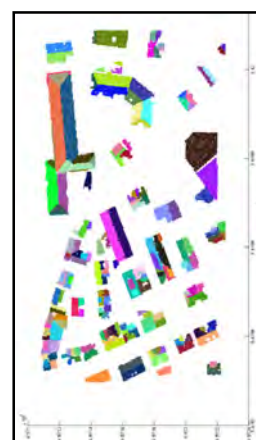
شکل ۱۲- تصویر هوایی منطقه مطالعاتی سوم

جدول ۳- پارامترهای تنظیمی منطقه مطالعاتی سوم

پارامتر گروه	n^m	e^m	t	$d\theta^d$	nt
-	۲۰	۶	۰,۳	۱۵	۳۰



(الف)



(ب)

شکل ۱۳- استخراج و قطعه‌بندی ساختمان‌ها در منطقه مطالعاتی سوم

منطقه‌ی اولیه که در ارائه روش پیشنهادی ذکر گردید، ماتریس خطا به صورت جدول در زیر آورده شده است.

جدول ۴- ماتریس خطا در فرایند طبقه‌بندی نقاط ساختمانی و غیر ساختمانی

کلاس‌ها	ساختمانی	غیر ساختمانی	مجموع
ساختمانی	۶۴۷	۳۱	۶۷۸
غیر ساختمانی	۰	۱۵۳۱	۱۵۳۱
مجموع	۶۴۷	۱۵۶۲	۲۲۰۹

تعداد کل نقاط لیدار اولیه ۵۵۶۶۵ می‌باشد، که از این تعداد ۱۵۴۵۶ نقطه در کلاس ساختمانی و ۴۰۲۰۹ نقطه در کلاس نقاط غیر ساختمانی طبقه‌بندی شده‌اند. به طور مثال سطر دوم جدول نشان می‌دهد که از ۶۷۸ نقطه کنترل ساختمانی تعیین شده، ۶۴۷ نقطه به‌طور صحیح در کلاس ساختمانی و ۳۱ نقطه به صورت اشتباه در کلاس غیر ساختمانی طبقه‌بندی شده‌اند. با توجه به جدول، دقت کلی که نسبت نقاط صحیح طبقه‌بندی شده به جمع کل نقاط معلوم را نشان می‌دهد، ۹۸٪ می‌باشد. دقت کاربر نیز، که بیانگر احتمال طبقه‌بندی یک کلاس خاص مطابق با همان کلاس در واقعیت زمینی می‌باشد در مورد کلاس ساختمانی ۹۵٪ و کلاس غیر ساختمانی ۱۰۰٪ محاسبه شده است. خطای Omission با استفاده از معادله ۴ محاسبه می‌شود:

$$C_e = 1 - P.A \quad (4)$$

در این رابطه P.A. دقت کاربر است. مقدار محاسبه شده این خطا ۵٪ و ۰ به ترتیب در مورد کلاس ساختمانی و غیر ساختمانی است. این خطا نشان می‌دهد که ۵٪ از نقاط ساختمانی به اشتباه در کلاس غیر ساختمانی طبقه‌بندی شده‌اند. غالب این خطا مربوط به لبه‌های ساختمان مسطح چندلایه‌ای موجود است، زیرا که در لبه‌های خارجی ساختمان و همچنین لبه‌های طبقات مختلف دیواره‌های بسیار نازکی وجود دارند که در فرایند طبقه‌بندی همانند یک نویز عمل می‌کنند و از بین نقاط ساختمانی جدا می‌گردند. در مورد طبقه‌بندی نقاط غیر ساختمانی، انتظار می‌رفت که برخی از نقاط مربوط به درختان خیلی بلند که روی سقف ساختمان قرار گرفته‌اند و ارتفاعی دقیقاً برابر با ساختمان داشته و البته در مرز بین

نقاط ساختمانی و درختی قرار گرفته باشند، به اشتباه در کلاس نقاط ساختمانی طبقه‌بندی شوند. اما از خطای محاسبه شده‌ی برابر با صفر، نتیجه می‌شود که حداقل در مورد نقاط کنترل تعیین شده این اتفاق روی نداده است، مطابق با توضیحات بالا ماتریس خطا و دقت‌های مربوطه در مورد مناطق سه‌گانه مطالعاتی نیز محاسبه و در جدول ۵ آورده شده است. در انتخاب نقاط کنترل مناطق حساس نظیر لبه‌های ساختمان که احتمال بروز خطا بیشتر است به صورت ویژه مدنظر قرار گرفته‌اند. لبه‌ها مرز تغییرات ارتفاعات ارتفاعی و بردار نرمال هستند از این رو احتمال خطا در آن‌ها بیشتر است. با توجه به دقت متوسط ۹۳٪ می‌توان عنوان کرد روش پیشنهادی به خوبی توانسته است ابرنقاط سقف ساختمانی را استخراج کند. در ساختمان‌های با سقف مسطح، خطای ایجاد شده در مورد کلاس ساختمانی که اکثراً مربوط به دیواره‌های نازک ساختمان است موجب بهبود دقت ارتفاعی می‌شود؛ زیرا دقت صفحه برازش داده شده را در مدلسازی سقف بالا می‌برد. اما دقت مسطحاتی در تقریب لبه‌ها را از بین می‌برد، زیرا اکثر خطاها مربوط به لبه‌ها هستند. در ساختمان‌های شیبدار بیشتر خطاها مربوط به ساختمان‌هایی با پنجره‌های سقفی پیچیده نظیر منطقه مطالعاتی سوم است. در این موارد استفاده از داده‌های کمکی نظیر تصاویر هوایی به کاهش مشکلات کمک می‌کند.

