

ارزیابی دقت تصاویر پهپاد در آشکارسازی تاج درختان در ساختارهای متفاوت یک جنگل شهری

زهرا عزیزی^۱

مژده میرکی^۲

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۱۲/۰۵

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۳/۱۶

چکیده

آماربرداری و نقشه برداری از درختان شهری به منظور برنامه ریزی و کمک به طراحی استراتژی های بهینه سازی خدمات اکوسیستم شهری و سازگاری با تغییرات اقلیمی بسیار ضروری است. پیشرفت های اخیر در فناوری سیستم های هوایی بدون سرنشین، فناوری انعطاف پذیر مکانی و زمانی داده های سه بعدی با وضوح بالا را تسهیل کرده است. روش های رایج آشکارسازی پایه های درختی بر اساس داده های ماهواره ای با وضوح بسیار بالا یا داده های اسکن لیزر هوایی است. با این حال، داده های ماهواره ای اغلب با مشکل مناسب نبودن در مقیاس تک درخت و محدودیت ابرها مواجه است و داده های لیزر اسکن هوایی نیز از هزینه های نسبتاً بالایی برخوردار هستند. بنابراین در مطالعه حاضر با هدف آشکارسازی تاج درختان، از دو الگوریتم رشد ناحیه ای و حوضه آبخیز معکوس در یک جنگل شهری با ساختارهای متفاوت از مدل ارتفاع تاج به دست آمده از ساختار حرکت مبنا استفاده شد. به همین منظور تصویربرداری و آماربرداری زمینی درختان در تابستان ۱۳۹۸ در جنگل شهری باغ فاتح واقع در شهرستان کرج انجام شد. پس از پردازش تصاویر و تولید مدل ارتفاع تاج، آشکارسازی درختان در ۵ اندازه پیکسل ۲۵، ۵۰، ۷۵، ۱۰۰ و ۱۲۵ سانتیمتر و در سه ساختار ناهمگن متراکم، ناهمگن پراکنده و همگن متراکم انجام شد. نتایج نشان داد که دو الگوریتم رشد ناحیه ای و حوضه آبخیز معکوس در ساختار همگن متراکم بیشترین عملکرد را دارد. همچنین الگوریتم رشد ناحیه ای با میزان صحت کلی ۸۸ درصد در سایت ۳ (ساختار همگن متراکم) با اندازه پیکسل ۷۵ سانتیمتر بهترین نتیجه را در آشکارسازی درختان ارائه داد. در کل نتایج این تحقیق نشان داد که آشکارسازی پایه های درختی با استفاده از مدل ارتفاع تاج به دست آمده از تصاویر پهپاد در سایت های همگن دارای دقت بالایی است، در حالی که در سایت های ناهمگن و متراکم از کارایی بالایی برخوردار نبود.

واژه های کلیدی: جنگل شهری، پهپاد، الگوریتم حوضه آبخیز، الگوریتم رشد ناحیه ای، آشکارسازی تک پایه های درختی

۱- استادیار گروه سنجش از دور و GIS، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات (نویسنده مسئول) zazizi@srbiau.ac.ir

۲- عضو باشگاه پژوهشگران جوان، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد سنندج، سنندج، ایران m.miraki@modares.ac.ir

۱- مقدمه

درختان از نظر کاهش اثر جزیره حرارتی شهری، حفظ تعادل زیست محیطی، محافظت از تنوع زیستی و ارتقاء کیفیت زندگی مردم نقش مهمی در محیط‌های شهری بازی می‌کنند. آماربرداری و نقشه‌برداری از درختان شهری به صورت دقیق برای کمک به برنامه‌ریزان در طراحی استراتژی‌های بهینه‌سازی خدمات اکوسیستم شهری و سازگاری با تغییرات اقلیمی بسیار ضروری است (Feng et al. 2015). امروزه فناوری‌های پیشرفته سنجنش‌ازدور به دلیل توانایی آن‌ها در استخراج اطلاعات دقیق و قوی از ویژگی‌های سطح زمین می‌توانند جایگزین معقولی برای تعیین پارامترهای توده در نظر گرفته شوند (Yilmaz and Gungor 2019). استفاده از فناوری سنجنش‌ازدور برای ترسیم گونه‌های درختی به دلیل قابلیت آن در مشاهده مناطق وسیع و در دسترس و همچنین امکان دستیابی به داده‌ها با اطلاعات مکانی و طیفی به عنوان روشی راحت‌تر توسط محققان مورد بررسی قرار گرفته است (Nordin, Abd Latif, and Omar 2019). روش‌های مختلف سنجنش‌ازدور، از ابزارهای تصویربرداری نوری ساده و پیچیده و سیستم‌های کوچک مانند وسایل نقلیه بدون سرنشین^۱ تا سیستم‌های ماهواره‌ای در سطح جهانی مورد استفاده قرار می‌گیرند (Asner et al. 2018).

پیشرفت در زمینه‌های فناوری و پردازش داده‌های سیستم‌های بدون سرنشین هوایی که به اختصار پهپاد نامیده می‌شوند، افق سنجنش‌ازدور جنگلداری شهری را گسترش داده و دستیابی به تصاویر با وضوح بالا و داده‌های سه‌بعدی را آسان‌تر و مقرون به صرفه‌تر کرده است. در واقع، می‌توان از پهپادها با هزینه‌های معقول، دربرآورد موجودی و تجزیه و تحلیل داده‌ها به صورت دوره‌ای استفاده کرد. این وسیله‌های سبک وزن می‌توانند دور از سطح زمین و در زیرسطح ابرها پرواز کنند. پهپادها با در اختیار داشتن طیف گسترده‌ای از سنجنده‌ها، به کاربران این امکان را می‌دهند تا وضوح مکانی را تعریف کرده و از این طریق قابلیت‌های

زیادی را برای مدیران منابع طبیعی ارائه دهند. در یک دهه گذشته، مطالعات بر روی استفاده از مدل ارتفاع تاج^۲ به دست آمده از پهپاد متمرکز شده است، که پتانسیل بالایی را در تشخیص قله‌های درختی^۳، مشخص شدن تاج‌های درختان و متعاقباً تخمین پارامترهای مورفولوژی تاج مانند ارتفاع و قطر نشان دهد (Mohan et al. 2017). در حال حاضر دو روش برای بازسازی مدل ارتفاع تاج وجود دارد. روش اول با استفاده از سنجنده‌های لایدار^۴ قابل حمل توسط پهپاد سبک وزن با دقت بالا که کمیاب و گران‌قیمت هستند و روش دوم که از دوربین‌های رنگی واقعی به عنوان سنجنده و رویکرد ساختار حرکت مبنا^۵ در تبدیل تصاویر دوبعدی به سه‌بعدی بهره می‌گیرند (Thiel and Schumliuss 2017).

بنابراین یک پهپاد کم‌هزینه مجهز به یک دوربین رقومی برای دستیابی به مدل ارتفاع تاج کافی است. اما از آنجا که هر ویژگی باید در بین تصاویر مختلف قابل مشاهده باشد، احتمال ثبت عناصر نزدیک به زمین در جنگل‌ها به دلیل بسته بودن تاج پوشش و وجود چندین لایه پوشش گیاهی مسدود می‌شود. به همین دلیل، لایدار با توجه به کامل بودن مدل سه‌بعدی بازسازی شده در جنگل‌ها، دقیق‌تر از ساختار حرکت مبنا است. با این حال، با توجه به ماهیت مقرون به صرفه‌تر ساختار حرکت مبنا مبتنی بر پهپاد، همراه با سهولت کاربرد آن، همچنان یک انتخاب محبوب محسوب می‌شود. علاوه بر این، مطالعات مختلف پتانسیل آن را برای کاربردهای جنگلی، از جمله رشد، موجودی، آشکارسازی و تشخیص تک‌پایه‌های درختی^۶ و تشخیص ویژگی‌های ساختاری توده (Nevalainen, Nilton, and Antonio 2017; Frey et al. 2018; Guerra-Hernández et al. 2018) نشان می‌دهد.

