



سنجش از دور & GIS ایران



سنجش از دور و GIS ایران / سال ششم، شماره سوم، پاییز ۱۳۹۳
Iranian Remote Sensing & GIS / Vol. 6, No. 3, Autumn 2014

۸۹-۱۰۲

طبقه‌بندی داده‌های لیدار موج‌پیوسته با ترکیب ویژگی‌های فیزیکی و هندسی در مناطق شهری

محسن حسن‌زاده شاهراجی^۱، علی محمدزاده^{۲*}

۱. کارشناس ارشد فتوگرامتری و سنجش از دور، دانشکده مهندسی ژئوماتیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
۲. استادیار گروه فتوگرامتری و سنجش از دور، دانشکده مهندسی ژئوماتیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۱/۲۵

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۰/۱۱/۲۰

چکیده

در دو دهه اخیر استفاده از لیزراسکن‌های هوایی یا لیدار در کاربردهای گوناگون مهندسی ژئوماتیک رشد فزاینده‌ای یافته است. دلیل این امر قابلیت اعتماد بالا و صحت داده‌های خروجی حاصل از این نوع سنجنده‌هاست. خروجی لیدار، ابرنقاط سه‌بعدی طبقه‌بندی‌نشده و غیرساختاریافته است. برای عملیاتی کردن داده‌های مذکور می‌بایست این داده‌ها به‌نوعی ساختارمند شوند و در کلاس‌های متمایز طبقه‌بندی گردند. در پژوهش حاضر با تلفیق ویژگی‌های هندسی و فیزیکی داده‌های حاصل از سنجنده جدید لیزراسکن هوایی موج‌پیوسته، بردار ویژگی متناسب با هر نقطه از ابرنقاط تشکیل می‌شود. روند پردازش به‌کارگرفته‌شده در این مقاله شامل استخراج ویژگی‌های هندسی از مختصات سه‌بعدی نقاط موجود در ابرنقاط است. این ویژگی شامل میزان مشارکت نقطه مطلوب در تشکیل یک صفحه در ابرنقاط است. برای رسیدن به این هدف از تبدیل هاف سه‌بعدی استفاده شده است. در کنار این ویژگی هندسی، ویژگی‌های فیزیکی شامل دامنه پالس، پهنای پالس و شماره پالس بازگشتی نیز به هر نقطه در داده‌های لیزراسکن هوایی موج‌پیوسته اختصاص داده می‌شود. با استفاده از بردار ویژگی تشکیل شده برای هر نقطه و طبقه‌بندی‌کننده ماشین‌بردار پشتیبان، ابرنقاط غیرساختاریافته را به مجموعه‌ای ساختاریافته و کلاسه‌بندی‌شده تبدیل می‌کنیم. خروجی حاصل از روش ارائه‌شده در این مقاله شامل ابرنقطه‌ای طبقه‌بندی‌شده به سه کلاس زمین‌لخت، ساختمان و پوشش گیاهی است. این طبقه‌بندی با دقت کلی ۸۱/۰۴ درصد، ضریب کاپا ۰/۶۹ و دقت میانگین ۷۹/۲۱ درصد انجام شده است.

کلیدواژه‌ها: لیدار موج‌پیوسته، طبقه‌بندی‌کننده ماشین‌بردار پشتیبان، پردازش ابرنقاط، تبدیل هاف سه‌بعدی، مناطق شهری.

* نویسنده مکاتبه‌کننده: تهران، خیابان ولی‌عصر، تقاطع میرداماد، دانشگاه فنی خواجه نصیرالدین طوسی، گروه فتوگرامتری و سنجش از دور، دانشکده مهندسی ژئوماتیک،

تلفن: ۰۹۱۲۴۷۵۲۹۶۱

۱- مقدمه

در دو دهه اخیر استفاده از داده لیزر اسکنر هوایی یا همان لیدار به‌منظور تولید مدل رقومی زمین و تشکیل مدل سطح^۱ بسیار فراگیر شده است (Ackerman, 1999). این سنجنده از نوع فعال است و در محدوده طیفی مادون قرمز نزدیک کار می‌کند و خروجی آن ابرنقاط سه‌بعدی با دقت هندسی بسیار بالاست (Ackerman, 1999). این ابرنقاط سه‌بعدی، زمین مرجع شده و غیرساختاریافته^۲ هستند و تهیه و تولید آنها در فرایندی قابل اعتماد، سریع و دقیق صورت می‌پذیرد (Mallet et al., 2008). از کاربردهای ویژه لیزراسکن‌های هوایی، استخراج خودکار ساختمان در مناطق شهری به‌منظور مدل‌سازی شهری است (Ackerman, 1999). تولید خودکار مدل‌های سه‌بعدی توصیف‌کننده اشیای ساخته دست بشر - نظیر ساختمان‌ها - در تحقیقات فتوگرامتری اهمیت بسیار بالایی دارد (Stilla et al., 2005).

پس از سال ۲۰۰۴، نوع جدیدی از لیزراسکن هوایی با نام لیدار موج‌پیوسته با قابلیت ثبت کل موج حاصل از پالس سیگنال بازپخش‌شده^۳، به‌صورت تجاری در دسترس قرار گرفت (Mallet and Bretar, 2009). خروجی این نوع سنجنده علاوه بر مختصات سه‌بعدی، ویژگی‌هایی با ماهیت فیزیکی است که از پیش‌پردازش سیگنال موج بازگشتی به سنجنده حاصل می‌شود. سنجنده لیدار موج گوسی‌شکل و متقارنی را به‌سمت هدف گسیل می‌کند و این موج پس از برخورد با عوارض و اشیای طبیعی یا مصنوعی دچار اعوجاج می‌شود و به‌صورت کاملاً نامتقارن به سنجنده بازمی‌گردد. از پردازش موج بازگشتی می‌توان پارامترهایی نظیر دامنه^۴، پهنا^۵ و شماره پالس بازگشتی^۶ را استخراج کرد، که ماهیتی فیزیکی دارند.

