

بازسازی مدل ساختمان بر مبنای تلفیق ابر نقطه لیدار و تصویر هوایی

بلال هژبری^{۱*}، فرهاد صمدزادگان^۲، حسین عارفی^۳

^۱ کارشناس ارشد فتوگرامتری - گروه مهندسی نقشه برداری - پردیس دانشکده‌های فنی - دانشگاه تهران

b.hujebry@ut.ac.ir

^۲ استاد گروه مهندسی نقشه برداری - پردیس دانشکده‌های فنی - دانشگاه تهران

samadz@ut.ac.ir

^۳ استادیار گروه مهندسی نقشه برداری - پردیس دانشکده‌های فنی - دانشگاه تهران

hossein.arefi@ut.ac.ir

(تاریخ دریافت اسفند ۱۳۹۲، تاریخ تصویب اردیبهشت ۱۳۹۳)

چکیده

امروزه مدل‌های سه بعدی شهری به عنوان یکی از بنیادی‌ترین اطلاعات مورد نیاز در بسیاری از کاربردهای مهندسی نظیر مدیریت شهری، مدیریت و طراحی جاده‌ها و بزرگراه‌ها و عملیات امداد می‌باشند. در این راستا تلاش گسترده‌ای در راستای بهینه سازی در روند تولید اطلاعات از سطح زمین و پردازش آن‌ها انجام پذیرفته است. در این تحقیق برای بازسازی مدل ساختمان یک روش بر مبنای تلفیق اطلاعات ابر نقطه لیدار و تصویر ارائه شده است. در روش پیشنهادی ابتدا با استفاده از نقشه دو بعدی موجود، نقاط متعلق به هر ساختمان از ابر نقطه کلی لیدار استخراج می‌گردد و ساختمان‌های مورد نظر در دو گروه کلی ساختمان‌های با سقف شیب‌دار و مسطح گروه‌بندی می‌شوند. سپس الگوریتم خوشه‌بندی انتقال میانگین بر روی نقاط سقفی ساختمان‌های مختلف اعمال می‌گردد و در نهایت با جداسازی صفحات موازی و هم صفحه مرحله بخش‌بندی پایان می‌یابد. در مرحله بعدی با استفاده از ماتریس همجواری هر ساختمان، بخش‌های مجاور با یکدیگر تقاطع داده می‌شوند و مختصات رئوس داخلی محاسبه می‌گردد. از طرف دیگر در فضای تصویر، محدوده مربوط به هر ساختمان جدا می‌گردد و الگوریتم بخش‌بندی انتقال میانگین بر روی آن قسمت اعمال می‌گردد. سپس خطوط مربوط به لبه‌های سقف با استفاده از الگوریتم تبدیل هاف استخراج می‌گردند و نقاط حاصل از تقاطع این خطوط به فضای زمین انتقال می‌یابند. در مرحله پایانی با ترکیب نقاط ساختاری حاصل از تقاطع صفحات مجاور و نقاط انتقال یافته از فضای تصویر، عملیات بازسازی انجام می‌شود. در این تحقیق برای ارزیابی کارایی روش ارائه شده، ساختمان‌های مختلف با شکل و سطوح مختلف پیچیدگی مختلف انتخاب شدند و نتایج روش پیشنهادی برای بازسازی مدل سه بعدی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج به دست آمده نشان دهنده کارایی قابل قبول روش ارائه شده در مواجهه با ساختمان‌های مختلف می‌باشد، به طوری که دقت مسطحاتی در بازسازی مدل‌های سه بعدی در حد ۰٫۴ متر به دست آمده است.

واژگان کلیدی: بازسازی، مدل سه بعدی، بخش‌بندی، لیدار، تصویر هوایی، انتقال میانگین.

* نویسنده رابط

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر تقاضا برای مدل‌های سه بعدی ساختمان‌ها با جزئیات بالا افزایش یافته است. استفاده از چنین مدل‌هایی در کاربردهایی نظیر: طراحی شهری، توسعه و طراحی‌های وابسته به معماری، توریسم، ارتباطات، آموزش پرسنل مراکز فوریت و پرسنل نظامی، شبیه‌سازی پدیده‌های طبیعی و ساخت بشر، ناوبری خودکار روبات‌ها و ... با موفقیت به کار گرفته شده است. در حال حاضر ایجاد چنین مدل‌های واقع‌گرایانه‌ای به صورت یک مساله‌ی مشکل و پیچیده باقی مانده است. به خصوص در زمینه مدل‌سازی نواحی با مقیاس بزرگ هنوز یک عملیات زمان‌بر، هزینه‌بر و مستلزم کار فشرده‌ی اپراتوری است (Charalambos Poullis, 2009).

مدل‌سازی سه‌بعدی ساختمان برای طیف گسترده‌ای از جوامع پژوهشی از قبیل بینایی کامپیوتر، ژئوانفورماتیک، علوم شهری و ارتباط از راه دور مورد علاقه می‌باشد. تحقیقات گسترده‌ای در زمینه بازسازی مدل سه بعدی ساختمان انجام گرفته است. روش‌ها و رویکردهای موجود برای بازسازی مدل سه بعدی ساختمان بر مبنای منبع داده مورد استفاده به تک منبع و منابع چندگانه، بر اساس روش پردازش داده به روش‌های داده مبنای، مدل مبنا تقسیم بندی می‌گردند [۱].

۲- مروری بر تحقیقات گذشته

تحقیقات گسترده‌ای در زمینه بازسازی مدل سه بعدی ساختمان انجام گرفته است. پژوهش‌هایی که قبلاً در زمینه استخراج و بازسازی ساختمان انجام گرفته‌اند، بر اساس منبع داده مورد استفاده در آن‌ها به سه گروه تقسیم بندی می‌شوند: ۱. روش‌هایی که فقط از داده تصویر استفاده می‌کنند (تک تصویر، تصاویر استریو، تصاویر چندگانه) ۲. روش‌های که صرفاً از داده لیدار استفاده می‌کنند. ۳. روش‌هایی که از داده‌های چند سنجنده استفاده می‌کنند.

۱-۲- استفاده از داده تصویر

سطوح بازسازی شده با استفاده اندازه‌گیری‌ها و روش‌های فتوگرامتری، حاوی اطلاعات غنی معناشناسی و

همچنین اطلاعات مکانی زیاد در محل خطوط شکست می‌باشند، از این رو تحقیقات متنوع و زیادی در زمینه استفاده از تصاویر برای بازسازی انجام گردیده است. گام اول در کارهای قبلی انجام شده، استفاده از تصاویر منفرد بوده است [۲]، [۳]. برای به دست آوردن اطلاعات سه بعدی ساختمان‌ها، دیوارها، سایه‌ها همراه با جهت و راستای خورشید و هندسه دوربین همه با هم به کار گرفته می‌شوند [۴]. مشکل عمده و اساسی در این روش این است که نتایج به دست آمده وابسته به کیفیت تصویر مورد استفاده و لبه‌های استخراج شده، است و همچنین استفاده از اطلاعات سایه باعث می‌شود که نتایج به دست آمده خیلی قابل اعتماد نباشند. زوج تصاویر استریو و تصاویر چندگانه به عنوان یکی از منابع عمده و اصلی در زمینه بازسازی مدل سه بعدی ساختمان مطرح گشته‌اند و مورد استفاده قرار می‌گیرند [۵-۸]. عوارض سه بعدی (همانند خطوط و صفحات) که پس از عملیات تناظریابی^۱ بین زوج عوارض متناظر به دست می‌آیند ترکیب و توسعه داده می‌شوند و برای بازسازی مدل سه بعدی مورد استفاده قرار می‌گیرند. پژوهشگران زیادی تمرکز خود را بر روی بهبود کیفیت عملیات تناظریابی و همچنین حل مساله نواحی پنهان معطوف داشته‌اند. در حالی که مساله خودکارسازی^۲ عملیات تناظریابی به دلیل موانع زیادی که وجود دارد از قبیل: جابه‌جایی ارتفاعی، شرایط متفاوت روشنایی و تاثیرات سایه هنگامی که تصاویر بزرگ مقیاس روی مناطق شهری مطرح باشد، همچنان به عنوان یک مساله و عملیات ناپایدار باقی است. Awrangjeb و همکاران خطوط ساختاری را از تصویر اورتوشده درجه خاکستری استخراج می‌کنند و با استفاده از ماسک زمین، تصویر NDVI^۳ (شاخص گیاهی نرمال شده) و تصویر آنتروپی به چندین کلاس مختلف از قبیل زمین، زمین با پوشش گیاهی پراکنده، درختان، لبه‌های سقف و خط الراس‌های سقف طبقه‌بندی می‌گردند. دو کلاس مربوط به لبه‌های سقف و خط الراس‌ها برای برآزش صفحات اولیه به نقاط لیدار مجاور و خطوط دیگر تصویر در نزدیکی صفحات اولیه برای برآزش حدود صفحه مورد استفاده قرار می‌گیرند. پس از اینکه خطوط تصویری مناسب انتخاب

^۱ Matching

^۲ Automation

^۳ Normalized Difference Vegetation Index: NDVI

فازی^۴ استفاده کرده‌اند. مرحله دوم می‌تواند کار مدل-سازي پنجره‌های (زیر سقف) را با بهره‌گیری از جزئیاتی از این اشیا انجام دهد. [۱۱]. Zhou با استفاده از یک الگوریتم طبقه‌بندی نقاط لیدار را به کلاس‌های درخت، ساختمان و زمین طبقه‌بندی کردند. الگوریتم یک روند کمینه‌سازی انرژی را بر اساس ویژگی‌های ۲/۵ بعدی ساختار ساختمان‌ها اتخاذ می‌کند. ساختمان‌ها از صفحات سقفی و همچنین دیوارهای قائم تشکیل شده‌اند که ساختار داخلی ساختمان‌ها را برای سیستم‌های اسکتر لیزری غیر قابل رویت می‌سازد. در مقابل درختان چنین ویژگی ندارند و برای نواحی زیر تاج درختان نیز نقاط نمونه‌ای وجود دارد. آن‌ها با ترکیب طبقه‌بندی، مدل‌سازی ساختمان و درخت، سیستمی را ارائه کردند که به صورت خودکار یک مدل ترکیبی که شامل ساختمان‌ها و درختان می‌باشد، را تولید می‌کند [۱۲].

