

قابلیت داده‌های قطبش چهارگانه راداری ALOS-PALSAR2 در برآورد مشخصه‌های ساختاری توده‌های جنگلی دست کاشت عرب‌داغ استان گلستان

عبدالمتین نوری^۱، شعبان شتایی^{۲*} و جهانگیر محمدی^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد جنگل‌داری، دانشکده علوم جنگل، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

۲* - نویسنده مسئول، استاد گروه جنگل‌داری، دانشکده علوم جنگل، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

پست الکترونیک: shataee@gau.ac.ir

۳- استادیار گروه جنگل‌داری، دانشکده علوم جنگل، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۱/۱۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۹/۰۲

چکیده

برآورد مشخصه‌های کمی جنگل اهمیت زیادی برای آگاهی از وضعیت و نحوه عملکرد آن در برنامه‌ریزی و مدیریت جنگل دارد. هدف از پژوهش پیش‌رو، برآورد مشخصه‌های ساختاری توده‌های جنگلی دست‌کاشت به‌طور عمده سوزنی‌برگ با استفاده از داده‌های با قطبش چهارگانه راداری به روش قطبش سنجی و الگوریتم‌های ناپارامتریک در منطقه عرب‌داغ استان گلستان بود. ابتدا ۳۱۹ قطعه‌نمونه دایره‌ای شکل به مساحت ۴۰۰ متر مربع به روش خوشه‌ای منظم تصادفی پیاده شد و قطر برابر سینه تمام درختان، ارتفاع برخی از آن‌ها در هر قطعه‌نمونه به‌همراه موقعیت دقیق قطعه‌نمونه برداشت شد. سپس، حجم سرپا، رویه زمینی و تعداد پایه در هکتار محاسبه شد. پیش‌پردازش‌ها و پردازش‌های مورد نیاز روی داده‌های خام رادار انجام شد و مقادیر متناظر با قطعه‌نمونه‌های زمینی از شاخص‌های به‌دست آمده از داده‌های رادار استخراج شد. مدل‌سازی با الگوریتم‌های جنگل تصادفی، ماشین بردار پشتیبان و k نزدیک‌ترین همسایه با ۷۵ درصد از قطعات نمونه انجام شد و نتایج با ۲۵ درصد باقیمانده قطعه‌نمونه‌ها ارزیابی شدند. نتایج نشان داد که کمترین جذر میانگین مربعات خطا و اریبی مدل‌سازی‌ها با استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی برای مشخصه رویه زمینی ۵۰/۶ و ۱۷/۱- درصد و با الگوریتم ماشین بردار پشتیبان برای مشخصه‌های حجم سرپا و تعداد در هکتار به ترتیب ۵۸/۸، ۷/۹- و ۵۲/۰۷، ۵/۱- بود. در مجموع، این پژوهش نشان داد که داده‌های قطبش چهارگانه سنجنده ALOS-2 با توجه به زیاد بودن دامنه تغییرات مشخصه‌های کمی ساختار جنگل‌های دست‌کاشت منطقه مورد مطالعه، قابلیت متوسطی در برآورد مشخصه‌های مذکور دارند.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم‌های ناپارامتریک، جنگل‌کاری سوزنی‌برگ، رادار، قطبش سنجی.

مقدمه

اطلاعات کمی با استفاده از روش‌های آماربرداری زمینی به‌ویژه در مساحت‌های بزرگ اغلب پرهزینه و زمان‌بر است (Reuveni et al., 2018). استفاده از اطلاعات

آگاهی از وضعیت کمی و کیفی جنگل‌های دست‌کاشت نقش اساسی در مدیریت بهینه آن‌ها دارد. جمع‌آوری

رادارگرامتری (Vastaranta *et al.*, 2014) با داده‌های تک قطبش و روش تداخل‌سنجی (Vastaranta *et al.*, 2014)، قطبش دوگانه با روش محاسبه حساسیت بازپراکنش (Nguyen *et al.*, 2016)، قطبش دوگانه و روش قطبش سنجی (Yazdani *et al.*, 2018) و تعداد پایه در هکتار با داده‌های قطبش دوگانه و روش قطبش سنجی (Morin *et al.*, 2018; Yazdani *et al.*, 2019) انجام شده است. همچنین، برخی از پژوهش‌ها با استفاده از داده‌های راداری با قطبش چهارگانه و روش قطبش سنجی برای تخمین حجم (Antropov *et al.*, 2013; Ataee *et al.*, 2019; Long *et al.*, 2019) در جنگل‌های طبیعی پهن‌برگ و سوزنی‌برگ انجام شده است. Chowdhury و همکاران (۲۰۱۴) برای تخمین حجم سریای جنگل‌های آمیخته طبیعی از داده‌های قطبش چهارگانه چندزمانه‌ای ALOS-1، ماتریس کوواریانس و همدوسی و همچنین اختلاف فاز بین قطبش HV و VH و همدوسی بین کانال‌های HH و VV استفاده کرده و نشان دادند که داده‌های قطبش چهارگانه در مقایسه با داده‌های قطبش تک و دوگانه در تخمین حجم سریای جنگل دقت بیشتری دارند. Antropov و همکاران (۲۰۱۳) حجم سریای توده‌های جنگل آمیخته را با استفاده از داده‌های با قطبش تک، دوگانه و چهارگانه با طول موج L به روش قطبش سنجی برآورد کرده و گزارش کردند که داده‌های با قطبش چهارگانه کمترین مقدار جذر میانگین مربعات خطا را دارا هستند. Ataee و همکاران (۲۰۱۹)، حجم سریای جنگل‌های آمیخته پهن‌برگ هیرکانی را با استفاده از داده‌های قطبش چهارگانه با طول موج L ماهواره ALOS-2 و داده‌های قطبش دوگانه با طول موج C ماهواره Sentinel-1 به روش قطبش سنجی در توده‌های جنگل آمیخته پهن‌برگ هیرکانی را برآورد کردند و نشان دادند که داده‌های قطبش چهارگانه با طول موج L در مقایسه با داده‌های قطبش دوگانه طول موج C عملکرد بهتری دارند. در مجموع، پژوهش‌های پیشین نشان داد که داده‌های راداری با قطبش چهارگانه در مقایسه با داده‌های

ماهواره‌ای در بازه‌های زمانی کوتاه و با هزینه کمتر به‌عنوان راهکار جایگزین مطرح شده است. مشخصه‌های ساختار توده‌های جنگلی مانند میانگین قطر برابر سینه، ارتفاع و حجم سرپا از جمله مهم‌ترین مشخصه‌های مورد استفاده در تخمین منابع جنگل هستند (Reuveni *et al.*, 2018).

