

استخراج و بازسازی سه بعدی عارضه ساختمان با استفاده از داده‌های اپتیکی و لیدار

اصغر زارع^۱، علی محمدزاده^{۲*}، محمدجواد ولدان زوج^۳

^۱کارشناس ارشد سنجش از دور - دانشکده مهندسی نقشه‌برداری - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
h_zarea80@yahoo.com

^۲استادیار دانشکده مهندسی نقشه‌برداری - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
almoh2@gmail.com

^۳دانشیار دانشکده مهندسی نقشه‌برداری - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
valadanzouj@kntu.ac.ir

(تاریخ دریافت شهریور ۱۳۹۲، تاریخ تصویب آبان ۱۳۹۳)

چکیده

در این مقاله روشی جهت آشکارسازی ساختمان‌ها و بازسازی مدل سه بعدی آن‌ها از طریق تصویر هوایی و داده‌های لیدار ارائه شده است. این پژوهش شامل سه مرحله کلی آشکارسازی ساختمان‌ها، بازسازی مرز دو بعدی ساختمان‌ها و بازسازی مدل سه بعدی ساختمان‌ها می‌باشد. در مرحله آشکارسازی ساختمان‌ها، عوارض غیرزمینی (درختان و ساختمان‌ها) از روی داده‌های لیدار استخراج می‌شوند و سپس جهت تفکیک ساختمان‌ها از درختان، طبقه‌بندی براساس ماشین‌های بردار پشتیبان (SVMs) بکار گرفته شده است. داده‌های آموزشی جهت انجام طبقه‌بندی ماشین‌های بردار پشتیبان بصورت نیمه‌اتوماتیک انتخاب شده است. جهت بهبود نتایج آشکارسازی ساختمان‌ها نیز ابتدا از عملگرهای مورفولوژی ریاضی استفاده شده است و سپس جداسازی ساختمان‌های غیرهم‌ارتفاع بر اساس دسته‌بندی K-Means انجام گرفته است. نتایج ارزیابی‌ها موفقیت روش پیشنهادی را در آشکارسازی ساختمان‌های بزرگ و کوچک نشان می‌دهند بطوری که شاخص‌های پیکسل‌مبنا جامع‌بودن، صحیح بودن و کیفیت برای روش پیشنهادی به ترتیب $0.99/10$ ، $0.86/60$ ، $0.85/92$ می‌باشند. در مرحله بازسازی مرز دو بعدی ساختمان‌ها، مرزهای دو بعدی ساختمان‌ها بعد از برداری کردن با خلاصه‌سازی و عمودسازی استخراج گردیده‌اند. در این تحقیق، بازسازی سه بعدی ساختمان در سطح LOD2 انجام گرفته است. جهت کشف ساختار سقف ساختمان‌ها، ابتدا پارامترهای صفحه برازش یافته به نقاط لیدار بدست می‌آیند و با در نظر گرفتن این پارامترها بعنوان ویژگی‌های هر ساختمان، دسته‌بندی ISO-DATA انجام گرفته است که در نهایت نتایج این دسته‌بندی بیانگر تعداد سطوح صفحه‌ای هر ساختمان می‌باشد. با ادغام صفحات نزدیک و موازی و برازش صفحه به هر سطح صفحه‌ای، تعداد و پارامترهای سطوح صفحه‌ای هر ساختمان مشخص گردیده است. با تقاطع این سطوح و بدست آوردن نقاط میانی و نقاط مرزی هر ساختمان، ساختار سقف ساختمان‌ها بازسازی شده‌اند. دیوارهای ساختمان نیز بطور قائم بر روی مرز دو بعدی ساختمان قرار گرفته‌اند. مقدار RMS ارتفاعی صفحات تعیین شده برای ساختار سقف ساختمان‌ها 0.4 متر و مقدار خطای RMS کلی رئوس پلیگون‌های این صفحات 0.9 متر می‌باشد.

واژگان کلیدی: آشکارسازی ساختمان، بازسازی سه‌بعدی ساختمان، لیدار، ماشین‌های بردار پشتیبان، عملگرهای مورفولوژی، سطوح صفحه‌ای

۱- مقدمه

بازسازی ساختمان از تک‌تصویر ماهواره‌ای پیشنهاد کردند. وی و همکاران بعد از بازسازی مرز ساختمان‌ها ارتفاع ساختمان‌ها را از طریق سایه ساختمان‌ها بدست آوردند و با انتقال مرز ساختمان‌ها در امتداد قائم به اندازه ارتفاع تخمین‌زده شده، ساختمان را بصورت سه بعدی بازسازی کردند. در همین سال، W.Langyue [۸]، یک روش شی-گرا را برای استخراج سه‌بعدی ساختمان با استفاده از تصاویر هوایی و داده‌های لیدار بکار برد که در استخراج ساختمان سطوح مختلفی از اتوماسیون (استخراج با نظارت اپراتور، استخراج بصورت نیمه‌اتوماتیک و استخراج بصورت تمام اتوماتیک) را تست کرد. روشی که در سال ۲۰۰۸، توسط S.R.Lach [۹]، توسعه داده شد یک روش نیمه‌اتوماتیک برای مدلسازی منظر شهری از روی داده‌های لیدار و تصاویر غیرفعال^۲ بود در این بازسازی منظر ساختمان‌ها و درختان مدنظر قرار گرفت. در همین سال A.Jarvis [۱۰]، نیز یک روش نیمه‌اتوماتیک را برای بازسازی و بصری‌سازی دقیق محیط شهری با استفاده از تلفیق داده‌های لیدار و تصاویر هوایی ارائه داد. روشی که توسط J.Shan و A.Sampath [۱۱] در سال ۲۰۱۰ جهت بازسازی ساختمان پیشنهاد شده است از ابر نقاط داده‌های لیدار استفاده می‌کند و بر مبنای قطعه‌بندی ابر نقاط می‌باشد. در سال ۲۰۱۲، مصطفی کابلی‌زاده و همکاران [۵]، جهت بازسازی سه‌بعدی ساختمان از الگوریتم ژنتیک استفاده کرده‌اند. در این روش تنها از داده‌های لیدار جهت بازسازی سه‌بعدی ساختمان استفاده شده است.

پارامترهای بکار گرفته شده

پارامتر	توضیح
th1	حدآستانه کشف نویز در داده‌های نقطه‌ای لیدار
th2	حدآستانه حذف عوارض زمینی
th3	حدآستانه کشف مقادیر بالای ویژگی‌ها
th4	حدآستانه کنترل‌کننده شاخص جامع بودن یا صحیح بودن در ساختمان‌های کشف شده
th5	حدآستانه تعیین‌کننده لبه‌های ساختمان با طول کافی
b	پارامتر کنترل‌کننده سطح اطمینان داده‌های آموزشی انتخاب شده
C	پارامتر جریمه در طبقه‌بندی SVMs
g	پارامتر تابع کرنلی گوسین در طبقه‌بندی SVMs

تحقیقات انجام گرفته در زمینه آشکارسازی ساختمان از اواخر سال ۱۹۸۰ میلادی شروع شده است [۱]. به موازات آشکارسازی ساختمان، بازسازی مدل سه بعدی ساختمان نیز جهت ایجاد دید بصری و شبیه‌سازی محیط شهری مورد توجه قرار گرفته است. از جمله موضوعات مهم در این راستا سطح اتوماسیون روش‌های بکار گرفته می‌باشد که بدلیل پیچیده بودن مناظر شهری، کامل نبودن ویژگی‌های استخراج و وابستگی سیستم‌های استخراج عارضه به سنجنده امکان ارائه روشی ۱۰۰٪ اتوماتیک وجود ندارد [۲]. ضرورت‌های مهم در ارتباط با استخراج دوبعدی ساختمان‌ها شامل به روزرسانی نقشه-های رقومی و پایگاه داده‌های GIS [۳]، کشف تغییرات ساختمان‌ها، برنامه‌ریزی شهری، مدیریت در مواقع بحرانی مثل سیل، زلزله و ایجاد امنیت شهری و مهم برای صنعت معاملات املاک [۴] می‌باشد. از جمله ضرورت‌های مهم در ارتباط با بازسازی سه‌بعدی ساختمان‌ها می‌توان به مدل سازی دیجیتال شهری، توسعه شهرهای مجازی، توسعه گردشگری مجازی، توسعه صنعت بازی‌های کامپیوتری [۳]، ارتباطات بی‌سیم و سیستم اطلاعات مجازی برای توریست‌ها [۵] اشاره کرد. در این مقاله، پیشینه تحقیقات انجام گرفته در این زمینه در بخش ۲ مورد بررسی قرار گرفته است. در بخش ۳ منطقه مطالعاتی بیان گردیده است. در بخش ۴ روش پیشنهادی جهت آشکارسازی ساختمان و بازسازی سه بعدی آن تشریح شده است و بخش ۵ شامل نتایج پیاده‌سازی روش پیشنهادی می‌باشد و در نهایت در بخش ۶ نتیجه‌گیری‌ها ارائه گردیده است.

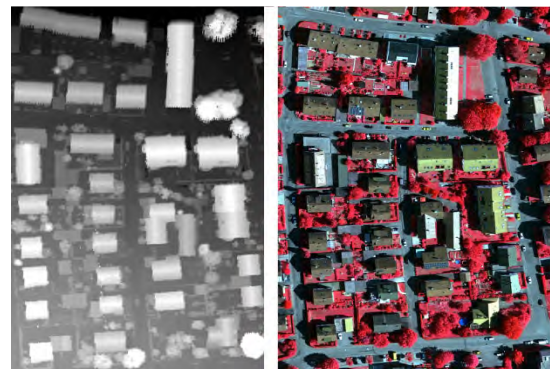
۲- پیشینه تحقیق

F. Rottensteiner و همکاران [۶] در سال ۲۰۰۳ با ترکیب داده‌های لیدار و تصاویر چند طیفی روشی اتوماتیک را جهت کشف ساختمان‌ها و قطعه‌های بام ارائه دادند و سپس با روش رشد ناحیه^۱ بازسازی صفحات بام ساختمان‌ها را انجام دادند. در سال ۲۰۰۷، T.kim و همکاران [۷] یک روش نیمه‌اتوماتیک را برای استخراج و

^۲ Passive Images^۱ Region growing

۳- منطقه مطالعاتی

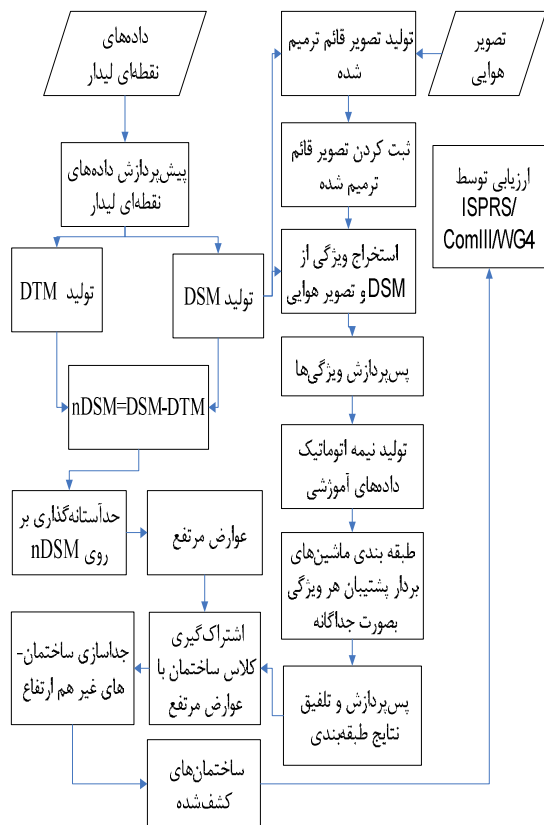
مجموعه داده مورد استفاده در این تحقیق مربوط به منطقه Vaihingen از کشور آلمان می‌باشد که توسط کمیسیون III- گروه کاری ۴ از جامعه بین‌المللی فتوگرامتری و سنجش از دور^۱ جهت انجام تحقیقات در زمینه استخراج عارضه و بازسازی سه بعدی ساختمان‌ها آماده سازی گردیده است. تصاویر هوایی موجود از منطقه توسط دوربین دیجیتالی Intergraph/ZI DMC اخذ شده- اند که دارای قدرت تفکیک مکانی ۸ سانتی‌متر و دارای سه باند مادون قرمز IR، قرمز R و سبز G می‌باشند. تمامی تصاویر اطلاعات مربوط به پارامترهای توجیه داخلی و خارجی را دارا می‌باشند [۱۲].