به‌دلیل جدیدبودن لیدار موج‌پیوسته تحقیقات بسیار محدودی در این زمینه انجام شده است. برخی از تحقیقات انجام‌شده بر مبنای استخراج عوارض از طریق پردازش‌های سیگنالی روی موج بازگشتی هستند

(Jutzi and Stilla 2006; Mallet et al., 2008). برخی دیگر به پردازش ابرنقاط سه‌بعدی می‌پردازند (Chahata et al., 2009; Mallet et al., 2008) و از پارامترهای فیزیکی منحصر به‌فرد لیدار موج پیوسته به‌منظور بهبود طبقه‌بندی بهره می‌گیرند. در پژوهش حاضر از رویکرد دوم بهره گرفته شده است و ورودی الگوریتم در آن شامل ابرنقاط سه‌بعدی با مختصات هندسی و ویژگی‌های فیزیکی است. چاهاتا و همکاران (۲۰۰۹) از ترکیب داده‌های لیدار موج پیوسته و تصویر هوایی اورتو بهره گرفتند. در مدل آنها بردار ویژگی با دوازده پارامتر شامل سه المان اپتیکی B, G, R و پنج المان هندسی استخراجی از مختصات هندسی نقاط و چهار پارامتر فیزیکی شامل پهنا، پالس، دامنه پالس، سطح مقطع پالس و شکل پالس است. اشکال عمده این روش، معایب ناشی از تلفیق تصویر اپتیکی و داده‌های لیدار و خطاهای حاصل از درون‌یابی است. کار مالت و همکاران (۲۰۰۸) مجموعه‌ای از خصوصیات فیزیکی شامل انحراف بردار نرمال محلی از جهت عمود، اختلاف بلندی بین اولین و آخرین پالس یک موج و همچنین خصوصیات فیزیکی را در بر می‌گیرد. بین پارامترهای فیزیکی پارامتری به‌نام شکل موج وجود دارد که از پردازش سیگنالی موج بازگشتی ایجاد می‌شود و اشکال عمده این روش به‌شمار می‌آید. دلیل پیدایش اشکال مذکور این است که بسیاری از شرکت‌های تولیدکننده داده لیدار موج پیوسته به‌دلایل امنیتی و فن‌شناختی مایل نیستند که داده خام و سیگنال پردازش‌نشده را در اختیار مصرف‌کننده نهایی قرار دهند. آنها ترجیح می‌دهند ابرنقاط سه‌بعدی را تشکیل دهند و پارامترهای خام و اولیه مربوط به آنها را تولید کنند و در اختیار مصرف‌کننده نهایی قرار دهند.

1. Surface Model
2. Unstructured
3. Backscattered signal echo
4. Amplitude
5. Width
6. Echo Number

به‌کارگیری آن برای کلاسه‌بندی ابرنقاط سه‌بعدی توضیح داده می‌شود. در بخش پایانی نتایج به‌دست‌آمده بررسی می‌شود و ارزیابی نتایج حاصل از طبقه‌بندی ابرنقاط لیدار انجام می‌شود.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- ویژگی‌های منطقه مورد مطالعه

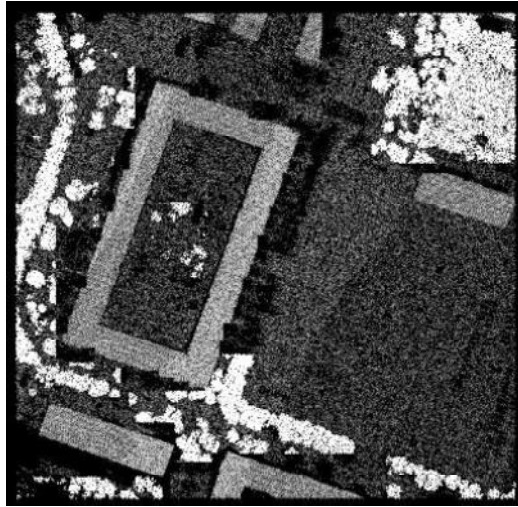
در پژوهش حاضر از بخشی از داده‌های لیدار موج‌پیوسته منطقه پارک شونبرون^۴ واقع در شهر وین کشور اتریش که با استفاده از سنجنده لیدار موج‌پیوسته Riegl LMS-Q560 دریافت شده است، بهره گرفته می‌شود. تراکم نقاط در هر مترمربع در هر نوار برداشتی یک نقطه است. در مجموع ۱۱ نوار پرواز برداشت شده است. پوشش عرضی بین نوارها در حدود ۷۵ درصد است. به دلیل همین پوشش عرضی بسیار بالا هنگامی که نقاط برداشت‌شده هر نوار کنار هم قرار می‌گیرند، هر مترمربع تراکم زیادی در حد ۶ تا ۷ نقطه می‌یابد. البته در روند پیاده‌سازی الگوریتم از منطقه انتخابی جداشده شامل سه کلاس مورد نظر ما استفاده شده است. این منطقه دارای تعدادی ساختمان، پوشش گیاهی مناسب و زمین‌لخت نسبتاً وسیعی است. در شکل ۱ نمای از منطقه مورد نظر نشان داده شده است. داده‌های مرجع کاملاً دستی به‌دست آمده‌اند و با اطمینان بسیار بالا هر نقطه مربوط به کلاس صحیح خود است. در جدول ۱ تعداد نقاط مربوط به هر کلاس نمایش داده شده است.

در پژوهش حاضر طبق شکل ۲ مراحل مختلف الگوریتم ارائه‌شده نشان داده شده است. ابتدا دو قسمت هندسی و فیزیکی داده اولیه را از یکدیگر جدا و تبدیل هاف سه‌بعدی را اعمال می‌کنیم. سپس بردار ویژگی را تشکیل و طبقه‌بندی ابرنقاط را انجام می‌دهیم. در نهایت نیز نتایج به‌دست‌آمده ارزیابی می‌شوند.

همان‌طور که بیان شد، برای طبقه‌بندی داده‌های لیدار موج‌پیوسته در مدل چاهاتا و همکاران (۲۰۰۹) بهره‌مندی از داده‌های اپتیکی و در روش مالت و همکاران (۲۰۰۸) به پردازش سیگنال موج بازگشتی نیاز است. در نوشتار حاضر برای نخستین بار رویه جدیدی برای طبقه‌بندی داده‌های لیدار موج‌پیوسته اتخاذ شده که شامل ترکیب هم‌زمان ویژگی‌های فیزیکی و هندسی نقاط است. در این روش هم از ویژگی‌های فیزیکی پالس موج ارسالی شامل پهنا، دامنه و عدد اکوی پالس و هم از ویژگی‌های هندسی ابرنقاط بهره برده شده است. در عین حال سعی شده است که بدون نیاز به داده‌های اپتیکی و پردازش‌های سیگنالی موج بازگشتی، روش جدیدی برای طبقه‌بندی داده‌های لیدار موج‌پیوسته آزمون و اجرا شود. در این روش ابتدا از طریق تبدیل هاف سه‌بعدی صفحات از ابرنقاط جدا می‌شوند. دلیل اصلی توجه به صفحات این است که بسیاری از اشیاء و لوازم ساخت دست بشر از جمله جاده‌ها و ساختمان‌ها از مجموعه‌ای از صفحات تشکیل شده‌اند (Borman and Elseberg, 2009) و از طرف دیگر عوارض طبیعی مثل پوشش گیاهی به‌شدت نامنظم و غیرصفحه‌ای هستند. به همین دلیل صفحه نقش بسیار مهمی در تفکیک این دو نوع عارضه دارد. با ترکیب ویژگی صفحه‌بودن نقاط و ویژگی‌های فیزیکی داده لیدار موج‌پیوسته، بردار ویژگی مورد نیاز برای تفکیک نقاط در طبقه‌بندی‌کننده ماشین‌بردار پشتیبان به سه کلاس زمین‌لخت^۱، ساختمان و پوشش گیاهی فراهم می‌آید. می‌توان این روش را روش طبقه‌بندی قطعه‌مینا^۲ نامید.

