

ارائه روشی غیرپارامتریک در بازسازی مدل سه بعدی ساختمان‌ها با استفاده از ابر نقاط لیزراسکرنر هوایی

مریم سجادیان^{۱*}، حسین عارفی^۲

^۱ کارشناس ارشد فتوگرامتری - دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی - پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران
m.sajadian@ut.ac.ir

^۲ استادیار دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی - پردیس دانشکده‌های فنی - دانشگاه تهران
hossein.arefi@ut.ac.ir

(تاریخ دریافت بهمن ۱۳۹۳، تاریخ تصویب مهر ۱۳۹۴)

چکیده

در سال‌های اخیر شیوه‌های نمایش زمین تغییر کرده است و مدل‌های سه بعدی جایگزین نقشه‌های دوبعدی شده‌اند. لیزراسکرنر هوایی به عنوان سیستمی قدرتمند در سنجش‌ازدور لیزری، یک منبع با ارزش برای اکتساب اطلاعات مکانی است که از آن می‌توان برای مدلسازی سه بعدی استفاده کرد. بازسازی مدل سه بعدی ساختمان‌ها به عنوان یکی از مهم‌ترین عوارض موجود در سطح زمین موضوعی است که در این تحقیق به آن پرداخته شده است. برای این منظور یک روش جدید غیرپارامتریک برای تولید مدل سه بعدی ساختمان‌های با سقف مسطح و شیبدار ارائه شده است. در مرحله‌ی اول یک روش چندعامله برای استخراج و قطعه‌بندی سقف ساختمان‌ها به صورت همزمان از ابر نقاط لیزراسکرنر هوایی ارائه شده است. سپس، در استخراج نقاط لبه از فرایندی ابتکاری که "فرسایش شبکه" نامگذاری شده بهره گرفته‌ایم. برای تقریب خطوط لبه‌ها و مرزهای ساختمان روشی رنسک مینا پیشنهاد شده است. اما قبل از آن با ارائه روشی زاویه‌مبنا، نقاط لبه طبقه‌بندی می‌شوند تا خطوط با دقت و کیفیت بیشتری تقریب زده شوند. در نهایت با در دست داشتن خطوط سقف ساختمان و تقریب ارتفاع کف ساختمان مدل سه بعدی ساختمان تشکیل می‌شود. جهت ارزیابی دقت روش پیشنهادی از تفسیر بصری و مقایسه کمی مدل بازسازی شده با اطلاعات استخراج شده توسط اپراتور انسانی استفاده شده است. در این ارزیابی که بر روی داده‌های مربوط به شهر فایهینگن آلمان انجام شده است، خطای مسطحاتی غالب در بازسازی مدل سه بعدی ساختمان تقریباً ۳۰ سانتی‌متر است که به صورت طولی محاسبه شده است. مزیت ویژه روش پیشنهادی، در ساختمان‌های چندلایه‌ای با سطوح سقفی موازی است که قطعات حتی با اختلاف ارتفاع خیلی کم (نظیر ۱۰ سانتی‌متری) به درستی از یکدیگر تفکیک و مدلسازی شده‌اند. به طور کلی نتایج موفقیت روش پیشنهادی را در استخراج ساختمان‌ها و بازسازی آن‌ها بدون نیاز به منابع کمکی مانند نقشه‌های کاداستر و تصاویر هوایی نشان می‌دهد.

واژگان کلیدی: لایدار، ابرنقاط، مدل سه بعدی، استخراج ساختمان، قطعه‌بندی، تقریب خطوط

۱- مقدمه

مدلسازی سه بعدی شهری، بازسازی هندسی و نمایش گرافیکی اشیای موجود در مناطق شهری مانند زمین، ساختمان‌ها، خیابان‌ها و پوشش گیاهی است. مدل‌های سه بعدی، راه حلی برای ارائه اطلاعات تفصیلی و مکانی اشیای موجود در سطح زمین هستند. در کاربرد این مدل‌ها می‌توان به طراحی، مدیریت و برنامه ریزی شهری، مدیریت بحران و بلایای طبیعی و خدمات رسانی به پروژه‌های ساختمانی اشاره کرد. این کاربردها برای سیستم‌های زیادی از قبیل سیستم‌های ناوبری، املاک، خدمات آموزشی، سازمان‌های عمرانی، خدمات اورژانسی و محیط زیست مفید می‌باشند. در دهه‌های اخیر مدلسازی سه بعدی شهری قسمت اعظم و مهمی از تحقیقات فتوگرامتری را در بر گرفته است. ساختمان‌ها به عنوان اجزای اصلی مدل‌های سه بعدی شهری، به صورت خودکار با استفاده از روش‌های گوناگونی در زمینه‌ی اکتساب داده‌ها، طبقه بندی و آنالیز انواع داده‌ها نظیر داده‌های لیزراسکنر، فتوگرامتری هوایی و کاداستر می‌توانند مدلسازی شوند [۱]. عمدتاً داده‌های مورد نیاز از زوج تصاویر هوایی و لیزراسکنر هوایی که معمولاً به آن لایدار (LiDAR)^۱ گفته می‌شود، بدست می‌آیند. در مقایسه با تصاویر هوایی، لایدار تحت تاثیر سایه و جابجایی ارتفاعی قرار نمی‌گیرد و به صورت مستقیم و با دقت بالا ارتفاع ساختمان‌ها را با سرعت و چگالی زیاد اندازه گیری می‌کند. اما مهمترین عیب سیستم لایدار دقت پایین تر 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^۲ می‌گویند. ابر نقاط شامل تمامی عوارض قرار گرفته بر روی سطح منطقه اسکن شده نظیر زمین، درختان، پوشش گیاهی، ساختمان‌ها و عوارض توپوگرافیک دیگر هستند. در بازسازی سه بعدی ساختمان‌ها، مسئله مهم استخراج داده‌های ساختمانی از میان داده‌های متعلق به عوارض دیگر است که در واقع یک مرحله‌ی پیش پردازش محسوب می‌گردد. در مراحل بعدی با در دست داشتن داده‌های

ساختمانی مدل سه بعدی ساختمان قابل بازسازی است. بر طبق تعریف [۲] دو روش کلی مدلسازی وجود دارد: یکی روش پارامتریک یا مدل مبنای^۳ و دیگری روش غیرپارامتریک یا داده مبنای^۴. روش پارامتریک بهترین مدل مناسب را از میان مدل‌های موجود در پایگاه داده مدل جستجو می‌کند، از این رو نیاز به ایجاد مدل اولیه ساختمان‌ها دارد. مدل اولیه یک ساختمان ساده است که می‌تواند با یکسری از پارامترها توصیف گردد. این روش محدود به اشکال استاندارد در پایگاه داده می‌شود و قابلیت بازسازی هر نوع ساختمانی را ندارد. در مقابل روش غیرپارامتریک ابرنقاط ساختمان را بدون وابستگی آن به یک سری از پارامترها، به صورت واحد مورد پردازش قرار می‌دهد. این مدل تلاش می‌کند ساختمان‌های غیرمعمول را بدون تجزیه کردن به مدل‌های اولیه مدل نماید. این روش تنها روشی است که بر روی تمام ساختمان‌های غیر معمول عمل می‌نماید و می‌توان این روش را هم برای ساختمان‌های پیچیده و هم ساده بکار برد.

بازسازی سه بعدی ساختمان‌ها به عنوان یکی از مهم ترین عوارض موجود در سطح زمین موضوعی است که در این تحقیق به آن پرداخته شده است. به صورت ویژه بازسازی مدل پریزماتیک ساختمان‌هایی با چند لایه‌ی ارتفاعی مدنظر است. مدل پریزماتیک ساختمان‌ها، بازسازی هندسی آن‌ها به صورت سه بعدی است به طوری که سقف ساختمان‌ها به صورت مسطح و افقی نمایش داده می‌شوند. طبق استاندارد CityGML در مدل پریزماتیک تنها یک ارتفاع به تمامی سقف ساختمان نسبت داده می‌شود؛ اما اگر ساختمان از چند لایه‌ی ارتفاعی تشکیل شده باشد مدل تولید شده از شکل واقعی بسیار دور می‌شود. هدف این تحقیق این است که تمامی لایه‌های ارتفاعی ساختمان بازسازی شود و مدل پریزماتیک بهبود یابد تا به شکل حقیقی ساختمان نزدیک گردد؛ چنین مدلی "مدل پریزماتیک بهبود یافته"^۵ نامیده شده است. در این زمینه یک روش غیر پارامتریک جدید که قابلیت بازسازی چنین ساختمان‌هایی را داشته باشد ارائه شده است.

