

# استخراج و مدل‌سازی ساختمان با استفاده از تصویرسازی ابر نقاط لیدار در صفحات دوبعدی

محسن رضائی\*<sup>۱</sup>، حسین عارفی<sup>۲</sup>، حیدر راستی‌ویس<sup>۲</sup>، مریم سجادیان<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد فتوگرامتری - دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی - پردیس دانشکده‌های فنی - دانشگاه تهران  
m\_rezaei91@ut.ac.ir

<sup>۲</sup> استادیار دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی - پردیس دانشکده‌های فنی - دانشگاه تهران  
{hossein.arefi, hrasti}@ut.ac.ir

<sup>۳</sup> کارشناس ارشد فتوگرامتری - دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی - پردیس دانشکده‌های فنی - دانشگاه تهران  
m.sajadian@ut.ac.ir

(تاریخ دریافت شهریور ۱۳۹۴، تاریخ تصویب شهریور ۱۳۹۶)

## چکیده

امروزه ارائه مدل سه‌بعدی از عارضه‌های جهان واقعی بسیار مهم و پرکاربرد است و توجه محققان در شاخه‌های مختلف از جمله نقشه‌برداری و سیستم‌های اطلاعات مکانی و علاقه‌مندان به بازسازی سه‌بعدی ساختمان را به خود جلب کرده است. ساختمان کلیدی‌ترین بخش اطلاعات در یک مدل سه‌بعدی شهر است، از این رو استخراج و مدل‌سازی ساختمان‌ها از داده‌های سنجش از دور گام مهمی برای ساخت مدل رقمی یک شهر محسوب می‌شود. در این مقاله، روشی جدید برای بازسازی ساختمان‌های مناطق شهری در مجاورت با پوشش گیاهی از ابر نقاط نامنظم لیدار ارائه می‌شود. این روش با بهره‌گیری از استراتژی داده‌مبنا شامل دو مرحله؛ استخراج نقاط ساختمانی و مدل‌سازی ساختمان است. در مرحله اول نقاط پوشش گیاهی اولیه با استفاده از پالس‌های بازگشتی لیدار و نقاط زمینی با استفاده از روشی بخش‌مبنا حذف می‌شوند. سپس نقاط سقف ساختمان با استفاده از تصویرسازی نقاط در صفحات دوبعدی  $XZ$ ،  $XY$  و  $YZ$  با کنار گذاشتن نقاط پوشش گیاهی متراکم استخراج می‌شوند. در مرحله دوم لایه‌های ارتفاعی سقف ساختمان جداسازی شده و رئوس مهم سقف هر لایه با برازش خط و سرشکنی راستای خطوط استخراج می‌شوند. در نهایت پس از تشکیل مدل سقف ساختمان با اتصال رئوس مهم سقف، با اضافه کردن دیوارهای ساختمان مدل کامل ساختمان ایجاد می‌گردد. در این تحقیق تمرکز بر روی مدل‌سازی ساختمان‌های در مجاورت پوشش گیاهی است. این روش بر روی ساختمان‌هایی با سبک‌های مختلف معماری سقف و اندازه متفاوت پیاده‌سازی شد و بیشتر ساختمان‌ها با موفقیت مدل‌سازی شدند؛ اگرچه با افزایش پوشش گیاهی و جزئیات ساختمان از دقت مدل‌سازی کاسته می‌شود. ساختمان‌های بازسازی شده به‌طور متوسط با دقت ۴۲ سانتی‌متر برای نقاط گوشه ساختمان مدل‌سازی شده‌اند.

**واژگان کلیدی:** مدل سه‌بعدی، بازسازی ساختمان، داده لیدار، صفحه دوبعدی، روش بخش‌مبنا

\* نویسنده رابط

## ۱- مقدمه

نشان‌دهنده‌ی مناطقی است که پوشش گیاهی، دیوارها و حتی سقف ساختمان را در بر گرفته است. از این رو هدف این تحقیق ارائه روشی جدید برای بازسازی مدل پارامتریک ساختمان‌های موجود در مناطق شهری است که در مجاورت با پوشش گیاهی انبوه قرار گرفته‌اند.



شکل ۱- ساختمان‌های در مجاورت پوشش گیاهی

در این بخش مفاهیم اولیه و ضرورت انجام تحقیق بیان شد. بخش دو شامل مروری بر تحقیقات در زمینه مدل‌سازی ساختمان و در ادامه بخش سه شامل ساختار کلی روش پیشنهادی است. در بخش چهار الگوریتم پیشنهادی در دو مرحله استخراج و مدل‌سازی پیاده‌سازی شده است و در بخش پنج نتایج پیاده‌سازی روش پیشنهادی ارائه شده است. بخش شش نیز شامل نتیجه‌گیری و بیان نقاط قوت و ضعف روش است.

## ۲- پیشینه تحقیق

منابع داده متنوعی برای استخراج خودکار و نیمه-خودکار ساختمان‌ها بکار گرفته می‌شود. این منابع شامل ابر نقاط لیدار، تصاویر هوایی و ماهواره‌ای، مدل‌های رقومی ارتفاعی<sup>۳</sup> (DEM) و نقشه‌های دوبعدی ساختمان‌ها می‌باشند. استخراج و مدل‌سازی ساختمان به صورت تک منبعی از این داده‌ها و یا با تلفیق تصاویر هوایی یا ماهواره‌ای با داده‌های لیدار یا سایر منابع اطلاعاتی انجام می‌شود.

از میان روش‌هایی که تنها از یک منبع اطلاعاتی برای مدل‌سازی ساختمان استفاده کردن می‌توان به [۲،۱] اشاره کرد. در این تحقیقی با استفاده از داده لیدار الگوریتمی برای بازسازی سقف‌های با ساختار نسبتاً ساده ارائه کرد. مدل‌سازی سقف‌ها با استفاده از قطعات صفحه‌ای، الگوریتم RANSAC و اعمال شروط هندسی انجام شد [۱]. در یک تحقیقی دیگر روشی برای استخراج خودکار ساختمان از داده‌های لیدار بر اساس یک فیلتر مورفولوژیک پیش‌رونده و یک روش رشد ناحیه بر مبنای برازش صفحه ارائه دادند [۳]. در روشی برای تهیه نقشه‌های سه‌بعدی از تصاویر

مدل سه‌بعدی در کاربردهای علمی و مهندسی همچون طراحی و برنامه‌ریزی شهری، ارتباط از راه دور و مدیریت بحران در شرایط اضطراری در دهه‌های اخیر مورد استفاده قرار گرفته است. مدل سه‌بعدی ساختمان با استفاده از تصاویر هوایی، تصاویر ماهواره‌ای، نقشه‌های دوبعدی و لیزر اسکنر هوایی<sup>۱</sup> و همچنین ترکیب این داده‌ها قابل بازسازی است. در چند دهه گذشته ایجاد مدل سه‌بعدی ساختمان از تصاویر هوایی شروع شد. به دلیل مشکلاتی نظیر وجود سایه، مناطق پنهان و روند خودکارسازی پایین در مدل‌سازی با استفاده از تصاویر هوایی به تدریج لیدار از محبوبیت بیشتری برخوردار شد. لیدار دارای مزایایی همچون روند خودکارسازی بالا، قابلیت جمع‌آوری اطلاعات در شب و روز به منظور ارائه مختصات سه‌بعدی نقاط از سطح زمین به‌طور مستقیم و با دقت بالا است. یکی از معایب لیدار در مقایسه با فتوگرامتری هوایی دقت پایین آن در لبه‌هاست. برخلاف فتوگرامتری که موقعیت نسبتاً دقیق لبه‌ها ثبت می‌شود در سیستم لیدار احتمال برخورد دقیق پرتو لیزر به لبه‌ها و در نتیجه ثبت آن‌ها کم است. با افزایش تراکم ابر نقاط لیدار این مشکل تا حد زیادی قابل حل است. یکی از خصوصیات دیگر لیدار قدرت نفوذ پالس لیزر به درون پوشش گیاهی است. در سیستم لیدار با ثبت چندین بازگشت از پالس ارسالی، پالس اولیه و پالس ثانویه به دست می‌آید که با استفاده از پالس‌های بازگشتی لیدار امکان استخراج پوشش گیاهی وجود دارد [۱]. ساختمان‌ها دارای شکل و جزئیات متنوعی می‌باشند که با توجه به کیفیت داده‌های موجود مدل سه‌بعدی ساختمان در سطح جزئیات<sup>۲</sup> (LODs) متفاوت تولید و نمایش داده می‌شود. طبق استاندارد City GML مدل LOD0، مدل رقومی زمین (DTM) است. در سطح LOD1 به هر ساختمان یک ارتفاع نسبت داده می‌شود و سقف همه ساختمان‌ها مسطح می‌باشند. در LOD2 یا مدل پارامتریک، ساختار و شیب در مدل‌سازی پشت‌بام ساختمان در نظر گرفته می‌شود.

