



بررسی مقایسه‌ای امکان برآورد برخی مشخصه‌های کمی ساختار توده‌های جنگل‌های خزری با استفاده از داده‌های رادار و تلفیق داده‌های رادار با لیدار

مهرسا یزدانی^{۱*}، شعبان شتابی جویباری^۲، جهانگیر محمدی^۳، یاسر مقصودی^۴

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد جنگلداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

۲. استاد دانشکده علوم جنگل، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

۳. استادیار دانشکده علوم جنگل، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

۴. استادیار دانشکده مهندسی ژئودزی و ژئوماتیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

مشخصات مقاله

پیشینه مقاله:

دریافت: ۲۳ مهر ۱۳۹۶

پذیرش: ۸ بهمن ۱۳۹۶

دسترسی اینترنتی: ۱ اسفند ۱۳۹۶

واژه‌های کلیدی:

داده‌های رادار

تلفیق رادار و لیدار

مشخصه‌های ساختار جنگل

جنگل‌های خزری

چکیده

هدف از تحقیق، مقایسه برآورد مشخصه‌های ساختاری حجم سرپا، رویه زمینی و تعداد درختان در هکتار توده‌های جنگلی خزری با استفاده از داده‌های رادار و تلفیق داده‌های رادار و لیدار در بخشی از سری یک و دو جنگل‌های شصت کلاته گرگان در استان گلستان است. اطلاعات مشخصه‌های ساختاری از ۳۰۷ قطعه نمونه دایره‌ای شکل در جنگل مورد مطالعه محاسبه و استخراج شد. پیش-پردازش‌ها و پردازش‌های مورد نیاز بر روی داده‌های خام راداری (سال ۲۰۰۹) و لیداری (سال ۱۳۹۰) صورت گرفت و مقادیر متناظر با قطعات نمونه زمینی بر روی همه شاخص‌های حاصل از داده‌های رادار و لیدار استخراج گردید. مدل‌سازی با استفاده از مشخصه‌های استخراجی راداری به صورت جداگانه و به صورت تلفیقی با لیدار با الگوریتم غیرپارامتریک جنگل تصادفی با ۷۵ درصد از قطعات نمونه انجام شد. ارزیابی اعتبار مدل‌سازی‌ها با استفاده از ۲۵ درصد باقی مانده قطعات نمونه و با معیارهای مجذور میانگین مربعات خطا و اریبی به صورت مطلق و نسبی صورت گرفت. نتایج نشان داد که مقدار درصد مجذور میانگین مربعات خطا و درصد اریبی با استفاده از داده‌های رادار به ترتیب برای حجم سرپا (۴۴/۰۹ درصد و ۰/۹۹- درصد)، رویه زمینی در هکتار (۳۵/۷۲ درصد و ۳/۱۵- درصد) و تعداد درختان در هکتار (۴۲/۷۳ درصد و ۳/۵۲ درصد) و با استفاده از تلفیق داده‌های رادار و لیدار به ترتیب برای حجم سرپا (۳۷/۲۳ درصد و ۰/۷۶ درصد)، رویه زمینی در هکتار (۳۱/۳۷ درصد و ۳/۱۴- درصد) و تعداد درختان در هکتار (۳۶/۴۴ درصد و ۰/۹۵ درصد) برآورد گردید. نتایج تحقیق نشان داد که تلفیق داده‌های رادار و لیدار سبب بهبود نتایج برآوردها به خصوص در مشخصه حجم سرپا نسبت به مواقعی که از داده راداری به صورت مجزا استفاده گردید شده است.

*مهرسا یزدانی 1991@gmail.com: پست الکترونیکی مسئول مکاتبات

مقدمه

جنگل‌های شمال کشور به جنگل‌های ناحیه رویشی هیرکانی یا خزری، جنگل‌های مرطوب و جنگل‌های صنعتی شمال شهرت یافته‌اند (۶). با تعیین و برآورد مشخصه‌های کمی درختان، اطلاعات اولیه به منظور برنامه‌ریزی درباره آینده جنگل حاصل می‌شود که برای مدیریت جنگل و پایش آن ضروری است (۱۲ و ۱۶). از طرفی دیگر لازمه مدیریت صحیح و پایدار در بهره‌برداری اصولی از آن، کسب اطلاعات دقیق و بهنگام از میزان موجودی جنگل است (۲۷). معمولاً تهیه اطلاعات مشخصه‌های کمی ساختار جنگل از طریق عملیات میدانی و با دقتی بالا صورت می‌گیرد، اما جمع‌آوری اطلاعات به روش زمینی، نیازمند صرف زمان و هزینه‌های زیادی است (۲۹). علاوه بر این، گستردگی سطح جنگل‌ها، کوهستانی بودن عرصه‌ها و هم‌چنین تغییرات شدید محیطی با فواصل زمانی کوتاه و نیاز به اطلاعات تغییر یافته، به‌کارگیری این روش‌ها را با چالش‌های جدی روبه‌رو ساخته است. این محدودیت‌ها به‌کارگیری فن‌آوری بهتری را در جهت حذف و یا کاهش موانع موجود به‌طور جدی مطرح می‌نماید (۳۲). استفاده از داده‌های منابع مختلف سنجش‌ازدوری به‌عنوان یکی از راهکارهای جایگزین مطرح هست که نیازمند بررسی قابلیت این داده‌ها در برآورد مشخصه‌های کمی ساختار جنگل در شرایط مختلف است. تحقیقات زیادی در جنگل‌های خزری با استفاده از منابع سنجش‌ازدور نوری (طول‌موج‌های مرئی و مادون‌قرمز) در برآورد برخی مشخصه‌های ساختاری جنگل انجام شده است (۲، ۴، ۲۶، ۳۸ و ۴۳) پایین بودن دقت حاصل شده از این مطالعات (بالا بودن نسبی میزان مجذور میانگین مربعات خطا) به دلیل استفاده از داده‌های بازتاب سطح پدیده‌ها و نیاز به بعد سوم (ارتفاع پدیده) توده‌های جنگلی با دقت بالا، برای محاسبه مشخصه‌های کمی ساختار جنگل مانند حجم سرپا را ضروری ساخت و نیاز به داده‌های سنجش‌ازدور با قابلیت تهیه اطلاعات ارتفاعی بیشتر گردید. استفاده از تصاویر و داده‌های سامانه‌های سنجش‌ازدور راداری و لیزر اسکنرهای هوایی و فضایی به دلیل تولید داده‌های تقریباً

سه‌بعدی و ارتفاعی می‌تواند گزینه قابل‌بررسی در برآورد مشخصه‌های ساختاری جنگل باشد (۳۴ و ۴۴). لیدار همانند رادار، یک سامانه دورسنجی فعال است که به‌جای امواج ماکروویو با استفاده از نور لیزر، سطح موردنظر را مورد نگرش قرار می‌دهد و می‌تواند در زمان تقریباً کوتاه با تولید لیزر و ارسال آن از ارتفاع بالای تاج پوشش جنگل به سمت درختان و ثبت پرتوهای برگشتی، داده‌های سه‌بعدی دقیقی را تولید کنند (۳۱). هییا (۲۳) برای اولین بار با استفاده از داده‌های لیدار به آشکارسازی و اندازه‌گیری مشخصات کمی پایه درختی (مانند ارتفاع و قطر تاج) پرداخت. در سال‌های اخیر در تحقیقات زیادی نظیر برگن و همکاران (۱۱)، هولاس و همکاران (۲۰)، هییا (۲۳)، آیوکی و همکاران (۲۴)، تسوی و همکاران (۴۹) و وینست و همکاران (۵۱)، در جنگل‌های مختلف از داده‌های لیدار برای ارزیابی جنبه‌های مختلف اکوسیستم‌های جنگلی مانند تعیین کمیت پارامترهای بیوفیزیکی (حجم، ارتفاع تاج پوشش و زی‌توده روی زمینی) استفاده شده است. در ایران و در جنگل‌های خزری نیز تحقیق محمدی و همکاران (۳۹) نشان داده است که برآورد مشخصه‌های حجم سرپا و رویه زمینی با استفاده از داده‌های لیدار در مقایسه با تصاویر نوری از قابلیت بالاتری برخوردار بوده است. این سامانه‌ها قادر به تولید داده‌های ارتفاعی خیلی دقیق از هر پایه درختی نیز هستند (۳۶ و ۴۰). داده‌های لیدار در ترکیب با داده‌های دیگر، دامنه وسیعی از محصولات، از درجه انبوهی تاج پوشش و حجم توده‌های جنگلی را تولید می‌کنند. از سویی دیگر سامانه‌های راداری با طول‌موج‌های بلندتر، قابلیت نفوذ در پوشش گیاهی و شناسایی پدیده‌های مخفی شده در زیر تاج پوشش جنگل و تحت شرایط ویژه در زیرخاک را دارند (۳). فرکانس‌های عملیاتی سامانه‌های رادار رویکردی امیدبخش را در برآورد مشخصه‌های کمی ساختاری جنگل که با بعد ارتفاعی و یا مشخصه‌های غیرسطحی و درونی جنگل مرتبط هستند فراهم ساخته است. تحقیقات زیادی با استفاده از داده‌های مختلف راداری در برآورد مشخصه‌های کمی ساختار جنگل نظیر زی‌توده، کریبراس و همکاران (۱۴)، تاپا و همکاران (۴۸) و

سرپا، هولپاین و همکاران (۲۱) صورت گرفته است. اکثر مطالعات انجام شده در توده‌های همگن و سوزنی‌برگ بوده و در توده‌های ناهمسال، ناهمگن و پهن‌برگ نظیر جنگل‌های خزری هنوز مطالعاتی در خصوص برآورد مشخصه‌های حجم سرپا، رویه زمینی و تعداد در هکتار با استفاده از تلفیق داده‌های لیدار و رادار انجام نشده است. بنابراین در مطالعه حاضر هدف مقایسه قابلیت‌های استفاده جداگانه داده‌های رادار و تلفیق آن با لیدار در برآورد برخی مشخصه‌های کمی ساختار توده‌های جنگلی شامل حجم سرپا، رویه زمینی و تعداد در هکتار در بخش‌هایی از سری یک و دو جنگل شصت کلاته گرگان در استان گلستان است.