شکل ۱- منطقه مطالعاتی (الف) تصویر هوایی منطقه (ب) مدل رقومی سطح منطقه

۴-۱- آشکارسازی ساختمان

روندنمای کلی آشکارسازی ساختمان در شکل ۲ نشان داده شده است و مراحل این آشکارسازی در ادامه تشریح شده است.



شکل ۲- روندنمای روش پیشنهادی برای آشکارسازی ساختمان‌ها

۴-۱-۱- آماده سازی داده‌ها

۴-۱-۱-۱- پیش پردازش داده‌های نقطه‌ای لیدار

در داده‌های نقطه‌ای لیدار بازگشت اول فاصله باید بزرگتر یا مساوی بازگشت آخر فاصله باشد بر این اساس داده‌های نقطه‌ای لیدار که رابطه (۱) را تصدیق کنند بعنوان نویز شناسایی و حذف می‌شوند.

$$\text{Last Range} - \text{Frist Range} > th1 \quad (1)$$

Last Range بازگشت اول فاصله و *Frist Range* بازگشت آخر فاصله می‌باشد و $th1$ مقدار ثابتی می‌باشد که به دقت ارتفاعی تفاضل دو بازگشت اول و آخر بستگی دارد. بعد از حذف نویزها تصاویر فاصله بازگشت اول و آخر با روش درون‌یابی نزدیکترین همسایگی تولید می‌شوند

۴- روش پیشنهادی

^۱ International Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS) – Commission III – Working Group 4

دلیل استفاده از روش درونیایی نزدیکترین همسایگی عدم تغییر مقادیر ارتفاعی و حفظ پرش‌های ارتفاعی است.

۴-۱-۲- توليد و ثبت کردن تصوير قائم ترميم يافته

جهت استفاده از تصوير هوايي منطقه، نياز هست تصوير قائم ترميم يافته^۱ توليد و ثبت گردد. در توليد تصوير قائم ترميم يافته از پارامترهاي توجيه داخلي و خارجي معرفي شده براي تصوير هوايي استفاده شده است و سپس تصوير قائم ترميم يافته بوسيله نقاط کنترل انتخاب شده از DSM منطقه ثبت گرديده است.

۴-۱-۲- شناسایی عوارض غیرزمینی^۲

در روش پیشنهادی ما جهت شناسایی عوارض غیرزمینی ابتدا مدل رقومی زمین^۳ (DTM) منطقه بر اساس روش ارتقاء یافته Scan Labeling [۱۳] توليد می‌شود و سپس با توليد مدل رقومی سطح نرمالایز شده (nDSM) عوارض غیرزمینی شناسایی می‌شوند.

۴-۱-۲-۱- توليد مدل رقومی زمین (DTM) منطقه

روش Scan Labeling از روش‌های فیلترینگ داده‌های لیدار می‌باشد که در سال ۲۰۰۳ توسط Sampath و Shan ارائه شده است [۱۴]. در این تحقیق جهت توليد DTM از روش ارتقاء یافته این الگوریتم استفاده شده است. در روش Scan Labeling اسکن در ۲ جهت راست به چپ، چپ به راست انجام می‌گیرد اما در روش ارتقاء یافته این الگوریتم اسکن در ۴ جهت راست به چپ، چپ به راست، بالا به پایین و پایین به بالا انجام می‌گیرد. برخلاف الگوریتم Scan Labeling که بر روی اسکن‌های داده‌های لیزر اسکن هوايي کار می‌کند روش ارتقاء یافته بر روی تصوير فاصله کار می‌کند. جهت توليد DTM از تصوير فاصله بازگشت آخر استفاده شده است بدلیل آن که تعداد نقاط زمینی در بازگشت آخر می‌تواند بیش‌تر از تعداد نقاط زمینی در بازگشت اول باشد. معیار ناپیوستگی در روش ارتقاء یافته Scan Labeling شیب بین پیکسل‌های مجاور در نظر گرفته شده است. بعد از جداسازی و حذف نقاط

غیرزمینی، به ترتیب از روش‌های انترپولاسیون نقاط زمینی Cubic و نزدیکترین همسایگی استفاده شده است تا DTM منطقه توليد گردد.

۴-۱-۲-۲- توليد مدل رقومی نرمالایز شده سطح و شناسایی عوارض غیرزمینی

بعد از توليد DTM، با توليد کردن nDSM مطابق رابطه (۲) یک ماسک اولیه از عوارض موجود بر روی زمین بدست می‌آید.

$$nDSM = DSM - DTM \quad (2)$$

در رابطه فوق از تصوير فاصله بازگشت اول به جای DSM منطقه استفاده شده است. با حدآستانه‌گذاری بروی nDSM مطابق با رابطه (۳) عوارض غیرزمینی (ساختمان‌ها و درختان) بدست می‌آیند.

$$Off - terrain Objects = nDSM > th2 \quad (3)$$

در رابطه فوق، $th2$ مقدار ثابت ارتفاعی است که مقدار حذف عوارض زمینی را کنترل می‌کند.

۴-۱-۳- استخراج ویژگی

ویژگی‌های بکار گرفته شده در این پژوهش از تصوير هوايي و تصوير فاصله منطقه توليد شده است.

- شاخص‌های گیاهی تقویت یافته در مناطق سایه شاخص‌های گیاهی در مناطق سایه نسبت به مناطق روشن مقادیر پایینی را دارا هستند به همین دلیل جهت استفاده از این شاخص‌ها نیاز است که این شاخص‌ها در مناطق سایه تقویت شوند. در این پژوهش مطابق با روابط (۴) و (۵) از شاخص گیاهی تفاضلی نرمال شده (NDVI) و شاخص نسبت انعکاس مادون قرمز بر انعکاس قرمز (IRRI) بعنوان شاخص‌های گیاهی استفاده شده است [۱۵]، [۱۶].

$$NDVI = (IR - R) / (IR + R) \quad (4)$$

$$IRRI = IR / R \quad (5)$$

در روابط فوق، IR و R به ترتیب انعکاس در ناحیه مادون قرمز و قرمز می‌باشند. مناطق سایه در هر دو ناحیه

^۱ Orthorectified Image

^۲ Off-Terrain Objects

^۳ Digital Terrain Model

می‌شود. واریانس نقاط داخل کرنل نیز بعنوان ویژگی واریانس هر نقطه در نظر گرفته می‌شود. جهت تولید ویژگی SSD یا مجموع مجذورات انحرافات ارتفاعی^۱، به مجموع نقاط داخل کرنل یک صفحه به روش کمترین مربعات برازش داده می‌شود و مجموع مجذورات انحرافات نقاط داخل کرنل از صفحه تعیین شده مشخص می‌شود و بعنوان ویژگی SSD هر نقطه تلقی می‌شود [۱۸]. در داخل هر کرنل ۳×۳ ویژگی لاپلاسین برای هر نقطه از مجموع مشتقات دوم در جهت‌های X و Y بدست می‌آید [۱۷]. بخاطر ماهیت ویژگی‌های تولید شده از تصویر فاصله، انتظار می‌رود که این ویژگی‌ها در مناطق گیاهی مرتفع (درختان) نسبت به مناطق ساختمانی مقادیر بالایی را داشته باشند اما بخاطر تغییرات ارتفاعی شدید لبه ساختمان‌ها و برخی قسمت‌های میانی، ویژگی‌های تولید شده از روی تصویر فاصله در این نواحی نیز مقادیر بالایی را دارا خواهند بود که این امر می‌تواند در جداسازی ساختمان‌ها و درختان مشکل ساز باشد به همین دلیل، این ویژگی‌ها با عملگرهای مورفولوژی پردازش شده‌اند. جهت پردازش این ویژگی‌ها، ابتدا با حدآستانه‌گذاری بر روی ویژگی موردنظر مطابق رابطه (۸) یک تصویر باینری برای هر ویژگی بدست می‌آید که پیکسل‌های سفید در این تصویر بیانگر مقادیر بالای ویژگی مورد نظر می‌باشد. سپس به ترتیب از عملگرهای مورفولوژی انسداد و گشایش استفاده می‌شود تا نواحی مربوط به مرزهای ساختمان حذف شوند. در نهایت ویژگی پردازش شده مطابق رابطه (۹) بدست می‌آید.

$$\text{Binary}_{\text{Img}} = \text{feature} > th3 \quad (8)$$

$$\begin{aligned} &\text{Processed Feature} \\ &= (1 - \text{Binary}_{\text{Img}} \\ &+ \text{ProcessedBinary}_{\text{Img}}) \times \text{feature} \end{aligned} \quad (9)$$

در رابطه فوق، $th3$ مقدار ثابتی برای شناسایی ویژگی‌هایی با مقادیر بالاست. $\text{Binary}_{\text{Img}}$ تصویر باینری بدست آمده از حدآستانه‌گذاری می‌باشد و $\text{ProcessedBinary}_{\text{Img}}$ تصویر باینری پردازش شده توسط عملگرهای مورفولوژی می‌باشد. Processed Feature نیز ویژگی پردازش شده می‌باشد. استفاده از عملگر مورفولوژی گشایش علاوه بر حذف

سبز و قرمز انعکاس پایینی دارند به همین دلیل از شاخص مذکور در رابطه (۶) بعنوان شاخص جدید سایه استفاده شده است.

$$SI = (G + R) \times G \quad (6)$$

در رابطه فوق، R و G به ترتیب انعکاس در ناحیه قرمز و سبز می‌باشند. با حدآستانه‌گذاری بر روی شاخص سایه مناطق سایه مشخص خواهند شد و با اشتراک‌گیری مناطق سایه با مناطقی که انعکاس مادون قرمز نسبتاً بالایی را دارا هستند مناطق گیاهی سایه‌دار تولید می‌شوند. جهت تقویت شاخص‌های گیاهی در مناطق سایه، در این مناطق مطابق با رابطه (۷) ضریبی از شاخص گیاهی به مقدار شاخص اضافه می‌شود.

$$VI_{AMP} = VI + SA_{veg} \times VI/2 \quad (7)$$

در رابطه فوق، VI و VI_{AMP} به ترتیب شاخص گیاهی و شاخص گیاهی تقویت شده در مناطق سایه می‌باشند. SA_{veg} نیز بیانگر مناطق گیاهی سایه‌دار می‌باشد.

• ویژگی سیری و رنگ

جهت تولید این دو ویژگی تصویر با ترکیب رنگی G-R-IR به فضای رنگی HSI تبدیل شده است [۱۷]. با تبدیل فضای رنگی سه ویژگی سیری، شدت و رنگ بدست می‌آیند که مقادیر شدت و سیری بین ۰ و ۱ می‌باشد و لایه رنگ دارای بازه ۰ تا ۳۶۰ می‌باشد که صفر مقادیر قرمز، ۱۲۰ مقادیر سبز و ۲۴۰ مقادیر آبی را نشان می‌دهند.

• ویژگی‌های تولید شده از روی تصویر فاصله

این ویژگی‌ها شامل ویژگی شیب، واریانس، زبری، SSD [۱۸] و لاپلاسین می‌باشند. جهت تولید این ویژگی‌ها یک کرنل با ابعاد فرد بر روی نقاط یا پیکسل‌های تصویر فاصله بازگشت اول قرار می‌گیرد. در داخل هر کرنر مقادیر شیب در جهت‌های افقی، عمودی و قطری تولید می‌گردد و از مقادیر شیب‌ها در جهات مختلف میانگین-گیری می‌شود و بعنوان ویژگی شیب هر نقطه در نظر گرفته می‌شود. در داخل هر کرنر نیز تفاضل مطلق نقاط همسایه از نقطه مرکزی کرنل محاسبه می‌شود و مقدار این تفاضل بعنوان ویژگی زبری هر نقطه در نظر گرفته

^۱ Sum of Squares of elevation Deviation

مقادیر بالا در لبه‌های ساختمان برخی مقادیر بالا در ناحیه درختان را نیز کاهش می‌دهند که جهت جبران این اثر در انتها از یک فیلتر ماکزیمم بر روی ویژگی‌های پردازش شده استفاده شده است.