^۳ Model driven

^۴ Data driven

^۵ Enhanced prismatic model

^۱ Light Detection And Ranging

^۲ Point cloud

۲- مروری بر تحقیقات

بهره‌گیری از اطلاعات چند طیفی حاصل از یک تصویر رنگی- مادون قرمز و اطلاعات هندسی لیزراسکنر هوایی برای طبقه‌بندی در [۳] دیده می‌شود، محققین این روش با فرض اینکه نقشه‌ی زمینی دقیق در دسترس است و به طور دقیق گوشه‌های سقف را تعیین می‌کند، از آن به عنوان داده‌ی کمکی برای بازسازی ساختمان استفاده کرده‌اند. در مرجع [۴] از روش گسترش ناحیه بر مبنای معیار-های توزیع احتمال دوبعدی عمق و توزیع احتمال سه-بعدی نرمال نقاط در یک همسایگی مشخص که بر اساس توزیع گوسین مطرح گردیده است، برای قطعه‌بندی نقاط استفاده شده است. [۵] از اطلاعات پالس‌های اولیه و -ثانویه^۱ و مقادیر RMSE هر نقطه مطابق با صفحه برازش داده شده برای استخراج ساختمان‌ها استفاده کرده‌اند. [۶] از پارامترهای اساسی سطح (شیب در جهت x، شیب در جهت y و ارتفاع) و RMSE برای قطعه‌بندی صفحات سقف و بازسازی ساختمان بهره‌برده‌اند. در روش پیشنهادی [۷] با آنالیز بردار نرمال‌ها، نقاط سقف قطعه‌بندی شده‌اند. سپس به هر قطعه صفحه‌ای به روش کمترین مربعات برازش داده شده است. از تقاطع صفحات، مرز قطعات حاصل می‌شود و مدل نهایی شکل می‌گیرد. روش مدل‌مبنا بر مبنای استفاده از داده‌های لایدار در [۲،۸] بکار رفته است. [۱۰] از مقادیر بدست‌آمده برای لبه‌های پرش از رابطه‌ی بعد همسایگی، برای شناسایی ابرنقاط ساختمانی استفاده کرده است. محققین [۱۱] از منحنی میزان‌ها برای شناسایی و استخراج مدل سه‌بعدی ساختمان‌های پیچیده با استفاده از مدل رقومی سطح متراکم استفاده کرده‌اند. [۱۲] از ترکیب تصاویر ماهواره‌ای و لایدار برای تولید مدل سه‌بعدی ساختمان‌ها و بخصوص ساختمان‌های با فاصله‌ی خیلی نزدیک به یکدیگر استفاده کرده‌اند. محققین [۱۳] با دردست‌داشتن نقشه دوبعدی منطقه که حاوی پلیگون‌های ساختمان است، روشی مدل-مبنا را ارائه کرده‌اند. در روش پیشنهادی [۱۴] از ترکیب مرز ساختمان که از نقشه بدست آمده است و ابر نقاط لیزر، مدل سه‌بعدی ساختمان‌ها تولید شده است. در روش پیشنهادی مطرح شده در [۱۵] روشی خودکار برای

استخراج و بازسازی ساختمان از DSM^۲ تولید شده از لایدار ارائه شده است، محققین از لبه‌های استخراج شده از تصویر عمق به منظور جداسازی لبه‌های ساختمان از دیگر لبه‌ها، بر پایه‌ی هندسه‌ی شکلشان نظیر قائم بودن، موازی بودن، مدور بودن و تقارن استفاده کرده‌اند. ترکیب روش-های بهینه‌سازی سراسری^۳ برای رسیدن به مدل پریزماتیک بهینه در [۱۶] استفاده شده است. [۹،۱۷] از روش رنسک برای تقریب خطوط بهره‌برده‌اند. در تحقیق انجام شده [۱۸] روشی مدل‌مبنا بر پایه‌ی تخمین پارامترهای مدل با استفاده از الگوریتم ژنتیک برای بازسازی سه‌بعدی ساختمان ارائه شده است. محققین از روش‌های فیلترینگ برای تفکیک نقاط زمینی و غیرزمینی و از پارامتر ناهمواری سطح برای جداسازی گیاهان و درختان از ساختمان‌ها استفاده کرده‌اند. [۱۹] الگوریتم رنسک^۴ و MBR^۵ را برای تقریب خطوط پیشنهاد کرده‌اند که بر روی تصویر عمق اجرا شده است. [۲۰،۲۱،۲۲] روشی گسترش ناحیه بر پایه برازش سطح ارائه داده‌اند. [۲۳] نیز از روش برازش سطح محلی برای استخراج قطعات صفحه‌ای استفاده کرده است. [۲۴] ترکیب تصاویر هوایی و داده‌های لیدار را برای استخراج ساختمان برگزیده است.

اغلب روش‌های موجود به بازسازی ساختمان‌های شیب‌دار و پریزماتیک ساده پرداخته‌اند [۲،۴،۵،۷،۱۱،۱۲،۱۳،۱۷،۱۸،۱۹،۲۸]. غیر از عدم توجه به تعدد لایه‌های ارتفاعی در ساختمان‌های مسطح و تولید مدل پریزماتیک ساده در اینگونه تحقیقات، در ساختمان-هایی با سقف‌های مسطح چندلایه‌ای که ویژگی اغلب ساختمان‌های موجود در کشور است؛ به دلیل ترازوی سطوح امکان استفاده از روش‌های معمول که اغلب در مورد ساختمان‌هایی با سقف شیب‌دار بکار می‌روند وجود ندارد. از این رو تمرکز این تحقیق بر روی ارائه‌ی روشی بوده است که بتواند خلا روش‌های قبل در بازسازی این نوع ساختمان‌ها را جبران کند و گامی مهم در افزایش کیفیت مدل‌سازی بردارد. علاوه بر مدل پریزماتیک روشی نیز برای بازسازی ساختمان‌هایی با سقف شیب‌دار در نظر گرفته شده است.

^۲ Digital Surface Model

^۳ Global optimization approaches

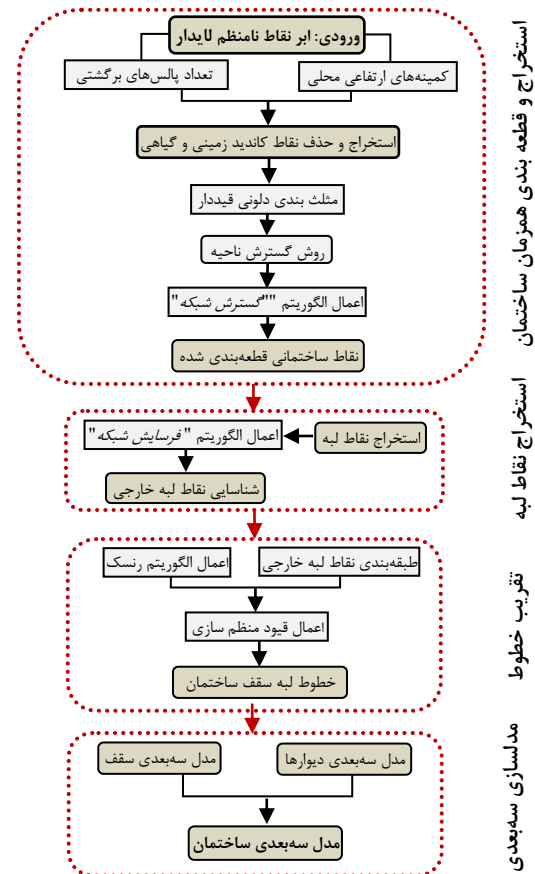
^۴ RANSAC

^۵ Minimum Bounding Rectangle

^۱ First and Last pulses

۳- روش پیشنهادی

روش پیشنهادی در چهار مرحله: (۱) استخراج و قطعه بندی همزمان ساختمان‌ها (۲) استخراج نقاط لبه (۳) تقریب خطوط لبه و (۴) مدلسازی سه بعدی انجام گرفته است. فلوچارت روش مذکور در شکل (۱) آمده است.

