



"مقاله پژوهشی"

تهیه نقشه روشن تاجی در جنگل‌کاری‌های سوزنی‌برگان با استفاده از تصاویر پهپادی
(مطالعه موردی: منطقه عرب داغ گلستان)

زینب خلیلی^۱، اصغر فلاح^۲ و شعبان شتابی^۳

۱- دانشجوی دکتری، گروه علوم جنگل، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ایران، (نویسنده مسؤل: z.khalili923@gmail.com)
۲- استاد، گروه علوم جنگل، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ایران
۳- استاد، گروه جنگلداری، دانشکده علوم جنگل، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، ایران
تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۳/۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۴/۲۲
صفحه: ۲۴ تا ۳۹

چکیده مبسوط

مقدمه و هدف: روشن‌های تاج‌پوشش جنگلی نقش مهمی در پویایی جنگل دارند. داده‌های پهپاد ظرفیت خوبی را برای شناسایی و استخراج اطلاعات نظیر روشن‌ها در مناطق جنگلی ارائه نموده و به‌عنوان یک منبع جایگزین و کم‌هزینه برای کسب اطلاعات ساختار جنگل مطرح شده است. هدف این تحقیق، بررسی و مقایسه روش‌های استخراج روشن‌ها در تهیه نقشه روشن‌های تاجی با استفاده از داده‌های پهپاد در بخشی از جنگل‌کاری‌های عرب داغ استان گلستان می‌باشد.

مواد و روش‌ها: پس از اخذ تصاویر مناسب و انجام پیش‌پردازش‌های لازم، از ترموژائیک، مدل رقومی ارتفاع زمین (DTM)، مدل رقومی سطح (DSM) و مدل رقومی ارتفاع تاج پوشش (CHM) تهیه شد. شناسایی و تهیه روشن‌ها با روش‌های آستانه ارتفاعی ثابت، آستانه شیب مدل ارتفاعی تاج‌پوشش جنگل و طبقه‌بندی شیء پایه انجام شد. به‌منظور بررسی کارایی روش‌های مختلف و انجام ارزیابی صحت و دقت نقشه‌ها، مراکز و محدوده تعدادی از روشن‌ها با استفاده از سامانه GPS تفاضلی برداشت شد. صحت روشن‌ها به‌صورت نقطه‌ای و تطابق هندسه محدوده‌ای روشن‌های استخراجی با نقشه واقعیت زمینی ارزیابی شد.

یافته‌ها: نتایج ارزیابی صحت نقطه‌ای نشان داد که روش طبقه‌بندی شیء پایه با الگوریتم ماشین‌بردار پشتیبان با صحت کلی ۹۹ درصد و ضریب کاپا ۰/۹۸ دارای بهترین عملکرد نسبت به سایر روش‌ها و الگوریتم‌ها بوده است. در ارزیابی تطابق محدوده‌ای، بیشترین تطابق روشن‌های استخراج‌شده با روشن‌های واقعیت زمینی در آستانه ارتفاع سه متر به‌دست آمد.

نتیجه‌گیری: نتایج نشان داد که می‌توان با تصاویر هوایی پهپاد و خروجی‌های حاصل از آن و همچنین کار گرفتن روش‌های خودکار، نقشه روشن‌های تاجی را با دقت خوبی استخراج کرد. البته میزان دقت به عوامل متعددی مانند نوع پهپاد و دوربین‌های استفاده‌شده، پارامترهای پرواز و غیره بستگی دارد. با توجه به دقت نتایج به دست آمده، استفاده از این روش برای آماربرداری جنگل توصیه می‌شود.

واژه‌های کلیدی: آستانه‌گذاری، پهپاد، تطابق محدوده‌ای، روشن‌ها، شیء پایه

مقدمه

با توجه به اهمیت جنگل‌کاری و نقش آن در ابعاد مختلف، کسب اطلاعات دقیق، مستمر و به‌هنگام از مشخصه‌های ساختاری این منابع جنگلی می‌تواند در برنامه‌ریزی و مدیریت صحیح این منابع، از اولویت بالایی برخوردار باشد. یکی از مهم‌ترین مشخصه‌های ساختاری در زیست‌سنجی جنگل، روشن‌ها به همراه پوشش تاجی جنگل و تغییرات عمودی ارتفاع تاج است (۵۹) که عامل اصلی تأثیرگذار بر ترکیب و ساختار جنگل هستند (۱۳،۳۳). روشن‌های تاج‌پوشش بر اثر عوامل طبیعی طوفان، برف، وقوع زلزله، زمین‌لغزش، رعد و برق، آتش‌سوزی، هجوم حشرات (۱۱) و یا عوامل غیرطبیعی دخالت‌های بشر مانند عملیات تنک کردن، قطع و بهره‌برداری درختان سرپا (۱۷،۳۴) ایجاد می‌شود. همچنین ابعاد، اندازه، پراکنش و تعداد روشن‌های طبیعی و مصنوعی در برنامه‌ریزی و مدیریت طرح‌های جنگلداری و تعیین شیوه‌های جنگل‌شناسی کمک به سزایی می‌کنند (۱۵). برای اندازه‌گیری روشن‌ها دو روش اندازه‌گیری عرصه‌ای و استفاده از داده‌های دورسنجی وجود دارد. ثبت کامل همه روشن‌های موجود در سطح جنگل، در روش آماربرداری زمینی بسیار زمان‌بر و طاقت‌فرسا است. به همین دلیل معمولاً پیمایش‌های عرصه‌ای روشن‌ها در سطوح کوچک‌تری انجام می‌شوند (۴۰). امروزه داده‌های سنجش‌ازدور به دلیل برخورداری از مزایایی چون سطح پوشش وسیع، قابلیت تکرار، سهولت پردازش، توأم

با داده‌های میدانی و استفاده از روش‌های جدید و پیشرفته برای افزایش دقت، می‌تواند وسیله‌ای برای نقشه‌برداری دقیق و صریح روشن‌ها و توصیف پویایی شکاف تاج‌پوشش جنگلی را فراهم کنند (۲۳،۴۹،۵۳)؛ که از آن جمله می‌توان به تصاویر ماهواره‌ای (۲۱)، لیزر اسکنر هوایی (۵۹)، لیزر اسکنر زمینی (۱۸) و داده‌های پهپاد (۱۹) اشاره کرد. در سال‌های اخیر مطالعات مختلفی باهدف تهیه نقشه روشن‌ها بر مبنای اطلاعات حاصل از داده‌های سنجش‌ازدور انجام گرفته است. بیشتر این مطالعات با استفاده از داده‌های لیدار و لیزر اسکنر هوایی انجام شده است (۱۶،۱۷،۲۴،۳۴،۵۵،۶۱) نتایج این مطالعات نشان داد که استفاده از فناوری لیدار و لیزر اسکنر هوایی توانایی شناسایی و تهیه نقشه حفره‌های تاج‌پوشش جنگل با دقت بالا را دارند. علی‌رغم پیشرفت‌های اخیر عیب اصلی این داده‌ها، هزینه بالای جمع‌آوری داده‌ها (۱۰)، عدم دسترسی به داده‌های زمانی متفاوت و محدودیت‌های عملیاتی آن‌ها موجب شده تا از تصاویر پهپاد، به‌عنوان روشی ارزان و انعطاف‌پذیر استفاده شود.

نوین‌ترین فناوری‌های جمع‌آوری اطلاعات سنجش‌ازدوری، پهپادها یا پرنده‌های بدون سرنشین^۱ (UAV) هستند که از دهه اخیر در کنار سایر سامانه‌های هواپرد و ماهواره‌ها به‌منظور جمع‌آوری اطلاعات از اکوسیستم‌های جنگلی استفاده می‌شوند. پهپادها ویژگی‌هایی دارند که استفاده از آن‌ها را در عرصه‌های جنگلی توجیه می‌کند که از آن جمله می‌توان

آستانه‌گذاری ویژگی‌های ارتفاع و شیب مدل رقومی ارتفاعی تاج‌پوشش است. تکنیک آستانه‌گذاری یک نوع روش استخراج روشنه‌هاست که از شرط آستانه‌گذاری برای تفکیک پدیده‌ها استفاده می‌کند و با تعریف شرایط خاصی، هر یک از قطعات تصویر را به طبقه متعلق به آن پدیده اختصاص می‌دهد (۴۴). در این روش تعیین حد آستانه‌ها نقش حائز اهمیتی در استخراج دقیق دارد. از اختلاف دو مدل رقومی ارتفاع زمین (DTM) و مدل رقومی سطح (DSM) مدل رقومی ارتفاع تاج‌پوشش (CHM) به دست می‌آید؛ که با تعریف حد آستانه‌های مختلف بر مدل ارتفاعی تاج و شیب مدل ارتفاعی تاج برای پوشش کف حفره‌ها دو طبقه حفره و غیر حفره حاصل می‌گردد. محققان حد آستانه (آستانه ثابت و یا به‌کارگیری تفاوت نسبی ارتفاع گیاهان) متفاوتی را برای تفکیک روشنه پیشنهاد کرده‌اند (۵۴). بی و همکاران (۴) آستانه ارتفاعی سه متر در جنگل‌های طبیعی در شمال شرقی چین، کنت و همکاران (۲۹) ارتفاع آستانه دو متر را برای جنگل سیرالئون غرب آفریقا، کولاس و بلکبرن (۳۰) ارتفاع آستانه چهار متر را برای جنگل‌های جنوب انگلستان، کوثری (۳۱) حد آستانه ارتفاعی هفت متر و امینی (۲) حد آستانه ارتفاعی ۱۲ متر در طرح جنگلداری دکتر بهرام نیا را پیشنهاد دادند. در تعیین حد آستانه ارتفاعی باید دقت شود اگر مقادیر حد آستانه ارتفاعی به ارتفاع درختان اطراف روشنه نزدیک‌تر باشد امکان ایجاد خطای بیش قطعه‌بندی وجود دارد و چنانچه مقادیر حد آستانه ارتفاعی کوچک‌تر از ارتفاع درختان اطراف باشد امکان بروز خطای کم قطعه‌بندی برای روشنه‌ها با نهال‌های بلند می‌شود. از طرف دیگر، انتخاب آستانه ارتفاعی بزرگ می‌تواند در شناسایی روشنه ناموفق باشد (۵۸)

در این زمینه کوثری (۳۱) به‌منظور شناسایی و تهیه نقشه حفره‌های تاج‌پوشش جنگلی از روش آستانه‌گذاری (ارتفاع ثابت) و شیء پایه استفاده کرد و نتایج نشان داد که روش آستانه‌گذاری با آستانه ارتفاعی هفت متر با صحت کلی ۹۹/۱۱۸ درصد و ضریب کاپا ۰/۹۸ نسبت به الگوریتم نزدیک‌ترین همسایه در روش شیء پایه با صحت کلی ۹۳/۱۳ درصد و ضریب کاپا ۰/۸۳ در شناسایی و تهیه نقشه روشنه عملکرد بهتری دارد. بونت و همکاران (۷) در پژوهش خود به‌منظور تهیه نقشه روشنه از سه روش آستانه‌گذاری، طبقه‌بندی نظارت‌شده پیکسل مینا و طبقه‌بندی شیء پایه (الگوریتم جنگل تصادفی) استفاده کردند. نتایج ارزیابی صحت هندسی نشان داد که عملکرد روش آستانه‌گذاری نسبت به دو روش دیگر بیشتر است. امینی (۱) در تحقیق خود به بررسی و مقایسه روش‌های استخراج روشنه در تهیه نقشه روشنه‌های تاجی با استفاده از داده‌های پهپاد در بخشی از توده مدیریت‌شده طرح جنگلداری دکتر بهرام نیا (شصت کلاته) با روش‌های آستانه‌گذاری مدل ارتفاعی تاج (ارتفاع و شیب ثابت و ارتفاع نسبی) و طبقه‌بندی شیء پایه مدل ارتفاعی تاج و اتوموزائیک پهپاد پرداخت که نتایج ارزیابی صحت نقطه‌ای نشان داد که به‌کارگیری روش آستانه شیب ۶۰٪ با صحت کلی ۹۱/۷ درصد و ضریب کاپا ۰/۸۷ دارای بهترین نتیجه نسبت به سایر روش‌های استخراج روشنه‌ها بوده است. وایت

هزینه عملیاتی پایین، قدرت تفکیک زمانی-مکانی بالا، جمع‌آوری داده با کیفیت بالا (۵۲)، امکان استفاده از الگوریتم‌های خودکار در پردازش‌ها (۳۷) و دقت تصویربرداری زیاد، اندازه پیکسل کمتر از پنج سانتی‌متر (۲۵) اشاره کرد. این ابزار به سبب برداشت تصاویر استریویی با همپوشانی زیاد، امکان تهیه مدل‌های رقومی سطحی (DSM) و مدل رقومی ارتفاعی (DTM) و مدل رقومی ارتفاعی تاج (CHM) را فراهم می‌کند که در استخراج نقشه روشنه‌ها می‌توان از آن استفاده کرد. یکی دیگر از خروجی‌های پردازش تصاویر پهپاد، ارتوموزائیک با اندازه مکانی در حد چند سانتی‌متر است که در استخراج نقشه روشنه‌ها به کار می‌رود.

