

مطالعه تطبیقی و تحلیل راهکارهای فیلتر کردن ابرنقاط متراکم برای حذف عوارض غیرزمینی

سید محمد ایازی^{۱*}، محمد سعادت سرشت^۲

^۱ دانشجوی دکتری فتوگرامتری - دانشکده مهندسی نقشه برداری و اطلاعات مکانی - پردیس دانشکده‌های فنی -

دانشگاه تهران

smayazi@gmail.com

^۲ دانشیار دانشکده مهندسی نقشه برداری و اطلاعات مکانی - پردیس دانشکده‌های فنی - دانشگاه تهران

msaadat@ut.ac.ir

(تاریخ دریافت آذر ۱۳۹۷، تاریخ تصویب شهریور ۱۳۹۸)

چکیده

فیلتر کردن ابرنقطه حاصل از فتوگرامتری رقومی و نیز داده‌های LiDAR یا حذف عوارض غیرزمینی و رسیدن به سطح زمین با هدف تولید DTM صورت می‌گیرد. روش‌های متنوعی توسط محققین مختلف به منظور تفکیک نقاط زمینی و غیرزمینی در داده ابرنقاط پیشنهاد شده است. اکثر روشهای کاملا اتوماتیک یک نقطه ضعف مشترک دارند و آن کارایی آنها فقط برای نوع خاصی از سطح زمین می‌باشد. همچنین، اکثر این الگوریتم‌ها در مناظر ساده نتایج خوبی دارند و در مناظر پیچیده با مشکلاتی مواجه می‌گردند. در این مقاله روشهای فیلتر کردن ابرنقاط در قالب سه گروه: اول روشهای سنتی شامل روشهای شیب مبنا، سطح مبنا، مورفولوژی، TIN، قطعه‌بندی و غیره، دوم روشهایی که الگوریتم‌های خاصی را مورد بررسی قرار داده و یا الگوریتم‌های موجود را بهبود داده اند و سعی در افزایش کارایی آنها داشته اند، و سوم روشهای فیلتر کردن مبتنی بر تکنیکهای نوین یادگیری ماشین و یادگیری عمیق، مورد بررسی قرار گرفته و تجزیه و تحلیل جامعی از نحوه عملکرد این روشها بعمل آمده، چالش‌ها و مشکلات اجرایی آنها مورد بررسی قرار گرفته و روش‌هایی که نسبت به سایر روشهای فیلتر کردن، کارایی بالاتری برای نواحی مختلف کوهستانی، جنگلی، شهری دارند، شناسائی و مزایا و معایب هر روش ارائه و پیشنهادهای جهت بکارگیری روشهای مختلف در نواحی متفاوت ارائه گردیده است. نتایج این تحلیل در راستای بهبود عملکرد روشهای فیلتر کردن، ترکیب روشهای بهبود یافته و نیز استفاده از روشهای نوین یادگیری ماشین و یادگیری عمیق در این زمینه پیشنهاد می‌گردد.

واژگان کلیدی: فیلتر کردن ابرنقاط، استخراج DTM، یادگیری ماشین، یادگیری عمیق

* نویسنده رابط

۱- مقدمه

فتوگرامتری با بیش از یک صده قدمت و به لطف پیشرفتهای دوربین‌های عکسبرداری هوایی رقومی با قدرت تفکیک بالا، بعنوان یکی از بزرگترین منابع اطلاعات مکانی جهان مورد استفاده قرار می‌گیرد. [۱] تهیه نقشه‌های سه بعدی، ارتوفتوموزائیک، تولید مدل رقومی سطح و استخراج ابرنقطه سه بعدی با دقت بالا، از دستاوردهای فتوگرامتری رقومی می‌باشد و با پیشرفت‌های فناوری، زنجیره خودکارسازی آن تکمیل گردیده است. [۲]. علاوه بر روشهای فتوگرامتری رقومی، پردازش و بکارگیری داده‌های LiDAR با کاربردهای گسترده آن نیز مورد مطالعه قرار گرفته و در زمینه استخراج DTM از آن، مطالعات زیادی بعمل آمده است. با توجه به اهمیت ویرایش مدل رقومی سطح و زمانبر بودن اجرای این مرحله از خط تولید اطلاعات مکانی با روشهای دستی، ویرایش خودکار مدل رقومی سطح ضروری به نظر می‌رسد. این روند خودکار سازی، کاهش قابل توجه هزینه و زمان اجرای پروژه را دربر خواهد داشت.

ابرنقطه سه بعدی حاصل از فتوگرامتری رقومی و LiDAR شامل نقاط زمینی و غیرزمینی می‌باشد و لذا اولین مرحله تولید مدل رقومی زمین از داده‌های ابرنقطه، شناسائی نقاط زمینی و حذف نقاط غیرزمینی می‌باشد که به آن اصطلاحاً فیلترکردن ابرنقطه می‌گوییم که خودکار سازی آن با توجه به تنوع عوارض و توپوگرافی زمین با چالشهایی روبروست [۳-۵]. روش‌های متنوعی توسط محققین مختلف به منظور تفکیک نقاط زمینی و غیرزمینی در داده ابرنقاط پیشنهاد شده است. نقطه ضعف اکثر روشهای کاملاً اتوماتیک شناسائی نقاط زمینی و غیرزمینی فقط برای نوع خاصی از سطح زمین می‌باشد. به عبارت دیگر اکثر این الگوریتم‌ها در مناظر ساده نتایج خوبی دارند و در مناظر پیچیده با مشکلاتی مواجه می‌گردند. [۶]. بدیهی است نوع منطقه از نظر تنوع و تراکم عوارض مانند شهری، غیرشهری، جنگلی و شیبدار و مسطح و غیره در نوع الگوریتم بکار گرفته شده اهمیت بسیاری داشته و بر میزان اتوماسیون عملیات تاثیرگذار خواهد بود. علیرغم تحقیقات گسترده در زمینه فیلترکردن ابرنقاط، استخراج مدل رقومی زمین از داده‌های بزرگ و با منظر پیچیده هنوز از چالشهای محققین می‌باشد [۷].

۸]. به عنوان مثال استفاده از یک سری پارامترهای محدود برای زمین با سطوح مجزا و پیچیده و نیز عوارض متفاوت بسیار مشکل می‌باشد. در بسیاری از تحقیقات انجام شده در این زمینه از داده‌های نمونه ISPRS برای بررسی عملکرد الگوریتم‌ها استفاده می‌شود.

آقابان Sithole و Vosselman نتایج حاصل از هشت روش سنتی فیلترکردن ابرنقاط را روی پانزده داده نمونه ISPRS مقایسه نمودند که مرجع مهمی برای انتخاب روش مناسب فیلترکردن ابرنقاط و تولید مدل رقومی زمین با توجه به ویژگیهای سطح زمین در زمان انتشار بوده است. در گزارش ایشان تاکید گردیده که بیشتر الگوریتم‌های فیلترکردن در مناطق نسبتاً مسطح و سطوح هموار عملکرد مطلوبی داشته اما در اکثر این روشها خطاهای قابل توجهی در مناطق با ساختارهای شهری یا تغییرات ناگهانی شیب و یا پوشش گیاهی پیچیده، دیده می‌شود. براساس این تحقیق در مجموع سه روش پیش بینی خطی^۱، فیلتر شیب مبنای توافقی^۲، و فیلتر مورفولوژیکی از سایر روشهای بررسی شده نتایج بهتری را نشان می‌دهند [۹].

آقای Meng بررسی جامعی از رفتار الگوریتم‌های فیلترکردن ابرنقاط را مورد ارزیابی قرار داده است. این تحقیق الگوریتم‌های فیلترکردن ابرنقاط به شش گروه اصلی طبقه‌بندی گردیده است: روشهای قطعه‌بندی و خوشه‌بندی^۳، فیلترها بر مبنای مورفولوژی^۴، فیلترهای اسکن جهتدار^۵، فیلترهای مبتنی بر منحنی^۶، فیلترهای مبتنی بر TIN و فیلترهای مبتنی بر درون‌یابی. این تحقیق بهترین الگوریتم در هر گروه را مشخص و مزایا و معایب هر روش را مورد تجزیه و تحلیل قرار داده است. همچنین در این تحقیق بیشتر از ده الگوریتم فیلترکردن در سه نوع زمین مورد بررسی قرار گرفته است: نمونه‌هایی با شیب تند و پوشش گیاهی مترکام، نمونه‌هایی با مناطق مسکونی نسبتاً مسطح شامل اشیاء با اندازه‌ها و اشکال مختلف و نمونه‌هایی با سطوح ناهموار و سطوح نامتقارن. بر اساس مقایسه نتایج حاصل از این تحقیق، فیلترکردن سطوح ناهموار یا شیب‌های ناپیوسته، جنگل‌های انبوه و نواحی با پوشش گیاهی کوتاه از چالشهای باقیمانده در موضوع فیلترکردن می‌باشد. [۱۰]

^۱ linear prediction

^۲ adaptive slope filter

^۳ Segmentation and cluster-based filters

^۴ Morphological filters

^۵ Directional Scanning Filters

^۶ Contour-based filters

جدول ۱- تجزیه و تحلیل کیفیت عملکرد ۸ الگوریتم فیلتر کردن سنتی [۹]

Pfeifer	Sithole	Axelsson	Wack	Brovelli	Roggero	Sohn	Elmqvist	توسعه دهنده
داده های خارج از محدوده								
خوب	خوب	خوب	خوب	خوب	خوب	خوب	خوب	نقاط بالا
خوب	خوب	خوب	خوب	خوب	خوب	خوب	خوب	نقاط موثر بالا
خوب	نسبتا خوب	نسبتا خوب	خوب	خوب	نسبتا خوب	نسبتا خوب	خوب	نقاط پائین
خوب	خوب	ضعیف	ضعیف	خوب	خوب	خوب	خوب	نقاط موثر پائین
اشیاء پیچیده								
خوب	خوب	خوب	خوب	خوب	خوب	خوب	خوب	اشیاء
خوب	خوب	خوب	خوب	خوب	خوب	خوب	خوب	اشیاء بزرگ
خوب	نسبتا خوب	خوب	نسبتا خوب	نسبتا خوب	خوب	نسبتا خوب	نسبتا خوب	اشیاء کوچک
نسبتا خوب	نسبتا خوب	نسبتا خوب	نسبتا خوب	نسبتا خوب	نسبتا خوب	نسبتا خوب	نسبتا خوب	اشیاء پیچیده
نسبتا خوب	نسبتا خوب	نسبتا خوب	خوب	خوب	خوب	ضعیف	ضعیف	اشیاء ریز
نسبتا خوب	نسبتا خوب	نسبتا خوب	نسبتا خوب	نسبتا خوب	نسبتا خوب	نسبتا خوب	نسبتا خوب	زمینهای منفصل
اشیاء ضمیمه								
خوب	نسبتا خوب	خوب	نسبتا خوب	نسبتا خوب	نسبتا خوب	نسبتا خوب	خوب	ساختمان یا شیب
خوب/حذف شده	خوب/حذف شده	نسبتا خوب	خوب/حذف شده	خوب/حذف شده	خوب/حذف شده	خوب/حذف شده	خوب/حذف شده	پل
ضعیف	ضعیف	نسبتا خوب	ضعیف	ضعیف	ضعیف	ضعیف	ضعیف	سطوح شیبدار
پوشش گیاهی								
خوب	خوب	خوب	خوب	خوب	خوب	خوب	خوب	پوشش گیاهی
خوب	نسبتا خوب	نسبتا خوب	نسبتا خوب	نسبتا خوب	نسبتا خوب	خوب	خوب	پوشش گیاهی یا شیب
خوب	نسبتا خوب	نسبتا خوب	خوب	نسبتا خوب	نسبتا خوب	نسبتا خوب	خوب	گیاهان ریز
عدم پیوستگی								
نسبتا خوب	ضعیف	نسبتا خوب	نسبتا خوب	ضعیف	ضعیف	ضعیف	ضعیف	مانع
ضعیف	ضعیف	ضعیف	نسبتا خوب	ضعیف	ضعیف	ضعیف	ضعیف	خط الراس های بارز

در این مقاله به اصل کلی و پردازش های لازم برای تولید DTM اشاره شده است و تحلیل جامعی از الگوریتم های فیلتر کردن ابرنقطه متراکم برای حذف عوارض غیرزمینی انجام گرفته است. در این مقاله الگوریتم های فیلتر کردن که با هدف تولید DTM ارائه گردیده است، به سه گروه کلی روشهای سنتی، روشهای بهبود یافته و یا دارای ویژگی خاص و روشهای مبتنی بر یادگیری، طبقه بندی گردیده است. سپس خلاصه ای از برخی از بهبودها، نقاط قوت و ضعف هر روش و چالش های اصلی در موضوع تولید DTM، بر اساس درک روش های موجود ارائه گردیده است. همچنین برخی از راه حل های بالقوه برای چالش های مطرح شده، پیشنهاد گردیده است و برخی از قواعد امیدوار کننده را برای مطالعات آینده پیشنهاد می کنیم.