تاکنون، اغلب از داده‌های طیف نوری ماهواره‌ای برای تخمین مشخصه‌های جنگل استفاده شده است، اما داده‌های طیف نوری در مناطق ابری و مناطق با زی‌توده زیاد و همچنین در تشخیص ساختار عمودی محدودیت دارند (Gonzalez *et al.*, 2010). برخی از پژوهش‌ها نشان دادند که داده‌های رادار با درجه مصنوعی (SAR) قابلیت زیادی در تخمین پارامترهای ساختاری جنگل دارند، زیرا سیگنال‌های راداری با طول موج بلند می‌توانند در زیر تاج پوشش جنگلی نفوذ کرده و اطلاعات را دقیق‌تر جمع‌آوری کند (Santos *et al.*, 2002). از سوی دیگر، توانایی داده‌های رادار در برآورد ویژگی‌های بیوفیزیکی جنگل به دلیل حساسیت‌پذیری کمتر در شرایط جوی و زمان اخذ اطلاعات زمینی، پایش جنگل‌های کوهستانی به‌ویژه در مناطق مرطوب، ابری و مه‌آلود در مقایسه با دیگر داده‌های سنجش از دوری بیشتر است (Askne *et al.*, 2013). تصاویر راداری ماهواره ALOS-2 در محدوده طیف L در بررسی برخی مشخصه‌های ساختاری توده‌های جنگل‌های هیرکانی (Yazdani *et al.*, 2018; Ataee *et al.*, 2019; Golshani *et al.*, 2019) به روش‌های مختلف استفاده شده است. امواج راداری می‌توانند با قطبش‌های مختلف تک‌گانه (V یا H)، دوگانه (HH و VV یا HV و VH) و چهارگانه (HH، VV، HV و VH) ارسال و دریافت شوند.

پژوهش‌های متعددی در برآورد حجم سرپا با استفاده از داده‌های قطبش تک با روش تداخل‌سنجی (Interferometry) (Solberg *et al.*, 2013)، قطبش دوگانه با روش قطبش سنجی (Polarimetry) (Yazdani *et al.*, 2018)، رویه زمینی با داده‌های تک قطبش و روش

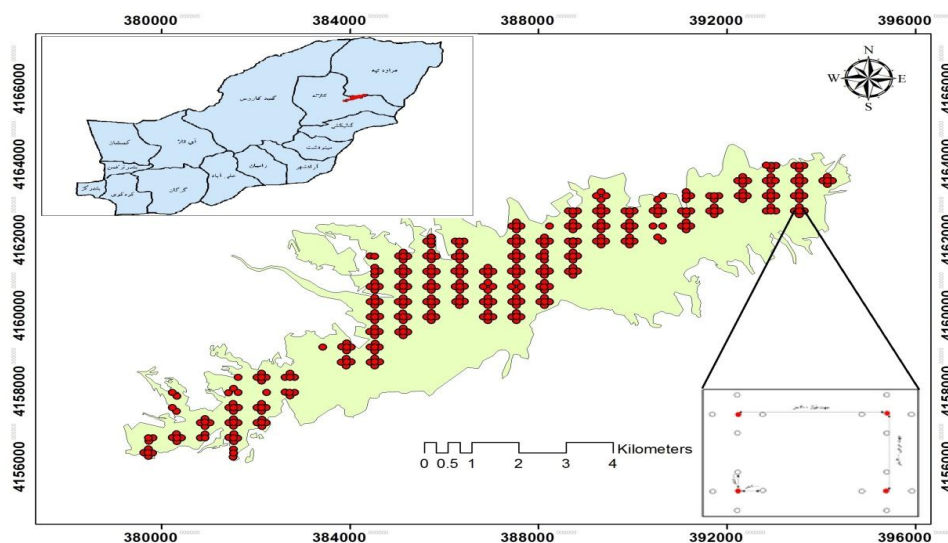
تا $51^{\circ}59'55.9''$ طول شرقی و $37^{\circ}30'46.1''$ تا $37^{\circ}38'19.43''$ عرض شمالی قرار گرفته است (شکل ۱). حداقل و حداکثر ارتفاع از سطح دریا ۲۳۰ و ۹۶۷ متر و جهت غالب شمالی جنوبی است. گونه‌های درختی منطقه شامل گونه‌های سوزنی‌برگ زربین (*Cupressus sempervirens*) و بروسیا (*Pinus brutia*) و به صورت لکه‌های کوچکی با گونه‌های پلت (*Acer velutinum*) و آزاد (*Zelkova carpinifolia*) هستند که به شکل خالص و یا مخلوط (آزاد- زربین، بروسیا- زربین، بروسیا- آزاد و ممرز) کاشته شده‌اند. اگرچه در این منطقه توده‌های طبیعی پهن‌برگ نیز وجود دارد، اما این پژوهش فقط در توده‌های دست‌کاشت منطقه انجام شد.

قطبش‌های تک و دوگانه قابلیت بیشتری در برآورد مشخصه‌های ساختاری جنگل دارند. بنابراین، پژوهش پیش‌رو با هدف برآورد مشخصه‌های کمی تعداد پایه، رویه زمینی و حجم در جنگل‌های دست‌کاشت منطقه عرب‌داغ با استفاده از داده‌های با قطبش چهارگانه راداری ماهواره ALOS-2 و روش قطبش سنجی انجام شد. کارایی سه الگوریتم ناپارامتریک جنگل تصادفی، ماشین بردار پشتیبان و k نزدیک‌ترین همسایه نیز در تحقق هدف اصلی پژوهش ارزیابی شد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

عرصه جنگل‌کاری عرب‌داغ در محدوده $55^{\circ}35'4.2''$



شکل ۱- موقعیت و گستره منطقه مورد مطالعه در استان گلستان

و فاصله هر قطعه‌نمونه از مرکز خوشه ۱۰۰ متر داشت (شکل ۱). مختصات دقیق مراکز خوشه‌ها با دستگاه تعیین موقعیت مکانی تفاضلی (DGPS) به روش PPK ثبت و با استفاده از نرم‌افزار TBC (Trimble Business Center) پردازش شد و مختصات مراکز خوشه‌های زمینی با دقت تعیین و نقشه آن‌ها در محیط GIS تهیه شد. در قطعه‌نمونه‌ها

داده‌های زمینی

داده‌های زمینی در پاییز ۱۳۹۶ با روش نمونه‌گیری منظم خوشه‌ای با تعداد ۶۹ خوشه (۳۱۹ قطعه‌نمونه) با فاصله بین مراکز هر خوشه ۶۰۰ متر در جهت طول و ۴۰۰ متر در جهت عرض جمع‌آوری شدند. هر خوشه پنج قطعه‌نمونه دایره‌ای شکل با شعاع $11/3$ متر به مساحت ۴۰۰ متر مربع

