

## Estimation of aboveground biomass of Arabdagh reforested stands, Golestān province using Sentinel-2 satellite data

Hassan Ali<sup>1</sup>, Jahangir Mohammadi<sup>\*2</sup>

1. Ph.D. of Forest Management, General Directorate of Forest Management and Development, Syria. E-mail: [hso414516@gmail.com](mailto:hso414516@gmail.com)
2. Corresponding Author, Associate Prof., Dept. of Forest Management, Faculty of Forest Science, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: [mohamadi.jahangir@gau.ac.ir](mailto:mohamadi.jahangir@gau.ac.ir)

### Article Info

**Article type:**  
Full Length Research Paper

**Article history:**  
Received: 10.13.2023  
Revised: 12.04.2023  
Accepted: 12.07.2023

**Keywords:**  
Allometric equation,  
Near-infrared band,  
Random forest algorithm,  
Remote sensing

### ABSTRACT

**Background and Objectives:** Reforested stands are recognized as crucial contributors to forest carbon storage and play a significant role in mitigating the destruction of natural areas. Aboveground biomass (AGB) serves as a vital component in sustainable forest management, contributing to the reduction of global warming, and provides valuable information. Allometric equations represent a valuable tool for quantifying AGB in forests. In recent years, non-parametric remote sensing techniques, such as the Random Forest algorithm, have gained widespread popularity for estimating forest tree biomass. This study aimed to evaluate the capability of Sentinel 2 data, coupled with the Random Forest algorithm, to estimate above-ground biomass in Arabdagh reforested stands located in Golestān province.

**Materials and Methods:** In this study, a total of 180 circular sample plots, each with an area of 400 m<sup>2</sup>, were measured using the cluster sampling method. Measurements of the diameter at breast height (DBH) and tree height (H) were recorded. Additionally, the precise coordinates of the sample plot centers were captured using DGPS. Subsequently, the above-ground biomass of trees was calculated using the developed allometric equations. For this study, pre-processed radiometric and geometrical data from Sentinel 2 were utilized, enabling the creation of various vegetation indices. The random forest algorithm was employed to explore the relationship between biomass characteristics (dependent variable) and the spectral values of vegetation indices (independent variables). The modeling process involved using 75% of the sample plots (135 sample plots) for training the random forest algorithm, while the remaining 25% (45 sample plots) were reserved for validating the estimates.

**Results:** The findings showed that the NDVI and GNDVI indices exhibited the strongest correlation in estimating above-ground biomass. By employing the random forest algorithm with 310 trees and 5 predictors, the percentage root mean square error was determined to be 35.83%, while the coefficient of determination was 0.51, indicating the algorithm's capability to estimate the above-ground biomass of Arabdagh reforested stands. Furthermore, the results indicated that the random forest algorithm, utilizing Sentinel 2 data, provided higher estimates for the above-ground biomass of trees compared to the actual values. However, at a 95% probability level, there was no significant difference between the estimated and real above-ground biomass values ( $p$ -value > 0.05).

---

**Conclusion:** The findings demonstrated that Sentinel 2 data successfully estimated the above-ground biomass of Arabdagh reforested stands with satisfactory accuracy. Based on the results presented, it can be concluded that the information derived from the main bands and spectral indices played a crucial role in the estimation of above-ground biomass.

---

Cite this article: Ali, Hassan, Mohammadi, Jahangir. 2024. Estimation of aboveground biomass of Arabdagh reforested stands, Golestān province using Sentinel-2 satellite data. *Journal of Wood and Forest Science and Technology*, 30 (4), 93-110.



© The Author(s).

DOI: 10.22069/JWFST.2024.21807.2039

Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

---

## برآورد زی‌توده روی زمینی توده‌های جنگلی دست‌کاشت عرب‌داغ استان گلستان با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای سنتینل ۲

حسان علی<sup>۱</sup>، جهانگیر محمدی<sup>۲\*</sup>

۱. دکتری مدیریت جنگل، اداره کل مدیریت و توسعه جنگل، سوریه. رایانامه: [hso414516@gmail.com](mailto:hso414516@gmail.com)  
۲. نویسنده مسئول، دانشیار گروه مدیریت جنگل، دانشکده علوم جنگل، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران.  
رایانامه: [mohamadi.jahangir@gau.ac.ir](mailto:mohamadi.jahangir@gau.ac.ir)

اطلاعات مقاله	چکیده
<b>نوع مقاله:</b> مقاله کامل علمی - پژوهشی	<b>سابقه و هدف:</b> جنگل‌های دست‌کاشت امروزه یکی از مهم‌ترین منابع ذخیره کربن جنگلی و از عوامل کاهش‌دهنده روند تخریبی عرصه‌های طبیعی هستند. زی‌توده روی زمینی درختان نقش اساسی در مدیریت پایدار جنگل و در کاهش روند گرم شدن کره زمین و یک منبع اطلاعاتی مهم محسوب می‌شود. معادلات آلومتریک ابزاری مهم برای کمی کردن زی‌توده روی زمینی درختان در جنگل‌ها هستند. در سال‌های اخیر، فنون سنجش‌ازدور با استفاده از روش‌های ناپارامتریک مانند الگوریتم رندوم فارست به‌طور گسترده برای برآورد زی‌توده درختان جنگل مورد استفاده قرار گرفته است. در این پژوهش قابلیت داده‌های سنتینل ۲ با استفاده از الگوریتم رندوم فارست در برآورد زی‌توده روی زمینی توده‌های جنگلی دست‌کاشت عرب‌داغ استان گلستان مورد ارزیابی قرار گرفت.
<b>تاریخ دریافت:</b> ۱۴۰۲/۰۷/۲۱ <b>تاریخ ویرایش:</b> ۱۴۰۲/۰۹/۱۳ <b>تاریخ پذیرش:</b> ۱۴۰۲/۰۹/۱۶	
<b>واژه‌های کلیدی:</b> الگوریتم رندوم فارست، سنجش از دور، مادون‌قرمز نزدیک، معادلات آلومتریک، نمونه‌برداری خوشه‌ای	<b>مواد و روش‌ها:</b> در این مطالعه از اطلاعات زی‌توده ۱۸۰ قطعه‌نمونه دایره‌ای به مساحت ۴۰۰ مترمربع حاصل از روش نمونه‌برداری خوشه‌ای استفاده شد. هم‌چنین مختصات مراکز قطعات نمونه با استفاده از DGPS ثبت شد. زی‌توده روی زمینی قطعات نمونه از معادلات آلومتریک تهیه شده است. در این بررسی از داده‌های سنتینل ۲ که پیش‌پردازش رادیومتری و هندسی شده بودند استفاده شد و براساس آن، شاخص‌های مختلف پوشش گیاهی تهیه شد. در اجرای الگوریتم رندوم فارست ارتباط بین مشخصه‌ی زی‌توده به‌عنوان متغیر وابسته و ارزش‌های طیفی شاخص‌های گیاهی تهیه شده به‌عنوان متغیرهای مستقل مورد بررسی قرار گرفت. مدل‌سازی با استفاده از ۷۵ درصد قطعات نمونه (۱۳۵ قطعه‌نمونه) با استفاده از الگوریتم رندوم فارست صورت گرفت و ارزیابی برآوردها با استفاده از ۲۵ درصد قطعات نمونه (۴۵ قطعه‌نمونه) انجام شد.