۲- اصول کلی در فیلتر کردن ابرنقاط

روش های مورد استفاده در تحقیقات پیشین از نظر اصول اجرای فیلتر کردن را می توان به دو گروه کلی تقسیم بندی نمود. گروه اول شامل روش هایی هستند که در آنها به طور مستقیم از ابرنقاط استفاده شده و با اعمال

آقای Chen با هدف بررسی جامع و همه جانبه روشهای موجود تولید DTM و ارائه اطلاعات مفید به محققان برای انتخاب، اجرا و بهبود روشهای مذکور، مقاله ای منتشر نمود. قسمت اصلی این تحقیق به موضوع فیلتر کردن ابرنقطه پرداخته و در آن روشهای فیلتر کردن را به شش گروه: روشهای سطح مبنا^۱، فیلترهای مورفولوژی مبنا، پالایش بر مبناي TIN، قطعه بندی و طبقه بندی، روش آنالیزهای آماری و مقایسه مقیاس چندگانه^۲ طبقه بندی نموده است. در این مطالعه همچنین به لزوم انجام درونیایی برای برخی روشها از جمله روش های مبتنی بر TIN تاکید نموده است [۱۱].

علی رغم مطالعات انجام شده در تحقیقات فوق و بررسی تعداد زیادی از روشها و الگوریتم های فیلتر کردن ابرنقاط، مقالات فوق همه روشهای فیلتر کردن بویژه الگوریتم های مبتنی بر روشهای یادگیری ماشین و یادگیری عمیق که در چند سال اخیر مورد توجه قرار گرفته است را پوشش نمی دهند.

^۱ Surface-Based Adjustment
^۲ Multi-Scale Comparison

عملیات سلسله مراتبی داده‌ها به دو گروه زمینی و تقسیم‌بندی شده‌اند و سپس با استفاده از نقاط زمینی مدل رقومی سطح زمین تولید گردیده است. گروه دوم از الگوریتم‌هایی هستند که اقدام به شناسایی عوارض سه‌بعدی در ابرنقاط نموده و سپس با تفریق آن از سطح اولیه ابرنقاط می‌توان رویه ای متشکل از عوارض زمینی تولید نمود [۱۲]. در این تحقیقات اصول کلی روش های فیلتر کردن از چند منظر قابل بررسی می‌باشد:

✓ **ساختار داده‌ها:** بعضی روش‌های با ابرنقاط نامنظم و بعضی باشبکه منظم نقاط که از درونیایی بدست آمده‌اند کار می‌کنند.

✓ **معیار ناپیوستگی:** فرض بر این است که عوارض بر روی سطح زمین ناپیوستگی ایجاد می‌کنند. لذا همه الگوریتم‌ها بر مبنای اندازه‌گیری برخی ناپیوستگی‌ها مانند اختلاف ارتفاع، شیب، کوتاهترین فاصله تا سطوح پارامتریک و کمترین فاصله تا وجوه TIN عمل می‌کنند.

✓ **تکراری بودن فرایند:** برخی الگوریتم‌ها، نقاط را در یک مرحله جداسازی می‌کنند در حالی که برخی دیگر از روش تکرار استفاده می‌کنند. مزیت روش اول سرعت بالاتر و مزیت روش دوم قابلیت اطمینان بالاتر به نتایج است.

✓ **تعداد همسایگی:** در فرایند جداسازی نقاط، برای هر نقطه عمدتاً پردازش نقاط همسایه ضروری می‌باشد. این مقایسه می‌تواند بصورت نقطه به نقطه (۱:۱)، نقطه به نقاط (m:۱) و نقاط به نقاط (m:n) باشد.

✓ **جایگزینی یا حذف نقاط:** در الگوریتم‌های حذف نقطه، نقطه مورد نظر در ابرنقاط نامنظم بر اساس خصوصیات مشخص عوارض مورد نظر انتخاب و حذف می‌شوند. در حالیکه در الگوریتم‌های جایگزینی که معمولاً بر روی داده‌های رستری DEM اعمال می‌شود، مقدار پیکسل مورد نظر با مقدار جدیدی که از همسایه‌های بدست آمده است جایگزین می‌گردد.

✓ **بکارگیری داده‌های اضافی:** در بعضی روش‌ها از اطلاعات اضافی از قبیل اورتوفوتوها، نقشه‌های توپوگرافی رقومی، نقشه‌های کاربری زمین و DEM های موجود برای تکمیل و بهبود جداسازی نقاط استفاده می‌شود.

✓ **استفاده از داده های آموزشی:** در بسیاری از روش‌های نوین بویژه روش‌های مبتنی بر یادگیری ماشین، قسمتی از داده ها که دارای برجسب می‌باشند، بعنوان داده آموزشی بکار گرفته می‌شوند.

ابرنقاط مربوط به سطح زمین، دارای داده‌های پرت^۱ بوده و با استفاده از روش‌هایی مانند اعمال فیلتر میانگین متحرک قابل برطرف کردن می‌باشد. همچنین با توجه به تغییرات توپوگرافی زمین و دقت DTM مورد درخواست، می‌توان تراکم نقاط در ابرنقاط را بطور انطباقی کاهش داد بطوریکه منجر به کاهش حجم داده با حفظ دقت هندسی شود. از آنجا که ابرنقاط مورد استفاده در این تحقیق می‌تواند از تکنولوژی LiDAR و یا حاصل از فتوگرامتری رقومی باشد، استراتژی پیش پردازش با توجه به روش تولید ابرنقاط متفاوت خواهد بود.

در ابرنقاط حاصل از LiDAR، داده‌های پرت را میتوان به دو گروه داده‌های پرت کلی و داده‌های پرت محلی طبقه‌بندی نمود. داده‌های پرت کلی، پائینترین نقاط با فاصله ارتفاعی قابل توجه از سایر داده ها بوده و مقدار کمی از داده ها را شامل می‌شود. با توجه به اینکه پائینترین نقطه در هر پنجره نقاط زمینی هستند، اگر یک نقطه پرت با ارتفاع خیلی پائین بعنوان نقطه زمینی ثبت گردد، تاثیر شدیدی روی تخمین سطح اولیه خواهد داشت و به سختی میتوان آنرا تصحیح نمود. داده‌های پرت محلی نیز مقادیر پائین نقاط همسایه می‌باشد ولی لزوماً پائینترین نقاط نیستند و با آنالیزهای ساده آماری نمی‌توان آنها را شناسایی نمود. این داده‌های پرت را می‌توان با استفاده از روشهای توزیع مبنا حذف یا کاهش داد [۱۱].

در ابرنقطه حاصل از فتوگرامتری رقومی نیز، خطاها عمدتاً به اختلافات هندسی و رادیومتری در تناظریابی و پیچیدگی اپی پولار در زوج تصویر مربوط می‌شود. به‌طور کلی مهمترین مشکلات ناشی از اختلافات هندسی در تناظریابی را کشیدگی (تغییرمقیاس) و نواحی پنهان ایجاد کرده و مهمترین مشکل ناشی از اختلافات رادیومتری، وجود سایه‌هاست. همچنین نحوه تشکیل هندسه‌ی اپی‌پولار که به روش تناظریابی بستگی دارد، از عوامل ایجاد خطا در تشکیل ابرنقاط می‌باشد. یکی از مزایای استفاده از تصاویر فتوگرامتری رقومی استفاده از باند IR برای شناسایی و حذف پوشش گیاهی با دقت مناسب می‌باشد و عملاً چالش فیلتر کردن ابرنقاط به عوارض دست ساز محدود می‌گردد.

^۱ Outlier

۳- الگوریتم‌های فیلترکردن ابرنقاط

روش‌های متنوعی توسط محققین مختلف به منظور تفکیک نقاط زمینی از غیرزمینی در داده ابرنقاط پیشنهاد شده است. هنگام استفاده از این روش‌ها باید ملاحظاتمانند جزئیات پیش‌پردازش‌های انجام شده، ساختار داده‌های ورودی و سایر پارامترهای تاثیر گذار را مدنظر قرار داد [۱۳]. روش‌های فیلترکردن داده‌های ابرنقاط را براساس نحوه عملکرد به چند دسته قابل تقسیم‌بندی می‌باشد. که در ادامه به الگوریتم‌های شاخص آنها و فرضیاتی که این الگوریتم‌ها بر پایه آنها بنا شده‌اند، می‌پردازیم. [۹، ۱۰]

۳-۱- روشهای سنتی فیلترکردن ابرنقاط

در این مقاله روشهای سنتی فیلترکردن ابرنقاط به روشهایی گفته می‌شود که از ابتدای موضوع فیلترکردن توسط محققین ارائه گردیده و عمدتاً بر اساس رفتار فیزیکی عوارض غیرزمینی مطرح گردیده است. از این گروه می‌توان به روشهای شیب مبنا، روشهایی که بر اساس مورفولوژی ریاضی عمل می‌نمایند، روشهای سطح مبنا، روشهای متکی بر شبکه نامنظم مثلثی TIN، روشهای قطعه‌بندی و خوشه‌بندی و سایر روشها که عمدتاً بهبود یافته روشهای فوق و یا مستقلاً دارای ویژگی خاصی دارند طبقه‌بندی می‌گردند.

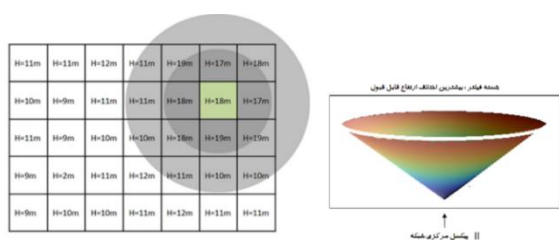
فلوجارت ۱- الگوریتم‌های مختلف فیلترکردن ابرنقاط را بر اساس نوع عملکرد و مرجع ارائه



۳-۱-۱- الگوریتم‌های شیب مبنا^۱

این الگوریتم با مقایسه شیب بین یک نقطه بانقاط همسایه کار می‌کند است و فرض براینست که اختلاف ارتفاع زاید بین دو نقطه نزدیک بهم بعید است توسط شیب تند در زمین ایجاد شود. یا به عبارت دیگر به احتمال زیاد، نقطه بالاتر زمین نیست. [۱۴] پارامترهای در این الگوریتم با ابعاد کوچکترین عارضه ای که باید حذف شود و شیب نیز با توجه به نقشه گرادپان که از داده‌های

خام بدست آمده، طراحی می‌گردند. این ساختار روی تک‌تک نقاط حرکت کرده و نزدیکترین نقطه به نقطه مرکزی از نظر ارتفاعی (پائینترین نقطه) بعنوان نقطه زمینی در نظر گرفته می‌شود [۱۵]



شکل ۱- نحوه عملکرد الگوریتم فیلتر شیب مبنا

^۱ Slope based Filter

به زبان ساده می‌توان گفت ، هر نقطه وقتی بعنوان سطح زمین طبقه‌بندی می‌شود که اختلاف ارتفاع آن با نقاط دیگر در شعاع جستجو بیشتر از حدآستانه نباشد. پارامترهای این روش عبارتند از : شعاع جستجو، شیب هسته فیلتر [۱۵]

در این روش نقاط ورودی در هر بار تکرار فیلتر شده و خروجی هر مرحله بعنوان ورودی مرحله بعد مورد استفاده قرار می‌گیرد. اگر شعاع جستجو بزرگ انتخاب شود، سطح زمین هموارتر شده و در مناطقی که زمین دارای شیب تند می‌باشد، اجرای این روش با مشکل مواجه شده و نتایج خوبی در پی ندارد. لذا باید دقت نمود که برای مناطق با شیب تند باید پارامترها با دقت انتخاب شده و یا از روش‌های جایگزین استفاده نمود. شعاع جستجو در این روش باید حداقل نصف ابعاد بزرگترین عارضه زمینی در نظر گرفته شود. [۱۵]

از نقاط ضعف این روش می‌توان به حذف جزئیات زمین اشاره نمود. به عبارت دیگر این روش علاوه بر حذف عوارض غیرزمینی کوچک ، بخشهایی از نقاط زمینی را نیز فیلتر می‌نماید. مزیت این روش اینست که کوچک گرفتن پارامترها، زمین را تخریب نکرده و با استفاده از یک روش سلسله مراتبی و با روش‌های تکراری می‌توان سطح زمین را بازسازی و نقاط غیرزمینی را فیلتر نمود [۱۶]. بدیهی است بدست آوردن پارامترهای منحصر بفرد برای این روش امکانپذیر نبوده و یکسری از پارامترها نمی‌تواند روی همه مناطق نتایج خوبی را دربرداشته باشد. لذا برای مناطق مختلف علاوه بر استفاده از روش تکراری، پارامترها باید براساس خواص و شکل زمین تنظیم شوند [۱۷].

Vosselman and Sithole ویرایشی جدید از این فیلتر را بنام الگوریتم شیب مبنای توافقی^۱ ارائه دادند و پیشنهاد داده‌اند قبل از اعمال این فیلتر باید outlier ها از داده‌ها حذف گردند. [۹]

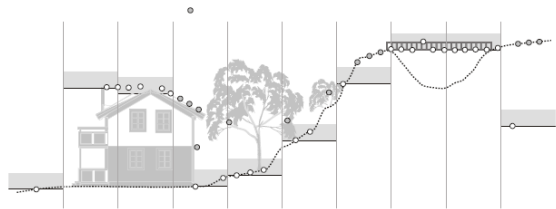
الگوریتم شیب مبنای توافقی دیگری توسط Roggero ارائه گردید. در این فیلتر شکل المان ساختاری با شیب سطح زمین در نقطه مورد نظر وفق پیدا می‌کند. [۱۷]

در روشهای شیب مبنای معرفتی حدآستانه مناسب بر رفتار این روشها بسیار موثر است [۱۴، ۱۵، ۱۸-۲۱]. در روشهای شیب مبنای فرض بر اینست که شیب بین نقاط

زمینی و بطور قابل توجهی متفاوت می‌باشد. در این روش ، شیبهای بین هر نقطه با نقاط همسایه بررسی و با حدآستانه اولیه مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. تعریف حدآستانه‌های مختلف خودکار بعنوان فیلتر شیب مبنای توافقی نتایج خوبی را در بر داشته است [۱۵، ۱۸].