در پژوهش حاضر ابتدا ضرورت طبقه‌بندی داده‌های لیدار موج‌پیوسته بررسی می‌شود. سپس در بخش دوم به توضیح چگونگی استخراج صفحه به‌کمک تبدیل هاف سه‌بعدی می‌پردازیم. در بخش سوم چگونگی به‌دست آوردن پارامترهای فیزیکی داده‌های لیدار موج‌پیوسته بررسی می‌شود. در بخش چهارم، طبقه‌بندی‌کننده ماشین‌بردار پشتیبان^۳ و روش

1. Bare Earth
2. Segmented-Based Classification
3. Support Vector Machine
4. Schonbrunn



شکل ۱. نمایی کلی از منطقه مطالعه‌شده در سه کلاس زمین‌لخت، ساختمان، و پوشش گیاهی

جدول ۱. تعداد نقاط مربوط به داده‌های تست برای هر کلاس

نام	تعداد کل نقاط	تعداد کل نقاط با کلاس	کلاس زمین‌لخت	کلاس ساختمان	کلاس پوشش گیاهی
مجموع داده	۲۷۷۵۸۳	۱۳۳۱۴۱	۵۳۵۵۸	۴۰۱۰۸	۳۹۴۷۵



شکل ۲. روندنمای مراحل الگوریتم طبقه‌بندی

۲-۲- استخراج ویژگی‌های هندسی به کمک

تبدیل هاف سه‌بعدی

همان‌طور که اشاره شد یکی از بهترین روش‌های به‌دست‌آوردن پارامترهای مناسب برای طبقه‌بندی، بهره‌گیری از ویژگی‌های هندسی ابرنقاط است. پژوهشگران بسیاری پتانسیل داده‌های لیدار چندبازگشتی^۱ به‌منظور تحلیل مناطق شهری و استخراج ساختمان را نشان داده‌اند (Sithole and Vosselman, 2004). طبقه‌بندی ابرنقاط سه‌بعدی بر مبنای خصوصیات هندسی و بافتی^۲ استوار است (Matikainen et al., 2007). چاهاتا و همکاران (2009) برای طبقه‌بندی داده‌های لیدار موج‌پیوسته از ۲۱ ویژگی استفاده کرده‌اند که در پنج گروه مختلف دسته‌بندی می‌شوند. در روشی دیگر که مالت و همکاران (2008) پیشنهاد کردند، بردار ویژگی طراحی شده برای نقاط شامل دودسته ویژگی هندسی و ویژگی فیزیکی (ویژگی برگرفته از خصوصیات داده‌های لیدار موج‌پیوسته) است. از ویژگی‌های هندسی آنها می‌توان به این موارد اشاره کرد: اختلاف بین برد پالس و بیشینه‌برد در فضای کروی نسبتاً بزرگ، انحراف معیار بردار نرمال محلی از جهت قائم، و اختلاف ارتفاع بین پالس اولی و آخری یک موج ساطع‌شده. این ویژگی‌ها به همراه سایر ویژگی‌های فیزیکی به‌دست‌آمده از موج پیوسته‌ارسالی، بردار ویژگی را تشکیل می‌دهند که در نهایت با طبقه‌بندی‌کننده ماشین‌برداری پشتیبان، داده‌های لیدار موج‌پیوسته طبقه‌بندی می‌شوند.

در مناطق شهری عوارض ساخت دست بشر فراوان‌اند. این عوارض دارای اشکال نسبتاً منظم هندسی هستند که غالباً می‌توان آنها را با مجموعه‌ای از سطوح تخت و صفحه‌ای شکل نشان داد. در مقیاسی وسیع‌تر می‌توان سطح زمین را به‌صورت سطوح هموار نمایش داد. برای استخراج هندسی اشیای ساخته‌شده و سطح زمین به الگوریتم‌هایی نیاز است که قادر به تشخیص سطوح تخت و هموار باشند (Vosselman, 2009). گام‌های اولیه برای استخراج اطلاعات، شامل

تشخیص صفحه یا سطوح هموار و سپس طبقه‌بندی نقاط بر مبنای اطلاعات حاصل از الگوهای محلی نقاط، شدت روشنایی اکو و شماره اکو است (Vosselman et al., 2004; Darmawati, 2008). علاوه بر صفحه، خطوط و لبه‌های تشکیل‌دهنده شکل هر شیء بخش زیادی از اطلاعات مورد نیاز برای تفسیر و طبقه‌بندی شیء مورد نظر را در اختیار سیستم بینایی انسان قرار می‌دهند (Borrman and Elseberg, 2009).

یکی از مهم‌ترین و کارآمدترین روش‌های تشخیص اشکال هندسی تبدیل هاف^۳ است. تبدیل هاف تکنیکی برای استخراج عوارض دارای رابطه پارامتریک مشخص ریاضی است. این تکنیک در حالت کلاسیک در دو بعد انجام می‌شود و معمولاً برای شناسایی خط، دایره و بیضی در تصاویر دوبعدی به‌کار گرفته می‌شود. عنوان تبدیل هاف برگرفته از اختراع ثبت‌شده پاول هاف در سال ۱۹۶۲ است، که از این روش ابداعی برای تشخیص خطوط ناقص و قطعه‌قطعه‌شده در شکل‌های حاصل از فعل و انفعالات هسته‌ای بهره برد.

برای یافتن صفحه در فضای سه‌بعدی از تبدیل هاف سه‌بعدی بهره می‌گیریم که تعمیم‌یافته‌ی حالت دوبعدی تبدیل هاف است. رابطه صفحه به‌صورت حاصل ضرب داخلی $p \cdot n = \rho$ در نظر گرفته می‌شود که در آن $P = (P_x, P_y, P_z)$ نقطه‌ای روی صفحه و n بردار نرمال عمود بر صفحه است. در فضای سه‌بعدی رابطه (۱) برقرار است، که فرمول صفحه را در فضای سه‌بعدی نشان می‌دهد (Borrman and Elseberg, 2009).