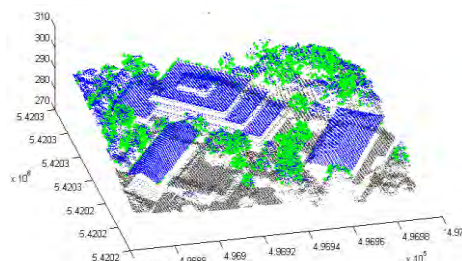


شکل ۱- فلوچارت روش پیشنهادی

۳-۱- استخراج و قطعه بندی همزمان ساختمان

ابر نقاط لایدار شامل تمامی عوارض موجود در منطقه برداشت شده نظیر زمین، درختان و پوشش گیاهی، ساختمان‌ها، راه و جاده، پل و دیگر عوارض توپوگرافیک می‌باشند. گام اولیه در بازسازی سه بعدی ساختمان‌ها، شناسایی و تفکیک ابر نقاط ساختمانی از دیگر ابر نقاط متعلق به عوارض دیگر است. برای این منظور یک روش چند عامله به منظور استخراج ساختمان‌ها و قطعه بندی صفحات سقف آن‌ها به صورت همزمان، معرفی شده است. در این روش از پنج معیار ارتفاع، تعداد پالس‌های برگشتی، طول، بردار نرمال و مساحت استفاده شده است.

مهمترین عوارض موجود در بین داده‌ها که باید از ساختمان‌ها جدا گردند، زمین، درختان و پوشش گیاهی هستند. نقاط کاندیدای زمینی کمترین ارتفاع را در میان نقاط اندازه گیری شده دارند. از این رو برای استخراج این نقاط از حد آستانه‌ای بر اساس کمینه‌های محلی نقاط^۱ 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 تقسیم بندی شده و در هر شبکه نقطه کمینه تعیین می‌شود و نقاط هر شبکه نسبت به همان کمینه محلی مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. 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. در واقع در این موارد دو پالس (یا بیشتر) وجود دارد. از این خاصیت می‌توان برای استخراج برخی نقاط گیاهی استفاده کرد. نقاط کاندیدای زمینی و گیاهی استخراج شده در شکل ۲ نشان داده شده‌اند. واحد تمامی اشکال موجود در این تحقیق بر حسب متر است.



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

پس از شناسایی نقاط کاندیدای گیاهی و زمینی این نقاط از بین داده‌های اولیه حذف می‌گردند. برای ایجاد ارتباط همسایگی بین نقاط از مثلث بندی دلونی^۲ استفاده می‌شود. اما بر روی مثلث‌های ایجاد شده قیدی برای حذف یکسری از مثلث‌هایی که ارتباط دهنده بین لبه‌های اشیاء مختلف و یا لبه‌های عوارض چند لایه‌ای هستند در نظر گرفته شده است. حذف این مثلث‌ها نقش بسیار کلیدی در فرایند قطعه بندی دارد. مثلث‌هایی که حداقل طول یکی از اضلاع آن‌ها از حد آستانه‌ای بر حسب انحراف

^۱ Local minimum points

^۲ Delaunay triangulation

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. مرحله‌ی بعد قطعه‌بندی است؛ در اینجا هدف از مرحله‌ی قطعه‌بندی برچسب‌گذاری 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. بردار نرمال واحد هر مثلث ($\vec{N}$) با استفاده از ضرب خارجی دو بردار $v1$ و $v2$ مطابق معادله ۲ محاسبه می‌شود:

$$\vec{N} = \frac{\vec{v1} \times \vec{v2}}{|\vec{v1} \times \vec{v2}|} \quad (2)$$

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

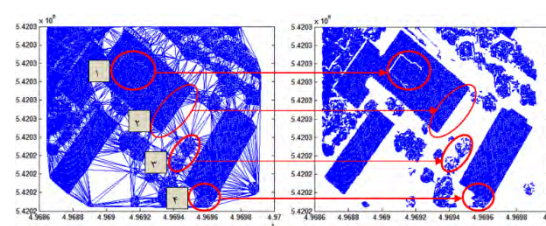
$$\theta = \cos^{-1}(\vec{N}_{s,t} \cdot \vec{N}_{c,t}) \quad (3)$$

اگر این زاویه کمتر از حدآستانه‌ی از پیش تعیین شده باشد، به قطعه مربوط به مثلث فعلی اضافه می‌گردد و همسایگان این مثلث‌ها نیز مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. این مراحل ادامه پیدا می‌کند تا تمام مثلث‌های همسایگی که در شرایط مورد نظر صدق می‌کنند در قطعه یکسانی قرار داده شوند. سپس مراحل فوق با انتخاب مثلث‌های تصادفی دیگری از بین مثلث‌های باقیمانده ادامه پیدا می‌کند تا جایی که تمامی مثلث‌ها قطعه‌بندی شوند (شکل ۴). معمولاً برای رسیدن به قطعات مجزا، حدآستانه‌ای بین

معیار و میانگین طول اضلاع مثلث‌ها بیشتر است، به عنوان مثلث‌های اتصال دهنده‌ی لبه‌های عوارض شناخته شده و حذف می‌گردند (شکل ۳). حدآستانه‌ی مورد نظر با استفاده از معادله ۱ محاسبه می‌گردد [۲۵]:

$$\tau = \bar{S} + t \mu \quad (1)$$

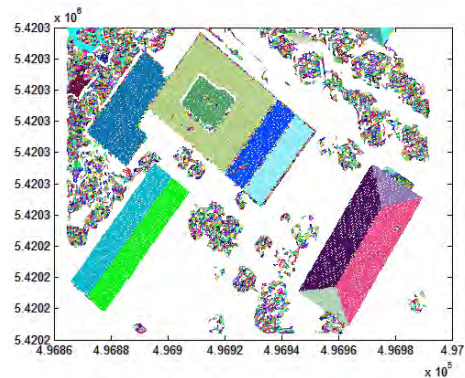
در این رابطه τ حدآستانه‌ی مدنظر، $\bar{S}$ و μ به ترتیب میانگین و انحراف معیار طول اضلاع مثلث‌ها و t ضریب واریانس است. ضریب واریانس می‌تواند مقادیری بین ۰-۳ داشته باشد. به صورت تجربی مقدار مناسب ضریب واریانس بین ۰,۷-۰,۳ است. مرجع [۲۵] از معادله ۱ در فتوگرامتری برد کوتاه استفاده کرده است که در روش پیشنهادی برای اولین بار در این کاربرد خاص استفاده شده است که کمک شایانی به رفع مشکلات روش‌های قطعه‌بندی موجود و بهبود نتایج کرده است که در ادامه به تحلیل آن خواهیم پرداخت.



شکل ۳- مثلث‌بندی دلونی قیددار

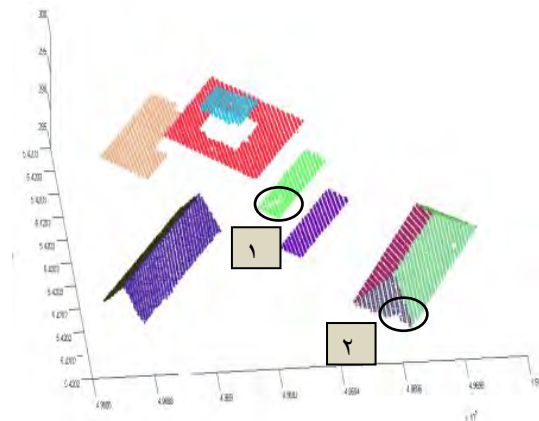
همان طور که در شکل ۳ نشان داده شده است، مثلث‌های بزرگ حذف شده‌اند. در منطقه‌ی یک مثلث‌های اتصال دهنده‌ی دو سطح ارتفاعی از ساختمان چند لایه‌ای موجود حذف گردیده است. حذف این مثلث‌ها بسیار مهم است، از یک سو باعث سهولت فرایند قطعه‌بندی در مراحل بعدی و تفکیک صحیح سطوح موازی اما با اختلاف ارتفاعات متفاوت می‌شود و از سوی دیگر ارتباط همسایگی بین سطح‌های 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 منطقه‌ی چهار

۱۵-۱۸ درجه مناسب است. برای کسب اطلاعات بیشتر در مورد فرایند قطعه‌بندی به [۲۶] مراجعه شود.