۳-۱-۲- الگوریتم مورفولوژیک ریاضی^۲

در این الگوریتم فرض بر اینست که پایین‌ترین نقاط در یک همسایگی متعلق به سطح زمین هستند. ابتدا یک مدل رقومی زمین بوسیله پایین‌ترین نقاط پیدا شده در پنجره متحرک، محاسبه می‌شود، سپس تمامی نقاطی که اختلاف ارتفاعشان از یک مقدار حد آستانه بیشتر باشد فیلتر می‌شوند و DTM دقیق‌تر می‌شود. [۲۲]



شکل ۲- نحوه عملکرد الگوریتم مورفولوژیک

پردازشهای مورفولوژی براساس عملگرهای باز^۳، بسته^۴، عملگر فرسایش^۵ و اتساع^۶ عمل می‌نمایند. بعنوان مثال [۲۳] یک فیلتر دوگانه که از طریق عملگرهای عملگر فرسایش و اتساع نقاط غیرزمینی را حذف می‌نماید، پیشنهاد داد. انتخاب اندازه پنجره بهینه معیار مهمی در این الگوریتم می‌باشد. پنجره کوچک عوارض کوچک را بخوبی شناسائی نموده ولی عوارض زمینی بزرگ را بعنوان زمین حفظ می‌نماید و پنجره بزرگ قله‌ها ، صخره‌ها و تپه‌ها را نرم می‌کند [۱۲].

الگوریتم بر مبنای روش کمترین بلوک^۷ نیز یک الگوریتم مورفولوژیک است که فرض می‌کند پایین‌ترین نقطه یک همسایگی به سطح زمین تعلق دارد. در این الگوریتم المان رستر عوارض به روش سلسله مراتبی نمایان می‌شود. [۲۴] این فیلتر بر اساس داده‌های منظم کار

^۲ Morphological Filter

^۳ Opening

^۴ Closing

^۵ Erosion

^۶ Dilation

^۷ Minimum block classification

^۱ Adaptive Slope based Filter

نگردیده و این موضوع مانع از خودکارسازی کامل روشهای مورفولوژی می‌گردد [۳، ۵، ۶]. علاوه بر این با تبدیل ابرنقاط به تصویر، حجم زیادی از اطلاعات که قابلیت بکارگیری در روشهای فیلترکردن ابرنقاط را دارد، از بین می‌رود.

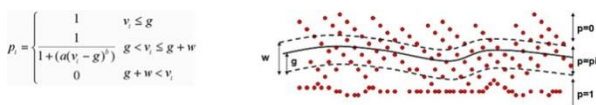
۳-۱-۳- الگوریتم بر مبنای سطح

روشهای شیب مبنا و مورفولوژی ریاضی، براساس تفکیک نقاط زمینی و غیرزمینی و حذف نقاط غیرزمینی از داده‌های ابرنقاط عمل می‌کنند. در نقطه مقابل این روشها الگوریتم‌های فیلترینگ بر مبنای سطح، با نزدیک کردن یک سطح پارامتریک به داده‌های ابرنقطه سعی در شناسایی سطح زمین می‌نمایند. این روشها معمولاً از سطح تقریبی زمین بعنوان سطح اولیه شروع نموده و به تدریج این سطح را تدقیق می‌نمایند.

الگوریتم پیوسته‌سازی سلسله مراتبی سطح^۴ [۲۸] یکی از این روشهاست. در این الگوریتم که به روش سلسله مراتبی عمل می‌کند فرض بر اینست که سطح زمین را می‌شود مجموعه‌ای از سطوح پیوسته پوشش دار با ابعاد کوچک در نظر گرفت. این فیلتر بر مبنای تعریف یک سطح پارامتریک می‌باشد. ابتدا یک سطح اولیه روی نقاط موجود تعریف می‌شود و سپس فاصله عمودی نقاط تا این سطح، توسط یک تابع کمترین مربعات وزن دهی می‌شود. حال با استفاده از تابع وزن که نقاط را بصورت وزن دار تاثیر میدهد، سطح جدیدی تعریف می‌شود که به نقاط با ارتفاع کمتر، نزدیک می‌شود. بعد از چندین تکرار به سطحی می‌رسیم که تابع وزن تاثیری در سطح جدید نمی‌گذارد. اگر نقاط زیرسطح برازش داده شده یا زیر حدآستانه باشد، بعنوان نقطه زمینی و در غیر اینصورت بعنوان نقطه غیرزمینی طبقه‌بندی می‌گردد [۲۹].



شکل ۳- برازش سطح اولیه در فیلتر درونیابی سلسله مراتبی سطح [۲۹]



شکل ۴- اختصاص وزن به نقاط براساس تابع وزن در فیلتر درونیابی

سلسله مراتبی سطح [۲۹]

۴ Hierarchical surface regularization

می‌کند. ابتدا المان شبکه ای عوارض با روش سلسله مراتبی بر مبنای فیلتر کمترین مربعات بلوک مشخص می‌شود. در مرحله بعد یک مدل رقومی ارتفاعی تنک با فواصل ۹ متری از ابرنقاط اولیه تولید گردیده و به این ترتیب اکثر ساختمانها و عوارض گیاهی در این مرحله مشکل ساز نمی‌باشند. با فرض اینکه تمام عوارض غیرزمینی دارای تغییرات ارتفاعی شدید هستند، با اعمال عملگر لاپلاسیان گوسین LOG بر مدل رقومی ارتفاعی ۹ متری، این عوارض حذف می‌شوند. این مدل رقومی ۹ متری، مبنای محاسبه مدل رقومی ۳ متری و مدل رقومی متراکم‌تر یک متری می‌باشد تا تمام نقاط غیرزمینی حذف گردند.

بسیاری از الگوریتم‌های مورفولوژی مشکلاتی که در فیلترکردن اشیاء با ابعاد مختلف پیش می‌آید را با تغییر اندازه پنجره برطرف می‌کنند. [۲۵] یک فیلتر مورفولوژی پیشرونده با افزایش تدریجی ابعاد پنجره پیشنهاد داد. در این الگوریتم از عملگر باز (شامل عملگر فرسایش و سپس اتساع) روی سطح استفاده می‌گردد. این عملگر بصورت تکراری و پیشرونده روی پنجره با ابعاد مختلف اجرا می‌گردد. افزایش شعاع پنجره می‌تواند بصورت خطی و یا نمائی^۱ باشد. [۲۶] روش مورفولوژی براساس عملگر اتساع ژئودزیک را بسط دادند و با تغییراندازه ابعاد پنجره اقدام به حذف نقاط غیرزمینی و بازسازی سطح نمودند. نتیجه نشان می‌دهد که انتخاب ابعاد پنجره معیاری برای حذف اشیاء با سایزهای مختلف مانند ساختمان می‌باشد.

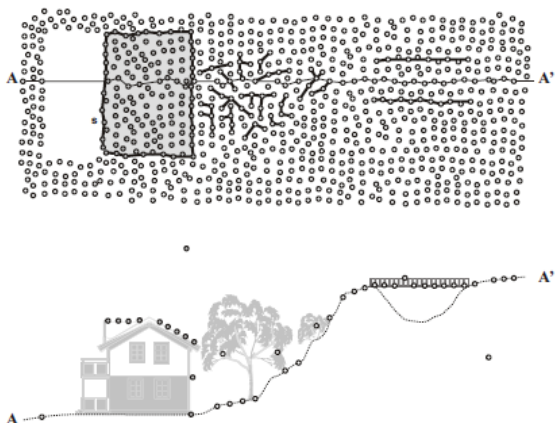
علاوه بر این با توجه به اینکه عملگرهای مورفولوژی بصورت محلی اجرا می‌شوند، هنگام تعریف پنجره داشتن اطلاعاتی درباره نوع منطقه ضروری می‌باشد [۴] و این مهمترین ضعف روش مورفولوژی است [۲۵، ۲۷]. با تبدیل ابرنقطه به فرمت رستری، عملگرهای باز^۲ و بسته^۳ میتواند مورد بهره برداری قرار گیرد [۲۷]. عملگرهای مورفولوژی با ابعاد پنجره کوچک می‌توانند بطور کارایی با عوارض با ابعاد متناسب کار کنند (بعنوان مثال تک درخت) اما در این صورت اشیاء بزرگ مانند ساختمانها حذف خواهند شد. از سوی دیگر اگر ابعاد پنجره بزرگ انتخاب شوند، جزئیات سطح زمین مانند قله کوهها حذف می‌شوند. لذا در این روش شکل زمین هنگام استفاده از ابعاد پنجره بزرگ حفظ

^۱ Exponential

^۲ Opening

^۳ Closing

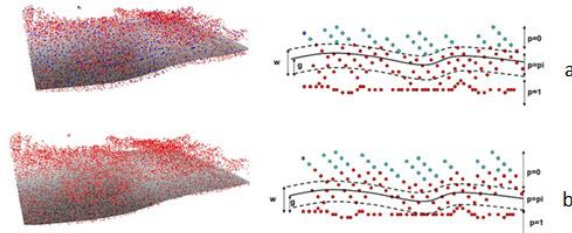
یکی دیگر از الگوریتم‌های بر اساس سطح، الگوریتم ارائه شده بر مبنای پایه مدل منحنی فعال می‌باشد. در این الگوریتم یک تابع انرژی با هدف تلفیق وزندار از نیروهای داخلی ناشی از شکل منحنی و نیروهای خارجی حاصل از برنقطه طراحی می‌گردد. با کمینه نمودن این تابع انرژی، سطح زمین برآورد می‌گردد. [۳۰]



شکل ۶- نحوه عملکرد الگوریتم بر پایه منحنی فعال

۳-۱-۴ الگوریتم بر مبنای TIN

الگوریتم TIN متراکم شونده پیشرونده^۲ [۳۰] بر اساس سطح کار می‌نماید. در این الگوریتم فرض بر اینست که سطح زمین بصورت محلی و کلی هموار است. در این روش ابتدا یک TIN پراکنده از مینیمم همسایه‌ها ایجاد می‌شود. این TIN اولین تخمین از سطح زمین است. سپس در مراحل تکراری این TIN بطور فزاینده با برنقاط متراکم می‌شود. در هر تکرار اگر نقطه ضوابط مشخصی را در رابطه مثلثی که حاوی آن است ارضاء کند، به TIN افزوده می‌گردد. به عبارت دیگر در هر تکرار، هر نقطه‌ای که در حدود آستانه تعریف شده قرار گیرد، به TIN اضافه می‌شود. پارامترهایی که برای حد آستانه تعریف می‌شود، زاویه‌ای که هر نقطه با صفحات TIN می‌سازد (شکل ۳-۹) و فاصله تا نزدیکترین سطح است. در پایان هر مرحله، TIN و حدود آستانه مجدداً محاسبه می‌گردند. این فرآیند تکراری آنقدر ادامه می‌یابد تا هیچ نقطه‌ای پایین‌تر از حد آستانه قرار نداشته باشد. مهمترین مزیت این الگوریتم در توانایی آن در مواجهه با سطوحی است که ناپیوستگی‌های زیادی دارند که در مناطق شهری یک ویژگی مهم تلقی می‌گردد.



شکل ۵- حذف نقاط غیرزمینی و (b) برازش سطح جدید به نقاط باقیمانده [۲۹]

در این روش با تنظیم پارامترها هرچه نقاط غیرزمینی بیشتری حذف می‌شوند نقاط زمینی متعلق به نواحی دره‌ها و لبه عوارض که متعلق به زمین می‌باشند نیز اشتباه طبقه‌بندی می‌شوند. برای حل این مشکل امکان بکارگیری خطوط شکست^۱ در الگوریتم وجود دارد. این روش دارای چهار پارامتری باشد که برای هر مرحله تعیین می‌گردند. این پارامترها عبارتند از: [۲۹]

قدرت تفکیک: این پارامتر تعداد نقاط سطح را تعیین می‌نماید. با کوچک گرفتن این پارامتر در اولین تکرار نقاط بیشتری از نقاط اصلی برای ساخت سطح اولیه در الگوریتم شرکت داده می‌شوند. بنابراین برای بالا بردن سرعت الگوریتم بهتر است در اولین تکرار از مقادیر بزرگتر و در تکرارهای آخر از مقادیر کوچکتری برای این پارامتر استفاده شود. بدین ترتیب نقاط غیرزمینی بیشتری در تکرارهای نخست حذف می‌شوند.

حد آستانه پایین و بالا: محدوده‌ای که در آن هر نقطه براساس فاصله از سطح میانی وزن داده می‌شود. مقادیر بزرگ این پارامتر باعث میشود نقاط بیشتری بالا و پائین سطح میانی وزن داده شده و در محاسبه سطح میانی بعدی دخالت داده شوند. با توجه به اینکه تشکیل سطح میانی از نقاط پائین مورد نظر می‌باشد، این پارامتر نباید خیلی بزرگ در نظر گرفته شود.

