



بررسی قابلیت داده‌های ماهواره‌های لندست ۸ و سنتینل ۲ در برآورد مشخصه‌های کمی توده در جنگل‌های پهن‌برگ استان گلستان

سیده‌زهره سیدموسوی^{۱*}، اصغر فلاح^۲، جهانگیر محمدی^۳ و روشنک درویش‌زاده^۴

^۱ دانش‌آموخته دکتری مدیریت جنگل، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، ایران
^۲ استاد گروه جنگلداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری
^۳ دانشیار گروه مدیریت جنگل، دانشکده علوم جنگل، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان
^۴ دانشیار گروه علوم اطلاعات جغرافیایی و رصد زمین (ITC)، دانشگاه توئنته، هلند

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۲۴؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۸/۰۱)

چکیده

مقدمه: کسب اطلاعات بهنگام از وضعیت کمی و کیفی جنگل‌ها در مدیریت اکوسیستم، طراحی طرح‌های مدیریتی و حفاظتی لازم است. با توجه به نقش جنگل‌های هیرکانی در حفظ تنوع زیستی، تعدیل آب‌وهوا، ارزش‌های محیط زیستی و اقتصادی و حفاظت از آب و خاک و هزینه زیاد و زمان‌بر بودن اندازه‌گیری مشخصه‌های کمی توده جنگل از طریق روش‌های میدانی، استفاده از داده‌های سنجنش از دور و مدل‌سازی اطلاعات زیادی را در این زمینه فراهم می‌کنند، به طوری که نیاز کمتری به انجام دادن کارهای میدانی است. هدف از این پژوهش بررسی قابلیت ماهواره‌های لندست ۸ و سنتینل ۲ در برآورد مشخصه‌های کمی رویه زمینی در هکتار و حجم در هکتار در بخش‌هایی جنگل‌های پهن‌برگ استان گلستان است.

مواد و روش‌ها: در این پژوهش برای برداشت اطلاعات زمینی ۲۳۰ قطعه نمونه دایره‌ای به مساحت ۱۰۰۰ متر مربع با روش نمونه‌برداری سیستماتیک و شبکه ۱۰۰×۱۰۰ متر در پنج رویشگاه کردکوی، شصت کلاته، زرین گل، سرخداری و لوه پیاده شد. مرکز جغرافیایی هر قطعه نمونه با استفاده از دستگاه سیستم موقعیت‌یاب جهانی تفاضلی (DGPS) ثبت شد. در هر قطعه نمونه نوع گونه، قطر برابرسینه بیشتر از ۱۲/۵ سانتی‌متر و ارتفاع درختان اندازه‌گیری شد. سپس حجم در هکتار، رویه زمینی در هکتار در هر قطعه نمونه محاسبه شد. پس از پردازش تصاویر و تهیه شاخص‌های گیاهی (NDVI، RVI، SAVI، PCA، GNDVI، EVI، DVI و IPVI)، ارزش‌های رقومی متناظر با قطعات نمونه زمینی از باندهای طیفی استخراج شد. تحلیل عدم قطعیت نتایج نیز با استفاده از روش مونت کارلو انجام گرفت. مدل‌سازی داده‌ها به دو روش رگرسیون چندمتغیره خطی و الگوریتم جنگل تصادفی انجام گرفت. در این تحقیق برای برآورد مشخصه‌های کمی از مجموع ۲۳۰ قطعه نمونه، ۱۷۵ قطعه نمونه (۷۵ درصد) در فرایند مدل‌سازی به کار گرفته شده و ۵۵ قطعه نمونه (۲۵ درصد) به منظور اعتبارسنجی در الگوریتم‌های داده‌کاوی استفاده شدند.

یافته‌ها: براساس نتایج حاصل از برآورد مشخصه‌های کمی رویه زمینی و حجم در هکتار با استفاده از رگرسیون چندمتغیره خطی و داده‌های لندست ۸، درصد مجذور میانگین مربعات خطا به ترتیب ۵۰/۷۲ و ۴۷/۰۶ و برای داده‌های سنتینل ۲ به ترتیب ۴۸/۶۶ و ۴۵/۸۹ حاصل شد. نتایج حاصل از برآورد دو مشخصه یادشده با استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی و داده‌های لندست ۸ به ترتیب ۴۴/۵۳ و ۴۱/۲۸ درصد و برای داده‌های سنتینل ۲ به ترتیب ۴۴/۲۱ و ۳۹/۶۶ حاصل شد.

نتیجه‌گیری: به طور کلی نتایج تحقیق نشان داد که الگوریتم جنگل تصادفی و داده‌های سنتینل ۲ در برآورد مشخصه‌های کمی رویه زمینی و حجم در هکتار نتایج بهتری به میزان حدود ۶ تا ۱۱ درصد نسبت به روش رگرسیون خطی و داده‌های لندست ۸ ارائه داد. نتایج آنالیز عدم قطعیت نیز نشان داد که میانگین برآوردشده مشخصه‌های کمی حجم و رویه زمینی در هکتار در محدوده حدود اطمینان (۹۷/۵-۲/۵) قرار دارد که نشان‌دهنده انتخاب مناسب مدل است. در مجموع می‌توان گفت رویکرد استفاده‌شده در این تحقیق حاکی از قابلیت متوسط در برآورد مشخصه‌های کمی رویه زمینی و حجم در هکتار جنگل است.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم جنگل تصادفی، حجم در هکتار، رگرسیون چند متغیره، رویه زمینی در هکتار، سنتینل ۲، لندست ۸

مقدمه

برآورد دقیق و بهنگام مشخصه‌های کمی ساختار توده‌های جنگل لازمه مدیریت صحیح توده‌های جنگلی است. این مشخصه‌های کمی، پایه و اساس تصمیم‌گیری‌های عملیات مدیریتی هستند و طولانی بودن عملیات مدیریتی جنگل، اهمیت این موضوع را دوچندان می‌کند. بنابراین در راستای مدیریت پایدار، به اطلاعات دقیق و بهنگام از وضعیت کمی و کیفی این منابع جنگل نیاز است (Farhadi et al., 2019). در عرصه‌های جنگلی مشخصه‌های کمی جنگل همچون قطر، رویه زمینی، حجم و سطح تاج پوشش از عوامل اساسی است که باید همیشه مدنظر قرار گیرد. با تعیین و برآورد مشخصه‌های کمی درختان، اطلاعات اولیه به‌منظور برنامه‌ریزی درباره آینده جنگل حاصل می‌شود که برای مدیریت جنگل ضروری است. همچنین آگاهی از مشخصه‌های کمی درختان، یکی از اولویت‌هایی است که نقش کلیدی در زمان‌بندی مناسب تیمارهای جنگل‌شناسی و برنامه‌ریزی‌های بلندمدت دارد (Marvie-Mohadjer et al., 2012). Zobeiri, 2008). به‌طور معمول تهیه اطلاعات مشخصه‌های کمی توده از طریق عملیات میدانی صورت می‌گیرد، اما جمع‌آوری این اطلاعات به روش زمینی نیازمند زمان و هزینه‌های زیادی است (Latifi et al., 2010). همچنین کوهستانی و شیبدار بودن عرصه‌های جنگلی برآورد دقیق و زمینی مشخصه‌های کمی را با مشکل روبه‌رو کرده است؛ بنابراین همواره سعی می‌شود با استفاده از دستاوردهای مختلف علمی از روش‌های جایگزین، کم‌هزینه و دقیق استفاده شود (Mohammadi, 2014). داده‌های سنجش از دور با توجه به مزایایی مانند سطح پوشش وسیع، کم‌هزینه بودن و قابلیت تکرار از پرکاربردترین روش‌ها هستند. امروزه با استفاده از داده‌های سنجش دوری مختلف و روش‌های مختلف مدل‌سازی مانند رگرسیون چندگانه (MLR)^۱ و الگوریتم‌های یادگیری ماشین، یادگیری

عمیق (DL^۲) و مدل‌های آمیخته (MM^۳) به همراه داده‌های زمینی به برآورد مشخصه‌های کمی ساختار توده‌های جنگلی می‌پردازند. توانایی داده‌های سنتینل ۲ و لندست ۸ برای پایش مشخصه‌های کمی توده بررسی شده است (Astola et Grabska et al., 2019; al., 2019). پژوهش‌های زیادی در زمینه برآورد مشخصه‌های کمی توده‌های جنگلی از جمله قطر، حجم سرپا، تراکم و غیره با استفاده از داده‌های سنجش از دوری و الگوریتم‌های داده‌کاوی در ایران و خارج از کشور انجام گرفته است (Varamesh & Anbaran., 2023; Dajleri et al., 2023; Poorazimy et al., 2023; Nazariani et al., 2022; Falah et al., Seyed Mousavi et al., Astola et al., 2022; Zahriban et al., 2019; 2020).