با استفاده از رابطه ۲ (Lee & Pottier, 2009) ساخته شد. سپس، به منظور بهبود قدرت تفکیک رادیومتری و ایجاد پیکسل‌های مربعی شکل، عمل چنددیدی (Multi looking) به اندازه دو بار در جهت برد (Range) و پنج بار در جهت آزیموت روی همه تصاویر راداری انجام شد تا اندازه پیکسل به ابعاد قطعه‌نمونه نزدیک شود. برای کاهش مقدار نویز لکه‌ای (Speckle noise)، مقایسه‌ای بین متغیرهای تصاویر راداری با اعمال دو نوع فیلتر لی پالایش‌شده و لی سیگما با الگوریتم جنگل تصادفی برای برآورد حجم سرپا انجام شد. همچنین، پس از مشخص شدن کارایی بهتر فیلتر معمول لی پالایش‌شده (Refined Lee)، به‌کارگیری این فیلتر با ابعاد پنجره‌های مختلف استفاده و ارزیابی شد و بهترین ابعاد پنجره به‌کار گرفته شد. تصحیحات اثر زاویه فرود (Polarimetric Orientation Angle Correction) طبق رابطه‌های ۳ و ۴ انجام شد (Zhao et al., 2017). مقدار ۷ با استفاده از رابطه ۵ محاسبه شد. در نهایت، تصاویر راداری تصحیح‌شده با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی با دقت ارتفاعی ۱۰ متری، زمین مرجع شدند. ویژگی‌های آلفا (∞)، آنتروپی (H) و ناهمسانگردی (A) تجزیه هدف با استفاده از الگوریتم Cloude & Pottier استخراج شدند. همچنین، پارامترهای قطبش سنجی Delta, Gamma, Beta, Lambada (1, 2, 3), Lambada (1, 2, 3), Alpha (1, 2, 3) و شاخص‌های RVI, SPAN, Pedestal Height با پنجره ۷×۷ استخراج شدند (Lee & Pottier, 2009). پردازش‌ها با استفاده از نرم‌افزار SNAP_6_0 انجام شدند.

قطر برابر سینه تمام درختان با قطر بیش از ۷/۵ سانتی‌متر و ارتفاع چهار درخت شامل نزدیک‌ترین درخت به مرکز قطعه‌نمونه، قطورترین درخت و دو درخت شاهد اندازه‌گیری شد. ابتدا تعداد درختان در قطعه‌نمونه و سپس تعداد در هکتار محاسبه شد. برای محاسبه رویه زمینی، ابتدا رویه زمینی تک‌درخت با استفاده از قطر برابر سینه و سپس رویه زمینی در قطعه‌نمونه و در هکتار محاسبه شد.

داده‌های رادار

در این پژوهش، از داده‌های راداری سنجنده PALSAR ماهواره ALOS-2 با قطبش چهارگانه (Full Polarimetry) یعنی (HH, HV, VV, VH)، در مد مشاهده‌ای حساسیت بالا (High-sensitive)، قدرت تفکیک مکانی (۶/۴۴×۲/۷۸ متر) و سطح تصحیحات L1.1 استفاده شد. در این سطح از تصحیحات، هیچ پردازشی بر روی تصاویر انجام نشد و داده‌ها به صورت (Single Look) SLC (Complex) دارای اطلاعات فاز بودند. داده‌ها در زاویه فرود (پهلونگری) ۳۵/۳ درجه در تاریخ ۲۹ اردیبهشت ۱۳۹۵ اخذ شده بودند.

پیش‌پردازش و پردازش داده‌های رادار

به‌طور متداول، داده‌های ماهواره‌ای تحت تأثیر عوامل مختلف، اغلب دچار خطاهای رادیومتری و هندسی می‌شوند. به‌منظور پیش‌پردازش داده‌های راداری، ابتدا داده‌های راداری با استفاده از رابطه ۱ (JAXA, 2014) کالیبره شدند. برای توصیف و تجزیه و تحلیل پدیده‌ها، ماتریس‌های مرتبه دوم T3

$$\sigma^{\circ} = 10 \times \log 10 (DN^2 + CF) \quad \text{رابطه (۱)}$$

$$s = \begin{bmatrix} S_{hh} & S_{hv} \\ S_{vh} & S_{vv} \end{bmatrix} \cdot \vec{k} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} S_{hh} + S_{hh} \\ S_{vv} - S_{vv} \\ 2S_{hv} \end{bmatrix} \cdot T_3 = \vec{k} \vec{k}^* T \quad \text{رابطه (۲)}$$

$$\delta = \frac{1}{4} \left[\tan^{-1} \left(\frac{-4\text{Re}((\text{shh}-\text{svv})s_{\text{hv}}^*)}{-|\text{shh}-\text{svv}|^2+4|\text{shv}|^2} \right) \right] \quad \text{رابطه (۳)}$$

$$T_3^{\text{POA}} = VT_3V^T \quad \text{رابطه (۴)}$$

$$V = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 + \text{COS}2\delta & \sqrt{2} \text{Sin}2\delta & 1 - \text{COS}2\delta \\ -\sqrt{2} \text{Sin}2\delta & 2\text{COS}2\delta & \sqrt{2} \text{Sin}2\delta \\ 1 - \text{COS}2\delta & -\sqrt{2} \text{Sin}2\delta & 1 + \text{COS}2\delta \end{bmatrix} \quad \text{رابطه (۵)}$$

کننده و اندازه گره ضروری هستند (Mutanga *et al.*, 2012). ساده‌ترین راه برای تعیین مقدار برآوردکننده‌ها k محاسبه جذر مربع تعداد کل متغیرهای مستقل است (Shataee *et al.*, 2012). یکی از پارامترهای اصلی در اجرای جنگل تصادفی پیش‌بینی کننده k (متغیر مستقل) در هر گروه جهت پیش‌بینی مقدار متغیر وابسته است. در پژوهش پیش‌رو، برای تعیین مقدار k از دامنه ± 2 از جذر کل تعداد متغیرهای مستقل استفاده شد.

ماشین بردار پشتیبان

الگوریتم ماشین بردار پشتیبان (SVM) براساس نظریه یادگیری آماری ارائه شده است. تعیین مناسب‌ترین پارامترهای الگوریتم شامل اپسیلون (ϵ) و ظرفیت (C) به همراه ثابت گاما نقش کلیدی در دستیابی به دقت بالا و عملکرد بهتر دارد. برای جستجوی شبکه‌ای از روش ارزیابی متقابل (Cross Validation) استفاده شد. در این پژوهش، از چهار کرنل خطی، چندجمله‌ای، سیگموئید و تابع شعاعی استفاده شد. برای محاسبه گاما از رابطه ۶ استفاده شد که n نشان‌دهنده تعداد متغیرهای مورد بررسی است (Shataee *et al.*, 2012).

$$\gamma = \frac{1}{n} \quad \text{رابطه (۶)}$$

برای انتخاب بهترین میزان اپسیلون و ظرفیت همانند

که در آن‌ها: σ_0 شدت بازپراکنش در واحد دسی‌بل (dB)، DN ارزش پیکسل، CF ضریب کالیبراسیون، S اجزای تشکیل‌دهنده ماتریس، Shh، SvV، Shv و SvH قطبش‌های چهارگانه، k بردار هدف Pauli برای محاسبه ماتریس T_3 و δ زاویه POA (زاویه فرود قطبش) هستند.