فاصله بالائی در مرحله مرتب کردن نقاط: مقادیر کوچک این پارامتر باعث می‌شود نقاط کمتری که بالای سطح میانی قرار گرفته‌اند برای تکرار بعدی پذیرفته شوند. **محدوده توصیف نقاط زمینی:** اگر این پارامتر بزرگ در نظر گرفته شود، باعث میشود تعداد نقاط بیشتری در داخل محدوده بعنوان نقطه غیرزمینی طبقه‌بندی شوند.

^۲ Progressive TIN densification

^۱ Break Line

منظر کار می‌کند و نه براساس ارتباط نقطه بامنظر. در این روش الگوریتم‌های مختلف در مقیاس‌های متفاوت برای طبقه‌بندی اشیاء اجرا گردیده و برخلاف سایر روش‌های فیلترکردن از یک روش برای انجام عملیات طبقه‌بندی استفاده نمی‌نماید. [۳۳]

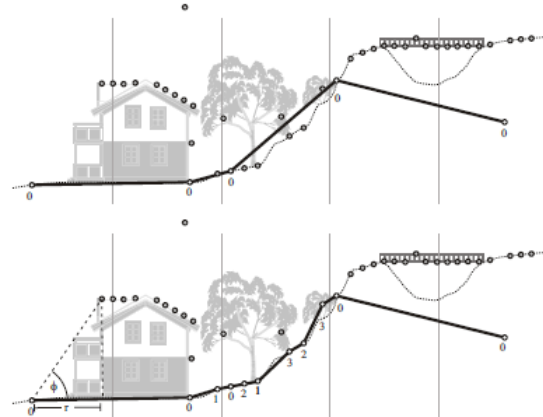
پیچیدگی مناطق شهری از چالش‌های اصلی قطعه‌بندی می‌باشد. با بررسی روش قطعه‌بندی فوق می‌توان گفت این روش در مدلسازی پلها و عوارض خاص خوب عمل نموده و الگوریتم‌های قطعه‌بندی توانایی خوبی در حفظ شکستگی‌ها، نسبت به سایر روش‌ها دارا می‌باشد [۱۰]. وجود اطلاعات RGB دقت عملیات طبقه‌بندی را ۵ تا ۱۰٪ افزایش داده و سایر منابع اطلاعات نیز در بهبود نتایج نقش مهمی دارند. همچنین بررسی‌ها نشان می‌دهد با افزایش ابعاد پیکسل و فاصله ابرنقاط نویزها کاهش می‌یابد [۳۳].

یکی دیگر از الگوریتم این گروه خوشه‌بندی بر پایه لبه‌ها^۲ می‌باشد. در این الگوریتم فرض بر اینست که نقاطی که در لبه‌های بسته قرار دارند متعلق به عوارض هستند. الگوریتم با در نظر گرفتن این که عوارض لبه‌های واضحی دارند و در کنار یکدیگر مرز بسته ای را تشکیل میدهند، اقدام به شناسایی نقاط مربوط به عوارض می‌کند. [۳۴]

آقای Hingee روشی براساس قطعه بندی برای حذف نقاط غیرزمینی ارائه داده است که در دو مرحله اجرا می‌گردد. در مرحله اول با استفاده از جهت شیب و حد آستانه برای آن نقاط کاندیدای مربوط به قطعات زمینی را شناسایی و در فاز دوم با برازش صفحات بر نقاط کاندیدا اقدام به تثبیت نقاط زمینی می‌نماید [۳۵] و در ادامه تحقیقات اقدام به مدلسازی سطوح ناپیوسته با استفاده از برازش صفحات اسپلاین نازک و خطوط شکست با هدف شناسایی نقاط زمینی نموده است [۳۶].

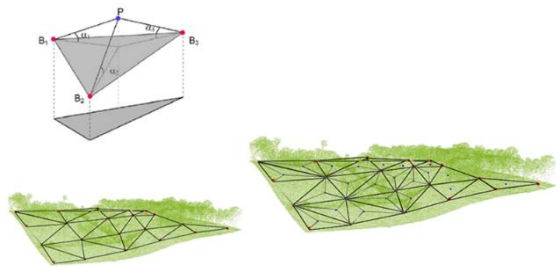
۳-۲- الگوریتم‌های فیلترکردن بهبود یافته یا دارای ویژگی خاص

تحقیقات انجام شده در زمینه روشهای فیلترکردن ابرنقاط بسیار متنوع می‌باشد. در این بخش تعدادی از سایر روشهای فیلترکردن که بهبود یافته روشهای سنتی



شکل ۷- نحوه عملکرد الگوریتم TIN

در روشی دیگر از الگوریتم TIN متراکم شونده پیشرونده با روش منظم سازی^۱ [۳۱] استفاده شده است. این فیلتر در دو مرحله متراکم‌سازی رو به پایین که یک تقریب اولیه از سطح زمین حاصل می‌شود و متراکم‌سازی رو به بالا که TIN اولیه در مرحله قبل بهینه می‌گردد و با لحاظ یک منطقه حائل بعمق ΔH ، نقاط زمینی در نظر گرفته می‌شوند، با تکرار در نهایت DTM سطح زمین بدست می‌آید.



شکل ۸- نحوه عملکرد الگوریتم فیلتر بر مبنای TIN

۳-۱-۵- الگوریتم‌ها بر مبنای قطعه‌بندی ابرنقاط

قطعه‌بندی و خوشه‌بندی از روشهای رایج برای طبقه‌بندی اطلاعات پوششی و کاربری اراضی می‌باشد و برخی محققین تلاش نموده اند از این روش در طبقه‌بندی ابرنقاط نیز استفاده نمایند. [۱۲، ۱۷، ۳۲]

در این الگوریتم‌ها فرض بر اینست که پس از قطعه‌بندی ابرنقاط، قطعات متعلق به عوارض، بالاتر از همسایگان‌شان قرار دارند. در این الگوریتم عوارض کوچک و بزرگ جداگانه کشف می‌شوند. عوارض بزرگ با قطعه‌بندی ابرنقاط و عوارض کوچک با نرم‌سازی ابرنقاط کشف می‌شوند. روش قطعه‌بندی براساس ارتباط بین سطح با

^۲ Edge based clustering

^۱ Progressive TIN Densification / Regularization Method

بوده و یا مستقلا دارای الگوریتم جدید و خاص می‌باشد مورد بررسی قرار می‌گیرد. بهبود کارایی الگوریتم شیب مبنا توسط [۱۹] براساس محاسبه شیب بین نقاط همسایه در امتداد خطوط اسکن در جهات مختلف انجام گرفت و [۱۳] با بسط این ایده به چند جهت آنرا تکمیل نمود.

محاسبه حد آستانه بهینه در الگوریتم شیب مبنا بطوریکه بتواند عوارض در توپوگرافی‌های مختلف را فیلتر نماید از مشکلات این الگوریتم می‌باشد [۳۷]. برای غلبه بر این مشکل روشها ی متنوعی از جمله [۱۵، ۳۸] و فیلترهای دو جهته [۳۹] پیشنهاد گردیده است. با این حال نتایج نشان می‌دهد روش شیب مبنا فیلتر مناسبی برای مناطق با توپوگرافی پیچیده نبوده و دقت عملکرد آن با افزایش شیب کاهش می‌یابد [۶].

استراتژی Scan Line از روشهای بسیار مهم مورفولوژی می‌باشد. این الگوریتم با هدف شناسائی نقطه زمینی براساس پروفیل ارتفاع و شیب می‌باشد. آقای Shan و همکاران نقاط زمین یک منطقه شهری را بصورت یک بعدی و در چند جهت برجست گذاری کردند [۱۹].

آقای Meng فیلتر دوجتهی را به چند جهتهی تعمیم داد [۱۳] و آقای Wang عملگر مخروطی شکل^۱ شیب سنتی را از حالت یک بعدی به دو عملگر مجزا تقسیم و سپس دو عملگر را به ترتیب برای فیلترکردن نقاط زمینی استفاده نمود و نتیجه این روش مجموعه نقاط زمینی و مجموعه نقاط فیلترشده با استفاده از هریک از عملگرها بود [۴۰]. در این روش فیلتر پروفیل دو جهتهی^۲ (DS) حتی می‌تواند در دوجتهت عمودی و افقی نیز استفاده شود. فیلتر دو جهتهی DS قادر به تشخیص زمین با تغییرات شدید و حتی پله ساخته شده بصورت دستی نیز می‌باشد و بنابراین مناسب برای مناطق شهری می‌باشد [۱۱].

با توجه به اطلاعات اولیه مربوط به مناطق مورد مطالعه می‌توان یک ابعاد پنجره بهینه و متناسب برای اجرای این روش تعریف نمود [۴۱]. آقای Chen با تعریف پارامترهای متناسب برای توصیف توپوگرافی زمین این الگوریتم را بسط داد [۲۷]. با مقایسه روشهای مورفولوژی می‌توان گفت دقت الگوریتم مورفولوژی نسبتا خوب می‌باشد [۳۷]. روشهای فیلترکردن بر اساس الگوریتم

مورفولوژی که از درونیایی Kriging استفاده می‌کند نیز در راسای بهبود عملکرد این الگوریتم ارائه گردیده است. [۴۲] از الگوریتم‌های بر مبنای سطح بهبود یافته، فیلتر طبقه‌بندی‌کننده براساس انحنا ی سطح با بهینه‌سازی پارامتر s تابع دو متغیر ابعاد زمینی عوارض و فاصله نمونه برداری داده‌های ابرنقطه می‌باشد. در این روش یک صفحه پارامتریکی و ناحیه حائل بالای آن تعریف می‌شود و نقاط شامل سطح و ناحیه حائل آن به سطح زمین تعلق دارند و نقاط خارج آن به سطح غیر زمین تعلق دارند. [۴۳]

آقای Maguya در تحقیقی دیگر الگوریتمی توافقی برای درونیایی DTM بزرگ مقیاس در مناطق شیبدار جنگلی ارائه نمود که ابتدا مجموعه ای از پایئنترین نقاط محلی برای تولید سطح اولیه انتخاب می‌شوند. متفاوت از مطالعات قبلی، این روش با استفاده از دو معادله مختلف برای شبیه سازی سطوح خطی و سطوح درجه دوم استفاده می‌نماید. یک نقطه کاندید در ابرنقاط توسط سطح اولیه مورد بررسی قرار می‌گیرد، اگر شعاع سطح به روز شده با نقطه کاندیدا، دارای شعاع بزرگتر از سطح اولیه باشد، نقطه زمینی بوده و سطح اولیه به روز می‌گردد و در غیر اینصورت نقطه غیرزمینی طبقه‌بندی می‌شود. از طریق تکرار، دو DTM با استفاده از مدل‌های خطی و درجه دوم تولید می‌گردد و DTM با شعاع کوچکتر رد شد. اگر هیچ یک از مدل ها نتایج رضایت بخش به دست نیورد، یک مدل Spline مکعبی برای تولید DTM در شرایط شیب دار مورد استفاده قرار می‌گیرد [۴۴].

Zhang الگوریتم TIN بهبود یافته را با تعبیه روشهای قطعه‌بندی بر اساس قیود نرمی برای سطوح شامل شکستگی‌ها بسط داده شده است [۴۵] علی‌رغم ارائه روشهای متنوع براساس الگوریتم مذکور، با توجه به اینکه در این الگوریتم فرض بر اینست که سطح زمین و تغییرات آن به نرمی اتفاق می‌افتد، عملیات فیلترکردن ممکن است در مناطق با تنوع بالا و شیب تند به خوبی عمل ننموده و یا نتایج غیرقابل اعتماد می‌باشند. علاوه براین عملکرد این فیلترها و رسیدن به نتایج مناسب منوط به تعیین پارامترهای هر الگوریتم می‌باشد که باید برای مناطق مختلف محاسبه و بهینه گردد. [۴۵]

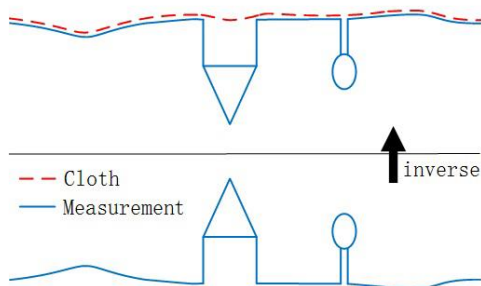
آقای Chen با اشاره به این موضوع که کوههای نوک تیز در روش TIN بیشترین مشکل را از نظر فیلترکردن دارا می‌باشند و عملکرد TIN سنتی در این مناطق درست

^۱ cone-shaped

^۲ dual-directional profile filter

میدهد، شبیه سازی رفتار فیزیکی پارچه زبر روی سطح ابرنقاط معکوس شده می باشد (شکل ۹). این روش که روی داده های استاندارد ISPRS اجرا گردیده است، با تحلیل عملکرد تار و پود پارچه و مطابقت آن با نقاط داده LiDAR، مدلی از سطح زمین را تقریب می کند و نتایج نشان داده شده در تحقیق نتایج بهتری نسبت به روشهای سنتی فیلتر کردن را ارائه می دهد [۳۷].