Pourazimi et al. (2023) به بررسی تنوع ساختاری دو مشخصه قطر برابرینه و تعداد درختان جنگل‌های هیرکانی با استفاده از داده‌های راداری پرداختند. نتایج نشان داد که الگوریتم نزدیک‌ترین همسایه نسبت به الگوریتم‌های جنگل تصادفی و ماشین بردار پشتیبان در پیش‌بینی قطر برابرینه و تعداد درختان موفق‌تر عمل کردند. درصد میانگین مجذور مربعات خطا و ضرایب تبیین برای مشخصه قطر برابرینه به ترتیب ۳۲/۸ درصد و ۰/۲۵ و برای مشخصه تعداد درختان ۴۱/۵۶ و ۰/۲۲ محاسبه شد. Varamesh & Anbaran (2023) به بررسی پتانسیل تصاویر سنتینل ۲ در برآورد زی‌توده هوایی در بخشی از جنگل‌های فندق‌لوی اردبیل پرداختند. نتایج نشان داد که شاخص SAVI با ضریب تبیین ۰/۷۸ و مجذور میانگین مربعات خطای ۲/۴۵ از شاخص‌های دیگر دقیق‌تر است. مقدار زی‌توده منطقه پژوهش نیز ۱۳۲/۴۳ تن در هکتار برآورد شد. Dabija et al. (2021) به مقایسه الگوریتم‌های ماشین بردار پشتیبان و جنگل تصادفی برای برآورد تاج پوشش با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ و سنتینل ۲ در سه

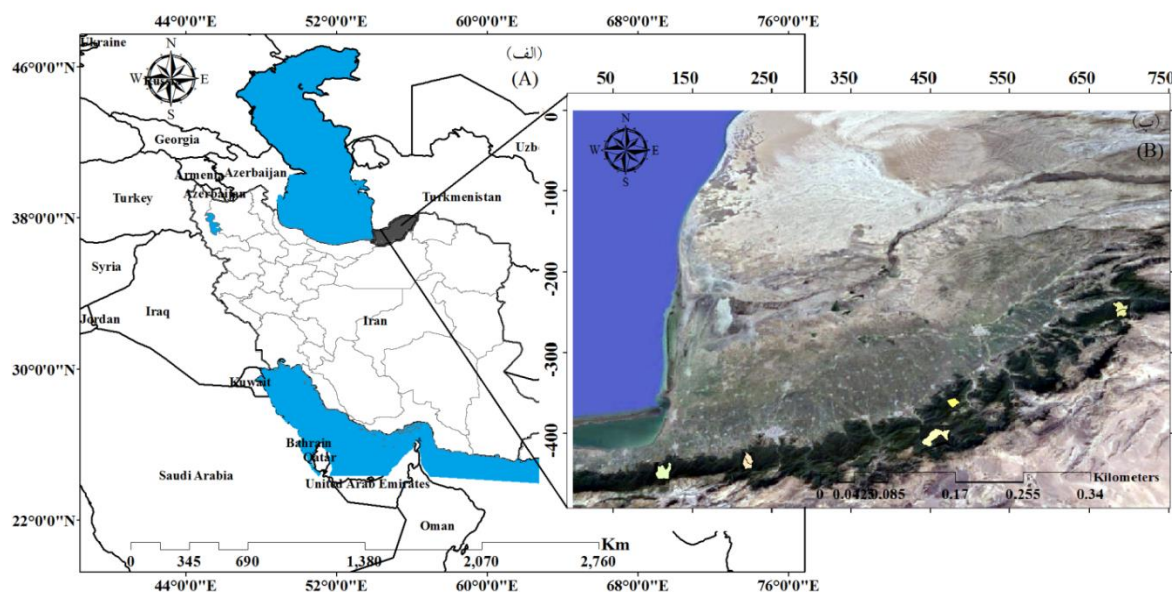
مواد و روش‌ها

منطقه پژوهش

پژوهش حاضر در پنج رویشگاه در جنگل‌های استان گلستان انجام گرفت (شکل ۱). رویشگاه درازنو کردکوی قسمتی از حوضه آبخیز شماره ۸۴ را شامل می‌شود. تیپ جنگل تحت بررسی، پهن‌برگ خالص و آمیخته و فرم آن اغلب دانه‌زاد ناهمسال و تیپ غالب جنگل شامل گونه‌های *Fagus orientalis* Lipsky., *Carpinus betulus* L. *Acer velutium* Boiss. و *Acer cappadocicum* Gled., (Kordkoy management of forestry project, 2008). رویشگاه شصت کلاته در بخشی از سری یک توده مدیریت‌شده و بخشی از سری ۲ مدیریت‌نشده طرح جنگلداری شصت کلاته گرگان در حوضه آبخیز ۸۵ اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان گلستان و در جنوب شرقی شهر گرگان واقع است. گونه‌های درختی منطقه شامل *Fagus orientalis*, *Acer velutium* Boiss., *Carpinus betulus*, *Parrotia persica* C.A. May., *Quercus castaneifolia* C.A. May. است (Doctor Bahramnia, 2009). رویشگاه زرین گل در حوضه آبخیز ۸۸، منطبق بر مرزهای جغرافیایی دو شهرستان علی‌آباد استان گلستان است. گونه‌های درختی منطقه شامل *Carpinus betulus* و *Quercus castaneifolia* است (Zarrin gol Forestry Plan, 2000). رویشگاه لوه در ۲۴ کیلومتری جنوب شرقی شهرستان استان گلستان واقع شده است. گونه‌های درختی منطقه شامل *Acer velutium*, *Quercus castaneifolia* و *Carpinus betulus* است (Sorkhdary Forest Management Plan, 2007). رویشگاه سرخداری در شهر رامیان واقع شده است. گونه‌های درختی منطقه شامل *Carpinus betulus* است (Loveh Forestry Plan Booklet, 2007). مناطق تحت بررسی از نظر طبقه‌بندی اقلیمی آمبرژه دارای اقلیم مرطوب معتدل‌اند و بارندگی متوسط سالیانه در این مناطق ۶۰۱ میلی‌متر است (شکل ۱).

منطقه مختلف کاتالونیا، لهستان و رومانی پرداختند. نتایج نشان داد که تصاویر ماهواره‌ای سنتینل ۲ نسبت به داده‌های لندست ۸ با دقت بهتری در طبقه‌بندی تاج پوشش جنگل عمل کرد. Nazariani et al. (2022) به برآورد مشخصه‌های کمی جنگل‌های زاگرس با استفاده از داده‌های لندست ۸ و سنتینل ۲ و الگوریتم‌های ناپارامتریک در جنگل‌های کوه‌دشت لرستان پرداختند. نتایج نشان داد که روش‌های مدل‌سازی ناپارامتریک و تصاویر ماهواره سنتینل ۲ با درصد میانگین مجذور مربعات خطا ۱۰/۵۳ و ۹/۳۸ نتایج مطلوبی در برآورد مشخصه‌های تعداد درختان در هکتار و تاج‌پوشش به همراه داشت. Chrysafis et al. (2017) به بررسی روابط بین حجم درختان و داده‌های سنتینل ۲ و لندست ۸ پرداختند. نتایج نشان داد که استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی و داده‌های سنتینل ۲ برای تخمین حجم درختان در مقابل الگوریتم ماشین بردار پشتیبان بهتر عمل کرد. Shataee et al. (2012) به بررسی مشخصه‌های کمی جنگل با استفاده از روش‌های یادگیری ماشینی (جنگل تصادفی، نزدیک‌ترین همسایه و ماشین بردار پشتیبان) و داده‌های ASTER پرداختند. نتایج نشان داد که در برآورد حجم در هکتار، هر سه الگوریتم عملکرد مشابهی داشتند، اما در برآورد رویه زمینی در هکتار و تعداد درختان در هکتار، الگوریتم ماشین بردار پشتیبان و نزدیک‌ترین همسایه نتایج بهتری را برآورد کردند.

با توجه به اینکه جنگل‌های هیرکانی از مهم‌ترین بوم‌سازگان‌های حیاتی دنیا هستند (Marvie, 2012)، بررسی مشخصه‌های کمی توده در سطح وسیع و تعداد زیاد نمونه با تصاویر ماهواره‌ای بسیار ضروری است. بررسی قابلیت‌های داده‌های ماهواره‌ای لندست و سنتینل ۲ برای برآورد مشخصه‌های کمی توده در بخشی از جنگل‌های استان گلستان مهم تلقی می‌شود.



شکل ۱- موقعیت منطقه پژوهش در استان ایران (الف)، استان گلستان (ب)
Figure 1. Location of study area in Iran (A), Golestan Province (B)

DBH قطر برابر سینه، H ارتفاع درخت و f ضریب شکل است.