رابطه (۱)

$$p_x \cdot \cos \theta \cdot \sin \varphi + p_y \cdot \sin \theta \cdot \sin \varphi +$$

$$p_z \cdot \cos \varphi - \rho$$

که در آن، پارامتر θ زاویه بین بردار نرمال روی صفحه xy و پارامتر φ زاویه بین صفحه xy و بردار

1. Multi-Echo LiDAR

2. Textural

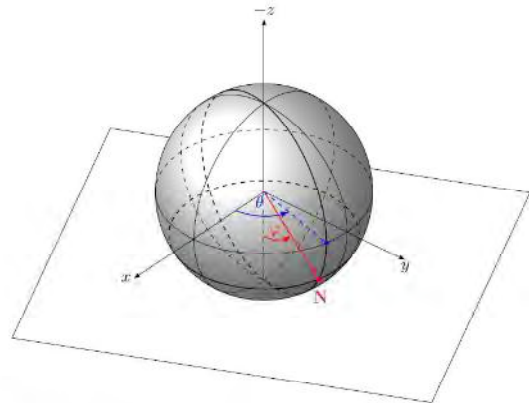
3. Hough Transform

پارامتریک می‌شود. بنابراین با شناسایی و تشخیص این تقاطع‌ها و مختصات قطبی‌شان در فضای پارامتریک هاف، می‌توان مختصات صفحات مطلوب در فضای سه‌بعدی کارتزینی را به‌دست آورد. در شکل ۴ این فرایند به تصویر کشیده شده است و در آن هر نقطه در فضای هاف متناسب با یک صفحه در فضای سه‌بعدی کارتزین R^3 است.

رویکردهای متفاوتی برای پیاده‌سازی تبدیل هاف سه‌بعدی وجود دارد (Borrman and Elseberg, 2009)، که دو نوع مهم آنها تبدیل هاف استاندارد^۱ و تبدیل هاف تصادفی^۲ است. در این مقاله از تبدیل هاف تصادفی یا RHT بهره گرفته شده است.

شرح و توضیح طرز کار تبدیل هاف تصادفی در شکل ۵ نشان داده شده که در آن ابتدا سه نقطه به‌صورت تصادفی انتخاب و سپس پارامترهای صفحه متناظر با آن به‌دست می‌آید. این پارامترها در فضای پارامتریک هاف تشکیل یک نقطه را می‌دهند. این نقطه در فضای انباشتگر^۳ به‌وسیله یک سلول معرفی می‌شود.

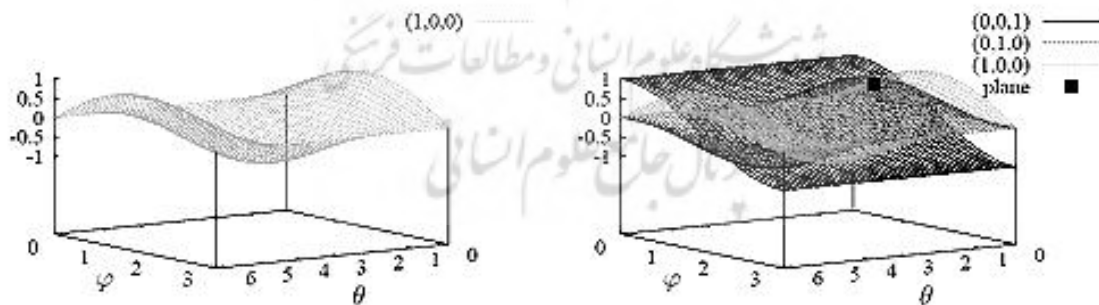
نرمال در جهت z است. پارامترهای φ ، θ و ρ فضای سه‌بعدی هاف (فضای پارامتریک) را مشخص می‌کنند. این زوایا در شکل ۳ مشخص شده‌اند و با تعاریف ارائه‌شده مطابقت دارند.



شکل ۳. نمایش پارامترهای قطبی، θ برای بردار نرمال در فضای سه‌بعدی

منبع: Borrman and Elseberg, 2009

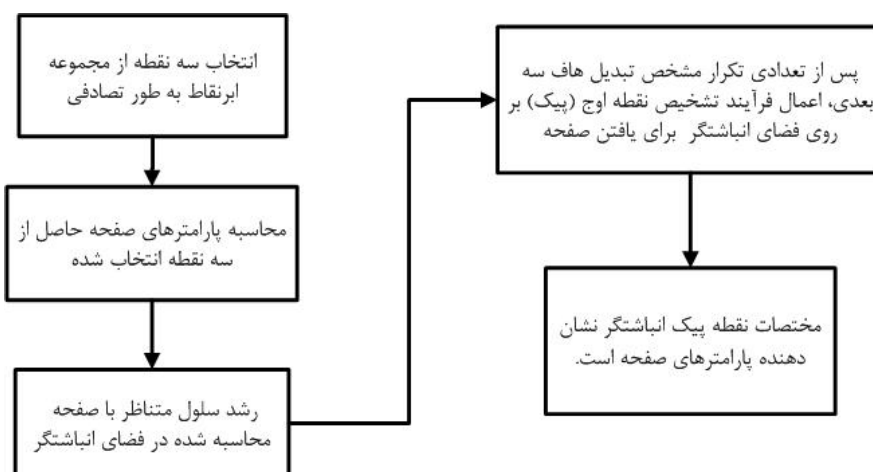
اگر نقطه‌ای در فضای کارتزینی باشد، در فضای هاف یک منحنی Sinusoid تشکیل می‌دهد. تجمع نقاط روی صفحه در فضای کارتزینی، موجب تقاطع منحنی‌های Sinusoid به‌دست آمده در فضای



شکل ۴. تقاطع سه‌منحنی sinusoid در فضای پارامترها در نقطه تشکیل‌دهنده پارامترهای یک صفحه

منبع: Borrman and Elseberg, 2009

1. Standard Hough Transform-SHT
2. Randomized Hough Transform-RHT
3. Accumulator Space



شکل ۵. الگوریتم پیاده‌سازی تبدیل هاف سه‌بعدی و استخراج صفحات

ارائه می‌کند، که تصویری پیوسته از مسیر طی‌شده با لیزر را نشان می‌دهد. همین خصوصیات منحصربه‌فرد کمک می‌کند تا دست‌کاربر نهایی در زمینه آنالیز و تحلیل داده‌های خروجی بسیار باز باشد. تحقیقات فراوانی در زمینه تحلیل سیگنال بازگشتی انجام شده و مدل‌های گوناگون ریاضی روی آن برآزش داده شده است (Mallet and Bretar, 2009). سنجنده با فاصله زمانی مشخص پالس‌های متقارن و گوسی را به سمت تارگت ارسال می‌کند. پس از برخورد پالس ارسالی به اشیای متفاوت در مسیر خود، پالس دچار اعوجاج می‌شود و از حالت تقارن و گوسی شکل خارج می‌گردد. این پالس نامتقارن به‌طور کامل به‌وسیله سنجنده دریافت و ثبت می‌شود. در مرحله نهایی به کمک تکنیک‌های پردازش سیگنالی و روش‌های تشخیص پیک^۱، دو پیک از کل پالس جدا می‌شود و به صورت دو نقطه استخراجی نشان داده می‌شود.