۴-۱-۴- تفکیک ساختمان‌ها و درختان

در این بخش برای هر ویژگی تولید شده طبقه‌بندی ماشین‌های بردار پشتیبان با ۲ کلاس در نواحی عوارض غیرزمینی (نواحی شامل ساختمان‌ها و درختان) بکار گرفته می‌شود تا تفکیک ساختمان‌ها از درختان انجام گیرد. طبقه‌بندی ماشین‌های بردار پشتیبان از طبقه‌بندی‌های نظارت شده می‌باشد که در سال ۱۹۹۵ میلادی توسط Cortes و Vapnik ارائه گردید [۱۹]. داده‌های آموزشی برای هر ویژگی جهت انجام این طبقه‌بندی در یک پروسه نیمه‌اتوماتیک انتخاب شده است.

۴-۱-۴- تولید نیمه اتوماتیک داده‌های آموزشی

داده‌های آموزشی برای هر ویژگی در یک پروسه نیمه اتوماتیک تعیین می‌شود که براساس استفاده از مفهوم ویژگی‌ها می‌باشد. بدین ترتیب برای هر کدام از ویژگی‌ها در ناحیه عوارض غیرزمینی یا مرتفع یک دسته‌بندی K-Means با دو کلاس انجام می‌گیرد و سپس کلاس‌ها بطور نیمه‌اتوماتیک تعیین و برچسب‌گذاری می‌شوند. برچسب‌گذاری نیمه‌اتوماتیک کلاس‌ها بر اساس استفاده از مفهوم یا اطلاعات ویژگی درباره کلاس‌های ساختمان و درختان می‌باشد یعنی بر اساس ماهیت هر ویژگی مشخص می‌شود که کدام کلاس مقادیر بالا و کدام کلاس مقادیر پایینی را باید دارا باشد. بدین ترتیب میانگین ویژگی دو کلاس (مرکز دسته‌ها) محاسبه می‌شود و بر اساس مفهوم یا اطلاعات ویژگی، کلاس ساختمان و درختان برچسب‌گذاری می‌شوند. بعنوان مثال برای شاخص گیاهی تقویت یافته در مناطق سایه، میانگین ویژگی در ناحیه درختان بیش‌تر از میانگین ویژگی در ناحیه ساختمان‌ها می‌باشد پس در این ویژگی، کلاسی که بیشترین میانگین ویژگی را داشته باشد بعنوان کلاس درختان برچسب‌گذاری می‌شود و کلاسی که کمترین میانگین ویژگی را داشته باشد بعنوان کلاس ساختمان برچسب‌گذاری می‌شود. پس از انجام دسته‌بندی، جهت

انتخاب داده‌های آموزشی برای کلاس ساختمان و درختان در هر ویژگی به ترتیب از روابط (۱۰) و (۱۱) استفاده می‌شود.

$$TD_{Buildings} = \begin{cases} 1 & \text{if } FV < m_1 + b \times s_1 \text{ and } FV > m_1 - b \times s_1 \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (10)$$

$$TD_{Trees} = \begin{cases} 1 & \text{if } FV < m_2 + b \times s_2 \text{ and } FV > m_2 - b \times s_2 \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (11)$$

در روابط فوق FV مقدار ویژگی مورد نظر و (m_1, m_2) و (s_1, s_2) به ترتیب مرکز و انحراف معیار کلاس‌های ساختمان و درختان در دسته‌بندی K-Means می‌باشند، b نیز ضریبی ثابت بین ۰ و ۳ می‌باشد که در حقیقت سطح اطمینان داده‌های آموزشی انتخاب شده را کنترل می‌کند بدین معنی که جهت انتخاب داده‌های آموزشی مطمئن و صحیح باید از مقادیر پایین b استفاده نمود. برچسب ۱ و ۰ نیز به ترتیب به معنای تعلق و عدم تعلق پیکسل مورد نظر به داده‌های آموزشی می‌باشد. در انتها جهت تولید داده‌های آموزشی نهایی، بطور تصادفی از داده‌های آموزشی انتخاب شده در مرحله قبل تعدادی مشخصی برای هر دو کلاس انتخاب می‌شوند.

۴-۱-۴-۲- تلفیق نتایج طبقه‌بندی‌ها

بعد از تفکیک ساختمان‌ها از درختان، جهت پس‌پردازش نتایج هر طبقه‌بندی به ترتیب از عملگرهای مورفولوژی گشایش و انسداد استفاده شده است. جهت شناسایی پیکسل‌های ساختمانی باید نتایج طبقه‌بندی‌ها با هم تلفیق گردند. اگر در نتایج طبقه‌بندی پیکسل‌های ساختمانی و غیرساختمانی را به ترتیب با برچسب ۱ و صفر نمایش دهیم آنگاه جهت شناسایی پیکسل‌های ساختمان از رابطه (۱۲) استفاده می‌شود.

$$Pixels_{buildings} = \begin{cases} 1 & \text{if } SL \geq th4 \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (12)$$

در عبارت فوق، SL مجموع برچسب‌ها در نتایج طبقه‌بندی‌ها است. $th4$ حدآستانه ثابتی بین ۱ تا ۹ می‌باشد که جامعیت یا صحیح بودن کشف ساختمان‌ها را تحت تاثیر قرار می‌دهد. رابطه (۱۲) بیانگر این است که پیکسل‌هایی به عنوان ساختمان مدنظر قرار می‌گیرند که حداقل در درصد مشخصی از نتایج طبقه‌بندی‌ها بعنوان پیکسل ساختمانی طبقه‌بندی شده باشند. انتخاب مقادیر

یک روش ابتکاری استفاده شده است تا گوشه‌های پلیگون مربوط به ساختمان عمودسازی گردد این روش زمانی کارساز است که گوشه‌ها یا کرنرهای ساختمان قائم باشند یا حداقل تعداد گوشه‌های قائم بیش‌تر از تعداد گوشه‌های غیرقائم باشد. بعد از کشف ساختمان‌ها، مرزهای اولیه ساختمان‌ها از طریق تبدیل رستر به وکتور^۱ تولید می‌شوند. بعد از تولید مرز اولیه ساختمان‌ها با خلاصه‌سازی و عمودسازی مرزهای ساختمان مدل دوبعدی نهایی ساختمان‌ها بدست می‌آیند. جهت خلاصه‌سازی مرز اولیه ساختمان‌ها از الگوریتم Ramer-Douglas-Peucker [۲۰] استفاده شده است. در این روش ابتدا جهت یا ژیزمان مرجع ساختمان‌ها تعیین شود. جهت مرجع در این پژوهش بصورت زاویه‌ای بین ۴۵ تا ۱۳۵ درجه تعریف می‌گردد که بیانگر جهت لبه‌های ساختمان یا جهت عمود بر آن می‌باشد. جهت محاسبه جهت مرجع ساختمان‌ها از ژیزمان لبه‌های ساختمان استفاده می‌شود که دارای طول کافی باشند. بدین منظور لبه‌هایی که در رابطه (۱۳) صدق کنند در محاسبه جهت مرجع ساختمان شرکت می‌کنند.

$$L/L_{Mean} > th5 \quad (13)$$

در رابطه فوق، L و L_{Mean} به ترتیب طول لبه مورد بررسی و میانگین طول لبه‌های ساختمان می‌باشد و $th5$ مقدار حدآستانه ثابتی می‌باشد. بعد از شناسایی لبه‌هایی با طول کافی، ژیزمان هر یک از این لبه‌ها محاسبه می‌شود و این ژیزمان‌ها با استفاده از رابطه (۱۴) بین بازه ۴۵ تا ۱۳۵ درجه معادل‌سازی می‌شوند (بدلیل آن که جهت مرجع ساختمان زاویه‌ای بین ۴۵ تا ۱۳۵ درجه می‌باشد).

$$G_E = \begin{cases} G & \text{if } G \geq 45^\circ & \text{OR} & G \leq 135^\circ \\ |90 - G| & \text{if } G > 135^\circ & \text{OR} & G \leq 225^\circ \\ |180 - G| & \text{if } G > 225^\circ & \text{OR} & G \leq 315^\circ \\ |270 - G| & \text{if } G > 315^\circ & \text{OR} & G \leq 360^\circ \\ |90 + G| & \text{if } G \geq 0^\circ & \text{OR} & G < 45^\circ \end{cases} \quad (14)$$

در رابطه فوق، G و G_E به ترتیب بیانگر ژیزمان لبه ساختمان و ژیزمان معادل آن لبه می‌باشد و نماد $| |$ بیانگر قدار مطلق می‌باشد. بعد از محاسبه ژیزمان معادل هر لبه، از ژیزمان‌های معادل بدست آمده برای لبه‌های

پایین (مقدار ۱) برای پارامتر $th4$ باعث افزایش شاخص جامع بودن و کاهش شاخص صحیح بودن می‌شود و انتخاب مقادیر بالا (مقدار ۹) برای پارامتر $th4$ باعث افزایش شاخص صحیح بودن و کاهش شاخص جامع بودن می‌شود.

۴-۱-۵- تفکیک ساختمان‌های به هم چسبیده

بعد از شناسایی ساختمان‌ها، نیاز است که ساختمان‌های به هم چسبیده تفکیک گردند و برچسب جداگانه‌ای بگیرند. در این پژوهش جهت تفکیک ساختمان‌ها از معیار ارتفاع نرمال شده استفاده شده است. بدین ترتیب که نتایج شناسایی ساختمان‌ها با آنالیز مولفه اتصال ۴ جهتی برچسب‌گذاری می‌شوند تا ساختمان‌های جدا از هم مشخص گردند. سپس هر ساختمان بصورت جداگانه با الگوریتم ۲ کلاسه K-Means دسته‌بندی می‌شود. قبل از انجام دسته‌بندی هر ساختمان می‌تواند شامل چند ساختمان به هم چسبیده باشد که بعد از دسته‌بندی این ساختمان‌ها جداسازی می‌شوند و برچسب متفاوت می‌گیرند. ویژگی مورد استفاده جهت انجام دسته‌بندی، nDSM ساختمان‌های کشف شده می‌باشد. هر کدام از ساختمان‌های جداسازی شده با عملگرهای مورفولوژی گشایش و انسداد بهبود داده می‌شوند. در این روند ساختمان‌هایی که شامل یک ساختمان هستند به دو نیمه تقسیم نمی‌شوند بلکه برخی نقاط غیرساختمانی موجود در اطراف ساختمان‌ها که بعنوان ساختمان شناسایی شده‌اند بعنوان دسته دوم دسته‌بندی می‌شوند و با اعمال عملگرهای مورفولوژی این پیکسل‌ها حذف می‌شوند. در نتیجه با انجام این دسته‌بندی هم ساختمان‌های غیر هم‌ارتفاع به هم چسبیده جداسازی می‌شوند و هم پیکسل‌های غیرساختمانی که بعنوان پیکسل ساختمانی شناسایی شده‌اند کاهش پیدا می‌کنند که این باعث افزایش صحت کشف ساختمان‌ها می‌شود.