استخراج ارزش‌های طیفی

به‌منظور برآورد مشخصه‌های ساختاری توده در فرآیند مدل‌سازی، مقادیر تمام مشخصه‌های اخذشده از داده‌های مورد استفاده در سطح قطعه‌نمونه استخراج شدند. با توجه به قطعه‌نمونه‌های دایره‌ای شکل به مساحت ۴۰۰ مترمربع، ارزش‌های پیکسل‌های واقع‌شده در قطعات نمونه زمینی در همه شاخص‌ها و مؤلفه‌های راداری به‌دست‌آمده به‌عنوان داده‌های مستقل در مدل‌سازی آماری با استفاده از توابع آمار منطقه‌ای در محیط ArcGIS[®] استخراج شدند.

مدل‌سازی آماری با الگوریتم‌های ناپارامتریک

جنگل تصادفی

این الگوریتم یکی از روش‌های زیرمجموعه درخت‌های تصمیم‌گیری است و برای حل مسئله تعداد زیاد درخت تصادفی روی زیرمجموعه‌هایی از مجموعه‌ای داده تولید میکند و با میانگین‌گیری باعث بهبود دقت نتایج می‌شود. در مدل‌سازی با این الگوریتم، تنظیم و تعیین سه پارامتر تعداد درخت، تعداد متغیرهای برآورد

شد (Shataee et al., 2012). همچنین، سه معیار فاصله اقلیدسی، منهتن و چپچف ارزیابی شدند.

اعتبارسنجی

برای اعتبارسنجی، ۳۰ درصد نمونه‌ها (۷۹ نمونه) به طور تصادفی به عنوان داده‌های اعتبارسنجی انتخاب شدند (Yazdani et al., 2018). با داشتن مقادیر تخمینی و حقیقی با استفاده از معیارهای آماری، جذر میانگین مربعات خطای مطلق و نسبی براساس رابطه‌های ۷ و ۸ محاسبه شد. ارزیابی خطای سیستماتیک یک طرفه‌ای می‌باشد که برای تعیین اعتبار برآورد مدل‌های رگرسیونی استفاده می‌شود. در این پژوهش، ارزیابی مطلق و نسبی مدل‌ها براساس رابطه‌های ۹ و ۱۰ محاسبه شد (Astola et al., 2019).

$$RMSE_r = \frac{RMSE}{\bar{y}_i} \times 100 \quad \text{رابطه (۸)}$$

$$Bias = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)}{n} \quad \text{رابطه (۱۰)}$$

مطالعه به دلیل سنین مختلف جنگل‌کاری و گونه‌های مختلف کاشته شده سوزنی‌برگ است (جدول ۱).

نتایج انتخاب بهترین فیلتر و ابعاد پنجره آن از آنجاییکه مجذور میانگین مربعات خطای به دست آمده از فیلتر لی با ابعاد پنجره ۷×۷ نسبت به ابعاد دیگر پنجره‌ها کمتر بود، فیلتر لی با ابعاد پنجره ۷×۷ وارد فرآیند مدل‌سازی شد (جدول ۲).

از روش جستجوی شبکه‌ای استفاده شد. برای جستجوی شبکه‌ای، طیف وسیعی از متغیرهای ورودی ۱-۵۰ برای ظرفیت و ۰/۱ تا ۰/۵۰ برای اپسیلون در نظر گرفته شد.

k نزدیک‌ترین همسایه (k-NN)

الگوریتم k-NN اغلب با نام k نزدیک‌ترین همسایه طبقه‌بندی کننده و یا با نام k نزدیک‌ترین همسایه رگرسیون شناخته می‌شود، در نتیجه الگوریتم k-NN برای هر دو طبقه‌بندی و رگرسیون استفاده می‌شود (Meng et al., 2007; Shataee et al., 2012). پیاده‌سازی k-NN نیاز به چهار گزینه فاصله یا شباهت متریک، متغیرهای کمکی خاص، تعداد نزدیک‌ترین همسایگان دارد. در پژوهش پیش‌رو، دامنه k بهینه ۱ تا ۷۰ در نظر گرفته

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{n}} \quad \text{رابطه (۷)}$$

$$Bias_r = \frac{Bias}{\bar{y}_i} \times 100 \quad \text{رابطه (۹)}$$

که در آن‌ها: \bar{y}_i بردار برآورد شده، \bar{y}_i میانگین برآورده شده، y_i مقدار مشاهده شده و n تعداد مشاهدات است.

نتایج

آمار توصیفی داده‌های زمینی در مدل‌سازی بررسی آماره‌های توصیفی مشخصه‌ها نشان داد که دامنه تغییرات آنها بسیار زیاد است که بیانگر تغییرپذیری مکانی مشخصه‌های کمی ساختار توده جنگلی در منطقه مورد

جدول ۱- آماره‌های توصیفی برای مشخصه‌های حجم، رویه زمینی و تعداد در هکتار در قطعات نمونه

آماره توصیفی	حجم (متر مکعب در هکتار)			رویه زمینی (متر مربع در هکتار)			تعداد در هکتار	
	کل	مدل‌سازی	ارزیابی	کل	مدل‌سازی	ارزیابی	کل	مدل‌سازی
تعداد قطعه نمونه	۳۱۹	۲۴۰	۷۹	۳۱۹	۲۴۰	۷۹	۳۱۹	۲۴۰
دامنه	۳۱۸	۳۱۸	۲۶۸/۵	۵۲/۲۳	۵۲/۲۳	۴۰/۹۵	۲۰۷۵	۲۰۷۵
حداقل	۸/۵	۸/۵	۹/۲۵	۲/۰۵	۲/۰۵	۲/۵۳	۵۰	۵۰
حداکثر	۳۲۶/۵	۳۲۶/۵	۲۷۷/۷۵	۵۴/۲۸	۵۴/۲۸	۴۳/۴۸	۲۱۲۵	۲۱۲۵
میانگین	۹۲/۲	۹۲/۴	۹۱/۵۸	۱۷/۳۵	۱۷/۳۹	۱۷/۲۵	۸۴۸/۹۸	۸۵۰
انحراف از معیار	۶۲/۴۱	۶۳/۰۱	۶۰/۹۳	۹/۶۶	۹/۷۷	۹/۳۶	۴۵۶/۴	۴۶۰/۴۷
چولگی	۰/۹۳	۰/۹۶	۰/۸۴	۰/۵۴	۰/۵۸	۰/۴۱	۰/۴۶	۰/۴۷
کشیدگی	۰/۶۵	۰/۷۶	۰/۳۴	۰/۱۷	۰/۳	۰/۲۷	۰/۲۹	۰/۲۵

جدول ۲- مقادیر جذر میانگین مربعات خطای نسبی محاسبه شده در ابعاد پنجره‌های مختلف فیلتر لی با الگوریتم جنگل تصادفی

متغیر / ابعاد پنجره	۵×۵	۷×۷	۹×۹	۱۱×۱۱
حجم سر یا	۵۵	۶۰/۰۶	۶۰/۹۸	۶۰/۶۱
جذر میانگین مربعات خطا (%)	۸/۷۳	۵۰/۶۲	۵۱/۶۶	۵۱/۵۷
تعداد در هکتار	۴۴۰/۶۶	۵۲/۰۹	۵۲/۶۴	۵۲/۳۳

داد که به کارگیری ۶۰۰ درخت به عنوان تعداد درخت بهینه و ۴ درخت اولیه و زیرنمونه‌های ۵۰ درصد دارای کمترین مقدار جذر میانگین مربعات خطا است. در برآورد مشخصه تعداد در هکتار، نتایج نشان داد که به کارگیری ۶۰۰ درخت به عنوان تعداد درخت بهینه و ۴ درخت اولیه و زیرنمونه ۵۰ درصد دارای کمترین جذر میانگین مربعات خطا است.