---

**یافته‌ها:** نتایج نشان داد که در بین متغیرهای مستقل مورد استفاده شاخص‌ها NDVI و GNDVI دارای بیش‌ترین همبستگی در برآورد زی‌توده روی زمینی را داشتند و الگوریتم رندوم فارست با ۳۱۰ درخت و ۵ پیش‌بینی‌کننده و درصد مجذور میانگین مربعات خطا ۳۵/۸۳ درصد و ضریب تبیین ۰/۵۱ توانسته است که زی‌توده روی زمینی توده‌های دست‌کاشت عرب‌داغ را برآورد نمایند. هم‌چنین نتایج نشان داد که الگوریتم رندوم فارست با استفاده از داده‌های سنتینل ۲، مقادیر زی‌توده روی زمینی درختان را بیش‌تر از مقدار واقعی برآورد نموده‌اند. بین مقادیر زی‌توده روی زمینی برآورد شده و واقعی تفاوت معنی‌داری در سطح احتمال ۹۵ درصد وجود ندارد ( $p\text{-value} > 0/05$ ).

**نتیجه‌گیری:** نتایج این پژوهش نشان داد که داده‌های سنتینل ۲ با دقت قابل‌قبول توانسته‌اند زی‌توده روی زمینی توده‌های دست‌کاشت عرب‌داغ را برآورد نمایند و با توجه به نتایج حاصل‌شده در این مقاله می‌توان گفت که اطلاعات باندهای اصلی و شاخص‌های طیفی نقش مهم در برآورد زی‌توده روی زمینی داشتند.

---

استناد: علی، حسان، محمدی، جهانگیر (۱۴۰۲). برآورد زی‌توده روی زمینی توده‌های جنگلی دست‌کاشت عرب‌داغ استان گلستان با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای سنتینل ۲. *نشریه پژوهش‌های علوم و فناوری چوب و جنگل*، ۳۰ (۴)، ۹۳-۱۱۰.  
DOI: 10.22069/JWFST.2024.21807.2039



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

## مقدمه

جنگل‌ها نقش مهمی در تغییرات اقلیم، تنظیم آب‌وهوا، حفاظت خاک و چرخه کربن بازی می‌کند و حدود ۴۵ درصد کربن زمینی جهان را در خود نگه می‌دارند (۱). جنگل‌ها حدود ۳۱ درصد سطح زمین را پوشش می‌دهند (۲). جنگل‌های دست‌کاشت امروزه یکی از مهم‌ترین منابع ذخیره کربن جنگلی هستند که مساحت آن‌ها در کل جهان حدود ۲۷۸ میلیون هکتار است که تقریباً ۷ درصد از کل جنگل‌های جهان را تشکیل می‌دهد (۳). مساحت کل جنگل‌های دست‌کاشت در ایران تقریباً ۰/۹۴ میلیون هکتار است که ۶/۶ درصد از کل مساحت جنگل‌ها را تشکیل می‌دهند (۴). تغییرات اقلیم و گرمایش جهانی در دهه‌های گذشته نیاز به اطلاعات درباره زی توده روی زمینی جنگل‌ها در مناطق مختلف برای تعریف یک سیاست اقلیمی مناسب افزایش داده است و این اطلاعات به برآوردهای قابل اطمینان از ذخیره کربن در اکوسیستم‌های جنگلی نیاز دارد (۵). تهیه اطلاعات زی توده توده‌های جنگلی از طریق آماربرداری زمینی زمان‌بر و مستلزم صرف هزینه‌های زیادی است (۶). روش‌های مبتنی بر داده‌های سنجش از دوری به‌عنوان راهکار مکمل مطرح شده‌اند (۷ و ۸).