۴-۲- بازسازی مرز دو بعدی ساختمان‌ها

ساختمان‌ها معمولاً عارضه‌هایی با کرنر یا گوشه‌هایی عمودی هستند به همین دلیل جهت تولید مرز دوبعدی ساختمان‌ها نیاز است که مرزهای تولید شده دارای گوشه‌های عمودی باشند. به همین دلیل در این پژوهش از

^۱ Raster to vector

$$Edge1_{diff} = [G_1, |90 - G_1|, |180 - G_1|, |270 - G_1|, |360 - G_1|] \quad (18)$$

$$Edge2_{diff} = [G_2, |90 - G_2|, |180 - G_2|, |270 - G_2|, |360 - G_2|] \quad (19)$$

$$BaseEdge = \begin{cases} Edge1 & \text{if } \min(Edge1_{diff}) < \min(Edge2_{diff}) \\ Edge2 & \text{if } \min(Edge2_{diff}) < \min(Edge1_{diff}) \end{cases} \quad (20)$$

لازم بذکر است که راس دوم از لبه اول همان راس اول از لبه دوم می‌باشد. جهت تغییر مختصات رئوس لبه باید مقدار حرکت رئوس و جهت حرکت رئوس مشخص شوند. اگر مختصات رئوس دو لبه متوالی را با (X_1, Y_1) ، (X_2, Y_2) و (X_3, Y_3) نشان دهیم آنگاه در صورتی که لبه ۱ بعنوان لبه مرجع باشد مقدار حرکت رئوس لبه دوم، d ، مطابق روابط (۲۱) تا (۲۴) از روی مختصات رئوس لبه دوم تعیین می‌شود.

$$\Delta X_{Edge2} = X_3 - X_2 \quad (21)$$

$$\Delta Y_{Edge2} = Y_3 - Y_2 \quad (22)$$

$$D = \min(|\Delta X_{Edge2}|, |\Delta Y_{Edge2}|) \quad (23)$$

$$d = D/2 \quad (24)$$

دلیل نصف کردن مقدار D این است که هر راس از لبه دوم به اندازه نصف مقدار D حرکت خواهند داشت. جهت حرکت رئوس نیز بستگی به نحوه قرارگیری دو لبه نسبت به هم دارد. دو لبه نسبت به هم ۳۲ حالت مختلف می‌توانند داشته باشند که بررسی تمامی حالت‌ها در اینجا مقدور نمی‌باشد با این حال جهت حرکت یک راس از لبه، متغیر ۸ حالت می‌تواند داشته باشد و راس دیگر از همان لبه در جهتی حرکت خواهد کرد که به اندازه ۱۸۰ درجه با جهت حرکت راس اول اختلاف دارد. بعنوان مثال در صورتی که زاویه کرner نزدیک به ۹۰ درجه باشد و لبه اول بعنوان لبه مرجع انتخاب شده باشد و شرایط رابطه (۲۵) برقرار باشند (یک حالت از ۸ حالت ممکن) آنگاه جهت حرکت نقاط اول و دوم از لبه دوم برحسب درجه به ترتیب طبق روابط (۲۶) و (۲۷) بدست می‌آیند.

$$IF \begin{cases} |\Delta X_{Edge2}| < |\Delta Y_{Edge2}| & \& \Delta X_{Edge2} < 0 & \& X_3 < X_1 \end{cases} \quad (25)$$

$$Direction_{p1} = 180^\circ + G_1 \quad (26)$$

$$Direction_{p2} = G_1 \quad (27)$$

یک ساختمان میانگین‌گیری می‌شود که مقدار میانگین آن‌ها طبیعتاً زاویه‌ای بین ۴۵ تا ۱۳۵ درجه خواهد بود و این مقدار میانگین بعنوان جهت مرجع ساختمان در نظر گرفته می‌شود. جهت عمودسازی کرnerهای ساختمان نیاز است که کرnerهای با زاویه‌ای نزدیک به ۹۰ درجه عمودسازی شوند و کرnerهای با زاویه‌ای نزدیک به ۱۸۰ درجه کاملاً باز شوند. بدین ترتیب ابتدا مطابق با روابط (۱۵) و (۱۶) و با استفاده از جهت مرجع، هر ساختمان به ساختمانی با جهت فرانس ۹۰ درجه تبدیل می‌شود.

$$\alpha = RD - 90 \quad (15)$$

$$\begin{bmatrix} X_N \\ Y_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} \quad (16)$$

در روابط فوق، RD و α به ترتیب جهت مرجع ساختمان و مقدار زاویه دوران در ماتریس دوران می‌باشد. (X, Y) و (X_N, Y_N) نیز به ترتیب مجموعه مختصات رئوس ساختمان قبل و بعد از دوران می‌باشند. بعد از محاسبه مختصات جدید رئوس ساختمان، با استفاده از این مختصات ژیزمان دو لبه متوالی از ساختمان محاسبه می‌گردد و براساس اختلاف بین این دو ژیزمان مطابق رابطه (۱۷)، زاویه بین دو لبه بدست می‌آید و براساس مقدار زاویه بین دو لبه تصمیم‌گیری می‌شود که کرner مورد نظر از ساختمان عمودسازی شود یا تبدیل به یک زاویه کاملاً باز شود.

$$Delta_G = |G_2 - G_1| \quad (17)$$

جهت عمودسازی کرnerها یا تبدیل کرner به یک زاویه باز نیاز است که یک لبه از دو لبه مورد بررسی را بعنوان لبه یا خط مرجع در نظر گرفت و مختصات دو گوشه از لبه دیگری را تغییر داد بدین منظور از ژیزمان محاسبه شده برای دو لبه استفاده می‌شود تا لبه مرجع تعیین شود. بدین ترتیب مقادیر اختلافات ژیزمان‌های هر دو لبه از ژیزمان‌های ۰، ۹۰، ۱۸۰، ۲۷۰ و ۳۶۰ درجه مطابق روابط (۱۸) و (۱۹) محاسبه می‌شوند و مطابق رابطه (۲۰) لبه‌ای که دارای کمترین مقدار اختلاف باشد به عنوان لبه مرجع انتخاب می‌شود. در حقیقت لبه‌ای بعنوان لبه مرجع انتخاب می‌شود که به جهت مرجع ساختمان موردنظر نزدیک باشد.

می‌شود. مختصات این نقاط از روی تصویر فاصله پردازش شده لیدار قابل استخراج هستند. ویژگی دیگری که جهت شناسایی سطوح مدنظر قرار گرفته است ویژگی شیب می‌باشد که در ناحیه مربوط به ساختمان‌ها تولید می‌شود. جهت تولید ویژگی شیب، یک کرنل با ابعاد فرد بر روی تصویر فاصله بازگشت اول لیدار قرار می‌گیرد و در نواحی مربوط به ساختمان‌های کشف شده، مقدار مطلق شیب بین نقاط داخل کرنل و نقطه مرکز کرنل محاسبه می‌شود و با تقسیم این مقدار بر تعداد نقاط یا پیکسل‌های ساختمانی مقدار شیب برای هر نقطه محاسبه می‌شود.



شکل ۳- روندنمای کلی بازسازی مدل سه بعدی ساختمان‌ها

۳-۳-۲- شناسایی سطوح صفحه‌ای سقف ساختمان‌ها

در این پژوهش جهت شناسایی سطوح صفحه‌ای سقف ساختمان‌ها از الگوریتم دسته‌بندی استفاده شده است. بدلیل آن که روش‌های دسته‌بندی جزء روش‌های نظارت نشده می‌باشند و نیاز به تعیین داده‌های آموزشی و دخالت کاربر ندارند که این امر سطح اتوماسیون را در شناسایی سطوح صفحه‌ای سقف ساختمان‌ها بالا می‌برد. از جهتی دیگر ماهیت دسته‌بندی در این مرحله بگونه‌ای است که بعد از انجام دسته‌بندی نیاز به برچسب‌گذاری و تعیین کلاس‌ها وجود ندارد. به عبارت دیگر در نتایج دسته‌بندی تمامی کلاس‌ها مربوط به سطوح صفحه‌ای می‌باشند با این تفاوت که دارای جهت‌های متفاوتی هستند و هدف

بعد از مشخص شدن جهت حرکت رئوسی از لبه که باید تغییر داده شوند مختصات جدید این رئوس از رابطه (۲۸) و (۲۹) محاسبه می‌شوند.

$$X_{new} = X_{old} + d \times \sin(\text{Direction}) \quad (28)$$

$$Y_{new} = Y_{old} + d \times \cos(\text{Direction}) \quad (29)$$

در روابط فوق، (X_{old}, Y_{old}) و (X_{new}, Y_{new}) به ترتیب مختصات اولیه و جدید رئوس لبه هستند و d مقدار حرکت لبه می‌باشد که مطابق رابطه (۲۴) تعیین می‌شود. بعد از عمودسازی یا باز کردن کرنر بین دو لبه اول و دوم، مختصات جدید رئوس تغییر داده شده جایگزین مختصات قبلی می‌شوند و سپس دوباره دو لبه متوالی دیگر (لبه دوم و سوم) از همان ساختمان انتخاب می‌شوند و کرنر بین این دو لبه بررسی می‌شوند و این کار تا زمانی ادامه می‌یابد که تمام کرنرها یا گوشه‌های ساختمان عمودسازی شوند. در نهایت بعد از اتمام مرحله عمودسازی گوشه‌های ساختمان، مختصات این گوشه‌ها با استفاده از رابطه (۱۶) به اندازه منفی زاویه α دوران داده می‌شوند تا مختصات واقعی گوشه‌های ساختمان تعیین شوند.

۳-۴- بازسازی مدل سه بعدی ساختمان

روندنمای کلی بازسازی مدل سه بعدی ساختمان‌ها در شکل ۳ نشان داده شده است و مراحل این بازسازی در ادامه تشریح شده است.

۳-۴-۱- تولید ویژگی برای شناسایی سطوح صفحه‌ای سقف ساختمان‌ها

در هر ساختمان، هر سطح صفحه‌ای سقف ساختمان دارای یک بردار نرمال می‌باشد و سطوح صفحه‌ای با جهت‌های مختلف بردار نرمال‌های متفاوتی دارند. به همین دلیل در این تحقیق، مولفه‌های بردار نرمال صفحات برآزش داده شده بعنوان ویژگی مد نظر قرار گرفته‌اند تا شناسایی سطوح صفحه‌ای سقف ساختمان‌ها از روی این ویژگی‌ها انجام گیرد. روش کار بدین صورت است که یک کرنل با ابعاد فرد بر روی تصویر مناطق ساختمانی کشف شده قرار می‌گیرد و یک صفحه به نقاط یا پیکسل‌های داخل کرنل موردنظر به روش کمترین مربعات برآزش داده

۴-۳-۴- ادغام سطوح صفحه‌ای موازی و مجاور

در مرحله دسته‌بندی ویژگی‌های تولید شده جهت شناسایی سطوح صفحه‌ای ممکن است یک کلاس (یک سطح صفحه‌ای) به دو یا چند کلاس (چند سطح صفحه‌ای) تقسیم شود. بدین دلیل نیاز است که در هر ساختمان بطور جداگانه، این سطوح صفحه‌ای تقسیم شده شناسایی و ادغام شوند. جهت شناسایی این سطوح از دو معیار مجاورت و موازی بودن استفاده شده است. جهت شناسایی سطوح صفحه‌ای موازی از معیار مشابه بودن پارامترهای صفحه برآزش یافته استفاده شده است بدین ترتیب که در هر ساختمان مولفه‌های بردار نرمال (۳ مولفه) سطوح صفحه‌ای دو به دو با هم بررسی می‌شوند و تفاضل این مولفه‌ها بصورت متناظر (۳ تفاضل) در دو سطح صفحه‌ای محاسبه می‌شوند. سطوح صفحه‌ای که مقدار مطلق تفاضل‌ها در آن‌ها کمتر از مقدار حدآستانه مورد نظر باشد بعنوان سطوح صفحه‌ای موازی در نظر گرفته می‌شوند.

۴-۳-۵- شناسایی سطوح صفحه‌ای مجاور و تعداد سطوح صفحه‌ای هر ساختمان

تعداد سطوح صفحه‌ای هر ساختمان از طریق تعداد کلاس‌های موجود در داخل مرز هر ساختمان قابل محاسبه هست. برای شناسایی سطوح صفحه‌ای مجاور نیز از معیار فاصله استفاده می‌شود.

۴-۳-۶- تقاطع سطوح صفحه‌ای مجاور و تولید پارامترهای خطوط ۳ بعدی

در این مرحله، در هر ساختمان سطوح صفحه‌ای مجاور با هم تقاطع داده می‌شوند که بعد از تقاطع صفحات مربوطه و بدست آوردن پارامترهای خطوط سه بعدی، این پارامترها برای هر ساختمان ذخیره می‌گردد تا در بدست آوردن نقاط ورتکس مربوط به سقف ساختمان‌ها (ساختمان‌هایی با بیش از یک سطح صفحه‌ای) استفاده شود.