برآورد مشخصه‌های کمی ساختار جنگل با استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی در برآورد مشخصه حجم با روش جنگل تصادفی، نتایج نشان داد که به کارگیری ۵۰۰ درخت به عنوان تعداد درخت بهینه و ۵ درخت اولیه و زیرنمونه‌های ۵۰ درصد دارای کمترین مقدار جذر میانگین مربعات خطا است (جدول ۳). در برآورد مشخصه رویه زمینی، نتایج نشان

جدول ۳- نتایج مربوط به اجرای الگوریتم جنگل تصادفی برای برآورد مشخصه‌های کمی توده‌های دست کاشت

مشخصه	تعداد درخت بهینه	تعداد K برآورد کننده	زیر نمونه	RMSE ($m^3 ha^{-1}$)	RMSE%	Bias ($m^3 ha^{-1}$)	Bias%
حجم سرپا	۵۰۰	۵	۰/۵	۵۵	۶۰/۰۶	۱/۸۷	۲/۰۴
	۵۰۰	۵	۰/۴	۵۵/۲۰	۶۰/۲۸	۲/۲۳	۲/۴۴
	۵۰۰	۵	۰/۶	۵۵/۴۸	۶۰/۵۸	۲/۴۸	۲/۷۱
	۵۰۰	۴	۰/۵	۵۵/۴۷	۶۰/۵۷	۲/۷۳	۲/۹۸
	۵۰۰	۴	۰/۶	۵۵/۰۴	۶۰/۱۰	۳	۳/۲۷
رویه زمینی	۶۰۰	۵	۰/۵	۸/۷۹	۵۰/۹۹	-۰/۱۷	-۰/۹۸
	۶۰۰	۵	۰/۴	۸/۷۸	۵۰/۹۲	-۰/۲۳	-۱/۳۴
	۶۰۰	۵	۰/۶	۸/۷۸	۵۰/۸۹	-۰/۲۸	-۱/۶۳
	۶۰۰	۴	۰/۵	۸/۷۳	۵۰/۶۲	-۰/۲۹	-۱/۷۰
	۶۰۰	۴	۰/۶	۸/۷۳	۵۰/۶۳	-۰/۲۷	-۱/۵۹
تعداد در هکتار	۶۰۰	۵	۰/۵	۴۴۲/۲۸	۵۲/۲۹	۴/۶۴	۰/۵۵
	۶۰۰	۵	۰/۴	۴۴۱/۹۰	۵۲/۲۴	-۱/۷۱	-۰/۲۰
	۶۰۰	۵	۰/۶	۴۴۱/۴۰	۵۲/۱۸	-۱/۳۱	-۰/۱۵
	۶۰۰	۴	۰/۵	۴۴۱/۰۷	۵۲/۱۴	-۲/۶۲	-۰/۳۱
	۶۰۰	۴	۰/۶	۴۴۰/۶۶	۵۲/۰۹	-۰/۸۷	-۰/۱۰

۵). نتایج به دست آمده از به کارگیری الگوریتم نزدیک ترین همسایه برای برآورد رویه زمینی با دامنه ۱ تا ۷۰ با سه معیار مربع اقلیدسی، منهتن و چپیچف وزن داده شده در برآورد رویه زمینی نشان داد که معیار منهتن وزن دار با $k = ۵۸$ دارای کمترین جذر میانگین مربعات خطا و اریبی است (جدول ۵). نتایج به دست آمده از به کارگیری الگوریتم نزدیک ترین همسایه برای برآورد تعداد پایه در هکتار با دامنه ۱ تا ۷۰ با سه معیار مربع اقلیدسی، منهتن و چپیچف وزن داده شده در برآورد تعداد پایه در هکتار نشان داد که معیار چپیچف وزن دار با $k = ۶۸$ دارای کمترین مقدار جذر میانگین مربعات خطا و اریبی است (جدول ۵). همچنین، در جدول ۶ نتایج ارزیابی اعتبار بهترین مدل‌ها با هر یک از الگوریتم‌ها برای سه مشخصه حجم سرپا، رویه زمینی و تعداد پایه در هکتار ارائه شده است.

برآورد مشخصه‌های کمی ساختار جنگل با استفاده از الگوریتم ماشین بردار پشتیبان نتایج الگوریتم ماشین بردار پشتیبان برای برآورد حجم سرپا با استفاده از کرنل‌های مختلف نشان داد که کرنل شعاعی با $\gamma = ۰/۰۶۳$ ، $\epsilon = ۰/۰۵$ و $C = ۳۵$ دارای کمترین مقدار جذر میانگین مربعات خطای نسبی و اریبی است (جدول ۴).

برآورد مشخصه‌های کمی ساختاری جنگل با استفاده از الگوریتم نزدیک ترین همسایه نتایج به کارگیری الگوریتم نزدیک ترین همسایه برای برآورد حجم سرپا با دامنه ۱ تا ۷۰ با سه معیار مربع اقلیدسی، منهتن و چپیچف وزن داده شده در برآورد حجم سرپا نشان داد که معیار منهتن وزن دار با $k = ۲۴$ دارای کمترین جذر میانگین مربعات خطا و اریبی است (جدول ۵).

جدول ۴- نتایج اجرای الگوریتم ماشین بردار پشتیبان برای برآورد مشخصه‌های کمی جنگل‌های دست کاشت