تحقیقات زیادی به منظور مدل‌سازی ساختمان در سطح جزئیات مختلف ارائه شده است. یکی از مشکلات در روند اکثر این مطالعات وجود درختان بلند و پوشش گیاهی انبوه در مجاورت ساختمان‌ها است. به‌طور مثال شکل ۱

1 Airborne Laser Scanner  
2 Level Of Details

3 Digital Elevation Model

زاده یک روش استخراج خودکار دوبعدی ساختمان از تصاویر هوایی و داده لیدار را بر مبنای منحنی فعال بهبودیافته پیشنهاد دادند [۱۱]. سجادیان در سال ۲۰۱۳ با استفاده از یک استراتژی چند عامله بر مبنای استفاده از اطلاعات سه بعدی ابر نقاط نامنظم لیدار و پالس‌های بازگشتی، سقف ساختمان‌ها را استخراج و قطعه‌بندی کرد. در این روش با استفاده از الگوریتم رنسک لبه قطعات سقف ساختمان به دست آمده است [۱۲]. Awrangjeb در سال ۲۰۱۴ یک روش جدید برای استخراج ساختمان با استفاده از تکنیک‌های بخش‌بندی ارائه کرد. نقاط زمینی با استفاده از یک حد آستانه، نقاط پوشش گیاهی با استفاده از یک فرایند قاعده‌مبنای<sup>۲</sup> و نقاط دیوارهای ساختمان با استفاده از تکنیک برازش صفحه کشف شدند [۱۳].

محققان در زمینه بازسازی سه بعدی ساختمان، از دو استراتژی داده‌مبنا و مدل‌مبنا استفاده می‌کنند. در روش‌های داده‌مبنا بازسازی بر اساس تقسیم‌بندی نقاط سقف ساختمان و برازش سطح به این نقاط انجام می‌شود. در روش‌های مدل‌مبنا، بازسازی ساختمان با تفکیک مدل پیچیده ساختمان به چندین مدل ساده و برازش مدل‌های از پیش تعریف شده به آن‌ها، مدل نهایی بازسازی می‌شود. Verma در سال ۲۰۰۶ روشی بر اساس تلفیق استراتژی داده‌مبنا و مدل‌مبنا برای بازسازی ساختمان‌های پیچیده با استفاده از داده لیدار ارائه داد. مرحله اصلی این کار استفاده از الگوریتم بخش‌بندی برای جدا کردن نقاط سقف و زمین است [۱۴]. Tarsha-Kurdi در سال ۲۰۰۷ مقایسه‌ای بین روش‌های داده‌مبنا و مدل‌مبنا انجام دادند. مدل پارامتریک با سرعت بالا و با استفاده از اطلاعات کتابخانه‌ای تشکیل می‌شود و مدل داده‌مبنا یا غیر پارامتریک برای مدلسازی ساختمان‌های پیچیده مناسب می‌باشد [۱۵]. در سال ۲۰۱۰، Sampath و Shan روشی داده‌مبنا بر روی ابر نقاط لیدار با استفاده از قطعه‌بندی نقاط سقف و بازسازی سقف چندوجهی ساختمان‌ها به وسیله برازش صفحه به سطوح جدا شده ارائه کرد [۱۶]. Arefi و Reinartz در سال ۲۰۱۳ روشی مدل‌مبنا را بر اساس آنالیز نقاط سه بعدی DSM به دست آمده از تصاویر ماهواره‌ای در صفحه تصویر دوبعدی ارائه دادند [۱۷]. Orthuber در سال ۲۰۱۵ برای بازسازی سه بعدی ساختمان از روشی داده‌مبنا استفاده کرد. در این

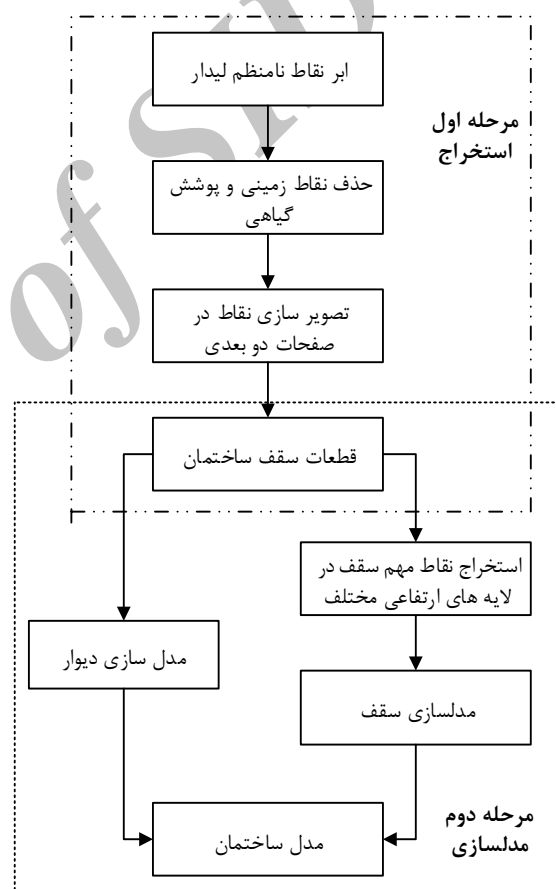
استریو هوایی استفاده شد. در این روش از باندهای آبی، سبز، قرمز و مادون قرمز و یک باند NDVI در طبقه‌بندی استفاده کردند [۴]. Turlapty نیز در سال ۲۰۱۲ برای استخراج ساختمان از تصاویر ماهواره‌ای با زوایای دید مختلف استفاده کرد. در این روش از تصویر pan-sharpening برای به دست آوردن ارتفاع استفاده کردند [۵]. در برخی از تحقیقات نیز از چند منبع داده به منظور مدلسازی ساختمان استفاده کردند که می‌توان به [۶، ۷] اشاره کرد. Syed در سال ۲۰۰۵ در روشی نیمه خودکار در ابتدا ناحیه بندی و سپس طبقه‌بندی شیء‌گرا را با استفاده از داده‌های تصویر هوایی و لیدار برای استخراج ساختمان ارائه دادند [۶]. Lee و همکارانش در سال ۲۰۰۶ با استفاده از نقشه دوبعدی و داده لیدار ساختمان‌ها را مدلسازی کرد. از نقشه دوبعدی برای به دست آوردن پای ساختمان و از داده لیدار برای بخش‌بندی سطوح سقف و به دست آوردن مدل این بخش‌ها استفاده شده است [۷]. Lach در سال ۲۰۰۸ یک روش نیمه خودکار برای مدلسازی ساختمان‌های مناطق شهری با استفاده از داده‌های لیدار و تصاویر ماهواره‌ای ارائه کرد [۸].