مشخص کردن سطوح صفحه‌ای می‌باشد و نیازی به تشخیص جهت سطوح صفحه‌ای نیست. برای دسته‌بندی فضای بردار نرمال تولید شده در ناحیه ساختمانی از الگوریتم ISO-DATA استفاده شده است. بدلیل آن که جهت دسته‌بندی به روش K-Means نیاز به مشخص کردن دقیق تعداد کلاس‌ها یا تعداد انواع سطوح صفحه‌ای موجود در منطقه می‌باشد که تعیین دقیق آن نیاز به اطلاع از منطقه دارد. اما در روش دسته‌بندی ISO-DATA که حالت خاصی از دسته‌بندی K-Means می‌باشد تعداد دقیق کلاس‌ها مشخص نمی‌شود بلکه حداقل و حداکثر تعداد کلاس‌ها مشخص می‌شود و در نهایت بر اساس سایر پارامترهای تعریف شده برای دسته‌بندی ISO-DATA تعداد کلاس‌ها قابل تغییر می‌باشد و عددی بین محدوده تعریف شده خواهد بود. بعد از انجام دسته‌بندی، شناسایی سطوح صفحه‌ای سقف ساختمان‌ها برای هر ساختمان بطور جداگانه انجام می‌گیرد. روال کار بدین صورت است که برای هر ساختمان مقدار متوسط شیب محاسبه می‌شود. بدین ترتیب با حدآستانه‌گذاری بر روی متوسط شیب ساختمان‌ها، اکثر ساختمان‌ها با بام مسطح شناسایی می‌شوند و برچسب جداگانه‌ای می‌گیرند. سپس در مابقی ساختمان‌ها کلاس یا سطوح صفحه‌ای شناسایی شده انتخاب می‌شود و با عملگرهای مورفولوژی انسداد و گشایش پردازش می‌شوند. در نهایت در یک ساختمان هر سطح صفحه‌ای برچسب جداگانه‌ای می‌گیرد.

۴-۳-۳- تولید پارامترهای صفحه

جهت تولید پارامترهای صفحه برای سطوح صفحه‌ای هر ساختمان از روش کمترین مربعات استفاده شده است. بدین صورت که در هر ساختمان پیکسل‌ها یا نقاط متعلق به یک سطح صفحه‌ای جدا می‌شوند و به مجموعه این نقاط یک صفحه مطابق با رابطه (۳۰) برآزش داده می‌شود. لازم بذکر است که در مجموعه نقاط لیدار بدلیل بزرگ بودن مقادیر مختصات X و Y نسبت به مولفه ارتفاعی Z، هر سه مولفه بین صفر و ۱ نرمال گردیده‌اند.

$$ax + by + cz = 1 \quad (30)$$

۴-۳-۷- تولید مدل سه بعدی ساختمان‌ها

بازسازی مدل سه بعدی ساختمان‌ها شامل بازسازی ساختار سقف ساختمان و سطح کف ساختمان و دیوارهای ساختمان می‌باشد. جهت بازسازی سطوح صفحه‌ای کف و دیوارهای ساختمان‌ها از یک پروسه ساده استفاده شده است که نحوه بازسازی آن‌ها برای تمام ساختمان‌ها یکسان می‌باشد. در این تحقیق جهت بازسازی سطوح صفحه‌ای کف، سطح محصور بین مرز دو بعدی هر ساختمان بعنوان سطح صفحه‌ای کف ساختمان در نظر گرفته می‌شود و به این سطح صفحه‌ای یک ارتفاع اختصاص داده می‌شود. مقدار این ارتفاع، از طریق حداقل ارتفاع نقاط موجود در حاشیه ساختمان تعیین می‌شود. در این تحقیق فرض بر این بوده که دیوارهای ساختمان بطور قائم بر روی مرز دو بعدی ساختمان‌ها قرار گرفته‌اند بدین منظور بعد از تولید مرز سه بعدی کف ساختمان و مرز سه بعدی سقف ساختمان، سطوح صفحه‌ای دیوارها بطور قائم بین این دو مرز تشکیل می‌شوند. بازسازی ساختار سقف ساختمان از طریق تولید نقاط ورتکس سقف ساختمان‌ها انجام می‌گیرد. نحوه تولید نقاط ورتکس سقف ساختمان‌ها براساس تعداد سطوح صفحه‌ای هر ساختمان انجام می‌گیرد. نقاط ورتکس سقف ساختمان‌ها دو نوع هستند نقاط ورتکس مرزی سقف ساختمان‌ها و نقاط ورتکس میانی سقف ساختمان‌ها. نقاط ورتکس مرزی همان نقاط مرز ساختمان‌ها هستند که تمام رئوس آن در مرحله تولید نقاط ورتکس ارتفاع گرفته‌اند و مرز سه بعدی سقف ساختمان‌ها را تشکیل می‌دهند اما نقاط ورتکس میانی نقاطی هستند که از تقاطع خطوط سه بعدی تولید شده بدست می‌آیند و داخل مرز ساختمان‌ها می‌باشند.

ساختمان‌هایی که دارای یک سطح صفحه‌ای می‌باشند دارای نقاط میانی نیستند. در این ساختمان‌ها ابتدا مختصات (X, Y) رئوس مرز دو بعدی ساختمان‌ها نرمال می‌شوند سپس مختصات نرمال شده رئوس مرز دو بعدی ساختمان‌ها در معادله صفحه مربوطه ساختمان جایگذاری می‌شوند و ارتفاع نرمال شده رئوس مرز دو بعدی ساختمان‌ها بدست می‌آیند.

ساختمان‌هایی که دارای دو سطح صفحه‌ای می‌باشند نیز دارای نقاط میانی نیستند. در این ساختمان‌ها تصویر خط سه بعدی مربوطه بر روی صفحه XY با پاره‌خط‌هایی

مربوطه از مرز ساختمان مورد نظر تقاطع داده می‌شوند تا محل‌های تقاطع صفحات بر روی مرز ساختمان مشخص شوند. برای شناسایی پاره‌خط‌هایی مربوطه، در مرز ساختمان دو پاره‌خطی جستجو می‌شود که شرایط زیر داشته باشند.

- هر دو پاره‌خط تقریباً بر بردار جهت دو بعدی خط تصویر شده عمود باشند.
- هر کدام از پاره‌خط‌ها دارای حداقل طول کافی باشند.
- دو پاره‌خط انتخاب شده حداقل فاصله کافی را دارا باشند.

جهت شناسایی پاره‌خط‌های عمود بر بردار جهت دوبعدی خط تصویر شده از ضرب داخلی بردار جهت دو بعدی خط تصویر شده و بردار جهت پاره‌خط‌ها استفاده می‌شود. در مورد شرط سوم نیز باید ذکر کرد که کوتاهترین فاصله بین دو پاره‌خط نیز بعنوان فاصله دو پاره‌خط در نظر گرفته می‌شود. بعد از شناسایی پاره‌خط‌های مربوطه و بدست آوردن محل تقاطع‌های تصویر خط سه‌بعدی با مرز دو بعدی ساختمان، مختصات نرمال شده این تقاطع‌ها در معادلات یکی از دو سطح صفحه‌ای یا در معادله خط سه بعدی مربوطه جایگذاری می‌شوند تا ارتفاع نرمال شده محل تقاطع‌ها بدست آیند. جهت تولید ارتفاع نرمال شده رئوس مرز ساختمان‌ها نیز دوباره مختصات این رئوس به فضای نرمال شده انتقال پیدا می‌کنند و سپس بر اساس معیار مجاورت به دو سطح صفحه‌ای یافت شده برای این ساختمان‌ها تعیین می‌شود که ارتفاع این رئوس باید با استفاده از کدام سطح صفحه‌ای تولید شود. با شناسایی صفحه نزدیک به هر راس، ارتفاع نرمال شده راس مربوطه از طریق جایگذاری مختصات نرمال شده (X, Y) در معادله صفحه مجاور بدست می‌آید.

ساختمان‌هایی که دارای بیش از دو سطح صفحه‌ای هستند دارای نقاط میانی می‌باشند. در این ساختمان‌ها ابتدا تمام خطوط سه بعدی مربوط به هر ساختمان بر روی صفحه XY تصویر می‌شوند یا به عبارت دیگر دو بعدی می‌شوند. سپس تصویر این خطوط سه بعدی دو به دو با هم تقاطع داده می‌شوند که از تقاطع این خطوط نقاط تلاقی دو بعدی بدست می‌آیند. محل تقاطع‌هایی که داخل مرز دو بعدی ساختمان قرار نگرفته باشند در نظر گرفته نمی‌شود. سپس ارتفاع نرمال شده نقاط تلاقی از طریق معادلات

سطوح صفحه‌ای بازسازی شده از RMS اختلافات ارتفاعی بین رئوس سطوح صفحه‌ای بازسازی شده با داده مرجع نیز استفاده شده است. در ارزیابی انجام گرفته همچنین از شاخص‌های پیکسل‌مینا و عارضه‌مینا جامع بودن، صحیح بودن و کیفیت استفاده شده است. جزئیات مربوط به این ارزیابی‌ها در [۱۲] تشریح شده است. لازم بذکر است که در ارزیابی عارضه‌مینا، گروه کاری ۴ از کمیسیون III از روش ارائه شده توسط Rutzinger و همکاران [۲۱] استفاده نموده است تا مولفه‌های مربوط به شاخص‌های جامع بودن، صحیح بودن و کیفیت را تعیین کند.

۵- پیاده‌سازی و ارزیابی نتایج

۵-۱- آماده‌سازی تصویر هوایی و پیش پردازش داده‌های لیدار

با در نظر گرفتن این که متوسط دقت ارتفاعی داده‌های لیدار برابر ۱۵ سانتی‌متر می‌باشد. مقدار دقت ارتفاعی برای هر دو بازگشت اول و آخر فاصله ۱۵ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است که در نتیجه با توجه به قانون انتشار خطاها^۱، مقدار خطا برای تفاضل این دو بازگشت بصورت رابطه (۳۱) قابل محاسبه است.

$$\sigma_{\text{total}} = \sqrt{\sigma_{\text{FR}}^2 + \sigma_{\text{LR}}^2} = \sqrt{15^2 + 15^2} = 21\text{cm} \quad (31)$$

اما مقدار نهایی برای حدآستانه $th1$ باید بزرگتر از خطای کل در نظر گرفته شود که مقدار نهایی برای این حدآستانه ۳۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است. در این مرحله ۸۱۸ نویز از داده‌های نقطه‌ای لیدار کشف و حذف شدند. جهت ثبت کردن تصویر قائم ترمیم یافته از ۷۱ نقطه کنترل با توزیع یکنواخت استفاده شد که این نقاط از طریق تناظریابی چشمی بین تصویر قائم ترمیم یافته و DSM منطقه مطالعاتی انتخاب گردید. جهت ثبت کردن تصویر قائم ترمیم یافته از روش دوران- انتقال- مقیاس (RST) استفاده شده است. میانگین RMSE برای ۷۱ نقطه کنترل ۰/۹۵ پیکسل DSM می‌باشد و میانگین RMSE برای ۱۰ نقطه چک انتخاب شده ۱/۰۱ پیکسل DSM می‌باشد.

خطوط تقاطع یافته بدست می‌آیند. نقاط میانی بدست آمده از این روش کنترل می‌شوند و نقاط میانی که فاصله کمتری از هم داشته باشند با میانگین‌گیری از مختصات آن‌ها به یک نقطه میانی تبدیل می‌شوند. بعد از تولید نقاط میانی، محل تقاطع تصویر خطوط سه بعدی با مرز دو بعدی ساختمان‌ها مشخص می‌شوند. تصویر خطوط سه بعدی که با تصاویر خطوط سه بعدی دیگری حداقل در یک نقطه تقاطع داشته باشند با مرز دوبعدی ساختمان مربوطه نیز در یک نقطه تقاطع خواهند داشت بدلیل این که یک سر این پاره‌خط‌ها به نقاط میانی متصل خواهد بود و یک سر دیگر باید به مرز دو بعدی ساختمان مربوطه متصل می‌باشد. اما تصویر خطوط سه بعدی که با تصاویر خطوط سه بعدی دیگر تقاطع نداشته باشد در دو نقطه با مرز دو بعدی ساختمان مربوطه تقاطع خواهد داشت. در حالت اول، تصویر خطوط سه بعدی با پاره خطی از مرز دو بعدی ساختمان تقاطع خواهد داشت که اولاً پاره‌خط مورد نظر دارای حداقل طول کافی باشد. سپس دو سطح صفحه‌ای که خط سه بعدی مورد نظر از تقاطع صفحات مربوط به این دو سطح صفحه‌ای بوجود آمده است مشخص می‌شود و پاره خطی از مرز دو بعدی ساختمان انتخاب می‌شود که دو نقطه سر پاره‌خط نزدیکترین نقاط به این دو سطح صفحه‌ای باشند. در حالت دوم، از روشی استفاده می‌شود که در مورد ساختمان‌هایی با دو سطح صفحه‌ای بکار گرفته شده است. در هر دو حالت ارتفاع نرمال شده نقاط تقاطع از معادله خط سه بعدی تولید می‌شوند. جهت تولید ارتفاع نرمال شده رئوس مرز ساختمان‌ها نیز دوباره از روش تشریح شده در ساختمان‌هایی با دو سطح صفحه‌ای استفاده می‌شود. در نهایت مقادیر واقعی تمام ارتفاعات نرمال شده از طریق غیر نرمالایز کردن ارتفاعات بدست می‌آیند.