به‌خصوص در مناطق شهری خیلی از پیک‌ها دچار تغییر شکل می‌شوند. اکثر امواج بازگشتی در معرض تأثیرات گوناگون هندسی (مثلاً شیب سقف‌ها) و

به تدریج که الگوریتم هاف پیش می‌رود، در فضای انباشتگر در برخی سلول‌ها تجمع اتفاق می‌افتد. پس از تعداد معینی تکرار الگوریتم، سلول‌هایی که بیشترین میزان انباشت نقاط را داشتند، شناسایی می‌شوند و از آنها به عنوان صفحات یافت‌شده، استفاده می‌شود. اگر نقاط خیلی از هم جدا بیفتند، به احتمال خیلی قوی نمی‌توانند یک صفحه را تشکیل دهند. برای جلوگیری از این موضوع و کاهش خطاهای ناشی از نویز سنجنده، ضابطه و شرط فاصله‌ای بدین صورت تعریف می‌شود:

برای مثال $\text{dist}_{\max}(p_1, p_2, p_3) \leq \text{dist}_{\max}$ حداقل فاصله نقطه به نقطه بین p_1 ، p_2 و p_3 می‌بایست از یک حد آستانه ثابت بیشتر و حداکثر فاصله هم از یک مقدار ثابت کمتر باشد. نکته مهم این است که به دلیل وابستگی پارامتر ρ به پارامترهای φ و θ عملاً فضای پارامتریک هاف، دوبعدی است. شکل ۵ مراحل تبدیل هاف سه‌بعدی تصادفی (RHT) را نشان می‌دهد.

۲-۳- استخراج پارامترهای فیزیکی

سنجنده لیدار موج‌پیوسته با ارسال پالس لیزر و دریافت کامل آن، پروفیلی طولی از کل مسیر سیر پالس لیزر

1. Peak Detection

طبیعتاً میزان دامنه آن کاهش محسوسی نمی‌یابد. بنابراین استفاده از دامنه پالس (A) در تفکیک بین کلاس پوشش گیاهی از دو کلاس دیگر یعنی کلاس زمین‌لخت و ساختمان نقش محسوسی دارد.

پارامتر فیزیکی پهنای پالس (W): پهنای پالس ارسالی به فاصله افقی ابتدا و انتهای پالس مورد نظر گفته می‌شود. مقدار این پارامتر در عوارض کلاس پوشش گیاهی به دلیل پخش موج ارسالی بالاتر از سایر کلاس‌هاست. بدین ترتیب پالس بازگشتی شامل چندین اکو می‌شود و پهنای پالس افزایش می‌یابد. بنابراین از این پارامتر می‌توان برای ایجاد تمایز بین کلاس پوشش گیاهی از دو کلاس دیگر بهره جست.

پارامتر شماره اکوی پالس (N): این پارامتر نشان می‌دهد که نقطه استخراجی مربوط به کدام اکوی پالس بازگشتی است. مقدار این پارامتر در عوارض کلاس پوشش گیاهی بیش از یک است که دلیل آن عبور پالس ارسالی از عوارض گیاهی به درون آنها و تشکیل چندین اکو در پالس ارسالی است. این امر تعداد اکوهای موجود در پالس ارسالی را از عدد یک بیشتر می‌کند. در مورد سایر کلاس‌های زمین‌لخت و ساختمان به دلیل نفوذ نکردن پالس ارسالی به درون عوارض تعداد اکوها مقدار یک است. این پارامتر نیز در تفکیک کلاس پوشش گیاهی از کلاس‌های زمین‌لخت و ساختمان تأثیر بسزایی دارد.

با توجه به بررسی انجام‌شده درباره نقش هر یک از پارامترهای به کار گرفته‌شده در بردار ویژگی می‌توان به این نتیجه دست یافت که پارامترهای فیزیکی شامل دامنه پالس، پهنای پالس و شماره اکوی پالس و پارامتر هندسی صفحه‌بودن نقش بسیار مفید و مؤثری در تفکیک عوارض کلاس پوشش گیاهی از عوارض کلاس‌های زمین‌لخت و ساختمان دارند. پارامتر صفحه‌بودن علاوه بر نقش مذکور، در تفکیک بین دو کلاس زمین‌لخت و ساختمان بسیار مؤثر است.

خصوصیات رادیومتریکی اشیا می‌شوند (برای مثال مواد متفاوت سازنده خیابان و سقف) (Mallet and Bretar, 2009). پس از پردازش پالس بازگشتی، مجموعه‌ای از پارامترهای فیزیکی به دست می‌آید، که شامل دامنه پالس و شماره اکوی پالس هستند.

۲-۴- تشکیل بردار ویژگی

بردار ویژگی شامل ترکیبی از پارامتر هندسی صفحه‌بودن (H) و پارامترهای فیزیکی (W, A, N) است. برای دسته‌بندی به‌روش ماشین‌بردار پشتیبان می‌بایست برای هر نقطه یک بردار ویژگی تعریف شود. این پارامترها نقش مهمی در فرایند طبقه‌بندی نقاط ایفا می‌کنند. در ادامه، تأثیر هر یک از پارامترها در کلاس‌بندی ابرنقاط به سه کلاس زمین‌لخت، ساختمان و پوشش گیاهی شرح داده می‌شود.

پارامتر هندسی صفحه‌بودن (H): با استفاده از این پردازش روی ابرنقاط، نقاطی که تشکیل صفحه می‌دهند از سایر نقاط جدا می‌شوند. این صفحات روی عوارضی وجود دارند که در کلاس زمین‌لخت و کلاس ساختمان قرار می‌گیرند. در کلاس پوشش گیاهی، عوارض بیشتر نامنظم‌اند و اشکال ساده هندسی مانند صفحه به خود نمی‌گیرند. بنابراین پارامتر صفحه‌بودن (H) می‌تواند نقش بسزایی در تفکیک دو کلاس زمین‌لخت و ساختمان از کلاس پوشش گیاهی داشته باشد.

پارامتر فیزیکی دامنه پالس (A): این پارامتر شدت انرژی بازگشتی را نشان می‌دهد. دامنه پالس ارسالی پس از برخورد به عوارض گوناگون موجود بر زمین دچار تغییرات متفاوتی می‌شود. وقتی پالس ارسالی به پوشش گیاهی برخورد می‌کند، سطح انرژی آن کاهش چندانی نمی‌یابد. همین امر سبب می‌شود که مقدار آن تقریباً ثابت بماند و حالت متوسطی داشته باشد. در صورتی که همان پالس ارسالی از سنجنده به عارضه زمین‌لخت یا عارضه ساختمان برخورد کند، حجم بالایی از سطح انرژی پالس ارسالی کاهش می‌یابد و

۲-۵- طبقه‌بندی به روش ماشین بردار پشتیبان
در این مرحله به کمک ویژگی‌های استخراج شده برای نقاط و روش طبقه‌بندی ماشین بردار پشتیبان، نقاط را کلاسه‌بندی می‌کنیم. از آنجا که طبقه‌بندی‌کننده‌های مبتنی بر نظریه آموزش آماری نشان دادند که هم برای داده‌های با ابعاد بالا (منظور تعداد بالایی داده مانند ابرنقطه متراکم لیدار) و هم برای مجموعه آموزشی محدود قابلیت بسیار بالایی دارند، SVM به‌طور طبیعی برای طبقه‌بندی داده‌های لیدار در مناطق شهری به کار گرفته شده است (Mallet et al., 2011; Second & Zakhor, 2007; Mallet & Bretar, 2009). تعداد کلاس‌ها سه عدد و شامل ساختمان، پوشش گیاهی و زمین‌لخت^۱ است.