شکل ۴- نتایج قطعه‌بندی

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. اما نواحی مربوط به درختان و پوشش گیاهی و اشیاء مصنوعی دیگر باعث ایجاد نواحی کوچک می‌شوند چون تغییرات بردار نرمال این عوارض به دلیل ماهیت شکل آن‌ها زیاد خواهد بود.



شکل ۵- نقاط ساختمانی قطعه‌بندی شده

بدین صورت همزمان با حذف نقاط غیرساختمانی، نقاط ساختمانی شناسایی و قطعه‌بندی می‌شوند (شکل ۵). این کار با حذف عوارض خارجی موجود بر سقف ساختمان نظیر منطقه ۱ در شکل ۵ و حذف درختان بلندی که تا سقف ساختمان بالا آمده‌اند و حتی بر روی سقف قرار گرفته‌اند نظیر منطقه ۲ در شکل ۵ 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 سه بعدی سقف هستند.

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.

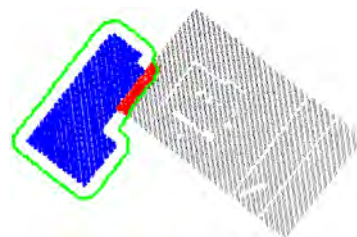
گسترش شبکه^۱. این فرایند به دلیل استفاده از عملگر مورفولوژی گسترش^۲ که بر روی شبکه^۳ منظمی که از نقاط نامنظم قطعه‌بندی شده ایجاد می‌شود، گسترش شبکه نامگذاری شده است. عملگر مورفولوژی گسترش ز با عضو ساختاری B به صورت زیر تعریف می‌شود:

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

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 سه بعدی در نظر گرفته می‌شود و به صورت فرضی شبکه‌ای به ابعاد ۰.۵ متر که با توجه به چگالی داده‌ها برگزیده شده است، 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. در گام بعدی نقاط لبه‌ی شبکه گسترش یافته استخراج می‌شوند (نقاط سبز رنگ در شکل ۶). نقاطی از قطعات دیگر ساختمان که در محدوده‌ی داخلی این لبه‌ها قرار گیرند (نظیر نقاط قرمز رنگ در شکل ۶)، به عنوان قطعه‌ی همسایگی شناخته می‌شود.

^۱ Grid Dilation
^۲ Dilation
^۳ Grid

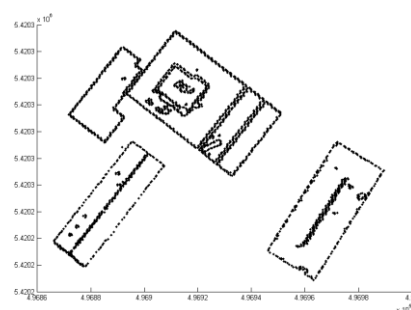
تمامی قطعات همسایگی با یکدیگر متحد می‌شوند تا یک ساختمان واحد شکل بگیرد. بدین صورت بدون نیاز به نقشه دوبعدی و به صورت خودکار تمامی قطعات متعلق به ساختمان‌های واحد شناسایی می‌شوند.



شکل ۶- اعمال روش گسترش شبکه در شناسایی قطعات همسایگی

۳-۲- استخراج نقاط لبه

پس از استخراج قطعات سقف ساختمان می‌توان لبه‌های آن‌ها را استخراج کرد، بدین صورت که نقاط اضلاع مثلث‌هایی که همسایگی ندارند، به عنوان نقاط لبه شناخته می‌شوند (شکل ۷). اما همان‌طور که در شکل (۵) دیده شد در حین فرایند استخراج و قطعه‌بندی نقاط ساختمانی، عوارض خارجی موجود بر روی سقف ساختمان‌ها و نویزها حذف گریه‌اند، که یکی از مزایای روش پیشنهادی در این تحقیق محسوب می‌شود. اما حذف آن‌ها موجب شده گپ‌هایی در قطعات ایجاد و لبه‌های داخلی تولید شوند. زیرا این گپ‌ها مانند نقاط لبه عمل می‌کنند. در مورد قطعاتی از سقف ساختمان که بر روی یکدیگر قرار گرفته‌اند همین مشکل وجود دارد. این نقاط لبه به عنوان نقاط لبه‌ی داخلی باید حذف شوند. در این تحقیق از فرایند ابتکاری که "فرسایش شبکه" نامگذاری شده، برای این منظور استفاده شده است. این روش مشابه روش گسترش شبکه است.

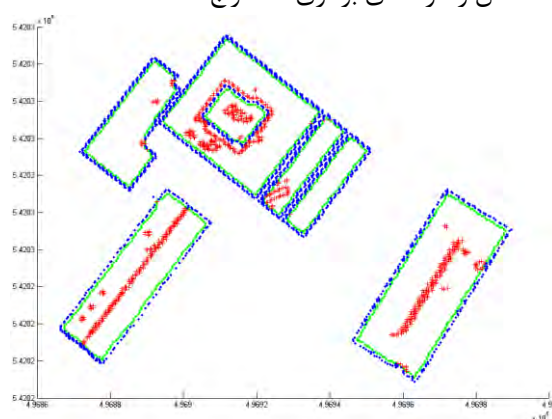


شکل ۷- استخراج نقاط لبه اولیه

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

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

سمبل $\ominus$ برای عملگر فرسایش استفاده می‌شود. ابتدا هر قطعه به صورت مجزا در فضای سه‌بعدی در نظر گرفته می‌شود و به صورت فرضی شبکه‌ای به ابعاد ۵، ۰ متر که با توجه به چگالی داده‌ها برگزیده شده است، بر روی هر یک از قطعات ایجاد می‌گردد. برای تمام نقاط این شبکه، با درونیایی به روش نزدیک‌ترین فاصله، مختصات سه‌بعدی 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 فرسایش استفاده می‌شود. با انجام اینکار شبکه به سمت داخل کشیده یا در واقع فشرده می‌گردد. در گام بعدی نقاط لبه‌ی شبکه‌ی فرسایش یافته استخراج می‌شوند. این نقاط، مرزی برای تفکیک نقاط داخلی و خارجی لبه هستند. تمامی نقاطی از لبه‌های استخراج شده اولیه در فضای برداری که در داخل این مرز بسته قرار می‌گیرند، به عنوان نقاط لبه‌ی داخلی شناسایی شده و حذف می‌گردند. نتایج (شکل ۸) نشان می‌دهند، الگوریتم بکار رفته به خوبی توانسته است لبه‌های خارجی قطعات سقف ساختمان را در فضای برداری استخراج کند.