۴-۴- روش ارزیابی نتایج

ارزیابی نتایج مراحل شناسایی ساختمان و بازسازی ساختار سقف ساختمان توسط کمیسیون III و گروه کاری ۴ از انجمن بین‌المللی سنسجس از دور و فتوگرامتری انجام گرفته است. جهت ارزیابی نتایج از شاخص‌های RMS اختلافات بین رئوس پلیگون ساختمان‌های کشف شده با داده مرجع و RMS اختلافات بین رئوس سطوح صفحه‌ای بازسازی شده با داده مرجع استفاده شده است. در ارزیابی

^۱ Errors Propagation Law

۵-۲- شناسایی عوارض غیرزمینی

مقدار شیب مجاز جهت رعایت ضابطه پیوستگی در الگوریتم ارتقاء یافته Scan Labeling ۶۰٪ در نظر گرفته شده است. بعد از تفکیک نقاط زمینی از غیرزمینی در مرحله فیلترینگ، از انترپولاسیون نقاط زمینی به روش Cubic استفاده شده است تا DTM منطقه تولید شود. جهت کشف عوارض غیرزمینی از مقدار ۱/۵ متر برای حدآستانه $th2$ مذکور در رابطه (۳) استفاده شده است. سپس به ترتیب از عملگرهای مورفولوژی گشایش و انسداد با المان ساختاری به ابعاد 9×9 و 5×5 استفاده شده است که در نتیجه استفاده از این عملگرها عوارض کوچکتر از ۲/۵ متر حذف شده‌اند و شکاف‌های کوچکتر از ۱/۲۵ متر مسدود شده‌اند. DTM، nDSM و nDSM مربوط به عوارض غیرزمینی تولید شده از الگوریتم ارتقاء یافته Scan Labeling به ترتیب در شکل‌های ۴ تا ۶ نشان داده شده است.



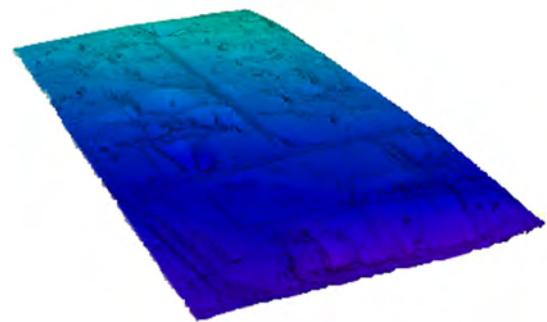
شکل ۶- nDSM عوارض غیرزمینی (مرتفع) منطقه مطالعاتی

عوارض غیرزمینی کشف شده با داده‌های مرجع تهیه شده مورد ارزیابی قرار گرفتند که نتایج این ارزیابی‌ها در جدول ۱ قابل مشاهده است. جهت ارزیابی نتایج این بخش به ترتیب از ۳ شاخص پیکسل‌مینا جامع بودن، صحیح بودن، کیفیت [۱۲] استفاده شده است.

جدول ۱- نتایج ارزیابی عوارض مرتفع (غیرزمینی) کشف‌شده

کیفیت	صحیح بودن	جامع بودن	
قبل از پس‌پردازش	٪۸۵/۶۲	٪۹۸/۲۶	٪۸۴/۳۴
بعد از پس‌پردازش	٪۹۲/۷۵	٪۹۳/۳۵	٪۸۶/۹۲

مشاهده می‌شود که بعد از پردازش نتایج توسط عملگرهای مورفولوژی، شاخص جامع بودن کاهش و شاخص صحیح بودن افزایش پیدا کرده است. اما میزان افزایش در شاخص صحیح بودن کمی بیش‌تر از میزان کاهش در شاخص جامع بودن هست بدین دلیل شاخص کیفیت نیز بعد از پردازش نتایج توسط عملگرهای مورفولوژی نزدیک به ۲/۵٪ افزایش پیدا کرده است.



شکل ۴- DTM منطقه مطالعاتی

۵-۳- استخراج ویژگی‌ها

ویژگی‌های بدست آمده بر اساس روش تشریح داده شده در بخش ۴-۱-۳ در شکل‌های ۷-۱۱ نشان داده شده است. نتایج نشان داده شده بین صفر تا ۲۵۵ نرمال شده‌اند. مقدار حدآستانه $th3$ مذکور در رابطه (۸) برای ویژگی‌های واریانس، زبری و SSD ۰/۱ و برای ویژگی‌های شیب و لاپلاسیان ۰/۳ در نظر گرفته شده است. سپس جهت پردازش این ۵ ویژگی به ترتیب از عملگرهای مورفولوژی انسداد و گشایش با المان ساختاری به ابعاد 5×5 و 19×19 بر روی تصاویر باینری بدست آمده استفاده



شکل ۵- nDSM منطقه مطالعاتی

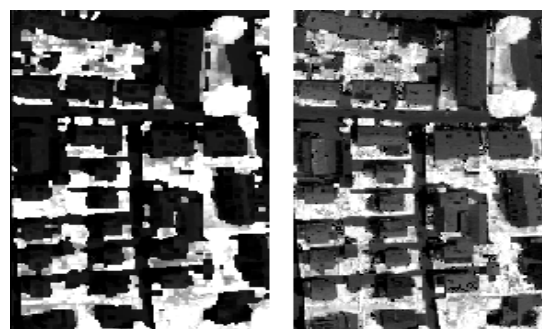
شده است و در نهایت از یک فیلتر ماکزیمم با ابعاد 3×3 استفاده شده است.



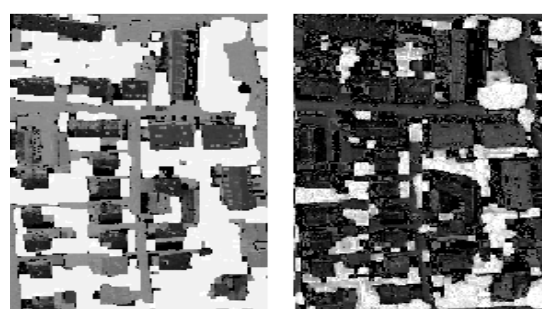
شکل ۱۱- ویژگی SSD

۵-۴- تفکیک ساختمان‌ها و درختان

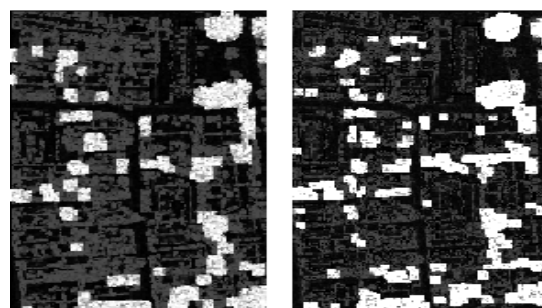
با توجه به ویژگی‌های استخراج شده مشاهده می‌شود که در ۹ ویژگی تولید شده درختان نسبت به ساختمان‌ها مقدار ویژگی بالایی را دارا هستند. جهت انتخاب داده‌های آموزشی با سطح اطمینان بالا از مقدار ۱ برای پارامتر b مذکور در رابطه ۱۰ و ۱۱ استفاده شده است و در هر ویژگی تعداد ۵۰ نمونه آموزشی برای هر دو کلاس ساختمان و درختان انتخاب شده است و سپس با استفاده از داده‌های آموزشی انتخاب شده، هر ویژگی بطور جداگانه بر اساس روش ماشین‌های بردار پشتیبان طبقه‌بندی گردیده است. در طبقه‌بندی ماشین‌های بردار پشتیبان از تابع کرنل پایه شعاعی استفاده شد بدلیل آن که استفاده از تابع پایه‌ای شعاعی می‌تواند نتایج بهتری را برای کارهای سنجش از دوری فراهم کند [۲۲]. مقدار پارامتر g در تابع کرنل گوسین $k(x, x_i) = \exp(-g \times |x - x_i|)$ برابر ۰/۱ در نظر گرفته شده است و مقدار پارامتر جریمه C ، که تاثیر بردارهای داده‌های آموزشی را محدود می‌کند [۲۲] برابر ۱ در نظر گرفته شده است. جهت بهبود نتایج طبقه‌بندی‌ها به ترتیب عملگرهای مورفولوژی گشایش و انسداد با المان‌های ساختاری به ابعاد 7×7 و 5×5 استفاده شده است. جهت تلفیق نتایج طبقه‌بندی‌ها نیز مقدار پارامتر $th4$ ۷ در نظر گرفته شده است. یعنی پیکسل‌هایی به عنوان ساختمان مدنظر قرار گرفته‌اند که بطور تقریبی حداقل در ۷۵٪ نتایج طبقه‌بندی‌ها بعنوان پیکسل ساختمانی طبقه‌بندی شده باشند. بدلیل انتخاب مقدار بالایی برای حدآستانه $th6$ انتظار می‌رود که نتایج مربوط به کشف ساختمان‌ها دارای شاخص صحیح بودن بالایی باشد.



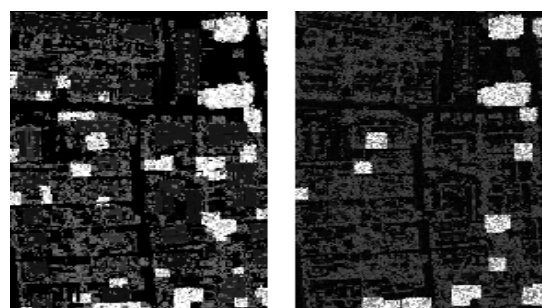
شکل ۷- ویژگی NDVI (سمت راست) و IRRI (سمت چپ) تقویت یافته در مناطق سایه



شکل ۸- ویژگی رنگ (سمت راست) و سیری (سمت چپ)



شکل ۹- ویژگی شیب (سمت راست) و لاپلاسیان (سمت چپ)

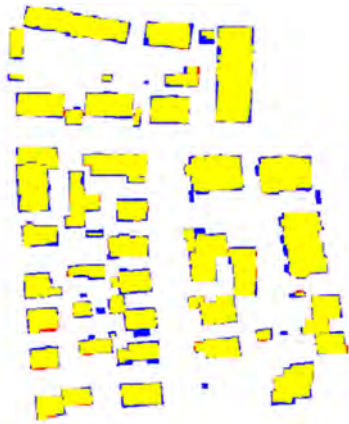


شکل ۱۰- ویژگی زبری (سمت راست) و واریانس (سمت چپ)

^۱ Penalty Parameter

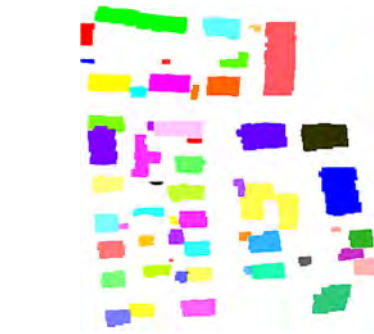
۵-۵- تفکیک ساختمان‌های به هم چسبیده

نتایج شناسایی ساختمان‌ها بعد از تفکیک ساختمان‌های به هم چسبیده در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود. در تفکیک ساختمان‌های به هم چسبیده، جهت بهبود نتایج به ترتیب از عملگرهای مورفولوژی گشایش و انسداد با ابعاد 9×9 و 5×5 استفاده شده است.