۲-۶- ارزیابی دقت
پس از طبقه‌بندی نوبت به ارزیابی دقت می‌رسد. بهتر است این کار از طریق داده‌های تست انجام گیرد، یعنی نمونه‌های مستقلی که در محاسبه‌ها و تخمین پارامترها دخیل نبوده‌اند. برای ارزیابی طبقه‌بندی‌کننده با دو دسته اطلاعات مواجهیم: اطلاعات معلوم و از پیش مشخص شده در مورد داده‌ها، و اطلاعاتی که نتیجه طبقه‌بندی‌کننده هستند. از مقایسه این دو مقدار، ماتریس ابهام^۵ تشکیل داده می‌شود و ارزیابی دقت انجام می‌گیرد. در پژوهش حاضر از سه پارامتر صحت کلی^۶ (Mallet et al., 2008)، ضریب کاپا (Richards and Jia, 2006) و دقت میانگین (Ibid) طبق روابط جدول ۲ استفاده شده است.

در پژوهش حاضر از تکنیک‌های مختلف موجود روش ماشین بردار پشتیبان، با توجه به حجم بالایی ابرنقاط و از روش ترکیب طبقه‌بندی‌کننده‌های دو کلاسه به صورت یکی در مقابل دیگری^۲ استفاده شده است. این تکنیک برای مسائل بزرگ و حجیم مناسب‌تر است (Hsu and Lin, 2002). در عمل از کتابخانه^۳ برنامه‌نویسی نوشته‌شده ماتئو جانسون^۴ با نام

جدول ۲. فرمولاسیون معیارهای ارزیابی دقت نتایج طبقه‌بندی‌کننده

$\rho = \frac{\sum_{i=1}^{\dim Y} A_{i,i}}{\sum_{i=1}^{\dim Y} \sum_{j=1}^{\dim Y} A_{i,j}} \in [0, 1]$	صحت کلی نسبت نمونه‌های درست ارزیابی شده به کل نمونه‌ها
$K = \frac{\sum_k x_{kk} - \sum_k x_{k+} x_{+k}}{N^2 - \sum_k x_{k+} x_{+k}}$	ضریب کاپا
$AA = 100 \times \frac{\sum_{i=1}^{N_c} CA_i}{N_c} \quad \text{with} \quad CA_i = \frac{C_{ii}}{\sum_{j=1}^{N_c} C_{ij}}$	دقت میانگین

1. Bare-Ground
2. One-Against-Others
3. Library
4. Matthew Johnson
5. Confusion Matrix
6. Overall Accuracy

ضریب کاپا معیار بسیار محکم‌تر و بهتری از صحت کلی است، زیرا در آن اثر مربوط به طبقه‌بندی درست تصادفی از بین می‌رود (مختارزاده، ۱۳۸۸). ضریب کاپا نمونه‌هایی را که شانس درست طبقه‌بندی شده‌اند به حساب نمی‌آورد. دقت میانگین از تقسیم دقت تولیدکننده کلاس‌ها بر تعداد کلاس‌ها به دست می‌آید.

۳- نتایج

ابتدا به کمک تبدیل هاف سه‌بعدی، صفحه را از ابرنقاط استخراج می‌کنیم. هنگام اجرای این تبدیل، در هر تکرار یک میلیون رابطه صفحه با کمک سه نقطه تصادفی انتخاب شده محاسبه می‌گردد. این صفحات هر کدام در فضای پارامتریک هاف یا همان فضای انباشتگر با یک سلول متناظرند. ابعاد این فضای پارامتریک یا همان انباشتگر 600×600 سلول هم‌اندازه انتخاب شده است. انتخاب اندازه این پارامترها به کمک آزمون و خطا صورت پذیرفته است.

نحوه اجرای تبدیل هاف سه‌بعدی به این صورت است که ابتدا کل مجموعه نقاط را در نظر می‌گیریم. پس از اجرای این تبدیل، مجموعه‌ای از نقاط که هر کدام تشکیل‌دهنده یک صفحه‌اند از مجموعه کل نقاط استخراج می‌شوند. در نخستین مرتبه‌ای که تبدیل هاف اجرا می‌شود، گروهی از نقاط که تشکیل‌دهنده سطح زمین هستند، بزرگ‌ترین گروه از نقاط را تشکیل می‌دهند. پیاده‌سازی تبدیل هاف به این صورت است که این نقاط در مجموعه‌ای جداگانه ذخیره و سپس از کل مجموعه نقاط حذف می‌شوند. حال به کمک مجموعه نقاط جدید تقلیل یافته، دو مرتبه تبدیل هاف را اجرا می‌کنیم تا صفحات بیشتری که معمولاً نماینده و نشان‌دهنده ساختمان‌ها و عوارض مصنوعی هستند، نمایان شوند. این فرایند را بسته به شرایط، نوع و حجم داده ادامه می‌دهیم. در پژوهش حاضر چهار مرتبه از تبدیل هاف استفاده شده و در هر مرحله ضمن حذف نقاط مراحل قبلی، صفحات جدید در ابرنقاط یافت و ذخیره شده‌اند.

هر کدام از نقاطی که در تبدیل هاف از مجموع

نقاط استخراج می‌شوند دارای یک مقدار هاف قراردادی می‌شوند. در واقع این مقداری است که طی طبقه‌بندی برای تفکیک کلاس‌ها به کار گرفته می‌شود. در نخستین تکرار هاف نقاط به دست‌آمده دارای مقدار هاف یا صفحه‌بودن یک و طی تکرارهای بعدی این مقدار تقسیم بر شماره تکرار به‌علاوه یک می‌شود. این مقادیر به ترتیب ۱، ۰/۵، ۰/۳۳ و ۰/۲۵ هستند. براساس محاسبات انجام‌شده طی تبدیل هاف ۸۴ درصد از کلاس زمین‌لخت، ۶۸ درصد از کلاس ساختمان و ۴۷/۶۵ درصد از کلاس پوشش گیاهی از مجموع کل داده‌ها استخراج و دارای مقدار ویژگی هاف می‌شوند. پس از تبدیل هاف و تشکیل بردار ویژگی برای هر نقطه وارد مرحله طبقه‌بندی می‌شویم.