از دیگر الگوریتم های ارائه شده که سعی در استفاده از بهینه سازی برای به دست آوردن طبقه بندی دقیق نقاط دارد روش فیلتر کردن SGF^۵ می باشد. در این الگوریتم با توجه به ویژگی های سطح زمین یک تابع انرژی، برای انطباق با سطوح شیب دار، زمین های گسسته و اشیاء پیچیده زمینی بکار گرفته می شود. سپس، از بهینه سازی SGF با به حداقل رساندن تابع انرژی برای برچسب گذاری نقاط استفاده می شود [۵۰].



شکل ۹- روش فیلتر کردن ابرنقاط با شبیه سازی رفتار پارچه [۳۷]

همچنین روشهای مبتنی بر پیش بینی خطی [۲۸، ۵۱، ۵۲] از تقریب سطح برای محاسبه منطقه حائل با استفاده از نقاط زمینی پذیرفته شده استفاده می کنند. از آنجا که نتایج این روشها تنها از تقریب سطح درشت بدست آمده است، اشیاء کوچک به اشتباه طبقه بندی گردیده و جزئیات زمین در این روشها حفظ نمی شود [۵]. نتایج حاصل از این روشها می تواند با قطعه بندی داده های ورودی قبل از اجرای عملیات فیلتر کردن، بهبود پیدا کند [۵۳]. با توجه به اینکه این روشها دارای یک سری پارامترهای قابل تنظیم برای محاسبه سطح اولیه می باشد و مقادیر حد آستانه می تواند مناسب و منطبق بر وضعیت زمین انتخاب شوند، این روشها هنوز کارایی خود را دارا می باشند [۶].

فیلترهای دانش مبنا بر اساس داده های آموزشی [۲۰] و فیلترهای دو جهتی [۲۱] اجرا می شوند. این روشها هنوز

عمل نمی کند و آنها را جزء عوارض غیرزمینی تشخیص می دهد. برای حل این مشکل ایشان سه استراتژی پیشنهاد نموده است: اول مفهوم مثلث تیز^۱ و مثلث مجاور^۲ بر اساس مشخصات این دو نوع مثلث برای تشخیص نقاط زمینی تیز معرفی گردد. دوم یک روش تخمین فاصله اطمینان مناسب برای انتخاب بهتر نقاط سطح اولیه که شامل پائین ترین نقطه محلی و نیز نقاط تیز باشد بکار گرفته شود و نهایتاً یک معادله ساده برای کنترل تعداد تکرارها بکار گرفته شود که در اینصورت کارایی محاسباتی بطور قابل توجهی بهبود پیدا می کند [۴۶]. همچنین آقای Zhang و همکاران برای حفظ جزئیات زمین در اطراف خطوط ترانسه ترکیب TIN پیشرونده^۳ را با قطعه بندی با استفاده از قید نرمی^۴ پیشنهاد داد [۴۵].

یکی از الگوریتم های فیلتر کردن ارائه شده بر پایه طبقه بندی به روش ماشین بردار [۴۷، ۴۸] می باشد. در این الگوریتم که بر پایه طبقه بندی SVM بنا شده، علاوه بر داده های ارتفاعی از مقادیر رادیومتریکی عکس و آنالیز بافت نیز استفاده می نماید. در این روش ابتدا تصاویر به چهار کلاس جاده، چمن، ساختمان و درخت طبقه بندی می شود سپس کلاس جاده و چمن بعنوان زمین و کلاسهای ساختمان و درخت بعنوان کلاس عارضه برچسب می خورند. یکی از مشکلاتی که اکثر الگوریتم های فیلتر کردن با آن مواجه هستند، عدم توانایی آنها در حذف نقاط مربوط به ساختمان های بزرگ است. این مشکل از آنجا ناشی می شود که این الگوریتم برای در نظر داشتن اثر ناهمواری های زمین در مناطق با توپوگرافی پیچیده مجبور می شوند که در تصمیم گیری برای عارضه بودن یا نبودن یک نقطه، بصورت محلی و در یک همسایگی عمل کنند. بدین ترتیب این الگوریتم ها هنگام برخورد با ساختمان های بزرگتر از این همسایگی دچار مشکل می شوند. برای حل این مشکل، روشهای مبتنی بر عملگرهای مورفولوژی ریاضی پیشنهاد گردیده است [۴۹]. روش دیگری در فیلتر کردن ابرنقاط که به ادعای نویسندگان مشکل تنظیم پارامترها را تا حد زیادی کاهش

^۱ Ridge Triangles
^۲ Adjacent Triangles
^۳ Progressive TIN
^۴ Smoothness

◦ Semi-Global Filtering

برای زمین‌های نسبتاً مسطح مناسب بوده و با افزایش شیب زمین، صحت عملکرد آنها کاهش می‌یابد [۳]. این روشها بویژه در مناطق جنگلی با شیب تند غیر قابل اعتماد نمی‌باشند [۶].

روشها دانش مبنا نیاز به پایگاه داده بزرگی دارند [۵] و اطلاعات اضافی ممکن است سهولت در دسترس نباشد. اخیراً روشهای آمار مبنا نیز معرفی شده اند [۵، ۵۴-۵۶]

۳-۳- روشهای نوین فیلتر کردن بر مبنای یادگیری

در سالهای اخیر الگوریتم‌های شبکه‌های عصبی^۱ و یادگیری ماشین^۲ برای طبقه‌بندی تصاویر کاربردهای فراوانی یافته است. همچنین استفاده از یادگیری عمیق^۳ برای این منظور نیز توسط محققین زیادی مورد مطالعه قرار گرفته است. در روشهای نوین از ویژگیهای هندسی و متنی برای هر نقطه می‌توان برای آموزش طبقه‌بندی استفاده نمود.

آقای Chehata برای بکارگیری روش جنگل تصادفی^۴ چهار ویژگی *Sphereocity*، *Planarity*، *Anisotropy* و *Linearity* را مورد استفاده قرار داده است. این ویژگیها بر اساس مقادیر ویژه^۵ ماتریس وریانس کوریانس محاسبه شده برای یک پنجره همسایگی با شعاع معین استخراج شده است. علاوه بر این چهار ویژگی، ویژگی‌های ارتفاعی، ویژگیهای پالس بازگشتی نیز برای آموزش این روش مورد استفاده قرار گرفته است. روش طبقه‌بندی جنگل تصادفی در این تحقیق به ۹۴٫۳۵٪ دقت کلی دست یافته است که نسبت به روشهای سنتی نتیجه خوبی می‌باشد [۵۷].

از دیگر روشهای نوین در استخراج نقاط زمینی و تولید مدل رقومی زمین با کیفیت بالا، الگوریتم BVMS می‌باشد. این الگوریتم یک روش با پیاده‌سازی آسان و هزینه‌های محاسباتی کم می‌باشد که براساس شبکه‌های عصبی مصنوعی طراحی شده است. این الگوریتم از دو فرآیند انتخاب داده‌های آموزشی خودکار (نظارت نشده) و نیز آموزش نظارت شده استفاده می‌نماید. در فرآیند اول، با استفاده از معیارهایی بر اساس شیب، تعدادی نقطه‌ی زمینی و با استفاده از معیارهای اختلاف بازگشت اول و آخر، تعدادی نقطه عارضه شناسایی می‌شوند. در دومین فرآیند، از

روش‌های آموزش نظارت شده بهره گرفته و نتایج حاصل از این دو فرآیند، بعنوان داده آموزشی برای آموزش شبکه عصبی استفاده گردیده است و سرانجام نقاط سطح زمین و عوارض غیرزمینی با استفاده از این شبکه عصبی طبقه‌بندی می‌شوند و نتایج حاصل با چهار روش سنتی روی داده‌های استاندارد ISPRS مقایسه گردیده است. نتایج بدست آمده از این الگوریتم نشان‌دهنده موفقیت الگوریتم BVMS بویژه در کاهش خطای نوع دو می‌باشد [۵۸].

آقای Niemeyer روش CRF^۶ را برای طبقه‌بندی ابرنقاط بکارگرفته است و بررسی کاملی از طبقه‌بندی با استفاده از طبقه‌بندی کننده‌ها، عوارض و همسایگی‌های مختلف انجام داد. اکثر روشهای مورد بررسی در این تحقیق نظارت شده بوده و نه تنها ابرنقاط را به کلاسهای زمینی و غیرزمینی طبقه‌بندی می‌نماید بلکه بسیاری از کلاس‌های دیگر را نیز طبقه‌بندی می‌نماید. روش CRF امکان ترکیب اطلاعات متنی و یادگیری ارتباطات خاص اشیاء زمینی را در مرحله آموزش فراهم می‌سازد. بنابراین این روش یک الگوریتم قدرتمند برای بدست آوردن نتایج قابل اعتماد حتی در صحنه‌ها پیچیده شهری می‌باشد. [۵۹].

آقای Zhang و همکاران از الگوریتم SVM برای طبقه‌بندی ابرنقاط استفاده نموده‌اند. وی الگوریتم سطح رو به رشد^۷ را برای خوشه‌بندی ابرنقاط بکارگرفته و از سیزده ویژگی هندسی، رادیومتریک، توپولوژی و پالس بازگشتی برای طبقه‌بندی و قطعه‌بندی با روش SVM استفاده نموده است. سپس روش تجزیه و تحلیل مولفه متصل^۸ با هدف بهینه‌سازی نتایج طبقه‌بندی اولیه بکار گرفته شده است. استفاده از سه مجموعه داده با داده‌های مترکم و پیچیده برای آزمون روشها از ویژگی‌های این تحقیق است. در این تحقیق در نهایت به دقت ۹۲٫۳۴٪ با ضریب کاپای ۰٫۸۳۸۸ برای طبقه‌بندی ابرنقاط شهری دست یافته است [۶۰].

آقای Hu و همکاران از روشهای طبقه‌بندی یادگیری عمیق برای استخراج DTM از ابرنقطه ALS استفاده نموده است. ایشان روشی جدید براساس یادگیری عمیق با استفاده از شبکه‌های عصبی کانولوشن CNN^۹ پیشنهاد داده است. در این روش برای هر نقطه، پنجره همسایگی استخراج و به یک

^۱ Conditional Random Field

^۲ Surface Growing

^۳ Connected Component Analysis

^۴ Convolution Neural Network

^۱ Neural Network

^۲ Machine Learning

^۳ Deep Learning

^۴ Random Forest

^۵ Eigen Value

ابرنقطه سه بعدی اجرا گردیده است. در این تحقیق الگوریتم یادگیری عمیق CNN با دو رویکرد، دید چند منظر و برمبنای Voxel و نیز پردازش مستقیم ابرنقطه مقایسه گردیده است [۶۴].

نتایج عملکرد روشهای نوین فیلترکردن که عمدتاً از الگوریتمهای یادگیری ماشین و یادگیری عمیق استفاده شده است، نشان میدهد این روشها بهتر از الگوریتمهای سنتی عمل نموده و بیانگر پتانسیل بالای روشهای مبتنی بر یادگیری در فیلترکردن ابرنقاط می باشد.

۴- بحث و بررسی نتایج

آقابان Sithole و همکاران [۹]، Meng و همکاران [۱۰] و Chen و همکاران [۱۱] در سالهای مختلف، بررسی جامعی روی روشهای فیلترکردن ابرنقاط انجام داده اند. در گزارش آقای Sithole هشت روش سنتی که تا آن زمان برای فیلترکردن مورد استفاده قرار میگرفته است را بررسی نموده است و از بین هشت الگوریتم مورد مطالعه الگوریتمهای فیلترکردن TIN [۶۵] و بر مبنای سطح [۲۸] بهترین نتایج را ارائه می دهند. با این وجود کارایی هیچ روشی برای استخراج نقاط زمینی در مناطق با زمین پیچیده و یا با تغییرات شدید ارتفاعی و یا درختان انبوه کاملاً مناسب نیست [۹]. آقای Sithole بر این باور است که روشهای خودکار ۶۰ تا ۸۰ درصد زمان تولید مدل رقومی زمین را نسبت به کار دستی کاهش می دهد. اگر روشها بدون حدآستانه باشند، کارایی استخراج DTM کاهش محسوسی نسبت به روشهای اپراتوری دستی دارد [۶۶]. کارایی عمده روشها به شرایط خاصی محدود می شوند. مثلاً فیلترهایی که در مناطق جنگلی کار می کنند ممکن است در مناطق شهری خوب کار نکنند. به هر حال دقت فیلترکردن از دهه قبل بهبود چشمگیری داشته است. در کنار عملکرد روشهای فیلترکردن، زمان پردازش و بازده محاسباتی روشهای ارائه شده بسیار مهم می باشد. آقای Mongus و همکاران با تنظیم دادههای ورودی رستری با کاهش زمان پردازش کارایی محاسباتی را تا ۹۸ درصد افزایش دادند [۶۷]. کارایی محاسباتی هم به زمان پردازش و هم به میزان بکارگیری حافظه با توجه به افزایش حجم دادههای ورودی بستگی دارد.

تصویر تبدیل می شود. بنابراین هر تصویر نماینده یک نقطه محسوب می گردد. تبدیل نقطه به تصویر باید با در نظر گرفتن اطلاعات ارتفاعی نقاط همسایه و با دقت کافی انجام گیرد. در این تحقیق بعد از آموزش حدود ۱۷ میلیون نقطه، مدل یادگیری CNN مشخص میکند که یک اپراتور انسانی چگونه میتواند تشخیص دهد یک نقطه زمینی یا غیرزمینی است. اجزای تشکیل دهنده این روش عبارتند از: نخست دادههای آموزشی دوم آموزش شبکه CNN از طریق دادههای برچسب گذاری شده و نهایتاً داده ها در چندین لایه کانولوشن، یک لایه نمونه برداری ۱، لایه اتصال کامل ۲ پردازش می شود. این روش روی ۱۵ سایت داده استاندارد ISPRS اجرا و نتیجه طبقه بندی با روشهای برمبنای TIN، Mongus 2012، SGF، Axelsson، و Mongus 2014 مقایسه گردید و نتایج بهتری را در برداشته است. [۶۱].