شکل ۱۳- ساختمان‌های شناسایی شده بر اساس تفکیک پیکسل‌های FP, FN, TP [۲۵]

نتیجه ارزیابی ساختمان‌های کشف شده بر اساس شاخص‌های پیکسل‌مینا و عارضه‌مینا در جدول ۲ ارائه گردیده است. شاخص‌های ارزیابی نیز صحت بالای روش پیشنهادی را نشان می‌دهد. خطای RMS اختلافات بین رئوس متناظر پلیگون در دو مجموعه داده کشف شده مرجع 0.7 متر می‌باشد.



شکل ۱۲- نتیجه تفکیک ساختمان‌های به هم چسبیده

۵-۶- ارزیابی نتایج شناسایی ساختمان‌ها

جزئیات مربوط به نتایج این ارزیابی‌ها در لینک‌های [۲۳] و [۲۴] موجود است. در این ارزیابی ساختمان‌هایی که بزرگتر از $2/5$ متر مربع هستند مد نظر قرار گرفتند. در کل ۴۳ ساختمان در نتایج کشف شده (شکل ۱۳) و ۵۶ ساختمان در داده مرجع وجود دارند که بزرگتر از $2/5$ متر مربع می‌باشند. نتیجه کشف ساختمان‌ها بر اساس تفکیک پیکسل‌های FP, FN, TP در شکل ۱۳ آورده شده است بطوریکه پیکسل‌های زرد، آبی و قرمز به ترتیب بیانگر پیکسل‌های FP, FN, TP می‌باشند. همانطور که در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود تعداد پیکسل‌های FP بسیار کم می‌باشد. کاهش تعداد این پیکسل‌ها در نتایج به دو دلیل می‌باشد. یکی انتخاب مقدار بالا (مقدار ۷) برای پارامتر $th4$ ذکر شده در بخش ۴-۱-۴ می‌باشد و دیگری حذف برخی از پیکسل‌های FP در پروسه تفکیک ساختمان‌های به هم چسبیده می‌باشد.

جدول ۲- نتایج ارزیابی ساختمان‌های کشف شده [۲۳] و [۲۴]

کیفیت	صحیح بودن	جامع بودن	
پیکسل‌مینا	٪۹۹/۱۰	٪۸۶/۶۰	٪۸۵/۹۲
عارضه‌مینا	٪۱۰۰	٪۸۰/۴۰	٪۸۰/۴۰

نتایج ارزیابی نشان می‌دهند که ساختمان‌ها با جامعیت و صحت بالا شناسایی شده‌اند. نتایج هم چنین بیانگر این است که در سطح عارضه هیچ ساختمان FP وجود ندارد و ساختمان‌های شناسایی شده همگی در داده مرجع وجود دارند.

۵-۷- بازسازی مرز دو بعدی ساختمان‌ها

مرزهای اولیه به همراه مرزهای خلاصه‌سازی شده توسط الگوریتم Ramer-Douglas-Peucker و مرزهای عمودسازی شده ساختمان‌ها به ترتیب در شکل‌های ۱۴ و ۱۵ نشان داده شده‌اند. مقدار باند تلورانس در الگوریتم Ramer-Douglas-Peucker ۱ متر در نظر گرفته شده است. با مقایسه دو شکل نشان داده شده در شکل ۱۴ مشخص می‌شود که شکل کلی عارضه‌های ساختمانی حفظ شده‌اند بدلیل آن که این الگوریتم نقاط غیرضروری را حذف می‌کند و تنها حافظ نقاطی است که بیانگر شکل کلی عارضه هستند [۲۰]. در عمودسازی کرنه‌های ساختمان نیز جهت شناسایی لبه‌هایی با طول کافی از مقدار 0.95 برای حدآستانه $th5$ معرفی شده در رابطه (۱۳) استفاده شده است.

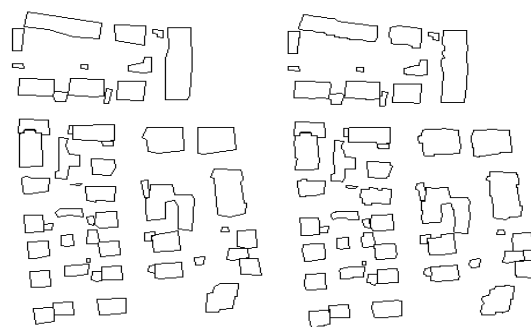
۵-۹- شناسایی سطوح صفحه‌ای سقف ساختمان‌ها و ادغام سطوح صفحه‌ای موازی و مجاور

در دسته‌بندی ISO-DATA تعداد کلاس‌ها بین ۵ تا ۱۰ کلاس انتخاب گردید و مقدار حدآستانه جهت همگرایی الگوریتم ۰/۱ درصد در نظر گرفته شده است و تعداد ماکزیمم تکرار ۱۰ بار در نظر گرفته شده است. مقدار ماکزیمم واریانس درون کلاسی و مقدار حداقل فاصله بین کلاسی به ترتیب $3/5$ و ۱۰ در نظر گرفته شده است. در شکل ۱۷ نتایج دسته‌بندی فضای بردار نرمال به روش ISO-DATA به همراه نتایج شناسایی سطوح صفحه‌ای سقف ساختمان‌ها نشان داده شده است که شامل ۶ کلاس در مناطق ساختمانی می‌باشد. در شناسایی ساختمان‌های مسطح مقدار حد آستانه برای شیب 70% در نظر گرفته شده است و جهت پردازش سطوح صفحه‌ای در ساختمان‌های غیر مسطح به ترتیب از عملگرهای مورفولوژی انسداد و گشایش با المان‌های ساختاری به ابعاد 5×5 و 9×9 استفاده شده است.

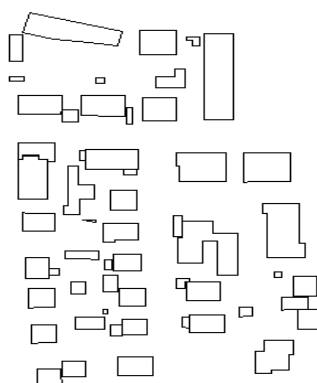


شکل ۱۷- نتایج دسته‌بندی فضای بردار نرمال به روش ISO-DATA (سمت راست) و نتایج شناسایی سطوح صفحه‌ای سقف ساختمان‌ها (سمت چپ)

نتایج ادغام سطوح صفحه‌ای موازی و مجاور نیز در شکل ۱۸ نشان داده شده است. مقدار حدآستانه جهت تشخیص سطوح مجاور ۵ متر در نظر گرفته شده است. جهت یکسان‌سازی وزن مولفه‌های بردار نرمال سطوح صفحه‌ای در روند تشخیص سطوح موازی، هر سه مولفه بین ۰ تا ۲۵۵ نرمال شده‌اند. در شناسایی سطوح صفحه‌ای موازی مقدار حدآستانه ماکزیمم برای تفاضل مولفه‌ها ۱۰ واحد در نظر گرفته شده است.



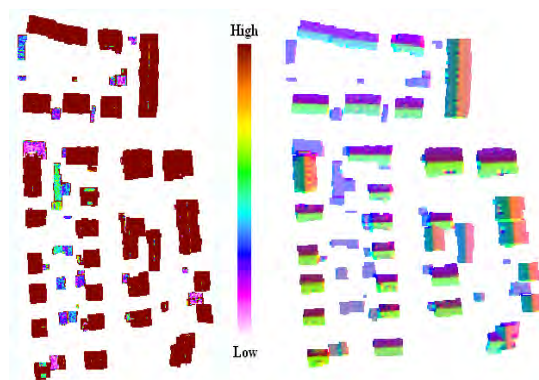
شکل ۱۴- مرز اولیه (سمت راست) و مرز خلاصه‌سازی شده (سمت چپ) ساختمان‌های شناسایی شده



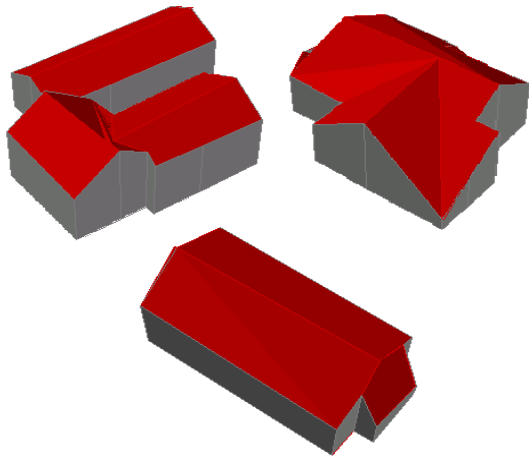
شکل ۱۵- مرز نهایی ساختمان‌های شناسایی شده بعد از عمودسازی گوشه‌های ساختمان‌ها

۵-۸- تولید ویژگی برای شناسایی سطوح صفحه‌ای سقف ساختمان‌ها

جهت برازش صفحه، از یک کرنل با ابعاد 9×9 استفاده شده است که مولفه‌های بردار نرمال صفحات برازش داده شده در مناطق ساختمانی کشف شده بصورت تصویر RGB به همراه ویژگی شیب در شکل ۱۶ آورده شده است.



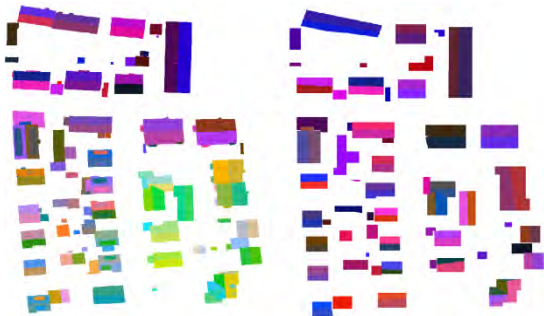
شکل ۱۶- مولفه‌های بردار نرمال صفحات برازش داده شده در مناطق ساختمانی کشف شده بصورت تصویر با ترکیب رنگی RGB (سمت راست) و ویژگی شیب تولید شده در ناحیه مربوط به ساختمان‌ها (سمت چپ)



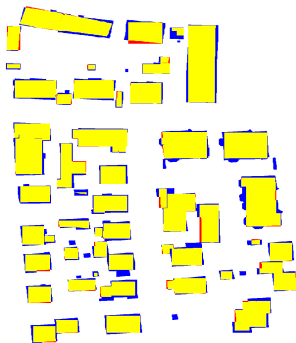
شکل ۲۰- نمونه‌هایی از مدل سه بعدی ساختمان‌های بازسازی شده با بیش از دو سطح صفحه‌ای

۱۱-۵- ارزیابی نتایج بازسازی سه بعدی ساختمان‌ها

جزئیات مربوط به نتایج این ارزیابی‌ها در لینک‌های [۲۶] و [۲۷] موجود است. فوت پرینت سطوح صفحه‌ای بازسازی شده و مرجع در شکل‌های ۲۱ آورده شده است. نتیجه بازسازی سطوح صفحه‌ای نیز بر اساس تفکیک پیکسل‌های TP, FN, FP در شکل ۲۲ نشان داده شده است.



شکل ۲۱- فوت پرینت سطوح صفحه‌ای بازسازی شده (سمت راست) و مرجع (سمت چپ)



شکل ۲۲- سطوح صفحه‌ای بازسازی شده بر اساس تفکیک پیکسل‌های TP, FN, FP [۲۸]

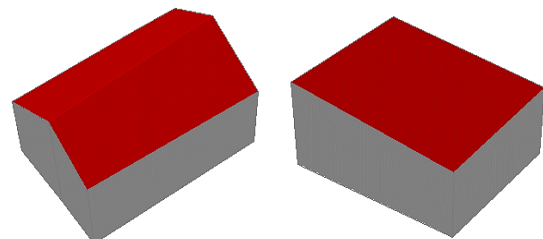


شکل ۱۸- نتایج ادغام سطوح صفحه‌ای موازی و مجاور

بعد از ادغام سطوح صفحه‌ای موازی و مجاور، در مرحله تقاطع سطوح صفحه‌ای مجاور، مقدار حدآستانه جهت تشخیص سطوح مجاور $2/5$ متر در نظر گرفته شده است.