Bias%	Bias(m ³ ha ⁻¹)	RMSE%	RMSE(m ³ ha ⁻¹)	Capacity	Epsilon	Gamma	پنجره	مشخصه
۲/۰۷	۱/۸۹	۶۳/۳۴	۵۸	۴۵	۰/۱	.	خطی	
-۹/۰۱	-۸/۲۵	۵۹/۵۹	۵۴/۵۷	۵۰	۰/۱	۰/۰۶۳	چندجمله‌ای	حجم سریا
-۷/۹۴	-۷/۲۷	۵۸/۸۲	۵۳/۸۶	۳۵	۰/۵	۰/۰۶۳	شعاعی	
-۷/۳۲	-۶/۷۰	۶۱/۵۲	۵۶/۳۴	۳	۰/۱	۰/۰۶۳	سیگموئید	
Bias%	Bias(m ³ ha ⁻¹)	RMSE%	RMSE(m ³ ha ⁻¹)					
-۵/۹۱	-۱/۰۲	۵۳/۲۰	۹/۱۸	۴۵	۰/۱	.	خطی	
-۶/۵۸	-۱/۱۴	۵۲/۳۴	۹/۰۳	۵۰	۰/۱	۰/۰۶۳	چندجمله‌ای	رویه زمینی
-۸/۰۵	-۱/۳۹	۵۲/۳۸	۹/۰۴	۳۵	۰/۵	۰/۰۶۳	شعاعی	
-۵/۸۵	-۱/۰۱	۵۲/۴۶	۹/۰۵	۳۵	۰/۲	۰/۰۶۳	سیگموئید	
Bias%	Bias(nha ⁻¹)	RMSE%	RMSE(nha ⁻¹)					
-۵/۹۶	-۵۰/۴۲	۵۴/۱۴	۴۵۷/۹۷	۵	۰/۱	.	خطی	
-۲/۸۱	-۲۳/۷۷	۵۲/۶۰	۴۴۴/۹۵	۳	۰/۲	۰/۰۶۳	چندجمله‌ای	تعداد در هکتار
-۵/۱۰	-۴۳/۱۷	۵۲/۰۷	۴۴۰/۴۳	۲۵	۰/۲	۰/۰۶۳	شعاعی	
-۱/۱۷	-۹/۸۶	۵۲/۸۶	۴۴۷/۱۵	۳	۰/۵	۰/۰۶۳	سیگموئید	

جدول ۵- نتایج مربوط به اجرای الگوریتم نزدیک‌ترین همسایه برای برآورد مشخصه‌های کمی جنگل دست کاشت

Bias%	Bias (m ³ ha ⁻¹)	RMSE%	RMSE (m ³ ha ⁻¹)	<i>k</i> بهینه	مقدار <i>k</i>	اندازه	مشخصه
-۰/۱۷	-۰/۱۵	۶۱/۹۴	۵۶/۷۲	۵۱	۱-۷۰	اقلیدسی وزن‌دار	
-۱/۵۴	-۱/۴۱	۶۰/۲۲	۵۵/۱۵	۲۴	۱-۷۰	منهتن وزن‌دار	حجم سریا
۰/۷۱	۰/۶۵	۶۳/۹۹	۵۸/۶	۱۶	۱-۷۰	چیچف وزن‌دار	
Bias%	Bias (m ³ ha ⁻¹)	RMSE%	RMSE (m ³ ha ⁻¹)				
-۱/۱۴	-۰/۵۴	۵۱/۹۸	۸/۹۷	۴۹	۱-۷۰	اقلیدسی وزن‌دار	
-۱/۷	-۰/۲۹	۵۱/۶۹	۸/۹۲	۵۸	۱-۷۰	منهتن وزن‌دار	رویه زمینی
-۳/۳۴	-۰/۵۸	۵۲/۹۲	۹/۱۳	۱۶	۱-۷۰	چیچف وزن‌دار	
Bias%	Bias (nha ⁻¹)	RMSE%	RMSE (nha ⁻¹)				
۰/۳۳	۲/۸۱	۵۳/۲۲	۴۵۰/۱۴	۶۵	۱-۷۰	اقلیدسی وزن‌دار	تعداد در هکتار
-۰/۴۳	-۳/۶۶	۵۳/۳۴	۴۵۱/۱۷	۶۹	۱-۷۰	منهتن وزن‌دار	
-۰/۲۲	-۱/۸۵	۵۲/۹۵	۴۴۷/۹۲	۶۸	۱-۷۰	چیچف وزن‌دار	

جدول ۶- بهترین نتایج به دست آمده برای مشخصه‌های حجم سرپا، رویه زمینی و تعداد پایه در هکتار

تعداد پایه در هکتار		رویه زمینی در هکتار		حجم در هکتار		مدل
Bias%	RMSE%	Bias%	RMSE%	Bias%	RMSE%	
-۰/۱۰	۵۲/۰۹	-۱/۷۰	۵۰/۶۲	۲/۰۴	۶۰/۰۶	جنگل تصادفی
-۵/۱۰	۵۲/۰۷	-۸/۰۵	۵۲/۳۸	-۷/۹۴	۵۸/۸۲	ماشین بردار پشتیبان
-۰/۲۲	۵۲/۹۵	-۱/۷۰	۵۱/۶۹	-۱/۵۴	۶۰/۲۲	نزدیک‌ترین همسایه

بحث

وجود داشت. الگوریتم ماشین بردار پشتیبان نسبت به دو الگوریتم دیگر در خصوص برآورد حجم سرپا کمترین جذر میانگین مربعات خطای نسبی (۵۸/۸۰) درصد را داشت که با نتایج Holopainen و همکاران (۲۰۱۰)، با مقدار ۵۵/۸ درصد تا حدی مطابقت داشت، اما نسبت به نتایج Santoro و همکاران (۲۰۱۵)، با جذر میانگین مربعات خطای ۶۴ درصد عملکرد بهتری نشان داد که می‌تواند به دلیل اختلاف اندازه زاویه فرود، قطبش و نوع توده‌های سوزنی برگ از نظر طبیعی و دست‌کاشت باشد. اما در مقایسه با نتایج Ataee و همکاران، (۲۰۱۹)، Santoro و همکاران (۲۰۱۷) و Yazdani و همکاران (۲۰۱۸) که به ترتیب جذر میانگین مربعات خطا را ۴۶/۰۸، ۳۳/۹ و ۴۴/۰۹ درصد گزارش کردند، عملکرد ضعیف‌تری داشت که می‌تواند به دلیل ناهمگن بودن منطقه، دامنه تغییر زیاد در مشخصه‌های کمی ساختار جنگل و متفاوت بودن ترکیب توده جنگلی در منطقه مورد مطالعه باشد. تغییرپذیری مکانی مشخصه‌های کمی ساختار توده جنگلی در منطقه عرب‌داغ به دلیل سنین مختلف جنگل‌کاری و گونه‌های مختلف کاشته شده سوزنی‌برگ باشد.

نتایج این پژوهش نشان داد که کمترین مقدار جذر میانگین مربعات خطا و اریبی در برآورد رویه زمینی به ترتیب با الگوریتم جنگل تصادفی ۵۰/۶۲ درصد و ۱/۷- درصد، الگوریتم ماشین بردار پشتیبان ۵۲/۳۸ درصد و ۸/۰۵- درصد و الگوریتم نزدیک‌ترین همسایه وزن دار ۵۱/۶۹ درصد و ۱/۷- درصد به دست آمد که بیانگر اختلاف کم بین الگوریتم‌های ناپارامتریک بود. الگوریتم جنگل تصادفی نسبت به دو الگوریتم دیگر در برآورد رویه زمینی دارای کمترین مقدار

در پژوهش پیش‌رو برخی مشخصه‌های کمی ساختار جنگل با استفاده از داده‌های سنجنده ALOS-2 با قطبش چهارگانه و روش قطبش سنجی برآورد شدند. از نقاط قوت این پژوهش، استفاده از داده‌های قطبش چهارگانه و روش قطبش سنجی بود و دیگر اینکه برای روش قطبش سنجی داده تک‌زمانه نیاز است و به دست آوردن داده‌های تک‌زمانه در مقایسه با تهیه داده‌های دوزمانه که دارای کوه‌رنسی زمانی کم باشد، آسان است.