پیش پردازش و پردازش داده‌های ماهواره‌ای
تصاویر لندست ۸ در آگوست ۲۰۲۱ از وبسایت سازمان زمین‌شناسی ایالات متحده (USGS) (<https://earthexplorer.usgs.gov>) به دست آمد. تصاویر با حداقل پوشش ابر و با وضوح مکانی ۳۰ متر، از تمامی باندها تهیه شدند. تصحیح جوی داده‌های لندست ۸ در سطح دو ماهواره سری زمانی لندست اجرا شد. صحت هندسی تصویر با استفاده از نقاط کنترل بررسی شد. سپس شاخص‌های طیفی NDVI، RVI، IPVI، DVI، GNDVI و EVI از باندهای چندطیفی لندست ۸ تولید شد (جدول ۱). وضوح رادیومتری و مکانی تصاویر به ترتیب ۱۲ بیت و ۳۰ متر برای باندهای (۲ تا ۸) است (جدول ۱).
تصاویر سنتینل ۲ در ماه آگوست ۲۰۲۱ از مرکز دسترسی آزاد کوپرنیکوس (<https://scihub.Copernicus.eu>) به دست آمد. داده‌های تصویر به دست آمده تصحیح و پیش‌پردازش شدند. صحت هندسی با استفاده از نقاط کنترل بررسی

شیوه اجرای پژوهش

در این تحقیق، داده‌هایی زمینی در تابستان ۱۴۰۱ با روش نمونه‌برداری منظم با شروع تصادفی با شبکه نمونه‌برداری ۱۰۰×۱۰۰ متر و قطعات نمونه دایره‌شکل با مساحت ۱۰۰۰ متر مربع در پنج طرح جنگلداری درازنو، شصت کلاته، سرخداری، زرین‌گل و لوه جمع‌آوری شد (شکل ۱). در مجموع در ۲۳۰ قطعه نمونه به مساحت ۳۶، ۹۰، ۴۱، ۳۳ و ۳۲ هکتار به ترتیب برای رویشگاه‌های درازنو، شصت کلاته، سرخداری، زرین‌گل و لوه آماربرداری شد. مرکز جغرافیایی هر قطعه نمونه با استفاده از سیستم موقعیت‌یاب جهانی تفاضلی (DGPS)^۱ ثبت شد. در هر قطعه نمونه نوع گونه، قطر برابر سینه بیشتر از ۱۲/۵ سانتی‌متر، ارتفاع درختان اندازه‌گیری و ثبت شد. ارتفاع درختان با ورتکس لیزری، قطر برابر سینه با خط‌کش دوبازو و قطر تاج با متر لیزری اندازه‌گیری شد. سپس سطح رویه زمینی از رابطه ۱ محاسبه شد. حجم سرپا درختان نیز از رابطه ۱ برآورد شد.

$$\text{رابطه ۱} \quad V = \frac{\pi}{4} DBH^2 H_f$$

1. Difference Global Positioning System

تولید شد (جدول ۱). وضوح رادیومتری تصاویر سنتینل ۲، ۱۶ بیت است. وضوح مکانی تصاویر سنتینل نیز برای باندهای (۲، ۳، ۴ و ۸) ۱۰ متر و برای باندهای (۵، ۶، ۷، ۸A، ۱۱ و ۱۲) ۲۰ متر است. مقادیر بازتاب برای تصاویر لندست ۸ از پنجره ۱×۱ و برای تصاویر سنتینل ۲ با استفاده از پنجره ۳×۳ پیکسلی در هر قطعه نمونه استخراج شد.

شد. تصاویر تمامی باندهای سنتینل ۲ نیز، با حداقل پوشش ابر و با وضوح مکانی ۱۰ و ۲۰ متر، تهیه شدند. تصحیح جوی داده‌های سنتینل ۲ در سطح 2A اجرا شده است. مقادیر پیکسل هر کدام از باندها با استفاده از نرم‌افزار R پردازش و مدل‌سازی شدند. سپس شاخص‌های پوشش گیاهی طیفی NDVI، RVI، IPVI، DVI، GNDVI و EVI از باندهای چندطیفی سنتینل ۲

جدول ۱- شاخص‌های گیاهی طیفی استفاده‌شده در تحقیق

Table 2. Spectral Vegetation Indices Used in the Research

نام	تعریف	فرمول	رفرنس
Name	Difine	Formula	Refrence
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index	$(NIR - Red)/(NIR + Red)$	(Rouse, 1974)
RVI	Ratio Vegetation Index	$(NIR)/(Red)$	(Pearson & Miller, 1972)
IPVI	Infrared Percentage Vegetation Index	$(NIR)/(NIR + Red)$	(Richardson et al., 1977)
DVI	Difference Vegetation Index	$(NIR - Red)$	(Tucker, 1979)
GNDVI	Green normalized difference vegetation index	$(Green-NIR)/(Green+NIR)$	(Bannari et al., 1995)
EVI	Enhanced vegetation index	$2.5 \times (NIR - Red)/(NIR + C1 \times Red - C2 \times blue + L)$	(Huete et al., 1994)

استفاده‌شده در مدل به دست می‌آید (Breiman, 2001).

اعتبارسنجی مدل‌های رگرسیونی

اعتبارسنجی با استفاده از ۲۵ درصد از داده‌های باقی‌مانده که به صورت تصادفی انتخاب شده بودند و به کمک آماره‌های مجذور میانگین مربعات خطا و میانگین تفاوت‌ها انجام گرفت (رابطه‌های ۲ تا ۵).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{n}} \quad \text{رابطه ۲}$$

$$RMSE\% = \frac{RMSE}{\bar{y}} \times 100 \quad \text{رابطه ۳}$$

$$\bar{D} = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)}{n} \quad \text{رابطه ۴}$$

$$\bar{D}\% = \frac{\bar{D}}{\bar{y}} \times 100 \quad \text{رابطه ۵}$$

n، تعداد نمونه‌ها \hat{y}_i مشخصه برآوردشده، y_i مشخصه اندازه‌گیری‌شده زمینی است.

آنالیز عدم قطعیت

برای بررسی عدم قطعیت (Uncertainty) معادلات

برآورد مشخصه‌های کمی با استفاده از الگوریتم‌های پارامتریک و ناپارامتریک

در این تحقیق برای برآورد مشخصه‌های کمی از مجموع ۲۳۰ قطعه نمونه برداشت‌شده زمینی در منطقه، ۱۷۵ قطعه نمونه (۷۵ درصد) در فرایند مدل‌سازی به کار گرفته شدند و ۵۵ قطعه نمونه (۲۵ درصد) به منظور اعتبارسنجی، در الگوریتم‌های داده‌کاوی استفاده شدند. از روش پارامتریک رگرسیون و الگوریتم ناپارامتریک جنگل تصادفی برای مدل‌سازی مشخصه‌های کمی استفاده شد. برای تعیین تعداد درختان بهینه و تهیه نمودار میانگین مربعات خطای از داده‌های آزمون، الگوریتم جنگل تصادفی با ۱۰۰۰ درخت اجرا شد. با تفسیر نمودار میانگین مربعات خطای داده‌های آموزش حاصل‌شده، جایی که میزان میانگین مربعات خطا تغییری مشاهده نشود، به عنوان تعداد درخت بهینه انتخاب شد. پارامتر دیگر در اجرای الگوریتم جنگل تصادفی تعداد برآوردکننده‌ها k در هر گره برای برآورد متغیر وابسته است که از جذر کل تعداد متغیرهای مستقل

مجموع ۲۳۰ قطعه نمونه به ترتیب ۳۶ قطعه نمونه در رویشگاه کردکوی، ۸۸ قطعه نمونه در رویشگاه شصت کلاته، ۴۱ قطعه نمونه در رویشگاه زرین گل، ۳۳ قطعه نمونه در رویشگاه سرخ‌داری و ۳۲ قطعه نمونه در رویشگاه لوه استان گلستان قرار داشتند و همگی به‌عنوان یک مجموعه وارد تجزیه و تحلیل‌ها شدند. نتایج بررسی آماره‌های توصیفی داده‌های زمینی رویه زمینی، حجم در هکتار برای کل قطعات نمونه نشان داد که میانگین رویه زمینی و حجم سرپا در هکتار به ترتیب ۲۴/۸۰ (متر مربع) و حجم در هکتار ۳۱۲/۹۳ (متر مکعب) است. آماره‌های توصیفی مشخصه‌های رویه زمینی در هکتار و حجم در هکتار نشان داد که دامنه تغییرات این مشخصه‌ها زیاد بوده است (جدول ۲).

برآورد مشخصه‌های کمی با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای و رگرسیون چندمتغیره خطی

از شاخص اهمیت جنگل تصادفی برای بررسی میزان اهمیت متغیرها استفاده شد. باند ۵ (طول موج ۸۵۰/۸۸-۰/۰ میکرومتر)، باند ۶ (طول موج ۱/۶۵-۱/۵۷ میکرومتر) و باند ۷ (طول موج ۲/۲۹-۲/۱۱ میکرومتر) و شاخص‌های گیاهی RVI، NDVI، DVI و IPVI با ضرایب همبستگی (R=۰/۴۳-۰/۷) را برای داده‌های لندست ۸ داشتند. نتایج همچنین نشان داد که برای هر دو مشخصه رویه زمینی در هکتار و حجم در هکتار، باند مادون قرمز نزدیک (B5) به ترتیب (۰/۷- و ۰/۵۷-) بیشترین همبستگی منفی را دارند (جدول ۳).

در برآورد مشخصه‌های کمی اندازه‌گیری در قطعات نمونه، از روش شبیه‌سازی بازنمونه‌گیری (Bootstrapping) به روش مونت کارلو با تعداد ۱۰۰۰ تکرار و با جایگزین استفاده شد. آنالیز عدم قطعیت مونت کارلو نوعی روش آماری است که برای برآورد عدم قطعیت در مدل‌های پیچیده استفاده می‌شود. این روش به‌ویژه زمانی مفید است که مدل‌های تحلیلی دقیق یا راه‌حل‌های بسته برای مسائل وجود ندارد و باید از شبیه‌سازی‌های عددی استفاده کرد. برای هر یک از پارامترهای ورودی، یک توزیع احتمالی مشخص می‌شود. این توزیع‌ها نشان می‌دهند که هر مقدار از پارامتر چقدر محتمل است. در این روش مشخصه‌های میانگین، انحراف معیار و حدود اطمینان داده‌های شبیه‌سازی شده به روش مونت کارلو بررسی می‌شوند. بودن میانگین داده‌های واقعیت زمینی در محدوده حدود اطمینان و نزدیک بودن میانگین آنها، نشان‌دهنده برازش خوب مدل است (Halperin et al., 2011, McRoberts et al., 2016). در این روش نمونه‌ها به‌صورت تصادفی و به‌صورت جایگزین شبیه‌سازی شدند و پارامترهای فاصله اطمینان (۵/۵-۲/۹۷ درصد) و واریانس معادلات در برآورد آنها محاسبه شد. برای بررسی نرمال بودن توزیع داده‌ها نیز از آزمون کولموگروف-اسمیرنوف استفاده شد.