آقای Rizaldy در تحقیقی از الگوریتمهای یادگیری ماشین برای طبقه بندی ابرنقاط استفاده نمود. روش کار در این تحقیق استفاده از شبکه عصبی CNN می باشد. تفاوت عملکرد روش بکار گرفته شده در این تحقیق با روش آقای Hu استفاده از تنها یک تصویر بجای تصاویر متعدد برای هر نقطه می باشد. این رویکرد منجر به کاهش قابل توجه محاسبات در جریان تولید تصویر و نیز طبقه بندی می گردد و کارایی محاسباتی روش را افزایش می دهد. بعلاوه طبقه بندی بوسیله یک شبکه کاملاً متناوب عصبی^۲ که نسخه اصلاح یافته CNN می باشد، انجام گرفته است. روش پیشنهادی بطور قابل توجهی سریعتر از تکنیکهای قبلی بوده و در مجموع با اجرای روش روی دادههای ISPRS در تبدیل و تولید تصویر ۷۸ بار و برای طبقه بندی ۱۶ بار سریعتر از روش قبلی می باشد. این روش خطای کلی ۵٫۲۲٪ و خطای نوع اول ۱۰٫۴٪ و خطای نوع دوم ۱۵٫۰۷٪ را نشان میدهد [۶۲].

در تحقیقی دیگر آقای Politz و همکاران از ابرنقطه سه بعدی، تصاویر دوبعدی و شبکه Voxel سه بعدی استخراج نموده و با بکارگیری شبکه مصنوعی عمیق اقدام به طبقه بندی ابرنقطه نموده است [۶۳].

در تحقیق دیگری شبکه یادگیری عمیق دیگری تحت عنوان PCSS^۴ معرفی گردیده که روی داده های لیدار و

^۱ Pooling Layer

^۲ Fully Connection Layer

^۳ Fully Convolutional Network

^۴ 3D Point Cloud Semantic Segmentation

جدول ۲- تجزیه و تحلیل کیفیت عملکرد فیلترها

الگوریتم	مرجع	روش / بهبود روش	نقاط قوت و ضعف
شیب مبنا	Vosselman 2000	تعریف حدآستانه های متغیر	قوت : ✓ با تنظیم پارامترها میتوان از تخریب زمین جلوگیری نمود ✓ مناسب برای مناطق جنگلی ضعف : ✓ حذف جزئیات زمین ✓ وابستگی روش به پارامترها ✓ عدم ارائه نتیجه مناسب روی همه مناطق ✓ نامناسب برای زمینهای شیبدار و ناهموار
	Sithole 2001	اصلاح فیلتر شیب مبنا برای مناطق با شیب تند	
	Reggoro 2001	تغییر پارامترهای المان ساختاری براساس شیب زمین	
	Sithole 2003	اعمال پیش پردازش حذف نقاط پرت	
مورفولوژی	Wake 2002	الگوریتم Minimum Block و بکارگیری المان رستری بصورت سلسله مراتبی	قوت : ✓ مناسب برای سطوح شیبدار، زمین با عوارض کوچک ضعف : ✓ نامناسب برای زمین با عوارض متنوع ✓ عوارض خیلی کوچک (با ارتفاع کم) حذف می شوند.
	Lohman 2003	استفاده از فیلتر دوگانه برمبنای اتساع و فرسایش	
	Zhang 2003	فیلتر مورفولوژی پیشرونده افزایش تدریجی ابعاد پنجره بصورت خطی یا نمائی	
	Zhang 2005	تنظیم پارامترها با اطلاع از نوع منطقه	
	Bartels 2006	استفاده از الگوریتم مورفولوژی ریاضی	
	Arefi 2005	بسط عملگر اتساع ژئودزیک با تغییر اندازه ابعاد پنجره	
	Forlani 2007	بکارگیری روش همزمان قطعه بندی و مورفولوژی	
	Mengus 2014	استفاده از فیلتر مورفولوژی با مشخصات و ابعاد مختلف و برازش سطح بصورت محلی	
Yong 2014	ارائه ایده Top Hat		
سطح مبنا	Kraus 1998	پیوسته سازی سلسله مراتبی	قوت : ✓ مناسب برای سطوح مختلف ضعف : ✓ تنظیم پارامترها ضروریست
	Elmqvist 2001	کمینه کردن تابع انرژی منحنی فعال	
	TUV 2012	بکارگیری خطوط شکست + وزندار کردن نقاط با استفاده از تابع وزن و تعریف سطح جدید بصورت تکرار	
TIN	Axelsson 1999,2000	TIN پیشرونده	قوت : ✓ مناسب برای سطوح شیبدار ضعف : ✓ نامناسب برای مناطق شهری، زمینهای گسسته
	Sohn 2002	TIN مترکم شونده پیشرونده	
	Haugerud 2001	VDF : اعوجاج مجازی	
قطعه بندی	Brovilli 2002	قطعه بندی براساس شناسایی لبه ها	قوت : ✓ مناسب برای مناطق شهری، زمین با عوارض متنوع ضعف : ✓ نامناسب برای زمین شیبدار و ناهموار، جنگل مترکم
	Jacobsen 2003, Filin 2006	طبقه بندی براساس قطعه بندی	
	Sithole 2005	استفاده از اطلاعات رادیومتریک برای قطعه بندی	
	Rabbania 2006	فیلتر قطعه بند با قید نرمی	
	Tóvári 2005	تلفیق روشهای قطعه بندی با پیش بینی خطی	
	Chen 2016	استفاده از روشهای قطعه بندی تصاویر و مقایسه همبستگی فضائی قطعات	
	Beumier 2016	قطعه بندی / طبقه بندی نقاط زمینی و غیرزمینی و تولید DTM	
	Yan 2012	استفاده از پائینترین نقاط محلی برای نقاط اولیه روش قطعه بندی پیش رونده	
Hingee 2016 , 2019	برازش صفحات اسپلاین نازک و خطوط شکست		

درونیابی	Briese 2001, Kraus 1999 2001, Schickler 2001	درونیابی robust تکرار شونده	قوت : ✓مناسب عموماً برای زمینهای هموار ضعف : ✓نامناسب برای زمین با عوارض متنوع
	Kraus 1998, Pfeifer 1999, Lee 2003,	تقریب سطح با روشهای مبتنی بر پیش بینی خطی	
	Zheng 2007	مدل Facet	
	Evans 2007	بر اساس انحنای مقیاس چندگانه : MCC	
سایر	Bao 2008, Bartels 2006, Bartels 2010	استفاده از الگوریتم Wavelet در آنالیز های آماری	قوت : مناسب برای مناطق شهری ضعف : نامناسب برای زمین شیبدار و ناهموار
	Shan 2005	محاسبه شیب بین نقاط همسایه در امتداد اسکن لاین ها در جهات مختلف	
	Meng 2009	بسط ایده اسکن لاین ها به چند جهت	
	Mongus 2012	تعریف ابعاد پنجره بهینه و متناسب	
	Maguya 2013	استفاده از دو معادله مختلف برای شبیه سازی سطوح خطی و سطوح درجه دوم	
	Tseng 2014	تقسیم عملگر مخروطی به دو عملگر مجزا DS	مناسب برای مناطق شهری
	Hu 2015	روش فیلتر کردن SGF	سرعت بالا در فیلتر کردن
	Hui 2016	الگوریتم مورفولوژی با درونیابی Kriging	
	Zhang 2013	بسط TIN بهبود یافته با روشهای قطعه بندی بر اساس قیود نرمی برای سطوح شامل شکستگی ها	
	Chen 2016	پیشنهاد سه استراتژی: اول تعریف مفهوم مثلث تیز و مثلث مجاور بر اساس مشخصات این دو نوع مثلث دوم یک روش تخمین فاصله اطمینان مناسب برای انتخاب بهتر نقاط سطح اولیه و نهایتاً یک معادله ساده برای کنترل تعداد تکرارها	
	Samadzadegan 2010	الگوریتم که بر پایه طبقه بندی SVM و نیز استفاده مقادیر رادیومتریک عکس و آنالیز بافت	
	متکان ۱۳۹۳	روش های مبتنی بر عملگرهای مورفولوژی ریاضی هنگام برخورد با ساختمان های بزرگتر	
	Zhang 2016	شبیه سازی رفتار فیزیکی پارچه زبر روی سطح ابرنقاط معکوس	
	Hu 2015	SGF : حداقل رساندن تابع انرژی	قوت : ✓شیب دار، زمین های گسسته و اشیاء پیچیده
	Wang 2009	فیلترهای دانش مبنا بر اساس داده های آموزشی	
	Wang 2010	فیلترهای دو جهتی	قوت : مناسب برای زمین های نسبتاً مسطح ضعف : روشها بویژه در مناطق جنگلی با شیب تند غیر قابل اعتماد نمی باشند
	Debella 2016	استخراج نقاط زمینی براساس حد آستانه با شیب محلی و استخراج DTM	قوت : با استفاده از ۵ روش درونیابی ضعف : نیاز به DTM با قدرت تفکیک پائین
یادگیری ماشین	Chehata 2009	بکار گیری روش جنگل تصادفی در فیلتر کردن	قوت : ✓مناسب برای منطقه مختلف ✓عدم نیاز به تنظیم پارامتر ضعف : ✓عدم وجود پشتوانه تئوریک ✓نیاز به استخراج ویژگی
	Baligh 2011	الگوریتم BVMS: تکنیک طبقه بندی شبکه های عصبی	
	Samadzadegan 2010	روش طبقه بندی چند کلاسه SVM	
	Baligh 2011	استفاده از شبکه عصبی مصنوعی	
	Niemeyer 2012	بکارگیری روش Conditional Random Fields	
	Zhang 2013	طبقه بندی و قطعه بندی با روش SVM	
یادگیری عمیق	Hu 2016	استفاده از روش یادگیری عمیق به روش شبکه عصبی کانولوشنی CNN	قوت : ✓امکان بکارگیری همزمان در انواع زمینها ✓عدم نیاز به تنظیم پارامتر ✓عملکرد سریع برای داده ها با حجم بالا ✓مزیت شبکه FCN نسبت به CNN سرعت بیشتر می باشد ✓گسترش و تکامل روشهای یادگیری عمیق برای رسیدن به دقت و صحت بالاتر ✓استخراج ویژگی بصورت خودکار انجام می شود ضعف : ✓عدم وجود پشتوانه تئوریک ✓وابستگی نتایج به داده های آموزشی ✓نیاز به داده های آموزشی زیاد
	Rizaldy 2018	بکارگیری روش یادگیری عمیق Fully Convolutional Network	
	Gevaert 2018	استفاده از اطلاعات رادیومتریک، اعمال فیلتر اولیه مورفولوژی و سپس FCN	
	Politz 2019	بکار گیری تصاویر دوبعدی و شبکه Voxel سه بعدی	
	Yuxing Xie 2019	شبکه یادگیری عمیق دیگری تحت عنوان PCSS	

بررسی روی الگوریتم‌های مختلف فیلتر کردن ابرنقاط نشان می‌دهد روش‌های سنتی ارائه شده تا حدی با در نظر گرفتن چند نکته همچنان قابل رقابت با روشهای نوین فیلتر کردن می‌باشد که عبارتند از: استفاده از روشهای سنتی بهبود یافته و استفاده از ترکیب روشهای سنتی می‌باشد [۱۱]. همچنین بکارگیری روشهای نوین یادگیری مانند یادگیری ماشین و یادگیری عمیق نیز پیشنهاد می‌گردد.

۴-۱- ترکیب روشهای بهبود یافته

با توجه به قابلیت‌های مختلف روشهای ارائه شده، در صورت ترکیب این قابلیت‌ها، میتوان نتیجه خوبی از این ادغام گرفت. آقای Su و همکارانش فیلترهای سطحی و الگوریتم مقایسه چند گانه^۱ را برای تشخیص و حذف بهتر ساختمان‌های بزرگ با موفقیت استفاده کردند [۶۸]. آقای Mongus و همکاران هم روش تولید DTM با ترکیب روشهای مقایسه چندگانه و روش قطعه‌بندی و طبقه‌بندی و مورفولوژی ارائه نموده و به دقت بالا و کارائی محاسباتی خوبی دست یافت. این روش هم بدلیل استراتژی مستقل از پارامتر و هم بدلیل مناسب بودن برای مناطق مختلف، مورد استفاده قرار می‌گیرد. موفقیت این روش عمدتاً بدلیل کارائی روش‌های سطح مینا، روش مقایسه چندگانه و تجزیه و تحلیل آماری می‌باشد [۶۷].