در مدل ارتفاع تاج به دست آمده از ساختار حرکت مبنا مقادیر هر سلول نشان‌دهنده اختلاف ارتفاع بین سطح

2- Canopy Height Model (CHM)

3- Treetop

4- LiDAR

5- Structure From Motion

6- Individual Tree Crown Detection and Delineation

1- Unmanned Aerial Vehicle

در جنگل‌های شهری نیز (Yilmaz and Gungor 2019) در شرق ترکیه به منظور برآورد قطر تاج درختان سوزنی‌برگ با استفاده از داده‌های ابر نقطه فتوگرامتری پهپاد از شش الگوریتم قطعه‌بندی متفاوت استفاده کردند. نتایج این تحقیق نشان داد که الگوریتم مبتنی بر برازش چند جمله‌ای بهتر از سایر الگوریتم‌ها عمل کرد، به نحوی که اندازه قطر تاج را با خطای ۰/۶۹ تا ۰/۹۲ متر برآورد کرد. (Dong et al. 2020) با استفاده از مدل ارتفاع تاج به دست آمده از داده‌های لایدار به آشکارسازی درختان در یک جنگل چند اشکوبه پرداختند. نتایج حاصله نشان داد که با استفاده از روش آشکارسازی چند لایه درختان و تقسیم‌بندی مبتنی بر نمودار، درختان اشکوب فوقانی با صحت ۹۱ درصد و درختان زیراشکوب با صحت ۷۸ درصد تشخیص داده شدند.

در داخل کشور نیز (Miraki et al. 2021) در جنگل‌های پهن‌برگ آمیخته واقع در پارک جنگلی نور به منظور آشکارسازی تاج پایه‌های درختی از سه الگوریتم رشد ناحیه‌ای، حوضه آبخیز معکوس و بیشینه محلی بر مدل ارتفاع تاج به دست آمده از ساختار حرکت مبنا مبتنی بر پهپاد استفاده کردند. نتایج نشان داد که الگوریتم رشد ناحیه‌ای با صحت ۰/۷۹ در یک سایت جنگلی با تراکم کم، بهترین نتیجه را ارائه داد.

همچنین (Salehi et al. 2016) در پارک جنگلی یاسوج با اعمال الگوریتم‌های حداکثر محلی، تطبیق الگو UltraCam-D تقسیم‌بندی حوضه بر روی تصاویر دیجیتال تعیین خودکار تاج درختان را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که الگوریتم تطبیق الگو در تشخیص تاج درختان نسبت به دیگر الگوریتم‌های مورد استفاده از صحت بیشتری برخوردار بود.

با توجه به پیشینه تحقیق می‌توان نتیجه گرفت که اکثر تحقیقات انجام شده با دقت زیاد، با استفاده از داده‌های لایدار صورت گرفته است. همچنین مطالعات انجام شده با استفاده از ابر نقطه حاصل از فتوگرامتری پهپاد بیشتر در جنگل‌های طبیعی صورت گرفته است و مطالعات بسیار

بالای پوشش گیاهی و سطح زمین، یعنی ارتفاع تاج پوشش است (Vauhkonen et al. 2012) و پتانسیل آن را در تشخیص قله‌های ارتفاعی درختی، تعیین تاج درختان و متعاقباً برآورد پارامترهای مورفولوژی تاج ارائه می‌دهد (Mohan et al. 2017). برای تعیین تاج درختان از مدل ارتفاع تاج از الگوریتم‌های مختلفی مانند پیرو دره^۱، رشد ناحیه‌ای^۲ و قطعه‌بندی حوضه آبخیز معکوس^۳ استفاده می‌شود (Ke and Quackenbush 2011). هنگامی که این الگوریتم‌ها بر روی مدل ارتفاع تاج به کار گرفته می‌شوند، موجب آشکارسازی و تعیین تاج درختان می‌شوند. در همین راستا (Goldbergs et al. 2018) مطالعه‌ای در رویشگاه ساوانای استرالیا به منظور آشکارسازی پایه‌های درختی گونه اکالیپتوس از ابر نقطه حاصل از ساختار حرکت مبنا به دست آمده از تصاویر پهپاد در مقایسه با داده‌های لایدار انجام دادند.

در این مطالعه از الگوریتم‌های بیشینه محلی و قطعه‌بندی حوضه آبخیز بر روی مدل رقومی تاج استفاده کردند. نتایج نشان داد که ۷۰ درصد درختان چیره و چیره‌نما و کمتر از ۳۵ درصد درختان مغلوب در استفاده از مدل رقومی تاج مبتنی بر ساختار حرکت شناسایی شدند (Dalponte, Frizzera, and Gianelle 2019) برای تعیین تاج پایه‌های درختان کاج و بلوط از الگوریتم رشد ناحیه‌ای با استفاده از باند مادون قرمز نزدیک تصاویر فرایفی استفاده کردند. نتایج این تحقیق با صحت کلی ۸۸ گزارش شد.

(Yin and Wang 2019) از ترکیب الگوریتم‌های اندازه پنجره متغیر و قطعه‌بندی حوضه آبخیز در رویشگاه‌های مانگرو چین به منظور آشکارسازی درختان مانگرو با استفاده از داده‌های لایدار و به منظور تأثیر اندازه تفکیک مناسب بر آشکارسازی پایه‌های درختی از مدل رقومی تاج در چهار اندازه تفکیک متفاوت، استفاده کردند. نتایج نشان داد که با استفاده از این ترکیب، صحت آشکارسازی درختی تا ۴۶ درصد ارتقاء پیدا کرد.

1- Valley-Following

2- (RG) Region-Growing

3- (IWS) Inverse Watershed Segmentation

از تصویربرداری پهپاد است. نوآوری ویژه این تحقیق ارزیابی دقت روش به کار گرفته شده در ساختارهای متفاوت جنگل‌های شهری می‌باشد.