نتایج

کنترل هندسه تصاویر نشان داد که تصاویر از کیفیت خوبی برخوردارند و به تصحیح نیاز ندارند. از

جدول ۲- مشخصه‌های آماری رویه زمینی در هکتار و حجم در هکتار به‌دست‌آمده از اندازه‌گیری‌های زمینی

Table 2. Basal Area ($m^2 \cdot ha^{-1}$) and Volume ($m^3 \cdot ha^{-1}$) statistical characteristics obtained from field measurements

مشخصه بررسی شده Quantitative characteristics	متغیر Value	تعداد قطعات نمونه (Number of plots)	میانگین (Mean)	حداقل (Min)	حداکثر (Max)
	مدل (Model)	175	26.42	6.41	85
رویه زمینی در هکتار (مترمربع در هکتار)	اعتبارسنجی (Valuation)	55	24.29	0.94	98.27
Basal area ($m^2 \cdot ha^{-1}$)	کل (Total)	230	24.80	0.94	98.27
	مدل (Model)	175	329.67	44.24	1328.52
حجم سرپا در هکتار (مترمکعب)	اعتبارسنجی (Valuation)	55	307.67	3.56	1547.22
Volume ($m^3 \cdot ha^{-1}$)	کل (Total)	230	230	3.56	1547.22

جدول ۳- نتایج همبستگی با استفاده از شاخص اهمیت برای مشخصه‌های رویه زمینی در هکتار و حجم در هکتار با استفاده از رگرسیون چندمتغیره خطی و داده‌های لندست ۸

Table 3. Correlation Analysis Using the Importance Index of Random Forest for Basal Area ($m^2 \cdot ha^{-1}$) and Volume ($m^3 \cdot ha^{-1}$) with MLR and Landsat 8 Data

مشخصه بررسی شده Quantitative characteristics	باندها و شاخص‌های گیاهی Bands and VI	ضریب همبستگی R
رویه زمینی در هکتار Basal area ($m^2 \cdot ha^{-1}$)	B5	-0.7
	B6	-0.64
	B7	-0.43
	DVI	-0.61
	IPVI	-0.61
	NDVI	-0.61
	RVI	-0.59
حجم در هکتار Volume ($m^3 \cdot ha^{-1}$)	B5	-0.57
	B6	-0.52
	B7	-0.37
	DVI	-0.52
	IPVI	+0.52
	NDVI	+0.52
	RVI	-0.5

درصد مجذور میانگین مربعات خطا با استفاده از داده‌های لندست به ترتیب ۵۰/۷۲ و ۴۷/۰۶ است. برای داده‌های سنتینل ۲ نیز به ترتیب مقادیر ۴۸/۶۶ و ۴۵/۸۹ حاصل شد (جدول ۵).

به دلیل اینکه داده‌های سنتینل ۲ مقادیر دو مشخصه کمی بررسی شده با استفاده از رگرسیون چندمتغیره خطی را بهتر برآورد کردند، تنها شکل مربوط به استفاده از داده‌های سنتینل ۲ آورده شد. شکل ۲ نمودارهای پراکنش مقادیر ارزیابی مشاهدات زمینی دو مشخصه کمی بررسی شده را در مقابل داده‌های پیش‌بینی شده از تصاویر سنتینل ۲ با استفاده از الگوریتم پارامتریک رگرسیون چندمتغیره خطی نشان می‌دهد (شکل ۲).

نتایج حاصل از آنالیز واریانس مدل‌های رگرسیونی دو مشخصه کمی بررسی شده با استفاده از داده‌های لندست ۸ و سنتینل ۲ نشان داد که در سطح احتمال ۹۹ درصد بین مشخصه‌های حجم در هکتار و سطح مقطع در هکتار مشاهده شده و برآوردی ارتباط معنی‌داری وجود دارد (جدول ۶).

باند ۲ (طول موج ۰/۴۵-۰/۵۱ میکرومتر)، باند ۳ (طول موج ۰/۵۳-۰/۵۹ میکرومتر)، باند ۴ (طول موج ۰/۶۳-۰/۶۷ میکرومتر)، باند ۵ (طول موج ۰/۸۸-۰/۸۵ میکرومتر)، باند ۶ (طول موج ۱/۶۵-۱/۵۶ میکرومتر)، باند ۷ (طول موج ۲/۱-۲/۳ میکرومتر)، باند ۸ (طول موج ۰/۶۷-۰/۵۱ میکرومتر) و باند ۸A (طول موج ۱/۳۴-۱/۳۶ میکرومتر) و شاخص‌های گیاهی GNDVI، DVI، NDVI، EVI و IPVI برای تصاویر سنتینل ۲ با ضرایب همبستگی بین (۰/۸۸-۰/۳) را برای داده‌های سنتینل ۲ داشتند (جدول ۴). همچنین نشان داد که برای هر دو مشخصه رویه زمینی در هکتار و حجم در هکتار، باند مادون قرمز نزدیک (B8) به ترتیب (۰/۸۸ و ۰/۶۴) بیشترین همبستگی را دارند.

نتایج حاصل از برآورد مقادیر دو مشخصه کمی رویه زمینی در هکتار و حجم در هکتار بررسی شده با استفاده از رگرسیون چندمتغیره خطی به روش گام‌به‌گام با استفاده از متغیرهای مستقل ایجاد شده از طریق شاخص اهمیت جنگل تصادفی نشان داد که

جدول ۴- نتایج همبستگی با استفاده از شاخص اهمیت برای مشخصه‌های رویه زمینی در هکتار و حجم در هکتار در هکتار با استفاده از رگرسیون چندمتغیره خطی و داده‌های سنتینل ۲

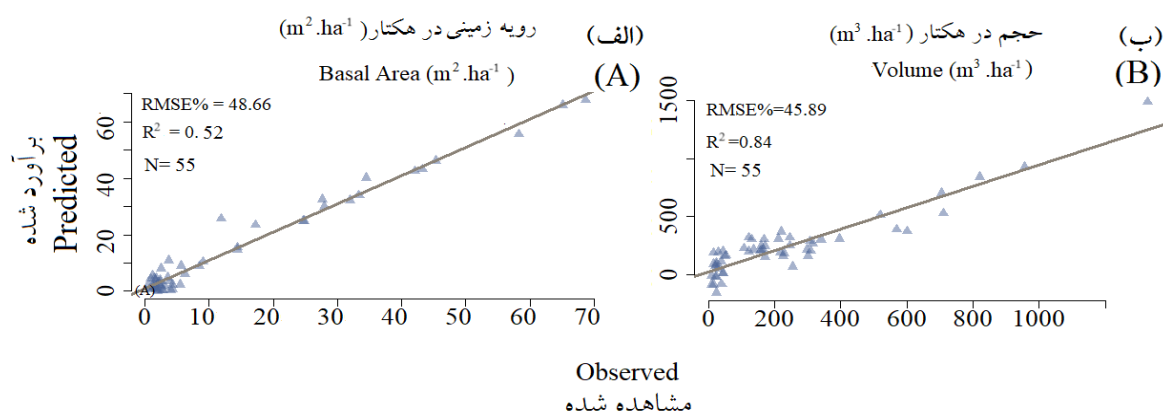
Table 4. Correlation Analysis Using the Importance Index of Random Forest for Basal Area ($m^2 \cdot ha^{-1}$) and Volume ($m^3 \cdot ha^{-1}$) with MLR and Sentinel 2 data

مشخصه بررسی شده Quantitative characteristics	باندها و شاخص‌های گیاهی Bands and VI	ضریب همبستگی R
رویه زمینی در هکتار Basal area ($m^2 \cdot ha^{-1}$)	B2	-0.74
	B3	-0.57
	B4	-0.5
	B5	+0.37
	B6	-0.55
	B7	+0.63
	B8	+0.88
	B8A	-0.81
	GNDVI	+0.67
	DVI	+0.81
	NDVI	+0.68
	EVI	-0.76
IPVI	+0.34	
حجم در هکتار Volume ($m^3 \cdot ha^{-1}$)	B2	-0.51
	B3	-0.52
	B4	-0.34
	B5	-0.3
	B6	+0.5
	B7	+0.51
	B8	+0.64
	B8A	-0.6
	GNDVI	+0.54
	DVI	-0.61
	NDVI	+0.61
	EVI	+0.58
IPVI	+0.51	

جدول ۵- مقادیر محاسبه‌شده مجذور میانگین مربعات خطا، درصد مجذور میانگین مربعات خطا، اریب و درصد اریب برای مشخصه‌های رویه زمینی در هکتار و حجم در هکتار با استفاده از رگرسیون چندمتغیره خطی و داده‌های لندست ۸ و سنتینل ۲

Table 5. The calculated values of RMSE, RMSE%, Bias, and Bias% for Basal Area ($m^2 \cdot ha^{-1}$) and Volume ($m^3 \cdot ha^{-1}$) using the MLR algorithm with Landsat 8 and Sentinel-2 data.