شکل ۸- استخراج نقاط لبه: نقاط لبه‌ی خارجی یا نهایی (آبی رنگ)، نقاط لبه شبکه فرسایش یافته (سبز رنگ) و نقاط لبه‌ی داخلی (قرمز رنگ)

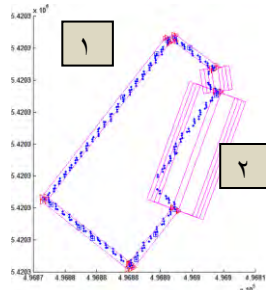
^۱ Grid Erosion
^۲ Erosion

۳-۳- تقریب خطوط

پس از استخراج نقاط لبه‌ی نهایی، برای تقریب خطوط روش رنسک [۲۷] بکار گرفته شده است. اصولاً استفاده از روش‌های کمترین مربعات در مواجهه با داده‌هایی که حاوی بیش از یک خط هستند امکان‌پذیر نیست. اما در روش رنسک تقریب خطوط نزدیک به واقعیت زمینی آن به صورت تکراری امکان‌پذیر است. روش رنسک در گام اول تنها یک خط به داده‌ها برازش می‌دهد و برای استخراج تمامی خطوط نیاز به تکرارها و پس پردازش‌های زیادی هستیم. در روش رنسک انتخاب و تنظیم پارامترها نقش بسیار کلیدی برای حصول نتایج صحیح دارد. به صراحت می‌توان گفت، رسیدن به بهترین پارامترها با استفاده از فرایند سعی و خطا زمان‌بر و طاقت فرساست. برای دستیابی به نتایج بهتر، حقیقی‌تر و با اعتمادپذیری بالاتر، عدم نیاز به پس پردازش‌های سنگین و همچنین کاهش حساسیت این روش به تعیین پارامترهای تنظیمی، روشی زاویه‌مبنا برای طبقه‌بندی نقاط لبه پیشنهاد گردیده است.

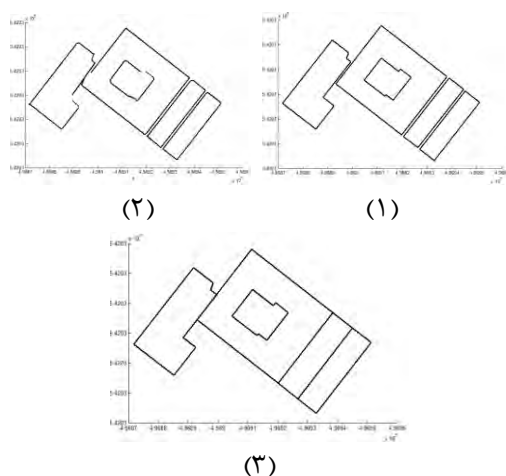
طبقه‌بندی نقاط لبه: در گام اول نقاط محدب^۱ هر قطعه استخراج و در جهت معین مثلاً پادساعتگرد مرتب می‌شوند. از اتصال هر دو نقطه‌ی متوالی خطی به وجود می‌آید و زاویه‌ی مابین خطوط محاسبه می‌گردد. اگر زاویه‌ی بین خطوط همسایگی کمتر از حدآستانه‌ی از پیش تعیین شده باشد، نشان می‌دهد که این خطوط مربوط به یک قطعه خط هستند. معمولاً حدآستانه ۱۶-۱۸ درجه مناسب است. این روند برای تمامی خطوط و تمامی قطعات تکرار و نقاط متعلق به خطوط یکسان شناسایی می‌شوند. گام بعدی شناسایی نقاط لبه‌ی مربوط به هر قطعه و قطعات غیر محدب است. برای شناسایی نقاط لبه مربوط به هر قطعه، نقاط ابتدا و انتهای هر یک در نظر گرفته می‌شود و در امتداد عمود بر خط متصل‌کننده‌ی این نقاط، با فاصله‌ی مشخص که ۰٫۵ متر در نظر گرفته شده است، چهار نقطه تعیین می‌گردد. این نقاط با حل معادلات مربوط به خط عبوری از دو نقطه و حدآستانه‌ی مدنظر بدست آمده‌اند. از اتصال این نقاط مستطیلی حاصل می‌شود، با شناسایی نقاط لبه‌ی درونی هر مستطیل، نقاط لبه‌ی مربوط به هر قطعه خط استخراج می‌گردد. در مورد قطعات طبقه‌بندی شده‌ای که حاوی بیش از یک خط هستند پردازش دیگری برای شناسایی آنها لازم است. برای این منظور تعداد نقاط لبه‌ی هر قطعه خط محاسبه شده و اگر تعداد آنها نسبت به طول خط کم باشد به عنوان قطعه خط غیرمحدب شناخته می‌شود (شکل ۹ قطعه ۲).

در این حالت قطعه خط مورد نظر از چند خط تشکیل شده است. پس از شناسایی غیر محدب بودن قطعات، حد آستانه (عرض مستطیل) در گام‌هایی معین مثلاً نیم متری افزایش می‌یابد تا تمام نقاط لبه‌ی آن قطعه شناسایی شوند.



شکل ۹- طبقه‌بندی نقاط لبه: قطعات خطی محدب (۱) و غیر محدب (۲)

بعد از کشف تمام نقاط هر قطعه، روش رنسک بر روی هر یک به صورت مجزا اعمال شده است. برای قطعات غیر محدب این فرایند باید به صورت تکراری انجام شود تا تمامی خطوط متعلق به آن قطعه استخراج شوند. با اعمال روش ذکر شده خطوط اولیه بازسازی می‌شوند. برای رسیدن به خطوط نهایی تصحیحات توپولوژیک و منظم‌سازی از طریق اعمال قیود مختلف انجام شده است. اهم قیود منظم‌سازی شامل حذف خطوط کوچک، موازی‌سازی دقیق خطوط نسبتاً موازی نسبت به آزیموت میانگین وزندار، تقاطع خطوط همسایه، الحاق خطوط نزدیک بهم متوالی موازی، اتصال خطوط متعامد متوالی و تلفیق قطعات همسایگی هستند. نتایج در شکل ۱۰ نشان داده شده است.



شکل ۱۰- تقریب خطوط: (۱) خطوط اولیه (۲) اعمال قیود منظم- سازی (۳) تلفیق قطعات

^۱ Convex



شکل ۱۱- شناسایی نقاط اطراف ساختمان به منظور تخمین ارتفاع کف ساختمان

۴- پیاده سازی و ارزیابی

روش پیشنهادی بر روی مناطق مختلفی از شهر فایهینگن در کشور آلمان پیاده سازی شده است. داده های مورد استفاده توسط انجمن فتوگرامتری و سنجش از دور آلمان (DGPE) تهیه شده است. این مجموعه داده شامل ۱۰ نوار اسکن هوایی است که در ۲۱ آگوست ۲۰۰۸ توسط Leica Geosystems و با استفاده از ALS50 Leica با زاویه ۴۵ درجه و ارتفاع متوسط ۵۰۰ متری از سطح زمین گرفته شده است. همپوشانی متوسط بین نوارها ۳۰٪ است که در این مناطق تراکم ابر نقاط لایدار ۶/۷ نقطه در هر متر مربع است. اما در مناطقی که توسط یک نوار پوشیده شده اند تراکم نقاط ۴ نقطه در هر متر مربع است. بازگشت چندگانه شدت و ارتفاع نیز برای هر نقطه ثبت شده است. همچنین تصاویر رنگی منطقه با قدرت تفکیک مکانی هشت سانتی متری و قدرت تفکیک رادیومتریکی ۱۱ بیتی در سال ۲۰۰۸ با استفاده از Intergraph / ZI DMC اخذ شده است. در این پژوهش تنها از ابر نقاط لایدار و پالس های برگشتی فاصله سنجی (ارتفاعی) لایدار استفاده شده است. تصاویر فقط به جهت مقایسه مدل بازسازی شده با مدل واقعی در مقاله آورده شده اند.

مدل سه بعدی ساختمان های بازسازی شده در منطقه آزمایشی اول، در شکل (۱۲) آمده است. این منطقه متشکل از سه نوع ساختمان از نوع Gable، Hipped و Flat، درختان بلند قامت و عوارض توپوگرافیک دیگر است. چون هدف خاص ما تولید مدل سه بعدی ساختمان های چندلایه ای مسطح بوده است، روش پیشنهادی بر روی منطقه ای دیگر که دارای ساختمان های مسطح است پیاده سازی شده است (شکل ۱۳). در ادامه تحلیل بصری و کمی در زمینه های گوناگون به تفکیک ذکر می شوند.