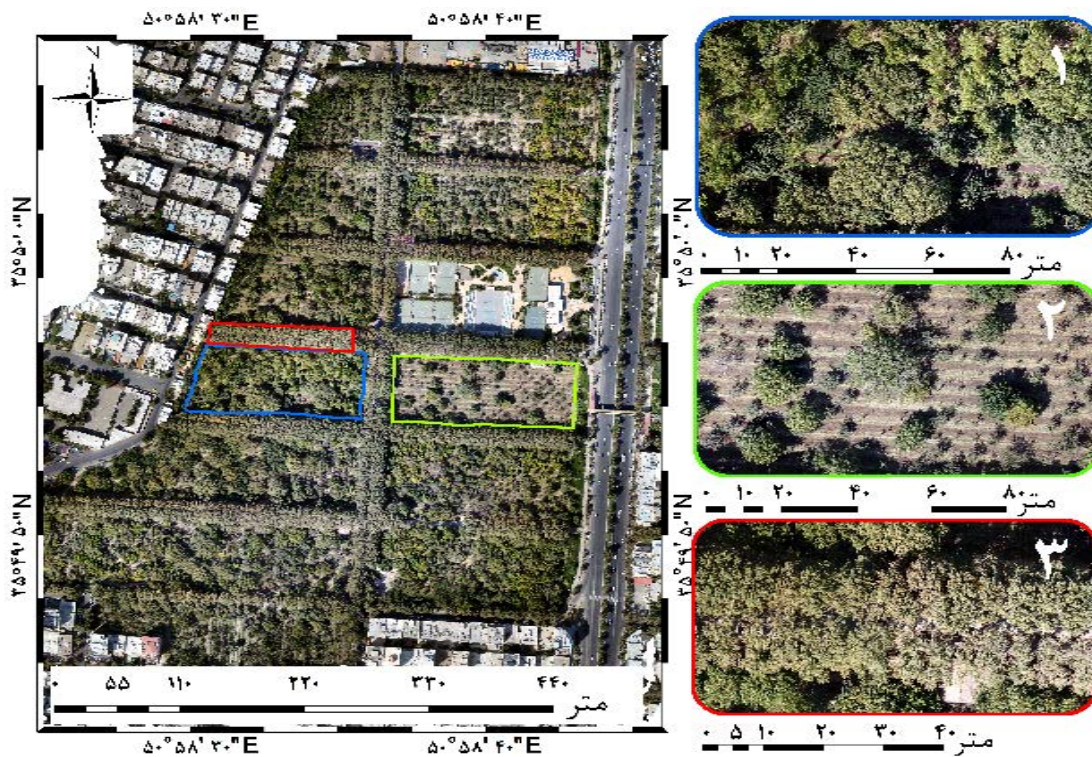
۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

تحقیق حاضر در باغ فاتح واقع در شهرستان کرج، استان البرز انجام شد. محدوده مورد مطالعه دارای مساحت حدود ۲۴ هکتار و در ارتفاع ۱۳۳۰ متر از سطح دریا قرار دارد. آب و هوای منطقه نیمه‌خشک با زمستان‌های نسبتاً سرد و تابستان‌های نسبتاً گرم، دارای متوسط بارندگی و دمای سالانه به ترتیب ۲۴۷/۳ میلیمتر و ۱۴/۴ درجه سانتیگراد است. پوشش غالب منطقه درختان پهن‌برگ خزان‌کننده و چندین گونه درخت سوزنی‌برگ همیشه سبز می‌باشد (نگاره ۱).

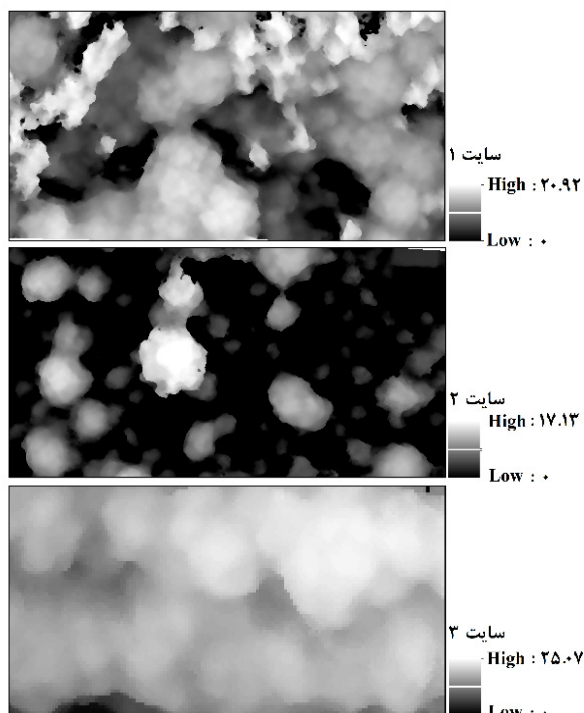
کمی در جنگل‌های شهری امکان آشکارسازی و شمارش درختان را از مدل‌های ارتفاع تاج که از ابر نقطه متراکم حاصل شده‌اند، بررسی کرده‌اند. زیرا در جنگل‌های شهری برخلاف جنگل‌های طبیعی که دارای تاج پوشش تقریباً مشابه هستند، درختان به صورت جداگانه یا گروه‌هایی از درختان با ارتفاع‌های متغیر و قطر تاج و قله‌های ارتفاعی چندگانه هستند (Yilmaz and Gungor 2019). همچنین جنگل‌های شهری از ترکیب گونه‌های مختلف با سنین مختلف درختان با اشکال متنوع تشکیل شده‌اند.

درختان پهن‌برگ و سوزنی‌برگ اغلب با یکدیگر ترکیب شده و این پیچیدگی‌ها آماربرداری در جنگل شهری را بسیار دشوار می‌کند (Zhang et al. 2015). بنابراین هدف این تحقیق مقایسه و بررسی عملکرد روش‌های حوضه آبخیز معکوس و رشد ناحیه‌ای در آشکارسازی تاج درختان یک جنگل شهری با استفاده از مدل ارتفاع تاج به دست آمده



نگاره ۱: سمت چپ: منطقه مورد مطالعه (باغ فاتح در شهرستان کرج). سمت راست: (۱) سایت ناهمگن متراکم. (۲) سایت ناهمگن پراکنده. (۳) سایت همگن متراکم

al. 2015) انجام شد. پس از مرتب کردن تصاویر در کنار یکدیگر ابرنقاط متراکم با استفاده از الگوریتم ساختار حرکت مبنا تولید شد و نقاط مربوط به زمین و عوارض ارتفاعی که در این مطالعه شامل درختان است با استفاده از فیلتر ابرنقاط تفکیک گردید و برای تهیه مدل ارتفاع تاج مورد استفاده قرار گرفت (نگاره ۲).



نگاره ۲: مدل ارتفاع تاج در سایت‌های مختلف

مدل ارتفاع تاج از تفاضل مدل رقومی زمین^۲ و مدل رقومی سطح^۳ به دست آمد. مدل رقومی سطح یک لایه رستری است که هر پیکسل آن ارتفاع از سطح دریا را نشان می‌دهد. مدل رقومی زمین نیز یک لایه رستری است که عوارض ارتفاعی آن حذف گردیده و ارزش هر پیکسل معادل ارتفاع زمین در آن پیکسل می‌باشد (Brovkina et al. 2018). پس از تولید مدل ارتفاع تاج، به منظور بررسی عملکرد الگوریتم‌های آشکارسازی تاج درختان در اندازه پیکسل‌های مختلف،

2- Digital Terrain Model

3- Digital Surface Model

۲-۲- آماربرداری و برداشت داده‌های زمینی

به منظور جمع‌آوری داده‌های زمینی در منطقه مورد مطالعه، سه سایت با سه ساختار متفاوت انتخاب گردید. سایت اول یک توده متراکم با ساختار ناهمگن و ناهمسال که از گونه‌های زبان گنجشگ (*Fraxinus excelsior*)، صنوبر (*Populus deltoides*)، افرای سیاه (*Acer negundo*)، گردو (*Juglans regia*)، اوجا (*Ulmus minor*)، گلابی (*Pyrus communis*) و کاج الدار (*Pinus edulis*) تشکیل شده است.

سایت دوم یک توده پراکنده با ساختار ناهمگن و ناهمسال متشکل از گونه‌های آلبالو (*Prunus cerasus*)، صنوبر (*Populus deltoides*)، گردو (*Juglans regia*) و سرو نقره‌ای (*Cupressus arizonica*)، سایت سوم یک توده متراکم با ساختار همگن و همسال که به صورت خالص از گونه چنار (*Platanus orientalis*) تشکیل شده است.