تهیه نقشه روشنه‌ها با استفاده از داده‌های دورسنجی از طریق روش‌های مختلف در جنگل‌های طبیعی و جنگل‌کاری‌ها همواره یکی از چالش‌های محققان بوده است. که هریک از این روش‌ها دارای مزایا و معایبی می‌باشد. بررسی و معرفی روش‌های مناسب می‌تواند برای تهیه نقشه روشنه‌ها برای مدیریت جنگل کمک زیادی نماید. انتخاب بهترین روش استخراج روشنه به هدف بررسی بستگی دارد؛ به‌عبارت‌دیگر می‌بایست یکی از دو ویژگی زیر را انتخاب کرد: الف- تشخیص روشنه‌ها با سطح اطمینان بالا که با خطای حذف و شناسایی نشدن بعضی روشنه‌ها همراه است. ب- شناسایی بیشترین تعداد روشنه که با خطای شناسایی اشتباه بعضی اشیای تصویر بجای روشنه همراه است (۷) که در این پژوهش از سه روش طبقه‌بندی بر روی مدل ارتفاعی تاج و اطلاعات طیفی ارتوموزائیک پهپاد استفاده شد و صحت نقطه‌ای و تطابق هندسی این روش‌ها در تفکیک و تهیه نقشه روشنه‌ها مقایسه شد.

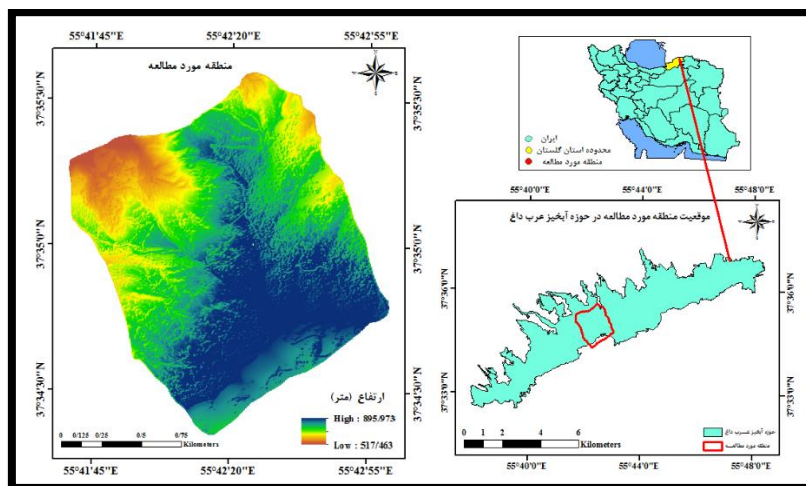
استخراج روشنه‌ها با استفاده از تجزیه و تحلیل شیء پایه مدل ارتفاعی تاج (CHM) و ارتوموزائیک پهپاد یکی از این روش‌ها می‌باشد. آنالیز شیء پایه، یک تکنیک کاربردی در پردازش رقومی تصاویر می‌باشد که اخیراً در مقابل آنالیز پیکسل پایه توسعه داده شده است (۵). شیء‌های تصویری حاصل از فرآیند قطعه‌بندی، مبنای طبقه‌بندی شیء پایه هستند و آن‌ها دارای حجم زیادی از مشخصات و خصیصه‌های پدیده‌های زمینی متناظرشان در سطح تصویر می‌باشند و هرچقدر این فرآیند با دقت بیشتری انجام گیرد در کیفیت طبقه‌بندی تأثیر مستقیم خواهد داشت (۹). محدودیت‌های موجود در روش طبقه‌بندی پیکسل پایه سبب تا روش شیء پایه مطرح گردد (۱۴،۴۶). در روش طبقه‌بندی شیء پایه، ابتدا با بهره‌گیری از تکنیک‌های متنوع، مناسب‌ترین مقیاس و پارامترهای دخیل در قطعه‌بندی اجزای تصویر انجام شده و در نهایت با بهره‌گیری الگوریتم‌های موجود، طبقه‌بندی تصویر صورت می‌گیرد. تاکنون از الگوریتم‌های زیادی در روش شیء پایه برای طبقه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای استفاده شده است (۵۰)، بنابراین انتخاب مناسب‌ترین الگوریتم طبقه‌بندی شیء پایه نظیر نزدیک‌ترین همسایه، ماشین‌بردارپشتیبان، درخت تصمیم‌گیر، جنگل تصادفی، K نزدیک‌ترین همسایه و بیز برای شناسایی و تهیه نقشه روشنه از اهداف فرعی این پژوهش است. یکی دیگر از روش‌های شناسایی و تهیه نقشه روشنه،

این تحقیق مقایسه روش‌های مختلف آستانه‌گذاری و الگوریتم‌های مختلف روش طبقه‌بندی شیء پایه در شناسایی و تهیه نقشه روشنه‌های حاصل از تصاویر پهپاد است. همچنین تطابق هندسی محدوده‌ای روشنه‌ها با شاخص‌های هندسی با استفاده از مدل ارتفاعی تاج و ارتوموزائیک پهپاد در جنگل‌کاری‌های سوزنی‌برگان، هدف فرعی تحقیق است.

مواد و روش‌ها منطقه پژوهش

این تحقیق در ۲۷۶/۵۹۳ هکتار از عرصه جنگل‌کاری عرب داغ در ۴۰ کیلومتری شمال شرق شهر کلاله و در حوزه مدیریتی اداره منابع طبیعی شهرستان کلاله استان گلستان با طول جغرافیایی "۵۵°۳۵'۵" تا "۵۵°۵۱'۵" شرقی و عرض جغرافیایی "۳۷°۳۰'۴۶" تا "۳۷°۳۸'۲۰" شمالی انجام شد (شکل ۱)؛ که از سال ۱۳۶۵ تا ۱۳۶۹ با گونه‌های سرو زربین، کاج بروسیا، کاج بادامی و سرو نقره‌ای با فاصله کاشت ۳×۳ متر، جنگل‌کاری شده است (۶). گونه‌های کاشت شده غالب منطقه عمدتاً با گونه‌های سوزنی‌برگ زربین و بروسیا و به‌صورت لکه‌های کوچکی با گونه‌های افرا و آزاد است که به شکل خالص و یا مخلوط آزاد-زربین، بروسیا-زربین، بروسیا-آزاد و ممرز است. این توده‌ها به دلایل مختلفی از جمله رقابت‌های نوری، آفت و بیماری، بادافتادگی و دیگر عوامل دارای روشنه‌های متعددی است از نظر زمین‌شناسی عرصه جنگل‌کاری عرب داغ، از نهشته‌های رسوبی لسی تشکیل شده است (۴۵). کمینه و بیشینه ارتفاع منطقه مورد مطالعه از سطح دریا به ترتیب ۲۳۰/۶۷۶ و ۹۶۷/۵۸ متر است و شیب متوسط آن ۱۵ درصد و جهت غالب آن شمالی است.

(۵۵) در پژوهش خود با عنوان مقایسه لیزر اسکنر هوایی و فتوگرامتری رقومی هوایی برای شناسایی روشنه‌های تاج‌پوشش جنگلی در جنگل‌های بارانی معتدله ساحلی مقایسه کردند. آن‌ها حد آستانه ارتفاعی ثابت و متغیری را برای شناسایی روشنه‌ها با استفاده از هر دو نوع داده به کار و نتایج حاصل را به‌صورت مجزا با تفسیر بصری تصویر، اعتبارسنجی کردند. صحت کلی برآورد روشنه‌های حاصل از لیزر اسکنر هوایی به ترتیب برای روش حد آستانه ثابت و متغیر ۹۶/۵۰ درصد و ۸۹/۵۰ درصد بوده است که در مقایسه با صحت برآورد روشنه‌ها با استفاده از داده‌های فتوگرامتری هوایی ۵۹/۵۰ درصد و ۵۰ درصد برای حد آستانه ثابت و متغیر خطای omission حذف‌شدگی بیشتری داشت (>۸۸٪). همچنین بررسی میزان تطابق روشنه‌های حاصل از روش‌های مختلف آستانه‌گذاری ارتفاعی و شیب سطح تاج و روش‌های طبقه‌بندی شیء پایه با محدوده‌های روشنه‌های واقعیت زمینی از نظر برخی ویژگی‌های شکلی روشنه می‌تواند در اطمینان از تهیه دقیق موقعیت و محدوده واقعی روشنه‌ها کمک زیادی نماید که اخیراً در برخی از تحقیقات همانند (۲۰) انجام شده است. در هر یک از پژوهش‌ها از روش‌ها و داده‌های متفاوتی در شرایط جنگلی متفاوت اعم از جنگل‌کاری تا جنگل‌های طبیعی مانند آستانه‌گذاری مدل ارتفاعی تاج‌پوشش (ارتفاع و شیب ثابت و ارتفاع نسبی) طبقه‌بندی شیء پایه مدل ارتفاعی تاج و ارتوموزائیک استخراج‌شده از تصاویر پهپاد برای شناسایی و تهیه نقشه روشنه‌ها استفاده کردند. بیشتر این مطالعات بر روی جنگل‌های پهن‌برگ میان‌سال و ناهمسال تمرکز کرده‌اند. ولی پژوهش‌های بسیار اندکی با هدف مقایسه روش‌های مختلف شناسایی و تهیه نقشه روشنه‌های تاجی و همچنین ارزیابی تطابق هندسی محدوده روشنه‌ها در جنگل‌کاری‌های سوزنی‌برگ صورت گرفته است. هدف اصلی



شکل ۱- موقعیت و گستره منطقه مورد مطالعه در شهرستان کلاله در استان گلستان و ایران
Figure 1. Location and scope of the study area in Kalaleh city in Golestan province and Iran

برنامه‌ریزی عملیات پرواز و برداشت تصاویر در این پژوهش از پهپاد DJI Phantom 4 pro استفاده گردید. ۱۶۶۴ تصویر با استفاده از دوربین معمولی

FC6310 در محدوده مرئی (RGB) با قدرت تفکیک ۶/۳۵ سانتی‌متر، فاصله کانونی ۸/۸ میلی‌متر و از ارتفاع ۱۱۵ متری از بالاترین سطح زمین منطقه

نقاط با استفاده از سامانه موقعیت‌یاب جهانی تفاضلی (DGPS) متصل به سامانه شمیم ثبت شد. این مختصات در تصحیح تصاویر و تهیه مدل رقومی سطح (DSM) و ارتوموزائیک دقیق استفاده گردید. شکل ۲ نمونه‌ای از نقاط کنترل و DGPS استفاده‌شده را نشان می‌دهد.