مشخصه بررسی شده Quantitative characteristics	ماهواره Satellite	ضریب تبیین R^2	مجذور میانگین مربعات خطا RMSE	درصد مجذور میانگین مربعات خطا RMSE%	اریبی \bar{D}	درصد اریبی $\bar{D}\%$
رویه زمینی در هکتار Basal area ($m^2 \cdot ha^{-1}$)	لندست ۸	0.48	10.23	50.72	0.40	1.52
حجم در هکتار Volume ($m^3 \cdot ha^{-1}$)	Landsat-8	0.59	155.15	47.06	9.10	2.75
رویه زمینی در هکتار Basal area ($m^2 \cdot ha^{-1}$)	سنتینل ۲	0.52	11.06	48.66	2.11	5.63
حجم در هکتار Volume ($m^3 \cdot ha^{-1}$)	Sentinel-2	0.84	105.41	45.89	8.53	3.72



شکل ۲- نمودار پراکنش مقادیر ارزیابی مشخصه‌های کمی رویه زمینی در هکتار و حجم در هکتار مشاهده شده در مقابل مقدار پیش‌بینی شده در داده‌های اعتبارسنجی با استفاده از داده‌های سنتینل ۲ و الگوریتم رگرسیون چندمتغیره خطی (الف و ب) Figure 2. Observed Basal Area (m².ha⁻¹) and Volume (m³.ha⁻¹) quantitative characteristics versus the predicted value in the validation data using the linear regression and Sentinel-2 (A, B)

جدول ۶- نتایج آنالیز واریانس مدل‌های رگرسیونی مشخصه‌های رویه زمینی در هکتار و حجم در هکتار با استفاده از داده‌های لندست ۸ و سنتینل ۲

Table 6. Analysis of Variance Results for Regression Models Estimating Basal Area (m².ha⁻¹) and Volume (m³.ha⁻¹) Using Landsat-8 and Sentinel-2 Data

مشخصه بررسی شده quantitative characteristics	ماهواره Satellite	مدل Model	درجه آزادی (Degrees of freedom)	مجموع مربعات (Sum of squares)	میانگین مربعات (mean squares)	آماره F (Statistics F)	سطح معنی‌داری (significance)
رویه زمینی در هکتار Basal aera (m ² . ha ⁻¹)		رگرسیون (regression)	11	12113.7	1101.2	7.94	0.000**
		باقی‌مانده‌ها (Residuals)	162	22471.8	138.7		
		کل (Total)	173	34585.3			
حجم در هکتار Volume (m ³ . ha ⁻¹)	Lansat-8	رگرسیون (regression)	11	4025023	365911	10.48	0.000**
		باقی‌مانده‌ها (Residuals)	162	5654837	34906		
		کل (Total)	173	9679860			
رویه زمینی در هکتار Basal aera (m ² . ha ⁻¹)	سنتینل ۲	رگرسیون (regression)	14	3693762	263840	27.10	0.000**
		باقی‌مانده‌ها (Residuals)	160	1557860	9737		
		کل (Total)	174	5251622			
حجم در هکتار Volume (m ³ . ha ⁻¹)	Sentinel-2	رگرسیون (regression)	14	6352725	453766	18.13	0.000**
		باقی‌مانده‌ها (Residuals)	160	4004097	25026		
		کل (Total)	174	10356823			

** در سطح ۹۹ درصد معنی‌دار است.
** Significant at the 99% level.

۸ و ۴۴/۲۱ و ۳۹/۶۶ درصد با استفاده از داده‌های سنتینل ۲ و الگوریتم جنگل تصادفی محاسبه شد (جدول ۷).

شکل ۳ نمودارهای پراکنش مقادیر ارزیابی مشاهدات زمینی دو مشخصه کمی بررسی شده را در مقابل داده‌های پیش‌بینی شده از تصاویر سنتینل ۲ با استفاده از الگوریتم ناپارامتریک جنگل تصادفی نشان می‌دهد. نتایج لندست هم کم‌وبیش همانند نمودارهای سنتینل است (شکل ۳).

برآورد مشخصه‌های کمی با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای و الگوریتم جنگل تصادفی

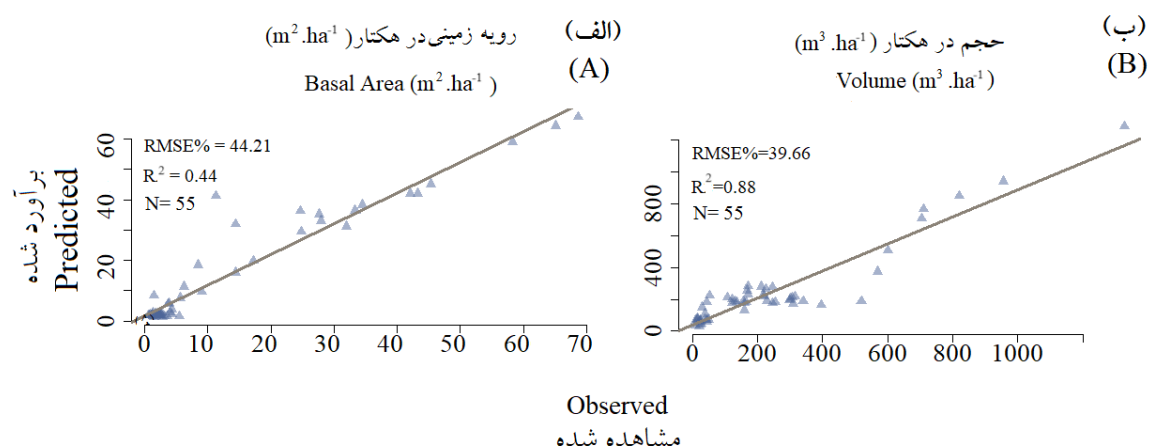
برای بررسی دقیق از ± 2 جذر کل تعداد متغیرها استفاده شد تا k یا تعداد برآوردکننده‌های بهینه در هر گره انتخاب شود. نتایج ارزیابی حاصل از الگوریتم جنگل تصادفی با تعداد $k = 4$ و تعداد ۵۰۰ درخت بهترین برآورد مشخصه‌های کمی را نشان می‌دهد. میانگین مجذور مربعات خطای مشخصه‌های رویه زمینی در هکتار و حجم در هکتار در هکتار به ترتیب ۴۴/۵۳ و ۴۱/۲۸ درصد با استفاده از داده‌های لندست

جدول ۷- مقادیر محاسبه‌شده مجذور میانگین مربعات خطا، درصد مجذور میانگین مربعات خطا، اریب و درصد اریب برای

مشخصه‌های رویه زمینی در هکتار و حجم در هکتار با استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی و داده‌های لندست ۸ و سنتینل ۲

Table 7. The calculated values of RMSE, RMSE%, Bias, and Bias% for Basal Area ($m^2 \cdot ha^{-1}$) and Volume ($m^3 \cdot ha^{-1}$) using the RF algorithm with Landsat 8 and Sentinel-2 data

مشخصه بررسی شده Quantitative characteristics	ماهواره Satellite	درخت بهینه (Optimal tree)	k	ضریب تبیین R^2	مجدور میانگین مربعات خطا RMSE	درصد مجذور میانگین مربعات خطا RMSE%	اریبی \bar{D}	درصد اریبی $\bar{D}\%$
رویه زمینی در هکتار Basal area ($m^2 \cdot ha^{-1}$)	لندست ۸	500	4	0.48	10.23	50.72	0.40	1.52
حجم در هکتار Volume ($m^3 \cdot ha^{-1}$)	Landsat-8	500	4	0.59	155.15	47.06	9.10	2.75
رویه زمینی در هکتار Basal area ($m^2 \cdot ha^{-1}$)	سنتینل ۲	500	4	0.52	11.06	48.66	2.11	5.63
حجم در هکتار Volume ($m^3 \cdot ha^{-1}$)	Sentinel-2	500	4	0.84	105.41	45.89	8.53	3.72



شکل ۳- نمودار پراکنش مقادیر ارزیابی مشخصه‌های کمی رویه زمینی در هکتار و حجم در هکتار در هکتار مشاهده‌شده در مقابل مقدار پیش‌بینی شده در داده‌های اعتبارسنجی با استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی و داده‌های سنتینل ۲ (الف و ب) Figure 3. Observed Basal Area ($m^2 \cdot ha^{-1}$) and Volume ($m^3 \cdot ha^{-1}$) quantitative characteristics versus the predicted value in the validation data using the RF algorithm and Sentinel-2 (A, B)

حدود اطمینان $۳۱/۴۵ - ۲۲/۷۶$ و $۲۷۹/۸۲ - ۲۱۷/۷$ محاسبه شد (جدول ۸).

نتایج بررسی عدم قطعیت نشان داد که ۹۵ درصد از مقادیر برآوردشده داده‌های ماهواره‌ای لندست ۸ و سنتینل ۲ در محدوده میانگین اندازه‌گیری زمینی هر کدام از دو مشخصه کمی بررسی شده است (جدول ۸).