نتایج تجزیه و تحلیل توصیفی داده‌های زمینی نشان‌دهنده واریانس و دامنه تغییرات زیاد در مشخصه‌های سن، تراکم کاشت و نوع گونه در توده‌های جنگل‌کاری منطقه مورد مطالعه بود که بیانگر شرایط ناهمگن منطقه از نظر توزیع مکانی و کمی مشخصه‌های مورد بررسی است، به طوری که نمونه‌های زمینی از نظر حجم سرپا دارای دامنه ۸/۵ تا ۳۲۶/۵ متر مکعب در هکتار، رویه زمینی ۲/۰۵ تا ۵۴/۲۸ متر مربع در هکتار و تعداد پایه در هکتار از ۵۰ تا ۲۱۲۵ متغیر بودند. بنابراین، می‌توان گفت که قطعه نمونه‌های زمینی دارای دامنه وسیع هر سه مشخصه‌های کمی ساختاری جنگل بودند.

نتایج پژوهش نشان داد که کمترین مقدار جذر میانگین مربعات خطا و اریبی نسبی در برآورد حجم به ترتیب با الگوریتم‌های جنگل تصادفی ۶۰/۰۶ و ۲/۴ درصد، ماشین بردار پشتیبان ۵۸/۸ و ۷/۹- درصد و نزدیک‌ترین همسایه وزن دار ۶۰/۲ و ۱/۵۴- درصد به دست آمد. بنابراین، بین درصد مجذور میانگین مربعات خطای به دست آمده از برآورد حجم سرپا بین الگوریتم‌های ناپارامتریک تفاوت بسیار کمی

کمی و مکانی در مشخصه‌های کمی ساختار جنگل در منطقه مورد مطالعه که ناشی از سنین مختلف توده‌های جنگل‌کاری است، داده‌های راداری با قطبش چهارگانه و روش قطبش‌سنجی دارای قابلیت به نسبت متوسط در برآورد مشخصه‌های کمی ساختاری جنگل است. اگرچه از نظر دقت، آماربرداری زمینی نسبت به تخمین داده‌های سنجش از دور دقت بیشتری دارد، اما با توجه به چالش‌هایی مانند زمان و هزینه زیاد و عدم امکان ارزیابی مداوم به‌ویژه در شرایط فصلی نامساعد، استفاده از داده‌های سنجش از دور یک گزینه منطقی و مناسب است. همچنین، با توجه به نفوذ امواج راداری در تاج‌پوشش درختان و استفاده از آن در هر شرایط جوی، روز و شب یک گزینه خوب نسبت به داده‌های ماهواره‌های نوری در خصوص تخمین مشخصه‌های کمی ساختار جنگل است، به‌ویژه اینکه از داده‌های راداری با طول موج‌های P که قابلیت نفوذ خیلی خوبی دارند، استفاده شود. انتظار می‌رود که پژوهش‌های تکمیلی با کاربرد روش‌های تداخل سنجی راداری و یا روش‌های توموگرافی راداری و تلفیق آن با داده‌های نوری با قدرت تفکیک مکانی زیاد و لیدار در توده‌های مختلف جنگلی به‌ویژه جنگل‌های دست‌کاشت نتایج دقیق‌تری تولید کنند. همچنین، در صورت تلفیق داده‌های پلاریمتری و تداخل سنجی (PolInSAR) می‌تواند دقت نتایج را در مقایسه با استفاده مجزا از این داده‌ها افزایش دهد.

منابع مورد استفاده

- Antropov, O., Rauste, Y., Ahola, H., & Hame, T. 2013. Stand-level stem volume of boreal forests from spaceborne SAR imagery at L-band. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 6(1): 35-44.
- Askne, J., Fransson, J., Santoro, M., Soja, M., and Ulander, L., 2013. Model-based biomass estimation of a hemi-boreal forest from multitemporal TanDEM-X acquisitions. *Remote Sensing*, 5(11): 5574-5597.
- Astola, H., Häme, T., Sirro, L., Molinier, M., and Kilpi, J., 2019. Comparison of Sentinel-2 and Landsat 8 imagery for forest variable prediction in boreal region. *Remote Sensing of Environment*, 223: 257-273.

جذر میانگین مربعات خطا (۵۰/۶۲ درصد) بود که در مقایسه با پژوهش‌های Vastaranta و همکاران (۲۰۱۴)، Yazdani و همکاران (۲۰۱۸) و Yu و همکاران (۲۰۱۵)، با مقادیر به ترتیب ۱۲، ۳۵/۷۲ و ۱۳/۴ درصد عملکرد ضعیف‌تری داشت که می‌تواند به دلیل ناهمگن بودن منطقه از نظر بازپراکنش و زیاد بودن دامنه تغییر در مشخصه روی زمینی توده جنگلی در منطقه مورد مطالعه و تفاوت در نوع داده‌ها و روش پژوهش Vastaranta و همکاران (۲۰۱۴) و Yu و همکاران (۲۰۱۵) باشد، اما در پژوهش Yazdani و همکاران (۲۰۱۸)، توده جنگلی از نظر پیدایش با منطقه مورد مطالعه متفاوت بود.

نتایج نشان داد که کمترین مقدار جذر میانگین مربعات خطا و اریبی در برآورد تعداد در هکتار به ترتیب با الگوریتم جنگل‌تصادفی ۵۲/۱ درصد و ۰/۱- درصد، الگوریتم ماشین بردار پشتیبان ۵۲/۱ درصد و ۵/۱- درصد و الگوریتم نزدیک‌ترین همسایه وزن‌دار ۵۲/۹۵ درصد و ۰/۲۲- درصد به دست آمد که بیانگر اختلاف کم بین الگوریتم‌های ناپارامتریک بود (۲ درصد). الگوریتم ماشین بردار پشتیبان نسبت به دو الگوریتم دیگر در برآورد تعداد پایه در هکتار کمترین مقدار جذر میانگین مربعات خطا (۵۲/۰۷ درصد) را داشت که در مقایسه با پژوهش Morin و همکاران (۲۰۱۹) با جذر میانگین مربعات خطای ۵۴ درصد، عملکرد بهتری داشت، اما نسبت به نتایج Yazdani و همکاران (۲۰۱۸) با جذر میانگین مربعات خطای ۴۲/۳۷ درصد ضعیف‌تر عمل کرد.