۵- نتیجه‌گیری

نتایج این تحقیق نشان داد که داده‌های لیدار به تنهایی قابلیت استخراج ساختمان را دارند؛ هرچند محدودیت‌ها و مشکلاتی در این زمینه وجود دارد. یک گروه از این محدودیت‌ها ناشی از خود سیستم لیدار است و یک گروه دیگر منشا در روش بکار گرفته شده دارد. نقص در داده‌ها و دقت پایین در لبه‌ها از جمله مشکلاتی هستند که در سیستم لیدار وجود دارند. همچنین طبقه‌بندی برخی از نقاط لبه ساختمان در قطعه غیر ساختمانی از جمله مشکلات روش پیشنهادی است. برای حل این مشکلات می‌توان از ترکیب لیدار با تصاویر هوایی استفاده کرد. در این تحقیق با اعمال الگوریتم بر روی داده‌های نامنظم لیدار خطای حاصل از درونیایی حذف گردیده است. عدم نیاز به منابع کمکی نظیر تصاویر هوایی و نقشه

کاداستر در پردازش ابرنقاط، که ممکن است در دسترس یا بهنگام نباشند از جمله مزایای روش پیشنهادی است. استخراج و قطعه‌بندی ساختمان‌ها با حذف عوارض خارجی موجود بر روی سقف ساختمان و نویزها همراه بوده است. مزیت ویژه روش پیشنهادی در مورد ساختمان‌های مسطح با چندلایه ارتفاعی موازی است که اکثر روش‌های مطرح شده در قطعه‌بندی اینگونه ساختمان‌ها با مشکل روبرو می‌شوند. اما روش پیشنهادی به خوبی توانسته‌است لایه‌های مختلف ارتفاعی ساختمان را استخراج و قطعه‌بندی کند. ارائه روش ابتکاری "گسترش شبکه" در شناسایی خودکار قطعات متعلق به ساختمان‌های واحد، نقشی مهم در روش پیشنهادی ایفا کرده است. همچنین حذف نقاط درختی روی سقف

ساختمان از دیگر مزایای روش پیشنهادی است. با حذف نویزها، عوارض خارجی و نقاط درختی موجود بر سقف ساختمان، داده‌های ساختمانی استخراج شده مناسب برای پردازش‌های بعدی نظیر برازش صفحه برای تولید مدل سه‌بعدی ساختمان هستند.

سپاسگزاری

داده‌های مورد مطالعه در این تحقیق با کسب اجازه و تشکر از انجمن فتوگرامتری، سنجش از دور و اطلاعات زمینی آلمان (DGPF) مورد استفاده قرار گرفته است.

جدول ۵- ارزیابی خطا در مناطق مطالعاتی سه‌گانه

منطقه	کلاس	ساختمانی	غیر ساختمانی	مجموع	دقت	خطا
گروه ۱	ساختمانی	۲۵۵۷	۱۸۹	۲۷۴۶	٪۹۳	٪۶٫۹
	غیر ساختمانی	۴	۳۰۰۶	۳۰۱۰	٪۹۹	٪۰٫۱
	مجموع	۲۵۶۱	۳۱۹۵	۵۷۵۶	٪۹۶	٪۳٫۳
گروه ۲	ساختمانی	۲۵۴۹	۱۹۷	۲۷۴۶	٪۹۲	٪۷٫۲
	غیر ساختمانی	۲۲	۲۹۸۸	۳۰۱۰	٪۹۹	٪۰٫۷
	مجموع	۲۵۷۱	۳۱۸۵	۵۷۵۶	٪۹۶	٪۳٫۸
۲	ساختمانی	۲۱۳۰	۳۳۵	۲۴۶۵	٪۸۶	٪۱۳٫۶
	غیر ساختمانی	۳	۳۱۰۳	۳۱۰۶	٪۹۹	٪۰٫۰۹
	مجموع	۲۱۳۳	۳۴۳۸	۵۵۷۱	٪۹۴	٪۶٫۱
۳	ساختمانی	۲۳۰۲	۵۹۵	۲۸۹۷	٪۷۹	٪۲۰٫۵
	غیر ساختمانی	۱۲۶	۲۸۱۴	۲۹۴۰	٪۹۶	٪۴٫۳
	مجموع	۲۴۲۸	۳۴۰۹	۵۸۳۷	٪۸۸	٪۱۲٫۳