نتایج آنالیز عدم قطعیت با استفاده از روش مونت‌کارلو نشان داد که ۹۵ درصد از مقادیر برآوردشده مشخصه کمی رویه زمینی در هکتار در محدوده حدود اطمینان $(۳۱/۶۱ - ۲۳/۲۷)$ و برای مشخصه کمی حجم در هکتار در محدوده حدود اطمینان $۳۰۰/۲۹ - ۲۲۷/۹۹$ بود. این مقادیر برای داده‌های سنتینل ۲ نیز به ترتیب در محدوده‌های

جدول ۸- نتایج بوت استرپ برای مشخصه‌های کمی رویه زمینی و حجم در هکتار با استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی و داده‌های لندست ۸ و سنتینل ۲

Table 8. Bootstrap results for Basal Area ($m^2.ha^{-1}$) and Volume ($m^3.ha^{-1}$) quantitative characteristics for RF algorithm and Landsat-8 and Sentinel-2 data

ماهواره Satellite	مشخصه بررسی شده quantitative characteristics	میانگین برآوردی Mean Estimate	میانگین بوت استرپ Mean of Bootstrap	95% CI for Mean		SE	SD
				Lower (2.5%) CI Limit	Upper (97.5%) Limit		
لندست ۸	رویه زمینی در (مترمربع در هکتار) هکتار Basal aera ($m^2.ha^{-1}$)	24.86	24.81	23.27	31.61	0.17	9.18
Landsat-8	حجم (مترمکعب در هکتار) Volume($m^3.ha^{-1}$)	347.79	346.92	294.87	400.10	0.17	211.48
سنتینل ۲	رویه زمینی در (مترمربع در هکتار) هکتار Basal aera ($m^2.ha^{-1}$)	24.6	24.19	22.76	31.45	0.20	8.94
Sentinel-2	حجم (مترمکعب در هکتار) Volume($m^3.ha^{-1}$)	231.98	231.71	173.22	299.91	0.19	242.05

جمع‌آوری اطلاعات مربوط به مشخصه‌های کمی زمان‌بر و هزینه‌بر است. با توجه به اینکه بعضی داده‌های سنجش از دوری رایگان‌اند، می‌توانند همزمان براساس داده‌های زمینی لحاظ و استفاده شوند. در این پژوهش دو سنجنده لندست ۸ و سنتینل ۲ در برآورد مشخصه‌های کمی رویه زمینی و حجم در هکتار در جنگل‌های پهن‌برگ استان گلستان ارزیابی شد. براساس نتایج آماره‌های توصیفی از مجموع ۲۳۰ قطعه نمونه زمینی در پنج طرح جنگلداری (درازنو، شصت‌کلاته، زرین‌گل، سرخداری و لوه) مشخصه کمی رویه زمینی در محدوده $۹۸/۲۷$ تا $۰/۹۴$ سانتی‌متر مربع در هکتار و حجم در هکتار در محدوده $۳/۵۶$ تا $۱۵۴۷/۲۲$ متر مکعب در هکتار اندازه‌گیری شد. آماره‌های توصیفی دو مشخصه‌های

طبق این جدول می‌توان نتیجه گرفت که میانگین واقعی مشخصه‌های کمی رویه زمینی، حجم در محدوده حدود اطمینان $(۲/۵ - ۹۷/۵)$ قرار دارند که نشان‌دهنده انتخاب مناسب و دقیق مدل است. حدود اطمینان $۲/۵$ درصد تا $۹۷/۵$ درصد به صورت گسترده برای نشان دادن دامنه‌ای از نتایج که با احتمال ۹۵ درصد شامل مقدار واقعی هستند استفاده می‌شود.

بحث

اجرای دقیق و صحیح عملیات جنگل نیازمند اطلاعات دقیق و بهنگام از مشخصه‌های کمی ساختار جنگل مانند رویه زمینی و حجم سرپا در هکتار به صورت یک نقشه پیوسته است. افزون‌بر این با توجه به وسعت زیاد و ساختار پراکنش جنگل‌های هیرکانی

کنند. وجود رابطه معنی‌دار در سطح احتمال ۹۵ درصد با ضریب تبیین ۰/۴۸ و درصد میانگین مجذور مربعات خطای ۵۰/۷۲ و نتایج آنالیز عدم اطمینان با استفاده از روش مونت کارلو و قرار گرفتن میانگین مشخصه رویه زمینی در حدود اطمینان ۹۷/۵-۲/۵ شواهدی هستند که امکان برآورد رویه زمینی در هکتار با استفاده از این داده‌ها را با دقتی متوسط تأیید می‌کند. نتایج حاصل از برآورد مشخصه رویه زمینی با داده‌های سنتینل ۲ نشان داد که با به‌کارگیری داده‌های سنتینل ۲، مجذور مربعات خطا حدود ۳ درصد بهبود یافت. با به‌کارگیری الگوریتم جنگل تصادفی برای داده‌های لندست ۸ و سنتینل ۲ میزان درصد مجذور میانگین مربعات خطا حدود ۶ و ۱۱ درصد به ترتیب بهبود یافت. میانگین مربعات خطای حاصل از این تحقیق در برآورد مشخصه رویه زمینی در هکتار در مقایسه با پژوهش‌های Shataee et al. (2012)؛ Noorian et al. (2019)؛ Kalbi et al. (2014) و Zahrihan et al. (2019) که میانگین مجذور مربعات خطا را بین ۳۸/۱۵-۱۸/۳۹ درصد برآورد کردند بیشتر بود. بیشتر بودن میانگین مجذور مربعات خطا در این پژوهش به عواملی مانند چندآشکوبه بودن توده‌ها و وجود قطعات نمونه در پنج توده بسیار دور از هم و مختلف و دور از هم از نظر تیپ، یکسان نبودن تعداد قطعات نمونه در هر منطقه و اندازه پنجره برای استخراج مقادیر بازتاب برای تصاویر لندست ۸ و سنتینل ۲ و غیره مرتبط است، در صورتی که در بقیه پژوهش‌ها به‌طور معمول کل قطعات نمونه از یک توده و تقریباً توده خالص با شرایط توپوگرافی یکنواخت (Moradi et al. (2018) و Kalbi et al. (2014) نمونه‌برداری شده‌اند. از این‌رو پیشنهاد می‌شود که در پژوهش‌های بعدی به این موضوع توجه شود.

نتایج حاصل از آنالیز رگرسیون برای داده‌های لندست ۸ نشان داد که ترکیب خطی B5، B6، B7، DVI، IPVI، NDVI و RVI به‌عنوان متغیر مستقل، بهتر توانستند تغییرات رویه زمینی در هکتار را توجیه

کمی بررسی شده نشان داد که دامنه تغییرات این مشخصه‌ها گسترده است و سعی شد از تمام طبقات قطری و ارتفاعی توده جنگل انتخاب شود. این دامنه تغییرات این مشخصه‌ها، ناشی از عواملی مانند نوع توده‌های انتخابی، ساختار جنگل و ناهمگنی توده‌ها و ساختار توده جنگلی و عوامل توپوگرافی در نقاط مختلف است.

همسو با پژوهش‌های (Ronoud et al. (2016) ، (Noorian et al. (2019) و (Kalbi et al. (2011) نتایج پژوهش حاضر نیز نشان داد که باند مادون قرمز نزدیک (B8) سنتینل ۲ بیشترین همبستگی مثبت را با مشخصه رویه زمینی در هکتار ($R=0/88$) و مشخصه حجم در هکتار ($R=0/64$) داشت. ضریب همبستگی مثبت بیانگر رابطه مستقیم بین ارزش‌های طیفی و مشخصه‌های رویه زمینی و حجم است. با افزایش یا کاهش رویه زمینی و حجم، بازتاب‌های طیفی نیز به‌صورت مشابه افزایش می‌یابند. زیاد بودن انعکاس طیفی در باند مادون قرمز نزدیک به تراکم زیاد درختان یا دو یا سه‌آشکوبه بودن توده و ساختار برگ درختان منطقه ارتباط دارد که سبب افزایش بازتاب طیفی می‌شود. مطابق یافته‌های (Kalbi et al. (2014) و (Ronoud et al. (2018) نتایج پژوهش حاضر نشان داد که باند مادون قرمز نزدیک (B8) سنتینل ۲ نیز بیشترین همبستگی ($R=0/68$) را با مشخصه حجم در هکتار و رویه زمینی در هکتار داشت. در نتایج بعضی از منابع به مثبت یا منفی بودن همبستگی اشاره‌ای نشده است. بررسی همبستگی (مثبت/منفی) به بررسی‌های زیادی نیاز دارد و پیشنهاد می‌شود که ویژگی‌هایی مانند نوع توده، آمیختگی توده و شرایط محیطی و اقلیمی و خاک توده لحاظ شود.