مواد و روش‌ها

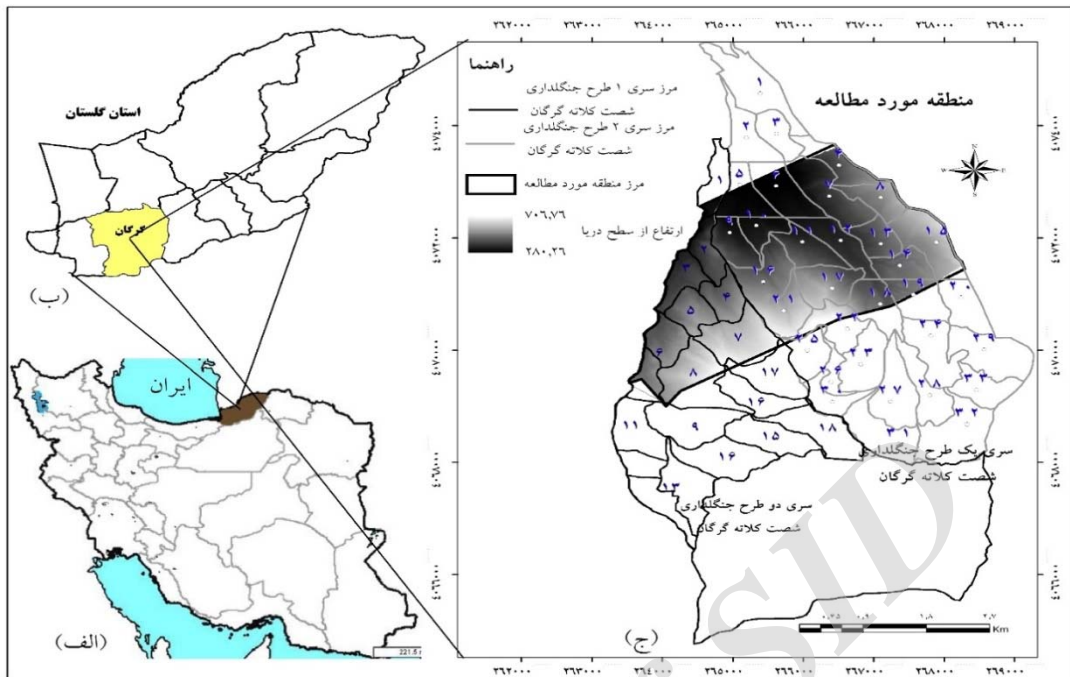
منطقه مورد مطالعه

سری یک و دو جنگل آموزشی و پژوهشی دکتر بهرام‌نیا (شصت کلاته) در حوزه آبخیز ۸۵ و در جنوب شرقی گرگان با طول جغرافیایی ۲۴° ۵۴' تا ۲۵° ۵۴' شرقی و عرض جغرافیایی ۳۸° ۳۶' تا ۴۲° ۳۶' شمالی قرار دارد (شکل ۱). مساحت سری یک و دو شصت کلاته ۳۷۱۶ هکتار است. این تحقیق در بخشی از توده‌های جنگلی سری یک و دو به مساحت ۱۱۰۰ هکتار که برداشت داده‌های لیدار انجام شده بود صورت گرفت. مساحت منطقه مورد مطالعه در سری ۱ (توده مدیریت شده، پارسل شماره ۴ تا ۲۲) ۷۶۲ هکتار و در سری ۲ (توده طبیعی مدیریت نشده، پارسل شماره ۲ تا ۷) ۳۳۸ هکتار است. پوشش گیاهی منطقه مورد مطالعه شامل پوشش درختی، درختچه‌ای و نباتات یک‌ساله است. جهت عمومی دامنه منطقه مورد مطالعه شمال غربی و در محدوده ارتفاعی منطقه مورد آماربرداری ۲۷۰ تا ۷۴۰ متر از سطح دریا واقع شده‌اند.

یا حجم سرپا، سانترو و همکاران (۴۲)، سولبرگ و همکاران (۴۷) و چودهوری و همکاران (۱۷) در جنگل‌های مختلف دنیا انجام شده است. از طرفی دیگر تحقیقات زیادی از جمله محمدی (۵) و شتایی (۴۴) نشان دادند که استفاده ترکیبی از داده‌های چند منبع سنجش‌ازدوری می‌تواند در مقایسه با استفاده به‌تنهایی هر یک از داده‌ها، برآورد بهتری از مشخصه‌های ساختاری جنگل خواهند داشت. همچنین برخی تحقیقات نظیر، امینی و صادقی (۱)، وفایی و همکاران (۸)، عطارچی و گلوگون (۹) و کارتوس و همکاران (۱۵) نشان دادند که ترکیب رادار و تصاویر نوری در برآورد مشخصه‌های ساختاری جنگل نتایج برآوردها را افزایش داده است. همچنین تلفیق داده‌های لیدار و تصاویر نوری سبب بهبود نتایج در مقایسه استفاده به‌تنهایی هر یک از این دو منبع شده است (۱۹، ۲۸، ۳۵، ۳۹ و ۴۵).

با توجه به ماهیت سامانه‌های برداشت داده‌های لیدار و رادار و نفوذ امواج ارسالی به عمق توده‌های جنگلی و ثبت امواج بازگشتی و پراکنش شده از قسمت‌های مختلف توده‌های جنگلی، این منابع ابزارهای مناسبی در تشخیص برخی مشخصه‌های ساختاری نظیر تاج‌پوشش، ارتفاع و زی‌توده هستند. اگرچه هزینه یک عامل محدودکننده در استفاده از داده‌های لیدار در سطح وسیع است، اما امروزه تجمیع داده‌های لیدار با داده‌های با وسعت برداشتی زیاد نظیر داده‌های راداری به‌عنوان یک استراتژی به‌منظور بهبود برآورد مشخصه‌های کمی ساختاری جنگل مطرح است (۳۳ و ۵۰).

با توجه به بررسی‌های انجام شده مشخص گردید که مطالعاتی در خارج از کشور در مورد استفاده توأمان داده‌های لیدار و رادار جهت برآورد برخی مشخصه‌های ساختاری نظیر زی‌توده، بانسکوتا و همکاران (۱۰)، کاسالاین و همکاران (۲۵)، میتچارد و همکاران (۳۷) و تسوی و همکاران (۴۹) و یا ارتفاع تاج پوشش، هاید و همکاران (۲۲) و یا برآورد حجم

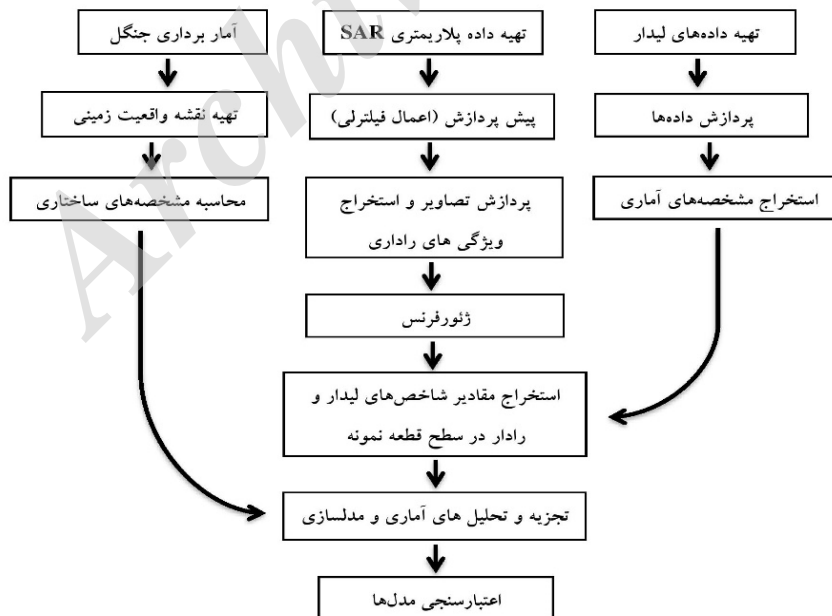


شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه در ایران، استان گلستان و طرح جنگلداری سری ۱ و ۲ شصت کلاته گرگان

زمینی و ماهواره‌ای، پیش‌پردازش و پردازش آن‌ها، مدل‌سازی و اعتبارسنجی مدل صورت گرفت (شکل ۲).

روش تحقیق

فرآیند تحقیق در ۴ مرحله شامل: جمع‌آوری داده‌های



شکل ۲. نمودار مراحل اجرای پژوهش

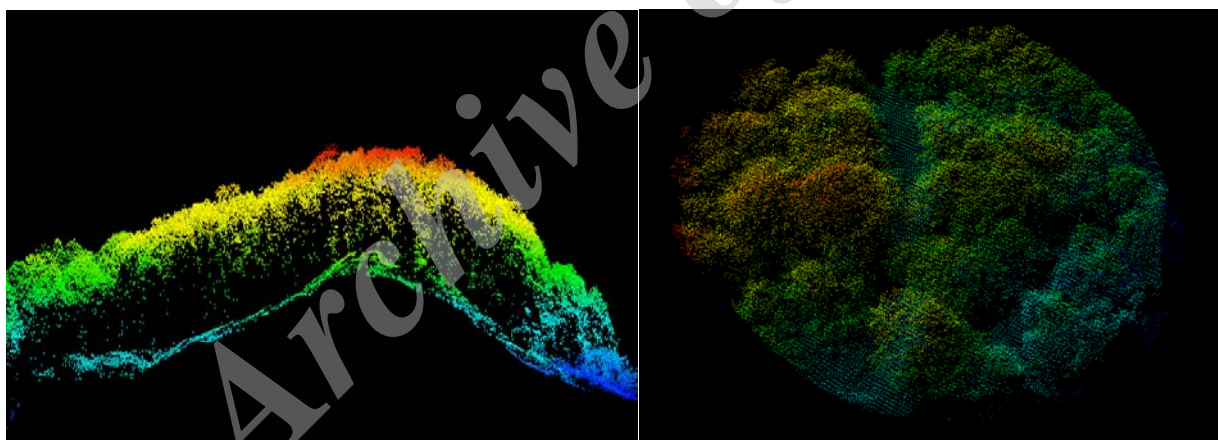
داده‌های زمینی

در این مطالعه از اطلاعات آماربرداری شده توسط محمدی (۵) در سال ۱۳۹۰، استفاده گردید. تعداد ۳۰۷ قطعه نمونه دایره‌ای شکل به مساحت ۱۰ آر به ابعاد ۱۵۰×۲۰۰ متر و با شدت ۳/۳۳ درصد (متداول سازمان جنگل‌ها و مراتع کشور) در سال ۱۳۹۰ در جنگل مورد مطالعه پیاده گردید. موقعیت مراکز تمامی قطعات نمونه با استفاده از دستگاه GPS تفاضلی با خطای کمتر از ۱۰ سانتیمتر ثبت شد. در کلیه قطعات نمونه مشخصه‌های تنوع گونه، قطر برابر سینه (با استفاده از خطکش دو بازو)، ارتفاع (با استفاده از دستگاه ورتکس لیزری VL402) اندازه‌گیری شد. از جداول حجم دو عامله برای محاسبه و برآورد حجم سرپا درختان استفاده گردید. ابتدا تعداد درختان در قطعه نمونه و سپس تعداد در هکتار نیز محاسبه گردید. برای محاسبه رویه زمینی، ابتدا رویه زمینی تک درخت با استفاده از قطر برابر سینه و سپس رویه زمینی در قطعه نمونه و

در هکتار تمامی قطعات نمونه محاسبه شد.