علی‌رغم اینکه سیستم لیدار دارای این مزیت عمده می‌باشد که اطلاعات سه بعدی به طور مستقیم به دست می‌آیند اما به دلیل ماهیت موقعیتی سیستم جمع‌آوری داده، استخراج و به دست آوردن اطلاعات مفهومی از سطح مورد نظر برای این سیستم مشکل می‌باشد. نقاط اندازه‌گیری شده توسط این سیستم، اطلاعات کافی را برای تعیین حدود و مرزهای دقیق هر قطعه ساختمانی در اختیار قرار نمی‌دهد. به دلیل ماهیت تصادفی و نامنظم این نقاط، احتمال اینکه نقاط به صورت دقیق روی لبه‌های شکل فیزیکی عارضه مورد نظر قرار گیرند بسیار پایین است. داده لیدار به عنوان یک منبع داده ناکافی برای استخراج دقیق و صحیح مرز ساختمان‌ها شناخته می‌شود و فرض‌های هندسی در مورد شکل ساختمان‌ها از قبیل توازی، تقارن، مسطح بودن سقف، راست و مستقیم بودن مرزها برای استخراج و به دست آوردن اطلاعات مربوط به ساختمان‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. در حالی که اثر ماهیت غیر منظم نقاط لیدار را کاهش می‌دهند [۱۳]، [۱۴].

۲-۳- استفاده از تلفیق داده‌ها

به دلیل محدودیت‌های استفاده از تک منابع داده (منابع داده منفرد) پژوهشگران زیادی تلاش کرده‌اند که

شدند، صفحه‌نهایی با استفاده از خطوط انتخاب شده بازسازی می‌گردند [۹]. محیط‌های شهری به دلیل ماهیت پیچیده‌ای که دارند و با محدودیت کنونی مدل‌سازی رقومی سطح زمین را از تصاویر ماهواره‌ای با قدرت تفکیک بالا با چالش روبه‌رو می‌کنند.

۲-۲- استفاده از داده لیدار

از آنجا که لیدار یک منبع مستقیم برای اخذ ابر نقطه متراکم سه بعدی و قابل اعتماد در برابر فرایند پیچیده تناظریابی تصویر است، تکنولوژی لیدار به عنوان یک منبع عمده و اصلی داده در زمینه بازسازی مدل سه بعدی مطرح شده است.

در روش ارائه شده توسط Kim و همکاران مدل‌سازی سقف در ابر نقطه لیدار طی یک فرآیند دو مرحله‌ای انجام می‌گیرد: بخش‌بندی، بازسازی. آن‌ها با استفاده از کمینه-سازی یک تابع انرژی که همانند مجموعه سطوح^۱ چند حالتی فرمول‌بندی می‌گردد، کار بخش‌بندی ابر نقطه لیدار مربوط به سقف ساختمان‌ها را انجام دادند. سپس خط الراس‌ها و لبه‌های پلکانی از طریق اجتماع خطوط تراز سطح صفر، تابع مجموعه سطح استخراج می‌گردند. برای بازسازی مدل سه بعدی سقف ساختمان‌ها، نقاط ساختاری سقف به وسیله تقاطع بخش‌های مجاور سقف یا بخش‌های خطی محدوده ساختمان تعیین می‌شوند و بر اساس روابط توپولوژی استنباط شده از نتایج بخش‌بندی به هم متصل می‌گردند [۱۰]. Satari برای بازسازی مدل سه بعدی ساختمان از ابر نقطه لیدار، یک روش ترکیبی با چند سطح متفاوت دقت ارائه کرد. خوشه‌بندی نقاط سقفی در یک فضای چند دقتی^۲ بر مبنای الگوریتم FCM در بخش چندوجهی رویکرد ترکیبی آن‌ها انجام می‌شود. تایید صفحات بین فضاهای چنددقتی، یک روش مبتنی بر ماشین بردار پشتیبان^۳ کمترین مربعات را اتخاذ می‌کند که در بخش مدل مینا برای تشخیص و شناسایی نوع سازه‌های نگاشت شده، اعمال می‌گردد. پس از تعیین پارامترهای مدل پنجره (جلو آمده زیر سقف)، برای شناسایی خطوط مرزی سقف، از الگوریتم تبدیل هاف

^۱ Level Set

^۲ Multi-resolution

^۳ Support Vector Machine: SVM

^۴ Fuzzy Hough Transform

از ترکیب و تلفیق منابع داده متنوع و گوناگون بهره گیرند.

[۱۵] یک مدل سه بعدی را از تصاویر هوایی با کمک نقشه دو بعدی GIS (به عنوان طرح کلی ساختمان) تولید کردند. از پلان زمینی برای تفکیک ساختمان‌های پیچیده به چندین قسمت مستطیلی استفاده شد. تلفیق داده GIS با داده لیدار توسط [۱۶-۱۸] مورد بررسی قرار گرفته است. اگرچه داده GIS می‌تواند اطلاعات اضافی تامین نماید و باعث می‌شود فضای جستجو در عملیات بازسازی کاهش یابد، اما ممکن است که این اطلاعات به روز و یا حاوی اطلاعات مفید نباشند و یا قابلیت تعمیم نداشته باشند و یا قابلیت سازگاری با منابع داده دیگر را نداشته باشند. تلفیق داده لیدار و تصویر برای تولید مدل سه بعدی ساختمان توسط مجامع تحقیقاتی و پژوهشی مورد توجه فراوان قرار گرفته است [۱۹-۳۰].

Ma داده لیدار را برای استخراج عوارض و سپس بازسازی مدل‌های اولیه ساختمان مورد استفاده قرار داده است. مدل‌های اولیه ساختمان به فضای تصویر نگاشت می‌شوند و با استفاده از پیکسل‌های مربوط به لبه عوارض که از تصویر استخراج می‌شوند، مدل‌ها را بهبود داده‌اند [۲۱]. Chen و همکاران نواحی ساختمان را با تلفیق بخش‌بندی ناحیه‌مبنا و طبقه‌بندی اطلاعات مبنا، از هر دو منبع داده لیدار و تصویر هوایی شناسایی کرد. آن‌ها ویژگی‌های ارتفاع و ناهمواری را از داده لیدار و اطلاعات طیفی و بافت را از تصاویر هوایی در نظر گرفتند. برای بازسازی مدل سه بعدی ساختمان‌ها، روش تفکیک-تلفیق-شکل‌دهی^۱ با استفاده از قطعات مسطح از داده لیدار و لبه‌های استخراج شده از تصاویر، مورد استفاده قرار گرفت. با این وجود این روش قادر به یافتن پنج سطح از جزئیات نیست و همچنین مشخص نیست که با خطوط خطادار چگونه برخورد می‌کند [۳۱].

Rau بر اساس نگاشت جانبی^۲ داده‌های لیدار، روشی را برای بازسازی مدل سه بعدی ساختمان‌ها ارائه کرده است. در روش ارائه شده ابتدا با استفاده از میانگین وزن‌دار تراکم ابر نقاط، توجیه اولیه ساختمان‌ها شناسایی می‌گردد و سقف‌های چند لایه به لایه‌های منفرد تجزیه می‌شوند. نقشه دو بعدی برای انتخاب نقاط داخل

ساختمان و برای کمک در تعیین توجیه اولیه ساختمان مورد استفاده قرار می‌گیرد. خطوط ساختاری سه بعدی از ابر نقاط تصویر شده، شناسایی و بازگردانده می‌شوند و در نهایت برای بازسازی مدل سه بعدی، یک روش ابتکاری مدل‌سازی سقف مبتنی بر خط، که ادغام و شکل‌دهی مجدد^۳ TIN نامیده می‌شود، ارائه شده است [۳۲]. Awrangjeb و همکاران خطوط ساختاری از تصویر اورتوشده درجه خاکستری استخراج می‌شوند و با استفاده از ماسک زمین، تصویر NDVI^۴ و تصویر آنروپی به چندین کلاس مختلف از قبیل زمین، زمین با پوشش گیاهی پراکنده، درختان، لبه‌های سقف و خط الراس‌های سقف طبقه‌بندی می‌گردند. دو کلاس مربوط به لبه‌های سقف و خط الراس‌ها برای برآزش صفحات اولیه به نقاط لیدار مجاور و خطوط دیگر تصویر در نزدیکی صفحات اولیه برای برآزش حدود صفحه مورد استفاده قرار می‌گیرند. پس از اینکه خطوط تصویری مناسب انتخاب شدند، بقیه کنار گذاشته می‌شوند و صفحه نهایی با استفاده از خطوط انتخاب شده بازسازی می‌گردند [۹]. Wang روشی سه مرحله‌ای را برای استخراج و بازسازی مدل سه بعدی ساختمان‌های ساده با شکل و ساختار منظم از داده لیدار و تصویر هوایی ارائه کرد که سه مرحله مورد نظر عبارتند از شناسایی نواحی مربوط به ساختمان‌ها از داده لیدار، استخراج ویژگی‌های مربوط به ساختمان‌ها و بازسازی سه بعدی. در مرحله اول با استفاده از طبقه‌بندی داده لیدار، ساختمان‌ها استخراج می‌شوند، در گام بعدی خوشه‌های نقاط لیدار به عنوان ساختمان‌های منفرد در نظر گرفته می‌شوند و سپس موقعیت اولیه ساختمان‌ها با استفاده از روش ترسیم طرح کلی نقاط به دست می‌آیند و موقعیت‌های اولیه با لبه‌های استخراج شده از تصویر هوایی، برای به دست آوردن لبه‌های ساختمانی با قابلیت اطمینان بالاتر ترکیب می‌گردند. در مرحله سوم، از لبه‌های ساختمان و مقادیر ارتفاعی مربوط به سقف ساختمان‌ها که از داده لیدار به دست آمده، برای بازسازی و نمایش مدل سه بعدی ساختمان‌ها استفاده می‌شود [۳۳]. Kwak و Habib یک روش پایدار و بازگشتی را برای مدل‌سازی خودکار ساختمان با استفاده الگوریتم

^۳ TIN Merging And Shaping

^۴ Normalized Difference Vegetation Index: NDVI

^۱ Split-Merge-Shape

^۲ Side Projection

تمام مدل‌های سه بعدی متناظر با هر خط الراس مدل پارامتریک بلوک ساختمانی را تشکیل می‌دهد [۳۰]. Henn و همکاران از تکنیک‌های برآورد پایدار از قبیل RANSAC/MSAC برای به دست آوردن بهترین برازش مدل‌های سقفی در رویکرد مدل مبنا استفاده کردند. برای شناسایی مناسب‌ترین مدل سقفی از روش یادگیری ماشین نظارت شده استفاده شد. طبقه‌بندی نظارت شده قادر است که ویژگی‌های اضافی دیگری را به کار گیرد که بهبود قابل توجهی در انتخاب مدل صحیح به همراه دارد. آن‌ها برای اولین بار از ترکیب روش‌های مدل مبنا و روش‌های تخمین پایدار مانند RANSAC و یادگیری ماشین نظارت شده در زمینه بازسازی مدل سه بعدی ساختمان استفاده کردند [۳۶]. Huang و همکاران در ابتدا ابر نقطه ورودی را به چند قسمت تقسیم کردند، که هر قسمت دارای تعداد محدودی از ساختمان‌ها باشد، برای اینکه پیچیدگی محاسبات در نواحی شهری بزرگ را کاهش دهند. آن‌ها برای استخراج و بازسازی ساختمان‌ها در هر قسمت از یک رویکرد مدل مبنا استفاده کرده‌اند که هیچ نیازی به داده‌های اضافی دیگر نظیر جای پای ساختمان‌ها ندارد و با استفاده از کتابخانه‌ی مدل‌های پایه موجود و قواعد ترکیب آن‌ها، کل سقف ساختمان را مدل‌سازی کردند و این مدل‌ها را به داده‌های موجود برازش دادند. انتخاب مدل‌های پایه سقف و همچنین تعیین پارامترهای مربوط به آن‌ها با استفاده از تکنیک MCMC^۶ و با یک سازوکار جهشی خاص انجام شده است [۳۷].