مورد مطالعه، با همپوشانی طولی و عرضی ۷۰ درصد در ۲۹ مهرماه ۱۳۹۹ برداشت گردید.

برداشت نقاط کنترل

تصحیح هندسی تصاویر و تهیه مدل‌های سه‌بعدی دقیق از ضروریات است. در منطقه مورد مطالعه ۱۳ نقطه کنترل با پراکنش مناسب طراحی و پیاده شد و مختصات دقیق این



شکل ۲- نقطه کنترل زمینی در عرصه (چپ) و برداشت همان نقطه کنترل زمینی با DGPS (راست)

Figure 2. Ground control point in the arena (left) and picking up the same ground control point with DGPS (right)

سه‌بعدی (Z, Y, X) برای هریک از نقاط گره‌ای محاسبه می‌شود. با استفاده از اطلاعات مربوط به GPS/INS که در طول پروژه جمع‌آوری می‌شود، دقت مختصات محاسبه‌شده برای ابر نقاط پراکنده، پایین (در حد چند متر) بود، به همین دلیل، از نقاط کنترل زمینی (۱۳ نقطه) برای زمین مرجع کردن ابر نقاط پراکنده تولیدشده از مرحله تناظریابی، استفاده شد. نقاط کنترل زمینی (برداشت توسط DGPS) توسط نرم‌افزار به صورت نیمه‌خودکار روی تصاویر شناسایی و مختصات دقیق آن در پیکسل‌های مربوط ثبت شد. در این مرحله تمام پارامترهای توجیه داخلی، خارجی و موقعیت صحیح دوربین برای هر تصویر مشخص و تصحیح‌شده و توجیه نسبی و مطلق صورت گرفت و ابر نقاط ایجادشده در این مرحله بهینه شد. ابر نقاط پراکنده تولیدشده در مرحله پردازش اولیه، تنها از نقاط گرهی تشکیل شده است و دارای تراکم کم است که برای ایجاد هندسه یک مدل سه‌بعدی مناسب، ناکافی است. در مرحله بعد با استفاده از پارامترهای دوربین و تصویر و ابر نقاط پراکنده حاصل از مرحله قبل، ابر نقاط متراکم که از میلیون‌ها نقطه تشکیل شده است برای تشکیل هندسه مدل ایجاد شد. در مرحله بعد با استفاده از ابر نقاط متراکم یک مدل سه‌بعدی Mesh ساخته شد. مدل سه‌بعدی Mesh مجموعه‌ای از رئوس، لبه‌ها و نماها است و سطح واحدی را ایجاد می‌کند. درحالی‌که ابر نقاط متراکم مجموعه‌ای از نقاط سه‌بعدی گسسته است. به‌منظور بهبود مدل سه‌بعدی Mesh، تابع بافت روی آن اجرا شد و مدل سه‌بعدی رقومی سطح DSM با قدرت تفکیک $1/8$ سانتی‌متر و ارتوموزائیک پهنای با قدرت تفکیک ۴ سانتی‌متر تولید شد.

در این مطالعه، مدل رقومی ارتفاع (DTM) به صورت ترکیبی از طریق درون‌یابی نقاط استخراج‌شده از طریق شناسایی بصری بستر زمین لخت در DSM و نقاط زمینی برداشتی توسط DGPS تهیه شد. تفاوت‌های موجود در روش‌های درون‌یابی و تراکم نقطه بر DTM تولیدشده تأثیر می‌گذارد که

پردازش تصویر هوایی پهپاد

پس از اخذ تصاویر پهپاد، آماده‌سازی‌های اولیه شامل بررسی کنترل کیفیت تصاویر و حذف تصاویر با کیفیت پایین انجام گرفت. سپس مختصات استخراج‌شده از DGPS برای هر یک از تصاویر، به متادیتای آن افزوده‌شده و به این ترتیب تصاویر ژئوتگ شدند. سپس از الگوریتم‌های ساختار حرکت مبنا (SFM) و دید استریوسکوپی استفاده شد تا از تصاویر دوبعدی متعددی که با همپوشانی زیاد از یک شیء ثابت به کمک دوربین متحرک برداشت شده‌اند و با لحاظ کردن پارامترهای دوربین مانند هندسه درونی، موقعیت و جهت مدل‌های سه‌بعدی ایجاد شود (۳۸). نرم‌افزار Agisoft با بهره‌گیری از اپراتور SIFT نقاط مشترک را در تصاویر پهپاد جستجو کرده و با یکدیگر متناظر می‌کند. خروجی این مرحله ابر نقاط کم تراکم است که در مناطق مشترک عکس‌ها ایجاد می‌شود. برای هر تصویر، موقعیت دوربین، پارامترهای توجیه خارجی و هندسی مانند فاصله کانونی دوربین (f) ، مختصات نقطه اصلی (x_p, x_p) و ضرایب اعوجاج شعاعی عدسی دوربین (k_1, k_2, k_3) را مشخص و تصحیح می‌کند. برای استخراج ابر نقاط در تصاویر به دلیل هندسه ناپایدار، شرایط متفاوت تصویربرداری و تفاوت در پارامترهای مقیاس، دوران، انتقال و روشنایی مربوط به تصاویر، استفاده از تکنیک‌های تناظریابی که به صورت سنتی در فتوگرامتری استفاده می‌شوند قابل‌اعتماد نیستند (۳۲). بنابراین در چنین شرایطی به الگوریتم تناظریابی قابل‌اعتمادی نیاز است تا تحت شرایط متفاوت تصاویر قرار نگیرد. الگوریتم SIFT از پرکاربردترین الگوریتم‌ها در پردازش تصاویر هوایی است که برای استخراج نقاط گرهی استفاده می‌کند (۲۷). پس از استخراج نقاط گرهی، بلوک تصاویر با استفاده از الگوریتم سرشکنی خطای بلوک^۱ (BBA) سرشکن و پارامترهای موقعیت و جهت برای هر تصویر به‌طور دقیق محاسبه می‌گردد. با استفاده از معادلات شرط هم‌خطی و بهره‌گیری از مثلث‌بندی هوایی به صورت خودکار، مختصات

مشخصی از شیب مدل ارتفاعی تاج پوشش حد آستانه تفکیک روشنه مشخص می‌شود. با آزمون مقادیر شیب بر روی تصویر مشخص شد که مقادیر شیب کمتر از ۶۰ درصد درون محیط تاج درختان و شیب‌های تندتر نشان‌دهنده لبه‌های تاج خواهند بود (۳۰). بونت و همکاران (۷) استفاده از شیب مدل ارتفاعی تاج را به منظور بهبود استخراج محدوده روشنه پیشنهاد کردند. به منظور بررسی دقیق و تعیین حد آستانه شیب مدل ارتفاعی تاج پوشش، مقادیر شیب مدل ارتفاعی تاج ۶۰، ۶۵، ۷۰ و ۷۵ درصد به عنوان حد آستانه تفکیک روشنه انتخاب شدند. در مرحله بعد هرکدام از این طبقه‌بندی‌ها جداگانه مورد ارزیابی صحت قرار گرفت و نقشه دارای ارزیابی صحت بالاتر به عنوان نقشه نهایی حاصل از داده‌های پهپاد انتخاب گردید.

روش طبقه‌بندی شیء پایه

طبقه‌بندی شیء پایه در سه مرحله کلی قابل انجام است که شامل قطعه‌بندی، طبقه‌بندی و ارزیابی صحت طبقه‌بندی است. قطعه‌بندی به معنی گروه‌بندی گروهی از پیکسل‌های همسایه در داخل یک ناحیه است که شباهت‌هایی نظیر ارزش عددی و بافت، مهم‌ترین معیار مشترک میان آن‌ها است (۵۱). شیء‌های تصویری حاصل از فرآیند قطعه‌بندی، مبنای طبقه‌بندی شیء پایه هستند و دارای حجم زیادی از مشخصات و ویژگی‌های پدیده‌های زمینی متناظرشان در سطح تصویر می‌باشند (۹). به منظور قطعه‌بندی در این پژوهش از روش قطعه‌بندی چند مقایسه‌ای ارتوموزائیک در نرم‌افزار eCognition با ترکیبی از سه باند اصلی در قالب داده‌های ورودی با وزن‌های متفاوت (باند قرمز یک، باند سبز دو و باند آبی یک) و داده‌های کمکی مانند لایه مدل ارتفاعی تاج و لایه شیب مدل به ترتیب با وزن‌های چهار و سه انجام شد. در این مطالعه با روش آزمون خطا و با بررسی قطعات حاصل از اعمال قطعه‌بندی بهترین پارامترهای قطعه‌بندی با مناسب‌ترین قطعات انتخاب شد. پارامترهای مناسب قطعه‌بندی تصویر، با مقادیر ۰/۷ برای شکل، ۰/۳ برای فشردگی و مقیاس ۵۰ انتخاب گردید. در طبقه‌بندی از الگوریتم‌های مختلف (نزدیک‌ترین همسایه، ماشین بردار پشتیبان، جنگل تصادفی، درخت تصمیم گیر و بیز) استفاده شد. در این پژوهش برای هرکدام از الگوریتم‌ها دوطبقه، روشنه و تاج پوشش تعریف شد و جهت دستیابی به نتایج بهتر و با دقت بیشتر علاوه بر اطلاعات طیفی، از دو ویژگی مهم، میانگین و انحراف معیار تمامی باندها استفاده شد (شکل ۳).

به طور غیرمستقیم می‌تواند بر دقت ارتفاع برآورد شده درخت تأثیر بگذارد؛ بنابراین، برای به دست آوردن DTM بهینه، ترکیبات مختلفی از روش‌های درون‌یابی (کریجینگ، اسپلاین و روش وزن دهی فاصله معکوس (IDW)) مورد آزمایش قرار گرفت که روش درون‌یابی کریجینگ نتایج خوبی را ارائه داد. پس از تهیه مدل رقومی زمین و سطح، مدل ارتفاعی تاج پوشش (CHM) از تفاضل آن‌ها تهیه شد. همچنین لایه شیب سطح‌رویی تاج از مدل رقومی ارتفاعی تاج پوشش در محیط GIS تهیه شد.

روش‌های شناسایی و تهیه نقشه روشنه‌ها

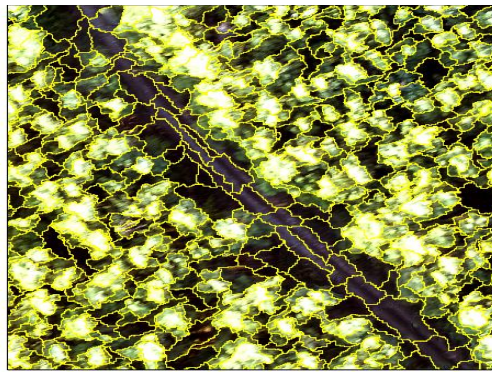
روش آستانه ارتفاعی بر روی مدل ارتفاعی تاج پوشش CHM

در این روش یک حد آستانه ارتفاعی برای جدا کردن پالس‌های تاج پوشش از پالس‌های زیر تاج پوشش و زمین باید تعریف شود. در تحقیقات مختلف دو تعریف اصلی از روشنه‌ها می‌توان یافت. تعریف اول: روشنه را به عنوان "سوراخ" در پوشش تاج جنگل تا ارتفاع از پیش تعریف شده (مثلاً دو متر) از سطح زمین تعریف می‌کند (۸). تعریف دوم: روشنه علاوه بر این شامل سطح زمین زیر تاج پوشش است که تا پایه درختانی که دهانه تاج پوشش را احاطه کرده‌اند گسترش می‌یابد (۴۳). تعاریف نیز بسته به روش ارزیابی و هدف تحقیق متفاوت است: یک رویکرد زمینی "از پایین به بالا" که بیشتر در بررسی‌های میدانی استفاده می‌شود (۸). حداکثر ارتفاع گیاهی ثابت را در داخل شکاف از پیش تعریف می‌کند، درحالی‌که رویکرد هوایی "از بالا به پایین" را در نظر می‌گیرد. حداکثر ارتفاع پوشش گیاهی را در یک شکاف نسبت به ارتفاع درختان اطراف تعریف می‌کند (۲۶، ۴۱). با توجه به نوع پوشش گیاهی برای این حد آستانه مقادیر متفاوتی ارائه شده است. در بیشتر تحقیقات، این حد آستانه ارتفاعی را دو متر در نظر گرفته‌اند (۳۱، ۳۹، ۶۱). در این پژوهش به منظور بررسی دقیق و تعیین حد آستانه ارتفاعی تاج پوشش واقعی جنگل، طبقه‌بندی برای حد آستانه ارتفاعی دو، سه، چهار، پنج و شش متر انجام گردید. هرکدام از این طبقه‌بندی‌ها جداگانه مورد ارزیابی صحت قرار گرفت و نقشه دارای ارزیابی صحت بالاتر به عنوان نقشه نهایی حاصل از تصاویر پهپاد انتخاب گردید.