تاکنون مطالعات زیادی در زمینه برآورد زی توده روی زمینی توده‌های جنگلی با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای انجام شده است. وفایی و همکاران (۲۰۱۷) برآورد زی توده روی زمینی درختان با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای نوری و راداری در جنگل‌های سری یک حوضه ناو اسالم گیلان را مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند. نتایج مطالعات آن‌ها نشان داد که داده‌های سنتینل با ضریب تبیین (۰/۷۲) و مجذور میانگین مربعات خطا (۳۹/۵۳) مگاگرم در هکتار) و یا ۱۹/۷ درصد توانسته‌اند زی توده روی زمینی را برآورد نمایند (۹). تراب‌زاده و همکاران

(۲۰۱۹) برآورد زی توده روی زمینی توده‌های جنگلی زاگرس را با استفاده از تصویر سنتینل ۲ مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که میزان ضریب تبیین (۰/۸۹) و مجذور میانگین مربعات خطا (۱۰/۷۵) تن در هکتار) حاصل شده است (۱۰). مرادی و همکاران (۲۰۱۸) قابلیت برآورد زی توده روی زمینی توده‌های مرمرز جنگل خیرودکنار را با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار دادند. نتایج این پژوهش نشان داد که باند مادون قرمز نزدیک با همبستگی (۰/۵۲-) دارای بیش‌ترین ضریب همبستگی بود. هم‌چنین میزان ضریب تبیین و میانگین مجذور مربعات خطا با استفاده از رگرسیون به ترتیب ۰/۲۹۵ و ۲۸/۶۳ درصد حاصل شده است که با به‌کارگیری شبکه عصبی مصنوعی میزان میانگین مجذور مربعات خطا حدود ۵ درصد بهبود یافت (۱۱). رنود و همکاران (۲۰۲۲) داده‌های راداری را جهت برآورد زی توده روی زمینی جنگل‌های هیرکانی مورد بررسی قرار دادند. نتایج پژوهش نشان داد که با استفاده از الگوریتم رندوم فارست میزان ضریب تبیین و میانگین مجذور مربعات خطا به ترتیب ۰/۳۸ و ۲۴/۳۸ درصد حاصل شد (۱۲). ورامش و محترم عنبران (۲۰۲۳) قابلیت تصاویر سنتینل ۲ را در برآورد زی توده جنگل‌های فندق‌لو اردبیل مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان داد که SAVI دارای بیش‌ترین ضریب همبستگی (۰/۷۸۷) می‌باشد (۱۳). نتایج به‌دست‌آمده در مطالعه وای و همکاران (۲۰۲۲) با استفاده از تصویر سنتینل ۲ و الگوریتم رندوم فارست نشان داد که ضریب تبیین بین ۰/۳۸ تا ۰/۴۷ و مجذور میانگین مربعات خطا بین ۲۵/۴۵ تن در هکتار تا ۴۰/۲۳ تن در هکتار می‌باشد (۱۴). چن و همکاران (۲۰۲۳) زی توده روی زمینی توده‌های کاج را با استفاده از تصویر سنتینل ۲ برای چهار دوره زمانی برآورد کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که ضریب تبیین بین ۰/۸۲ تا ۰/۸۷ و

اهمیت و حساسیت موضوع تغییر اقلیم و افزایش دمای زمین، اطلاعات زی‌توده روی زمینی درختان به‌ویژه در جنگل‌های دست‌کاشت استان گلستان از اهمیت بالایی برخوردار است؛ بنابراین هدف از این پژوهش برآورد زی‌توده روی زمینی توده‌های جنگلی دست‌کاشت عرب‌داغ استان گلستان با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای سنتینل ۲ و الگوریتم رندوم فارست است.