داده‌های لیزر اسکنر هوایی (لیدار) و پردازش آن‌ها

داده‌های لیدار مورد استفاده در این تحقیق در سال ۱۳۹۰ توسط شرکت رایان نقشه با استفاده از هواپیما TB-20 با میانگین ارتفاع پرواز ۱۰۰۰ متر از سطح دریا و تراکم ۴ پالس در مترمربع و با استفاده از دستگاه Riegl LMS Q560 برداشت شدند (شکل ۳). محمدی (۵) تمامی مشخصه‌های آماری ارتفاعی تراکمی را برای پالس‌های بازگشت اول و بازگشت آخر لیدار به‌طور جداگانه با استفاده از DTM و حد آستانه ارتفاعی ۲ متر به همراه سه مشخصه شدت، درصد تاج پوشش و تراکم نسبی پوشش گیاهی را مطابق با سطح قطعات نمونه زمینی $۳۱/۶۲۳ \times ۳۱/۶۲۳$ متر استخراج و در مجموع ۱۱۴ شاخص تهیه کرد.



شکل ۳. ابر نقاط داده‌های لیزر اسکنر هوایی در توده‌های منطقه مورد مطالعه

داده‌های رادار و پردازش آن‌ها

در این مطالعه تصاویر به صورت آنلاین از سایت آلاسکا گرفته شد. از داده‌های دو قطبشی ALOS-PALSAR با دو قطبش HH و HV با قدرت تفکیک مکانی بالا و سطح تصحیحات L1.1 استفاده شد. در این سطح از تصحیحات هیچ پردازشی بر روی تصاویر انجام نشده و به صورت (SLC)

Single Look Complex بودند. این داده‌ها در زاویه فرود ۳۴/۳ درجه در تاریخ ۲۰۰۹/۰۷/۰۷ اخذ شدند. به منظور توصیف و آنالیز پدیده‌ها، ماتریس‌های مرتبه دوم مانند ماتریس کواریانس و هم‌مدوسی ساخته شد (۷ و ۳۰). پس از ساخت ماتریس‌ها پیش‌پردازش روی تصاویر صورت گرفت. المان‌های ماتریس کواریانس در رابطه‌های ۱ و ۲ نشان داده شده است.

پارامترها با بهترین ابعاد پنجره 7×7 استخراج گردیدند. کلیه پیش‌پردازش‌ها و پردازش‌های ذکر شده در نرم‌افزار PolSARpro انجام گردید. پس از استخراج ویژگی‌های راداری (ویژگی‌های عناصر ماتریس، ویژگی‌های حاصل از تجزیه و ویژگی‌های تفکیک‌کننده) و ذخیره آن‌ها نیاز به تصحیح هندسی داده‌ها و زمین مرجع سازی آن‌ها است.

بخشی از تصحیح هندسی تصاویر راداری تبدیل هندسه برد مایل به برد زمینی است. به این منظور تمامی ویژگی‌های استخراج شده راداری در نرم‌افزار ASF MapReady به‌وسیله مدل رقومی ارتفاعی تهیه‌شده از خطوط منحنی میزان ۱۰ متر برای همخوانی با تصاویر راداری، زمین مرجع گردیدند.

استخراج مقادیر شاخص‌های لیدار و رادار در سطح قطعه- نمونه

به‌منظور برآورد مشخصه‌های ساختاری توده در فرآیند مدل‌سازی مقادیر تمام مشخصه‌های اخذ شده از داده‌های مورد استفاده در سطح قطعه‌نمونه استخراج شدند. با توجه به قطعات نمونه دایره‌ای شکل 1000 متر مربعی مقادیر کمی تمامی شاخص‌های لیدار و رادار در محیط نرم‌افزار ArcMap از طریق میانگین‌گیری ارزش‌های پیکسل‌های واقع شده در قطعات نمونه زمینی استخراج گردیدند.

مدل‌سازی

الگوریتم انتخابی بین سایر الگوریتم‌ها، الگوریتم جنگل تصادفی به دلیل دقت بالا، توانایی تعیین اهمیت متغیرها، توانایی مدل‌سازی روابط پیچیده غیرخطی از متغیرها، محاسبه مقادیر گم‌شده و اندازه‌گیری دقیق نسبت خطا در مقایسه با سایر الگوریتم‌ها بود (۱۸). جنگل تصادفی یکی از روش‌های غیرپارامتریک و درخت پایه است که شامل انبوهی از درخت‌های کلاسه‌بندی و رگرسیونی است و گسترش‌یافته مدل رگرسیون درختی است (۱۳).

در اجرای الگوریتم غیرپارامتریک جنگل تصادفی ارتباط بین مشخصه‌های موجودی سرپا، رویه زمینی و تعداد درختان در هکتار به عنوان متغیرهای وابسته و مقادیر مشخصه‌های

$$k_c = [S_{hh} \quad \sqrt{2}S_{hv} \quad S_{vv}]^T \quad [1]$$

[۲]

$$C = k_c \cdot k_c^t = \begin{bmatrix} |S_{hh}|^2 & \sqrt{2}S_{hh}S_{hv}^* & S_{hh}S_{vv}^* \\ \sqrt{2}S_{hv}S_{hh}^* & 2|S_{hv}|^2 & \sqrt{2}S_{hv}S_{vv}^* \\ S_{vv}S_{hh}^* & \sqrt{2}S_{vv}S_{hv}^* & |S_{vv}|^2 \end{bmatrix}$$

در این رابطه؛ * نشانگر مزدوج مختلط یک عدد مختلط، بردار هدف و حاوی المان‌های ماتریس پراکنندگی است، S_{hh} ، S_{hv} ، S_{vv} المان‌های ماتریس برای کانال‌های راداری و C ماتریس کواریانس است. ماتریس کواریانس ارتباط مستقیمی بین مشاهدات راداری و خصوصیات فیزیکی اهداف مختلف ایجاد می‌کند (۳۰).

یکی از نویزهای رادیومتری در تصاویر SAR نویز اسپکل است که به دلیل تداخل‌های مخرب سازنده آکوه‌های بازگشتی حاصل شده و به‌صورت لکه‌های سیاه و سفید (فلفل- نمکی) بر روی تصاویر ظاهر می‌شود. چهار پنجره فیلتر لی با ابعاد 3×3 ، 5×5 ، 7×7 و 9×9 پیکسل روی تمامی مشخصه‌های راداری به‌منظور انتخاب بهترین ابعاد پنجره اعمال شد (۹). نتایج حاصل از بکارگیری الگوریتم جنگل تصادفی با استفاده از آماره مجذور میانگین مربعات خطا برای هر یک از ابعاد پنجره به‌طور جداگانه مورد بررسی و بر اساس نتایج مشخص گردید که مقادیر مجذور میانگین مربعات خطای حاصل از بکارگیری فیلتر لی با ابعاد پنجره 7×7 نسبت به دیگر ابعاد پنجره‌های بکار گرفته شده کمترین است.

از این‌رو به‌منظور تصحیحات رادیومتری و بهبود قدرت تفکیک رادیومتری از فیلتر حوزه مکان نظیر لی بهبودیافته با ابعاد پنجره 7×7 به منظور حداقل‌سازی میزان نویز اسپکل استفاده گردید. پارامترهای فیزیکی حاصل از داده‌های پلاریمتری، مفاهیم مستقیمی در ارتباط با نوع پراکنش، میزان پلاریزاسیون و متناسب با ویژگی‌های خاص هدف ارائه می‌دهند. مهم‌ترین پارامترهای فیزیکی در سه بخش پارامترهای اصلی، روش‌های تجزیه و تفکیک‌کننده‌ها قرار دارند (۷). این

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - Y_i)^2}{n}} \quad [3]$$

$$100 \times RMSE\% = \frac{RMSe}{\bar{y}} \quad [4]$$

$$Bias = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - Y_i)}{n} \quad [5]$$

$$100 \times Bias\% = \frac{Bias}{\bar{y}} \quad [6]$$

در این رابطه‌ها؛ \hat{Y}_i مقدار برآورد شده، \bar{Y} میانگین برآورده شده، Y_i مقدار مشاهده شده و n تعداد مشاهدات است.

نتایج

تجزیه و تحلیل آماری داده‌های زمینی

از ۳۰۷ قطعه نمونه مشخصه‌های حجم سرپا، تعداد درختان و رویه زمینی در هکتار محاسبه گردید. میانگین، حداقل و حداکثر مشخصه حجم سرپا به ترتیب (۲۶۵/۶۴)، ۲۰/۹۶ و ۷۱۷/۱۰ مترمکعب در هکتار، رویه زمینی به ترتیب (۲۳/۶۸)، ۴/۱۴ و ۵۶/۰۸ مترمربع در هکتار و تعداد درختان در هکتار به ترتیب (۲۱۵/۱۵)، ۵۰ و ۶۴۰ پایه در هکتار است. بررسی آماره‌های توصیفی مشخصه‌های حجم سرپا، تعداد درختان و رویه زمینی در هکتار نشان داد که دامنه تغییرات این مشخصه‌ها زیاد بوده و نشان‌دهنده تغییرپذیری مکانی مشخصه‌های کمی ساختار توده جنگلی در منطقه مورد مطالعه است (جدول ۱).