در ادامه برخی از تحقیقات در زمینه استخراج و مدلسازی ساختمان مورد بررسی قرار می‌گیرند. با توجه به نوع داده مورد استفاده برای استخراج خودکار ساختمان‌ها روش‌های متنوعی ارائه شده است که آن‌ها را می‌توان به روش‌های مبتنی بر کشف لبه، روش‌های مبتنی بر فیلترهای مورفولوژی<sup>۱</sup>، روش‌های مبتنی بر قطعه‌بندی و روش‌های مبتنی بر منحنی‌های فعال تقسیم‌بندی نمود. در سال ۲۰۰۷، Kokkas و Miliariesis برای استخراج ساختمان از داده‌های ارتفاعی از قطعه‌بندی به روش رشد ناحیه و طبقه‌بندی عارضه‌ها استفاده کردند [۹]. در سال ۲۰۱۰، Matikainen و همکاران در روشی بخش مبنا از ایده کشف ساختمان در بخش‌های اولیه گرفته شده از نواحی همگن با استفاده از اطلاعات ارتفاعی استفاده کردند. بخش‌ها با استفاده از ویژگی‌های پایه داده‌های تصویر هوایی و لیزر اسکنر طبقه‌بندی شده‌اند. در مرحله اول طبقه‌بندی عوارض مرتفع (ساختمان و درختان) از سطح زمین و در ادامه ساختمان‌ها از درختان تشخیص داده شده است. در نهایت بخش‌های مربوط به ساختمان با هم ادغام شده و یک بخش ساختمانی را تشکیل می‌دهند [۱۰]. در سال ۲۰۱۰ کابلی

روش برای یافتن نقاط مهم سقف ساختمان از الگوریتم  $2\text{dual contouring}$  بر روی نقاط بخش‌بندی شده در لایه‌های ارتفاعی متفاوت استفاده شد [۱۸].

### ۳- روش پیشنهادی

روش پیشنهادی در این تحقیق، که فلوجارت آن در شکل ۲ نشان داده شده است، شامل دو مرحله کلی استخراج و بازسازی ساختمان برای مدلسازی ساختمان است. مرحله اول نقاط سقف هر ساختمان از ابر نقاط خام لیدار استخراج شده و در مرحله دوم مدل ساختمان با در اختیار داشتن این نقاط تشکیل می‌شود.

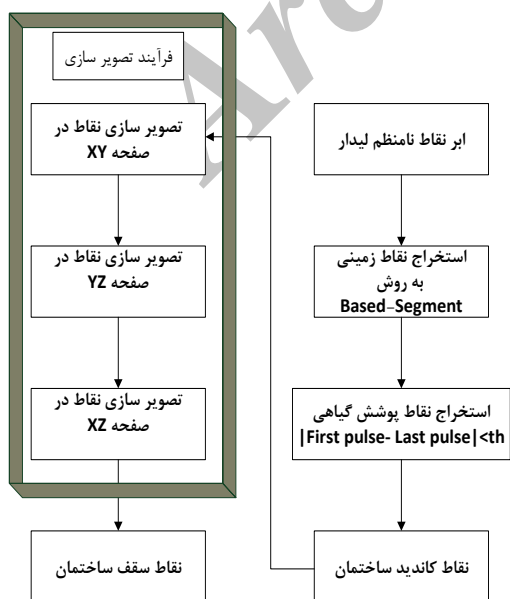


شکل ۲- مراحل روش پیشنهادی به منظور مدلسازی ساختمان با استفاده از داده لیدار

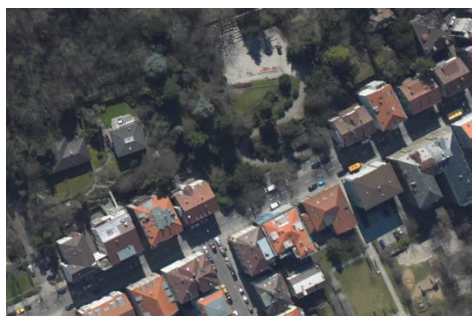
### ۳-۱- استخراج ساختمان

در شکل ۳ جزئیات استخراج ساختمان ارائه شده است. به منظور استخراج نقاط ساختمان، ابتدا نقاط زمینی با استفاده از روشی  $\text{Segment-based}$  و نقاط پوشش گیاهی با استفاده از اختلاف ارتفاع پالس اولیه و ثانویه از مجموعه نقاط حذف می‌شوند. ابر نقاط لیدار، شامل عوارضی نظیر زمین،

درختان، پوشش گیاهی، ساختمان‌ها، ماشین‌ها و غیره است. برای رسیدن به نقاط ساختمانی سایر نقاط به تدریج از مجموعه نقاط کنار گذاشته شده است. در مرحله اول، نقاط زمینی با استفاده از روش  $\text{Segment-Based}$  از نقاط غیرزمینی جداسازی می‌شوند. با کم کردن ارتفاع نقاط غیرزمینی در هر بخش، تمامی نقاط به سطح زمین می‌رسند. در این روش در هر تکرار اندازه بخش‌ها بزرگ‌تر شده و معیار جداسازی نقاط زمینی، تغییرات ارتفاعی نقاط در تکرارهای مختلف است. نقاطی که تغییر ارتفاعی نداشته‌اند، به عنوان نقاط زمینی در نظر گرفته می‌شوند. سیستم لیدار قادر به ثبت چندین ارتفاع از نقاط برداشتی است. برای حذف نقاط پوشش گیاهی و درختان از اختلاف بین پالس اولیه و ثانویه لیدار استفاده می‌شود. نقاطی که دارای اختلاف بزرگ‌تر از حد آستانه هستند را می‌توان به عنوان پوشش گیاهی در نظر گرفت. لبه‌های ساختمان در بازگشت‌های پالس لیزر دارای مقادیر متفاوتی هستند. بنابراین، حد آستانه انتخابی باید به گونه‌ای باشد که لبه‌های ساختمان را به عنوان پوشش گیاهی انتخاب نکند. با حذف نقاط پوشش گیاهی و نقاط زمینی به نقاط کاندید ساختمان دست می‌یابیم. این نقاط شامل نقاط سقف ساختمان، دیوارهای ساختمان و نقاط مربوط به پوشش گیاهی متراکم است. با فرایند تصویرسازی این نقاط در صفحات دوبعدی  $XY$ ،  $XZ$  و  $YZ$ ، نقاط سقف ساختمان استخراج می‌شوند. در هر صفحه با مثلث‌بندی نقاط تصویر شده و با استفاده از معیار طول اضلاع مثلث‌ها و تراکم نقاط، نقاط ساختمانی کشف می‌شوند.



شکل ۳- مراحل استخراج ساختمان



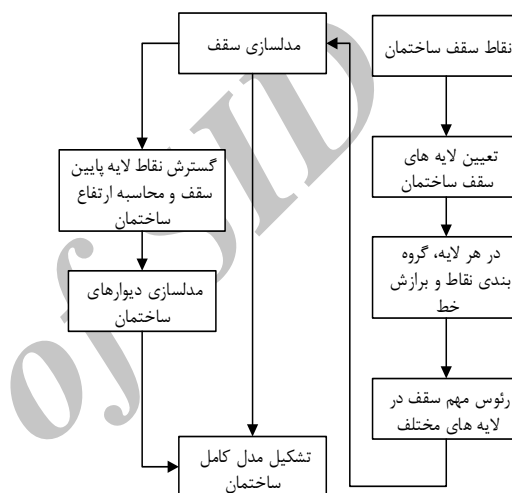
شکل ۵- تصویر هوایی ناحیه مورد مطالعه، شهر اشتوتگارت آلمان

### ۳-۲- مدلسازی ساختمان

در مرحله دوم با در اختیار داشتن نقاط سقف ساختمان، مدلسازی به وسیله لایه‌های ارتفاعی سقف انجام می‌شود. نقاط لایه‌های ارتفاعی با استفاده از یک حد آستانه ارتفاعی جدا می‌شوند. در هر لایه با برازش خط به نقاط گروه‌بندی شده و سرشکن کردن راستای این خطوط در لایه‌های ارتفاعی، رئوس اصلی سقف به دست می‌آید. مدل سقف با اتصال رئوس مهم سقف تشکیل می‌شود و در ادامه با تشکیل مدل دیوارها، مدل ساختمان کامل می‌شود (شکل ۴).