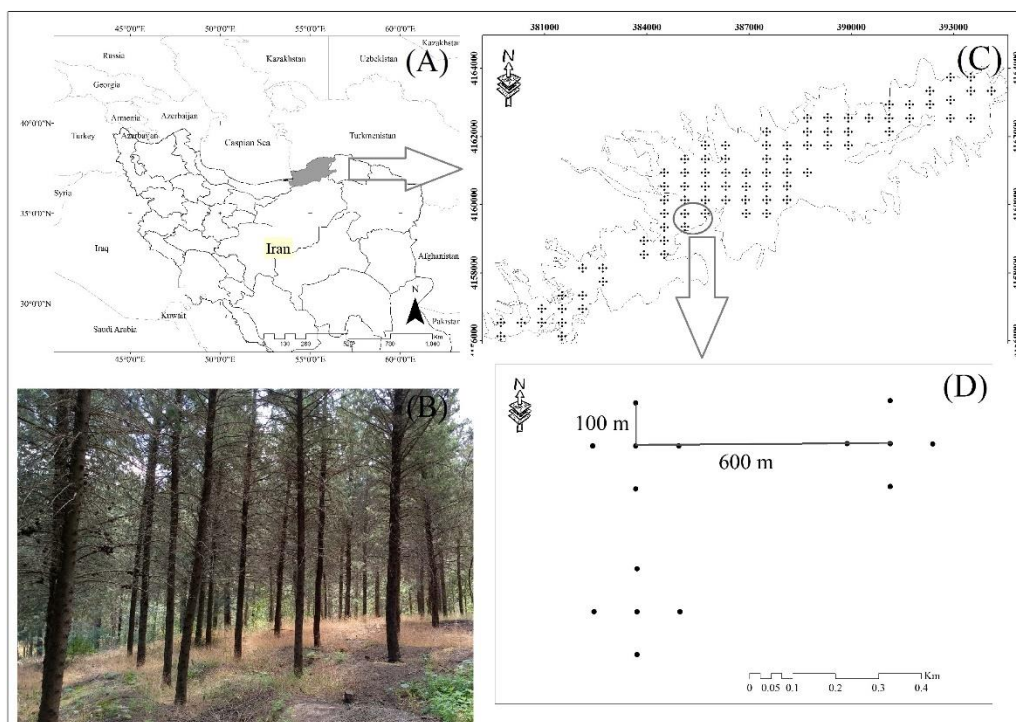
### مواد و روش‌ها

**منطقه مورد مطالعه:** این پژوهش در جنگل‌های دست‌کاشت عرب‌داغ با مساحت ۵۰۰۰ هکتار در محدوده شهرستان کلالة استان گلستان و در محدوده ۳۵° ۵۵' تا ۵۵° ۵۱' طول شرقی و ۳۷° ۳۰' تا ۳۷° ۳۸' عرض شمالی قرار گرفته است (شکل ۱). از نظر پوشش گیاهی با گونه‌های سرو زربین *Cupressus sempervirens*، کاج بروسیا *Pinus brutia*، کاج بادامی *Pinus pinea* و سرو نقره‌ای *Cupressus arizonica* با فاصله ۳ در ۳ متر کاشت شده است. میانگین حجم در هکتار، رویه زمینی در هکتار و تعداد درختان در هکتار جنگل‌های مورد بررسی به ترتیب ۹۲/۸۷ مترمکعب در هکتار، ۱۸/۷۷ مترمربع در هکتار و ۹۰۶/۲۵ درخت در هکتار می‌باشد. مساحت این عرصه حدود ۵۰۰۰ هکتار می‌باشد که از سال ۱۳۶۵ تا ۱۳۶۹ جنگل‌کاری شده است. خاک عرصه مورد مطالعه قهوه‌ای جنگلی با عمق زیاد و pH قلیایی است و بافت آن در سطح به‌طور عمده لوم و سیلتی لوم و در افق‌های زیرین سیلتی کلی لوم با درصد هدایت الکتریکی کم است. این عرصه در محدوده ارتفاعی ۲۰۰-۱۰۰۰ متر از سطح دریا قرار دارد. متوسط رطوبت نسبی سالیانه، متوسط دمای ماهیانه و متوسط بارندگی سالیانه به‌ترتیب ۷۷/۷ درصد، ۱۶/۹ سانتی‌گراد، ۵۳۶/۷ میلی‌متر است (۱۸).

مجدور میانگین مربعات خطا بین ۱۸/۲۳ تن در هکتار تا ۲۱/۴۶ تن در هکتار می‌باشد (۱۵).

در دهه اخیر با استفاده از الگوریتم‌های ناپارامتریک مانند رندوم فارست در مدل‌سازی مشخصه‌های کمی ساختار جنگل مانند زی‌توده به‌دلیل مزایایی مانند تفسیر آسان، انعطاف‌پذیر بودن در استفاده از داده‌های کمکی دیگر، عدم نیاز به تطابق با هیچ‌گونه توزیعی مورد استفاده قرار می‌گیرند (۱۶) و (۱۷).

اگرچه در بسیاری از پژوهش‌های صورت گرفته، برآورد میزان زی‌توده با استفاده از داده‌های نوری رضایت‌بخش بوده است، با توجه اهمیت برآورد هرچه دقیق‌تر زی‌توده روی زمینی توده‌های جنگلی جهت استفاده در سیاست‌ها و برنامه‌ریزی‌های تغییر اقلیم و گرمایش جهانی همیشه سعی در کاهش خطای برآوردها و برآورد دقیق‌تر زی‌توده شده است. یکی از موارد عدم اطمینان در این برآوردها دقت داده‌های زمینی است که معمولاً در ایران به دلیل عدم وجود معادلات آلومتریک، معمولاً از معادلات جهانی و فاکتور تعمیم زی‌توده استفاده می‌شود که باعث ایجاد خطای بالای ۷۰ درصد در برآوردها می‌گردد؛ بنابراین در این پژوهش از داده‌های زمینی دقیق که از معادلات آلومتریک همان‌گونه در همان منطقه استفاده شده است که میزان اریبی را کاهش داده است. علاوه بر آن استفاده از تعداد قطعات نمونه کافی در برازش مدل و استفاده از الگوریتم‌های ناپارامتریک اهمیت بالایی دارد. علاوه بر آن اکثر مطالعات انجام‌شده در مورد برآورد زی‌توده روی زمینی در ایران در جنگل‌های طبیعی انجام شده است و مطالعات کمی در توده‌های جنگلی دست‌کاشت انجام شده است و اطلاعات مربوط به زی‌توده توده‌های جنگلی دست‌کاشت در جهان و به‌ویژه در ایران هنوز اندک است. امروزه با گسترش صنعت، افزایش جمعیت و تخریب بخش بزرگی از جنگل‌ها توسط فعالیت‌های بشر، با توجه به



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه در شمال ایران (A) و نمونه‌ای از توده جنگلی مورد مطالعه (B) و پراکنش قطعات نمونه زمینی (C and D).

Figure 1. Location of the study area in the North of Iran (A), examples of stands in the study area (B), distribution of field plot network in the study area (C and D).

داده‌های زمینی: جمع‌آوری داده‌های زمینی در پاییز ۱۳۹۶ با روش نمونه‌برداری خوشه‌ای انجام شد. فاصله بین مراکز هر خوشه ۶۰۰ متر در جهت طول و ۴۰۰ متر در جهت عرض بوده و هر خوشه شامل ۵ قطعه نمونه دایره‌ای شکل و فاصله هر قطعه نمونه از مرکز خوشه ۱۰۰ متر در نظر گرفته شد. در مجموع ۶۹ خوشه شامل ۱۸۰ قطعه نمونه (۴۰۰ مترمربع) آماربرداری شد. مختصات دقیق موقعیت مراکز تمامی قطعات نمونه با استفاده از دستگاه DGPS به روش RTK و با دقت کمتر از ۵ سانتی‌متر ثبت شد. قطر در ارتفاع سینه (برای همه درختان داخل در قطعه نمونه)

و ارتفاع درختان (برای درختان شاهد) با استفاده از کالیپر و ورتکس به ترتیب برای همه درختان داخل قطعات نمونه اندازه‌گیری شد. در این پژوهش جهت محاسبه زی توده روی زمینی درختان در قطعه نمونه از معادلات آلومتریک تهیه شده در این منطقه توسط علی و همکاران (۲۰۲۳) استفاده شد (۱۹) (جدول ۱). زی توده کل *P. brutia* از رابطه ۱، *P. pinea* از رابطه ۲ و *C. sempervirens* از رابطه ۳ برآورد شده و سپس زی توده کل درختان در هر قطعه نمونه و بر حسب تن در هکتار محاسبه شد.

جدول ۱- معادلات آلومتریک توسعه‌یافته برای سه گونه (۱۶).