مراجع

- [۱] ستاری، م. ۱۳۹۰، بازسازی سه بعدی ساختمان‌ها با استفاده از داده‌های لیدار بر مبنای یک روش ترکیبی با قدرت تفکیک چندگانه، پایان نامه دکتری، گروه مهندسی نقشه برداری دانشکده فنی دانشگاه تهران.
- [۲] کاوش، م.ط. ۱۳۸۷، بازسازی اتوماتیک ساختمان‌ها بر مبنای بکارگیری داده‌های لیدار، پایان نامه کارشناسی ارشد، گروه مهندسی نقشه برداری، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران.

- [3] Wang, z. and schenk, t. (2000). "Building extraction and reconstruction from lidar data". international archives of photogrammetry and remote sensing. vol. xxxiii, part b3, Amsterdam .
- [4] Zhou, Q.Y and Neumann, U. (2008). "fast and extensible building modeling from airborne lidar data". ACM GIS'08, November 5-7, 2008. Irvine, CA, USA.
- [5] Arefi, H., Engels, J., Hahn, M. and Mayer, H. (2008). "Levels of detail in 3d building reconstruction from lidar data". International archives of the photogrammetry, Remote sensing and spatial information sciences. vol. xxxvii, part b3b., pp. 485-190.
- [6] Kabolizade, M., Ebadi, H. and 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.
- [7] Samadzadegan, F. and Tabib mahmoudi, F. (2010). "A multi-agent strategy for automatic 3d object recognition based on the fusion of lidar range and intensity data". Gis Ostrava.
- [8] Wang, J. and Shan, J. (2009) "Segmentation of lidar point clouds for building extraction". ASPRS 2009 Annual Conference. Baltimore, Maryland, March 9-13.
- [۹] معبودی، م. ۱۳۸۴، استخراج عوارض از داده‌های لیدار، پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد، گروه مهندسی نقشه برداری دانشکده فنی دانشگاه تهران.
- [10] Oude Elberink, S. and Vosselman, G. (2009). "Building reconstruction by target based graph matching on incomplete laser data: analysis and limitations". Sensors , vol. 9, pp. 6101-6118.
- [11] Alharty, A. and Bethel, J.(2004) "Detailed building reconstruction from airborne laser data using a moving surface method". IAPRS international archive of photogrammetry and remote sensing, vol.34, part 3 b3, pp. 213-219.
- [12] Poullis, C. and You, S. (2009) "Automatic reconstruction of cities from remote sensor data". Computer Vision and Pattern Recognition, 20-25 jun, Miami. pp. 2775 – 2782.
- [13] Zhang, K., Yan, J. and Chen, S.H. (2009). "Automatic 3d building reconstruction from airborne lidar measurements". Urban Remote Sensing Event, 20-22 May, Shanghai, pp.1-5.
- [14] Wang, Lu, and CH, Chu. (2009). "3D building reconstruction from LiDAR data." In Systems, Man and Cybernetics, SMC 2009. IEEE International Conference on, pp.3054-3059.
- [15] Lari, Z., Habib, A., and Kwak, E. (2011). "An adaptive approach for segmentation of 3D laser point cloud. International Archives of the Photogrammetry". International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences.
- [16] H, Yuxiang., Zhang, C.H., Awrangjeb, M. and Clive, S.F." (2012). " Automated reconstruction of walls from airborne lidar data for complete 3d building modeling". International archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences, vol. xxxix-b3 , 25 august – 01 september, melbourne, Australia.
- [17] Wang, W, and Tseng, Y.H. "Automatic segmentation of lidar data into coplanar point clusters using anoctree-based split-and-merge algorithm". Photogrammetric Engineering & Remote Sensing. Vol. 76, No.4, April 2010, pp. 407-420.
- [18] Alharthy, A and Bethel, J. "Heuristic filtering and 3d feature extraction from lidar data". International Archives of Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences, vol. 34(3/A), pp. 29-34.
- [19] Mian, A.S., Bennamoun, M, and Owens, R. A.(2004). "Automatic Multiview Coarse Registration of Range Images for 3D Modeling". Proceedings of the 2004 IEEE Conference on Cybernetics and Intelligent Systems Singapore, 1-3 December, pp.158-163.