علاوه بر روشهایی که از تلفیق الگوریتم‌های سنتی بدست می‌آید، روشهای منحصر بفردی وجود دارد که راهبردهای مختلف فیلتر کردن را تلفیق می‌کنند. برخی محققین حتی روشهایی را پیشنهاد میدهند که می‌توانند مستقیماً با ادغام DTM تولید شده با روشهای مختلف و پارامترهای متفاوت بطور قابل توجهی تولید DTM را بهبود ببخشند. در همین زمینه آقای Chen و همکاران یک روش تلفیقی برای تولید DTM پیشنهاد داده اند. این روش رستر مینا می‌باشد و لذا محاسبات را می‌تواند با استفاده از روشهای تولید DTM رستری با بکارگیری چندین روش و پارامتر اداره نمود [۷] به نظر می‌رسد در آینده رویکرد بیشتری روی ترکیب روشهای موجود و استفاده از روشهای نوین خواهد بود.

۴-۲- استفاده از منابع مختلف اطلاعاتی

اگر چه پیشرفتهای زیادی در طراحی روشهای جدید فیلتر کردن ابرنقاط صورت گرفته و برخی از موضوعات چالشی این روشها مورد تاکید قرار گرفته، ولی محدودیت‌ها همچنان ادامه دارد. بطور خاص در روشهای سنتی فیلتر کردن، در شرایط پیچیده زمین و با عوارض متنوع استخراج نقاط زمینی بسیار مشکل می‌باشد بویژه در مناطقی که میزان تغییرات ارتفاعی زیاد می‌باشد و یا زمین دارای برجستگی‌های تیز و خیلی شبیه به عوارض غیرزمینی باشد، که در این حالت عملگرهای مورفولوژی، شیب مینا و توابع آماری، این نقاط زمینی را بعنوان غیرزمینی فیلتر می‌نماید.

استفاده از ویژگی‌های اضافی بعنوان یک راه کار عملی برای حل این مشکل می‌باشد. اگر چه برخی محققین با استفاده از ویژگی شدت^۲ اقدام به طبقه‌بندی عوارض نموده اند ولی شدت تک باندی نمی‌تواند از طبقه‌بندی عوارض متنوع غیرزمینی پشتیبانی نماید. علاوه بر این ویژگی شدت ارائه شده در داده‌های LiDAR بطور کامل برای طبقه‌بندی قابل اعتماد نیست. [۱۱].

در سالهای اخیر ادغام داده‌های LiDAR با سایر داده‌ها بطور گسترده ای افزایش یافته است. تلفیق LiDAR با داده‌های هوایی با قدرت تفکیک بالا و تصاویر ماهواره ای، تصاویر چند طیفی برای طبقه‌بندی پوشش زمین مورد مطالعه قرار گرفته است [۶۹]. Kim و همکاران نیز از ویژگی‌های طیفی تصاویر هوایی [۷۰] و ماهواره ای [۷۱] برای بهبود دقت طبقه‌بندی سطح زمین استفاده نمود.

Delbella و همکاران، DTM‌ها با قدرت تفکیک کم را بعنوان سطح اولیه بکار گرفته و با ابرنقطه حاصل از فتوگرامتری رقومی تلفیق نموده و DTM با قدرت تفکیک بالا تولید نمودند [۷۲].

سعیدی و همکاران، بجای استفاده مستقیم از اطلاعات طیفی، ویژگی NDVI را برای کمک به طبقه‌بندی سطح زمین، درختان متصل به و زمین شیب دار و ساختمان‌های بزرگ در منظرهای پیچیده بکار گرفت [۷۳]. علی رغم انجام مطالعات زیاد در این زمینه، تولید DTM با استفاده از چند منبع مطالعات بیشتری در مناطق با منظر پیچیده و گسسته نیاز دارد.

^۲ Intensity

^۱ Multi Scale Comparison

۴-۳- بکارگیری الگوریتم‌های نوین یادگیری

یادگیری ماشین، زیر مجموعه‌ای از هوش مصنوعی است و با استفاده از تکنیک‌های یادگیری ماشین، کامپیوتر، الگوهای موجود در داده‌ها (اطلاعات پردازش شده) را یاد گرفته و می‌تواند از آن استفاده کند. امروزه استفاده از روشهای یادگیری ماشین و نیز یادگیری عمیق در بهبود نتایج طبقه بندی گسترش یافته بطوریکه بکارگیری این روشها بویژه در داده هائی که امکان برچسب گذاری آنها با هدف داده آموزشی فراهم باشد، نتایج قابل توجهی بدنبال داشته است. نتایج عملکرد روشهای یادگیری در موضوع فیلترکردن، نشان میدهد این روشها بهتر از الگوریتم‌های سنتی عمل نموده و بیانگر پتانسیل بالای روشهای مبتنی بر یادگیری در فیلترکردن ابرنقاط می‌باشد. استخراج ویژگیهای موثر با کارائی بالا برای بکارگیری در روشهای یادگیری ماشین و نیز استفاده از یادگیری عمیق در استخراج ویژگی و نیز در طبقه‌بندی نقاط زمینی و غیرزمینی به نظر می‌رسد نتایج بهتری را در بر دارد. استفاده از روش یادگیری عمیق به بویژه شبکه عصبی کانولوشنی CNN^۱ و نیز استفاده از اطلاعات رایومتریک در یادگیری و اعمال فیلتر اولیه مورفولوژی و سپس FCN^۲ از جمله روشهای بکارگرفته شده در زمینه فیلترکردن ابرنقاط می‌باشد. با توجه به پتانسیل بالای روشهای یادگیری عمیق، استفاده از سایر روشهای یادگیری از جمله الگوریتم‌های یادگیری تلفیقی می‌تواند نتایج بهتری در بر داشته باشد [۶۱، ۶۲، ۷۴].

۵- نتیجه گیری

طی چند دهه گذشته روشهای فیلترکردن ابرنقطه بطور گسترده ای مورد مطالعه قرار گرفته است و الگوریتم‌های مختلف با رویکردی متفاوت برای شرایط مختلف زمین پیشنهاد گردیده است. با توجه به ارائه روشهای متنوع فیلترکردن ابرنقاط، با این وجود استفاده ساده از یک روش فیلترکردن به سختی می‌تواند برای زمین‌های مختلف کارائی لازم را داشته باشد. در این مقاله ضمن بررسی روشها و الگوریتم‌های سنتی، پیشرفتهای اخیر فیلترکردن ابرنقطه، بویژه استفاده از روشهای نوین یادگیری مورد مطالعه قرار

گرفته است. روشهای فیلترکردن در این مقاله به دو گروه اصلی روشهای سنتی که عمدتاً قانون مبنا بوده و بر اساس رفتار فیزیکی نقاط زمینی و غیرزمینی طراحی گردیده اند و روشهای نوین که عمدتاً بر اساس الگوریتم‌های یادگیری ماشین و یادگیری عمیق اقدام به شناسائی نقاط زمینی و غیرزمینی می‌نمایند.

روشهای سنتی در هشت گروه روشهای شیب مبنا، مورفولوژی، مبتنی بر سطح، TIN، روشهای قطعه بندی، روشهای درونبایی یا مبتنی بر پیش بینی خطی، روشهای آنالیز اماری و سایر روشهایی که در این زمینه مطرح گردیده، مورد بحث قرار گرفته است. روشهای نوین نیز در دو گروه روشهای مبتنی بر یادگیری ماشین و مبتنی بر یادگیری عمیق پیشنهاد گردیده است مورد بررسی قرار گرفته است. از مزایای اصلی روشهای سنتی، دارا بودن پشتوانه تئوریک و قاعده مند بودن روشها، امکان استفاده از روشهای خاص برای مناطق خاص و ارائه نتایج مناسب برخی روشها برای بخش عمده ای از داده های ورودی و از چالشهای این روشها، مناسب بودن هر روش برای نوع یا انواع خاصی از زمینها، وابستگی زیاد به تنظیم پارامترهای مختلف، میتوان نام برد.

مزایای روشهای نوین نیز امکان بکارگیری همزمان در انواع زمینها، عدم نیاز به تنظیم پارامتر، عملکرد سریع برای داده ها با حجم بالا، گسترش و تکامل روشهای یادگیری عمیق برای رسیدن به دقت و صحت بالاتر و استخراج ویژگیها بصورت خودکار در یادگیری عمیق میتوان برشمرد. عدم وجود پشتوانه تئوریک، نیاز به داده های آموزشی زیاد، وابستگی نتایج به داده های آموزشی و نیاز به سخت افزار قدرتمند برای پردازش داده ها نیز از نقاط ضعف روشهای نوین می‌باشد.

با وجود توسعه قابل توجه در زمینه روشهای فیلترکردن، هنوز برخی محدودیتها وجود دارد. این چالشها در مناطقی از زمین که دارای منظر پیچیده بوده و یا دارای عوارض متنوع و یا زمینها گسسته می‌باشند بیشتر دیده می‌شود. در این مقاله برای غلبه بر این چالش و کاهش خطای ناشی از آن راهکارهای اساسی پیشنهاد گردیده است. این راهکارها عبارتند از: ترکیب روشهای فیلترکردن بهبود یافته، استفاده از منابع مختلف اطلاعاتی، اجرای عملیات پیش پردازش مانند روشهای قطعه بندی فازی و نیز بکارگیری الگوریتم‌های نوین یادگیری ماشین و یادگیری عمیق.

^۱ Convolution Neural Network

^۲ Fully Convolutional Network

برای مناطق خاص نیز از جمله راهکارهای بهبود نتایج حاصل از عملیات فیلترکردن می‌باشد.

در پایان راهکار اصلی این مقاله مشتمل بر سه راهکار می‌باشد، استفاده از روشهای نوین یادگیری عمیق می‌باشد، استفاده از منابع اطلاعاتی متنوع و بکارگیری روشهای پیش پردازش را فراهم می‌سازد. بعنوان مثال اجرای برخی روشهای سنتی با کارائی بالا روی داده ها و تمرکز بر داده ها و نقاطی که دارای پیچیدگی بوده و سپس استفاده از روشهای یادگیری ماشین روی این نقاط برای افزایش کارائی پیشنهاد می‌گردد.

به تازگی برخی روشهای فیلترکردن پیشنهاد گردیده است که چندین دسته از روشهای فیلترکردن را با هم ترکیب نموده و بنابراین جزئیات زمین را حفظ و عوارض غیرزمینی را حذف می‌نماید بطوریکه روشهای ترکیبی قابلیت اعتماد پذیری به نتایج را تا حد زیادی افزایش داده اند. همچنین استفاده از منابع اطلاعاتی مختلف مانند بکارگیری داده های LiDAR و فتوگرامتری بصورت همزمان و یا استفاده از باند IR تصاویر و استفاده از شاخص NDVI برای تشخیص درختان در مناطق جنگلی از جمله این منابع می‌باشد. اجرای عملیات پیش پردازش مانند روشهای قطعه بندی و استفاده از روشهای خاص

مراجع

- [1] K. Nurminen et al., "Automation Aspects for the Georeferencing of Photogrammetric Aerial Image Archives in Forested Scenes," *Remote Sensing*, vol. 7, no. 2, pp. 1565-1593, 2015/02/02 2015.
- [2] C. Heipke, M. Madden, Z. Li, and I. Dowman, "Theme issue "State-of-the-art in photogrammetry, remote sensing and spatial information science"," *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 115, pp. 1-2, 2016/05 2016.
- [3] G. Sithole and G. Vosselman, "Experimental comparison of filter algorithms for bare-Earth extraction from airborne laser scanning point clouds," *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 59, no. 1-2, pp. 85-101, 2004/08 2004.
- [4] K. Zhang and D. Whitman, "Comparison of Three Algorithms for Filtering Airborne Lidar Data," *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, vol. 71, no. 3, pp. 313-324, 2005/03/01 2005.
- [5] M. Bartels and H. Wei, "Threshold-free object and ground point separation in LIDAR data," *Pattern Recognition Letters*, vol. 31, no. 10, pp. 1089-1099, 2010/07 2010.
- [6] X. Liu, "Airborne LiDAR for DEM generation: some critical issues," *Progress in Physical Geography*, vol. 32, no. 1, pp. 31-49, 2008/02/01 2008.
- [7] Z. Chen, B. Devereux, B. Gao, and G. Amable, "Upward-fusion urban DTM generating method using airborne Lidar data," *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*, vol. 72, pp. 121-130, 2012.
- [8] L. Wei-Lwun, K. P. Murphy, J. J. Little, A. Sheffer, and F. Hongbo, "A Hybrid Conditional Random Field for Estimating the Underlying Ground Surface From Airborne LiDAR Data," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol. 47, no. 8, pp. 2913-2922, 2009/08 2009.
- [9] G. Sithole and G. Vosselman, "Comparison of filtering algorithms," in *Proceedings of the ISPRS working group III/3 workshop*, 2003, pp. 71-78.
- [10] X. Meng, N. Currit, and K. Zhao, "Ground Filtering Algorithms for Airborne LiDAR Data: A Review of Critical Issues," *Remote Sensing*, vol. 2, no. 3, pp. 833-860, 2010.
- [11] Z. Chen, B. Gao, and B. Devereux, "State-of-the-Art: DTM Generation Using Airborne LIDAR Data," *Sensors*, vol. 17, no. 1, p. 150, 2017.
- [12] G. Sithole and G. Vosselman, "Filtering of airborne laser scanner data based on segmented point clouds," *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. 36, no. part 3, p. W19, 2005.
- [13] X. Meng, L. Wang, J. L. Silván-Cárdenas, and N. Currit, "A multi-directional ground filtering algorithm for airborne LIDAR," *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 64, no. 1, pp. 117-124, 2009.
- [14] G. Vosselman, "Slope based filtering of laser altimetry data," *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 33, no. B3/2; PART 3, pp. 935-942, 2000.
- [15] G. Sithole, "Filtering of laser altimetry data using a slope adaptive filter," in *IAPRS Annapolis, 2001: IAPRS* pp. 203-210.