روش آستانه‌گذاری شیب مدل ارتفاعی تاج پوشش

Slope-CHM

در توده جنگلی محل تلاقی درخت و محدوده روشنه حداکثر شیب لایه تاج را نشان می‌دهد. روش آستانه‌گذاری شیب مدل ارتفاعی تاج پوشش یکی دیگر از روش‌های شناسایی و استخراج محدوده روشنه‌ها است که از لایه شیب سطح‌رویی تاج از مدل رقومی ارتفاع تهیه می‌شود. با تعیین مقدار



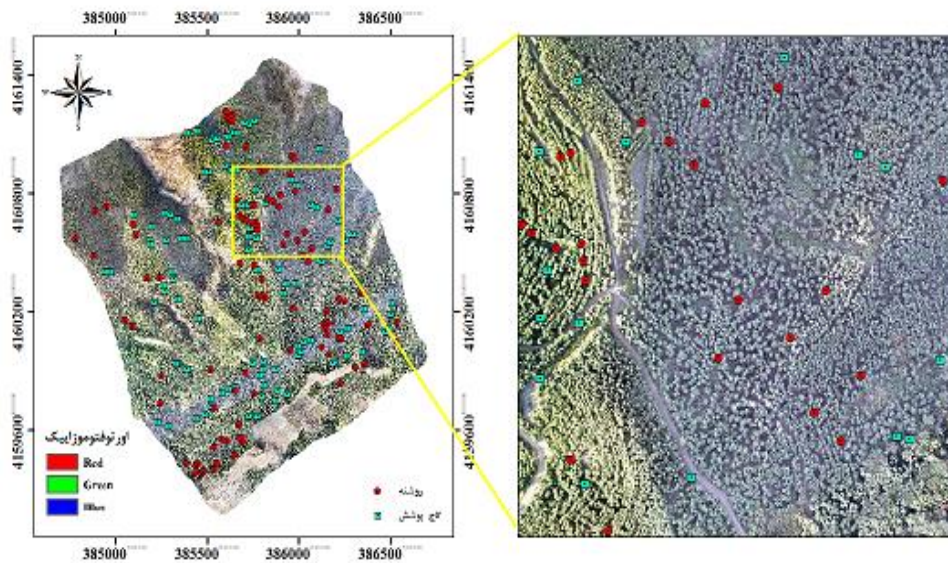
شکل ۳- قطعه‌بندی چند مقیاسه با مقیاس ۵۰، شکل ۰/۷ و فشردگی ۰/۳ برای تمایز روشن‌های تاج پوشش با استفاده توأم داده‌های ارتوفتو CHM

Figure 3. Multi-scale segmentation with scale 50, Figure 0.7 and compaction 0.3 for differentiation of canopy specimens using orthophoto and CHM data

برداشت گردید، محدوده ۱۰۵ روشن شامل تعدادی از محدوده‌های برداشتی توسط DGPS و تعدادی هم به صورت دستی بر روی ارتوموزائیک پهنپای مشخص شد (شکل ۵). شباهت ویژگی‌های هندسی روشن‌های استخراج شده با روشن‌های مرجع از طریق معیارهایی به نام بیش قطعه‌بندی $(OS)^2$ ، کم قطعه‌بندی $(US)^3$ و شاخص D مورد ارزیابی قرار گرفت (۲۸). معیار بیش قطعه‌بندی زمانی رخ می‌دهد که یک پدیده از دنیای واقعی به زیر پدیده‌هایی کوچک‌تری تقسیم شود (رابطه ۵) و کم قطعه‌بندی هنگامی اتفاق می‌افتد که یک پدیده واقعی و یا قسمت‌هایی از آن به‌عنوان قسمتی از پدیده دیگر طبقه‌بندی شود (رابطه ۶)، (۲۸). مقادیر بیش قطعه‌بندی و کم قطعه‌بندی بین صفر تا یک تغییر می‌کند و در شرایط بهینه، زمانی که مقدار بیش قطعه‌بندی و کم قطعه‌بندی معادل صفر است. پلی‌گون‌های طبقه‌بندی شده با نمونه واقعیت زمینی دقیقاً تطابق دارند (۱۲). شاخص D از مقادیر بیش قطعه‌بندی و کم قطعه‌بندی به دست می‌آید (رابطه ۷). شاخص D دارای مقادیری بین صفر و یک است و بدین ترتیب ارزیابی کمی از نکویی تطبیق پلی‌گون‌ها ارائه می‌دهد. هرچه مقدار شاخص D به صفر نزدیک‌تر باشد، بین بیش قطعه‌بندی و کم قطعه‌بندی تعادل خوبی وجود دارد و نتایج طبقه‌بندی به نتایج داده‌های واقعیت زمینی نزدیک‌تر است (جدول ۲)، (۷، ۱۲، ۳۶).

تهیه نقشه واقعیت زمینی و ارزیابی صحت و تطابق هندسی روشن‌ها

برای ارزیابی صحت نقشه‌های تولید شده، می‌توان نقشه واقعیت زمینی را به صورت صد در صد و یا نمونه‌ای و با استفاده از تفسیر عکس‌های هوایی و یا روش میدانی تهیه کرد (۴۷). در این پژوهش نقشه واقعیت زمینی به روش نمونه‌ای و به صورت تصادفی در تعدادی از روشن‌ها از طریق بازدید میدانی و ثبت مرکز و محدوده روشن‌ها با DGPS متصل به سامانه شمیم و تعدادی هم بر روی تصویر ارتوموزائیک پهنپای گردید در این پژوهش دو نوع ارزیابی صحت نقطه‌ای و ارزیابی تطابق هندسه محدوده روشن انجام گرفت. به منظور ارزیابی صحت نقطه‌ای (کمی)، تعداد ۳۰۲ نقطه نمونه تصادفی (روشنه و تاج‌پوشش) به‌عنوان واقعیت زمینی ثبت شد (شکل ۴) و با استفاده از ماتریس خطا، صحت کلی (رابطه ۱)، ضریب کاپا (رابطه ۲)، صحت تولیدکننده (رابطه ۳) و صحت کاربر (رابطه ۴) مورد محاسبه گردید (جدول ۱). به منظور بررسی مطابقت محدوده‌ای روشن‌های استخراجی با واقعیت زمینی از روش ارزیابی تطابق هندسی (کیفی) محدوده روشن‌ها استفاده شد. هدف استخراج محدوده روشن‌ها، ارائه یک پلی‌گون مشخص و واحد به ازای هر یک از روشن‌های مرجع (واقعیت زمینی) است. با بررسی نقاط نمونه (مرکز روشن‌ها) که واقعیت زمینی آن به‌عنوان طبقه روشن ثبت شده و نیز در محل روشن‌هایی که در عرصه



شکل ۴- موقعیت و پراکنش نقاط واقعیت زمینی بر روی ارتوفتوموزاییک منطقه
Figure 4. Position and distribution of terrestrial reality points on the orthophotomosaic area

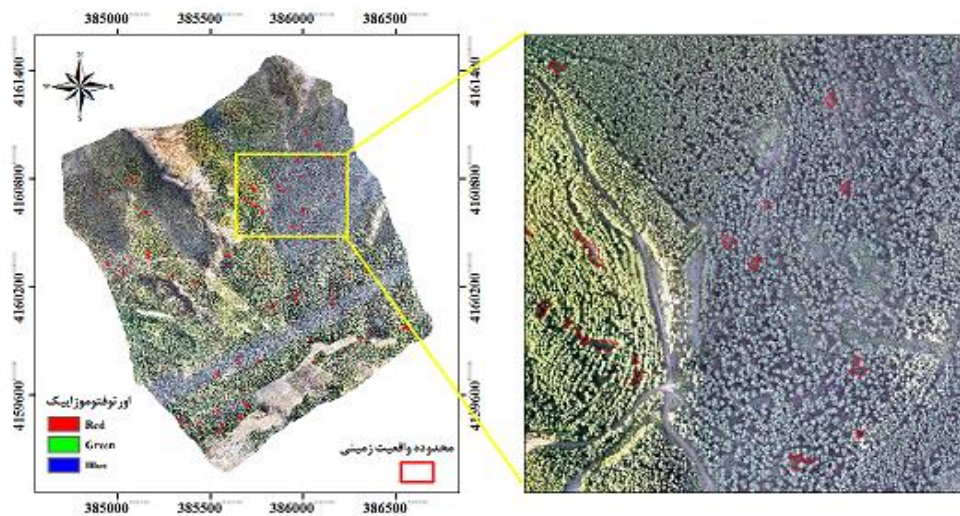
جدول ۱- معادلات ارزیابی صحت نقطه‌ای روشن‌ها

Source منبع	Formula فرمول	Equations معادلات	
1	$O.A = \frac{\sum_{i=0}^C E_{ii}}{N}$	Overall accuracy (O.A) صحت کلی (O.A) C = Number of class, N= Total number of known pixel, Eii= Diagonal members of the error matrix تعداد طبقات، N: تعداد کل پیکسل‌های معلوم، Eii: اعضای قطری ماتریس خطا،	رابطه ۱
42	$kappa = \frac{P_i - P_c}{1 - P_c} \times 100$	Kappa coefficient ضریب کاپا Pi= Overall accuracy observed, Pc= Chance agreement Pi: درستی مشاهده‌شده، Pc: توافق مورد انتظار Producer Accuracy (PA) صحت تولیدکننده (PA)	رابطه ۲
48	$PA = \frac{t_a}{g_a} \times 100$	ta= Number of correctly classified pixels of a particular class ga= Number of reference pixels of the same class ta: تعداد پیکسل‌های صحیح طبقه‌بندی‌شده به‌عنوان کلاس a، ga: تعداد پیکسل‌های کلاس a در واقعیت زمینی	رابطه ۳
48	$UA = \frac{t_a}{n_1} \times 100$	User Accuracy (UA) صحت کاربر (UA) ta= Number of correctly classified pixels of a particular class n1= Number of classified pixels in the class ta: تعداد پیکسل‌های صحیح طبقه‌بندی‌شده به‌عنوان کلاس a، n1: تعداد پیکسل‌های کلاس a در طبقه‌بندی	رابطه ۴

جدول ۲- معیارهای ارزیابی تطابق هندسی روشن‌ها (Ar(i): مساحت کل روشن‌های مرجع، As(j): مساحت کل روشن‌های استخراج‌شده، Ar(i) ∩ As(j): مساحت کل هم‌پوشانی روشن‌های استخراج‌شده و مرجع، شاخص D: مشتق شده از مقادیر بیش قطعه‌بندی (OS) و کم قطعه‌بندی (US))