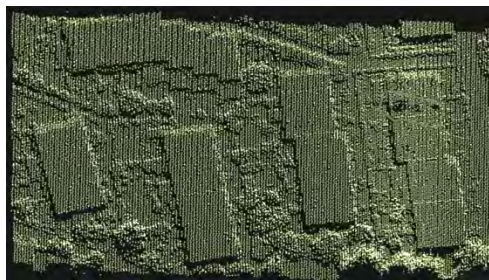
در مورد ساختمان های شیب دار، پس از برازش صفحه به تمامی نقاط هر قطعه، قطعات همسایگی هر ساختمان با یکدیگر تقاطع داده می شوند. شرایط توپولوژیک از راه اعمال قیودی نظیر محدودیت فضایی خطوط تقاطع در نظر گرفته شده است تا تقاطع های صحیح شناسایی شوند. لازم بذکر است که تنها قطعات همسایه ای با یکدیگر تقاطع داده می شوند که از روش "گسترش شبکه" بدست آمده اند. همچنین مرزهای بدست آمده با استفاده از این الگوریتم قیدی برای شناسایی تقاطع های صحیح هستند.

۳-۴- مدلسازی سه بعدی

پس از تقریب خطوط لبه ساختمان، با در دست داشتن نقاط ابتدا و انتهای هر خط مدل سه بعدی ساختمان قابل بازسازی است. این کار در دو مرحله، مدلسازی سقف ساختمان و مدلسازی دیوارها انجام گرفته است.

مدلسازی سقف ساختمان: ابتدا تمامی نقاط هر قطعه از ساختمان در فضای سه بعدی در نظر گرفته شده و به روش کمترین مربعات صفحه ای به آن ها برازش داده می شود. سپس ارتفاع نقاط ابتدا و انتها هر خط با توجه به معادله صفحه برازش داده شده محاسبه می گردد. با داشتن این اطلاعات مدل سه بعدی سقف ساختمان حاصل می گردد.

مدلسازی دیوارهای ساختمان: برای بازسازی مدل سه بعدی دیوارها، تخمین ارتفاع کف ساختمان ضروری است. در اینجا نیز مشابه روشی که برای پیدا کردن قطعات همسایگی بکار گرفته شد از عملگر گسترش اما بر روی تمام قطعات متعلق به یک ساختمان به صورت یکجا استفاده می شود (شکل ۱۱). بدین صورت تمام نقاط اولیه به جز نقاط طبقه بندی شده ساختمانی و گیاهی اطراف ساختمان شناسایی می شوند و با محاسبه میانگین ارتفاع نقاط مینیمم، ارتفاع کف ساختمان تخمین زده می شود. سپس در هر قطعه، نقاط ابتدا و انتهای هر خط با کم کردن ارتفاع آنان از ارتفاع کف، بر روی کف ساختمان تصویر می شوند. با در دست داشتن نقاط تصویر شده و نقاط سقف ساختمان مدل سه بعدی دیوارهای ساختمان بازسازی می شود. در نهایت با ترکیب مدل سه بعدی سقف و دیوارها مدل نهایی شکل می گیرد.



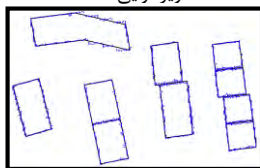
ابر نقاط لایدار منطقه (داده ورودی)



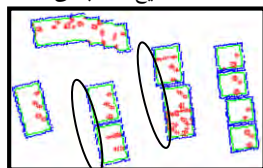
تصویر هوایی



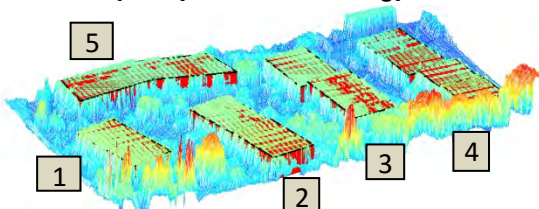
نتایج قطعه‌بندی



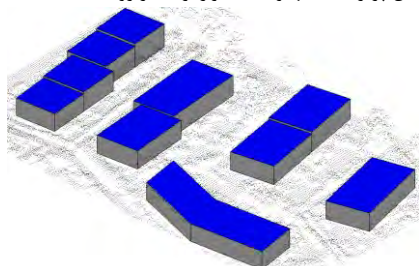
تقریب خطوط



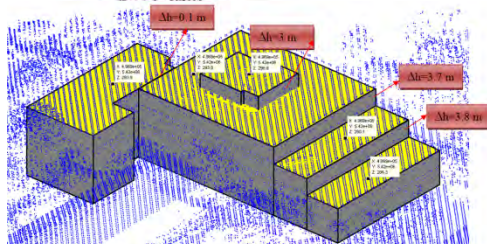
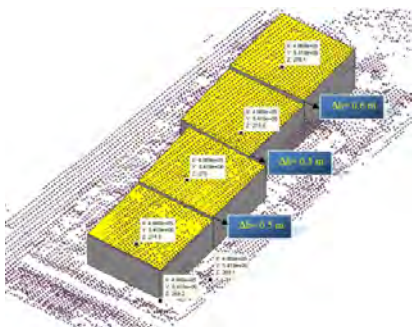
استخراج نقاط لبه



مدل پریزماتیک بهبودیافته قرار گرفته بر روی DSM منطقه



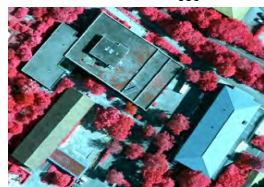
مدل پریزماتیک بهبودیافته قرار گرفته بر روی ابر نقاط منطقه
شکل ۱۳- بازسازی مدل سه بعدی ساختمان‌ها در منطقه دوم



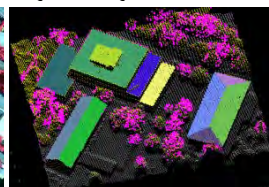
شکل ۱۴- تفکیک لایه های ارتفاعی ساختمان



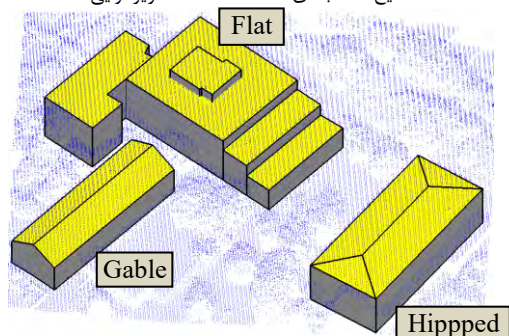
ابر نقاط لایدار منطقه (داده ورودی)



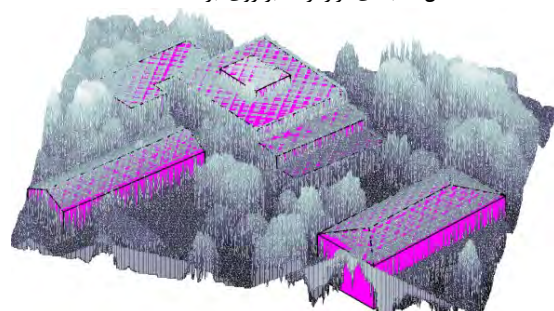
تصویر هوایی



نتایج قطعه‌بندی

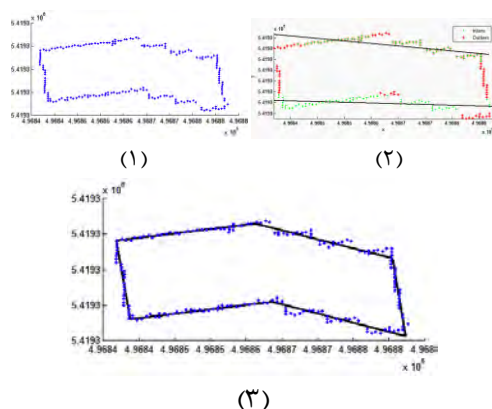


مدل سه بعدی قرار گرفته بر روی ابر نقاط منطقه



شکل ۱۲- بازسازی مدل سه بعدی ساختمان‌ها در منطقه اول

شناسایی و تفکیک قطعات ساختمانی: نتایج قطعه‌بندی در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ گویای این مطلب هستند که تمامی قطعات ساختمانی به درستی شناسایی شده‌اند. در روش پیشنهادی قطعه‌بندی همزمان با استخراج نقاط ساختمانی صورت می‌گیرد؛ بنابراین در صورت کامل بودن داده‌ها به منابع کمکی نظیر نقشه دوبعدی برای استخراج ابر نقاط ساختمانی احتیاج نیست. در مورد ساختمان‌های مسطح چندلایه‌ای که هدف خاص ما هستند، با وجود موازی بودن صفحات، تمامی قطعات از یکدیگر تفکیک شده‌اند. قطعات با اختلاف ارتفاع ۰٫۵ متری و حتی ۱۰ سانتی متری نظیر شکل ۱۴ از یکدیگر تفکیک شده‌اند.