نتایج انتخاب بهترین ابعاد پنجره فیلتر لی

نتایج مقادیر مجذور میانگین مربعات خطای حاصل از بکارگیری فیلتر لی با ابعاد پنجره ۷×۷ نسبت به دیگر ابعاد پنجره‌های بکار گرفته شده کمترین است (جدول ۲). از این رو فیلتر لی با ابعاد پنجره ۷×۷ وارد فرآیند مدل‌سازی شد.

آماره داده‌های رادار و لیدار هم به صورت جداگانه و هم به صورت تلفیقی، به عنوان متغیرهای مستقل مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. ابتدا برای تعیین تعداد درختان بهینه و تهیه نمودار میانگین مربعات خطای داده‌های آموزش و آزمون، الگوریتم جنگل تصادفی با ۵۰۰ و ۷۰۰ درخت اجرا گردید. سپس با تفسیر نمودار میانگین مربعات خطای داده‌های آموزش و آزمون حاصل شده، جایی که با افزایش تعداد درختان تغییری در کاهش میزان میانگین مربعات خطای آموزش و آزمون مشاهده نمی‌شود به عنوان تعداد درخت بهینه انتخاب گردید. یکی دیگر از پارامترهای مهم در اجرای الگوریتم جنگل تصادفی تعداد برآورد کننده‌ها K (متغیرهای مستقل) در هر گره برای برآورد متغیر وابسته است. یکی از ساده‌ترین راه‌های ممکن، استفاده از جذر کل تعداد متغیرهای مستقل مورد استفاده در مدل است که این مقدار به عنوان تعداد برآورد کننده‌ها در هر گره مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای تعیین تعداد برآورد کننده‌ها در هر گره از جذر کل تعداد متغیرهای مستقل مورد استفاده در مدل ۲ استفاده شد تا K یا تعداد برآورد کننده بهینه در هر گره انتخاب شود.

اعتبارسنجی مدل

اعتبارسنجی مدل‌ها به شیوه‌های مختلفی انجام می‌گیرد. در این تحقیق به منظور ارزیابی و برازش الگوریتم‌های داده‌کاوی و مدل‌های رگرسیونی و نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل‌های آماری، ۲۵ درصد از داده‌ها به صورت تصادفی انتخاب و به عنوان مجموعه داده‌های ارزیابی کنار گذاشته شدند. با در اختیار داشتن مقادیر تخمینی و مقادیر حقیقی و معیارهای آماری مجذور میانگین مربعات خطا و اریب به صورت مطلق با استفاده از رابطه‌های ۳ و ۵ و نسبی با استفاده از رابطه‌های ۴ و ۶، اعتبار مدل‌های آماری به دست آمده مورد ارزیابی قرار گرفتند (۳۴).

جدول ۱. آماره‌های توصیفی مشخصه‌های حجم، تعداد درختان و رویه زمینی در هکتار قطعات نمونه

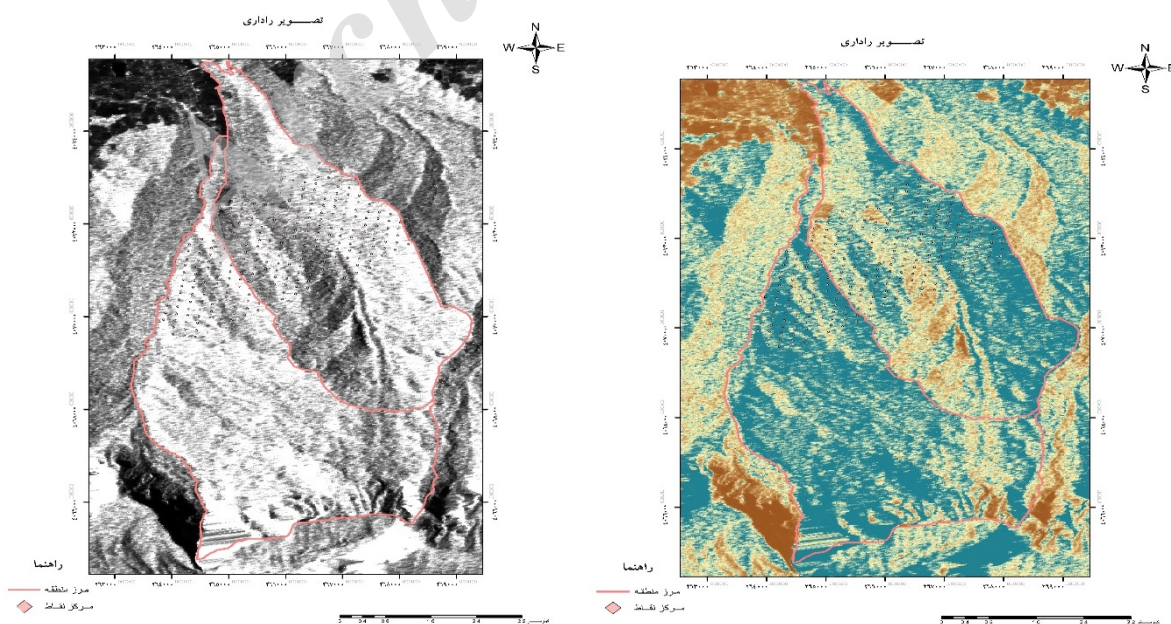
آماره‌های توصیفی	حجم (مترمکعب در هکتار)			تعداد درختان در هکتار			رویه زمینی (مترمربع در هکتار)		
	کل	مدل	ارزیابی	کل	مدل	ارزیابی	کل	مدل	ارزیابی
میانگین	۲۶۵/۶۴	۲۶۶/۱۶	۲۶۴/۱۱	۲۱۵/۱۵	۲۱۳/۱۷	۲۲۱/۰۴	۲۳/۶۸	۲۳/۸۵	۲۳/۱۸
حداقل	۲۰/۹۶	۳۱/۵۳	۲۰/۹۶	۵۰	۵۰	۶۰	۴/۱۴	۵/۳۱	۴/۱۴
حداکثر	۷۱۷/۱۰	۷۱۷/۱۰	۶۸۳/۰۰	۶۴۰	۶۴۰	۶۴۰	۵۶/۰۸	۵۶/۰۸	۵۰/۶۵
دامنه	۶۹۶/۱۳	۶۸۵/۵۶	۶۶۲/۰۳	۵۹۰	۵۹۰	۴۵۰	۵۱/۹۳	۵۰/۷۶	۴۶/۵۰
انحراف از معیار	۱۱۷/۰۹	۱۱۶/۸۷	۱۱۸/۵۱	۹۷/۱۹	۹۸/۰۵۵	۹۴/۹۶	۸/۴۸	۸/۵۲	۸/۳۹
چولگی	۰/۷۹۹	۰/۸۱۳	۰/۷۷۳	۱/۴۷	۱/۶۱۳	۱/۰۸۲	۰/۵۹۷	۰/۶۳۴	۰/۴۸۵
کشیدگی	۱/۱۰۶	۱/۱۲۸	۱/۱۹۱	۳/۰۲	۳/۶۸۷	۱/۱۳۹	۱/۰۷۱	۱/۲۲۷	۰/۶۶۰
تعداد	۳۰۷	۲۳۰	۷۷	۳۰۷	۳۰۷	۷۷	۳۰۷	۲۳۰	۷۷

جدول ۲. مقادیر مجذور میانگین مربعات خطای محاسبه شده در ابعاد پنجره‌های مختلف فیلتر لی برای مشخصه‌های کمی ساختار

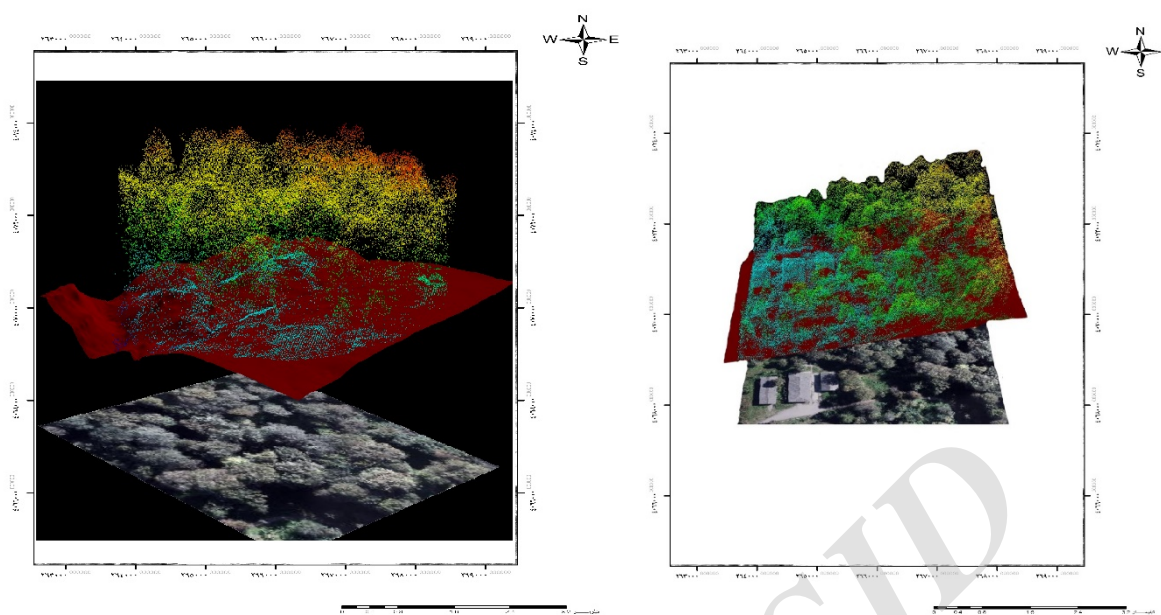
جنگل با الگوریتم جنگل تصادفی

متغیرهای مستقل / ابعاد پنجره	۳×۳	۵×۵	۷×۷	۹×۹
حجم سرپا	۴۴/۶۰	۴۵/۰۳	۴۴/۴۷	۴۴/۸۳
رویه زمینی	۳۵/۷۳	۳۶/۱۶	۳۵/۶۴	۳۵/۹۴
تعداد در هکتار	۴۲/۵۴	۴۲/۴۰	۴۲/۳۹	۴۲/۴۷

در نهایت پس از انجام تمامی پیش‌پردازش‌ها و پردازش‌ها نقشه خروجی آن هم به شکل اصلی و هم به صورت رنگی به اندازه منطقه مورد مطالعه به دست آمد (شکل ۴). همچنین با استفاده از داده‌های زمینی و مدل‌های ارتفاعی نیز از داده‌های لیدار نقشه‌ای سه‌بعدی تهیه گردید (شکل ۵).