Table 2. Criteria for evaluating the geometric conformity of canopy gap (Ar(i): illustrate total area of reference objects, As(j): show total area of evaluated segments, Ar(i) ∩ As(j): The total area of overlap is extracted and reference canopy gap, Index D: derived from Oversegmentation (OS) and Undersegmentation (US))

Source منبع	Formula فرمول	Criteria معیارها	
12	$1 - \frac{A_{r(i)} \cap A_{s(j)}}{A_{r(i)}}$	Oversegmentation (os) بیش قطعه‌بندی (OS)	رابطه ۵
12	$1 - \frac{A_{r(i)} \cap A_{s(j)}}{A_{s(j)}}$	Undersegmentation (US) کم قطعه‌بندی (US)	رابطه ۶
35	$\sqrt{\frac{OS^2 + US^2}{2}}$	Index D شاخص D	رابطه ۷



شکل ۵- موقعیت و پراکنش پلی‌گون‌های بر روی ارتوفتوموزاییک منطقه
Figure 5. Position and distribution of polygons on the orthophotomosaic area

ارتفاعی سه متر دارای صحت کلی، صحت تولیدکننده و ضریب کاپا بیشتری نسبت به آستانه ارتفاعی سه متر و صحت کاربر کمتری در استخراج طبقه روشنه دارد. همچنین نتایج حاصل از ارزیابی صحت طبقه‌بندی با ارتفاع سه متر نشان داد که این نقشه دارای صحت کلی ۹۶/۰۳ درصد و ضریب کاپا ۰/۹۲ است. همچنین نتایج ارزیابی استخراج روشنه نشان داد با افزایش حد آستانه ارتفاعی از دو متر به شش متر صحت کاربر کاهش و صحت تولیدکننده افزایش یافت. به‌منظور بررسی دقیق و تعیین حد آستانه شیب مدل ارتفاعی تاج‌پوشش، مقادیر شیب مدل ارتفاعی تاج ۶۰، ۶۵، ۷۰ و ۷۵ درصد را به‌عنوان حد آستانه تفکیک روشنه انتخاب شدند هرکدام به‌صورت جداگانه ارزیابی صحت نقطه‌ای شدند. در این روش بهترین صحت کلی مربوط به حد آستانه شیب ۷۰٪ بود که به‌عنوان طبقه نهایی با صحت کلی ۸۲/۱۱ درصد و ضریب کاپا ۰/۶ انتخاب شد (جدول ۳).

نتایج و بحث

ارزیابی صحت نقطه‌ای روش‌های آستانه ارتفاعی ثابت و شیب مدل ارتفاعی تاج‌پوشش جنگل (CHM)

پس از طبقه‌بندی مدل رقومی ارتفاع تاج‌پوشش (CHM) با تعریف حد ارتفاعی مختلف دو، سه، چهار، پنج و شش متر دوطبقه روشنه و تاج‌پوشش جنگل حاصل گردید. به‌منظور ارزیابی دقت پارامترهای آماری ضریب کاپا، صحت کلی و ماتریس خطای طبقه‌بندی برای هر یک از نقشه‌ها با استفاده از ۳۰۲ نمونه زمینی به‌صورت تصادفی (تعدادی با برداشت‌های میدانی با DGPS و تعدادی هم بر روی ارتوموزاییک) استخراج و محاسبه گردید. نتایج حاصل از ارزیابی صحت نقطه‌ای نقشه‌های آستانه ارتفاعی ثابت نشان داد که همه نقشه‌ها دارای صحت کلی قابل قبولی هستند؛ اما بهترین صحت کلی مربوط به طبقه‌بندی حد ارتفاعی سه متر بود که به‌عنوان طبقه‌بندی نهایی انتخاب گردید. آستانه

جدول ۳- ارزیابی صحت نقطه‌ای نقشه‌های حاصل از اعمال آستانه ارتفاعی ثابت و شیب مدل ارتفاعی تاج‌پوشش

Table 3. Evaluation of the point accuracy of the maps obtained from the application of a fixed height threshold and the slope of the canopy height model

Kappa Coefficient ضریب کاپا	Overall accuracy (%) صحت کلی (درصد)	Producer Accuracy (%) صحت تولیدکننده (درصد)		User Accuracy (%) صحت کاربر (درصد)		Method روش
		Canopy تاج پوشش	Gap روشنه	Canopy تاج پوشش	Gap روشنه	
0.91	95.69	99.34	92.05	92.59	99.29	Height threshold 2m آستانه ارتفاعی دو متر
0.92	96.03	98.01	94.04	94.27	97.93	Height threshold 3m آستانه ارتفاعی سه متر
0.90	95.36	96.69	94.04	94.19	96.60	Height threshold 4m آستانه ارتفاعی چهار متر
0.88	94.37	94.04	94.70	94.67	94.08	Height threshold 5m آستانه ارتفاعی پنج متر
0.82	91.39	88.08	94.70	94.33	88.82	Height threshold 6m آستانه ارتفاعی شش متر
0.58	79.13	92.72	65.56	72.92	90.00	Slope 60% CHM شیب ۶۰٪ مدل ارتفاعی تاج
0.62	81.12	90.73	71.52	76.11	88.52	Slope 65% CHM شیب ۶۵٪ مدل ارتفاعی تاج
0.64	82.11	88.08	76.16	78.70	86.47	Slope 70% CHM شیب ۷۰٪ مدل ارتفاعی تاج
0.62	81.45	84.77	78.15	79.50	83.69	Slope 75% CHM شیب ۷۵٪ مدل ارتفاعی تاج

ارزیابی صحت نقطه‌ای روش طبقه‌بندی شیء پایه حاصل از تصاویر پهپاد

در این پژوهش الگوریتم‌های مبتنی بر طبقه‌بندی شیء پایه تصاویر پهپاد شامل الگوریتم‌های نزدیک‌ترین همسایه، جنگل تصادفی، ماشین بردار پشتیبان، درخت تصمیم‌گیری و بیز در

استخراج روشنه مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج ارزیابی صحت نقطه‌ای نشان داد که در روش طبقه‌بندی شیء پایه، الگوریتم ماشین بردار پشتیبان با صحت کلی ۹۹٪ و ضریب کاپا ۰/۹۸ دارای بیشترین دقت نسبت به سایر الگوریتم‌ها بوده است (جدول ۴).

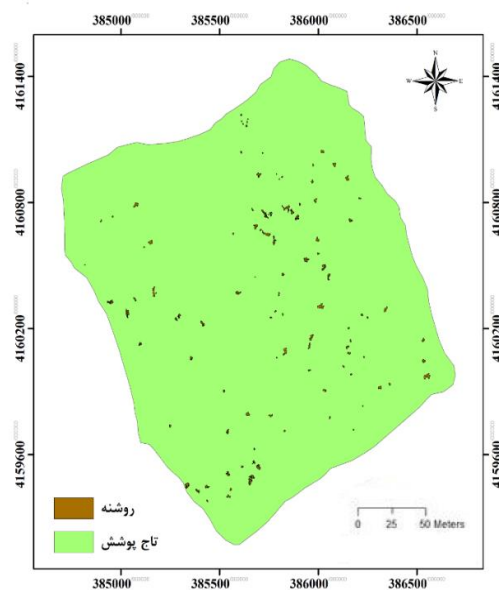
جدول ۴- ارزیابی صحت نقطه‌ای الگوریتم‌های شیء پایه

Table 4. Evaluation of the point accuracy of object-based algorithms

Kappa Coefficient ضریب کاپا	Overall accuracy (%) صحت کلی (درصد)	Producer Accuracy (%) صحت تولیدکننده (%)		User Accuracy (%) صحت کاربر (درصد)		Algorithm الگوریتم
		canopy تاج پوشش	Gap روشنه	canopy تاج پوشش	Gap روشنه	
0.84	92.38	93.38	91.39	91.56	93.24	Nearest Neighbor نزدیک‌ترین همسایه
0.94	97.01	98.68	95.36	95.51	98.63	Random Forest جنگل تصادفی
0.98	99.00	99.34	98.68	98.68	99.33	Support Vector Machine ماشین بردار پشتیبان
0.96	98.34	96.69	100	100	96.79	Decision Tree درخت تصمیم‌گیری
0.94	97.35	97.35	97.35	97.35	97.35	Bayes بیز
0.92	96.35	98.68	94.04	94.30	98.61	K- Nearest Neighbor k در روش نزدیک‌ترین همسایه

ارتفاعی با صحت کلی ۷۹/۱۳ درصد و ضریب کاپا ۰/۵۸ مشاهده شد. شکل ۶ نتایج بهترین طبقه‌بندی شیء پایه با الگوریتم ماشین بردار پشتیبان را نشان می‌دهد.

با در نظر گرفتن مجموع روش‌های استخراج روشنه، الگوریتم ماشین بردار پشتیبان بیشترین صحت کلی و ضریب کاپا را به ترتیب با مقادیر ۹۹ درصد و ۰/۹۸ را دارا بود. کمترین صحت استخراج طبقات، در روش آستانه شیب ۶۰ درصد مدل



شکل ۶- نتایج طبقه‌بندی شیء پایه با الگوریتم ماشین بردار پشتیبان
Figure 6. Results of object classification with support vector machine algorithm

ارزیابی تطابق هندسی محدوده‌ای روش‌ها

برای تخمین کیفیت نکویی طبقه‌بندی روشنه‌ها، سه معیار

کیفیت طبقه‌بندی برای روش‌های شناسایی و تهیه نقشه روشنه‌ها محاسبه شد (جدول ۵).

جدول ۵- ارزیابی تطابق هندسی محدوده‌ای روش‌های آستانه ارتفاعی ثابت و شیب مدل ارتفاعی تاج پوشش CHM
Table 5. Evaluation of geometric conformity of the range of fixed height threshold and slope methods of CHM canopy height model

Index D (RMS) (RMS) شاخص D	Undersegmentation (US) (US) کم طبقه‌بندی	Oversegmentation (os) (OS) بیش طبقه‌بندی	Method روش
0.15	0.04	0.21	Height threshold 2m آستانه ارتفاعی ۲ متر
0.06	0.06	0.05	Height threshold 3m آستانه ارتفاعی سه متر
0.16	0.22	0.04	Height threshold 4m آستانه ارتفاعی چهار متر
0.27	0.38	0.03	Height threshold 5m آستانه ارتفاعی پنج متر
0.35	0.5	0.01	Height threshold 6m آستانه ارتفاعی شش متر
0.36	0.03	0.51	Slope 60% CHM شیب ۶۰٪ مدل ارتفاعی تاج
0.34	0.04	0.47	Slope 65% CHM شیب ۶۵٪ مدل ارتفاعی تاج
0.31	0.05	0.44	Slope 70% CHM شیب ۷۰٪ مدل ارتفاعی تاج
0.26	0.06	0.37	Slope 75% CHM شیب ۷۵٪ مدل ارتفاعی تاج

نتایج نشان می‌دهد بین مقادیر بیش طبقه‌بندی در روش آستانه ارتفاعی، به جز در آستانه ارتفاعی دو متر در بقیه آستانه‌های ارتفاعی تفاوت چندانی وجود ندارد و تقریباً ثابت است. در آستانه ارتفاع دو متر خطای کم طبقه‌بندی سطح روشن‌ها اندک (۰/۰۴) و در عین حال خطای بیش طبقه‌بندی قابل توجهی (۰/۲۱) نسبت به سایر طبقه‌بندی‌ها در روش آستانه ارتفاعی برای سطح روشن‌های استخراج شده نشان می‌دهد. آستانه ارتفاعی شش متر دارای کمترین خطای بیش طبقه‌بندی (۰/۰۱) و بیشترین خطای کم طبقه‌بندی (۰/۵) سطح پلی‌گون‌ها در روش طبقه‌بندی آستانه ارتفاعی بر روی مدل ارتفاعی تاج پوشش CHM است. آستانه ارتفاعی سه متر با خطای بیش طبقه‌بندی (۰/۰۵) و خطای کم