**Table 1. Allometric equations developed for three species (16).**

شماره معادله Eq. number	گونه‌ها Species	معادلات آلومتریک Allometric equations
1	<i>P. brutia</i>	$AGB = \exp(-33.87 + 1.05 \times \ln(DBH^2 \times H)) + 1.001 \times \ln(p)$
2	<i>P. pinea</i>	$AGB = \exp(-9.15 + 6.66 \times \ln(DBH) - 0.7 \times (\ln(DBH))^2)$
3	<i>C. sempervirens</i>	$AGB = \exp(-2.75 + 0.93 \times \ln(DBH^2 \times H))$

AGB: زی‌توده کل روی زمین درختان بر حسب تن، DBH: قطر برابر سینه بر حسب سانتی‌متر، H: ارتفاع درختان بر حسب متر، p: چگالی خشک بر حسب گرم بر سانتی‌متر مکعب

داده‌های ماهواره‌ای مورد استفاده: در این پژوهش از داده‌های سنتینل ۲ مربوط به تاریخ ۲۰۱۸ میلادی طیفی این سنجنده در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲- مشخصات تصاویر ماهواره‌ای سنجنده سنتینل ۲.

**Table 2. Spatial and Spectral characteristics of Sentinel-2 images.**

باندها Bands	اندازه تفکیک مکانی (متر) Spatial resolution (m)	طول موج وسط باند (نانومتر) Central Wavelength (nm)
Blue آبی	10	490
Green سبز	10	560
Red قرمز	10	665
Vegetation red edge لبه قرمز	20	705
Vegetation red edge لبه قرمز	20	740
Vegetation red edge لبه قرمز	20	783
Vegetation red edge لبه قرمز	20	865
NIR مادون قرمز نزدیک	10	842
SWIR مادون قرمز کوتاه	20	1610
SWIR مادون قرمز کوتاه	20	2190

دستگاه DGPS استفاده شد. سنجنده سنتینل ۲ اطلاعات را در ۱۳ باند طیفی در محدوده‌های مرئی، مادون قرمز نزدیک، مادون قرمز با طول موج کوتاه و لبه قرمز برداشت می‌کند. در این پژوهش از ۱۰ باند برای مدل‌سازی استفاده شد و علاوه بر باندهای اصلی از نسبت گیری باندها و شاخص‌های طیفی پوشش گیاهی جهت برآورد زی‌توده استفاده شد (جدول ۳).

پیش‌پردازش و پردازش تصاویر سنتینل ۲: تصاویر سنتینل ۲ از منطقه مورد مطالعه از سایت USGS (United States Geological Survey) گرفته شد. این تصاویر در هنگام دانلود در سطح 2A (تصحیح هندسی به صورت ارتو و تصحیح نوردی و رادیومتری) تهیه شد. برای اطمینان از صحت هندسی دقیق‌تر از لایه‌های برداری و نقاط کنترلی ثبت شده با



جدول ۳- شاخص‌های پوشش گیاهی استخراج شده از تصویر سنتینل ۲.

Table 3. Vegetation indices extracted from Sentinel 2 image.

شاخص طیفی گیاهی Vegetation indices	معادله Equation	مرجع Reference
Normalized difference vegetation index	$NDVI = (NIR - Red) / (NIR + Red)$	(20)
Soil adjusted vegetation index	$SAVI = 1.5 \times (NIR - Red) / (NIR + Red + 0.5)$	(21)
Ratio vegetation index	$RVI = NIR / R$	(22)
Modified soil adjusted vegetation index	$MSAVI2 = (0.5) \times (2(NIR + 1) - \sqrt{(2 \times NIR + 1)^2 - 8(NIR - RED)})$	(23)
Difference vegetation index	$DVI = (NIR - RED)$	(20)
Green Normalized Difference Vegetation Index	$GNDVI = (IR\_factor \times near\_IR - green\_factor \times green) / (IR\_factor \times near\_IR + green\_factor \times green)$	(24)
Transformed Normalized Difference Vegetation Index	$TNDVI = \sqrt{(IR\_factor \times near\_IR - red\_factor \times red) / (IR\_factor \times near\_IR + red\_factor \times red) + 0.5}$	(25)
Perpendicular Vegetation Index	$PVI = \sin(a) \times IR\_factor \times near\_IR - \cos(a) \times red\_factor \times red$	(26)
Modified Soil Adjusted Vegetation Index	$MSAVI = (1 + L) \times (IR\_factor \times near\_IR - red\_factor \times red) / (IR\_factor \times near\_IR + red\_factor \times red + L)$	(23)

برآورد متغیر وابسته است (۲۷). یکی از ساده‌ترین راه‌های ممکن، استفاده از جذر کل تعداد متغیرهای مستقل مورد استفاده در مدل می‌باشد که این مقدار به‌عنوان تعداد برآوردکننده‌ها در هر گره مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای بررسی دقیق‌تر در این مطالعه از  $(\pm 2)$  جذر کل تعداد متغیرها مستقل) مورد استفاده قرار گرفت تا تعداد برآوردکننده‌های بهینه در هر گره، انتخاب شود. در این مطالعه برای ارزیابی و برازش الگوریتم رندوم فارست از پکیج "RandomForest" در نرم‌افزار R (۲۸) استفاده شد.

بررسی اعتبار الگوریتم مورد استفاده: در این پژوهش برای ارزیابی الگوریتم رندوم فارست با استفاده از ۲۵ درصد داده‌ها به‌عنوان مجموعه داده‌ها ارزیابی از معیارهای آماری، ضریب تبیین (رابطه ۱)، مجذور میانگین مربعات خطا (رابطه ۲) و درصد مجذور میانگین مربعات خطا (رابطه ۳) استفاده شد.