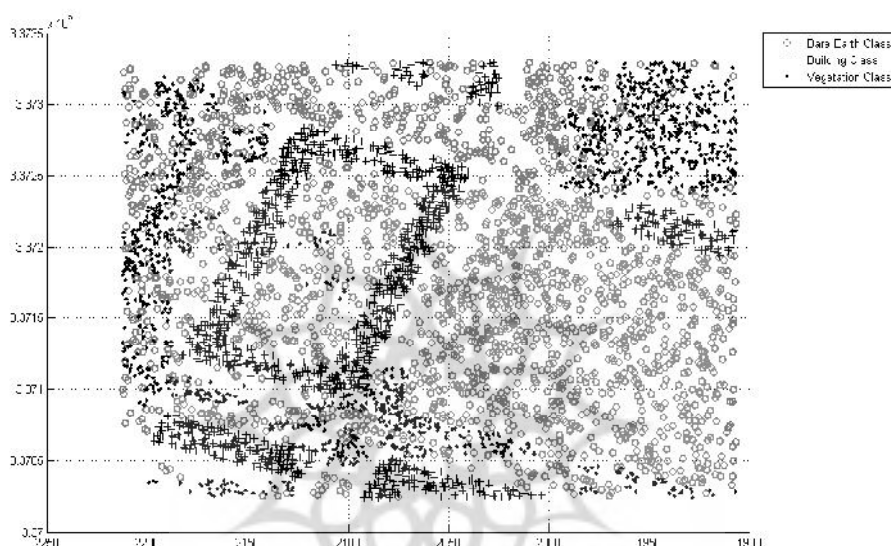
کل نقاط موجود در ابرنقطه شامل ۲۷۷۵۸۳ نقطه است، که از این تعداد ۱۳۳۱۴۱ نقطه (حدود ۴۷/۹۶ درصد کل نقاط) دارای برچسب کلاس مشخص است. برای انجام طبقه‌بندی، ابرنقاط دارای کلاس را به دو دسته تقسیم می‌کنیم و در حدود ۵۰ درصد را برای آموزش طبقه‌بندی‌کننده ماشین‌بردار پشتیبان و ۵۰ درصد باقی‌مانده را برای تست نتایج به کار می‌بریم. برای ارزیابی نتایج از داده‌هایی که شامل ۴۵۵۴۸ نقطه‌اند و کلاس‌شان مشخص است اما در عین حال در فرایند طبقه‌بندی و تشکیل مدل SVM شرکت نداشته‌اند، استفاده می‌شود. نتیجه حاصل از پیش‌بینی طبقه‌بندی‌کننده برای داده‌های تست به ترتیب پارامترهای ارزیابی شامل صحت کلی برابر ۸۱/۰۴ درصد، ضریب کاپا برابر ۰/۶۹ و صحت میانگین برابر ۷۹/۲۱ درصد برآورد شده، که نشان‌دهنده کارایی روش پیشنهادی در این مقاله است. نتایج به دست‌آمده نشان از کارآمدی روش به کار گرفته شده دارند. در جدول ۳ ماتریس ابهام به دست‌آمده نمایش داده شده است.

در شکل ۶ نتیجه به دست‌آمده نمایش داده شده است. در این شکل تراکم نقاط به میزان ۲۵ مرتبه نسبت به داده‌های واقعی کمتر شده است تا بتوان تفکیک به وجود آمده بین کلاس‌ها را به صورت شماتیک به خوبی نمایش داد.

طبقه‌بندی داده‌های لیدار موج‌پیوسته با ترکیب ویژگی‌های فیزیکی و هندسی در مناطق شهری

جدول ۳. ماتریس ابهام

کل نقاط	(داده‌های مرجع)			نام کلاس	زمین لخت	ساختمان	پوشش گیاهی
	پوشش گیاهی	ساختمان	زمین لخت				
۲۴۹۲۴	۱۸۱۷	۳۴۶۱	۱۹۶۴۶	زمین لخت			
۱۲۵۶۷	۳۷۷	۹۹۸۶	۲۲۰۴	ساختمان			
۸۰۵۸	۷۲۸۲	۱۹۷	۵۷۹	پوشش گیاهی			
۴۵۵۴۹	۹۴۷۶	۱۳۶۴۴	۲۲۴۲۹	کل نقاط			



شکل ۶. نتیجه نهایی طبقه‌بندی منطقه مورد مطالعه در سه کلاس زمین لخت، ساختمان و پوشش گیاهی

جدول ۴. نتایج ارزیابی دقت به دست آمده از پیاده‌سازی الگوریتم به کمک پارامترها و تعداد نمونه‌های آموزشی متفاوت

	%۵۰ AWNH	%۲۵ AWNH	%۵۰ AWN	%۲۵ AWN	
دقت کلی	۸۰/۶۲	۷۹/۸۱	۷۸/۴	۷۷/۹۱	
دقت میانگین	۸۰/۰۶	۷۹/۶۸	۷۷/۱	۷۷/۴۶	
ضریب کاپا	۷۰/۵	۶۹/۲۸	۶۷/۱	۶۶/۱۵	

جدول ۴ ابتدا فقط سه پارامتر فیزیکی در نظر گرفته شده‌اند. این سه پارامتر شامل دامنه پالس (A)، پهنای پالس (W) و شماره اکوی بازگشتی (N) است. طبقه‌بندی به کمک این سه پارامتر در دو حالت صورت گرفته است، حالت اول ۲۵ درصد و در حالت دوم ۵۰ درصد نقاط را به عنوان نقاط آموزشی در نظر می‌گیرد. در مرحله بعد افزون بر پارامترهای ذکر شده، پارامتر

همان‌طور که مشاهده می‌شود مقداری از کلاس زمین لخت و ساختمان با هم تداخل پیدا کرده‌اند، اما کلاس پوشش گیاهی به خوبی جدا شده و از دو کلاس دیگر تفکیک شده است. در ادامه به بررسی تأثیر تعداد نمونه‌های آموزشی و همچنین تعداد پارامترهای به کار گرفته شده در فرایند طبقه‌بندی داده‌های لیدار موج‌پیوسته می‌پردازیم. در

موج‌پیوسته در مقایسه با روش‌های دیگر از جمله روش مالت و همکاران (۲۰۱۱) داشته باشد.

به‌عنوان پیشنهاد می‌توان روی ویژگی‌های هندسی بیشتر تمرکز کرد و در خصوص تبدیل هاف و بهبود آن تحقیقات کامل‌تری انجام داد. در مورد ویژگی‌های فیزیکی می‌توان با تحلیل سیگنالی، موج عوارض فیزیکی بیشتری استخراج کرد که در کلاسه‌بندی نقاط به کار می‌آید. درنهایت می‌توان پارامترهای گوناگون را برای طبقه‌بندی SVM به کار برد و نتایج را با هم مقایسه کرد.

۶- منابع

مختارزاده، م.، ۱۳۸۸، **تشخیص الگو، دانشکده نقشه‌برداری و ژئودزی**، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، جزوه کارشناسی ارشد، تهران.

Ackerman, F., 1999, **Airborne Laser Scanning-present Status and Future Expectations**, ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 54, PP. 64-67.

Borrman, D. and J. Elseberg, 2009, **Deforming Scans for Improving the Map Quality using Plane Extraction and Thin Plane Splines**, in Institute for Computer Science Knowledge-Based Systems, University of Osnabruck, P. 157.