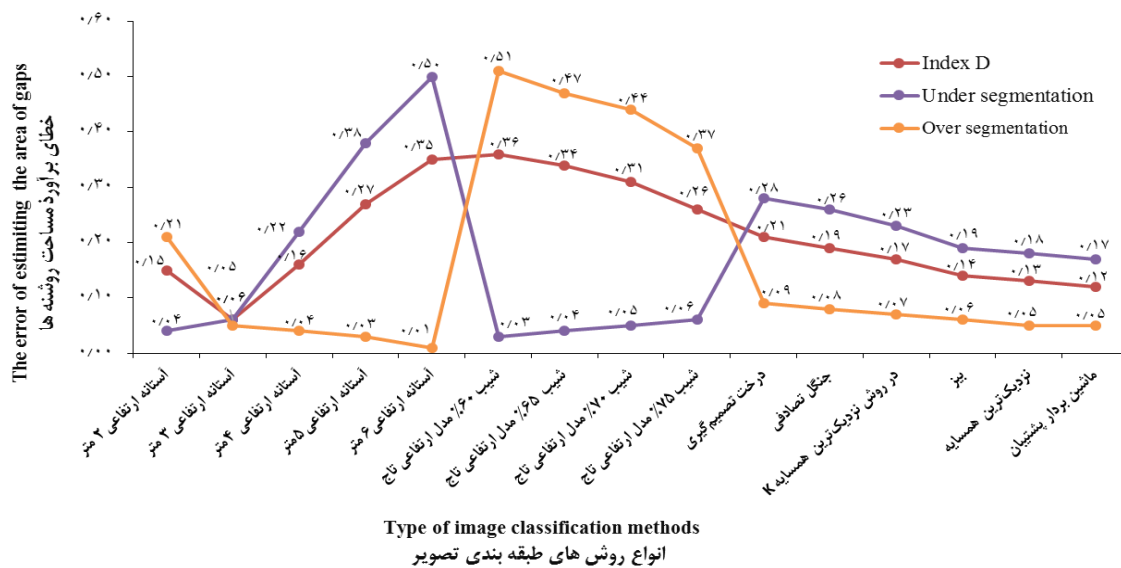
طبقه‌بندی (۰/۰۶) و شاخص D (۰/۰۶) که تطابق بهتری بین سطح روشن‌های مرجع و روشن‌های استخراج شده را نشان می‌دهد. دقیق‌ترین طبقه‌بندی از بین روش‌های آستانه ارتفاعی و شیب مدل ارتفاعی تاج پوشش در ارزیابی تطابق هندسی محدوده‌ای است. با در نظر گرفتن معیارهای کیفیت طبقه‌بندی می‌توان نتیجه گرفت که الگوریتم ماشین بردار پشتیبان از نظر تمام معیارهای کیفیت، خطای بیش طبقه‌بندی (۰/۰۵) و خطای کم طبقه‌بندی (۰/۱۷) و شاخص D (۰/۱۲) بهتر عمل کرده است و تطابق بهتری بین سطح روشن‌های مرجع و روشن‌های استخراج شده ایجاد کرده است و نسبت به سایر الگوریتم‌های روش شیب پایه نتایج دقیق‌تری را در ارزیابی تطابق هندسی محدوده‌ای ارائه می‌دهد (جدول ۶).

جدول ۶- ارزیابی تطابق هندسی محدوده‌ای روش طبقه‌بندی شیء پایه
Table 6. Evaluation of the geometric conformity of the scope of the object object classification method

Index D (RMSE) (RMS) شاخص D	Undersegmentation (US) (US) کم طبقه‌بندی	Oversegmentation (os) (OS) بیش طبقه‌بندی	Algorithm الگوریتم	Method روش
0.21	0.28	0.09	Decision Tree درخت تصمیم‌گیری	Object base شیء پایه
0.19	0.26	0.08	Random Forest جنگل تصادفی	
0.17	0.23	0.07	K- Nearest Neighbor K در روش نزدیک‌ترین همسایه	
0.14	0.19	0.06	Bayes بیز	
0.13	0.18	0.05	Nearest Neighbor نزدیک‌ترین همسایه	
0.12	0.17	0.05	Support Vector Machine ماشین بردار پشتیبان	

نتایج به‌طور قابل توجهی نشان می‌دهد، تصویر طبقه‌بندی شده آستانه ارتفاعی سه متر در روش طبقه‌بندی آستانه ارتفاعی بر روی مدل ارتفاعی تاج پوشش CHM دقیق‌تر از سایر روش‌ها از نظر تمام معیارهای کیفیت بوده است (شکل ۷).

نتایج به‌طور قابل توجهی نشان می‌دهد، تصویر طبقه‌بندی شده آستانه ارتفاعی سه متر در روش طبقه‌بندی آستانه ارتفاعی بر روی مدل ارتفاعی تاج پوشش CHM دقیق‌تر از سایر روش‌ها از نظر تمام معیارهای کیفیت بوده است (شکل ۷).



شکل ۷- مقایسه روش‌های مختلف تشخیص روشن‌تاج از نظر تطابق مساحت روشن‌تاج‌های استخراج‌شده

Figure 7. Comparison of different methods of clear detection in terms of matching the area of the extracted samples

ارتفاعی ثابت با صحت کلی ۹۶/۵ درصد نسبت به آستانه ارتفاعی نسبی با صحت کلی ۸۹/۵ درصد در شناسایی روشن‌تاج عملکرد مطلوبی دارد؛ زیرا تیپ غالب جنگل از نوع سوزنی‌برگ بود که نسبت به جنگل‌های پهن‌برگ فاقد تغییرات شدید ارتفاع تاج‌پوشش است؛ که نتیجه این پژوهش با نتایج پژوهش حاضر مطابقت دارد.

نتایج حاصل از ارزیابی صحت نقطه‌ای در روش آستانه شیب‌های متفاوت مدل ارتفاعی تاج‌پوشش نشان داد حد آستانه شیب ۷۰٪، با صحت کلی ۸۲/۱۱ و ضریب کاپا ۰/۶ نسبت به سایر شیب‌ها بهترین نتیجه را داد؛ اما این روش نسبت به دو روش دیگر (حد آستانه ارتفاعی و الگوریتم‌های روش شیب‌پایه) دارای بدترین عملکرد در استخراج و شناسایی روشن‌تاج‌ها داشت. امینی (۲) در تحقیق خود به بررسی و مقایسه روش‌های استخراج روشن‌تاج در تهیه نقشه روشن‌تاجی با استفاده از داده‌های پهپاد در بخشی از توده مدیریت‌شده طرح جنگلداری دکتر بهرام نیا (صحت کلاته) پرداخت. استخراج روشن‌تاج‌ها را با روش‌های آستانه‌گذاری مدل ارتفاعی تاج (ارتفاع و شیب ثابت و ارتفاع نسبی) و طبقه‌بندی شیب‌پایه مدل ارتفاعی تاج و ارتوموزائیک پهپاد انجام داد. نتایج ارزیابی صحت نقطه‌ای نشان داد که به‌کارگیری روش آستانه شیب ۶۰٪ با صحت کلی ۹۱/۷٪ و ضریب کاپا ۰/۸۷ دارای بهترین نتیجه نسبت به سایر روش‌های استخراج روشن‌تاج بوده است؛ که با نتایج به‌دست‌آمده در پژوهش حاضر مغایرت دارد.

در آنالیز شیب‌پایه تصاویر در مقایسه با آنالیز پیکسل پایه، از اطلاعات بیشتری از جمله اطلاعات هندسی مربوط به شکل عوارض و نحوه قرارگیری آن‌ها، اطلاعات کمکی (مدل‌های رقومی ارتفاع، شاخص‌های متنوع تصویری) برای طبقه‌بندی پدیده‌ها و عوارض استفاده گردید. در این روش قطعه‌بندی مبنای طبقه‌بندی محسوب می‌شود و هرچقدر قطعه‌بندی با دقت بالاتری انجام گیرد در کیفیت طبقه‌بندی تأثیر دارد. در

در پژوهش حاضر پس از تهیه مدل رقومی ارتفاع زمین (DTM) و مدل رقومی سطح (DSM) از اختلاف این دو مدل، مدل رقومی ارتفاع تاج‌پوشش CHM تهیه گردید که حاوی اطلاعات ارتفاعی هر نقطه از تاج درختان و درختچه‌ها است. از همین قابلیت برای شناسایی و تهیه نقشه‌های روشن‌تاج‌پوشش استفاده شد. نقشه‌های حاصل از طبقه‌بندی مدل رقومی ارتفاعی تاج‌پوشش با ارتفاع‌های آستانه دو تا شش دارای صحت قابل قبولی بودند؛ اما طبقه‌بندی مدل رقومی ارتفاعی تاج‌پوشش با حد آستانه ارتفاعی سه متر دارای بیشترین صحت نقطه‌ای (صحت کلی ۹۶/۰۲ درصد و ضریب کاپای ۰/۹۲) به‌عنوان بهترین حد ارتفاعی جداسازی روشن‌تاج از تاج درختان برای منطقه مورد مطالعه پیشنهاد شد. گالتون و مالتوس (۱۷) در پژوهش خود به‌منظور شناسایی و استخراج روشن‌تاج به این نتیجه رسیدند که آمیختگی و ناهم‌ساز بودن توده مورد بررسی و در نتیجه تغییرات چشم‌گیر ارتفاع درختان شکل‌دهنده تاج‌پوشش، می‌تواند سبب کاهش دقت روش آستانه ارتفاع ثابت در تفکیک روشن‌تاج باشد. به‌علاوه، با توجه به اجرای شیوه تک‌گزینی و متفاوت بودن سن روشن‌تاج‌ها، ارتفاع نهال‌ها و خال‌های درون روشن‌تاج و متفاوت بودن مراحل تحولی که هر یک از روشن‌تاج‌ها در گذر زمان طی کرده‌اند، تعیین یک حد آستانه ارتفاع ثابت می‌تواند سبب نادیده گرفتن روشن‌تاج‌های مسن‌تر شود (۵۸). امینی (۲) نیز در پژوهش خود به این نتیجه رسیدند وجود زادآوری‌های بلندتر (پیش از بسته شدن کامل روشن‌تاج) دقت آستانه ارتفاع ثابت را در تفکیک روشن‌تاج کاهش می‌دهد. این یافته با نتایج بررسی حاضر مغایرت دارد. علت این تفاوت می‌تواند متفاوت بودن تیپ جنگل مورد بررسی باشد؛ زیرا در هر سه پژوهش تیپ غالب مناطق، پهن‌برگ بوده است. در حالی که تیپ غالب منطقه مورد مطالعه سوزنی‌برگ است. وایت و همکاران (۵۵) در شناسایی روشن‌تاج‌پوشش جنگلی در جنگل‌های بارانی به این نتیجه رسیدند که آستانه

اندازه روشنه در تشریح و تعیین حدود آشفستگی و میزان دسترسی به منابع مؤثر است، اما اندازه‌گیری آن دشوار است. شاخص D نشان‌دهنده برآیند دو خطای بیش طبقه‌بندی و کم طبقه‌بندی پلی گون روشنه‌های استخراج‌شده نسبت به پلی گون روشنه‌های مرجع است و برای انتخاب روش بهینه تفکیک به کار می‌رود. نتایج ارزیابی تطابق هندسی محدوده‌های نشان داد به‌جز الگوریتم درخت تصمیم گیر سایر الگوریتم‌ها در روش شیء پایه از نظر مقادیر شاخص D تقریباً مشابه بودند. بدین معنی تطابق مجموع پلی گون روشنه‌های استخراج‌شده با پلی گون روشنه‌های مرجع در الگوریتم‌های روش شیء پایه تقریباً مشابه بوده است. همچنین نتایج نشان داد در روش‌های آستانه ارتفاعی ثابت و شیب مدل ارتفاعی تاج‌پوشش جنگل مقادیر شاخص D دارای مقادیر متفاوتی بوده است که عدم انطباق مجموع پلی گون روشنه‌های استخراج‌شده با پلی گون روشنه‌های مرجع را در این دو روش نشان می‌دهد. همچنین نتایج ارزیابی تطابق هندسی محدوده‌های نشان داد آستانه ارتفاعی سه متر در روش آستانه ارتفاع ثابت با خطای بیش طبقه‌بندی (۰/۰۵) و خطای کم طبقه‌بندی (۰/۰۶) و شاخص D (۰/۰۶) تطابق بهتری بین سطح روشنه‌های مرجع و روشنه‌های استخراج‌شده را نشان می‌دهد که در این تحقیق به‌عنوان دقیق‌ترین طبقه‌بندی از بین سایر روش‌ها در ارزیابی تطابق هندسی محدوده‌های است؛ که این نتایج با یافته‌های بونت و همکاران (۷) مطابقت دارد. آن‌ها در تحقیق خود به این نتیجه رسیدند که صحت نقشه‌های حاصل از به‌کارگیری داده‌های طیفی به دلیل ساختار ناخالص، ناهمسان و تراکم متفاوت، از صحت نقشه‌های حاصل از اطلاعات ارتفاعی کمتر بود و در صورت استفاده از داده‌های ارتفاعی، محدوده روشنه واضح‌تر از داده‌های طیفی خواهد بود. به همین دلیل، این نوع داده‌ها را برای شناسایی روشنه مناسب‌تر از اطلاعات طیفی دانستند.