برآورد زی توده توده‌های جنگلی دست‌کاشت با استفاده از الگوریتم رندوم فارست: در اجرای الگوریتم رندوم فارست ارتباط بین مشخصه‌ی زی توده به‌عنوان متغیر وابسته و ارزش‌های طیفی شاخص‌های گیاهی تهیه شده به‌عنوان متغیرهای مستقل مورد بررسی قرار گرفت. ابتدا برای تعیین تعداد درختان بهینه و تهیه نمودار میانگین مربعات خطای داده‌های آموزش و آزمون، الگوریتم رندوم فارست با ۱۰۰۰ درخت اجرا شد. 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 به‌عنوان تعداد درختان بهینه انتخاب شد. یکی دیگر از پارامترهای مهم در اجرای الگوریتم رندوم فارست تعداد برآوردکننده‌ها  $k$  (متغیرهای مستقل) در هر گره برای

### نتایج

آمارهای توصیفی داده‌ها: نتایج حاصل از بررسی آمارهای توصیفی زی‌توده توده‌های جنگلی دست‌کاشت عرب‌داغ استان گلستان نشان داد که میانگین، حداقل و حداکثر زی‌توده کل قطعات نمونه به ترتیب (۵۹/۹۲، ۳/۴۳، ۱۲۵/۲۵ تن در هکتار)، داده‌های آموزش (۶۱/۴۷، ۳/۴۳، ۱۲۵/۲۵ تن در هکتار) و برای زی‌توده داده‌های آزمون (۵۵/۷۶، ۳/۷۳، ۱۲۳/۵ تن در هکتار) است (جدول ۴).

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2} \quad (1)$$

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

$$RMSE\% = \left( \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n}} / \bar{Y} \right) \times 100 \quad (3)$$

که در آن،  $\hat{y}_i$  مقدار متغیر اندازه‌گیری شده،  $\bar{y}_i$  مدار متغیر برآورد شده و  $n$  تعداد نمونه‌های ارزیابی.

جدول ۴- آمارهای توصیفی زی‌توده کل همه قطعات نمونه و داده‌های آموزش و داده‌های آزمون.

Table 4. Descriptive statistics of AGB all plots (training and test data).

زی‌توده روی زمینی (تن در هکتار) Above-ground biomass (ton per hectare)			آمارهای توصیفی Descriptive statistics
داده‌های آزمون Test data	داده‌های آموزش Training data	تمام قطعات نمونه All plots	
45	135	180	تعداد قطعات نمونه Number of plots
55.76	61.47	59.92	میانگین Average
29.09	28.64	28.80	انحراف از معیار Standard deviation
3.73	3.43	3.43	حداقل Minimum
123.45	125.25	125.25	حداکثر Maximum

این مطالعه با ۷۵ درصد قطعات نمونه (۱۳۵ قطعه نمونه) که به صورت تصادفی انتخاب شده بودند مدل‌سازی انجام شد. نتایج حاصل از آنالیز همبستگی نشان داد که شاخص NDVI و GNDVI به ترتیب دارای بیش‌ترین (۰/۵۷ و ۰/۵۴) ضریب همبستگی با زی‌توده روی زمینی را دارد (جدول ۵).

برآورد زی‌توده روی زمینی توده‌های جنگلی دست‌کاشت با استفاده از داده‌های سنتینل ۲ و الگوریتم رندوم فورست: در این پژوهش زی‌توده روی زمینی توده‌های جنگلی دست‌کاشت در هکتار به‌عنوان متغیر وابسته و شاخص‌های گیاهی تهیه شده به‌عنوان متغیرها مستقل مورد بررسی قرار گرفت. در

جدول ۵- نتایج همبستگی بین زی توده روی زمینی، شاخص‌ها طیفی گیاهی و باندها.

**Table 5. Correlation coefficient between Above-ground biomass, vegetation indices and bands.**

ضرایب همبستگی Correlation coefficients	شاخص‌ها طیفی گیاهی و باندها Vegetation indices and bands
0.57	NDVI
0.42	SAVI
0.54	RVI
0.40	MSAVI2
0.35	DVI
0.56	GNDVI
0.54	TNDVI
0.35	PVI
0.39	MSAVI
-0.26	آبی Blue
-0.23	سبز Green
-0.36	قرمز Red
-0.19	لبه قرمز Vegetation red edge
0.15	لبه قرمز Vegetation red edge
0.16	لبه قرمز Vegetation red edge
0.10	لبه قرمز Vegetation red edge
-0.18	مادون قرمز نزدیک NIR
-0.25	مادون قرمز کوتاه SWIR
-0.25	مادون قرمز کوتاه SWIR

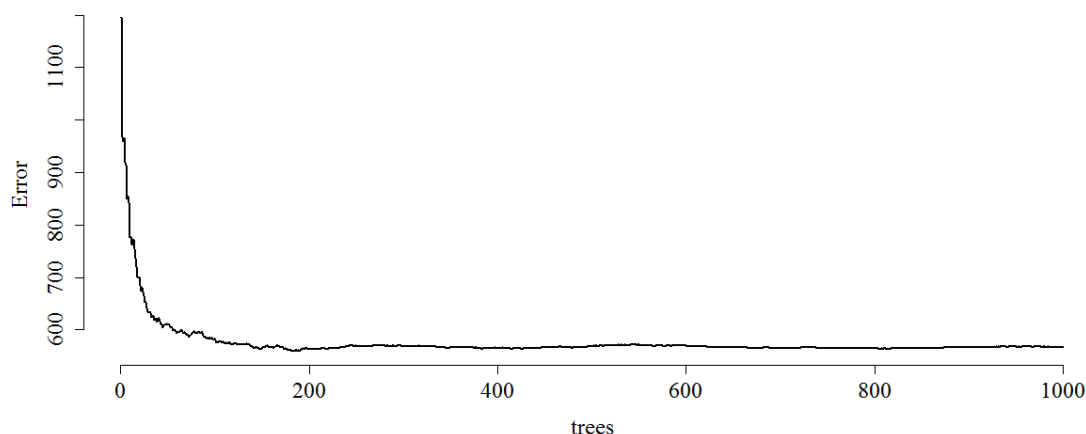
میانگین مربعات خطا مشاهده نمی‌شود (شکل ۲).  
به‌همین منظور تعداد ۳۱۰ درخت به‌عنوان تعداد  
درخت بهینه برای برآورد مشخصه زی توده در هکتار  
در نظر گرفته شد (جدول ۶).