در هر سایت آماربرداری به صورت صد درصد انجام شد و برای تمامی درختان در هر قطر و ارتفاعی برداشت زمینی انجام شد که در طی آن نوع گونه و قطر تاج مشخص گردید و موقعیت هر درخت به دلیل محدودیت دریافت سیگنال برای استفاده از سیستم تعیین موقعیت جهانی (GPS) در زیر تاج پوشش با روش آزیموت - فاصله ثبت گردید.

۳-۲- پردازش و برداشت تصاویر پهپاد

در این مطالعه برای برداشت تصاویر هوایی از پهپاد مدل Phantom 4 Pro با قابلیت ثبت تصاویر رنگی واقعی با فرمت JPG و کیفیت ۲۰ مگاپیکسل استفاده شد. ارتفاع پرواز ۱۲۷ متر، همپوشانی طولی و عرضی ۸۰ درصد و سرعت پرواز ۸ متر بر ثانیه در نظر گرفته شد. تصاویر برداری بعد از مشخص کردن نقاط کنترل زمینی^۱ در تابستان ۱۳۹۸ انجام شد.

پردازش تصاویر به منظور تولید ابرنقطه متراکم و موزاییک تصاویر در نرم‌افزار Agisoft PhotoScan v1.27 مطابق منابع (Klein Hentz and Strager 2018; Lisein et)

1- Ground Control Points

۵ اندازه پیکسل ۲۵، ۵۰، ۷۵، ۱۰۰ و ۱۲۵ در نرم افزار Arcmap10.3 با استفاده از عملیات resampling تولید شد.

۲-۵-۱- الگوریتم رشد ناحیه‌ای
الگوریتم رشد ناحیه‌ای یک روش تقسیم‌بندی تصویر است که برای جدا کردن بخش‌ها و شناسایی اشیاء درون یک تصویر استفاده می‌شود. در این الگوریتم بعضی از پیکسل‌ها به عنوان پیکسل‌های شروع اولیه یا پیکسل‌های بذر^۴ انتخاب شده و با شروع از این پیکسل‌ها، پیکسل‌های همسایه یک بار بررسی و اگر به اندازه کافی شبیه پیکسل بذر باشند، به منطقه در حال رشد اضافه می‌شوند و تا هنگامی که یک مرز قابل توجه پیدا شود، این روند ادامه پیدا خواهد کرد. بنابراین در این روش، کاربران باید برای جلوگیری از رشد نادرست نواحی، پیکسل بذر و معیارهای مربوط به رشد را تنظیم کنند (Dalponte, Frizzera, and Gianelle 2019).

در این مطالعه برای انتخاب پیکسل بذر از الگوریتم پیشینه محلی استفاده شد یعنی پیکسلی که دارای بیشترین ارزش ارتفاعی در تاج هر پایه درختی می‌باشد به عنوان پیکسل بذر انتخاب می‌گردد.

برای انجام این الگوریتم، اندازه پنجره جستجو برای یافتن پیکسل‌های بذر در اندازه‌های ۳، ۵، ۷ و ۹ و آستانه رشد برابر ۰/۵ برای هر اندازه تفکیک در نظر گرفته شد. تک پایه‌های درختی برای اندازه تفکیک‌های مختلف بر روی مدل ارتفاع تاج در سایت‌های مختلف در پکیج itcSegment در نرم افزار R ترسیم شد (Dalponte 2018).

۲-۵-۲- الگوریتم حوضه آبخیز معکوس

الگوریتم حوضه آبخیز معکوس به نوعی شبیه به الگوریتم رشد ناحیه‌ای می‌باشد با این تفاوت که به جای پیشینه محلی از کمینه محلی^۵ به عنوان پیکسل شروع اولیه یا پیکسل بذر استفاده خواهد شد. در این مطالعه برای اجرای حوضه آبخیز معکوس به دلیل توانایی تعیین تاج پایه‌های درختی به ویژه در تاج پوشش‌های نسبتاً بسته از نرم افزار ArcGIS10.3.1 استفاده شد. به این صورت که در ابتدا، مدل ارتفاعی تاج معکوس گردید، که در پی آن بالاترین نقطه

۴-۲- زمین مرجع کردن تصاویر

برای زمین مرجع کردن تصاویر از ۱۵ نقطه کنترل با مقدار خطای کل برابر ۵/۶ سانتیمتر و ۵ نقطه چک با مقدار خطای کل برابر ۲/۹ سانتیمتر در کل منطقه مورد مطالعه استفاده شد. مختصات هر کدام از این نقاط با استفاده از GPS-RTK مدل GintecG10 برداشت شد.

برای مشخص کردن موقعیت نقاط کنترل زمینی از اسپری رنگی بر روی پیاده‌روها و جاده‌های اطراف باغ فاتح در نقاط قابل دید از بالای تاج پوشش استفاده شد. سپس، بعد از مرحله مرتب کردن تصاویر کنار هم، زمین مرجع کردن تصاویر در نرم افزار Agisoft PhotoScan v1.27 با استفاده از الگوریتم‌های بینایی کامپیوتر، به صورتی که نقطه‌های مشترک را در تصاویر جستجو کرده و سپس نقاط مشترک را با هم متناظر می‌کند، انجام گرفت.

۵-۲- آشکارسازی تاج درختان

الگوریتم‌های آشکارسازی پایه‌های درختی معمولاً شامل دو قسمت می‌باشد و به آشکارسازی پایه‌های درختی که به تعیین موقعیت درخت می‌پردازد و تعیین تاج درخت که به شناسایی تاج هر پایه درختی اشاره دارد، تقسیم می‌شود (Harikumar, Bovolo, and Bruzzone 2019). الگوریتم‌های پیشینه محلی^۱، تطبیق الگو^۲ و تصویر باینری^۳ از روش‌های آشکارسازی پایه‌های درختی هستند که بر روی مدل رقومی تاج اجرا می‌شوند و برای تعیین تاج درخت نیز از الگوریتم‌هایی چون پیرو دره، قطعه‌بندی حوضه آبخیز و رشد ناحیه‌ای استفاده می‌شود (Huang et al. 2018). در این مطالعه از دو الگوریتم رشد ناحیه‌ای و قطعه‌بندی حوضه آبخیز معکوس استفاده گردید.

1- Local Maxima

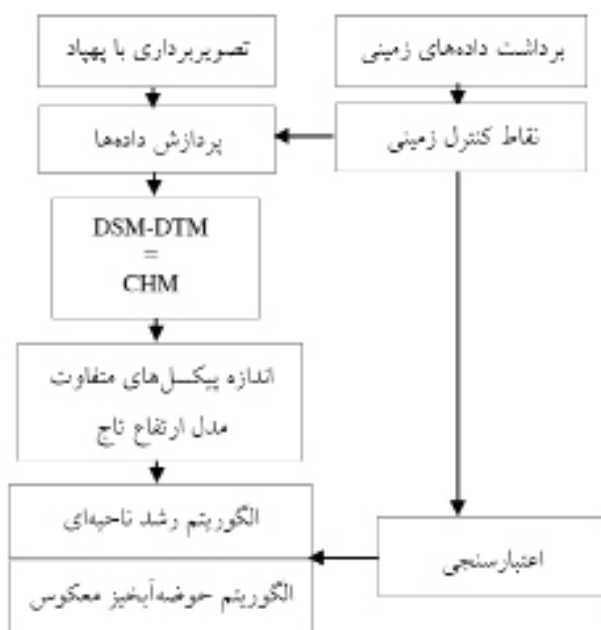
2- Template Matching

3- Image Binarization

4- Seed Pixel

5- Local Minima

نتیجه هر سه رابطه در بازه بین صفر و یک قرار می‌گیرد. هر چه مقدار r و p بالاتر، مقدار F یا صحت کلی نیز بالاتر خواهد بود. مقدار F برابر یک یعنی تاج کلیه درختان به صورت کامل آشکارسازی شده است. مراحل اجرای فرآیند تحقیق در نگاره ۳ نشان داده شده است.