از بین الگوریتم‌های ناپارامتریک مورد استفاده در این پژوهش استفاده از الگوریتم جنگل‌تصادفی نسبت به دو الگوریتم دیگر در برآورد حجم سرپا عملکرد بهتری داشت و در برآورد دو مشخصه رویه زمینی و تعداد پایه در هکتار الگوریتم ماشین بردار پشتیبان بهترین نتایج را ارائه کرد. اگرچه نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که نمی‌توان به‌طور دقیق از برآوردهای به دست آمده برای مرحله اجرایی مدیریت جنگل استفاده کرد، اما می‌توان پژوهش‌های هدفمندی را برای یافتن بهترین روش و منبع داده که بتوان نتایج قابل قبولی را ارائه کند، ادامه داد. بنابراین، می‌توان نتیجه‌گیری کرد که با توجه به ناهمگنی زیاد توده‌های مورد بررسی و زیاد بودن دامنه تغییرات

- Mutanga, O., Adam, E., and Cho, M. A., 2012. High density biomass estimation for wetland vegetation using WorldView-2 imagery and random forest regression algorithm. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 18: 399-406.
- Nguyen, L. V., Tateishi, R., Nguyen, H. T., Sharma, R. C., To, T. T., and Le, S. M., 2016. Estimation of tropical forest structural characteristics using ALOS-2 SAR data. *Advance in Remote Sensing*, 5: 131-144.
- Reuveni, Y., Dahan, E., Anker, Y., and Sprintsin, M., 2018. Estimating forest parameters using Landsat ETM+ spectral responses and monocultured plantation fieldwork measurements data. *International Journal of Remote Sensing*, 39(8): 2620-2636.
- Santos, J. R., Lacruz, M. P., Araujo, L. S., and Keil, M., 2002. Savanna and tropical rainforest biomass estimation and spatialization using JERS-1 data. *International Journal of Remote Sensing*, 23(7): 1217-1229.
- Shataee, S., Kalbi, S., Fallah, A., and 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.
- Solberg, S., Astrup, R., Breidenbach, J., Nilsen, B., and Weydahl, D., 2013. Monitoring spruce volume and biomass with InSAR data from TanDEM-X. *Remote Sensing of Environment*, 139: 60-67.
- Vastaranta, M., Niemi, M., Karjalainen, M., Peuhkurinen, J., Kankare, V., Hyypä, J., and Holopainen, M., 2014. Prediction of forest stand attributes using TerraSAR-X stereo imagery. *Remote Sensing*, 6(4): 3227-3246.
- Yazdani, M., Shataee, S., Mohammadi, J., Maghsoudi, M., 2018. Comparative study of the possibility estimation of some structural quantitative attributes of Caspian forests using Radar and integrating Radar and Lidar data. *RS and GIS for Natural Resources*, 8(4): 109-126 (In Persian).
- Yu, X., Hyypä, J., Karjalainen, M., Nurminen, K., Karila, K., Vastaranta, M., and Kukko, A., 2015. Comparison of laser and stereo optical, SAR and InSAR point clouds from air-and space-borne sources in the retrieval of forest inventory attributes. *Remote Sensing*, 7(12): 15933-15954.
- Zhao, L., Chen, E., Li, Z., Zhang, W., and Gu, X., 2017. Three-step semi-empirical radiometric terrain correction approach for PolSAR data applied to forested areas. *Remote Sensing*, 9(3): 269.
- Ataee, M. S., Maghsoudi, Y., Latifi, H., and Fadaie, F., 2019. Improving Estimation Accuracy of Growing Stock by Multi-Frequency SAR and Multi-Spectral Data over Iran's Heterogeneously-Structured Broadleaf Hyrcanian Forests. *Forests*, 10(8): 641.
- Chowdhury, T. A., Thiel, C., and Schmullius, C., 2014. Growing stock volume estimation from L-band ALOS PALSAR polarimetric coherence in Siberian forest. *Remote Sensing of Environment*, 155: 129-144.
- Golshani, P., Maghsoudi, Y., and Sohrabi, H., 2019. Relating ALOS-2 PALSAR-2 Parameters to Biomass and Structure of Temperate Broadleaf Hyrcanian Forests. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 47(5): 749-761.
- Gonzalez, P., Asner, G. P., Battles, J. J., Lefsky, M. A., Waring, K. M., and Palace, M., 2010. Forest carbon densities and uncertainties from Lidar, QuickBird, and field measurements in California. *Remote Sensing of Environment*, 114(7): 1561-1575.
- Holopainen, M., Haapanen, R., Karjalainen, M., Vastaranta, M., Hyypä, J., Yu, X., ... and 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.
- JAXA, 2014. ALOS-2/Calibration Result of JAXA Standard Products. Japan Aerospace Exploration Agency, Earth Observation Research Center. http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS-2/en/calval/calval_index.htm
- Lee, J. S., and Pottier, E., 2009. *Polarimetric radar imaging: from basics to applications*. CRC press. Taylor & Francis Group. 422 p.
- Long, J., Lin, H., Wang, G., Sun, H., and Yan, E., 2019. Mapping growing stem volume of chinese fir plantation using a saturation-based multivariate method and Quad-polarimetric SAR images. *Remote Sensing*, 11(16): 1872.
- Meng, Q., Cieszewski, C. J., Madden, M., and Borders, B. E., 2007. K nearest neighbor method for forest inventory using remote sensing data. *GIScience and Remote Sensing*, 44(2): 149-165
- Morin, D., Planells, M., Guyon, D., Villard, L., Mermoz, S., Bouvet, A., and Dedieu, G., 2019. Estimation and Mapping of Forest Structure Parameters from Open Access Satellite Images: Development of a generic method with a study case on coniferous plantation. *Remote Sensing*, 11(11): 1275.

Capatality of Alos-Palsar-2 radar quad polarization data for estimation of structural quantitative characteristics of planted forest, Arabdagh region, Iran

A. Noori¹, Sh. Shataee^{*2} and J. Mohammadi³

1- M.Sc. Graduated of Forestry, Department of Forestry, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran

2^{*}- Corresponding author, Prof., Department of Forestry, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: shataee@gau.ac.ir

3- Assistant Prof., Department of Forestry, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran

Received: 23.11.2019

Accepted: 02.02.2020

Abstract

Estimating forest attributes is essential for understanding the condition and function of the forest to be applied in forest planning and management. The purpose of this study was to estimate the structural attributes of conifer-dominated plantations using radio detection and ranging (RADAR) polarimetric data and nonparametric algorithms in the Arabdagh region of Golestan province. Field-based structural attributes were collected from 319 circular plots with 400 m² areas designed within a random cluster method. Within each plot, diameter at breast height (for all trees) and height (for some trees) were measured. The precise position of plots ere also recorded. Then stand volume, basal area, and the number of stem per ha were calculated. The required preprocessing and processing were conducted on raw RADAR data, followed by the extraction of plot-based values from the derived indices. Model training was done on 75% of plots using random forest, support vector machine, and K nearest neighbor algorithms. Results were validated with the remaining 25% of the plots. The results showed the lowest Root Mean Square Error and Bias for Random Forest algorithm for basal area 50.62% and -1.7%, respectively. Moreover, the support vector machine model achieved 58.82% and -7.94% for volume as well as 52.07% and -5.1% for no. of trees per hectare. As a whole, this study showed that the full polarization PALSAR-2 data has a moderate ability to estimate the quantitative structural attributes due to the high amplitude of changes in the quantitative forest characteristics.

Keywords: Nonparametric algorithms, polarimetric, radar, softwood replantations.