در این تحقیق بازسازی مدل سه بعدی ساختمان‌ها بر مبنای تلفیق منابع داده لیدار و تصویر هوایی و استفاده از رویکرد داده مبنا انجام شده است. با توجه به اینکه ماهیت ابر نقاط لیدار نامنظم می‌باشد و همچنین در روش‌هایی که از رویکرد داده مبنا استفاده می‌شود، عملیات بخش‌بندی ابر نقاط یک مرحله پیش‌پردازش اساسی و مهم است. در سال‌های گذشته روش‌های زیادی برای بخش‌بندی و استخراج سطوح مسطح از ابر نقاط ارائه شده است. سه روش عمده که در این زمینه بیشترین موارد استفاده را دارند، عبارتند از روش بسط ناحیه [۳۸-۴۰]، روش‌های برازش مدل از قبیل تبدیل سه بعدی هاف

کوچکترین مستطیل محیط^۱ و تعدیل پی در پی آن‌ها برای ترکیب مزایای منابع داده لیدار و تصویر هوایی ارائه دادند. آن‌ها مدل نهایی را با استفاده از عملگرهای بولین تفریق و جمع در هر مرحله از MBR^۱ های تعدیل شده به دست آوردند. الگوریتم ارائه شده توسط آن‌ها قابلیت اعمال به ساختمان‌های پیچیده‌تر با سطح‌های MBR^۱ بیشتر را دارد و از دقت و صحت بالا و میزان زیادی خودکارسازی برخوردار است اما مشکل عمده روش آن‌ها این است که فقط قابلیت اعمال به ساختمان‌هایی را دارد که قابل تجزیه و تفکیک به اشکال مستطیل می‌باشند [۳۴]. Tong و همکاران بر مبنای تلفیق داده لیدار و تصاویر هوایی اورتو شده، کار بازسازی مدل سه بعدی را انجام دادند. فرآیند مورد استفاده آن‌ها شامل سه مرحله می‌باشد: در ابتدا با استفاده از داده ابر نقطه لیدار یک شبکه مثلثی دلونی^۲ ایجاد می‌شود و یک بخش‌بندی مثلثی خوشه مبنا برای جداسازی قسمت‌های مختلف سقف از این شبکه مثلثی انجام می‌گیرد. سپس خط الراس‌های سقف با استفاده از روی هم قرار دادن^۳ خطوط استخراج شده از سقف و قسمت‌های بخش‌بندی شده سقف به دست می‌آیند. و در نهایت مدل سه بعدی سقف ساختمان‌ها با استفاده از قطعات بخش‌بندی شده و خط الراس‌های استخراج شده بازسازی می‌شوند [۳۵]. Arefi یک روش مدل مبنا را بر اساس استفاده از داده DSM با قدرت تفکیک بالا و تصاویر اورتو شده فضایی WorldView2 ارائه کرده است. برای بازسازی پارامتریک، یک بلوک ساختمانی بر اساس جهت و تعداد خط الراس‌ها به قسمت‌های کوچکتر تقسیم می‌شوند. اطلاعات مربوط به لبه‌ها از تصویر اورتو شده استخراج می‌گردند. خط الراس بلوک ساختمانی به چندین قسمت متعدد تجزیه می‌شوند. برای هر خط الراس یک صفحه نگاشت تعریف می‌شود که تمام نقاط قرار گرفته در یک بافر^۴ مشخص از خط الراس، روی صفحه تصویر می‌شوند و سپس با استفاده از بیشترین تعداد نقاط تصویر شده یک مدل دو بعدی به دست می‌آید. برای تولید سقف‌های شیروانی و هیپ^۵ به فضای سه بعدی تعمیم داده می‌شوند. ترکیب

^۱ Minimum Boundary Rectangle: MBR

^۲ Delaunay Triangular Network

^۳ Overlaying

^۴ Buffer

^۵ Gable & Hipped Roof

^۶ Markov Chain Monte Carlo

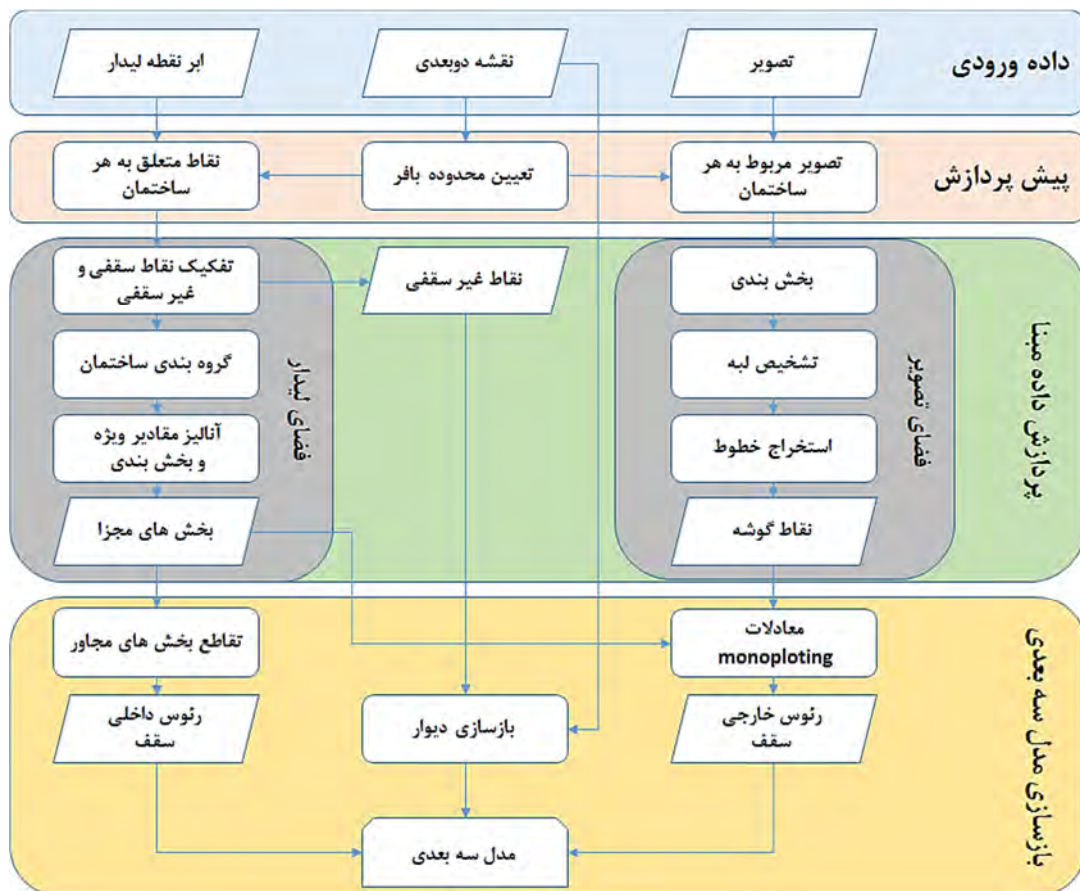
[۴۱-۴۳]، الگوریتم RANSAC [۴۴-۴۶] و روش مبتنی بر خوشه‌بندی ویژگی‌ها [۴۷]، [۴۸].

داده لیدار موقعیت سه بعدی نقاط را به صورت مستقیم در اختیار قرار می‌دهد، امکان ایجاد و محاسبه معادله ریاضی صفحات را فراهم می‌کند. ولی به دلیل محدودیت ناشی از تراکم نقاط لیدار، استخراج لبه‌های مربوط به ساختمان‌ها کاری مشکل و با دقت پایین می‌باشد. از طرف دیگر در فضای دوبعدی تصویر بر خلاف فضای سه بعدی لیدار استخراج نقاط سه بعدی مربوط به صفحات سقفی کاری مشکل و پیچیده است، اما با توجه به اطلاعات طیفی موجود می‌توان لبه‌ها و مرزهای سقف ساختمان‌ها را با دقت بالایی شناسایی و استخراج نمود. در این تحقیق سعی شده است که با تلفیق اطلاعات موجود در منابع داده مختلف، نقاط ضعف و قوت یکدیگر را پوشش دهند.

۳- روش پیشنهادی

با بررسی نقاط ضعف و قوت دو منبع داده لیدار و تصویر در زمینه بازسازی مدل سه بعدی ساختمان‌ها، می‌توان

آن‌ها را منابع داده مکمل یکدیگر در نظر گرفت، به نحوی که این دو منبع داده می‌توانند نقاط ضعف و قوت یکدیگر را به خوبی پوشش دهند. زیرا از ابر نقاط لیدار می‌توان معادله ریاضی صفحات سقفی را با صحت بالا تعیین کرد و برای تعیین دقیق لبه‌های این صفحات سقفی می‌توان از اطلاعات موجود در تصاویر هوایی بهره گرفت. در روش پیشنهادی ابتدا با استفاده از نقشه دوبعدی منطقه مورد نظر نقاط مربوط به هر ساختمان از ابر نقطه کلی استخراج می‌شوند، در مرحله بعدی با استفاده از الگوریتم انتقال میانگین بخش‌بندی انجام می‌گیرد. سپس برای استخراج رئوس داخلی سقف ساختمان‌های شیب‌دار بخش‌های مجاور تقاطع داده می‌شوند. از سوی دیگر تصویر مربوط به هر ساختمان به صورت جداگانه پردازش می‌شود و خطوط خارجی سقف ساختمان‌ها استخراج می‌گردد. در نهایت با ادغام اطلاعات به دست آمده از لیدار و تصویر مدل سه بعدی سقف ساختمان‌ها بازسازی می‌گردد. شکل (۱)



شکل ۱- فلوچارت کلی روش مورد استفاده برای بازسازی مدل سه بعدی ساختمان

۳-۱- پیش پردازش

قبل از انجام هر عملیاتی باید اطلاعات مربوط به هر ساختمان از ابر نقاط کلی و تصویر هوایی محدوده مورد مطالعه تفکیک و استخراج گردد. با توجه به این واقعیت که اصولاً داده لیدار شهرهایی موجود است که نقشه دوبعدی آن‌ها نیز موجود می‌باشد از نقشه دو بعدی شهر برای تفکیک نقاط متعلق به هر ساختمان استفاده شده است.