نگاره ۳: مراحل انجام تحقیق

۳- نتایج

جدول ۱ نتایج آشکارسازی تاج درختان در سایت‌های مختلف برای دو الگوریتم حوضه آبخیز و رشد ناحیه‌ای را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود بالاترین میزان فراخوانی در هر سه سایت برای الگوریتم حوضه آبخیز در اندازه پیکسل ۲۵ سانتیمتر و بالاترین میزان صحت در اندازه پیکسل ۱۰۰ سانتیمتر مشاهده شد. بالاترین مقدار صحت کلی در سایت ۱ و ۳ در اندازه پیکسل ۱۰۰ سانتیمتر و در سایت ۲ در اندازه پیکسل ۷۵ سانتیمتر مشاهده شد.

در مورد الگوریتم رشد ناحیه‌ای نیز چنانچه در جدول ۱ نشان داده شده است همانند الگوریتم حوضه آبخیز معکوس، با افزایش اندازه پیکسل تا یک حد مشخص مقدار فراخوانی

ارتفاعی درختان برعکس شده و شاخه‌ها و تاج‌های هر پایه درختی تبدیل به یک دریاچه می‌شوند. سپس با استفاده از دستور ایجاد حوضه آبخیز و مطابق با روش ارائه شده در منبع (Panagiotidis et al. 2016)، تاج هر پایه درختی به عنوان یک حوضه آبخیز ترسیم شد.

۶-۲- ارزیابی صحت

. بررسی کمی نتایج آشکارسازی با استفاده از معیارهای دقت^۱، فراخوانی^۲ و صحت کلی یا معیار F ^۳ مورد ارزیابی قرار گرفت. در روش‌های مربوط به آشکارسازی تاج درختان هر قطعه یا پولیگون به عنوان یک درخت در نظر گرفته می‌شود.

نتایج آشکارسازی به سه دسته تقسیم می‌شود: قطعه‌بندی صحیح^۴ که هر قطعه کاملاً به یک پایه درختی اشاره می‌کند. بیش‌قطعه‌بندی^۵ که یک قطعه بخشی از یک پایه درخت حقیقی است و کم‌قطعه‌بندی^۶ که چندین درخت حقیقی در یک قطعه قرار می‌گیرند.

با توجه به این تعاریف قطعه‌بندی صحیح، بیش‌قطعه‌بندی و کم‌قطعه‌بندی به ترتیب با FP, TP و FN مطابقت دارند (Yilmaz and Gungor 2019; Yin and Wang 2016) ارزیابی صحت با استفاده از فرمول‌های زیر محاسبه شد:

$$r = \frac{n_{TP}}{n_{TP} + n_{FN}}$$

$$p = \frac{n_{TP}}{n_{TP} + n_{FP}}$$

$$F = \frac{2rp}{r + p}$$

- 1- Precision
- 2- Recall
- 3- F-Measure
- 4- Correct Segmentation
- 5- Over-Segmentation
- 6- Under-Segmentation

جدول ۱: نتایج آشکارسازی تاج درختان برای دو الگوریتم مورد استفاده

سایت	الگوریتم حوضه آبخیز معکوس				الگوریتم رشد ناحیه‌ای			
	اندازه پیکسل	فراخوانی	دقت	صحت کلی	اندازه پیکسل	فراخوانی	دقت	صحت کلی
سایت ۱	۲۵	۰/۴۵	۰/۱۳	۰/۲۰	۲۵	۰/۴۱	۰/۳۴	۰/۳۷
	۵۰	۰/۴۴	۰/۱۸	۰/۲۵	۵۰	۰/۴۱	۰/۵۲	۰/۴۶
	۷۵	۰/۴۴	۰/۲۹	۰/۳۵	۷۵	۰/۴۳	۰/۶۵	۰/۵۲
	۱۰۰	۰/۴۱	۰/۵۳	۰/۴۶	۱۰۰	۰/۲۵	۰/۵۶	۰/۳۴
	۱۲۵	۰/۳۷	۰/۵۲	۰/۴۳	۱۲۵	۰/۲۱	۰/۵۵	۰/۳۰
سایت ۲	۲۵	۰/۷۵	۰/۱۶	۰/۲۷	۲۵	۰/۵۴	۰/۵۲	۰/۵۳
	۵۰	۰/۷۱	۰/۵۲	۰/۶۰	۵۰	۰/۵۷	۰/۹۱	۰/۷۰
	۷۵	۰/۷۰	۰/۷۰	۰/۷۰	۷۵	۰/۵۸	۰/۹۶	۰/۷۲
	۱۰۰	۰/۵۵	۰/۸۶	۰/۶۷	۱۰۰	۰/۵۹	۰/۹۶	۰/۷۳
	۱۲۵	۰/۵۲	۰/۸۶	۰/۶۵	۱۲۵	۰/۵۵	۰/۹۶	۰/۷۰
سایت ۳	۲۵	۰/۸۸	۰/۱۳	۰/۲۳	۲۵	۰/۹۵	۰/۴۵	۰/۶۱
	۵۰	۰/۸۶	۰/۴۱	۰/۵۶	۵۰	۰/۸۶	۰/۷۷	۰/۸۱
	۷۵	۰/۷۹	۰/۵۹	۰/۶۸	۷۵	۰/۸۰	۰/۹۷	۰/۸۸
	۱۰۰	۰/۸۳	۰/۸۱	۰/۸۲	۱۰۰	۰/۷۴	۱	۰/۸۵
	۱۲۵	۰/۸۰	۰/۷۷	۰/۷۹	۱۲۵	۰/۶۵	۱	۰/۷۸

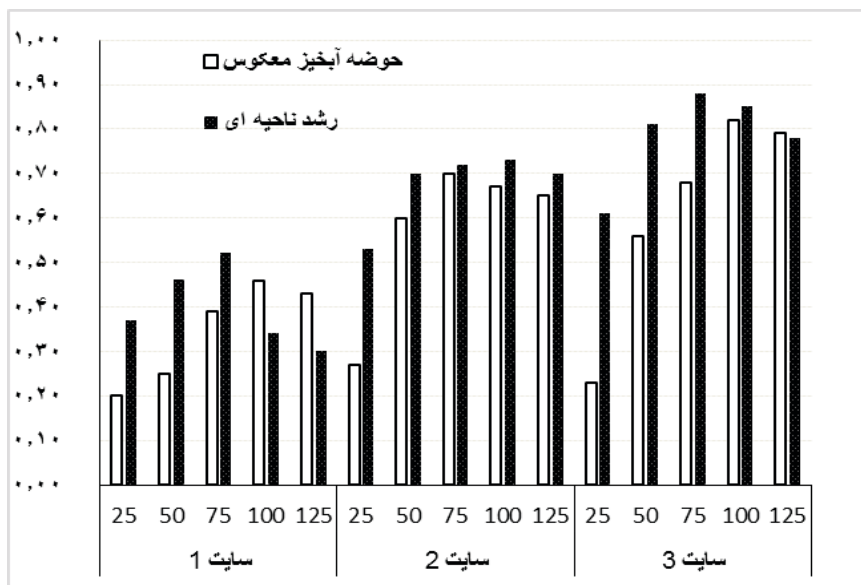


افزایش و بیشتر از آن مقدار کاهش پیدا می‌کند. بیشترین مقدار صحت کلی در سایت ۱ در اندازه پیکسل ۷۵ سانتی-متر مشاهده شد، در سایت ۲ بیشترین مقدار صحت کلی در اندازه پیکسل ۱۰۰ سانتیمتر و در سایت ۳ در اندازه پیکسل ۷۵ سانتیمتر مشاهده شد.