نتایج حاصل از تفسیر نمودار میانگین مربعات  
خطای در برابر تعداد درختان (ntree) نشان داد که با  
افزایش تعداد درختان تا ۳۱۰ درخت، مقادیر میانگین  
مربعات خطای داده‌های کاهش می‌یابد سپس با  
افزایش بیشتر درختان، تغییری در مقادیر میزان

جدول ۶- مقادیر محاسبه شده ضریب تبیین، مجذور میانگین مربعات خطا و درصد مجذور میانگین مربعات خطا با استفاده از الگوریتم رندوم فارست و داده‌های سنتینل ۲.

**Table 6. The calculated R<sup>2</sup>, RMSE and RMSE% using random forest algorithm and Sentinel 2 data.**

درصد مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE%)	مجدور میانگین مربعات خطا (تن در هکتار) Root mean square error (RMSE (ton.ha <sup>-1</sup> ))	ضریب تبیین R <sup>2</sup>	تعداد برآوردکننده N. of Predictors (k)	تعداد درخت بهینه No. of trees
36.41	20.30	0.49	3	310
36.13	20.14	0.49	4	310
35.83	19.97	0.51	5	310
36.35	20.27	0.49	6	310
36.34	20.26	0.49	7	310



شکل ۲- نمودار میانگین مربعات خطای داده‌های آموزش در برابر تعداد درختان برای مشخصه زی توده در هکتار.

**Figure 2. Graph of the mean square error of the training data against the number of trees for AGB.**

الگوریتم انتخاب شد (جدول ۶). نتایج این پژوهش نشان داد که داده‌های سنتینل ۲ مقادیر زی توده روی زمینی درختان را بیش‌تر از مقدار واقعی برآورد نموده‌اند. هم‌چنین برای داده‌ها آزمون مقادیر زی توده روی زمینی برآورد شده با استفاده از داده‌های سنتینل ۲ با مقادیر واقعی در سطح احتمال ۹۵ درصد معنی‌دار نمی‌باشد (جدول ۷).

جدول ۶ نتایج معیارهای ارزیابی حاصل از الگوریتم رندوم فارست با تعداد پیش‌بینی‌کننده‌ها مختلف در برآورد زی توده درختان را نشان می‌دهد. برای داده‌ها آزمون نتایج نشان داد که الگوریتم رندوم فارست با ۳۱۰ درخت و ۵ پیش‌بینی‌کننده دارای کم‌ترین درصد مجذور میانگین مربعات خطا ۳۵/۸۳ درصد و بیش‌ترین ضریب تبیین ۰/۵۱ بهتر توانسته است که زی توده روی زمینی برآورد و به‌عنوان بهترین

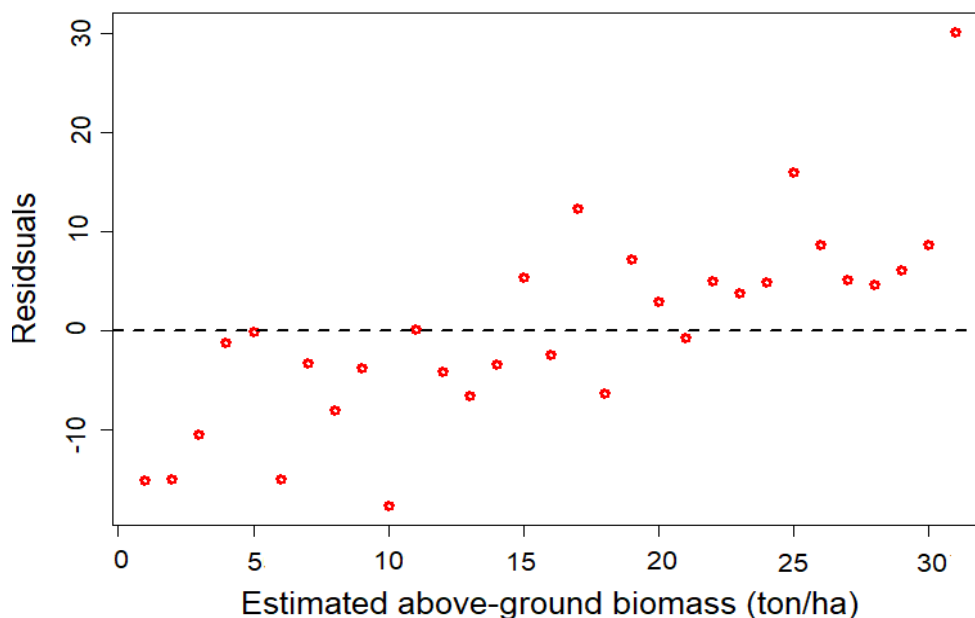
جدول ۷- تفاوت‌های مقادیر واقعی برای داده‌ها آزمون با مقادیر برآورد شده زی توده با استفاده الگوریتم رندوم فرست.

**Table 7. The differences between the actual values for validation data and the estimated values of biomass using the Random Forest algorithm.**

میانگین تفاوت‌ها (تن در هکتار) Differences average (ton.ha <sup>-1</sup> )	آماره t Statistic t	میانگین برآورد شده (تن در هکتار) Estimated average (ton.ha <sup>-1</sup> )	میانگین واقعی (تن در هکتار) Actual average (ton.ha <sup>-1</sup> )	داده مورد استفاده Data
3.77	0.19 <sup>ns</sup>	58.66	55.76	سنتینل ۲ Sentinel 2

<sup>ns</sup> عدم معنی داری در سطح احتمال ۹۵ درصد

نتایج حاصل از تحلیل باقی مانده‌ها نشان داد که این میانگین باقی مانده‌ها تقریباً صفر و دارای توزیع نرمال می‌باشد (شکل ۳).