۳-۱-۱- تفکیک نقاط مربوط به هر ساختمان

به ازای هر ساختمان، با استفاده از مختصات رئوس آن و با توجه به هم مرجع بودن نقشه دوبعدی و ابر نقاط لیدار، نقاط داخل پلیگون هر ساختمان از ابر نقطه کلی استخراج می‌گردند. با ایجاد یک بافر^۱ در اطراف پلیگون هر ساختمان سعی می‌شود که تعدادی از نقاط زمینی کنار ساختمان نیز در نظر گرفته شوند. همچنین می‌توان اطمینان حاصل کرد که نقاط مربوط به سقف‌هایی که نسبت به دیوار ساختمان جلوآمدگی دارند، نیز در نظر گرفته می‌شوند.

۳-۱-۲- تفکیک تصویر مربوط به هر ساختمان

به منظور کاهش پیچیدگی مساله، ابتدا باید تصویر متعلق به یک ساختمان به صورت منفرد از تصویر کلی استخراج گردد. برای جدا کردن محدوده مربوط به یک ساختمان، برای نقاط گوشه مربوط به پلیگون‌های نقشه، ارتفاع نزدیکترین نقطه سقفی را اختصاص می‌دهیم و با در نظر گرفتن یک حد مشخص بافر موجب می‌شود که تمام قسمت‌های مربوط به سقف ساختمان مثلاً قسمت‌های جلو آمده، در محدوده تعیین شده قرار گیرند. محدوده قرار گرفته بین این نقاط برای هر ساختمان جدا می‌گردد و مراحل بعدی روش ارائه شده بر روی تصویر مربوط به یک ساختمان منفرد اعمال می‌گردد. در نهایت تصویر هر ساختمان با برش و فیلتر ناحیه محدود به نقاط انتقال یافته و ناحیه بافر معین شده، به دست می‌آید.

۳-۲- پردازش فضای لیدار

با توجه به ماهیت متفاوت دو منبع داده موجود (ابر نقطه لیدار و تصویر) از لحاظ ساختار داده و نوع پردازش‌های مورد نیاز، در روش ارائه شده هر کدام از منابع داده به صورت مجزا و در مراحل جداگانه‌ای پردازش می‌شوند.

۳-۲-۱- تفکیک نقاط سقفی و غیر سقفی

پس از آنکه نقاط متعلق به هر ساختمان از ابر نقطه کلی تفکیک شدند، از آنجاکه این نقاط مربوط به تمام قسمت‌های یک ساختمان می‌باشند و همچنین عملیات بازسازی سقف ساختمان شامل یک فرآیند مجزا می‌باشد، باید در این مرحله نقاط سقفی از نقاط غیر سقفی جدا گردند. برای این کار بدین صورت عمل می‌شود که در مجاورت نقاط گوشه مربوط به نقشه دوبعدی، چند (K) نزدیکترین همسایگی انتخاب می‌شوند (نزدیکترین همسایگی فقط روی مولفه‌های مسطحاتی اعمال می‌گردد)، سپس کمترین و بیشترین ارتفاع مربوط به این نقاط همسایگی در هر گوشه محاسبه می‌شوند و یک پارامتر اختلاف ارتفاع به صورت $dh = Z_{max} - Z_{min}$ برای هر راس تعریف می‌گردد. سپس بر اساس یک استاندارد مشخص و یا اطلاعات محلی موجود منطقه، یک حد آستانه معین در نظر گرفته می‌شود. اگر ارتفاع نقاط $(Z_{min} + dh_{thr})$ از آن حد آستانه بیشتر باشد، نقاط مورد نظر به عنوان نقاط سقفی در نظر گرفته می‌شوند و در غیر این صورت به عنوان نقاط غیر سقفی در نظر گرفته خواهند شد.

۳-۲-۲- گروه‌بندی ساختمان‌ها

در محیط‌های شهری انواع سقف‌های ساختمانی مشاهده می‌گردد، اما در یک تقسیم بندی کلی می‌توان آن‌ها در دو گروه کلی سقف‌های شیب‌دار و مسطح دسته‌بندی کرد. در این مرحله برای نقاط سقفی هر ساختمان بردار نرمال به دست می‌آید، سپس انحراف معیار مولفه‌های بردار نرمال مربوط به هر ساختمان محاسبه می‌شود. اگر انحراف معیار مربوط به هر ساختمان کمتر از حد آستانه مشخص (مثلاً ۰/۲) باشد، به عنوان یک ساختمان با سقف مسطح در نظر گرفته می‌شود و در غیر این

^۱ Buffer

همسایگی صفحه‌ای. یک شاخص که شاخص مسطح بودن محلی نامیده می‌شود، به صورت $\left(\frac{\lambda_1}{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3}\right)$ محاسبه می‌شود [۴۹].

$$\begin{cases} \text{If } \left[\frac{\lambda_1}{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3}\right] < \varepsilon & P \text{ is planar;} \\ \text{otherwise} & P \text{ is nonplanar} \end{cases} \quad (1)$$

اگر اندازه مسطح بودن محلی در نقطه لیدار کمتر از یک حد آستانه‌ی (ε) باشد می‌توان فرض کرد که همسایگی صفحه‌ای است.

۳-۲-۴- بخش بندی (ابر نقطه لیدار)

پس از تشخیص نوع ساختمان، برای بخش بندی ابرنقاط مربوط به هر ساختمان از الگوریتم خوشه بندی انتقال میانگین استفاده می‌شود، که در مورد ساختمان های دارای سقف مسطح از ارتفاع نقاط به عنوان بردار ویژگی استفاده می‌شود و برای ساختمان هایی که دارای سقف شیب دار می‌باشند، از بردار نرمال نقاط به عنوان بردار ویژگی استفاده می‌شود.

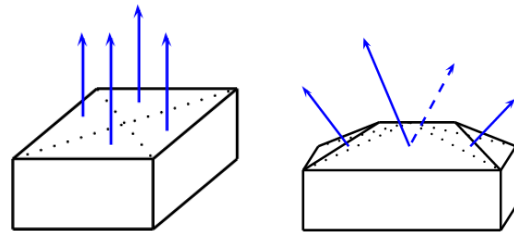
الگوریتم انتقال میانگین یک روش تکراری ساده است که یکی از کاربردهای آن برای خوشه بندی می‌باشد، این الگوریتم اولین بار توسط Fukunaga و Hostetler در سال ۱۹۷۵ ارائه شد [۵۰]. ایده‌ی اصلی انتقال میانگین برخورد با نقاط موجود در فضای ویژگی همانند یک تابع چگالی احتمال تجربی می‌باشد، که نواحی تراکم در فضای ویژگی، متناظر با بیشینه‌های محلی^۲ در تابع توزیع هستند.

برای یک مجموعه داده n عضوی x_i ($i=1, \dots, n$) در یک فضای d بعدی تابع تخمین تراکم با استفاده از یک هسته شعاعی متقارن $K(x)$ به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$\hat{f}_k = \frac{1}{nh^d} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{x - x_i}{h}\right) \quad (2)$$

که h (پارامتر پهنای باند نامیده می‌شود) شعاع هسته را تعریف می‌کند. با گردان گیری از تابع برآورد تراکم و بعد از آن یک سری عملیات جبری دیگر رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

صورت اگر انحراف معیار مولفه‌های بردار نرمال یک ساختمان بیشتر از حد آستانه تعیین شده باشد، ساختمان مورد نظر به عنوان ساختمان با سقف شیب دار گروه بندی می‌شود.



شکل ۲- پراکندگی بردار نرمال مربوط به ساختمان های با سقف مسطح و شیب دار

۳-۲-۳- آنالیز مقادیر ویژه

اگرچه نقاط سقفی و غیر سقفی تا حد زیادی از هم جدا شده‌اند، اما نقاط باقی مانده به عنوان نقاط سقفی، هنوز حاوی تعدادی نقاط نامتجانس می‌باشند، (مثلا نقاط مربوط به دیوارها و یا نقاط دارای نويز و خطای فاحش)، که این نقاط نیز باید تشخیص داده شده و از روند پردازش های بعدی کنار گذاشته شوند. در روش ارائه شده در این تحقیق از آنالیز مقادیر ویژه [۴۷] برای این منظور استفاده شده است. این آنالیز در واقع برای تشخیص نقاطی که بردار نرمال آن ها قابل تعریف نیست و یا همراه با ابهام می‌باشد استفاده شده است، استفاده از آنالیز مقادیر ویژه در این مرحله، تاثیر قابل توجهی برای کسب نتایج رضایت بخش در مرحله خوشه بندی نیز دارد.

آنالیز مقادیر ویژه بدین صورت است که اگر فرض شود که P مجموعه‌ای از نقاط در فضای R^3 است و Σ ماتریس واریانس کواریانس محاسبه شده برای این نقاط باشد، برای این ماتریس مقادیر ویژه $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ تعیین می‌شود. بردار ویژه متناظر با کمترین مقدار ویژه در جهت کمترین واریانس خواهد بود. اگر فرض شود که مجموعه نقاط P روی یک صفحه قرار داشته باشند، این بردار ویژه در واقع جهت بردار نرمال صفحه را مشخص می‌کند. برای اینکه مجموعه نقاط P بر روی یک صفحه قرار داشته باشند باید مقدار λ_1 بسیار کوچک باشد. از آنجا که مجموعه داده لیدار دارای نويز می‌باشد و همچنین با در نظر گرفتن فاکتورهایی از قبیل ناهمواری سطح، منطقی نیست که انتظار داشت مقدار ویژه برابر صفر باشد حتی برای یک

^۲ Local Maxima

بخش‌بندی می‌شوند. برای بخش‌بندی تصویر، فضای ویژگی از دو دامنه مجزا تشکیل شده است: حیطه مکانی و حیطه طیفی (رنگ). هر پیکسل به یک نقطه ویژگی چند بعدی نگاشت می‌شود که شامل حوزه مکانی p بعدی (برای تصویر $p=2$) و حوزه رنگی q بعدی (برای فضای رنگی R^*G^*B ، $q=3$) می‌باشد [۵۲]. به دلیل ماهیت متفاوت دو حوزه، معمولاً هسته‌ها به حاصل ضرب دو هسته شعاعی متقارن شکسته می‌شوند. هنگامی که بردار موقعیت و بردار طیفی ترکیب می‌شوند، بعد فضا برابر $p+q$ می‌شود. سپس هر پیکسل متناظر با یک بردار $p+q$ بعدی می‌شود $x = (x_s, x_r)$. یک هسته شعاعی متقارن و اقلیدسی چند هسته به صورت زیر بیان می‌گردد [۵۳].

$$K_{h_s, h_r}(x) = \frac{c}{(h_s)^p (h_r)^q} k^s \left(\left\| \frac{x^s}{h^s} \right\|^2 \right) k^r \left(\left\| \frac{x^r}{h^r} \right\|^2 \right) \quad (۵)$$

که x_s, x_r به ترتیب قسمت‌های مکانی و طیفی بردار ویژگی، k^s, k^r پروفیل‌های مورد استفاده، h^s, h^r پارامترهای پهنای باند به کار گرفته شده در دو حوزه و c ثابت نرمال سازی می‌باشند. با استفاده از هسته بالا، معادله برآورد تراکم به صورت زیر خواهد بود.

$$\hat{f}(x) = \frac{c}{n(h_s)^p (h_r)^q} \sum_{i=1}^n k^s \left(\left\| \frac{x^s - x_i^s}{h^s} \right\|^2 \right) k^r \left(\left\| \frac{x^r - x_i^r}{h^r} \right\|^2 \right) \quad (۶)$$

فرآیند انتقال میانگین به دنبال یافتن مقدار نهایی $\hat{f}_h(x)$ است که در هر مرحله از طریق انتقال میانگین محاسبه می‌شود و به موقعیت جدید جابه‌جا می‌گردد [۵۴].