بالاترین عملکرد هر دو الگوریتم در سایت ۳ و برای الگوریتم رشد ناحیه‌ای در اندازه تفکیک ۷۵ سانتیمتر و برای الگوریتم حوضه آبخیز معکوس در اندازه تفکیک ۱۰۰ سانتیمتر مشاهده شد (نگاره ۴).

در مقایسه الگوریتم حوضه آبخیز معکوس و رشد ناحیه‌ای، حداکثر کارایی دو الگوریتم در هر سایت متفاوت بود به نحوی که در سایت ۱ با ساختار ناهمگن و متراکم، بالاترین مقدار صحت کلی برای رشد ناحیه‌ای در اندازه پیکسل ۷۵ سانتیمتر و برای حوضه آبخیز معکوس در ۱۰۰ سانتیمتر مشاهده شد. در دو سایت ۲ و ۳ نیز با ساختار ناهمگن پراکنده و همگن متراکم عملکرد دو الگوریتم با افزایش اندازه پیکسل افزایش پیدا کردند (نگاره ۵).

نگاره ۴: آشکارسازی تاج درختان در سایت ۳ با الگوریتم الف: رشد ناحیه‌ای و ب: حوضه آبخیز معکوس



نگاره ۵: مقایسه صحت الگوریتم رشد ناحیه ای و حوضه آبخیز معکوس

۴- بحث

ساختار تاج پوشش یکی از عوامل مهمی است که بر عملکرد الگوریتم‌ها تأثیر می‌گذارد (Panagiotidis et al. 2016; Vauhkonen et al. 2012). بالاترین مقدار صحت کلی در سایت ۳ (۰/۸۸) که ساختار آن به صورت همگن متراکم و فقط از گونه چنار تشکیل شده است مشاهده شد. این را می‌توان به این واقعیت نسبت داد که توده‌هایی با گونه‌ها و اندازه‌های مشابه احتمالاً دارای ارتفاع، اندازه و شکل تاج یکنواخت هستند که این یک ویژگی مطلوب برای انواع روش‌های تجزیه و تحلیل تصاویر است (Ke and Quackenbush 2011). در یک توده نسبتاً یک اشکوبه، تقریباً همه درختان قابل شناسایی هستند، در حالی که در یک توده متراکم با چندین لایه ارتفاعی، میزان آشکارسازی به میزان قابل توجهی پایین خواهد آمد (Cochrane 2000). شکل و ترکیب متنوع گونه‌های درختی می‌تواند یک مشکل بزرگ در تشخیص درخت بوده و میزان آشکارسازی را تحت تأثیر قرار دهد (Surovy, Almeida and Ribeiro, and Panagiotidis 2018). چنین تغییراتی می‌تواند منجر به خطای بیش برآورد شود که در آن چندین نقطه بیشینه محلی به اشتباه در یک تاج شناسایی خواهند شد (Zhen, Quackenbush and Zhang 2016). عامل تأثیرگذار بعدی اندازه درختان است. در سایت ۲ که تعداد زیادی از درختان کم‌ارتفاع وجود دارند، درختان با ارتفاع کمتر از پنج متر اصلاً شناسایی

در این مطالعه عملکرد دو الگوریتم رشد ناحیه ای و حوضه آبخیز معکوس برای آشکارسازی تاج درختان در ساختارهای متفاوت، با در نظر گرفتن اندازه پیکسل‌های مختلف در یک جنگل شهری مورد بررسی قرار گرفت. اندازه پیکسل مدل ارتفاعی تاج بر مقدار صحت کلی بسیار مؤثر می‌باشد. همانطور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود، هنگامی که آشکارسازی تاج درختان در مدل‌های ارتفاعی تاج با اندازه پیکسل ریز استفاده می‌شود، تعداد قطعه‌های حاصل از حوضه آبخیز معکوس و رشد ناحیه ای معمولاً بسیار بیشتر از تعداد واقعی درختان است که قطعه‌های اضافی در درجه اول نتیجه وقوع چندین بیشینه محلی یا قله ارتفاعی در درختان در محدوده تاج هر پایه درختی هستند (Tanhuanpaa et al. 2016). به دلیل وضوح مکانی بالای تصاویر حاصل از پهپاد، ممکن است بیش از یک بیشینه محلی در هر تاج درخت تشخیص داده شود و استفاده مستقیم از الگوریتم‌های مشخص شده می‌تواند باعث قطعه‌بندی بیش از حد تصاویر شود (Huang et al. 2018). اما با افزایش اندازه پیکسل مدل ارتفاع تاج، تعداد قطعه‌ها و نواحی ایجاد شده کاهش پیدا کرده و مقدار صحت کلی را، البته تا یک حد مشخص، برای الگوریتم RG و IWS افزایش داد (مشاهده جدول ۱).

نشان داد که الگوریتم‌های مذکور وقتی در یک ساختار همگن با تغییرات ارتفاعی کم اعمال می‌شوند مناسب هستند و استفاده از الگوریتم رشد ناحیه‌ای در یک ساختار پهن‌برگ مخلوط به دلیل انعطاف‌پذیری این روش در تشخیص اندازه‌های مختلف تاج سودمند است چرا که روش رشد ناحیه‌ای فرض نمی‌کند که تاج درخت باید شکل دایره‌ای داشته باشد. بنابراین، اگرچه تاج شکل نامنظم دارد، قادر به شناسایی آن‌ها بوده و تقسیم‌بندی خوبی را ارائه می‌دهد (Nordin, Abd Latif, and Omar 2019).

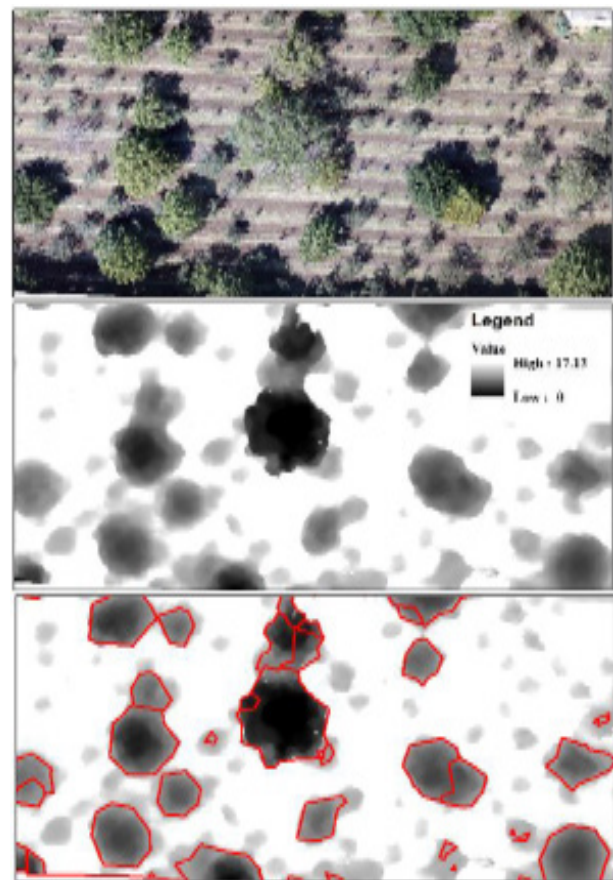
۵- نتیجه‌گیری

آشکارسازی تاج درختان در جنگل‌های شهری یک هدف مهم برای برنامه‌های کاربردی با استفاده از فناوری‌های سنجنش از دور است. ما دریافتیم که آشکارسازی تک‌پایه‌های تاج درختان در ساختارهای مختلف و با استفاده از الگوریتم‌های مختلف، نتایج متفاوتی را نشان می‌دهد. رشد ناحیه‌ای با صحت کلی ۸۸ درصد در ساختار همگن متراکم در مقایسه با الگوریتم حوضه آبخیز معکوس دارای دقت کلی بالاتری بود. درحالی‌که در ساختار ناهمگن متراکم و با استفاده از الگوریتم حوضه آبخیز معکوس، نتایج رضایت‌بخشی حاصل نشد (صحت کلی ۲۰ درصد). در کل، استفاده از روش مذکور می‌تواند به‌طور قابل توجهی زمان و هزینه را کاهش دهد و به‌طور منظم برای نظارت بر جنگل شهری در مکان‌های همگن مورد استفاده قرار گیرد.