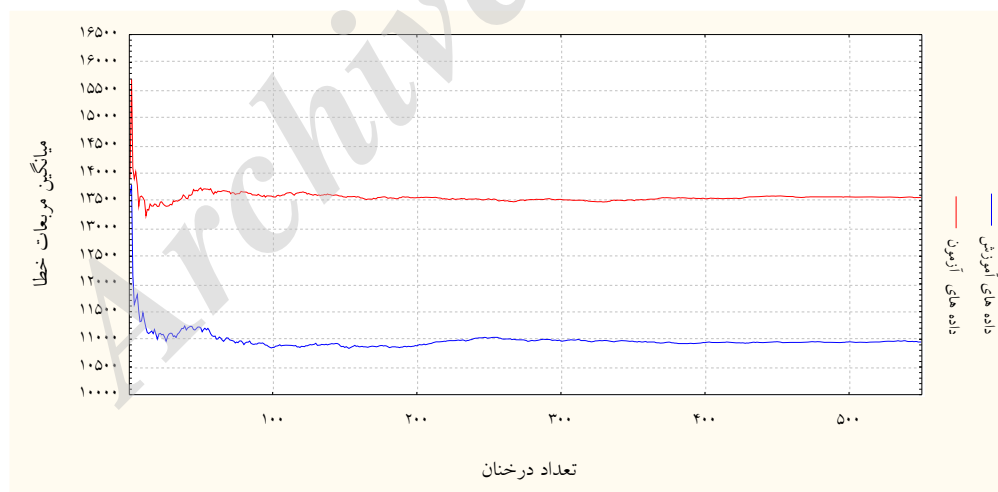
شکل ۴. نقشه تصویر راداری ALOS-PALSAR در منطقه مورد مطالعه



شکل ۵. نقشه تصویر لیدار در توده‌های منطقه مورد مطالعه

به‌عنوان تعداد درخت بهینه انتخاب شد جایی که افزایش تعداد درختان تأثیری بر روند کاهش میانگین مربعات خطای داده‌های آموزش آزمون نداشت (شکل ۶).

برآورد حجم سرپا با استفاده از داده‌های رادار بر اساس تفسیر نمودار میانگین مربعات خطای داده‌های آموزش آزمون نسبت به تعداد درختان تعداد ۵۵۰ درخت



شکل ۶. نمودار میانگین مربعات خطای داده‌های آموزش و آزمون در برابر تعداد درختان برای مشخصه حجم سرپا

مربعات خطا است و به عنوان k بهینه در برآورد حجم سرپا با استفاده از داده‌های رادار انتخاب شد (جدول ۳).

نتایج معیارهای ارزیابی حاصل از الگوریتم جنگل تصادفی با تعداد k متغیر برآوردکننده در برآورد حجم سرپا نشان داد که $k=6$ دارای کمترین مقدار مجذور میانگین

جدول ۳. مقادیر محاسبه شده مجذور میانگین مربعات خطا، درصد مجذور میانگین مربعات خطا، اریب و درصد اریب برای مشخصه حجم سرپا با استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی و داده‌های رادار

تعداد درخت بهینه	تعداد برآوردکننده K	مجذور میانگین مربعات خطا (m ³ /ha)	درصد مجذور میانگین مربعات خطا	اریب (m ³ /ha)	درصد اریب
۵۵۰	۲	۱۱۶/۸۳	۴۴/۲۳	-۲/۸۱	-۱/۰۶
۵۵۰	۳	۱۱۶/۸۸	۴۴/۲۵	-۳/۲۷	-۱/۲۴
۵۵۰	۴	۱۱۶/۷۷	۴۴/۲۱	-۳/۳۱	-۱/۲۵
۵۵۰	۵	۱۱۶/۶۶	۴۴/۱۷	-۳/۱۱	-۱/۱۸
۵۵۰	۶	۱۱۶/۴۶	۴۴/۰۹	-۲/۶۲	-۰/۹۹
۵۵۰	۷	۱۱۶/۵۷	۴۴/۱۳	-۳/۱۶	-۱/۱۹

حاصل از الگوریتم جنگل تصادفی با تعداد k های مختلف در برآورد حجم سرپا نشان داد که k=۱۰ دارای کمترین مقدار مجذور میانگین مربعات خطا است و به عنوان k بهینه در برآورد حجم سرپا با استفاده از تلفیق داده‌های رادار و لیدار انتخاب شد (جدول ۴).

برآورد حجم سرپا با استفاده از تلفیق داده‌های رادار و لیدار بر اساس تفسیر نمودار میانگین مربعات خطای داده‌های آموزش آزمون نسبت به تعداد درختان تعداد ۱۸۰ درخت به‌عنوان تعداد درخت بهینه انتخاب شد جایی که افزایش تعداد درختان تأثیری بر روند کاهش میانگین مربعات خطای داده‌های آموزش آزمون نداشت. نتایج معیارهای ارزیابی

جدول ۴. مقادیر محاسبه شده مجذور میانگین مربعات خطا، درصد مجذور میانگین مربعات خطا، اریب و درصد اریب برای مشخصه حجم سرپا با استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی و تلفیق داده‌های رادار و لیدار

تعداد درخت بهینه	تعداد برآوردکننده K	مجذور میانگین مربعات خطا (m ³ /ha)	درصد مجذور میانگین مربعات خطا	اریب (m ³ /ha)	درصد اریب
۱۸۰	۸	۹۸/۹۸	۳۷/۴۷	-۰/۳۸	-۰/۱۴
۱۸۰	۹	۹۸/۷۳	۳۷/۳۸	-۴/۲۳	-۱/۶۰
۱۸۰	۱۰	۹۸/۳۳	۴۴/۲۱	-۲/۰۲	-۰/۷۶
۱۸۰	۱۱	۹۹/۳۰	۴۴/۱۷	-۲/۹۱	-۱/۱۰
۱۸۰	۱۲	۹۹/۰۶	۴۴/۰۹	-۱/۰۳	-۰/۳۹
۱۸۰	۱۳	۹۸/۶۱	۴۴/۱۳	-۳/۰۹	-۱/۱۷

۵۵۰ درخت به عنوان تعداد درخت بهینه برای برآورد مشخصه رویه زمینی در هکتار در نظر گرفته شد. نتایج معیارهای ارزیابی حاصل از الگوریتم جنگل تصادفی با تعداد k های مختلف در برآورد رویه زمینی در هکتار نشان داد که k=۵ دارای کمترین مقدار مجذور میانگین مربعات خطا است و به عنوان k بهینه در برآورد رویه زمینی در هکتار با استفاده از داده‌های رادار انتخاب شد (جدول ۵).

برآورد رویه زمینی در هکتار با استفاده از داده‌های رادار نتایج حاصل از تفسیر نمودار میانگین مربعات خطای داده‌های آموزش و آزمون حاصل شده در برابر تعداد درختان نشان داد که با افزایش تعداد درختان تا ۵۵۰ درخت، مقادیر میانگین مربعات خطای داده‌های آموزش و آزمون کاهش می‌یابد سپس با افزایش بیشتر درختان، تغییری در مقادیر میزان میانگین مربعات خطا مشاهده نمی‌شود. به همین منظور تعداد

جدول ۵. مقادیر محاسبه شده مجذور میانگین مربعات خطا، درصد مجذور میانگین مربعات خطا، اریب و درصد اریب برای مشخصه رویه زمینی در هکتار با استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی و داده‌های رادار

تعداد درخت بهینه	تعداد برآورد کننده K	مجذور میانگین مربعات خطا (m ² /ha)	درصد مجذور میانگین مربعات خطا	اریب (m ² /ha)	درصد اریب
۵۵۰	۲	۸/۳۳	۳۵/۹۲	-۰/۷۳	-۳/۱۸
۵۵۰	۳	۸/۳۲	۳۵/۹۰	-۰/۷۲	-۳/۱۴
۵۵۰	۴	۸/۳۵	۳۶/۰۱	-۰/۷۱	-۳/۰۹
۵۵۰	۵	۸/۲۹	۳۵/۷۸	-۰/۷۷	-۳/۳۴
۵۵۰	۶	۸/۳۰	۳۵/۵۲	-۰/۶۴	-۲/۷۷
۵۵۰	۷	۸/۳۱	۳۵/۸۶	-۰/۷۲	-۳/۱۴

برآورد رویه زمینی در هکتار با استفاده از تلفیق داده‌های رادار و لیدار

داده‌های آموزش آزمون نداشت. نتایج معیارهای ارزیابی حاصل از الگوریتم جنگل تصادفی با تعداد k های مختلف در برآورد رویه زمینی در هکتار نشان داد که $k=10$ دارای کمترین مقدار مجذور میانگین مربعات خطا است و به عنوان k بهینه در برآورد رویه زمینی در هکتار با استفاده از تلفیق داده‌های رادار و لیدار انتخاب شد (جدول ۶).