۳-۳-۲- تشخیص لبه

مزیت بخش‌بندی تصویر این است که بسیاری از نواحی کوچک که در واقع نشان‌دهنده عارضه قابل اهمیتی نمی‌باشند، حذف می‌شوند. سقف ساختمان دارای قسمت‌های کوچک زیادی می‌باشد. پس از انجام بخش‌بندی این نواحی غیر قابل اهمیت با نواحی بزرگتر ادغام می‌شوند. پس از انجام بخش‌بندی، با استفاده از الگوریتم تشخیص لبه canny لبه‌های سقفی شناسایی می‌شوند. با توجه به اینکه

$$\nabla \hat{f}(x) = \frac{2}{nh^{d+2}} \left[\underbrace{\sum_{i=1}^n g \left(\left\| \frac{x - x_i}{h} \right\|^2 \right)}_{\text{ترم اول}} \right] \quad (۳)$$

$$* \left[\frac{\sum_{i=1}^n x_i g \left(\left\| \frac{x - x_i}{h} \right\|^2 \right)}{\sum_{i=1}^n g \left(\left\| \frac{x - x_i}{h} \right\|^2 \right)} - x \right] \quad \text{ترم دوم}$$

که $g(x) = -k'(x)$ نشان دهنده مشتق پروفیل هسته‌ای انتخاب شده است. ترم اول متناسب با برآورد تراکم می‌باشد. ترم دوم بردار انتقال میانگین (m) نقاط نسبت به جهت بیشینه افزایش در تراکم نامیده می‌شود و متناسب با برآورد گرادیان تراکم در نقطه‌ی x می‌باشد، که توسط هسته‌ی K به دست آمده است.

$$m = \frac{\nabla \hat{f}_K(x)}{\hat{f}(x)_G} = \left(\frac{\sum_{i=1}^n x_i g \left(\left\| \frac{x - x_i}{h} \right\|^2 \right)}{\sum_{i=1}^n g \left(\left\| \frac{x - x_i}{h} \right\|^2 \right)} - x \right) \quad (۴)$$

روند الگوریتم انتقال میانگین برای نقطه‌ی دلخواه x_1 به صورت زیر است [۵۱]:

- I. محاسبه‌ی بردار انتقال میانگین $m(x_i^t)$
- II. انتقال پنجره‌ی برآورد تراکم به محل جدید $x_i^{t+1} = x_i^t + m(x_i^t)$
- III. تکرار مراحل ۱ و ۲ تا زمان همگرایی، یعنی $\nabla \hat{f}(x) = 0$
- IV. یافتن نقاط مرتبط به هر نقطه ثابت یکسان

۳-۳-۳- پردازش فضای تصویر

تصاویر بر خلاف ابر نقطه که دارای ساختار نامنظم بودند، از ساختار منظمی برخوردار هستند و در این مرحله برای پردازش تصویر مربوط به هر ساختمان بر اساس روند ارائه شده در روش پیشنهادی مراحل مختلفی در نظر گرفته شده است.

۳-۳-۱- بخش‌بندی تصویر

پس از جداسازی تصویر مربوط به هر ساختمان از تصویر کلی، این تصاویر با استفاده از الگوریتم انتقال میانگین

قبل از اعمال الگوریتم تشخیص لبه، تصویر بخش‌بندی شده است، لبه‌های مهم باقی مانده است و لبه‌های شناسایی شده نسبت به تصویر اصلی کمتر می‌باشند.

monoploting به صورت اخذ اطلاعات سه بعدی از اندازه-گیری‌های انجام شده روی تک تصویر تعریف می‌شود [۵۶].

$$\begin{aligned} x_a &= x_p - c \frac{r_{11}(X_A - X_o) + r_{21}(Y_A - Y_o) + r_{31}(Z_A - Z_o)}{r_{13}(X_A - X_o) + r_{23}(Y_A - Y_o) + r_{33}(Z_A - Z_o)} \\ y_a &= y_p - c \frac{r_{12}(X_A - X_o) + r_{22}(Y_A - Y_o) + r_{32}(Z_A - Z_o)}{r_{13}(X_A - X_o) + r_{23}(Y_A - Y_o) + r_{33}(Z_A - Z_o)} \quad (7) \\ aX_A + bY_A + cZ_A + d &= 0 \end{aligned}$$

۳-۳-۳ استخراج خطوط

برای سهولت بیشتر در استخراج خطوط، پس از شناسایی لبه‌ها، با استفاده از اطلاعات نقشه دوبعدی محل لبه‌های خارجی سقف هر ساختمان بر روی تصویر مشخص می‌شود و یک ناحیه بافر با فاصله مشخص در اطراف لبه‌ها ایجاد می‌گردد و لبه‌های داخل محدوده بافر جداسازی می‌شوند. در نهایت با استفاده از الگوریتم تبدیل هاف خطوط مربوط به لبه‌های داخل محدوده بافر استخراج می‌شوند.

معادله صفحات سقفی در ترکیب با معادلات شرط هم-خطی، برای به دست آوردن مستقیم اطلاعات سه بعدی از تصاویر منفرد دوبعدی مورد استفاده قرار می‌گیرند [۵۷].

۳-۴-۳ بازسازی دیوار

با یک فرآیند مشابه جداکردن نقاط سقفی و غیر سقفی، با تعیین یک حد آستانه مناسب نقاط زمینی از سایر نقاط غیر سقفی (نقاط مربوط به دیوار و پوشش گیاهی و ...) تفکیک می‌گردند و سپس با استفاده از الگوریتم RANSAC معادله بهترین صفحه برازش شده به نقاط زمینی محاسبه می‌گردد. در نهایت با قرار دادن مولفه‌های مسطحاتی (x,y) نقاط گوشه نقشه در معادله این صفحه، ارتفاع رئوس پایینی دیوارها نیز به دست می‌آید. برای رئوس بالای دیوارها، نزدیکترین بخش‌ها به هر راس نقشه دو بعدی شناسایی می‌شوند و سپس (x,y) مربوط به هر راس نقشه در معادله مربوط به صفحات متناظر قرار داده می‌شوند و ارتفاع آن‌ها محاسبه می‌گردد. بدین صورت می‌توان صفحات مربوط به دیوار ساختمان‌ها را بازسازی نمود.

۴-۳ بازسازی مدل سه بعدی ساختمان

هدف از بازسازی و مدل‌سازی سقف ساختمان‌ها، نمایش قسمت‌های همگن و بخش‌بندی شده سقف ساختمان‌ها به صورت مدل‌های سه بعدی است. این مدل‌های ساختمانی شامل نقاط (رئوس^۳)، خطوط (خطوط شکست^۴) و چندضلعی‌ها^۵ (صفحات سقفی) می‌باشند.

۳-۴-۱ تقاطع بخش‌های مجاور

مرحله اول در فرآیند بازسازی سقف، تولید و ایجاد یک ساختار توپولوژی از قیده‌های همسایگی برای تمام بخش‌های سقفی است و این امر از طریق ایجاد ماتریس همجواری قابل انجام است [۵۵]. در مرحله بعدی، قیده‌های همسایگی برای تعیین رئوس داخلی سقف (حاصل از تقاطع بخش‌ها مجاور) مورد استفاده قرار می‌گیرند.

۴- نتایج عملی و ارزیابی

برای بررسی و ارزیابی روش ارائه شده، در این تحقیق یک مجموعه داده مربوط به شهر اشتوتگارت آلمان مورد استفاده قرار گرفته است. این مجموعه داده شامل چند تصویر هوایی و یک ابر نقطه نامنظم لیدار مربوط به یک محدوده مشخص از شهر می‌باشد. تصویر رقومی با استفاده از دوربین رقومی اخذ شده است و ابر نقاط لیدار توسط سیستم ALTM 1225 شرکت Topscan و در سال ۲۰۰۴ اخذ شده است. ابر نقاط مورد استفاده دارای ساختار نامنظم بوده و تراکم نقاط آن به طور متوسط یک نقطه در متر مربع

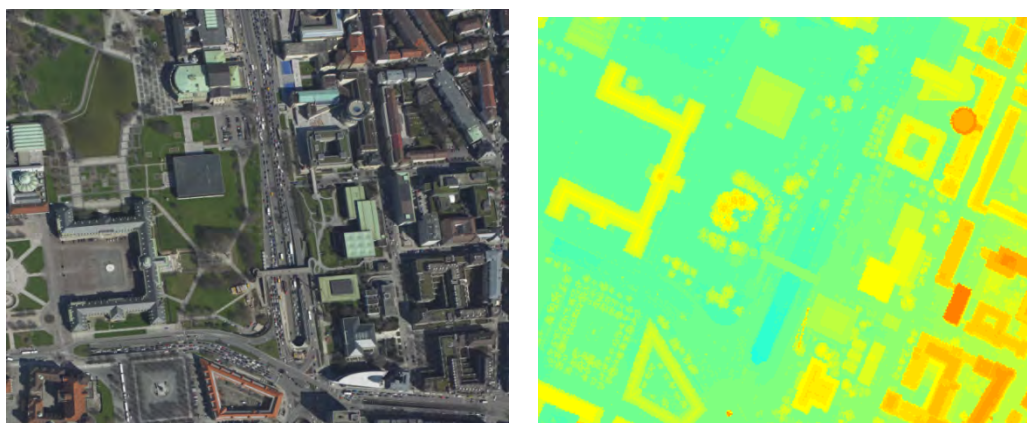
۳-۴-۲ معادلات monoploting

رئوس گوشه با استفاده از لبه‌های استخراج شده در فضای تصویر تعیین می‌شوند. پس از شناسایی و استخراج خطوط بر روی تصویر، خطوط انتخاب شده (نقاط حاصل از تقاطع) به فضای سه بعدی نگاشت می‌شوند و این نگاشت از طریق یک فرآیند monoploting انجام می‌شود. روند

۳ Vertex
 ۴ Break line
 ۵ Polygon

می‌باشد. شکل (۳) ابر نقاط لیدار و تصویر هوایی مربوط به

منطقه مورد مطالعه را نمایش می‌دهد.