نتایج حاصل از آنالیز رگرسیون برای داده‌های لندست ۸ نشان داد که ترکیب خطی B5، B6، B7، DVI، IPVI، NDVI و RVI به‌عنوان متغیر مستقل بهتر توانستند تغییرات رویه زمینی در هکتار را توجیه

به‌طور کلی نتایج نشان داد که تصاویر ماهواره‌ای سنتینل ۲ مشخصه حجم در هکتار را در مقایسه با مشخصه رویه زمینی در هکتار بهتر برآورد کرد که دلیل آن عامل مهم ارتفاع درختان است که به‌طور ذاتی برای تشخیص تغییرات سه‌بعدی و حجم درختان مناسب‌تر است. در مقابل، اندازه‌گیری‌های رویه زمینی به داده‌هایی با وضوح بیشتر و تحلیل‌های پیچیده‌تر نیاز دارند.

نتیجه‌گیری

نتایج این تحقیق نشان داد که استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی و داده‌های سنتینل ۲ در مقایسه با رگرسیون چندمتغیره و داده‌های ماهواره‌ای لندست ۸، مجذور مربعات خطا را حدود ۶ تا ۱۱ درصد بهبود می‌بخشد و مشخصه‌های حجم در هکتار و رویه زمینی در هکتار را می‌توان با دقتی متوسط برآورد کرد. براساس دانش و تجربه‌های کسب‌شده در فرایند تحقیق، پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آینده تعداد قطعات نمونه مساوی و متناسب با وسعت هر منطقه انتخاب شود، شکل قطعات نمونه زمینی مطابق با پیکسل تصویر مربعی و با مساحت بیشتر باشد و پیکسل‌های تصاویر مختلف هم‌اندازه شوند تا بتوان اندازه پنجره یکسانی برای استخراج ارزش‌های رقومی تعیین کرد. همچنین پیشنهاد می‌شود از الگوریتم‌های یادگیری عمیق (Deep Learning) و مدل‌های غیرخطی با اثرهای آمیخته (Mixed Effect Model) و شاخص‌های گیاهی جدید توسعه‌یافته برای تصاویر سنتینل ۲ مانند NDII و NDVI استفاده شود.

سپاسگزاری

نویسندگان از کارشناسان اداره کل منابع طبیعی استان گلستان (شهرستان‌های کردکوی، گرگان، علی‌آباد، رامیان و گالیکش) بابت همکاری در جمع‌آوری داده‌های زمینی بسیار سپاسگزارند.

تغییرات حجم در هکتار را بهتر توجیه کرد. وجود رابطه معنی‌دار در سطح احتمال ۹۵ درصد با ضریب تبیین ۰/۵۹ و درصد میانگین مجذور مربعات خطای ۴۷/۰۶ و نتایج آنالیز عدم اطمینان با استفاده از روش مونت‌کارلو و قرار گرفتن میانگین مشخصه حجم در حدود اطمینان ۹۷/۵-۲/۵ شواهدی هستند که امکان برآورد حجم در هکتار با استفاده از این داده‌ها را با دقتی متوسط تأیید می‌کنند. همچنین نتایج نشان داد که با به‌کارگیری داده‌های سنتینل ۲ میزان درصد مجذور مربعات خطا حدود ۲/۵ درصد بهبود یافت. با به‌کارگیری الگوریتم جنگل تصادفی و داده‌های لندست ۸ و سنتینل ۲ میانگین مجذور مربعات خطا حدود ۶ و ۸ درصد بهبود یافت. درصد میانگین مربعات خطای حاصل از این تحقیق در برآورد مشخصه حجم در هکتار نسبت به پژوهش‌های Mohamadi et al. (2010) و Zahriban et al. (2019) که درصد میانگین مجذور مربعات خطا را بین ۹۴/۲-۴۰/۶۶ برآورد کردند نتیجه بهتری ارائه داد؛ اما در مقایسه با پژوهش‌های Azizi et al. (2010)؛ Kalbi et al. (2014) و Shataee et al. (2012) که درصد میانگین مجذور مربعات خطا را بین ۳۲/۵-۲۵/۸۶ برآورد کردند بیشتر بود. زیاد بودن میانگین مجذور مربعات خطا در پژوهش حاضر نیز ممکن است به عوامل یادشده در مورد رویه زمینی مربوط باشد. در جنگلداری، اندازه‌گیری دقیق مشخصه‌ها مانند حجم یا رویه زمینی با عدم قطعیت‌هایی همراه است. این عدم قطعیت‌ها ممکن است ناشی از تغییرات طبیعی، خطاهای نمونه‌برداری یا محدودیت‌های مدل‌سازی باشند. به کمک مدل مونت‌کارلو می‌توان این عدم قطعیت‌ها را در تخمین‌ها لحاظ کرد. با شبیه‌سازی متعدد و تحلیل توزیع احتمالی نتایج، مدل مونت‌کارلو می‌تواند میانگین و واریانس برآوردها را ارائه دهد که سبب بهبود دقت و اعتماد به نتایج مدل می‌شود.

References

- Golestan Province General Department of Natural Resources. (1981). *Loveh Forestry Plan Booklet*. Golestan: Golestan Province General Department of Natural Resources, 262 pp.
- Azizi, Z., Najafi, A., Fatehi, P., & Pirbavaghar, M. (2010). Forest stand volume estimation using satellite IRS_P6 (LISS_IV) data (Case study: Lirehsar, Tonekabon). *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*, 18(1), 143–151.
- Golestan Province General Department of Natural Resources. (1991). *Zarrin Gol Forestry Plan Booklet*. Golestan: Golestan Province General Department of Natural Resources, 240 pp.
- Forest, Range and Watershed Management Organization. (2007). *Sorkhdary Forest Management Plan*. Tehran: Forest, Range and Watershed Management Organization Press, 253 pp. (In Persian).
- Astola, H., Häme, T., Sirro, L., Molinier, M., & 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. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.01.019>
- Bannari, A., Morin, D., Bonn, F., & Huete, A.R. (1995). A review of vegetation indices. *Remote Sensing Reviews*, 13(1–2), 95–120. <https://doi.org/10.1080/02757259509532298>
- Breiman, L. (2001). *Random forests*. *Machine Learning*, 45(1), 5–32. <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>
- Chrysafis, I., Mallinis, G., Siachalou, S., & Patias, P. (2017). Assessing the relationships between growing stock volume and Sentinel-2 imagery in a Mediterranean forest ecosystem. *Remote Sensing Letters*, 8(6), 508–517. <https://doi.org/10.1080/2150704X.2017.1295479>
- Dabija, A., Kluczek, M., Zagajewski, B., Raczko, E., Kycko, M., Al-Sulttani, A.H., & Corbera, J. (2021). Comparison of support vector machines and random forests for CORINE land cover mapping. *Remote Sensing*, 13(4), 777. <https://doi.org/10.3390/rs13040777>
- Dajleri, H., Zahedi Amiri, G.H., Abdi, E., Pour, J., & Asgari, M. (2023). Appraisal of carbon sequestration capacity of soil and underground biomass in mixed stands of beech and hornbeam (Case study: Lirasar Forest–Tonekabon). *Iranian Journal of Forest*, 15(2), 141–154. <https://doi.org/10.22034/ijf.2022.337770.1865>
- Doctor Bahramnia Forestry Plan Management. (2009). Forest management plan. *Forest Science Faculty, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources*, 478 pp. (In Persian).
- Grabska, E., Hostert, P., Pflugmacher, D., & Ostapowicz, K. (2019). Forest stand species mapping using the Sentinel-2-time series. *Remote Sensing*, 11(10), 1197. <https://doi.org/10.3390/rs11101197>
- Halperin, J.L., Levine, G.N., Al-Khatib, S.M., Birtcher, K.K., Bozkurt, B., Brindis, R.G., Cigarroa, J.E., Curtis, L.H., Fleisher, L.A., Gentile, F., & Gidding, S. (2016). Further evolution of the ACC/AHA clinical practice guideline recommendation classification system: *A report of the American College of Cardiology/American Heart Association Task Force on Clinical Practice Guidelines*. *Circulation*, 133(14), 1426–1440. <https://doi.org/10.1161/CIR.0000000000000312>
- Fallah, A., Nazariani, N., Rastabi, M.I., & Bakhshi, F. (2022). Modeling the commercial volume of pure and mixed stands of beech trees using non-parametric algorithms in the educational-research Forest of Darabkola, Sari, Iran. *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*, 30(2), 57–72. <https://doi.org/10.1001.1.17350883.1401.30.2.6.2>
- Farhadi, P., & Soosani, J. (2019). Analysis of different types structure in Nave Asalem–Gilan forests using nearest neighbor indices. *Iranian Journal of Plant Biology Research*, 32(1), 167–182.
- Huete, A., Justice, C., & Liu, H. (1994). Development of vegetation and soil indices for MODIS-EOS. *Remote Sensing of Environment*, 49(3), 224–234. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(94\)90018-3](https://doi.org/10.1016/0034-4257(94)90018-3)