بر اساس تفسیر نمودار میانگین مربعات خطای داده‌های آموزش آزمون نسبت به تعداد درختان تعداد ۱۰۰ درخت به عنوان تعداد درخت بهینه انتخاب شد جایی که افزایش تعداد درختان تأثیری بر روند کاهش میانگین مربعات خطای

جدول ۶. مقادیر محاسبه شده مجذور میانگین مربعات خطا، درصد مجذور میانگین مربعات خطا، اریب و درصد اریب برای مشخصه رویه زمینی در هکتار با استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی و تلفیق داده‌های رادار و لیدار

تعداد درخت بهینه	تعداد برآورد کننده K	مجذور میانگین مربعات خطا (m ² /ha)	درصد مجذور میانگین مربعات خطا	اریب (m ² /ha)	درصد اریب
۵۵۰	۲	۸/۳۳	۳۵/۹۲	-۰/۷۳	-۳/۱۸
۵۵۰	۳	۸/۳۲	۳۵/۹۰	-۰/۷۲	-۳/۱۴
۵۵۰	۴	۸/۳۵	۳۶/۰۱	-۰/۷۱	-۳/۰۹
۵۵۰	۵	۸/۲۹	۳۵/۷۸	-۰/۷۷	-۳/۳۴
۵۵۰	۶	۸/۳۰	۳۵/۸۲	-۰/۶۴	-۲/۷۷
۵۵۰	۷	۸/۳۱	۳۵/۸۶	-۰/۷۲	-۳/۱۴

برآورد تعداد درختان در هکتار با استفاده از داده‌های رادار

۷۰۰ درخت به عنوان تعداد درخت بهینه برای برآورد مشخصه تعداد درختان در هکتار در نظر گرفته شد. جدول ۷ نتایج معیارهای ارزیابی حاصل از الگوریتم جنگل تصادفی با تعداد k های مختلف در برآورد رویه زمینی در هکتار را نشان می‌دهد. نتایج نشان داد که $k=2$ دارای کمترین مقدار مجذور میانگین مربعات خطا است و به عنوان k بهینه در برآورد رویه زمینی در هکتار با استفاده از تلفیق داده‌های رادار و لیدار انتخاب شد.

نتایج حاصل از تفسیر نمودار میانگین مربعات خطای داده‌های آموزش و آزمون حاصل شده در برابر تعداد درختان نشان داد که با افزایش تعداد درختان تا ۷۰۰ درخت، مقادیر میانگین مربعات خطای داده‌های آموزش و آزمون کاهش می‌یابد سپس با افزایش بیشتر درختان، تغییری در مقادیر میزان میانگین مربعات خطا مشاهده نمی‌شود. به همین منظور تعداد

جدول ۷. مقادیر محاسبه شده مجذور میانگین مربعات خطا، درصد مجذور میانگین مربعات خطا، اریب و درصد اریب برای مشخصه تعداد درختان در هکتار با استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی و داده‌های رادار

تعداد درخت بهینه	تعداد برآوردکننده K	مجذور میانگین مربعات خطا (n/ha)	درصد مجذور میانگین مربعات خطا	اریب (n/ha)	درصد اریب
۷۰۰	۲	۹۴/۵۸	۴۲/۷۸	۷/۷۲	۳/۴۹
۷۰۰	۳	۹۴/۶۹	۴۲/۸۴	۸/۵۱	۳/۸۵
۷۰۰	۴	۹۴/۷۴	۴۲/۸۶	۷/۲۰	۳/۲۶
۷۰۰	۵	۹۴/۶۰	۴۲/۷۹	۷/۸۰	۳/۵۲
۷۰۰	۶	۹۴/۸۷	۴۲/۹۲	۷/۷۹	۳/۵۲
۷۰۰	۷	۹۵/۲۱	۴۳/۰۷	۸/۵۸	۳/۸۸

برآورد تعداد درختان در هکتار با استفاده از تلفیق داده‌های رادار و لیدار

بر اساس تفسیر نمودار میانگین مربعات خطای داده‌های آموزش آزمون نسبت به تعداد درختان تعداد ۱۵۰ درخت به‌عنوان تعداد درخت بهینه انتخاب شد جایی که افزایش تعداد درختان تأثیری بر روند کاهش میانگین مربعات خطای داده‌های

آموزش آزمون نداشت. نتایج معیارهای ارزیابی حاصل از الگوریتم جنگل تصادفی با تعداد k های مختلف در برآورد تعداد درختان در هکتار نشان داد که $k=8$ دارای کمترین مقدار مجذور میانگین مربعات خطا است و به عنوان k بهینه در برآورد تعداد درختان در هکتار با استفاده از تلفیق داده‌های رادار و لیدار انتخاب شد (جدول ۸).

جدول ۸. مقادیر محاسبه شده مجذور میانگین مربعات خطا، درصد مجذور میانگین مربعات خطا، اریب و درصد اریب برای مشخصه تعداد درختان در هکتار با استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی و تلفیق داده‌های رادار و لیدار

تعداد درخت بهینه	تعداد برآوردکننده K	مجذور میانگین مربعات خطا (n/ha)	درصد مجذور میانگین مربعات خطا	اریب (n/ha)	درصد اریب
۱۵۰	۸	۸۰/۵۵	۳۶/۴۴	۲/۱۰	۰/۹۵
۱۵۰	۹	۸۱/۴۶	۳۶/۸۵	۲/۲۲	۱/۰۰
۱۵۰	۱۰	۸۱/۰۵	۳۶/۶۷	۲/۵۴	۱/۱۴
۱۵۰	۱۱	۸۱/۲۳	۳۶/۷۵	۰/۹۲	۰/۴۱
۱۵۰	۱۲	۸۰/۹۴	۳۶/۶۱	۲/۳۷	۱/۰۷
۱۵۰	۱۳	۸۱/۲۷	۳۶/۷۶	۱/۶۵	۰/۷۴

بهترین نتایج به‌دست‌آمده برای هر سه مشخصه، حجم سرپا و رویه زمینی در هکتار و تعداد درختان در هکتار هم با

استفاده از داده‌های رادار و هم با استفاده از تلفیق داده‌های رادار و لیدار نشان داده شده است (جدول ۹).

جدول ۹. مقایسه برآورد مشخصه‌های ساختاری با استفاده از داده‌های رادار و تلفیق داده‌های رادار و لیدار

مشخصه ساختاری	نوع داده	مجذور میانگین مربعات خطا	درصد مجذور میانگین مربعات خطا	اریب	درصد اریب
حجم سرپا در هکتار	رادار	۱۱۶/۴۶	۴۴/۰۹	-۲/۶۲	-۰/۹۹
	تلفیق رادار و لیدار	۹۸/۳۳	۳۷/۲۳	-۲/۰۲	-۰/۷۶
رویه زمینی در هکتار	رادار	۸/۲۹	۳۵/۷۸	-۰/۷۷	-۳/۳۴
	تلفیق رادار و لیدار	۷/۲۷	۳۱/۳۷	-۰/۷۲	-۳/۱۴
تعداد درختان در هکتار	رادار	۹۴/۵۸	۴۲/۷۸	۸/۲۱	۳/۷۱
	تلفیق رادار و لیدار	۸۰/۵۵	۳۶/۴۴	۲/۱۰	۰/۹۵

بحث و نتیجه‌گیری

هدف اصلی آماربرداری جنگل، آماده کردن اطلاعات بهنگام برای برنامه‌ریزی، مدیریت منابع جنگلی، توسعه سیاست‌ها و برنامه‌های حفاظتی است و این تصمیم‌گیری‌ها نیازمند اطلاعات دقیق و بهنگام از کل منطقه است. اطلاعات برخی مشخصه‌های کمی ساختار جنگل از قبیل حجم سرپا، تعداد درختان در هکتار و رویه زمینی در هکتار از داده‌های مورد نیاز در برنامه‌ریزی و مدیریت بهینه جنگل‌ها می‌باشند. هدف از این تحقیق مقایسه قابلیت داده‌های رادار و لیدار، تلفیق آن‌ها با یکدیگر در برآورد مشخصه‌های حجم سرپا در هکتار، تعداد درختان در هکتار و رویه زمینی در هکتار با استفاده از الگوریتم غیرپارامتریک جنگل تصادفی بوده است. بررسی نتایج به‌دست‌آمده از آماره‌های توصیفی داده‌های زمینی نشان داد که این داده‌ها از واریانس و دامنه تغییرات بالایی در منطقه مورد مطالعه برخوردار هستند که بیان‌کننده این مطلب است که قطعات نمونه زمینی از یک دامنه وسیع حجم سرپا ۳۹/۶۱ تا ۵۹۲/۴۵ مترمکعب در هکتار، تعداد درختان از ۴۰ تا ۶۴۰ پایه در هکتار و رویه زمینی از ۵/۳۲ تا ۵۶/۰۸ مترمربع در هکتار انتخاب شده‌اند و بیانگر وضعیت متفاوت و ناهمگن ساختار توده جنگلی در منطقه مورد مطالعه می‌باشند (۵). همچنین بیانگر این مطلب است که منطقه مورد مطالعه یک نمونه خوبی از جنگل‌های خزری بوده و تقریباً تمامی شرایط ساختاری توده‌های جنگلی را در بر گرفته و نتایج این تحقیق قابلیت تعمیم در جنگل‌های دیگر را خواهد داشت و مطالعه انجام شده در یک شرایط طبیعی جنگل‌های شمال کشور انجام

شده است (۵). نتایج حاصل از تحقیق نشان داد که بهترین مقادیر درصد مجذور میانگین مربعات خطا و اریبی برای مشخصه حجم سرپا با استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی و داده‌های رادار به ترتیب (۴۴/۰۹ درصد و -۰/۹۹ درصد) و با استفاده از تلفیق داده‌های رادار و لیدار به ترتیب (۳۷/۲۳ درصد و -۰/۷۸ درصد) برآورد شده است. بطور کلی درصد مجذور میانگین مربعات خطا حاصل از برآورد حجم سرپا با استفاده از تلفیق داده‌های رادار و لیدار تفاوت قابل توجهی (حدود ۷ درصد) کمتر در مقایسه با برآورد حجم سرپا با استفاده از داده‌های رادار بوده است. درصد مجذور میانگین مربعات خطا حاصل‌شده در این تحقیق با استفاده از داده‌های رادار در مقایسه با مطالعات سانترو و همکاران (۴۲) با دامنه‌ای بین ۲۵ تا ۵۱ درصد تا حدی مطابقت داشت ولی در مقایسه با مطالعات هولپاینن و همکاران (۲۱) ($RMSE\% = 55/8$) برای حجم متوسط و ($RMSE\% = 138/2$) برای میانگین حجم گونه‌های درختی برگی خزان‌کننده دارای نتایج بهتری بوده است که علت آن تفاوت نوع داده راداری و سنجنده‌اش در تحقیق حاضر (ALOS PALSAR) با تحقیق هولپاینن و همکاران (۲۱) (TerraSAR-X) بوده است. همچنین درصد مجذور میانگین مربعات خطا حاصل شده در این تحقیق با استفاده از تلفیق داده‌های رادار و لیدار ۳۷/۲۳ درصد بوده است که در مقایسه با مطالعات مختلف حاصل از تلفیق از جمله سیتھول و ووسلمن (۴۶) با استفاده از تلفیق داده‌های لیدار و نوری ($RMSE\% = 52/84$)، شتایی و همکاران (۴۵) با استفاده از تلفیق داده‌های لیدار و سنجنده TM ($RMSE\% = 42/93$) و

تصادفی و داده‌های رادار به ترتیب (۴۲/۷۸ درصد و ۳/۷۱ درصد) و با استفاده از تلفیق داده‌های رادار و لیدار به ترتیب (۳۶/۴۴ درصد و ۰/۹۵ درصد) برآورد شده است.