### ۴-۲- استخراج ساختمان

در مرحله استخراج ساختمان، جهت به دست آوردن بهترین مدل برای هر ساختمان، ابتدا باید نقاط مربوط به سقف هر ساختمان از سایر نقاط جدا سازی شود. برای این منظور، در این مرحله، به ترتیب نقاط زمینی، نقاط پوشش گیاهی و در ادامه، با فرایند تصویرسازی، نقاط دیوارها و نقاط پوشش گیاهی مترکم از مجموعه نقاط حذف می‌شوند. در ادامه، جزئیات هر کدام از این مراحل به همراه نتایج به دست آمده بر روی منطقه تست ارائه گردیده است.



شکل ۴- مراحل مدلسازی ساختمان

### ۴-۲-۱- حذف نقاط زمینی

در روش Segment-Based، تمامی نقاط منطقه به بخش‌هایی منظم تقسیم شده و در هر گروه از نقاط، میانگین و انحراف معیار ارتفاع نقاط محاسبه می‌شود. سپس در هر بخش نقاطی که اختلاف ارتفاع بین آن‌ها و میانگین ارتفاع نقاط گروه بیشتر از انحراف معیار گروه است، ارتفاعشان کاهش یافته و به ارتفاع میانگین نقاط انتقال داده می‌شوند. در فرآیند فوق نقاطی که مطمئناً نقاط غیرزمینی‌اند، ارتفاعشان کاهش می‌یابد. در ادامه، اندازه بخش‌ها به تدریج بزرگ‌تر شده و فرآیند فوق هر بار تکرار می‌شود. در هر تکرار و با بزرگ‌تر شدن بخش‌ها نقاط دارای ارتفاع بیشتر نسبت به نقاط زمینی به تدریج به سمت نقاط زمینی کشیده می‌شوند. در پایان فرآیند نقاطی که تغییر ارتفاعی زیادی داشته‌اند را می‌توان به عنوان نقاط غیرزمینی در نظر گرفت.

در شکل ۶ نتیجه به دست آمده از استخراج نقاط زمینی و غیرزمینی به دست آمده به روش ناحیه-مبنا به ترتیب با رنگ‌های سیاه و آبی نشان داده شده است.

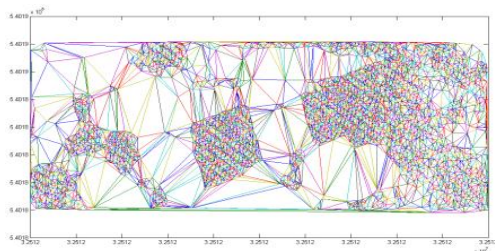
### ۴- پیاده‌سازی روش پیشنهادی

در این فصل، مراحل پیاده‌سازی روش پیشنهادی بر روی داده تست ارائه شده است. در این راستا، ابتدا مشخصات داده تست ارائه شده و در ادامه جزئیات هر مرحله همراه با نتایج آن از نظر خواهد گذشت.

### ۴-۱- منطقه مورد مطالعه

در این تحقیق از ابر نقاط سه‌بعدی منطقه‌ای در شهر اشتوتگارت آلمان با تراکم ۴ نقطه در متر مربع به عنوان داده تست استفاده شده است. تصویر هوایی منطقه مورد مطالعه برای آنالیز بصری و کیفی نتایج روش پیشنهادی مورد استفاده قرار می‌گیرد (شکل ۵). این ناحیه، منطقه‌ای شهری با ساختمان‌های در مجاورت پوشش گیاهی است. ساختمان‌های این ناحیه دارای ساختارهای نظیر Gable، Mansard، Shed، Hipped و ترکیبی از این ساختارها است.

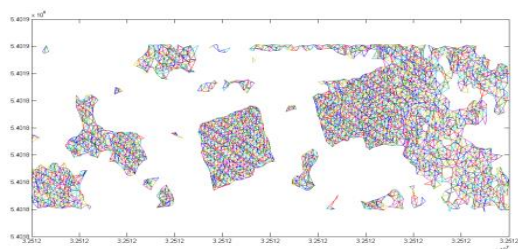




ب

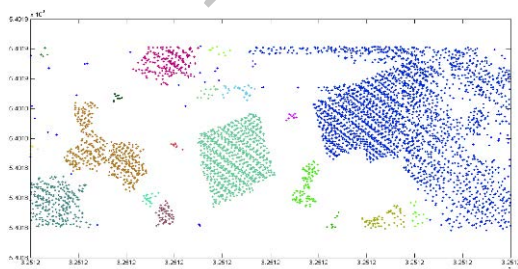
شکل ۸- تصویرسازی نقاط و مثلث‌بندی در صفحه XY

در فرآیند مثلث‌بندی، برخی از مثلث‌ها دو گروه از نقاط مربوط به عوارض مختلف را به هم متصل می‌کنند (مطابق شکل ۸). در این مرحله با اعمال یک حد آستانه بر روی طول اضلاع، این مثلث‌ها کشف شده و از لیست مثلث‌ها کنار گذاشته می‌شوند. با توجه به اینکه تراکم نقاط لیدار استفاده شده در این تحقیق ۴ نقطه در مترمربع است، فاصله بین ابر نقاط روی سقف ساختمان از یک متر کمتر می‌باشد. از این رو به منظور جداسازی اضلاع بلند مثلث‌ها (اضلاع متصل‌کننده دو گروه از عوارض به هم) از حد آستانه ۱ متر استفاده شده است. شکل ۹ مثلث‌های باقیمانده پس از اعمال حد آستانه را نشان می‌دهد.



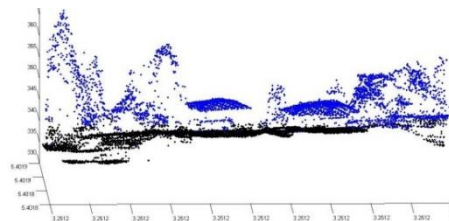
شکل ۹- حذف مثلث‌های اضافی در صفحه XY

پس از حذف مثلث‌های اضافی، مثلث‌های باقیمانده در یک فرآیند گروه‌بندی می‌شوند (شکل ۱۰). گروه‌بندی نقاط با روش گسترش ناحیه انجام می‌گیرد.



شکل ۱۰- گروه‌بندی نقاط در صفحه XY

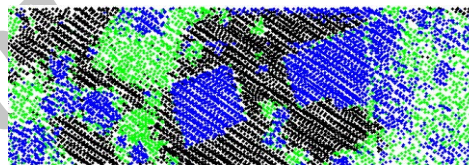
بعد از گروه‌بندی نقاط، گروه‌های بزرگ‌تر با استفاده از حد آستانه‌ی تعداد مثلث‌ها در هر گروه شناسایی می‌شوند. با فرض اینکه کوچک‌ترین ساختمان مساحتش ۵۰ مترمربع



شکل ۶- حذف نقاط زمینی به روش ناحیه-مینا. نقاط سیاه: نقاط زمینی، نقاط آبی: نقاط غیرزمینی

#### ۴-۲-۲- حذف نقاط پوشش گیاهی

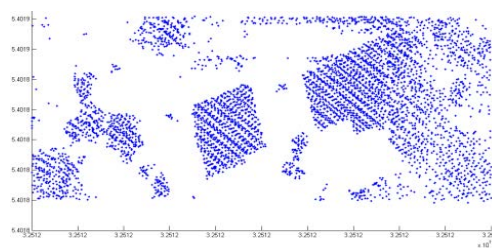
برای حذف نقاط پوشش گیاهی و درختان از اختلاف بین پالس اولیه و ثانویه لیدار استفاده شده است. ذکر این نکته مهم است که در نواحی با پوشش گیاهی متراکم پالس لیزر نمی‌تواند از پوشش گیاهی عبور کند و به زمین برسد. به همین دلیل مناطق متراکم از پوشش گیاهی در این مرحله قابل شناسایی نیستند و در مراحل بعد این نقاط حذف خواهند شد. نقاط سبزرنگ در شکل ۷ به‌عنوان قسمتی از نقاط پوشش گیاهی تشخیص داده شده‌اند که در ادامه از مجموعه نقاط حذف می‌شوند.