۶- پیشنهادات

عدم اطمینان در آشکارسازی درختان و میزان موفقیت روش‌های آشکارسازی از عوامل بسیاری چون نوع گونه‌های درختی متفاوت و حتی شرایط محیطی متأثر است. براساس یافته‌های گزارش شده در این مطالعه، جهت‌گیری تحقیق در آینده باید شامل افزایش میزان دقت تشخیص پایه‌های درختی و بررسی موارد مذکور باشد. همچنین در صورت امکان، مقایسه آشکارسازی درختان با استفاده از سنسورهای مختلف مورد بررسی قرار گیرد.

نشندند (نگاره ۶) زیرا درختان کوچک به‌علت اندازه و تراکم کم تاج درختان نماینده ضعیفی در مدل ارتفاعی تاج هستند (Duncanson et al. 2014)، حتی اگر درخت بر روی تصویر نیز دیده شود، ممکن است در مدل ارتفاع تاج قابل شناسایی نباشد. علاوه بر این، ترکیبی از اندازه‌های مختلف تاج در تاج پوشش متراکم باعث می‌شود که تمایز بین درختان کوچک و قسمت تحتانی تاج درختان بزرگ‌تر دشوار شود (Larsen et al. 2011; Goldbergs et al. 2018).



نگاره ۶: از بالا به پایین: اورتوموزایک سایت ۲، مدل ارتفاع تاج، نتیجه آشکارسازی درختان

صحت بالای الگوریتم رشد ناحیه‌ای و صحت پایین‌تر الگوریتم حوضه آبخیز معکوس در این مطالعه با نتیجه مطالعات (Bunting and Lucas 2006; Dalponte et al. 2015; Nordin, Abd Latif, and Omar 2019; Heenkenda, Joyce, and Maier 2015) موافق بود. ارزیابی نتایج به‌دست آمده

Computers and Electronics in Agriculture 170 (March): 105213. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105213>.

9- Duncanson, L.I., Cook, B.D., Hurtt, G.C., and Dubayah, R.O. 2014. "An Efficient, Multi-Layered Crown Delineation Algorithm for Mapping Individual Tree Structure across Multiple Ecosystems." *Remote Sensing of Environment* 154 (November): 378–86. <https://doi.org/10.1016/J.RSE.2013.07.044>.

10- Feng, Quanlong., Jiantao Liu., Jianhua Gong., Quanlong Feng., Jiantao Liu., and Jianhua Gong. 2015. "UAV Remote Sensing for Urban Vegetation Mapping Using Random Forest and Texture Analysis." *Remote Sensing* 7 (1): 1074–94. <https://doi.org/10.3390/rs70101074>.

11- Frey, Julian., Kyle Kovach., Simon Stemmler., and Barbara Koch. 2018. "UAV Photogrammetry of Forests as a Vulnerable Process. A Sensitivity Analysis for a Structure from Motion RGB-Image Pipeline." *Remote Sensing* 10 (6). <https://doi.org/10.3390/rs10060912>.

12- Goldbergs, Grigorijs., Stefan Maier., Shaun Levick., Andrew Edwards., Grigorijs Goldbergs., Stefan W. Maier., Shaun R. Levick., and Andrew Edwards. 2018. "Efficiency of Individual Tree Detection Approaches Based on Light-Weight and Low-Cost UAS Imagery in Australian Savannas." *Remote Sensing* 10 (2): 161. <https://doi.org/10.3390/rs10020161>.

13- Guerra-Hernández, Juan., Diogo N. Cosenza., Luiz Carlos Estraviz Rodriguez., Margarida Silva., Margarida Tomé., Ramón A. Díaz-Varela., and Eduardo González-Ferreiro. 2018. "Comparison of ALS- and UAV(SfM)-Derived High-Density Point Clouds for Individual Tree Detection in Eucalyptus Plantations." *International Journal of Remote Sensing* 39 (15–16): 5211–35. <https://doi.org/10.1080/01431161.2018.1486519>.

14- Harikumar, Aravind., Francesca Bovolo., and Lorenzo Bruzzone. 2019. "A Local Projection-Based Approach to Individual Tree Detection and 3-D Crown Delineation in Multistoried Coniferous Forests Using High-Density Airborne LiDAR Data." *IEEE Transactions*

1- Asner, Gregory., Roberta Martin., Lisa Keith., Wade Heller., Marc Hughes., Nicholas Vaughn., et al. 2018. "A Spectral Mapping Signature for the Rapid Ohia Death (ROD) Pathogen in Hawaiian Forests." *Remote Sensing* 10 (3): 404. <https://doi.org/10.3390/rs10030404>.

2- Brovkina, Olga., Emil Cienciala., Peter Surový., and Přemysl Janata. 2018. "Unmanned Aerial Vehicles (UAV) for Assessment of Qualitative Classification of Norway Spruce in Temperate Forest Stands." *Geo-Spatial Information Science* 21 (1): 12–20. <https://doi.org/10.1080/10095020.2017.1416994>.

3- Bunting, Peter., Richard Lucas. 2006. "The Delineation of Tree Crowns in Australian Mixed Species Forests Using Hyperspectral Compact Airborne Spectrographic Imager (CASI) Data." *Remote Sensing of Environment* 101 (2): 230–48. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2005.12.015>.

4- Cochrane, Mark. 2000. "Using Vegetation Reflectance Variability for Species Level Classification of Hyperspectral Data." *International Journal of Remote Sensing* 21 (10): 2075–87. <https://doi.org/10.1080/01431160050021303>.

5- Dalponte, Michele. 2018. "Individual Tree Crowns Segmentation R Package Version 0.8."

6- Dalponte, Michele., Lorenzo Frizzera., and Damiano Gianelle. 2019. "Individual Tree Crown Delineation and Tree Species Classification with Hyperspectral and LiDAR Data." *PeerJ* 6 (January): e6227. <https://doi.org/10.7717/peerj.6227>.

7- Dalponte, Michele., Francesco Reyes., Kaja Kandare., and Damiano Gianelle. 2015. "Delineation of Individual Tree Crowns from ALS and Hyperspectral Data: A Comparison among Four Methods." *European Journal of Remote Sensing* 48 (August): 365–82. <https://doi.org/10.5721/EuJRS20154821>.

8- Dong, Tianyang, Xinpeng Zhang, Zhanfeng Ding, and Jing Fan. 2020. "Multi-Layered Tree Crown Extraction from LiDAR Data Using Graph-Based Segmentation."