- [16] Y. Li, B. Yong, H. Wu, R. An, and H. Xu, "An Improved Top-Hat Filter with Sloped Brim for Extracting Ground Points from Airborne Lidar Point Clouds," *Remote Sensing*, vol. 6, no. 12, pp. 12885-12908, 2014.
- [17] M. Roggero, "Airborne laser scanning-clustering in raw data," *International Archives of Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. 34, no. 3/W4, pp. 227-232, 2001.
- [18] Y. Tseng, M. Wang, and F. Chou, "Dem generation using 3d rasterized airborne lidar data," in *Proceedings of ISPRS 20th Congress (Commission III)*, Istanbul, 2004.
- [19] J. Shan and S. Aparajithan, "Urban DEM Generation from Raw Lidar Data," *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, vol. 71, no. 2, pp. 217-226, 2005/02/01 2005.
- [20] J. Wang and J. Shan, "Segmentation of LiDAR point clouds for building extraction," in *American Society for Photogramm. Remote Sens. Annual Conference*, Baltimore, MD, 2009, pp. 9-13.
- [21] C.-K. Wang and Y.-H. Tseng, DEM generation from airborne LiDAR data by an adaptive dual-directional slope filter. na, 2010.
- [22] J. Lindenberger, "Laser-Profilmessungen zur topographischen Gelandaufnahme. Ph. D. thesis.," 1993.
- [23] P. Lohmann, A. Koch, and M. Schaeffer, "Approaches to the filtering of laser scanner data. *Int. Arch. Photogramm.*" *Remote Sensing*, pp. 540-547., 2003.
- [24] R. Wack and A. Wimmer, "Digital terrain models from airborne laserscanner data-a grid based approach," *International Archives of Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. 34, no. 3/B, pp. 293-296, 2002.
- [25] K. Zhang, C. Shu-Ching, D. Whitman, S. Mei-Ling, Y. Jianhua, and Z. Chengcui, "A progressive morphological filter for removing nonground measurements from airborne LIDAR data," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol. 41, no. 4, pp. 872-882, 2003/04 2003.
- [26] H. Arefi, J. Engels, and M. Hahn, "Automatic DTM generation from laser-scanning data in residential hilly area," In *Proceedings of ISPRS Joint Workshop; Visualization and Exploration of Geospatial Data*, Stuttgart, Germany, 2007.
- [27] Q. Chen, P. Gong, D. Baldocchi, and G. Xie, "Filtering Airborne Laser Scanning Data with Morphological Methods," *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, vol. 73, no. 2, pp. 175-185, 2007/02/01 2007.
- [28] K. Kraus and N. Pfeifer, "Determination of terrain models in wooded areas with airborne laser scanner data," *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 53, no. 4, pp. 193-203, 1998/08 1998.
- [29] TUV, "The SCOP++ software. Institute of Photogrammetry and Remote Sensing, University of Vienna, Austria and INPHO GmbH, Stuttgart, Germany. ," 2012.
- [30] M. Elmqvist, E. Jungert, F. Lantz, A. Persson, and U. Soderman, "Terrain modelling and analysis using laser scanner data," *International Archives of Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. 34, no. 3/W4, pp. 219-226, 2001.
- [31] G. a. I. D. Sohn, "Terrain surface reconstruction by the use of tetrahedron model with the MDL criterion," *Proceedings of the Photogrammetric Computer Vision*, ISPRS Commission III, pp. 336- 344., 2002.
- [32] S. Filin and N. Pfeifer, "Segmentation of airborne laser scanning data using a slope adaptive neighborhood," *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 60, no. 2, pp. 71-80, 2006/04 2006.
- [33] G. Sithole, "Segmentation and classification of airborne laser scanner data," *Netherlands Geodetic Commission Delft*, phd thesis, 2005.
- [34] M. Brovelli, M. Cannata, and U. Longoni, "Managing and processing LiDAR data within GRASS," in *Open Source GIS-GRASS users conference*, Trento, Italy, 2002, p. 29.
- [35] K. Hingee, P. Caccetta, L. Caccetta, X. Wu, and D. Devereaux, "Digital terrain from a two-step segmentation and outlier-based algorithm," *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. 3, pp. 233-239, 2016.
- [36] K. L. Hingee, P. Caccetta, and L. Caccetta, "Modelling discontinuous terrain from DSMs using segment labelling, outlier removal and thin-plate splines," *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 155, pp. 159-171, 2019.
- [37] W. Zhang et al., "An Easy-to-Use Airborne LiDAR Data Filtering Method Based on Cloth Simulation," *Remote Sensing*, vol. 8, no. 6, p. 501, 2016.
- [38] J. Susaki, "Adaptive Slope Filtering of Airborne LiDAR Data in Urban Areas for Digital Terrain Model (DTM) Generation," *Remote Sensing*, vol. 4, no. 12, pp. 1804-1819, 2012.
- [39] M. Wang and Y.-H. Tseng, "Automatic Segmentation of Lidar Data into Coplanar Point Clusters Using an Octree-Based Split-and-Merge Algorithm," *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, vol. 76, no. 4, pp. 407-420, 2010/04/01 2010.

- [40] C.-K. Wang and Y.-H. Tseng, "Dual-directional profile filter for digital terrain model generation from airborne laser scanning data," *Journal of Applied Remote Sensing*, vol. 8, no. 1, p. 083619, 2014/06/05 2014.
- [41] D. Mongus and B. Žalik, "Parameter-free ground filtering of LiDAR data for automatic DTM generation," *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 67, pp. 1-12, 2012/01 2012.
- [42] Z. Hui, Y. Hu, Y. Yevenyo, and X. Yu, "An Improved Morphological Algorithm for Filtering Airborne LiDAR Point Cloud Based on Multi-Level Kriging Interpolation," *Remote Sensing*, vol. 8, no. 1, p. 35, 2016.
- [43] J. S. Evans and A. T. Hudak, "A Multiscale Curvature Algorithm for Classifying Discrete Return LiDAR in Forested Environments," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol. 45, no. 4, pp. 1029-1038, 2007/04 2007.
- [44] A. S. Maguya, V. Junttila, and T. Kauranne, "Adaptive algorithm for large scale dtm interpolation from lidar data for forestry applications in steep forested terrain," *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*, vol. 85, pp. 74-83, 2013.
- [45] J. Zhang and X. Lin, "Filtering airborne LiDAR data by embedding smoothness-constrained segmentation in progressive TIN densification," *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 81, pp. 44-59, 2013/07 2013.
- [46] Q. Chen, H. Wang, H. Zhang, M. Sun, and X. Liu, "A point cloud filtering approach to generating DTMs for steep mountainous areas and adjacent residential areas," *Remote Sensing*, vol. 8, no. 1, p. 71, 2016.
- [47] M. Salah and J. Trinder, "Support vector machines based filtering of lidar data: a grid based method," 2010.
- [48] F. Samadzadegan, B. Bigdeli, and P. Ramzi, "A multiple classifier system for classification of LIDAR remote sensing data using multi-class SVM," in *International Workshop on Multiple Classifier Systems*, 2010: Springer, pp. 254-263.
- [49] A. Mohammadzade, M. Hajeb, and A. Mottakan, "Optimization of filtering algorithm result with used mathematical Morphology of LIDAR data" no. Vol.2, No.2, Summer 2014, pp. 75-90, 1393.
- [50] X. Hu, L. Ye, S. Pang, and J. Shan, "Semi-global filtering of airborne LiDAR data for fast extraction of digital terrain models," *Remote Sensing*, vol. 7, no. 8, pp. 10996-11015, 2015.
- [51] H. S. Lee and N. H. Younan, "DTM extraction of Lidar returns via adaptive processing," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol. 41, no. 9, pp. 2063-2069, 2003/09 2003.
- [52] N. Pfeifer, T. Reiter, C. Briese, and W. Rieger, "Interpolation of high quality ground models from laser scanner data in forested areas," *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 32, no. 3/W14, pp. 31-36, 1999.
- [53] D. Tóvári and N. Pfeifer, "Segmentation based robust interpolation-a new approach to laser data filtering," *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. 36, no. 3/19, pp. 79-84, 2005.
- [54] M. Bartels and P. Aplin, "ISPRS commission VII symposium: remote sensing: from pixels to processes," *The Photogrammetric Record*, vol. 21, no. 116, pp. 407-410, 2006/12 2006.
- [55] Y. Bao, C. Cao, H. Zhang, and Q. He, "CLASSIFICATION OF LIDAR POINT CLOUD AND GENERATION OF DTM FROM LIDAR HEIGHT AND INTENSITY DATA IN FORESTED AREA," *Sci. China Ser. E-Technol. Sci.*, vol. 51, no. S2, pp. 176-187, 2008/12 2008.
- [56] M. Bartels and H. Wei, "Towards DTM generation from LiDAR data in hilly terrain using wavelets," in *4th International Workshop on Pattern Recognition in Remote Sensing in conjunction with the 18th International Conference on Pattern Recognition*, 2006, vol. 1, pp. 33-36.
- [57] N. Chehata, L. Guo, and C. Mallet, "Airborne lidar feature selection for urban classification using random forests," *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. 38, no. Part 3, p. W8, 2009.
- [58] A. Baligh Jahromi, M. J. V. Zoej, A. Mohammadzadeh, and S. Sadeghian, "A Novel Filtering Algorithm for Bare-Earth Extraction From Airborne Laser Scanning Data Using an Artificial Neural Network," *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, vol. 4, no. 4, pp. 836-843, 2011/12 2011.
- [59] J. Niemeyer, F. Rottensteiner, and U. Soergel, "Conditional random fields for lidar point cloud classification in complex urban areas," *ISPRS annals of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences*, vol. 3, pp. 263-268, 2012.
- [60] J. Zhang, X. Lin, and X. Ning, "SVM-based classification of segmented airborne LiDAR point clouds in urban areas," *Remote Sensing*, vol. 5, no. 8, pp. 3749-3775, 2013.

- [61] X. Hu and Y. Yuan, "Deep-learning-based classification for DTM extraction from ALS point cloud," *Remote sensing*, vol. 8, no. 9, p. 730, 2016.
- [62] A. Rizaldy, C. Persello, C. Gevaert, and S. Oude Elberink, "FULLY CONVOLUTIONAL NETWORKS FOR GROUND CLASSIFICATION FROM LIDAR POINT CLOUDS," *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, vol. 4, no. 2, 2018.
- [63] S. Briechle, P. Krzystek, and G. Vosselman, "SEMANTIC LABELING OF ALS POINT CLOUDS FOR TREE SPECIES MAPPING USING THE DEEP NEURAL NETWORK POINTNET+," *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. 42, no. 2/W13, 2019.
- [64] Y. Xie, J. Tian, and X. X. Zhu, "A Review of Point Cloud Semantic Segmentation," *arXiv preprint arXiv:1908.08854*, 2019.
- [65] P. Axelsson, "DEM generation from laser scanner data using adaptive TIN models," *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 33, no. 4, pp. 110-117, 2000.
- [66] F. Bretar and N. Chehata, "Terrain Modeling From Lidar Range Data in Natural Landscapes: A Predictive and Bayesian Framework," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol. 48, no. 3, pp. 1568-1578, 2010/03 2010.
- [67] D. Mongus and B. Zalik, "Computationally efficient method for the generation of a digital terrain model from airborne LiDAR data using connected operators," *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, vol. 7, no. 1, pp. 340-351, 2014.
- [68] W. Su et al., "A new hierarchical moving curve-fitting algorithm for filtering lidar data for automatic DTM generation," *International Journal of Remote Sensing*, vol. 36, no. 14, pp. 3616-3635, 2015.
- [69] S. Luo et al., "Fusion of airborne discrete-return LiDAR and hyperspectral data for land cover classification," *Remote Sensing*, vol. 8, no. 1, p. 3, 2015.
- [70] Y. M. Kim, Y. D. Eo, A. J. Chang, and Y. I. Kim, "Generation of a DTM and building detection based on an MPF through integrating airborne lidar data and aerial images," *International Journal of Remote Sensing*, vol. 34, no. 8, pp. 2947-2968, 2013/04/20 2013.
- [71] Y. Kim and Y. Kim, "Improved classification accuracy based on the output-level fusion of high-resolution satellite images and airborne LiDAR data in urban area," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 11, no. 3, pp. 636-640, 2014.
- [72] M. Debella-Gilo, "Bare-earth extraction and DTM generation from photogrammetric point clouds including the use of an existing lower-resolution DTM," *International Journal of Remote Sensing*, vol. 37, no. 13, pp. 3104-3124, 2016.
- [73] V. Saeidi, B. Pradhan, M. O. Idrees, and Z. A. Latif, "Fusion of airborne lidar with multispectral spot 5 image for enhancement of feature extraction using Dempster-Shafer theory," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 52, no. 10, pp. 6017-6025, 2014.
- [74] C. Gevaert, C. Persello, F. Nex, and G. Vosselman, "A deep learning approach to DTM extraction from imagery using rule-based training labels," *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 142, pp. 106-123, 2018.