Borrmann, D., Elseberg, J., Lingemann, K., and Nüchter, A., 2010, **A Data Structure for the 3D Hough Transform for Plane Detection**, In Proceedings of the 7th IFAC Symposium on Intelligent Autonomous Vehicles (IAV '10), Lecce, Italy, September.

صفحه‌بودن (H) هم در نظر گرفته شده است. در این قسمت هم از ۲۵ درصد و هم از ۵۰ درصد اطلاعات استفاده شده و نتایج آن نسبت به قبل ارتقا پیدا کرده است.

۵- بحث و نتیجه‌گیری

در این نوشتار روش نوینی در دسته‌بندی ابرنقاط سه‌بعدی حاصل از سنجده لیدار موج‌پیوسته ارائه شد و از ویژگی‌های هندسی نظیر صفحه‌بودن و ویژگی‌های فیزیکی استخراجی از پالس بازگشتی اشعه لیزر ارسالی، برای تشکیل بردار ویژگی استفاده شد. درنهایت با طبقه‌بندی کننده ماشینی بردار پشتیبان، ابرنقاط به سه کلاس تفکیک شدند.

در مورد طبقه‌بندی ابرنقاط سه‌بعدی، مطالعات بسیار کمی انجام شده است. گروهی از پژوهشگران با پردازش سیگنالی موج بازگشتی، طبقه‌بندی داده‌های لیدار را انجام دادند (Mallet et al., 2008; Wagner et al., 2008). برخی دیگر با تلفیق ویژگی‌های حاصل از لیدار با منابع دیگر داده از جمله تصاویر اپتیکی، ویژگی‌های جدیدی را به بردار ویژگی اضافه کردند (Chahata et al., 2009; Charaniya et al., 2004). در روش پیشنهادی در پژوهش حاضر، ابرنقاط سه‌بعدی به روشی نیمه‌خودکار و بدون نیاز به پردازش سیگنالی موج بازگشتی یا استفاده از منابع دیگر، طبقه‌بندی شدند و نتایج مناسبی نیز به دست دارند. نزدیک‌ترین پژوهش صورت‌گرفته در این زمینه که می‌توان برای مقایسه از آن بهره برد مربوط به مقاله مالت و همکاران (۲۰۱۱) است. این پژوهشگران از پارامترهای مربوط به آنالیز سیگنالی موج بازگشتی استفاده کردند، که در بسیاری از مواقع این اطلاعات در دسترس عموم نیستند و پیچیدگی‌های بسیار بالای محاسباتی دارند. اما در روش پیشنهادی این مقاله از پارامترهای کم‌تعداد شامل یک پارامتر هندسی و سه پارامتر فیزیکی موجود در همه انواع داده‌های موج‌پیوسته استفاده شد، که کاملاً در دسترس‌اند. از این رو روش پیشنهادی می‌تواند عمومیت و کاربرد بیشتری برای طبقه‌بندی داده‌های

- Chahata, N., Guo L. and Mallet, C., 2009, **Airborne Lidar Feature Selection for Urban Classification Using Random Forests**, in Laser scanning 2009, IAPRS, Paris, France.
- Chang, C.C. and Lin, C.J., 2001, **LIBSVM: A Library for Support Vector Machines**, Software available at <http://www.csie.ntu.edu.tw/~cjlin/libsvm>.
- Charaniya, A., Manduchi, R. and Lodha, S., 2004, **Supervised Parametric Classification of Aerial Lidar Data**, in Real-Time 3D Sensors and their Use Workshop, in conjunction with IEEE CVPR, PP. 30-37.
- Chauve, A. et al., 2007, **Processing Full-Waveform Lidar Data: Modelling Raw Signals**, in ISPRS Workshop on Laser Scanning, Finland.
- Filin, S., 2002, **Surface Clustering From Airborne Laser Scanning Data**, in International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, PP. 119-124.
- Haala, N. and Brenner, C., 1999, **Extraction of Buildings and Trees in Urban Environments**, ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 54 (2-3), PP. 130-137.
- Hsu, C.W. and C.J. Lin, 2002, **A Comparison of Methods for Multiclass Support Vector Machines**, IEEE Transactions on Neural Networks, 13(2).
- Hyypa, J. et al., 2004, **Algorithms and Methods of Airborne Laser Scanning for Forest Measurements**, in International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, PP. 82-89.
- Jotzi, B. and U. Stilla, 2006, **Range Determination with Waveform Recording Laser Systems Using a Wiener Filter**, ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 61, PP. 95-107.
- Mallet, C. et al., 2011, **Relevance Assessment of Full-waveform Lidar Data for Urban Area Classification**, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 66, PP. 571-584.
- Mallet, C. and F. Bretar, 2009, **Full-waveform Topographic Lidar: State-of-the-art**, ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 64, PP. 1-16.
- Mallet, C., Bretar, F. and Soergel, U., 2008, **Analysis of Full-Waveform Lidar Data for Classification of Urban Areas**, Photogrammetrie Fernerkundung Geoinformation, 5, PP. 337-349.
- Matikainen, L., Kaartinen, H. and Hyypa, J., 2007, **Classification Tree Based Building Detection from Laser Scanner and Aerial Image Datas**, International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 36, PP. 280-287.
- Niemeyer, J. et al., 2010, **Conditional Random Fields for the Classification of Lidar Point Clouds**.

- Richards, J.A. and X. Jia, 2006, **Remote Sensing Digital Image Analysis**, Springer.
- Rottensteiner, F. and Briese, C., 2002, **A New Method for Building Extraction in Urban Areas from High-Resolution Lidar Data**, in International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, PP. 295-301.
- Secord, J. and Zakhor, A., 2007, **Tree Detection in Urban Regions Using Aerial Lidar and Image Data**, IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters 4 (2), PP. 196-200.
- Stilla, U., Rottensteiner, F. and Hinz, S., 2005, **Object Extraction for 3D City Models, Road Databases, and Traffic Monitoring - Concepts, Algorithms, and Evaluation**, in International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences.
- Sithole, G., 2005, **Segmentation and Classification of Airborne Laser Scanner Data**, in ITC. University of Delft: The Netherlands.
- Sithole, G. and Vosselman, G., 2004, **Experimental Comparison of Filter Algorithms for Bare-earth Extraction from Airborne Laser Scanning Point Clouds**, ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 2004. 59(1-2), PP. 85-101.
- Vosselman, G., 2009, **Advanced Point Cloud Processing**, In Photogrammetric Week 2009; Fritsch, D., Ed; University of Stuttgart: Stuttgart, Germany.
- Wagner, W. et al., 2008, **3d Vegetation Mapping Using Small-footprint Full-waveform Airborne Laser Scanners**, International Journal of Remote Sensing, 29(5), PP. 1433-1452.
- Xu, L., Oja, E. and Kultanen, P., 1990, **A New Curve Detection Method: Randomized Hough Transform (RHT)**, Pattern Recognition Letter, 11, PP. 331-338.