- Aerial System Imagery." Edited by Marco Cristani. PLoS ONE 10 (11): 1–20. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0141006>.
- 22- Mohan, Midhun., Carlos Alberto Silva., Carine Klauberg., Prahlad Jat., Glenn Catts., Adrián Cardil., Andrew Thomas Hudak., and Mahendra Dia. 2017. "Individual Tree Detection from Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Derived Canopy Height Model in an Open Canopy Mixed Conifer Forest." *Forests* 8 (9): 1–17. <https://doi.org/10.3390/f8090340>.
- 23- Miraki, Mojdeh, Hormoz Sohrabi, Parviz Fatehi, and Mathias Kneubuehler. 2021. "Individual Tree Crown Delineation from High-Resolution UAV Images in Broadleaf Forest." *Ecological Informatics* 61 (March): 101207. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2020.101207>.
- 24- Nevalainen, A., Nilton, N., and Antonio, M G. 2017. "Individual Tree Detection and Classification with UAV-Based Photogrammetric Point Clouds and Hyperspectral Imaging." *Remote Sensing* 9 (3): 185. <https://doi.org/10.3390/rs9030185>.
- 25- Nordin, Sitinor Atikah., Zulkiflee Abd Latif., and Hamdan Omar. 2019. "Individual Tree Crown Segmentation in Tropical Peat Swamp Forest Using Airborne Hyperspectral Data." *Geocarto International* 34 (11): 1218–36. <https://doi.org/10.1080/10106049.2018.1475511>.
- 26- Panagiotidis, Dimitrios., Azadeh Abdollahnejad., Peter Surový., and Vasco Chiteculo. 2016. "Determining Tree Height and Crown Diameter from High-Resolution UAV Imagery." *International Journal of Remote Sensing* 38 (8–10): 2392–2410. <https://doi.org/10.1080/01431161.2016.1264028>.
- 27- Salehi, A., Gomroki, M., Azizi, A., and Sadeghian, H. 2016. "Automated Tree Crown Delineation and Detection in UltraCam-D Digital Image." *Forest Research and Development*, 2 (3): 241–56.
- 28- Surovy, Peter., Nuno Almeida Ribeiro., and Dimitrios Panagiotidis. 2018. "Estimation of Positions and Heights from UAV-Sensed Imagery in Tree Plantations in on Geoscience and Remote Sensing 57 (2): 1168–82. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2018.2865014>.
- 15- Heenkenda, Muditha K., Karen E. Joyce., and Stefan W. Maier. 2015. "Mangrove Tree Crown Delineation from High-Resolution Imagery." *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 81 (6): 471–79. <https://doi.org/10.14358/PERS.81.6.471>.
- 16- Huang, Gang., Chen-Hua Li., and Yan Li. 2018. "Phenological Responses to Nitrogen and Water Addition Are Linked to Plant Growth Patterns in a Desert Herbaceous Community." *Ecology and Evolution* 8 (10): 5139–52. <https://doi.org/10.1002/ece3.4001>.
- 17- Huang, Hongyu., Xu Li., and Chongcheng Chen. 2018. "Individual Tree Crown Detection and Delineation from Very-High-Resolution UAV Images Based on Bias Field and Marker-Controlled Watershed Segmentation Algorithms." *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* 11 (7): 2253–62. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2018.2830410>.
- 18- Ke, Yinghai., Quackenbush, Lindi. 2011. "A Review of Methods for Automatic Individual Tree-Crown Detection and Delineation from Passive Remote Sensing." *International Journal of Remote Sensing* 32 (17): 4725–47. <https://doi.org/10.1080/01431161.2010.494184>.
- 19- Klein Hentz, Ângela Maria., Michael P. Strager. 2018. "Cicada Tree Damage Detection Based on UAV Spectral and 3D Data." *Natural Science* 10 (01): 31–44. <https://doi.org/10.4236/ns.2018.101003>.
- 20- Larsen, Morten., Mats Eriksson., Xavier Descombes., Guillaume Perrin., Tomas Brandtberg., and François A. Gougeon. 2011. "Comparison of Six Individual Tree Crown Detection Algorithms Evaluated under Varying Forest Conditions." *International Journal of Remote Sensing* 32 (20): 5827–52. <https://doi.org/10.1080/01431161.2010.507790>.
- 21- Lisein, Jonathan., Adrien Michez., Hugues Claessens., and Philippe Lejeune. 2015. "Discrimination of Deciduous Tree Species from Time Series of Unmanned

Mangrove Tree Measurement Using UAV-Based LiDAR Data: Possibilities and Challenges.” *Remote Sensing of Environment* 223 (December 2018): 34–49. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.12.034>.

36- Zhang, Caiyun., Yuhong Zhou., Fang Qiu., Caiyun Zhang., Yuhong Zhou., and Fang Qiu. 2015. “Individual Tree Segmentation from LiDAR Point Clouds for Urban Forest Inventory.” *Remote Sensing* 7 (6): 7892–7913. <https://doi.org/10.3390/rs70607892>.

37- Zhen, Zhen., Lindi J. Quackenbush., and Lianjun Zhang. 2016. “Trends in Automatic Individual Tree Crown Detection and Delineation-Evolution of LiDAR Data.” *Remote Sensing*. 8(4), 333. <https://doi.org/10.3390/rs8040333>.

Agrosilvopastoral Systems.” *International Journal of Remote Sensing* 39 (14): 4786–4800. <https://doi.org/10.1080/01431161.2018.1434329>.

29- Tanhuanpaa, Topi., Ninni Saarinen., Ville Kankare, Kimmo Nurminen., Mikko Vastaranta., Eija Honkavaara., Mika Karjalainen., et al. 2016. “Evaluating the Performance of High-Altitude Aerial Image-Based Digital Surface Models in Detecting Individual Tree Crowns in Mature Boreal Forests.” *Forests* 7 (12): 143. <https://doi.org/10.3390/f7070143>.

30- Thiel, Christian., Christiane Schullius. 2017. “Comparison of UAV Photograph-Based and Airborne Lidar-Based Point Clouds over Forest from a Forestry Application Perspective.” *International Journal of Remote Sensing* 38 (8–10): 2411–26. <https://doi.org/10.1080/01431161.2016.1225181>.

31- Vauhkonen, J., Ene, L., Gupta, S., Heinzl, J., Holmgren, J., Pitkanen, J., Solberg, S et al. 2012. “Comparative Testing of Single-Tree Detection Algorithms under Different Types of Forest.” *Forestry* 85 (1): 27–40. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpr051>.

32- Vauhkonen, Jari., Anne Seppänen., Petteri Packalén., and Timo Tokola. 2012. “Remote Sensing of Environment Improving Species-Specific Plot Volume Estimates Based on Airborne Laser Scanning and Image Data Using Alpha Shape Metrics and Balanced Field Data.” *Remote Sensing of Environment* 124: 534–41. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.06.002>.

33- Yilmaz, Volkan., Oguz Gungor. 2019. “Estimating Crown Diameters in Urban Forests with Unmanned Aerial System-Based Photogrammetric Point Clouds.” *International Journal of Remote Sensing* 40 (2): 468–505. <https://doi.org/10.1080/01431161.2018.1562255>.

34- Yin, Dameng., Le Wang. 2016. “How to Assess the Accuracy of the Individual Tree-Based Forest Inventory Derived from Remotely Sensed Data: A Review.” *International Journal of Remote Sensing* 37 (19): 4521–53. <https://doi.org/10.1080/01431161.2016.1214302>.

35- Yin, Dameng., Le Wang. 2019. “Individual