شکل ۳- منطقه مورد مطالعه، (الف) داده لیدار ، (ب) تصویر منطقه

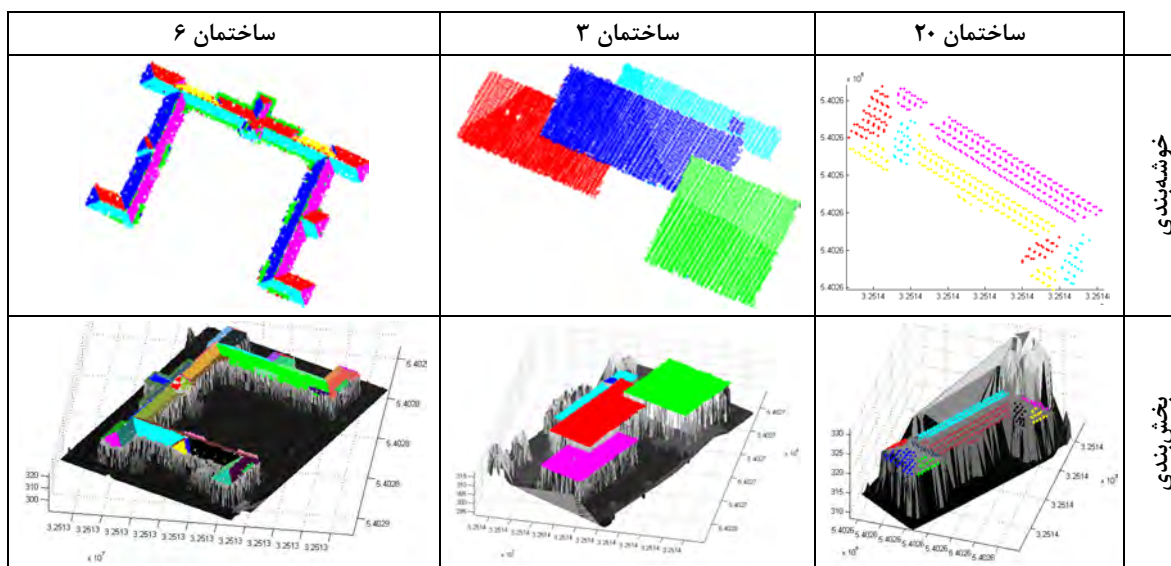
پس از تفکیک نقاط مربوط به هر ساختمان، نقاط سقفی و غیر سقفی از هم جدا می‌شوند و سپس برای شناسایی نقاط دارای ابهام از آنالیز مقادیر ویژه استفاده می‌شود. نتایج مربوط به این مراحل در شکل (۴) نمایش داده شده است.

ساختمان ۶	ساختمان ۳	ساختمان ۲۰	ابر نقطه
			نقاط سقفی
			آنالیز مقادیر ویژه

شکل ۴- مراحل مختلف تفکیک ابر نقاط هر ساختمان تا آنالیز مقادیر ویژه

صورت گرافیکی در شکل (۵) مشاهده می‌شود. در مرحله پایانی فرایند بخش‌بندی، بخش‌های موازی و هم صفحه جداسازی می‌شوند. پس از این مرحله هر بخش نماینده یک صفحه مجزا می‌باشد. نتایج بخش‌بندی نهایی برای ساختمان‌های نمونه در شکل (۵) مشاهده می‌گردد. در شکل (۶) نتیجه بخش‌بندی به دست آمده برای ساختمان‌های موجود در منطقه مورد مطالعه نشان داده شده است.

پس از آنکه نقاط مربوط به هر ساختمان تفکیک شد، آنالیز مقادیر ویژه انجام گرفت و نقاطی که بردار نرمال آن‌ها دارای ابهام بود و یا قابل تعریف نبود از روند خوشه‌بندی کنار گذاشته شد. در این قسمت با استفاده الگوریتم خوشه‌بندی انتقال میانگین، نقاط مربوط به هر ساختمان متناسب با نوع آن و بر اساس بردار ویژگی مناسب، در بخش‌های مجزایی قرار می‌گیرند. خروجی‌های مربوط به مرحله خوشه‌بندی به



شکل ۵- نتایج خوشه بندی و بخش بندی ساختمان های مختلف

$$\rho_d = |n_x x + n_y y + n_z z + \rho| \quad (۸)$$

با قید اینکه $n_x^2 + n_y^2 + n_z^2 = 1$ باشد.

جدول ۱- ارزیابی دقت بخش بندی

No	Pt	Min(m)	Max(m)	Mean(m)	σ (m)
1	2966	0.00034	1.0023	0.2429	0.1735
2	30	0.00056	0.0874	0.0245	0.0212
3	3958	0.00001	0.4261	0.0818	0.0631
4	796	0.00008	0.3194	0.0465	0.0386
5	3606	0.00014	0.6598	0.0848	0.0678

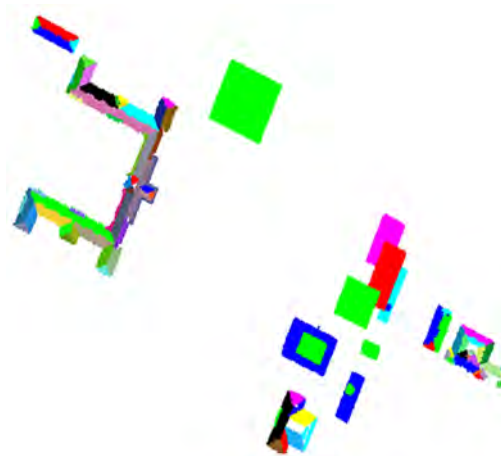
۴-۲- استخراج لبه های سقف

پس از جداسازی تصویر مربوط به هر ساختمان از تصویر کلی، این تصاویر با استفاده از الگوریتم انتقال میانگین بخش بندی می شوند. مزیت بخش بندی تصویر این است که بسیاری از نواحی کوچک که در واقع نشان دهنده عارضه قابل اهمیتی نمی باشند، حذف می شوند. پس از انجام بخش بندی، با استفاده از الگوریتم تشخیص لبه canny لبه های سقفی شناسایی می شوند. با توجه به اینکه تصویر از بخش بندی شده است، لبه های مهم باقی مانده است و لبه های شناسایی شده نسبت به تصویر اصلی کمتر می باشند، که در شکل (۷) مشاهده می گردد.

برای سهولت بیشتر در استخراج خطوط، پس از شناسایی لبه ها، با استفاده از اطلاعات نقشه دوبعدی محل لبه های خارجی سقف هر ساختمان بر روی تصویر

۴-۱- ارزیابی دقت و صحت بخش بندی

در شکل (۶) نتیجه بخش بندی به دست آمده برای ساختمان های موجود در منطقه مورد مطالعه نشان داده شده است.








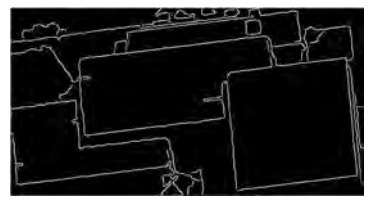
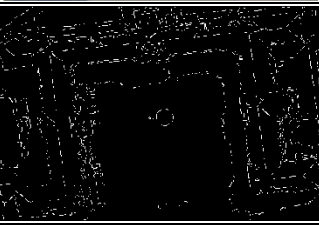
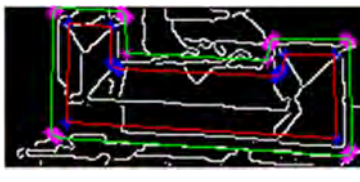
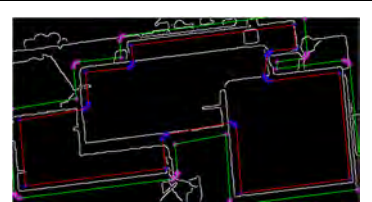

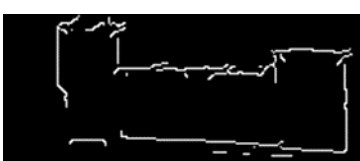


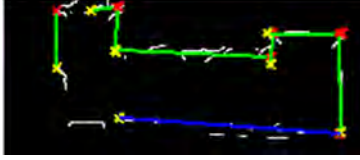
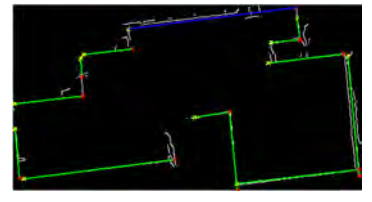
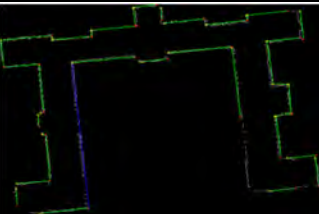


شکل ۶- نتیجه بخش بندی منطقه مورد مطالعه

برای ارزیابی بخش بندی انجام شده، می توان دو معیار را در نظر گرفت که عبارتند از، فرض ماهیت چند وجهی بودن سقف ساختمان ها و همچنین تعیین صحیح پارامترهای سطح. پس از اینکه نقاط مربوط به سقف هر ساختمان بخش بندی شدند، فاصله قائم آن ها از صفحه متناظر که فرش می شود بر روی آن قرار دارند، محاسبه می گردد.

تبدیل‌ها، خطوط مربوط به لبه‌های داخل محدوده بافر استخراج می‌شوند. در شکل (۷) مراحل مختلف برای استخراج خطوط مربوط به لبه‌های سقف در ساختمان‌های مختلف نشان داده شده است.

مشخص می‌شود و یک ناحیه بافر با فاصله مشخص در اطراف لبه‌ها ایجاد می‌گردد و به طوری که در شکل (۷) نشان داده شده است، لبه‌های داخل محدوده بافر جداسازی می‌شوند. در نهایت با استفاده از الگوریتم

تصویر	ساختمان ۲۰	ساختمان ۳	ساختمان ۶
			
			
			
			
			
			

شکل ۷- مراحل مختلف استخراج لبه از تصویر هوایی

۳-۴- بازسازی مدل ساختمان

در مرحله بازسازی، با توجه به گروه ساختمان‌ها (مسطح یا شیب دار) روند بازسازی متفاوت است. در مورد ساختمان‌های با سقف شیب‌دار، در مرحله اول برای هر ساختمان ماتریس همجواری ایجاد می‌گردد و پس از شناسایی بخش‌های مجاور با یکدیگر تقاطع داده می‌شوند. رئوس داخلی سقف ساختمان‌های شیب‌دار از تقاطع بخش‌های مجاور محاسبه می‌گردد. لبه‌های خارجی سقف‌ها از تصویر استخراج می‌گردد و همچنین دیوارها نیز با استفاده از اطلاعات مربوط به پلیگون نقشه دو بعدی بازسازی می‌گردند. در مورد بازسازی ساختمان‌های با سقف مسطح، امکان تقاطع بخش‌های مختلف لیدار وجود ندارد و در واقع اطلاعات تصویر نقش کلیدی در بازسازی ساختمان‌های با سقف مسطح دارند، به ویژه در مورد ساختمان‌هایی که دارای چندین لایه مختلف ارتفاعی هستند (همانند ساختمان شماره (۳)). در فرایند بازسازی ساختمان‌های با سقف مسطح کاربرد بخش‌های لیدار محدود به استفاده در معادلات *monoplotting* می‌باشد.