شکل ۷- حذف نقاط پوشش گیاهی

#### ۴-۲-۳- استخراج نقاط سقف ساختمان

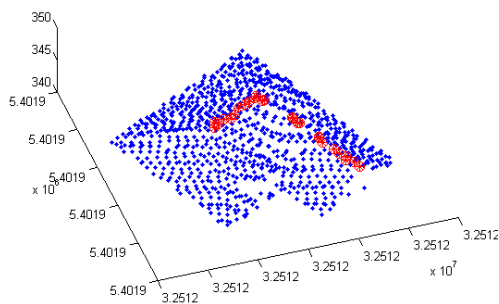
در شکل ۷ نقاط غیرزمینی بارنگ آبی جداسازی شده‌اند. در بین این نقاط، نقاط پوشش گیاهی و نقاطی از درختان بلند که در مجاورت ساختمان‌ها قرار دارند، حذف نشده‌اند. در این مرحله، با تصویرسازی نقاط در صفحات دوبعدی به‌تدریج این نقاط از مجموعه نقاط کنار گذاشته خواهند شد. نتایج تصویرسازی نقاط غیرزمینی به‌دست‌آمده از مرحله قبل در صفحه XY در شکل ۸-الف و نتایج مثلث‌بندی این نقاط به روش دلونی<sup>۱</sup> در این صفحه در شکل ۸-ب نشان داده شده است.



الف

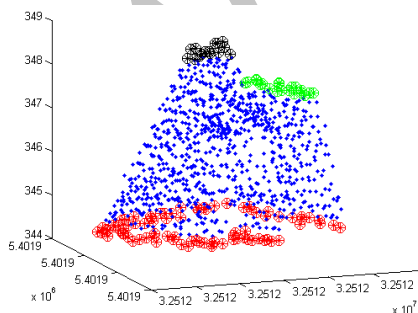
1 delaunay

پایین و بالای سقف با استفاده از کمترین و بیشترین ارتفاع نقاط سقف ساختمان ایجاد می‌شوند. لایه‌های میانی سقف با استفاده از تعریف یک پارامتر جدید استخراج می‌شوند. این پارامتر برای هر نقطه از سقف برابر با نسبت تعداد نقاط با ارتفاع بالاتر از نقطه موردنظر به تمام نقاط در محدوده‌ای به شعاع ۱/۵ متری از نقطه موردنظر است. این پارامتر برای تمام نقاط سقف ساختمان محاسبه می‌شود. محدوده تغییرات پارامتر از صفر تا یک است. به صورت تجربی عدد بهینه پارامتر تعریف شده برای یافتن نقاط مربوط به لایه‌های ارتفاعی سقف ۰/۹ انتخاب شده است. استفاده از این پارامتر برای شناسایی نقاط هر لایه، در سقف‌های با بیرون زدگی (قطعات کوچک بر روی سقف) زیاد با مشکلاتی نظیر تشخیص اشتباه ارتفاع لایه و تعداد لایه‌های زیاد مواجه است.



شکل ۱۴- لایه‌های ارتفاعی استخراج شده. رنگ قرمز: نقاط لایه‌های ارتفاعی سقف، رنگ آبی: نقاط سقف

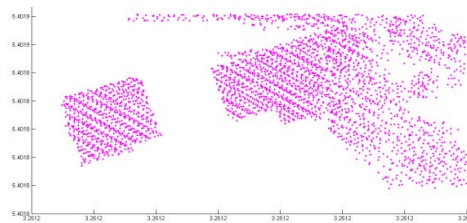
به‌طور مثال در شکل ۱۵ سقف ساختمان دارای سه لایه ارتفاعی است، نقاط لایه پایین (نقاط قرمز) با استفاده از نقاط سقف با کمترین ارتفاع و نقاط لایه میانی و بالای سقف (نقاط سبز و مشکی) به کمک پارامتر تعریف شده، جداسازی می‌شوند.



شکل ۱۵- لایه‌های ارتفاعی سقف ساختمان. نقاط قرمز: نقاط لایه پایین سقف، نقاط سبز: نقاط لایه میانی سقف، نقاط سیاه: نقاط لایه بالای سقف

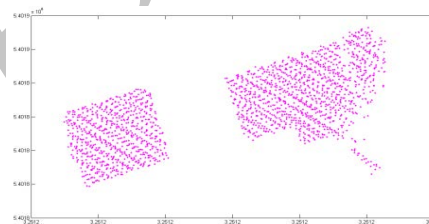
نقاط هر لایه از سقف ساختمان با استفاده از روشی مبتنی بر برازش خط و محاسبه فاصله نقاط از خطوط برازش داده شده گروه‌بندی می‌شوند (شکل ۱۶).

باشد و با در نظر گرفتن این که تراکم نقاط ۴ نقطه در متر مربع می‌باشد، با استفاده از حد آستانه ۲۰۰ نقطه در هر گروه می‌توان این گروه‌های بزرگ را جداسازی کرد و به‌عنوان نقاط کاندید سقف در نظر گرفته می‌شوند (شکل ۱۱).

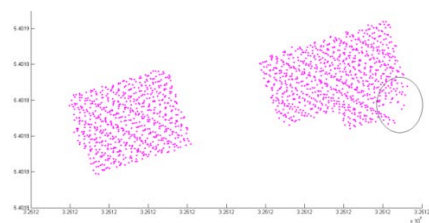


شکل ۱۱- نقاط کاندید سقف ساختمان در صفحه XY

خروجی نقاط در صفحه XY، ورودی تصویرسازی نقاط در صفحه XZ است. به همین ترتیب فرآیند فوق در صفحه XZ و YZ انجام می‌شود. در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ نقاط خروجی از فرآیند تصویرسازی در صفحات XZ و YZ نشان داده شده است.



شکل ۱۲- نقاط کاندید سقف ساختمان در صفحه XZ



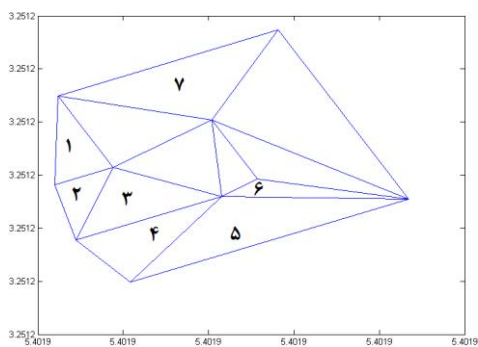
شکل ۱۳- نقاط سقف ساختمان و ناحیه‌ای که نقاط پوشش گیاهی از روی سقف کنار گذاشته شده‌اند

در شکل ۱۳ ناحیه مشخص شده قسمتی از سقف ساختمان را نشان می‌دهد که پوشش گیاهی از روی سقف کنار گذاشته شده است. تا این مرحله تمامی نقاط پوشش گیاهی و نقاط غیر ساختمانی از مجموعه ابر نقاط کنار گذاشته و نقاط ساختمانی استخراج شده‌اند.

#### ۴-۳- مدلسازی ساختمان

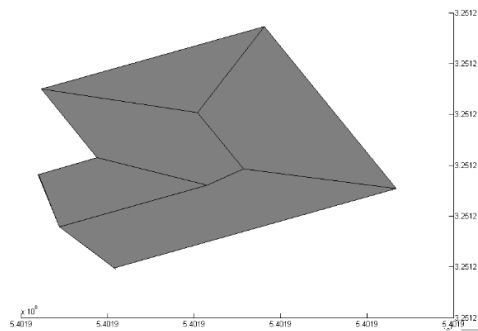
برای تشکیل مدل سقف ساختمان، رئوس مهم سقف در لایه‌های مختلف ارتفاعی استخراج می‌شوند. در ابتدا نقاط لایه‌های ارتفاعی سقف ساختمان جداسازی می‌شوند. لایه

مشابه با مثلث ۷ هستند با این تفاوت که در همسایگی یکدیگر قرار ندارند، از این رو مثلث‌های ۲ و ۳ فقط باهم ادغام می‌شوند. مثلث ۱ دارای بردار نرمالی در راستای مولفه Z است و جزء سقف ساختمان نبوده و حذف می‌گردد. بعد از ادغام مثلث‌ها، اشکال باقیمانده هر کدام یک صفحه از سقف ساختمان را تشکیل می‌دهند. با نمایش این صفحات در کنار هم مدل سقف تشکیل می‌شود (شکل ۲۰).