- Kalbi, S. (2011). Estimation of forest structural attributes using ASTER and SPOT-HRG data (Case study: Darabkola Forest) (M.Sc. thesis). *Department of Forestry, Sari University of Agricultural Sciences & Natural Resources*, 107 pp. (In Persian).
- Kalbi, S., Fallah, A., & Shetaee-Joybari, Sh. (2014). Estimation of forest biophysical properties using SPOT HRG data (Case study: Darabkola Experimental Forest). *Journal of Wood and Forest Science and Technology Research*, 20(4), 117–133.
- Kordkoy Management of Forestry Project. (2008). *Forest management report*. Forests, Range and Watershed Organization, 249pp.
- Korhonen, L., Hadi, Packalen, P., & Rautiainen, M. (2017). Comparison of Sentinel-2 and Landsat 8 in the estimation of boreal forest canopy cover and leaf area index. *Remote Sensing of Environment*, 195, 259–274. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.03.021>
- 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(1), 1–15. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpq022>
- Marvie-Mohadjer, M., Zobeiri, M., Etemad, V., & Jourgholami, M. (2012). Performing of the single selection method at compartment level and necessity for full inventory of tree species (Case study: Gorazbon district in Kheyroud forest, north of Iran). *Journal of Natural Resources*, 61(4), 889–908.
- McRoberts, R.E., Magnussen, S., Tomppo, E.O., & Chirici, G. (2011). Parametric, bootstrap, and jackknife variance estimators for the k-Nearest Neighbors technique with illustrations using forest inventory and satellite image data. *Remote Sensing of Environment*, 115(12), 3165–3174. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.07.006>
- 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. <https://doi.org/10.1080/01431160903140811>
- Mohammadi, J., Shataei, S., & Namiranian, M. (2014). Comparison of quantitative and qualitative characteristics of forest structure and composition in natural and managed forest stands (Case study: Shast Kalate forests of Gorgan). *Journal of Wood & Forest Science and Technology*, 21, 65–83.
- Moradi, F., Darvishsefat, A.A., Namiranian, M., & Ronoud, G. (2018). Investigating the capability of Landsat 8 OLI data for estimation of aboveground woody biomass of common hornbeam (*Carpinus betulus* L.) stands in Khyroud Forest. *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*, 26(3), 406–420. <https://doi.org/10.22034/ijfpr.2018.117743>
- Nazariani, N., Fallah, A., Hamidi, S.K., & Varamesh, S. (2022). Estimation of quantitative characteristics of Zagros forests using data mining nonparametric algorithms (Case study: Olad Ghobad Watershed, Koohdasht, Lorestan). *Forest Research and Development*, 8(3), 249–263. <https://doi.org/10.30466/JFRD.2022.53924.1578>
- Noorian, N., Shataee, S., & Mohammadi, J. (2019). Evaluation of RapidEye satellite data for estimation of some quantitative structure variables in the Caspian forests of Gorgan region. *Journal of RS and GIS for Natural Resources*, 9(4), 1–16. <https://dorl.net/dor/20.1001.1.26767082.1397.9.4.1.7>
- Pearson, R.L., & Miller, L.D. (1972). Remote mapping of standing crop biomass for estimation of the productivity of the shortgrass prairie. *Remote Sensing of Environment*, 1, 1355.
- Poorazimy, M., Shataee Jouibary, S., Mohammadi, J., & Aghababaei, H. (2023). Feasibility of single-polarized TanDEM-X data for Hyrcanian forest height estimation (Case study: Shast-Kalateh forest). *Iranian Journal of Forest*, 15(3), 329–343. <https://doi.org/10.22034/ijf.2023.367017.1905>
- Richards, J.A. (1986). Error correction and registration of image data. *Remote Sensing Data Interpretation and Analysis*, 33, 33–68.
- Richardson, A.J., & Wiegand, C.J. (1977). Distinguishing vegetation from soil background information. *Photogrammetric Engineering*, 43, 1541–1552.

- Rouse, J. (1974). Type III final report. Monitoring the vernal advancement and retrogradation of natural vegetation, *Greenbelt, MD*, 371.
- Ronoud, G., Fatehi, P., Darvishsefat, A.A., Tomppo, E., Praks, J., & Schaepman, M.E. (2016). Multi-sensor aboveground biomass estimation in the broadleaved Hyrcanian forest of Iran. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 47(6), 818–834. <https://doi.org/10.1080/07038992.2016.1234567>
- Ronoud, G., & Darvishsefat, A.A. (2018). Estimating aboveground woody biomass of *Fagus orientalis* stands in Hyrcanian forest of Iran using Landsat 5 satellite data (Case study: Khyroud Forest). *Geographic Space*, 17(60), 117–129.
- 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. <https://doi.org/10.1080/01431161.2012.682661>
- Sayed Mosavi, Z., Mohammadi, J., & Shataee, S. (2019). Estimation of some quantitative characteristics of individual trees using airborne laser scanning data in part of Shast-Kalate forests of Gorgan. *Journal of Wood and Forest Science and Technology*, 26(1), 1–19. <https://doi.org/10.22069/JWFST.2019.15422.1762>
- Tucker, C.J. (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 8(2), 127–150. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(79\)90013-0](https://doi.org/10.1016/0034-4257(79)90013-0)
- Varamesh, S., & Mohtaram Anbaran, S. (2023). Investigation of the potential of Sentinel-2 images in estimation of forest biomass. *Journal of Environmental Science Studies*, 8(3), 7149–7157.
- Wang, Q., Putri, N.A., Gan, Y., & Song, G. (2022). Combining spectral and textural indices for alleviating saturation problem in forest LAI estimation using Sentinel-2 data. *Geocarto International*, 37(11), 10511–10531. <https://doi.org/10.1080/10106049.2022.2037730>
- Zahriban Heasari, M., Fallah, A., Shataee, S., Kalbi, S., & Persson, H. (2019). Estimating the forest stand volume and basal area using Pleiades spectral and auxiliary data. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 42, 1131–1136. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-4-W18-1131-2019>
- Zobeiri, M. (2008). *Forest biometry*. University of Tehran Press, 407 pp.



Investigating the capability of Landsat -8 and Sentinel- 2 satellites in estimating the quantitative characteristics of stands in the Hyrcanian broadleaved forests of Golestan province

S.Z. Seyed Mousavi^{*1}, A. Fallah², J. Mohammadi³, and R. Darvishzadeh⁴

¹Ph.D. Student Dept. of Forestry, Forest Science Faculty, Gorgan University of Agricultural Sciences & Natural Resources, Gorgan, Iran.

²Prof., Dept. of Forestry, Faculty of Natural Resources, Sari University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Mazandaran, I. R. Iran.

³Associate Prof., Dept. of Forestry, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran.

⁴Associate Prof., Dep. of Geo-Information Science and Earth Observation (ITC), University of Twente, P.O. Box 217, 7500 AE Enschede, The Netherlands.

(Received: 24 May 2024; Accepted: 22 October 2024)

Abstract

Introduction: Obtaining timely information on the qualitative and quantitative characteristics of forests is useful in ecosystem management, designing management and protection plans. Considering the role of Hyrcanian forests in maintaining biological diversity, adjusting climate, environmental and economic values, and protecting water and soil, and the high cost and time-consuming nature of measuring the quantitative characteristics of the forests through field methods, remote sensing application and modeling provide a lot of information in this field so that there is less need to do field work. The purpose of this research is to investigate the capability of Landsat-8 and Sentinel-2 satellites in estimating quantitative characteristics of stands in broadleaved forests of Golestan province.

Materials and methods: In this study, 230 circular sample plots with an area of 1000 square meters were measured using a systematic sampling method and a 100x100 meter grid in five sites of Kordkoy, Shasat Kalateh, Zarrin Gol, Sukhdari and Loveh. The geographic center of each plot was recorded using a Differential Global Positioning System (DGPS) device. In each plot the species, the DBH was more than 12.5 cm and the height of the trees were measured. Then the number of trees density ($n \cdot ha^{-1}$), volume ($m^3 \cdot ha^{-1}$), basal area ($m^2 \cdot ha^{-1}$) located in each sample plot were calculated. After processing the images and creating plant indices (NDVI, RVI, EVI, GNDVI, PCA, SAVI, IPVI and DVI), the numerical values corresponding to the ground sample plots were extracted from the spectral bands. Uncertainty analysis of the results was also carried out using the Monte Carlo method. Data modeling was carried out using two methods: multiple linear regression and the Random Forest algorithm. In this study, a total of 230 sample plots were used, with 175 plots (75%) allocated for model development, and the remaining 55 plots (25%) employed for validation purposes within the data mining algorithms.

Results: The results of estimating the quantitative characteristics of basal area ($m^2 \cdot ha^{-1}$) and volume ($m^3 \cdot ha^{-1}$) using linear multivariate regression showed that the percentage of root mean square error was 50.72 and 47.06 using Landsat-8 data, respectively and 48.66 and 45/89 using Sentinel- 2 data. The results also showed that the root mean square error percentage for the characteristics of basal area ($m^2 \cdot ha^{-1}$) and volume ($m^3 \cdot ha^{-1}$) are 44.53 and 41.28 percent with Using Landsat-8 data, respectively, and 44.21 and 39.66 using Sentinel-2 data and random forest algorithm.

Conclusion: In general, the results of the study indicated that the Random Forest algorithm, combined with Sentinel-2 data, provided approximately 6 to 11 percent better estimates of basal area ($m^2 \cdot ha^{-1}$) and volume ($m^3 \cdot ha^{-1}$) quantitative characteristics compared to the linear regression method using Landsat 8 data. Furthermore, the uncertainty analysis showed that the mean estimated values of basal area and volume were within the confidence interval (2.5–97.5%), suggesting that the chosen model was appropriate. In summary, the approach used in this study demonstrated a moderate capability in estimating quantitative basal area and volume of the forest.

Keywords: Basal Area, Landsat 8, Multiple Linier Regression, Random Forest Alghorithm, Sentinel 2, Volume.