بطور کلی درصد مجذور میانگین مربعات خطا حاصل از برآورد تعداد درختان در هکتار با استفاده از تلفیق داده‌های رادار و لیدار تفاوت قابل توجهی (حدود ۶/۵ درصد) کمتر در مقایسه با برآورد تعداد درختان در هکتار با استفاده از داده‌های رادار بوده است. درصد مجذور میانگین مربعات خطا حاصل شده در این تحقیق با استفاده از تلفیق داده‌های رادار و لیدار ۳۶/۴۴ درصد در مقایسه با مطالعات مختلف حاصل از تلفیق از جمله پکالین و مالتامو (۴۱) (RMSE%= ۴۷/۹) نتیجه بهتر و در مقایسه با محمدی (۵) (RMSE%= ۳۵/۸۴) ضعیف‌تر است. با توجه به نتایج به دست آمده در این مطالعه، در نهایت چنین می‌توان نتیجه‌گیری نمود که تلفیق داده‌های رادار و لیدار در مورد برآورد مشخصه‌های حجم سرپا، تعداد درختان در هکتار و رویه زمینی در هکتار سبب بهبود نتایج گردید. علت این امر را می‌توان به این صورت توجیه کرد که هرکدام از داده‌ها به تنهایی دارای معایب و مزایای منحصر به فردی می‌باشند که هنگام تلفیق آن‌ها با یکدیگر سبب بهبود نتایج شده و توانایی آن‌ها را ارتقا می‌دهد. همچنین با مقایسه نتایج حاصل از این تحقیق با سایر مطالعات انجام شده نشان داده شد که درصد مجذور میانگین مربعات خطا در بعضی موارد به دلیل نوع توده منطقه مورد مطالعه، چنداشکوبه بودن و آمیختگی توده‌ها، وجود درختان قطور، نوع داده راداری و قطبش دوگانه آن بالاتر است (۵ و ۲۸)؛ اما در مقایسه با برخی مطالعاتی که انجام شده بود (۲۱، ۴۱ و ۴۶) به دلیل تلفیق داده‌های راداری PALSAR با لیدار دارای درصد مجذور میانگین مربعات خطا کمتری بود. امید می‌رود که در تحقیقات تکمیلی در این زمینه با استفاده از تصاویر بهتر و با قدرت تفکیک بالاتر راداری و دارای قطبش چهارگانه و استفاده از تکنیک تداخل سنجی در مناطق مختلف جنگلی مخصوصاً توده‌های سوزنی‌برگ نتایج بهتری حاصل گردد. همچنین انتظار می‌رود که ترکیبی از اطلاعات پلاریمتریک و اینترفرومتریک دقت صحت ارزیابی

هولپاینز و همکاران (۲۱) با استفاده از تلفیق داده‌های لیدار و رادار برای میانگین حجم گونه‌های درختی برگی خزان‌کننده (RMSE%= ۹۱/۶) نتایج بهتری داشته است که علت آن را می‌توان به توانایی نفوذ امواج راداری درون توده جنگل و برآورد بهتر مشخصه‌ها و همچنین تفاوت نوع داده راداری نسبت داد؛ اما در مقایسه با نتایج به دست آمده از پژوهش‌های لطیفی و همکاران (۲۸) (RMSE%= ۲۳/۲۶) و هولپاینز و همکاران (۲۱) (RMSE%= ۳۴/۷) برای حجم متوسط ضعیف‌تر عمل کرده است که علت آن را می‌توان به نوع توده (پهن‌برگ)، پیچیدگی ساختار، چند اشکوبه بودن و آمیختگی توده‌های مورد مطالعه نسبت داد. بهترین مجذور میانگین مربعات خطای نسبی و اریب برای مشخصه رویه زمینی در هکتار با استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی و داده‌های رادار به ترتیب (۳۵/۷۸ درصد و ۳/۳۴ درصد) و با استفاده از تلفیق داده‌های رادار و لیدار به ترتیب (۳۱/۳۷ درصد و ۳/۱۴ درصد) برآورد شده است. بطور کلی درصد مجذور میانگین مربعات خطا حاصل از برآورد رویه زمینی در هکتار با استفاده از تلفیق داده‌های رادار و لیدار تفاوت قابل توجهی (حدود ۵ درصد کمتر) در مقایسه با برآورد رویه زمینی در هکتار با استفاده از داده‌های رادار بوده است. درصد مجذور میانگین مربعات خطا حاصل شده در این تحقیق با استفاده از داده‌های رادار در مقایسه با مطالعات هولپاینز و همکاران (۲۱) (RMSE%= ۴۳/۸) نتایج بهتری داشته است ولی درصد مجذور میانگین مربعات خطا حاصل شده در این تحقیق با استفاده از تلفیق داده‌های رادار و لیدار ۳۱/۳۷ درصد در مقایسه با مطالعات مختلف حاصل از تلفیق از جمله پکالین و مالتامو (۴۱) برای توده‌های پهن‌برگ (RMSE%= ۸۷/۷۶) نتیجه بهتر و در مقایسه با نتایج شتایی و همکاران (۴۳) (۱۸/۳۹) (RMSE%= ۲۷/۱۶) محمدی (۵) و هولپاینز و همکاران (۲۱) (RMSE%= ۲۸/۱) ضعیف‌تر است که علت آن را می‌توان به استفاده ترکیبی از داده‌های لیدار و نوری نسبت داد. بهترین مجذور میانگین مربعات خطای نسبی و اریب برای مشخصه تعداد درختان در هکتار با استفاده از الگوریتم جنگل

high-frequency radar and discrete-return lidar for estimating biomass in temperate hardwood and mixed forests. *Annals of Forest Science*, 68(2): 347-356.

11. Bergen K, Goetz S, Dubayah R, Henebry G, Hunsaker C, Imhoff M, Nelson R, Parker G, Radeloff V. 2009. Remote sensing of vegetation 3-D structure for biodiversity and habitat: review and implications for lidar and radar spaceborne missions. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 114(6): 1-13.
12. Brandtberg T, Warner TA, Landenberger RE, McGraw JB. 2003. Detection and analysis of individual leaf-off tree crowns in small footprint, high sampling density lidar data from the eastern deciduous forest in North America. *Remote sensing of Environment*, 85(3): 290-303.
13. Breiman L. 2001. Random forests. *Machine Learning*, 45(1): 5-32.
14. Carreiras JM, Vasconcelos MJ, Lucas RM. 2012. Understanding the relationship between aboveground biomass and ALOS PALSAR data in the forests of Guinea-Bissau (West Africa). *Remote Sensing of Environment*, 121: 426-442.
15. Cartus O, Kellndorfer J, Rombach M, Walker W. 2012. Mapping canopy height and growing stock volume using airborne lidar, ALOS PALSAR and Landsat ETM⁺. *Remote Sensing*, 4(11): 3320-3345.
16. Chen Q, Baldocchi D, Gong P, Kelly M. 2006. Isolating individual trees in a savanna woodland using small footprint lidar data. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 72(8): 923-932.
17. Chowdhury TA, Thiel C, Schmullius C. 2014. Growing stock volume estimation from L-band ALOS PALSAR polarimetric coherence in Siberian forest. *Remote Sensing of Environment*, 155: 129-144.
18. Cutler DR, Edwards TC, Beard KH, Cutler A, Hess KT, Gibson J, Lawler JJ. 2007. Random forests for classification in ecology. *Ecology*, 88(11): 2783-2792.
19. Dalponte M, Tonolli S, Vescovo L, Neteler M, Gianelle D. 2010. Fusion of multispectral and Lidar remote sensing data for the estimation of forest attributes in an Alpine region. *The 10th International Conference on LIDAR Applications for Assessing Forest*

پارامترهای جنگلی را در مقایسه با استفاده از شدت برگشت از سطح پدیده‌ها به تنهایی افزایش دهد.

منابع مورد استفاده

۱. امینی، ج. و ی. صادقی. ۱۳۹۰. تصاویر ماهواره‌ای نوری و راداری در مدل‌سازی زیست توده جنگل‌های شمال ایران. *سنجش از دور و GIS ایران*، ۴(۴): ۶۹-۸۲.
۲. خرمی، ر. ۱۳۸۳. بررسی قابلیت داده‌های ماهواره‌ای Landsat7 ETM⁺ در برآورد حجم سرپای توده‌های راش (مطالعه موردی: جنگل‌های سنگده). پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران. ۸۰ صفحه.
۳. درویش‌صفت، ع. ۱۳۹۰. *سنجش از دور برای مدیران GIS*. انتشارات دانشگاه تهران، ۷۰۱ صفحه.
۴. عزیززی، ز. ا. نجفی آشتیانی، پ. فاتحی و م. پیرباوقار. ۱۳۸۹. بررسی امکان برآورد حجم سرپای جنگل با استفاده از داده‌های سنجنده Liss-IV ماهواره IRS P6 مطالعه موردی لیره‌سر تنکابن. *تحقیقات جنگل و صنوبر ایران*، ۱۸(۱): ۱۲۳-۱۵۱.
۵. محمدی، ج. ۱۳۹۲. بهبود برآورد برخی مشخصه‌های کمی ساختار جنگل با استفاده از تلفیق داده‌های لیدار و تصاویر هوایی رقومی در جنگل‌های پهن برگ شصت کلاته گرگان. رساله دکتری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان. ۲۴۱ صفحه.
۶. مروی مهاجر، م. ۱۳۸۹. *جنگل‌شناسی و پرورش جنگل*. انتشارات دانشگاه تهران، ۳۸۷ صفحه.
۷. مقصودی، ی. و س. مهدوی. ۱۳۹۵. مبانی سنجش از دور راداری. انتشارات دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، ۲۸۷ صفحه.
۸. وفایی، س. ج. سوسنی، ک. عادلی، ه. فدایی و ح. نقوی. ۱۳۹۶. برآورد زی‌توده روی زمینی درختان جنگل با استفاده از تصویرهای نوری و راداری (مطالعه موردی: حوزه ناو اسالم گیلان). *تحقیقات جنگل و صنوبر ایران*، ۲۵(۲): ۳۲۰-۳۳۱.
9. Attarchi S, Gloaguen R. 2014. Improving the estimation of above ground biomass using dual polarimetric PALSAR and ETM⁺ data in the Hyrcanian mountain forest (Iran). *Remote Sensing*, 6(5): 3693-3715.
10. Banskota A, Wynne RH, Johnson P, Emessiene B. 2011. Synergistic use of very