نتیجه‌گیری کلی

نتایج نشان داد در منطقه مطالعاتی با توجه به هدف تهیه نقشه روشنه چنانچه صرفاً تفکیک نقطه‌ای روشنه مدنظر باشد. استفاده از الگوریتم ماشین بردار پشتیبان روشنه‌ها را با بالاترین صحت (۹۹ درصد) و ضریب کاپا (۰/۹۸) طبقه‌بندی می‌کند؛ اما در صورتی که صحت و تطابق محدوده‌ای روشنه‌های استخراج‌شده مدنظر باشد، روش آستانه ارتفاعی سه متر با دارا بودن صحت کلی ۹۶ درصد، خطای بیش طبقه‌بندی (۰/۰۵) و خطای کم طبقه‌بندی (۰/۰۶) و شاخص D (۰/۰۶) روشنه‌ها را با تطابق نزدیک به روشنه‌های مرجع طبقه‌بندی می‌کنند. بنابراین به‌طور کلی مشخص گردید که تصاویر پهپاد و مدل‌های ارتفاعی حاصل از آن قابلیت شناسایی و تهیه نقشه روشنه‌ها را با دقت محدوده‌ای بسیار بالا دارند و می‌توانند در برنامه‌ریزی‌های مدیریت جنگل و تحلیل و پایش روشنه‌ها مورد استفاده قرار گیرند.

نتایج طبقه‌بندی عوامل متعددی از جمله داده‌های ورودی، وزن لایه‌ها، شکل، پیچیدگی و پارامتر مقیاس، بسیار مؤثر است (۳۶). در این پژوهش از ضرایب شکل، فشردگی و مقیاس‌های متفاوت جهت طبقه‌بندی استفاده شد. این پارامترها مقادیر معینی ندارد و می‌بایست توسط کاربر در محیط نرم‌افزار eCognition مشخص شود. اندازه مقیاس بر اساس همگنی یا ناهمگنی منطقه تعیین می‌شود. اگر منطقه مطالعاتی از نظر کاربری ناهمگنی بالایی داشته باشد قاعدتاً باید میزان مقیاس پایین باشد تا بتوان طبقه‌بندی دقیقی ایجاد کرد؛ اما اگر منطقه همگن باشد می‌توان مقدار مقیاس را عدد بالا در نظر گرفت Xuegang و همکاران (۵۷) در پژوهش خود در جنگل‌های ثانویه چین برای تفکیک خودکار روشنه‌ها به این نتیجه رسیدند که صحت تفکیک روشنه تحت تأثیر مقیاس طبقه‌بندی قرار می‌گیرد. طبقه‌بندی هم از نظر هندسی (انطباق دقیق مرز قطعات بر پدیده‌ها) و هم از نظر مفهومی (اختصاص هر قطعه نمونه برای یک طبقه) قابل ارزیابی است (۵۶). روش‌های مختلف ارزیابی نتایج طبقه‌بندی توسط محققینی چون ژانگ (۵۸) و هوور (۲۲) بررسی شده‌اند، اما قابل‌اعتمادترین روش ارزیابی، تفسیر بصری و استفاده از چشم انسان است؛ بنابراین نتیجه هیچ نوع طبقه‌بندی پذیرفته نخواهد بود، مگر این‌که از دید مفسر راضی‌کننده باشد (۳). نتایج بر اساس تفسیر بصری نشان داد با افزایش مقیاس از ۱۰ به ۵۰ هر قطعه نمونه به یک طبقه اختصاص یافت و مرز قطعات بر پدیده‌ها منطبق بود. همچنین نتایج طبقه‌بندی نشان داد با افزایش مقیاس از ۱۰ به ۵۰ صحت کلی و ضریب کاپا صحت نقطه‌ای طبقه‌بندی روشنه افزایش یافت.

نتایج طبقه‌بندی ارزیابی صحت نقطه‌ای الگوریتم‌های مختلف روش شیء پایه نشان داد الگوریتم ماشین بردار پشتیبان با صحت کلی ۹۹ درصد، الگوریتم درخت تصمیم گیر ۹۸ درصد، الگوریتم بیز ۹۷/۳۵ درصد، الگوریتم جنگل تصادفی ۹۷/۰۱ درصد، الگوریتم K در روش نزدیک‌ترین همسایه ۹۶/۳۵ درصد و الگوریتم نزدیک‌ترین همسایه ۹۲/۳۸ درصد در استخراج و شناسایی روشنه دارند که ماشین بردار پشتیبان دارای بهترین عملکرد در بین الگوریتم‌های مختلف طبقه‌بندی بود. Xuegang و همکاران (۵۷) در پژوهش خود که از تصاویر ارتوفتو عکس‌های هوایی و داده‌های لیدار برای تفکیک خودکار روشنه‌ها در یک جنگل ثانویه طبیعی در شمال شرقی چین برای طبقه‌بندی روشنه‌ها از الگوریتم‌های مختلف روش شیء پایه استفاده کردند ارزیابی صحت نقطه‌ای نشان داد. الگوریتم ماشین بردار پشتیبان با صحت کلی ۹۰ درصد، الگوریتم درخت تصمیم گیر ۹۰ درصد، الگوریتم بیز ۹۰ درصد و الگوریتم K نزدیک‌ترین همسایه ۸۷ درصد، توانستند استخراج و شناسایی روشنه‌ها را انجام دهند. همچنین به این نتیجه رسیدند که صحت تفکیک روشنه تحت تأثیر مقیاس طبقه‌بندی کننده قرار می‌گیرد؛ که با نتایج به‌دست‌آمده در پژوهش حاضر مطابقت دارد.

ارزیابی تطابق هندسی محدوده‌ای برای درک و کمی‌سازی الگوی پراکنش روشنه‌ها ضروری است (۵۴). شکل و توزیع

منابع

1. Alavi Panah, S.K. 2005. Application of Remote Sensing in Earth Sciences. University of Tehran Publications. 268 p (In Persian).
2. Amini, SH. 2022. Quantitative and dynamic analysis of geometric characteristics and spatial patterns of canopy gaps using unmanned Aerial vehicles in managed and unmanaged stands (In the Dr. Bahramnia forestry plan), Gorgan, Iran, 160 pp (In Persian).
3. Baatz, M. and A. Schape. 1999. Object-oriented and multi-scale image analysis in semantic network. in Proc. of 2nd Int. symposium on operationalization of remote sensing, Enschede, ITC, 148-157.
4. Bi, S., Y. Tan, Y. Wang, M. Liu and M. Xuegang. 2020. Quantification of Spatial Structure Characteristics of Typical Natural Secondary Forest Gaps in Northeastern China. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-38728/v1>.
5. Blaschke, T. 2014. Object based image analysis for remote sensing. ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing, 65(1): 2-16.
6. Booklet of Arab Dag hot breeding plan, 2016. General Department of Natural Resources and Watershed Management of Golestan Province. 697.
7. Bonnet, S., R. Gaulton, F. Lehaire and P. Lejeune. 2015. Canopy gap mapping from airborne laser scanning: An assessment of the positional and geometrical accuracy. Remote Sensing, 7(9): 11267-11294. <https://doi.org/10.3390/rs70911267>
8. Brokaw, N.V.L. 1982. The definition of treefall gap and its effect on measures of forest dynamics. Biotropica, 14: 158-160.
9. Chaudhuri, B. and N. Sarkar. 1995. Texture segmentation using fractal dimension. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 17: 72-77 pp.
10. Chung, C.H., C.H. Wang, C.H. Hsieh and C.Y. Huang. 2022. Comparison of forest canopy height profiles in a mountainous region of Taiwan derived from airborne lidar and unmanned aerial vehicle imagery. GISci. Remote Sens, 56: 1289-1304 pp.
11. Choi, H., Y. Song and Y. Jang. 2019. Urban forest growth and gap dynamics detected by yearly repeated Airborne Light Detection and Ranging (LiDAR): a case study of Cheonan. South Korea, Remote Sensing, 11(13): 1551. <https://doi.org/10.3390/rs11131551>
12. Clinton, N., A. Holt, J. Scarborough, L. Yan and P. Gong. 2010. Accuracy assessment measure for object-based image segmentation goodness. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 289-299.
13. Daniels, L.D. and R.W. Gray. 2006. Disturbance regimes in coastal British Columbia. Br. Columbia Journal Ecosystem Management, 7(2): 44-56.
14. Darvishsefat, A.A., O. Rafieyan, S. Babai Kafaki and A. Mataji. 2010. Evaluation of UltraCam-D images capability for tree species identification using object-based method in the even-aged mixed forestation, Iranian Journal of Forest, 2(2): 165-176 (In Persian).
15. Delfan Abazari, B., KH. Sagheb-Talebi and M. Namiranian. 2004. Regeneration gaps and quantitative characteristics of seedlings in different development stages of undisturbed beech stands (Kelardasht, Northern Iran), Iranian Journal of Forest and Poplar Research, 12(2): 251-266 (In Persian).
16. Espirito-Santo, F.D.B., M.M. Keller, E. Linder, R.C. Oliveira Junior, C. Pereira and C.G. Oliveira. 2014. Gap formation and carbon cycling in the Brazilian Amazon: measurement using high-resolution optical remote sensing and studies in large forest plots. Plant Ecology Divers, 7(1-2): 305-318. <https://doi.org/10.1080/17550874.2013.795629>.
17. Gaulton, R. and T.J. Malthus. 2010. LiDAR mapping of canopy gaps in continuous cover forests: A comparison of canopy height model and point cloud based techniques. International Journal of Remote Sensing, 31(5): 1193-1211. <https://doi.org/10.1080/01431160903380565>
18. Gajardo, J., D. Riano, M. Garcia, J. Salas and M.P. Martin. 2020. Estimation of Canopy Gap Fraction from Terrestrial Laser Scanner Using an Angular Grid to Take Advantage of the Full Data Spatial Resolution. Remote Sensing, 17(12): 1596.
19. Getzin, S., R.S. Nuske and K. Wiegand. 2014. Using unmanned aerial vehicles (UAV) to quantify spatial gap patterns in forests. Remote Sensing, 6(8): 6988-7004. <https://doi.org/10.3390/rs6086988>.
20. Gu, J., H. Grybas and R.G. Congalton. 2020. A comparison of forest tree crown delineation from unmanned aerial imagery using canopy height models vs. spectral lightness. Forests, 11(6). <https://doi.org/10.3390/F11060605>
21. Hobi, M.L., C. Ginzler, B. Commarmot and H. Bugmann. 2015. Gap pattern of the largest primeval beech forest of Europe revealed by remote sensing. Ecosphere, 6(5). <https://doi.org/10.1890/ES14-00390.1>
22. Hoover, A. 1996. An experimental comparison range image segmentation algorithms, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 18(7): 673-689.
23. Hopkinson, C., L. Chasmer, A.G. Barr, N. Kljun, T.A. Black and J.H.M. McCaughey. 2016. Monitoring boreal forest biomass and carbon storage change by integrating airborne laser scanning.