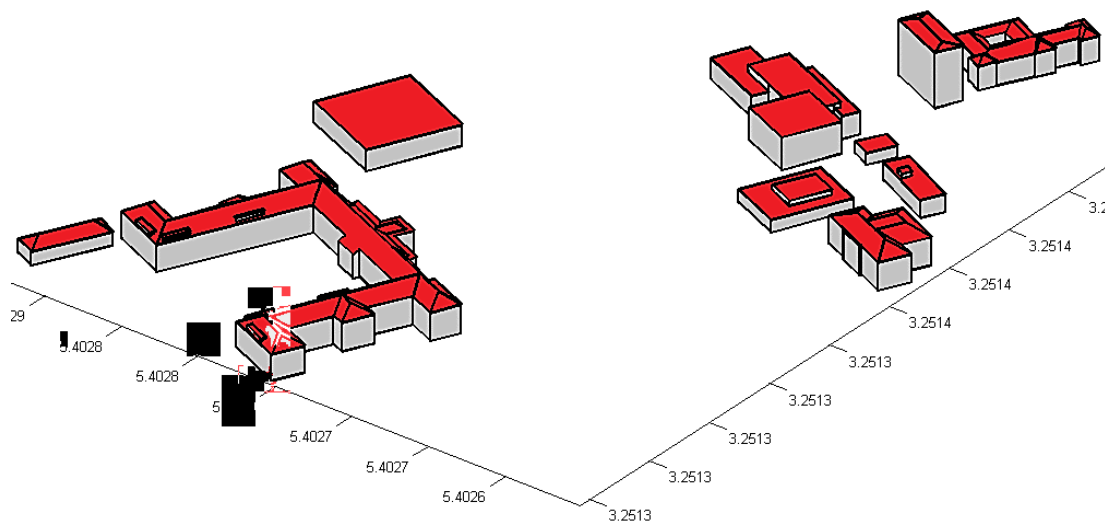
پس از استخراج خطوط مربوط به لبه‌های سقف، این خطوط با یکدیگر تقاطع داده می‌شوند. سپس این نقاط به فضای سه بعدی زمین انتقال می‌یابند. پلیگون حاصل از نقاط انتقال یافته و پلیگون مربوط به نقشه در حالت دوبعدی با هم مقایسه می‌شوند و اگر نسبت مساحت پلیگون حاصل از نقاط تصویری (در حالت دو بعدی) به پلیگون نقشه، از یک حد مشخص بیشتر باشد، نشان

دهنده این است که لبه‌های سقف ساختمان نسبت به مرز دیوار جلو آمده است. در این حالت از نقاط تصویری انتقال یافته برای بازسازی لبه‌های بیرونی سقف و از پلیگون نقشه برای بازسازی دیوارها استفاده می‌گردد.

در مورد ساختمان‌های با سقف مسطح که دارای چندین لایه ارتفاعی مختلف می‌باشند، در رئوس داخلی، امکان تقاطع صفحات مجاور وجود ندارد. برای شناسایی و بازسازی این رئوس (لبه‌های پلکانی) بدین صورت عمل می‌شود که برای بخش‌های لیدار مجاور، فاصله تمام نقاط دو بخش با یکدیگر محاسبه می‌گردد. سپس نقاطی که فاصله آن‌ها کمتر از یک مقدار معین (مثلاً ۲ متر) باشد، تفکیک می‌شوند. در مرحله بعد این نقاط به فضای تصویر نگاشت می‌شوند و یک تصویر ماسک ایجاد می‌گردد. با قرار دادن تصویر ماسک بر روی لبه‌های شناسایی شده، لبه‌هایی (لبه پلکانی) که مربوط به محدوده مورد نظر می‌باشند، تفکیک می‌گردند.

۴-۴- ارزیابی مدل‌های سه بعدی

در محدوده مورد مطالعه چندین ساختمان با ابعاد، ساختار، شکل و بافت متفاوت برای ارزیابی کارایی و قابلیت روش ارائه شده انتخاب شدند. مدل سه بعدی ساختمان‌ها به صورت دستی به عنوان داده مرجع و برای مقایسه با مدل‌های سه بعدی بازسازی شده با استفاده از روش ارائه شده، تولید شده‌اند.



شکل ۸- نتیجه نهایی بازسازی مدل سه بعدی ساختمان‌های موجود در منطقه مورد مطالعه

جدول ۳- ارزیابی هندسی مدل بازسازی شده ساختمان ۲۰

Vertex	dX (m)	dY (m)	dZ (m)
1	-0.319	-0.347	-0.082
2	-0.173	-0.057	0.059
3	-0.213	-0.097	0.101
4	-0.244	-0.416	-0.084
5	-0.119	-0.123	0.030
6	0.232	0.178	-0.099
7	0.080	-0.462	-0.172
8	0.503	0.133	0.193
10	0.185	0.009	0.002
11	0.240	-0.0001	0.008
12	0.263	0.308	0.115
13	0.155	-0.017	0.029
RMSE	0.240	0.228	0.096
RMSE _H	0.234		
RMSE _T	0.199		

۵- نتیجه گیری

روش پیشنهادی بر روی داده‌های موجود برای قسمتی از شهر اشتوتگارت آلمان پیاده‌سازی شد و نتایج به دست آمده نشان دهنده این واقعیت است که بازسازی مدل سه بعدی ساختمان فرآیندی زمان‌بر و چالش برانگیز است و همچنین ارائه روشی جامع برای مناطق مختلف و وسیع و همچنین انواع مختلف ساختمان، کاری پیچیده و مشکل است.

خطای کمترین مربعات به دست آمده کلی برای بازسازی مدل سه بعدی برابر (dx: ۰/۴۱، dy: ۰/۴۵، dz: ۰/۱۵) می‌باشد. با توجه به نتایج به دست آمده برای ارزیابی هندسی مدل‌های بازسازی شده، می‌توان نتیجه گرفت که به طور کلی با افزایش سطح پیچیدگی ساختمان خطای بازسازی افزایش می‌یابد، به طوری که بیشترین خطای کمترین مربعات مربوط به ساختمان ۶ با مقدار (۰/۷۰۹ متر) می‌باشد. البته با توجه به اینکه داده‌های مرجع واقعی در دسترس نیست، نمی‌توان در مورد دقت و صحت مطلق مدل‌های به دست آمده اظهار نظر کرد. مقادیر عددی ارائه شده برای ارزیابی هندسی صرفاً به صورت نسبی می‌باشند.

گروه‌بندی ساختمان‌های موجود به دو گروه ساختمان‌های با سقف مسطح و شیب‌دار یک روند ابتکاری است و با انجام این کار، اتخاذ روش مناسب برای بخش-

۴-۵- ارزیابی کمی (صحت، درستی و تمامیت)

در مرحله آنالیز کمی مدل‌های سه بعدی بازسازی شده، صحت و تمامیت مدل‌های بازسازی شده با استفاده از معادلات زیر قابل محاسبه است [۲۹].

$$Completeness = \frac{TP}{TP + FN} \quad (9)$$

$$Correctness = \frac{TP}{TP + FP} \quad (10)$$

که TP تعداد صفحات سقفی صحیح، FP تعداد صفحات سقفی غیر صحیح و FN تعداد صفحات سقفی شناسایی نشده است.

جدول ۲- ارزیابی کمی بازسازی ساختمان‌های مختلف

B_No	TP	FN	FT	Complete	Correct
2	9	1	0	0.9	1
3	5	0	0	1	1
4	23	5	1	0.821	0.958
6	44	5	4	0.898	0.958
8	4	0	0	1	1
9	2	0	0	1	1
11	1	0	0	1	1
14	3	0	0	1	1
20	9	1	0	0.9	1
24	2	1	0	0.667	1

۴-۶- صحت هندسی

یک معیار دیگر برای ارزیابی مدل‌های سه بعدی بازسازی شده، برآورد صحت هندسی این مدل‌ها می‌باشد، در این تحقیق تمرکز اصلی بحث صحت هندسی بر روی برآورد صحت هندسی مسطحاتی می‌باشد. بر اساس آنالیزهای صحت و تمامیت، تعدادی از صفحات سقفی که به صورت صحیح بازسازی شده‌اند، انتخاب می‌گردند. برای یک صفحه سقفی، هر راس آن با نقطه متناظرش در داده مرجع و در راستای مسطحاتی مقایسه می‌شوند. در شکل (۶) ابر نقطه، تصویر و مدل سه بعدی بازسازی شده مربوط به یک ساختمان نمونه و در جدول (۳) مقادیر عددی مربوط به مقایسه مدل بازسازی شده با داده مرجع آن ارائه شده است.



شکل ۹- مدل سه بعدی ساختمان (۲۰)

پوشش داده شده است. یکی دیگر از مزایای استفاده از تصاویر هوایی، بازسازی مدل سه بعدی ساختمان‌های با سقف مسطح و چندلایه‌ای می‌باشد. از آنجاکه این لایه‌های مختلف موازی می‌باشند و امکان تقاطع با هم ندارند و بازسازی آن‌ها صرفاً با استفاده از اطلاعات ابر نقاط لیدار مشکل است، اما با اطلاعات موجود در تصاویر این امر امکان پذیر است.