- Ecosystems, Germany, 14-17 September.
20. Hollaus M, Wagner W, Maier B, Schadauer K. 2007. Airborne laser scanning of forest stem volume in a mountainous environment. *Sensors*, 7(8): 1559-1577.
 21. Holopainen M, Haapanen R, Karjalainen M, Vastaranta M, Hyypä J, Yu X, Tuominen S, Hyypä H. 2010. Comparing accuracy of airborne laser scanning and TerraSAR-X radar images in the estimation of plot-level forest variables. *Remote Sensing*, 2(2): 432-445.
 22. Hyde P, Dubayah R, Walker W, Blair JB, Hofton M, Hunsaker C. 2006. Mapping forest structure for wildlife habitat analysis using multi-sensor (LiDAR, SAR/InSAR, ETM⁺, Quickbird) synergy. *Remote Sensing of Environment*, 102(1-2): 63-73.
 23. Hyypä J. 1999. Detecting and estimating attributes for single trees using laser scanner. *Photogramm Journal of Finland*, 16: 27-42.
 24. Ioki K, Imanishi J, Sasaki T, Morimoto Y, Kitada K. 2010. Estimating stand volume in broad-leaved forest using discrete-return LiDAR: plot-based approach. *Landscape and Ecological Engineering*, 6(1): 29-36.
 25. Kaasalainen S, Holopainen M, Karjalainen M, Vastaranta M, Kankare V, Karila K, Osmanoglu B. 2015. Combining lidar and synthetic aperture radar data to estimate forest biomass: status and prospects. *Forests*, 6(1): 252-270.
 26. Kalbi S, Fallah A, Shataee S. 2014. Estimation of forest attributes in the Hyrcanian forests, comparison of advanced space-borne thermal emission and reflection radiometer and satellite pour l'observation de la terre-high resolution grounding data by multiple linear, and classification and regression tree regression models. *Journal of Applied Remote Sensing*, 8(1): 2-18.
 27. Koch B, Heyder U, Weinacker H. 2006. Detection of individual tree crowns in airborne lidar data. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 72(4): 357-363.
 28. Latifi H, Nothdurft A, Koch B. 2010. Non-parametric prediction and mapping of standing timber volume and biomass in a temperate forest: application of multiple optical/LiDAR-derived predictors. *Forestry*, 83(4): 395-407.
 29. Lee H, Slatton KC, Roth BE, Cropper Jr W. 2010. Adaptive clustering of airborne LiDAR data to segment individual tree crowns in managed pine forests. *International Journal of Remote Sensing*, 31(1): 117-139.
 30. Lee J, Pottier SE. 2009. *Polarimetric Radar imaging: from basics to applications*. Boca Raton, FL, USA: CRC press, 422 pp.
 31. Lim K, Treitz P, Wulder M, St-Onge B, Flood M. 2003. LiDAR remote sensing of forest structure. *Progress in Physical Geography*, 27(1): 88-106.
 32. Lu D, Mausel P, Brondizio E, Moran E. 2004. Relationships between forest stand parameters and Landsat TM spectral responses in the Brazilian Amazon Basin. *Forest Ecology and Management*, 198(1-3): 149-167.
 33. Lu D. 2006. The potential and challenge of remote sensing-based biomass estimation. *International Journal of Remote Sensing*, 27(7): 1297-1328.
 34. Mäkelä H, Pekkarinen A. 2004. Estimation of forest stand volumes by Landsat TM imagery and stand-level field-inventory data. *Forest Ecology and Management*, 196(2-3): 245-255.
 35. Maltamo M, Malinen J, Packalén P, Suvanto A, Kangas J. 2006. Nonparametric estimation of stem volume using airborne laser scanning, aerial photography, and stand-register data. *Canadian Journal of Forest Research*, 36(2): 426-436.
 36. Maltamo M, Mustonen K, Hyypä J, Pitkänen J, Yu X. 2004. The accuracy of estimating individual tree variables with airborne laser scanning in a boreal nature reserve. *Canadian Journal of Forest Research*, 34(9): 1791-1801.
 37. Mitchard ET, Saatchi SS, White L, Abernethy K, Jeffery KJ, Lewis SL, Collins M, Lefsky MA, Leal ME, Woodhouse IH. 2012. Mapping tropical forest biomass with radar and spaceborne LiDAR in Lopé National Park, Gabon: overcoming problems of high biomass and persistent cloud. *Biogeosciences*, 9(1): 179-191.
 38. Mohammadi J, Shataee Joibary S, Yaghmaee F, Mahiny A. 2010. Modelling forest stand volume and tree density using Landsat ETM⁺ data. *International Journal of Remote Sensing*, 31(11): 2959-2975.
 39. Mohammadi J, Shataee S, Namiranian M, Næsset E. 2017. Modeling biophysical properties of broad-leaved stands in the

- hyrcanian forests of Iran using fused airborne laser scanner data and ultraCam-D images. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 61: 32-45.
40. Næsset E, Bjercknes K-O. 2001. Estimating tree heights and number of stems in young forest stands using airborne laser scanner data. *Remote Sensing of Environment*, 78(3): 328-340.
41. Packalén P, Maltamo M. 2007. The k-MSN method for the prediction of species-specific stand attributes using airborne laser scanning and aerial photographs. *Remote Sensing of Environment*, 109(3): 328-341.
42. Santoro M, Eriksson L, Askne J, Schmillius C. 2006. Assessment of stand-wise stem volume retrieval in boreal forest from JERS-1 L-band SAR backscatter. *International Journal of Remote Sensing*, 27(16): 3425-3454.
43. Shataee S, Kalbi S, Fallah A, Pelz D. 2012. Forest attribute imputation using machine-learning methods and ASTER data: comparison of k-NN, SVR and random forest regression algorithms. *International Journal of Remote Sensing*, 33(19): 6254-6280.
44. Shataee S. 2013. Forest attributes estimation using aerial laser scanner and TM data. *Forest Systems*, 22(3): 484-496.
45. Shataee S, Weinaker H, Babanejad M. 2011. Plot-level forest volume estimation using airborne laser scanner and TM data, comparison of boosting and random forest tree regression algorithms. *Procedia Environmental Sciences*, 7: 68-73.
46. Sithole G, Vosselman G. 2004. Experimental comparison of filter algorithms for bare-Earth extraction from airborne laser scanning point clouds. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 59(1-2): 85-101.
47. Solberg S, Astrup R, Breidenbach J, Nilsen B, Weydahl D. 2013. Monitoring spruce volume and biomass with InSAR data from TanDEM-X. *Remote Sensing of Environment*, 139: 60-67.
48. Thapa RB, Watanabe M, Motohka T, Shimada M. 2015. Potential of high-resolution ALOS-PALSAR mosaic texture for aboveground forest carbon tracking in tropical region. *Remote Sensing of Environment*, 160: 122-133.
49. Tsui OW, Coops NC, Wulder MA, Marshall PL, McCardle A. 2012. Using multi-frequency radar and discrete-return LiDAR measurements to estimate above-ground biomass and biomass components in a coastal temperate forest. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 69: 121-133.
50. Tsui OW, Coops NC, Wulder MA, Marshall PL. 2013. Integrating airborne LiDAR and space-borne radar via multivariate kriging to estimate above-ground biomass. *Remote Sensing of Environment*, 139: 340-352.
51. Vincent G, Sabatier D, Blanc L, Chave J, Weissenbacher E, Pélissier R, Fonty E, Molino J-F, Coueron P. 2012. Accuracy of small footprint airborne LiDAR in its predictions of tropical moist forest stand structure. *Remote Sensing of Environment*, 125: 23-33.



Comparative study of the possibility estimation of some structural quantitative attributes of Caspian forests using Radar and integrating Radar and Lidar data

M. Yazdani ^{1*}, Sh. Shataee Joibari ², J. Mohammadi ³, Y. Maghsoudi ⁴

1. MSc. Student of Forestry, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources
2. Prof. College of Forest Science, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources
3. Assis. Prof. College of Forest Science, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources
4. Assis. Prof. College Geodesy & Geomatics Engineering, Khajeh Nasir Toosi University of Technology

ARTICLE INFO

Article history:

Received 15 October 2017
Accepted 28 January 2018
Available online 20 February 2018

Keywords:

Radar data
Integration Lidar and radar
Forest structure attributes
Caspian forests

ABSTRACT

The purpose of this study was to compare the estimation of the structural attributes of stand volume, basal area, and tree stem density per hectare of the Caspian forests using Radar data and integration of Radar and Lidar data in some parts of the district I and II the ShastKalateh forest in the Golestan province. Forest structural data were measured and computed from 307 circular plots. The required pre-processing and processing was performed using raw data of Radar (2009) and Lidar (2011), and the corresponding values of sample plots were extracted on all Radar and Lidar derived indices. The modeling was performed using extracted Radar features as individual and also using Lidar and Radar extracted features as integrated with the non-parametric random forest algorithm in 75% of samples. The modeling validity was performed using 25% of the remained samples by absolute and relative root mean square error (RMSe) and Bias. The percentage RMSe and the Bias values using Radar data were obtained from stand volume (44.09% and -0.99%), basal area per hectare (35.72% and -3.15%) and tree stem density per hectare (42.73% and 3.52%), respectively, and using the integration of Radar and Lidar data for stand volume (37.23% and 0.76%), basal area per hectare (31.37% and -3.14%), and tree density per hectare (36.44% and 0.95%). The results showed that the integration of Radar and Lidar data could improve the estimates, especially in the stand volume, compared to using Radar data as individually.

* Corresponding author e-mail address: mehrsa.yazdani1991@gmail.com