شکل ۱۶- گروه‌بندی نقاط هر لایه سقف

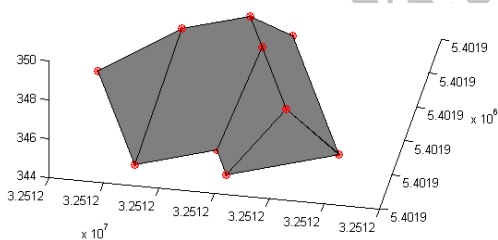
به هر گروه از نقاط یک خط برازش داده می‌شود. راستای خطوط برازش داده شده در هر لایه از سقف، با توجه به طول خطوط به‌عنوان وزن سرشکنی و اعمال قیود توازی و تعامد خطوط نسبت به یکدیگر تعدیل می‌شوند (شکل ۱۷).



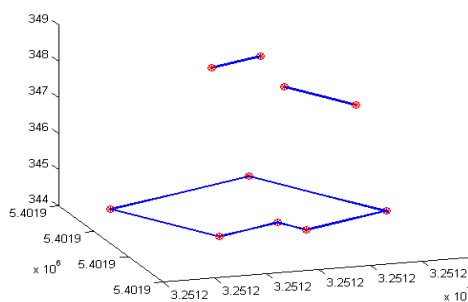
شکل ۱۷- خطوط برازش داده شده

نتایج به‌دست‌آمده از رئوس مهم استخراجی سقف با استفاده از راستای نهایی خطوط در هر لایه در شکل ۱۸ نشان داده شده است.

شکل ۱۹- نحوه تشکیل صفحات سقف ساختمان



شکل ۲۰- مدل سقف



شکل ۱۸- رئوس مهم سقف

## ۵- نتایج و بحث

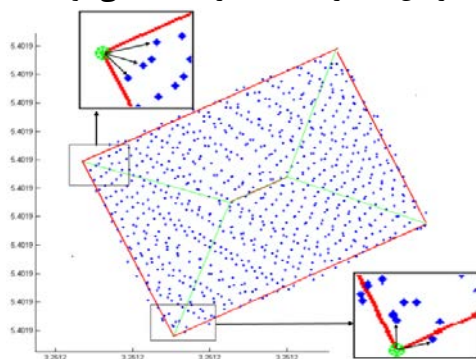
### ۵-۱- نتایج به‌دست‌آمده در مرحله استخراج ساختمان

نتایج فرایند استخراج ساختمان برای سه ناحیه در شکل ۲۲ ارائه شده است. نقاط قرمز، نقاط مربوط به سقف ساختمان‌های استخراج شده و نقاط آبی نقاط غیر ساختمانی می‌باشند. در این مرحله بعد از جداسازی نقاط زمینی و پوشش گیاهی از روش ابتکاری تصویرسازی ابر نقاط در صفحات دوبعدی با هدف استخراج نقاط سقف ساختمان

با استخراج رئوس مهم سقف ساختمان، صفحات سقف با اتصال این نقاط ایجاد می‌شوند. برای این منظور ابتدا بر روی رئوس مهم سقف مثلث‌بندی دلونی انجام شده و برای تمامی مثلث‌ها بردار نرمال محاسبه می‌شود. مثلث‌هایی که دارای دو شرط؛ مجاورت و برابر بودن بردار نرمال باشند، باهم ادغام می‌شوند و تشکیل اشکال چهارضلعی یا پنج‌ضلعی می‌دهند. در شکل ۱۹ مثلث‌های ۴، ۵ و ۶ دارای بردار نرمالی هم‌رستا بوده و باهم ادغام شده، مثلث‌های ۲ و ۳ دارای بردار نرمال

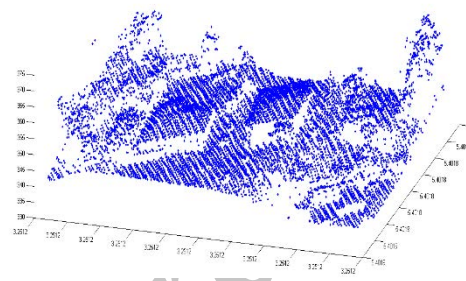


نقاط استخراج شده برای سقف ساختمان تولید می شود. ارزیابی نتایج مدل سازی ساختمان به وسیله مقایسه بین مدل های تولید شده با روش پیشنهادی با مدل های مرجع انجام می شود. این ارزیابی در جداول ۱ تا ۴ با محاسبه فاصله بین نقاط گوشه های ساختمان در دو مدل انجام می شود (شکل ۲۱). با توجه به جداول نتایج، ساختمان های این ناحیه با دقت ۴۲ سانتی متر مدل سازی شده اند. تمامی اعداد در جداول ۱ تا ۴ نتایج دارای واحد متر می باشند. با بررسی نتایج مدل سازی ساختمان به نکته خواهیم رسید که هر چه میزان پوشش گیاهی قرار گرفته بروی سقف ساختمان و پیچیدگی های سقف افزایش یابد، از دقت مدل سازی کاسته می شود.

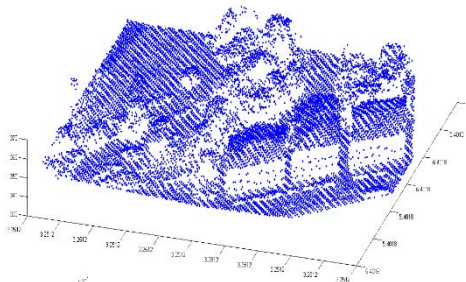


شکل ۲۱- ارزیابی نقاط گوشه ساختمان

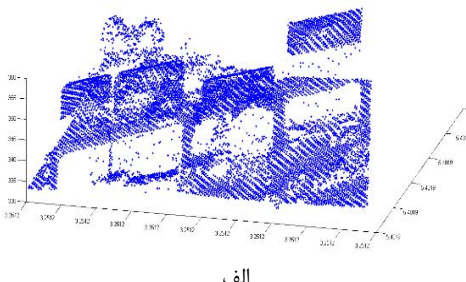
ناحیه ۱



ناحیه ۲



ناحیه ۳



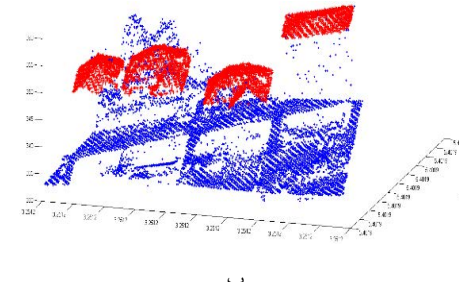
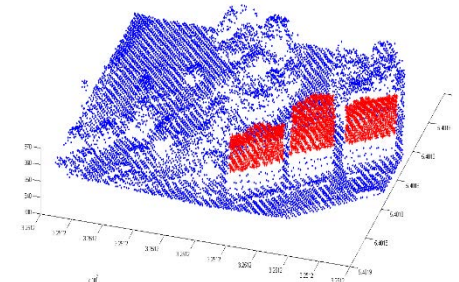
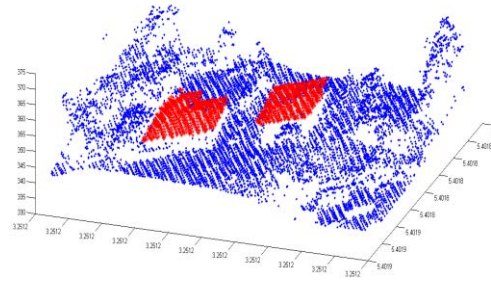
الف

استفاده شده است. با توجه به کامل نبودن روش های استخراج نقاط زمینی و نقاط پوشش گیاهی، تعدادی از این نقاط به همراه نقاط دیوارهای هر ساختمان در مجموعه نقاط جداسازی نمی شوند. فرآیند تصویرسازی ضمن جداسازی این نقاط، نقاط مربوط به پوشش گیاهی متراکم قرار گرفته بر روی سقف ساختمان را با موفقیت شناسایی و جداسازی می کند.