۱۰-۵- تولید مدل سه بعدی ساختمان‌ها

بعد از تقاطع سطوح صفحه‌ای مجاور و تولید پارامترهای خطوط ۳ بعدی، مدل سه بعدی ساختمان‌ها تولید می‌گردد. در این مرحله جهت تخصیص ارتفاع به سطوح کف ساختمان‌ها مقدار $2/5$ متر بعنوان حاشیه اطراف ساختمان‌ها در نظر گرفته شده است. در تولید نقاط ورتکس ساختمان‌هایی با بیش از یک سطح صفحه‌ای از مقدار ۳ متر (در فضای غیر نرمال شده) برای حداقل طول پاره‌خطها و از مقدار $1/5$ متر برای حداقل فاصله دو پاره‌خط استفاده شده است. در این بخش هم چنین جهت تشخیص نقاط میانی نزدیک به هم از مقدار ۲۵ سانتی‌متر بعنوان حدآستانه استفاده شده است. نمونه‌هایی از مدل سه‌بعدی ساختمان‌های بازسازی شده در شکل‌های ۱۹ و ۲۰ نشان داده شده است.



شکل ۱۹- نمونه‌هایی از مدل سه بعدی ساختمان‌های بازسازی شده با یک سطح صفحه‌ای (سمت راست) و با دو سطح صفحه‌ای (سمت چپ)

همانطور که مشاهده می‌شود تعداد پیکسل‌های FP بسیار کم می‌باشد. پایین بودن تعداد این پیکسل‌ها به دلیل حذف اکثریت پیکسل‌های FP در پروسه کشف ساختمان‌ها می‌باشد. نتیجه ارزیابی فوت پرینت سطوح صفحه‌ای بازسازی شده بر اساس شاخص‌های پیکسل‌مبنا و عارضه مبنا در جدول ۳ ارائه گردیده است.

جدول ۳- نتایج ارزیابی سطوح صفحه‌ای بازسازی شده سقف ساختمان [۲۶] و [۲۷]

	جامع بودن	صحیح بودن	کیفیت
پیکسل مبنا	٪۸۴/۰	٪۹۸/۳۰	٪۸۲/۹۰
عارضه مبنا	٪۸۰/۴۰	٪۹۶/۷۰	٪۷۸/۳۰

شاخص‌های ارزیابی بیانگر صحت بالای سطوح صفحه‌ای بازسازی شده می‌باشند هر چند که جامعیت سطوح سطوح صفحه‌ای بازسازی شده نسبت به صحت آن پایین می‌باشد اما جامعیت سطوح سطوح صفحه‌ای بازسازی شده نیز نسبتا بالا می‌باشد. خطای RMS اختلافات بین رئوس متناظر سطوح صفحه‌ای در دو مجموعه داده بازسازی شده و مرجع ۰/۹ متر می‌باشد و خطای RMS اختلافات ارتفاعی بین رئوس متناظر سطوح صفحه‌ای در دو مجموعه داده بازسازی شده و مرجع ۰/۴ متر می‌باشد. این خطاها نشان می‌دهند که سطوح صفحه‌ای بازسازی شده دارای صحت هندسی قابل قبولی می‌باشند.

۶- نتیجه‌گیری

هدف از این پژوهش ارائه روشی بود که با سطح اتوماسیون بالا ساختمان‌ها را شناسایی و بازسازی کند. روش ارائه شده در این تحقیق سطح اتوماسیون نسبتا بالایی را دارا می‌باشد بدلیل آن که اکثریت مراحل اجرا شده در این تحقیق بصورت اتوماتیک انجام می‌گیرد و نیاز به دخالت چندان کاربر نیست و تنها در برخی موارد نیاز به دخالت یا تصمیم‌گیری کاربر می‌باشد همانند تعیین برخی پارامترها یا تعیین نیمه‌اتوماتیک داده‌های آموزشی جهت طبقه‌بندی بر مبنای ماشین‌های بردار پشتیبان. روش ارائه شده در این تحقیق حجم محاسباتی بالایی را دارا نمی‌باشد و الگوریتم جهت استخراج و بازسازی مدل

سه بعدی نیازی به تکرار مراحل ندارد. در پروسه کشف عوارض غیرزمینی (عوارض مرتفع) نتایج ارزیابی نشان می‌دهند که روش فیلترینگ Scan Labeling ارتقاء یافته موفق می‌باشد بدلیل آن که باعث شناسایی صحیح درختان و ساختمان‌ها از میان عوارض زمینی شده است. استفاده از عملگرهای مورفولوژی نیز در تمام مراحل شناسایی ساختمان مفید واقع شده است و باعث افزایش کیفیت شناسایی ساختمان یا عارضه می‌شود. در این تحقیق تا حد ممکن پیکسل‌های غیرساختمانی، FP، فیلتر و کاهش یافته‌اند که بالا بودن شاخص صحیح بودن در نتایج ارزیابی‌ها گواه بر این کاهش می‌باشد. در این تحقیق از طبقه‌بندی جداگانه برای هر ویژگی و تلفیق نتایج پس از طبقه‌بندی استفاده شده است که باعث می‌شود الگوریتم در انتخاب جامعیت (بالا بودن شاخص جامع بودن) و صحت (بالا بودن شاخص صحیح بودن) نتایج آزاد باشد به این معنی که با انتخاب نتیجه‌ای با شاخص صحیح بودن بالا، شاخص جامع بودن نیز بالا خواهد بود اما نسبت به شاخص صحیح بودن پایین خواهد بود. در روش پیشنهادی، قابلیت استخراج و بازسازی ساختمان‌هایی با ابعاد و ساختار پیچیده وجود دارد. هم چنین در این پژوهش از الگوریتم جدیدی استفاده شده است که می‌تواند با تعیین جهت مرجع ساختمان‌ها، مرزهای ساختمان‌ها را بصورت قائم بازسازی کند. در انتها می‌توان بیان کرد که روش پیشنهادی می‌تواند بعنوان یک روش موفق در شناسایی و بازسازی ساختمان‌هایی با ابعاد متفاوت بکار گرفته شود.

سپاسگزاری

مجموعه داده مورد استفاده در این تحقیق توسط جامعه فتوگرامتری و سنجش از دور آلمان جهت انجام تحقیقات در زمینه طبقه‌بندی مناطق شهری و استخراج و بازسازی سه‌بعدی ساختمان‌ها آماده گردیده است. بدین طریق از عواملین تهیه این مجموعه داده بخصوص جناب دکتر Gerke که در تهیه داده‌های این تحقیق کمک کرده‌اند و ارزیابی نتایج این تحقیق را انجام داده‌اند کمک کمال تشکر را داریم.

- [1] Peng, J., Zhang, D., Liu, Y., 2005, An improved snake model for building detection from urban aerial images, *Pattern Recognition Letters*, Vol. 26, pp.587-595.
- [2] Sohn, G., Dowman, I., 2007, Data fusion of high-resolution satellite imagery and LiDAR data for automatic building extraction, *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, Vol.62, No.1, pp. 43-63.
- [3] Jiang, N., Zhang, J.X., Li, H.T., Lin, X.G., 2008, Semi-Automatic Building Extraction from High Resolution Imagery Based on Segmentation, *International Workshop on Earth Observation and Remote Sensing Applications*, June 30-July 2, Beijing.
- [4] Awrangjeb, M., Ravanbakhsh, M., Fraser, C., 2010, Automatic detection of residential buildings using LIDAR data and multispectral imagery, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol.65, No.5, pp.457-467.
- [5] Kabolizade, M., Ebadi, H., Mohammadzadeh, A., 2012, Design and implementation of an algorithm for automatic 3D reconstruction of building models using genetic algorithm, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, Vol.19, pp.104-114.
- [6] Rottensteiner, F., Trinder, J., Clode, S., and Kubik, K., 2003, Detecting Buildings and Roof Segments by Combining LIDAR Data and Multispectral Images, *Proceedings of Image and Vision Computing*, pp.60-65, 26-28 November, Massey University, Palmerston North. N.Z., New Zealand.
- [7] Kim, T., Javzandulam, Ts., Lee, T., 2007, Semiautomatic reconstruction of building height and footprints from single satellite images, *Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS, IEEE International*, pp.4737-4740, 23-28 July, Barcelona.
- [8] Langyue, W., 2007, Object-Oriented Model based 3D Building Extraction using Airborne Laser Scanning Points and Aerial Imagery, M.Sc Thesis, International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation, Enschede, The Netherlands, pp.45-62.
- [9] Lach, S.R., 2008, Semi-Automated DIRSIG Scene Modeling from 3D Lidar and Passive Imagery, Ph.D Thesis, Rochester Institute of Technology (RIT), New York, pp.50-133.
- [10] Jarvis, A.M.Y., 2008, Integration of Photogrammetric and LiDAR Data for Accurate Reconstruction and Visualization of Urban Environments, M.Sc Thesis, Department of Geomatics Engineering, University of Calgary, Alberta, pp.63-106.
- [11] Sampath, A. and Shan, J., 2010, Segmentation and Reconstruction of Polyhedral Building Roofs From Aerial LiDAR Point Clouds, *IEEE Transaction on GeoScience and Remote Sensing*, Vol.48, No.3, pp.1554-1567.
- [12] Rottensteiner, F., Sohn, G., Gerke, M., Wegner, J.D., 2013, ISPRS test project on urban classification and 3D building reconstruction, ISPRS - Commission III - Photogrammetric Computer Vision and Image Analysis, Working Group III / 4 - 3D Scene Analysis.

[۱۳] زارع، ا.، محمدزاده، ع.، ولدان زوج، م.ج.، ۱۳۹۲، ارتقاء الگوریتم Scan Labeling جهت فیلترینگ داده‌های لیزر اسکن هوایی، همایش ملی ژئوماتیک، ۹ الی ۱۱ اردیبهشت ماه، سازمان نقشه‌برداری کشور، تهران.

- [14] Sampath, A. and Shan, J., 2003, Building segmentation from raw LiDAR data, *ASPRS annual conference*, Anchorage, Alaska, United States of America.
- [15] Silleos, N.G., Alexandridis, Th.K., Gitas, I.Z., and Perakis, K., 2006, Vegetation Indices: advances made in biomass estimation and vegetation monitoring in the last 30 years, *Geocarto International*, Vol. 21, No. 4, pp.21-28.
- [16] Birth, G.S., and McVey, G., 1968, Measuring the color of growing turf with a reflectance spectroradiometer, *Agronomy Journal*, Vol. 60, No. 6, pp. 640-643.
- [17] McAndrew, A., 2004, *An Introduction to Digital Image Processing with Matlab*, School of Computer Science and Mathematics, Victoria University of Technology, Melbourne, Australia.

- [18] Zhang, K., Yan, J. and Chen, Sh.-Ch., 2009, Automatic 3D Building Reconstruction from Airborne LiDAR Measurements, Urban Remote Sensing Joint Event, 20-22 May, Shanghai.
- [19] Cortes, C., Vapnik, V., 1995. Support vector networks, Machine Learning, Vol. 20, No.3, pp.273-297.
- [20] Douglas, D., Peucker, T., 1973, Algorithms for the reduction of the number of points required to represent a digitized line or its caricature, The Canadian Cartographer, Vol. 10, No. 2, pp. 112–122,1973.
- [21] Rutzinger, M., Rottensteiner, F., and Pfeifer, N., 2009, A Comparison of Evaluation Techniques for Building Extraction From Airborne Laser Scanning, IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, VOL.2, NO.1, pp.11-20.
- [22] Burges, C.J.C., 1988, A tutorial on Support Vector Machines for pattern recognition. Data Mining and Knowledge Discovery, Vol. 2, pp. 121-167.
- [23] http://www2.isprs.org/commissions/comm3/wg4/results/a3_detect.html
- [24] http://www.brian94.de/ISPRSIII_4_Test_results/test_results_a3_detect.html
- [25] http://www.itc.nl/external/ISPRS_WGIII4/ISPRSIII_4_Test_results/area3_detection/KNTU_buildings/index.html
- [26] http://www2.isprs.org/commissions/comm3/wg4/results/a3_recon.html
- [27] http://www.brian94.de/ISPRSIII_4_Test_results/test_results_a3_recon.html
- [28] http://www.itc.nl/external/ISPRS_WGIII4/ISPRSIII_4_Test_results/area3_reconstruction/KNTU/index.html