شکل ۱۵- تقریب خطوط در ساختمان شماره پنج: (۱) نقاط لبه (۲) خطوط تقریبی با استفاده از روش رنسک (۳) خطوط تقریبی با استفاده از الگوریتم پیشنهادی

تخمین صفحات ساختمان: مقایسه بصری مدل‌های ایجاد شده با DSM منطقه در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ نشان می‌دهند صفحات ساختمانی با استفاده از روش کمترین مربعات به طور صحیح تخمین زده شده‌اند و در موقعیت صحیح خود قرار گرفته‌اند. روش پیشنهادی با اعمال معیارهایی نظیر تعداد پالس‌های برگشتی، قید طولی و مساحت توانسته است، ابرنقاط درختی موجود بر روی سقف ساختمان‌ها را شناسایی و حذف کند. نویزها و عوارض خارجی موجود بر روی سقف ساختمان نیز با استفاده از این معیارها استخراج می‌شوند. با حذف نویزها، عوارض خارجی و درختان موجود بر روی سقف ساختمان، برازش صفحه به قطعات ساختمانی با بالاترین دقت ممکن صورت گرفته است.

جدول ۱- ارزیابی دقت مدل بازسازی شده در منطقه اول

ساختمان	خطا (m)	میانگین خطا (m)	انحراف معیار (m)
Gable	۰/۳۸ ۰/۳۷ ۰/۱۷ ۰/۱۸	۰/۲۷	۰/۱۱
Flat	۰/۴۸ ۰/۴۱ ۰/۳۹ ۰/۴۶ ۰/۴۸ ۰/۴۵ ۰/۷۵ ۱/۱ ۰/۶۸ ۰/۳۳ ۰/۳۲ ۰/۳۵ ۰/۶۸ ۰/۸۲ ۰/۵۳ ۰/۶۰ ۰/۶۳ ۰/۴۴ ۰/۲۹ ۰/۲۶ ۰/۳۶ ۰/۴۶ ۰/۴۲ ۰/۳۵	۰/۴۳	۰/۱۹
Hipped	۰/۳۲ ۰/۳۳ ۰/۳۰ ۰/۲۹	۰/۳۱	۰/۰۲



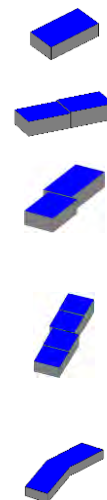
همان‌طور که ذکر شد اکثر روش‌های موجود در جداسازی صفحات موازی با مشکل روبرو هستند، بردار نرمال مشابه و ترازوی سطوح قطعه‌بندی این نوع ساختمان‌ها را سخت می‌کند. اما روش پیشنهادی به خوبی توانسته است از عهده این کار برآید. به صراحت می‌توان عنوان کرد موفقیت روش مذکور در زمینه جداسازی صفحات موازی مدیون اعمال قید طولی با استفاده از معادله ۱ و همچنین اعمال همسایگی از طریق مثلث‌بندی است.

استخراج نقاط لبه: برای استخراج نقاط لبه از روش ابتکاری "فرسایش شبکه" استفاده شده است. این روش به صورت خودکار می‌تواند لبه‌های ناخواسته و یا داخلی را شناسایی و حذف کند. آنچه در این بخش قابل ذکر است؛ مشکل سیستم لایدار در لبه‌هاست. همان‌طور که پیش‌تر گفته شد، احتمال اینکه پرتوهای لیزر دقیقاً به نقاط لبه ساختمان برخورد کنند و ثبت شوند کم است. در صورتی که خط برداشت نیز در جهت نامناسبی قرار بگیرد این مشکل بیشتر می‌شود. به همین دلیل است که در برخی مناطق در شکل ۱۳ (بیضی‌های سیاه رنگ) نقاط لبه استخراج شده به حالت نویزگونه ظاهر شده‌اند. اما در منطقه‌ی اول جهت خط برداشت به گونه‌ای مناسب‌تر بوده است و نقاط لبه منظم‌تری استخراج شده‌اند.

تقریب خطوط: تصاویر ۱۲ و ۱۳ نشان می‌دهند، در تقریب خطوط لبه سقف ساختمان، روش پیشنهادی به خوبی عمل کرده است. با وجود حالت نویزگونه نقاط لبه بهترین خطوط ممکن تقریب زده شده‌اند. با طبقه‌بندی نقاط لبه قبل از اعمال روش رنسک، تقریب خطوط کوچک نیز در اکثر موارد امکان پذیر شده است. اما ساختمان پنج در منطقه دوم از این قاعده مستثنی است. در این ساختمان مشکلاتی از قبیل نویزی‌وار بودن، عدم کامل بودن و موقعیت نقاط لبه و همچنین محدودیت الگوریتم باعث شده‌اند خطوط کوچک قابل بازسازی خودکار نباشند. هرچند خطوط تقریب زده شده نسبت به روش خام رنسک بسیار واقعی‌تر اند (شکل ۱۵).

جدول ۲- ارزیابی دقت مدل بازسازی شده در منطقه دوم

انحراف معیار (m)	میانگین خطا (m)	خطا (m)	ساختمان
۰/۱۴	۰/۳۰	۰/۳۰ - ۰/۴۶ - ۰/۳۳ ۰/۱۲	۱
۰/۱۲	۰/۲۶	۰/۳۵ - ۰/۳۸ - ۰/۲۲ ۰/۳۶ - ۰/۰۵ - ۰/۲۲ ۰/۱۳ - ۰/۳۵	۲
۰/۱۰	۰/۳۰	۰/۴۳ - ۰/۲۴ - ۰/۲۲ ۰/۳۹ - ۰/۳۰ - ۰/۲۵ ۰/۱۴ - ۰/۴۱	۳
۰/۱۴	۰/۳۰	۰/۱۵ - ۰/۵۲ - ۰/۳۰ ۰/۴۵ - ۰/۱۳ - ۰/۱۵ ۰/۴۵ - ۰/۲۶ - ۰/۱۳ ۰/۱۸ - ۰/۲۹ - ۰/۲۹ ۰/۲۰ - ۰/۵۷ - ۰/۴۳ ۰/۲۹	۴
۰/۵۳	۱/۲۲	۱/۳۳ - ۰/۳۴ - ۰/۸۹ ۱/۸۳ - ۱/۵۳ - ۱/۴۱	۵



ارزیابی کمی: برای ارزیابی نسبی مدل بازسازی شده، مدل سقف ساختمان به صورت دستی از داده‌های مرجع اولیه بازسازی شده‌اند و با نتایج بدست آمده در بازسازی با استفاده از روش پیشنهادی مقایسه شده‌اند. اختلاف طولی مسطحاتی در جداول ۱ و ۲ آمده است. به دلیل عدم وجود مرجع زمینی حقیقی، روش دستی استفاده شده است. بیشترین خطای روی داده مربوط به ساختمان پله‌ای شکل پنجم در منطقه دوم است. با توجه به اینکه این خطاها در تمامی مراحل استخراج تا بازسازی است، قابل قبول هستند. پایین بودن انحراف معیار نشان می‌دهد که مقدار خطاها نزدیک به یکدیگر اند، از این رو و با در نظر گرفتن اینکه لبه‌ها به سمت داخل کشیده شده‌اند می‌توان با توجه به انحراف معیار مقادیری ثابت مثبت برای کشیده کردن مدل به سمت خارج در نظر گرفت. در نکته-۱ پایانی باید به این مطلب اشاره کرد که هرچه تراکم ابر نقاط بیشتر باشد، کیفیت مدل تولید شده متناسب با آن بهبود می‌یابد. خوشبختانه با پیشرفت تکنولوژی حصول ابر نقاط متراکم امکان پذیر شده است.

۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق روشی جدید برای بازسازی مدل سه بعدی ساختمان‌ها با استفاده از لایدار ارائه گردید. تمامی مراحل از استخراج ساختمان تا مدلسازی آن مد نظر قرار

گرفته و گام به گام پیاده سازی شده‌اند. در هیچ از مراحل پژوهش از ادیت دستی استفاده نشده است. تنها الگوریتم یک سری پارامترهای تنظیمی دارد که با توجه به هدف کاربر و سطح جزئیات مدنظر متغیر خواهد بود [۲۶ و ۲۹]. بیشترین زمان مورد نظر برای اجرای فرایند مربوط به مرحله‌ی استخراج و قطعه‌بندی ساختمان است که بسته به وسعت منطقه از ۵ تا ۲۰ دقیقه متغیر است. باقی مراحل نظیر استخراج نقاط لبه، تقریب خطوط و مدلسازی نهایی در زمان خیلی کوتاهی تا نهایت ۳ دقیقه اجرا می‌شود. آنچه که این تحقیق را متمایز می‌کند و البته هدف اصلی این تحقیق نیز بوده است، ارائه‌ی روشی برای جداسازی لایه‌های ارتفاعی ساختمان‌های مسطح و تقریب خطوط قطعات به صورت مستقل است. خلا مدلسازی ساختمان‌های چندلایه‌ای در اغلب روش‌های مطرح دیده می‌شود؛ از این رو سعی بر آن بود با تمرکز بر روی این نوع ساختمان‌ها گامی مهم در بازسازی آن‌ها برداشته شود. در زمینه‌ی جداسازی لایه‌های ارتفاعی یا همان قطعه‌بندی، آنچه که بیش‌تر از همه به دستیابی به نتایج صحیح کمک کرده است؛ اعمال قید طولی و ایجاد همسایگی از طریق مثلث‌بندی بوده است. در زمینه‌ی استخراج نقاط لبه نیز هر قطعه سقفی به صورت مجزا مورد پردازش قرار می‌گیرد، از این رو قابلیت استخراج نقاط لبه هر قطعه ساختمان وجود دارد. بنابراین خطوط لبه هر قطعه سقفی بدون نیاز به تقاطع صفحات ساختمان قابل بازسازی است. در تقریب خطوط، طبقه‌بندی نقاط لبه به بازسازی صحیح و جزئی بسیار کمک کرده است. از طرفی به کاهش حساسیت پارامترهای تنظیمی در روش رنسک انجامیده است. نکته‌ی دیگر این که روش پیشنهادی بر روی ابرنقاط نامنظم لایدار و نه بر روی تصویر عمق یا DSM پیاده سازی شده است. بنابراین خطای حاصل از درونیابی برای تولید DSM حذف شده است. در سخن پایانی به این نکته می‌توان اشاره کرد که چون این تحقیق بر روی بازسازی ساختمان‌هایی با سقف‌های مسطح متمرکز شده است که ویژگی بیشتر ساختمان‌های موجود در ایران است؛ امید است با ورود فراگیر این تکنولوژی به کشور بتوان از روش پیشنهادی بهره برد.

- [1] Döllner, J., Buchholz, H., Brodersen, F., Glander, T., Jütterschenke, S., & Klimetschek, A. (2005). "Smart Buildings—A concept for ad-hoc creation and refinement of 3D building models". In Proceedings of the 1st International Workshop of 3D City Models, Bonn, Germany.
- [2] Maas, H.G. and Vosselman, G. (1999). "Two algorithms for extracting building models from raw laser altimetry data". *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* 54 153–163.
- [3] Haala, n., and Brenner, c. (1999). "Extraction of buildings and trees in urban environments". *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, volume 54, 130-137.
- [4] 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.
- [5] Alharthy, A., & Bethel, J. (2002). "Heuristic filtering and 3D feature extraction from LIDAR data". *International Archives of Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 34(3/A), 29-34.
- [6] 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, pp. 213-219.
- [7] Rebecca, O. C., Gold, C., & Kidner, D. (2008). "Implementation of Building Reconstruction Algorithm Using Real World LIDAR Data". In *Headway in Spatial Data Handling* (pp. 297-313). Springer Berlin Heidelberg.
- [8] Arefi, H., Engels, J., Hahn, M. & 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.
- [9] Sester, M., and Neidhart, H. (2008). "Reconstruction of Building Ground Plans from Laser Scanner Data". *11th AGILE International Conference on Geographic Information Science*.
- [10] Wang, J. and Shan, J. (2009) "Segmentation of lidar point clouds for building extraction". *ASPRS 2009 Annual Conference*. Baltimore, Maryland, March 9-13.
- [11] Li, L., Zhang, J., & Jiang, W. (2009). "Automatic complex building reconstruction from LIDAR based on hierarchical structure analysis". In *Sixth International Symposium on Multispectral Image Processing and Pattern Recognition* (pp. 74961J-74961J). International Society for Optics and Photonics.
- [12] Yu, Y., Liu, X., & Buckles, B. P. (2010). "A cue line based method for building modeling from LiDAR and satellite imagery". In *Computing Communication and Networking Technologies (ICCCNT), 2010 International Conference on IEEE*. (pp. 1-8)
- [13] Elberink, S. O., & Vosselman, G. (2009). "Building reconstruction by target based graph matching on incomplete laser data: analysis and limitations". *Sensors*, 9(8), 6101-6118.
- [14] Alexander, C. Smith-Voysey, S., Jarvis, J. and Tansey, k. (2009). "Integrating building footprints and LiDAR elevation data to classify roof structures and visualise buildings". *Computers, Environment and Urban Systems* 33. 285–292.
- [15] Wang, W, and Tseng, Y.H. (2010). "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, pp. 407-420.
- [16] Guercke, R., Götzelmann, T., Brenner, C. & Sester, M. (2010). "Aggregation of LoD 1 building models as an optimization problem". *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 66, 209–222.
- [17] Kim, K., and Shan, J. (2011). "Building footprints extraction of dense residential areas from lidar data". *ASPRS Annual Conference Milwaukee, Wisconsin*, May 1-5.
- [18] 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.
- [19] Arefi, H., and Reinartz, P. (2013). "Building Reconstruction Using DSM and Orthorectified Images". *Remote Sensing*. 5(4), pp. 1681-1703. 1-3 December, pp.158-163.

- [20] Awrangjeb, Mohammad, Guojun Lu, and Clive S. Fraser. (2014). "Automatic building extraction from lidar data covering complex urban scenes." *isprs-international archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences* 1 (25-32).
- [21] Awrangjeb, M., & Fraser, C. S. (2014). "Automatic Segmentation of Raw LIDAR Data for Extraction of Building Roofs". *Remote Sensing*, 6(5), 3716-3751.
- [22] Yan, J., Zhang, K., Zhang, C., Chen, S. C., & Narasimhan, G. (2015). "Automatic Construction of 3-D Building Model From Airborne LIDAR Data Through 2-D Snake Algorithm".
- [23] Mongus, D., Lukač, N., & Žalik, B. (2014). "Ground and building extraction from LiDAR data based on differential morphological profiles and locally fitted surfaces". *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*.
- [24] 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*, 87, 78-92.
- [25] Mian, A.S., Bennamoun, M., & Owens, R. A. "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. 2004.
- [26] Sajadian, M., and arefi, H. (2014). "A Multi-Agent Method for Simultaneous Building Extraction and Segmentation from LiDAR Point Cloud". *Journal of geomatics science and technology*, Vol.4, No. 2 .
- [27] Fischler, M. and Bolles, R. (1981). "Random sample consensus: A paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography". *Communications of the ACM* 24(6), pp. 381–395.
- [28] Satari, m. (2012). "Multi-resolution hybrid approach for building model reconstruction from lidar data". PhD thesis, School of surveying and geospatial engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.
- [29] Sajadian, M. (2014). "Automatic generation of an enhanced prismatic model from building containing multi-level flat-roof structures using LiDAR data", M.Sc thesis, School of surveying and geospatial engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.