- biometry and eddy covariance data. *Remote Sensing of Environment*, 181: 82-95. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.04.010>
24. Hunter, M.O., M. Keller, D. Morton, B. Cook, M. Lefsky, M. Ducey, S. Saleska, R.C. de Oliveira, J. Schiatti and R. Zang. 2015. Structural dynamics of tropical moist forest gaps. *Plos One* 10 (7): e0132144. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0132144>.
 25. Hunt, E.R., W.D. Hively. C.S. Daughtry. G.W. McCarty. S.J. Fujikawa.T.L. Ng. M. Tranchitella. D.S. Linden and D.W. Yoel. 2008. Remote sensing of crop leaf area index using unmannedairborne vehicles. In: *Proceedings of the Pecora 17 Symposium*, Denver, CO.
 26. Hytteborn, H. and T. Verwijst. 2013. Small-scale disturbance and stand structure dynamics in an old-growth *Picea abies* forest over 54 yr in central Sweden. *Journal Veg. Science*, 25: 100-112.
 27. Karagiannis, G., F.N. Castro and D. Mioc. 2016. Automated photogrammetric image matching with SIFT algorithm and Delaunay triangulation. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume III-2.
 28. Kavzoglu, T. and H. Tonbul. 2017. A comparative study of segmentation quality for multi-resolution segmentation and watershed transform. 8th International Conference on Recent Advances in Space Technologies (RAST), June, 113-117. <https://doi.org/10.1109/RAST.2017.8002984>
 29. Kent, R., J.A. Lindsell, G. Laurin, R. Valentini and D.A. Coomes. 2015. Airborne LiDAR Detects Selectively Logged Tropical Forest Even in an Advanced Stage of Recovery. *Remote Sensing*, 7: 8348-8367; doi:10.3390/rs70708348
 30. Koukoulas, S. and G.A. Blackburn. 2004. Quantifying the spatial properties of forest canopy gaps using LiDAR imagery and GIS. *International Journal Remote Sensing*, 25(15): 3049-3072. <https://doi.org/10.1080/014311603100016>
 31. Kousari Pelangi, Gh. 2015. Forest canopy gap detection and mapping using of Lidar data and aerial digital camera images. MSc Thesis, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran, 114 pp (In Persian).
 32. Küng, O., C. Strecha, A. Beyeler, J.C. Zufferey, D. Floreano, P. Fua and F. Gervais. 2011. The accuracy of automatic photogrammetric techniques on ultralight UAV imagery. In *UAV-g 2011-Unmanned Aerial Vehicle in Geomatics (No.EPFL-CONF-168806)*.
 33. Lertzman, K.P., G.D. Sutherland, A. Inselberg and S.C. Saunders. 1996. Canopy gaps and the landscape mosaic in a coastal temperate rain forest. *Ecology*, 77(4):1254-1270.
 34. Lombard, L., R. Ismail and N. Poona. 2019. Modelling forest canopy gaps using LiDAR-derived variables. *Geocarto Int.* 34(2): 179-193. <https://doi.org/10.1080/10106049.2017.1377775>.
 35. Lucieer, A. and A. Stein. 2002. Existential uncertainty of spatial objects segmented from satellite sensor imagery, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40(11).
 36. Mao, X., J. Hou and W. Fan. 2017. Object-Based Automatic Recognition for Forest Gaps Using Aerial Image and LiDAR Data. In *LinYE Kexue/Scientia Silvae Sinicae*, 53(11): 94-103. <https://doi.org/10.11707/j.1001-7488.20171111>
 37. Mlambo, R., H.I. Woodhouse, F. Gerard and K. Anderson. 2017. Structure from Motion (SfM) photogrammetry with drone data: A low cost method for monitoring greenhouse gas emissions from forests in developing countries. *Forests*, 68: 1-20.
 38. Micheletti, N., J.H. Chandler and S. Lane. 2013. Structure from motion (SfM) photogrammetry. *Geomorphological techniques*, 2(2): 1-11.
 39. Næsset, E. 2015. Vertical height errors in digital terrain models derived from airborne laser scanner data in a boreal-alpine ecotone in Norway. *Remote Sensing*, 7: 4702-4725.
 40. Nuske, R.S. 2019. Acquisition and Characterization of Canopy Gap Patterns of Beech Forests.
 41. Qinghong, L. and H. Hytteborn. 1991. Gap structure, disturbance and regeneration in a primeval *Picea abies* forest. *Journal Vegetation Science*, 2: 391-402.
 42. Richards, J.A. and J. Xiuoing. 1999. *Remote sensing Digital Image analysis*. 3 rd. Springer pud, 363 p.
 43. Runkle, J.R. 1982. Patterns of disturbance in some old-growth mesic forests of eastern North America. *Ecology*, 63(5): 1533-1546 pp.
 44. Salmani, S., H. Ebrahimi. K. Mohammadzade and K. Valizadeh Kamran. 2019. Evaluating efficiency of object-based classification techniques used to extract land use from IKONOS satellite imageries. *Scientific-Research Quarterly of Geographical Data (Sepehr)*, 28(111): 205-215.
 45. Sadeghzadeh, H. and A. Rostaghi. 2011. A Study of Vegetative Yield of Borussia Pine (Case Study: Arab-Dagh Forestry Project). *Iranian Forest Journal*, 3: 201-212 (In Persian).
 46. Shabanipour, M. 2011. Investigation of the possibility of distinguishing tree species in digital image with high spatial resolution by basic object classification method (Case study: Taleghani Park, Tehran). MScThesis, University of Tehran, Tehran, Iran,73 pp (In Persian).
 47. Shataee Joybari, Sh., A.A. Darvishsefat and H. Sobhani. 2007. Comparison of pixel-based and object-based approaches for forest type mapping using satellite data, *Journal of the Iranian Natural Resource*, 60(3): 869- 881 (In Persian).

48. Shataee Joybari, SH. 2003. Investigating the possibility of preparing a map of forest types using satellite data (case study: Nowshahr Khairudkanar Research Educational Forest), PhD Thesis, University of Tehran, 155 p.
49. Stark, S. 2012. Amazon forest carbon dynamics predicted by profiles of canopy leaf area and light environment. *Ecology Letters*, 15(12): 1406-1414.
50. Strasser, T. and S. Lang. 2015. Object-based class modelling for multi-scale riparian forest habitat mapping. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 37: 29-37.
51. Szuster, B.W., Q. Chen and M. Borger. 2011. A comparison of classification techniques to support land cover and land use analysis in tropical coastal zones. *Applied Geography*, 31(2): 525-532.
52. Torresan, C., A. Berton, F. Carotenuto, S.F. Di Gennaro, B. Gioli, A. Matese, F. Miglietta, C. Vagnoli, A. Zaldei and L. Wallace. 2017. Forestry applications of UAVs in Europe: a review. *International Journal of Remote Sensing*, 38(8-10): 2427-2447.
53. Valbuena, R., M. Maltamo, L. Mehtätalo and P. Packalen 2017. Key structural features of boreal forests may be detected directly using L-moments from airborne lidar data. *Remote Sensing of Environment*, 194: 437-446. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.10.024>
54. Vepakomma, U., B. St-Onge and D. Kneeshaw. 2008. Spatially explicit characterization of boreal forest gap dynamics using multi-temporal lidar data. *Remote Sens. Environ.* 112(5): 2326-2340. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2007.10.001>.
55. White, J.C., P. Tompalski, N.C. Coops and M.A. Wulder. 2018. Comparison of airborne laser scanning and digital stereo imagery for characterizing forest canopy gaps in coastal temperate rainforests. *Remote Sens. Environ.* 208, 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.02.002>.
56. Yu, Q., P. Gong, N. Clinton, G. Biging, M. Kelly and D. Schirokauer. 2006. Object-based detailed vegetation classification with airborne high spatial resolution remote sensing imagery. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 72(7): 799-811.
57. Xuegang, M., Z. Liang and W. Fan. 2020. Object-Oriented Automatic Identification of Forest Gaps Using Digital Orthophoto Maps and LiDAR Data. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 46(2): 177-192. <https://doi.org/10.1080/07038992.2020.1768515>
58. Zhang, K. 2008. Identification of gaps in mangrove forests with airborne LIDAR. *Remote Sensing Environ.* 112(5): 2309-2325. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2007.10.003>.
59. Zheng, G., G.L. Shen and M. Moskal. 2021. Characterizing spatiotemporal variations of forest canopy gaps using aerial laser scanning data. *International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation* 104.
60. Zielewska-Büttner, K., P. Adler, M. Ehmann and V. Braunisch. 2016. Automated detection of forest gaps in spruce dominated stands using canopy height models derived from stereo aerial imagery. *Remote Sensing*, 8(3): 1-21. <https://doi.org/10.3390/rs8030175>.
61. Zielewska-Büttner, K., P. Adler, M. Ehmann and V. Braunisch. 2017. Erratum: automated detection of forest gaps in spruce dominated stands using canopy height models derived from stereo aerial imagery. *Remote Sensing*, 9(5): 471.

Canopy Gap delineation using UAV data in Coniferous Forests using (Case Study: Arab Dagh Region in Golestan Province)

Zeynab Khalili¹, Asghar Fallah² and Shaban Shataee³

1-Ph.D. Student Forestry, Faculty of Natural Resources, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Iran, (Corresponding Author: z.khalili923@gmail.com)

2- Professor, Department of Forestry, Faculty of Natural Resources, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Iran

3- Professor, Department of Forestry, Faculty of Natural Resources, Gorgan Agricultural Sciences and Natural Resources University, Iran

Received: 28 May, 2022 Accepted: 13 July, 2022

Extended Abstract

Introduction and Objective: Forest canopy gaps play an important role in forest dynamics. Unmanned aerial vehicle (UAV) data provide demonstrated capacity to systematically and accurately detect and map canopy gaps and have been considered as an alternative way to describe the forest stands. This study aims to extract canopy gaps using UAV data and compare the performance of different canopy gap extraction methods in a part of the replanted forest in the Arab Dagh Region, Golestan Province, Iran.

Material and Methods: After the acquisition of UAV images and initial preprocessing, the digital terrain model (DTM), digital surface model (DSM), Canopy height model (CHM), and orthophoto mosaic were produced. CHM classification performs to extract forest gaps by different methods of height thresholding on CHM, CHM slope thresholding, and object-based classification. For performance evaluation of used methods and accuracy assessment of the canopy gap maps, the central position and boundary of some gaps were measured by DGPS. Finally, the point and polygon base accuracy of delineated gaps were assessed for each of the methods..

Results: The results of the point accuracy assessment showed that the canopy gap map obtained by object-based classification method with applying the support vector machine (SVM) algorithm with 99% overall accuracy and 0.98 kappa coefficient had the best performance compared to other algorithms and methods. About area accuracy assessment, the best match between delineated gaps and ground truth polygons was achieved by using 3 m height thresholding.

Conclusion: The results showed that with aerial images of the UAV and its outputs, as well as the use of automated methods, the map of the canopy gap can be accurately extracted. Of course, the degree of accuracy depends on several factors such as the type of drone and cameras used, flight parameters and so on. Given the results, it is hoped that this approach will gradually be used as a cheap and accurate method in forest surveying.

Keywords: Boundary geometric conformity, Canopy gap, Object-based, Thresholding, UAV