بندی و بازسازی مدل سه بعدی هر کدام از انواع ساختمان‌ها بسیار آسان‌تر است. استفاده از اطلاعات نقشه دو بعدی در این تحقیق، فرآیند شناسایی و تفکیک نقاط مربوط به هر ساختمان را بسیار آسان نموده است و از درگیر شدن در مسائل مربوط به فیلتر کردن نقاط مربوط به ساختمان‌ها و پیچیدگی‌های خاص آن پرهیز شده است. یکی از نقاط ضعف ابر نقاط لیدار که غیر دقیق بودن لبه‌ها می‌باشد، با وجود استفاده از اطلاعات تصویر موجود،

مراجع

- [1] G. Vosselman and H. Maas, "Airborne and Terrestrial Laser Scanning," *Taylor & Francis*, 2010.
- [2] J. C. McGlone and J. A. Shufelt, "Projective and object space geometry for monocular building extraction," in *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 1994, pp. 54–61.
- [3] A. Huertas and R. Nevatia, "Detecting Buildings in Aerial Images," *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, pp. 131–152, 1988.
- [4] C. Lin and R. Nevatia, "Building Detection and Description from a Single Intensity Image," *Computer vision and image understanding*, vol. 72, no. 2, pp. 101–121, 1998.
- [5] C. Baillard and H. Maître, "3-D Reconstruction of Urban Scenes from Aerial Stereo Imagery : A Focusing Strategy," vol. 76, no. 3, pp. 244–258, 1999.
- [6] Z. W. Kim and R. Nevatia, "Automatic description of complex buildings from multiple images," *Computer Vision and Image Understanding*, pp. 60–95, 2004.
- [7] K. Hammoudi and F. Dornaika, "A Featureless Approach to 3D Polyhedral Building Modeling from Aerial Images," pp. 228–259, 2011.
- [8] F. Shi, Y. Xi, X. Li, and Y. Duan, "An Automation System of Rooftop Detection and 3D Building Modeling from Aerial Images," pp. 383–396, 2011.
- [9] M. Awrangjeb, C. Zhang, and C. S. Fraser, "Automatic Reconstruction of Building Roofs Using LIDAR and Multispectral Imagery," in *International Conference on Digital Image Computing: Techniques and Applications*, 2011, pp. 2–7.
- [10] K. Kim and J. Shan, "Building roof modeling from airborne laser scanning data based on level set approach," *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 66, no. 4, pp. 484–497, 2011.
- [11] M. Satari, "A MULTI-RESOLUTION HYBRID APPROACH FOR BUILDING MODEL RECONSTRUCTION," vol. 27, no. September, pp. 330–359, 2012.
- [12] Q. Zhou and U. Neumann, "Complete residential urban area reconstruction from dense aerial LiDAR point clouds," *GRAPHICAL MODELS*, pp. 1–8, 2012.
- [13] H. Maas, "Closed solutions for the determination of parametric building models from invariant moments of airborne laserscanner data," pp. 8–10, 1999.

- [14] G. Vosselman, "BUILDING RECONSTRUCTION USING PLANAR FACES IN VERY HIGH DENSITY HEIGHT DATA," 1998.
- [15] I. Suveg and G. Vosselman, "Reconstruction of 3D building models from aerial images and maps," vol. 58, pp. 202–224, 2004.
- [16] G. Vosselman and S. Dijkman, "3D BUILDING MODEL RECONSTRUCTION FROM POINT CLOUDS AND GROUND PLANS," *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. XXXIV, pp. 22–24, 2001.
- [17] J. Overby, L. Bodum, E. Kjems, and P. Cloud, "AUTOMATIC 3D BUILDING RECONSTRUCTION FROM AIRBORNE LASER SCANNING AND CADASTRAL DATA USING HOUGH TRANSFORM," 2004.
- [18] E. Schwalbe, H. Maas, and F. Seidel, "3D BUILDING MODEL GENERATION FROM AIRBORNE LASER SCANNER DATA USING 2D GIS DATA AND ORTHOGONAL POINT CLOUD PROJECTIONS," in *ISPRS WG III/3, III/4, V/3 Workshop "Laser scanning 2005"*, 2005, pp. 209–214.
- [19] G. Vosselman, "Fusion of Laser Scanning Data, Maps, and Aerial Photographs for Building Reconstruction," in *Int'l Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS)*, IEEE Press, 2002, pp. 85–88.
- [20] N. Demir and E. Baltsavias, "AUTOMATED MODELING OF 3D BUILDING ROOFS USING IMAGE AND LIDAR DATA," no. 1, 2003.
- [21] R. Ma, "BUILDING MODEL RECONSTRUCTION FROM LIDAR DATA AND AERIAL PHOTOGRAPHS," 2004.
- [22] L. Chen, T. Teo, and J. Rau, "Building Reconstruction from LIDAR Data and Aerial Imagery," vol. 00, no. 1, pp. 5–8, 2005.
- [23] Y. Hongjian and Z. Shiqiang, "3D building reconstruction from aerial CCD image and sparse laser sample data," vol. 44, no. 8, pp. 555–566, 2006.
- [24] A. Novacheva, "BUILDING ROOF RECONSTRUCTION FROM LIDAR DATA AND AERIAL IMAGES THROUGH PLANE EXTRACTION AND COLOUR EDGE DETECTION," pp. 53–58, 2007.
- [25] C. Kim, "Object-based Integration of Photogrammetric and LiDAR Data for Accurate Reconstruction and Visualization of Building Models," 2008.
- [26] Y. Yu, B. P. Buckles, and X. Liu, "Residential Building Reconstruction Based on the Data Fusion of Sparse LiDAR Data and Satellite Imagery *," pp. 240–251, 2009.
- [27] H. Li, S. Chen, Z. Wang, W. Li, and E. Beijing, "FUSION OF LIDAR DATA AND ORTHOIMAGE FOR AUTOMATIC BUILDING RECONSTRUCTION," pp. 1194–1197, 2010.
- [28] L. Cheng, J. Gong, M. Li, and Y. Liu, "3D Building Model Reconstruction from Multi-view Aerial Imagery and Lidar Data," vol. 77, no. 2, pp. 125–139, 2011.
- [29] L. Cheng, L. Tong, Y. Chen, W. Zhang, J. Shan, Y. Liu, and M. Li, "Integration of LiDAR data and optical multi-view images for 3D reconstruction of building roofs," *Optics and Lasers in Engineering*, pp. 1–10, 2012.
- [30] H. Arefi and P. Reinartz, "Building Reconstruction Using DSM and Orthorectified Images," pp. 1681–1703, 2013.
- [31] L. Chen, T. Teo, Y. Shao, Y. Lai, and J. Rau, "FUSION OF LIDAR DATA AND OPTICAL IMAGERY FOR BUILDING MODELING," *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, pp. 2–7, 2004.
- [32] J. Rau and B. Lin, "Automatic roof model reconstruction from ALS data and 2D ground plans based on side projection and the TMR algorithm," *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 66, no. 6, pp. S13–S27, 2011.
- [33] S. Wang, "Simple Building Reconstruction from Lidar Data and Aerial Imagery," vol. 1, 2012.

- [34] E. Kwak and A. Habib, "AUTOMATIC 3D BUILDING MODEL GENERATION FROM LIDAR AND IMAGE DATA USING SEQUENTIAL MINIMUM BOUNDING RECTANGLE," in *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2012, vol. XXXIX, no. September.
- [35] L. Tong, M. Li, Y. Chen, Y. Wang, W. Zhang, and L. Cheng, "A Research on 3 D Reconstruction of Building Rooftop Models from LiDAR Data and Orthophoto," no. 4, pp. 0–4, 2012.
- [36] A. Henn, G. Gröger, V. Stroh, and L. Plümer, "Model driven reconstruction of roofs from sparse LIDAR point clouds," *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 76, pp. 17–29, 2013.
- [37] H. Huang, C. Brenner, and M. Sester, "A generative statistical approach to automatic 3D building roof reconstruction from laser scanning data," *ISPRS JOURNAL OF PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING*, vol. 79, pp. 29–43, 2013.
- [38] S. Pu and G. Vosselman, "AUTOMATIC EXTRACTION OF BUILDING FEATURES FROM TERRESTRIAL LASER SCANNING," *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. 36, no. 5, 2006.
- [39] M. Jarzabek-Rychard, "IMPLEMENTATION OF 3 D POINT CLOUDS SEGMENTATION BASED ON PLANE GROWING METHOD," *Practical Aspects of Geodesy and Cartography*, pp. 1–7, 2010.
- [40] W. Zhao, L. Cheng, L. Tong, Y. Liu, and M. Li, "Robust Segmentation of Building Points from Airborne LiDAR Data and Imagery," no. 41001238, 2011.
- [41] J. Overby, L. Bodum, E. Kjems, and P. Cloud, "AUTOMATIC 3D BUILDING RECONSTRUCTION FROM AIRBORNE LASER SCANNING AND CADASTRAL DATA USING HOUGH TRANSFORM," *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 35, pp. 296–301, 2004.
- [42] F. Tarsha-Kurdi and P. Grussenmeyer, "HOUGH-TRANSFORM AND EXTENDED RANSAC ALGORITHMS FOR AUTOMATIC DETECTION OF 3D BUILDING ROOF PLANES FROM LIDAR DATA," *Science And Technology*, vol. XXXVI, no. 1, pp. 407–412, 2007.
- [43] H. Huang and C. Brenner, "Rule-based Roof Plane Detection and Segmentation from Laser Point Clouds," no. 1, pp. 293–296, 2011.
- [44] F. Tarsha-Kurdi, T. Landes, and P. Grussenmeyer, "EXTENDED RANSAC ALGORITHM FOR AUTOMATIC DETECTION OF BUILDING," *The photogrammetric journal of Finland*, vol. 21, pp. 97–109, 2008.
- [45] T. M. Awwad, "An Extension of ' SEQ-NV-RANSAC ' Approach To Avoid Bad-segmentation Cases From Unstructured 3D Point Clouds Using Topology Information," no. 1, pp. 9–12, 2009.
- [46] M. Y. Yang and F. Wolfgang, "Plane Detection in Point Cloud Data," no. 1, 2010.
- [47] A. Sampath and J. Shan, "Clustering based planar roof extraction from lidar data," in *ASPRS Annual Conference*, 2006, no. 2004.
- [48] J. M. Biosca and J. L. Lerma, "Unsupervised robust planar segmentation of terrestrial laser scanner point clouds based on fuzzy clustering methods," *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* 63, vol. 63, pp. 84–98, 2008.
- [49] A. Sampath and J. Shan, "Segmentation and Reconstruction of Polyhedral Building Roofs From Aerial Lidar Point Clouds," *IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING*, vol. 48, no. 3, pp. 1554–1567, 2010.
- [50] K. Fukunaga and L. D. Hostetler, "The Estimation of the Gradient of a Density Function , with Applications in Pattern - Recognition," vol. lim, no. 4, pp. 32–40, 1975.
- [51] K. G. Derpanis, "Mean Shift Clustering," vol. 1, no. x, pp. 1–4, 2005.
- [52] J. Wang, B. Thiesson, Y. Xu, and M. Cohen, "Image and Video Segmentation by Anisotropic Kernel Mean Shift."
- [53] F. Wan and F. Deng, "Remote Sensing Image Segmentation Using Mean Shift Method," pp. 86–90, 2011.

- [54] B. Varga and K. Karacs, "High-resolution image segmentation using fully parallel mean shift," pp. 1–17, 2011.
- [55] A. Sampath, "SEGMENTATION AND RECONSTRUCTION OF POLYHEDRAL BUILDINGS FROM AERIAL LIDAR POINT CLOUD," Purdue University, West Lafayette, Indiana, 2010.
- [56] B. Makarovic, "Digital mono-plotters," ITC Journal, vol. 4, pp. 583–599, 1973.
- [57] A. M. Y. Jarvis, "Integration of Photogrammetric and LiDAR Data for Accurate Reconstruction and Visualization of Urban Environments," UNIVERSITY OF CALGARY, 2008.