## ۵-۲- نتایج به دست آمده در مرحله مدل سازی

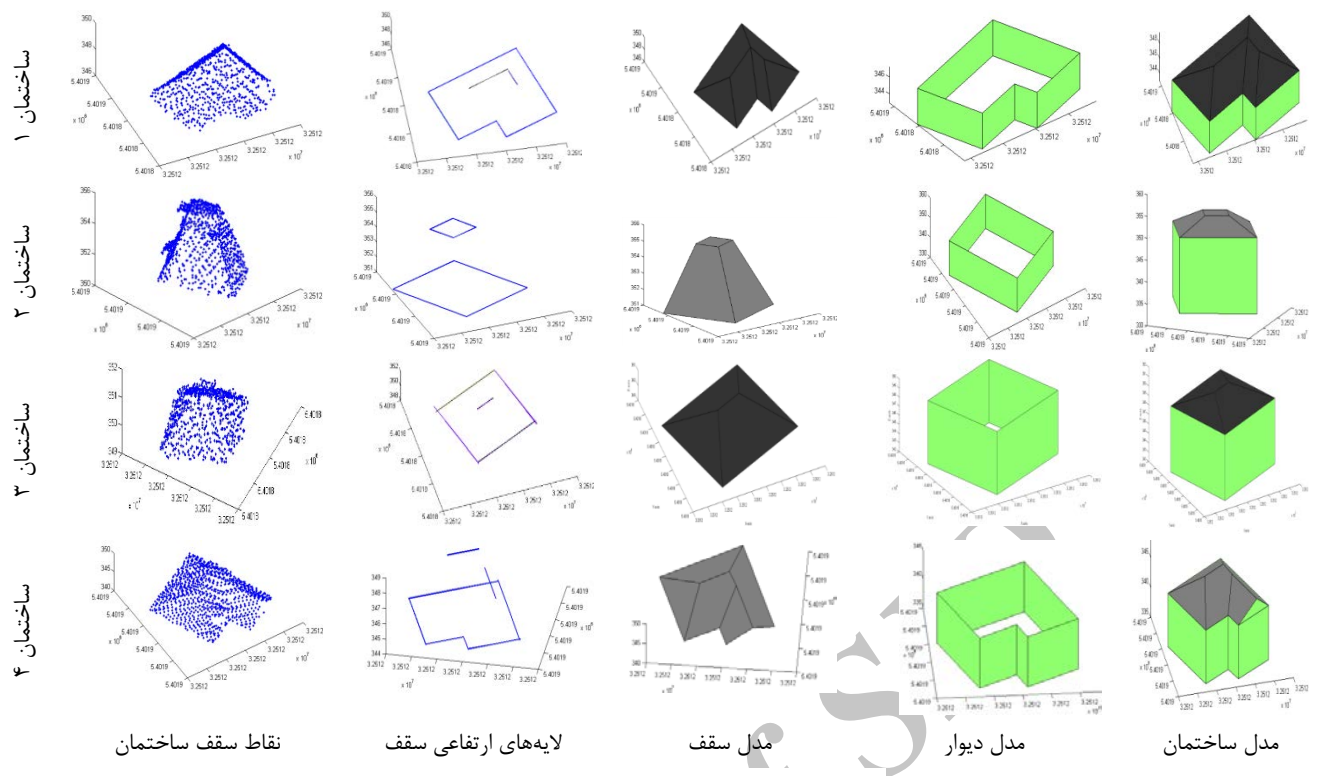
مراحل مدل سازی چهار ساختمان با ساختارهای متفاوت در شکل ۲۳ ارائه شده است. برای هر ساختمان به ترتیب در هر ستون نقاط سقف ساختمان، لایه های ارتفاعی سقف، مدل دیوار و در نهایت مدل ساختمان نشان داده شده است. در شکل ۲۴ مدل سازی ساختمان های منطقه ارائه شده است.

دقت مدل سازی چهار ساختمان در جداول ۱، ۲، ۳ و ۴ نشان داده شده است. برای هر ساختمان دقت چهار گوشه ساختمان در سه راستای طول ( $dx$ )، راستای عرض ( $dy$ ) و راستای ارتفاع ( $dz$ ) مورد ارزیابی قرار می گیرد. برای ارزیابی نتایج مدل سازی، مدل مرجعی برای ناحیه مورد مطالعه در دسترس نیست. بنابراین توسط اپراتور مدل مرجع با استفاده از

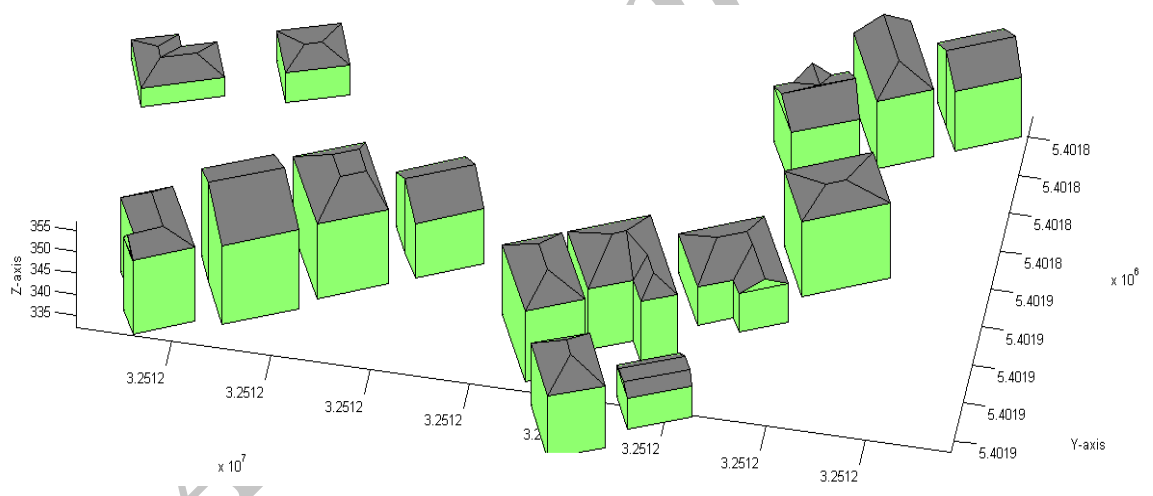


ب

شکل ۲۲- نتایج استخراج نقاط ساختمانی. الف- ابر نقاط خام لیدار. ب- ساختمان های استخراج شده. نقاط قرمز: نقاط ساختمانی، نقاط آبی: نقاط غیر ساختمانی



شکل ۲۳- مراحل مدلسازی ۴ ساختمان نمونه از داده تست



شکل ۲۴- مدل ساختمان‌های موجود در داده تست.

جدول ۱- دقت مدلسازی ساختمان شماره ۱ (بر حسب متر)

ساختمان ۱	نقطه	dx	dy	dz	خطای موقعیت نقطه	خطای ساختمان	
	۱	-۰/۵۲	۰/۴۳	-۰/۲۷	۰/۷۳	۰/۴۶	
	۲	۰/۰۶	۰/۴	-۰/۱۸	۰/۴۵		
	۳	۰/۳۷	-۰/۱۲	-۰/۰۵	۰/۳۹		
	۴	-۰/۲۵	-۰/۱۳	-۰/۰۲	۰/۲۸		

جدول ۲- دقت مدلسازی ساختمان شماره ۲ (برحسب متر)

ساختمان ۲	نقطه	dx	dy	dz	خطای موقعیت نقطه	خطای ساختمان
	۱	-۰/۱۱	۰/۰۸	-۰/۱	۰/۱۶	۰/۳۴
	۲	۰/۲۶	۰/۲۱	-۰/۰۱	۰/۳۳	
	۳	۰/۲۴	-۰/۳۱	-۰/۱۳	۰/۴۱	
	۴	-۰/۳۶	-۰/۰۳	-۰/۲۸	۰/۴۵	



جدول ۳- دقت مدلسازی ساختمان شماره ۳ (برحسب متر)

ساختمان ۳	نقطه	dx	dy	dz	خطای موقعیت نقطه	خطای ساختمان
	۱	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۱۲	۰/۱۳	۰/۴۶
	۲	۰/۱۲	۰/۲۵	۰/۰۶	۰/۲۹	
	۳	-۰/۰۸	۰/۲۳	۰/۰۸	۰/۲۷	
	۴	-۰/۶۶	-۰/۹۲	۰/۲۷	۱/۱۶	



جدول ۴- دقت مدلسازی ساختمان شماره ۴ (برحسب متر)

ساختمان ۴	نقطه	dx	dy	dz	خطای موقعیت نقطه	خطای ساختمان
	۱	۰/۱۹	۰/۲۱	-۰/۰۵	۰/۲۸	۰/۴
	۲	۰/۱۲	۰/۵۳	-۰/۲	۰/۵۷	
	۳	۰/۳۶	۰/۱۹	-۰/۰۳	۰/۴	
	۴	-۰/۶۴	-۰/۱۶	۰/۰۶	۰/۶۶	



## ۶- نتیجه گیری و پیشنهادات

قرار گرفته بر روی سقف برخی از نقاط سقف ساختمان در داده‌ها ثبت نشده‌اند، از لایه‌های ارتفاعی سقف و رئوس مهم سقف ساختمان به منظور مدلسازی استفاده شد. با پیاده‌سازی الگوریتم بیشتر ساختمان‌ها با موفقیت مدلسازی شدند. البته با افزایش جزئیات ساختمان‌ها از دقت مدلسازی کاسته شد و الگوریتم در مدلسازی ساختمان‌های پیچیده موفقیت کمتری داشته است.

نتایج مدلسازی با توجه به تراکم نقاط اولیه لیدار مطلوب است، اگرچه روش پیشنهادی در این تحقیق با معایب و مشکلاتی همراه بوده است. مرحله جداسازی نقاط پوشش گیاهی و استخراج نقاط ساختمان دارای حجم محاسباتی بالایی است و استخراج ساختمان در مناطق وسیع زمان‌بر است. از این رو پیاده‌سازی روش در ناحیه‌های کوچک انجام شده و سپس نتایج ناحیه‌های مختلف در کنار هم ارائه می‌شوند. در این تحقیق مدلسازی ساختمان فقط بر روی ساختمان‌های دارای شکل هندسی منظم با خطوط مستقیم انجام شده است. از این رو در تحقیقات آینده ارائه الگوریتمی

با توجه به پیچیدگی‌ها و تنوع زیاد در شکل ساختمان‌ها و همچنین تنوع داده‌های موجود برای مدلسازی ساختمان‌ها، با یک روش و فرآیند خاص نمی‌توان تمامی ساختمان‌ها را مدلسازی کرد و به نتایج قابل قبول برای تمامی ساختمان‌ها رسید. در این تحقیق، از ابر نقاط لیدار با تراکم ۴ نقطه در مترمربع از منطقه‌ای در شهر اشتوتگارت آلمان به عنوان داده آزمایشی استفاده شد. ساختمان‌های مدلسازی شده به‌طور متوسط دارای دقت ۴۲ سانتی‌متر می‌باشند. اگرچه الگوریتم پیشنهادی در این تحقیق بر روی ساختمان‌های مختلف و با پیچیدگی‌های متفاوت قابل پیاده‌سازی است، تمرکز در این تحقیق بر روی مدلسازی ساختمان‌های در مجاورت پوشش گیاهی است. در این روش به‌منظور استخراج ساختمان از پوشش گیاهی در مرحله اول از تصویرسازی نقاط سه‌بعدی در صفحات دوبعدی استفاده شد. در مرحله دوم برای مدلسازی ساختمان با توجه به این که به علت پوشش گیاهی

## سپاسگذاری

داده‌های مورد مطالعه در این تحقیق با کسب اجازه و تشکر جناب دکتر عارفی مورد استفاده قرار گرفته است.

برای مدل‌سازی ساختمان‌های منحنی شکل پیشنهاد می‌شود. روش پیشنهادی برای مدل‌سازی سقف ساختمان، جزئیات سقف ساختمان نظیر پنجره‌های روی سقف و شیروانی را در برنمی‌گیرد. از این رو ارائه راهکاری برای اضافه کردن قطعات روی سقف به مدل ساختمان ضروری است.

## مراجع

- [1] Sajadiyan, M, (2013), "Advanced Prismatic Automatic Preparation of Multi-layer flat roofed buildings by use Lidar," Master Thesis, Department of surveying, University of Tehran.
- [2] C. Nardinocchi, G. Forlani, (2001), "Detection and segmentation of building roofs from Lidar data," Proceedings of ISPRS Workshop on 3D digital imaging and modelling applications of heritage, industries, medicine & commercial land, Padua, Italy.
- [3] K. Zhang, J. Yan, and S. Chen, (2006), "Automatic construction of building footprints from airborne LIDAR data," IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 44 (9):2523-2533.
- [4] L. Zebedin, A. Klaus, B. Gruber-Geymayer and K. Karner, (2006), "Towards 3d map generation from digital aerial images," International Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 60(6), pp. 413-427.
- [5] A. Turlapaty, B. Gokaraju, N. Younan and J. Aanstoos, (2012), "A Hybrid Approach for Building Extraction From Spaceborne Multi-Angular Optical Imagery," IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, vol.5, no.1, pp.89-100.
- [6] S. Syed, P. Dare and S. Jones, (2005), "Automatic classification of land cover features with high resolution imagery and lidar data: an object-oriented approach," Proceedings of SSC2005 Spatial Intelligence, Innovation and Praxis: The national biennial Conference of the Spatial Sciences Institute.
- [7] J. Park, I. Lee, Y. Choi and Y. J. Lee, (2006), "Automatic Extraction of Large Complex Buildings Using Lidar Data and Digital Maps," International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 36(3), pp. 148-154.
- [8] S.R. Lach, (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.
- [9] G. Miliareisis and N. Kokkas, (2007), "Segmentation and object-based classification for the extraction of the building class from LIDAR DEMs," Comput, Geosci, 33, 1076-87.
- [10] L. Matikainen, J. Hyppaa, E. Ahokas, L. Markelin, H. Kaartinen, (2010), "Automatic detection of building and changes in building for updating of maps," Remote Sens, 2, 1217-1248.
- [11] M. Kabolizade, H. Ebadi, S. Ahmadi, (2010), "An improved snake model for automatic extraction of buildings from urban aerial images and LiDAR data," Computers, Environment and Urban Systems, vol 34, pages 435-441.
- [12] Sajadiyan, M, Arefi, H, (2015). "The extension of the RANSAC method in the approximation of the edge of the building roof from the points cloud Lidar." International Conference of SMPR, 2015, Tehran.
- [13] M. Awrangjeb, C.S. Fraser, (2014), "Automatic Segmentation of Raw LIDAR Data for Extraction of Building Roofs," Remote Sens, 2014, 6, 3716-3751.
- [14] V. Verma, R. Kumar, S. Hsu, (2006), "3D Building detection and modeling from Aerial LIDAR Data," In: Proceedings of 2006 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR 2006), New York, NY, USA, Vol III, pp. 2213-2220.
- [15] F. Tarsha-Kurdi, T. Landes, P. Grussenmeyer, M. Koehl, (2007), "Model-driven and data-driven approaches using LIDAR data: analysis and comparison," International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 36 (Part 3/W49A), pp. 87-92.
- [16] A. Sampath, J. Shan, (2010), "Segmentation and reconstruction of polyhedral building roofs from aerial LiDAR point clouds," IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 48 (3), 1554-1567.
- [17] H. Arefi, P. Reinartz, (2013), "Building Reconstruction Using DSM and Orthorectified Images," Remote Sensing, 5(4):pp.1681-1703.
- [18] E. Orthuber, and J. Avbelj, (2015), "3D Building Reconstruction From Lidar Point Clouds By Adaptive Dual Contouring," isprsannals-II-3-W4-157.