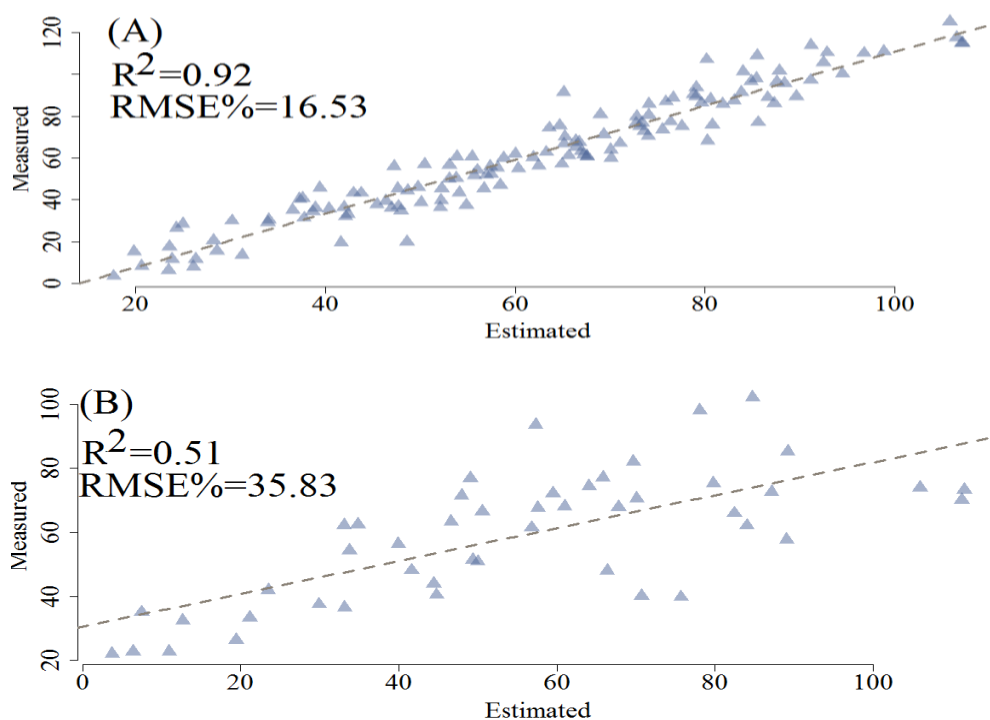


شکل ۳- باقی مانده‌ها در برابر زی توده روی زمینی برآورد شده.

**Figure 3. residuals against the estimated above-ground biomass.**

داده‌های آموزش و آزمون در شکل 4A و 4B آورده شده است.

همچنین مقادیر زی توده روی زمینی مشاهده شده در برابر مقادیر زی توده روی زمینی برآورد شده برای

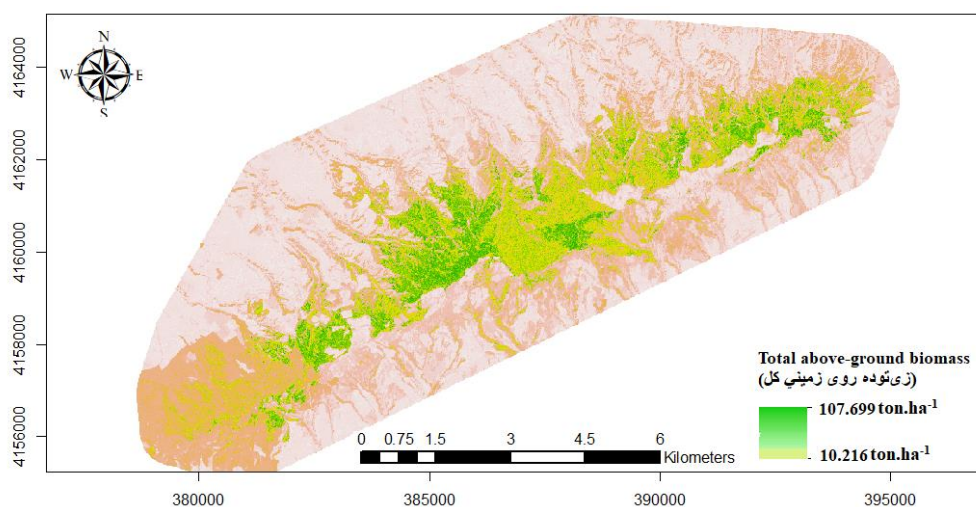


شکل ۴- مقادیر زی توده مشاهده شده (تن در هکتار) برای داده‌ها آموزش (A) و آزمون (B) در برابر مقادیر زی توده برآورد شده (تن در هکتار) با استفاده از داده‌های سنتینل ۲ و الگوریتم رندوم فارست.

Figure 4. Observed AGB values (tons per hectare) for model (A) and validation (B) data against estimated AGB values ( $\text{ton. ha}^{-1}$ ) using Sentinel 2 data and Random Forest algorithm.

رنگ سبز روشن نشان‌دهنده زی توده پایین‌تر و در مقابل رنگ سبز تیره نشان‌دهنده زی توده بالاتر می‌باشد (شکل ۵).

با اعمال الگوریتم رندوم فارست با ۳۱۰ درخت بهینه و ۵ پیش‌بینی‌کننده در برآورد زی توده روی زمینی در هکتار، نقشه زی توده تهیه شد. در این نقشه



شکل ۵- نقشه توزیع زی توده روی زمینی کل در منطقه مورد مطالعه با استفاده از داده‌های سنتینل ۲ و الگوریتم رندوم فارست.

Figure 5. Distribution map of total above-ground biomass in the study area using Sentinel 2 data and Random Forest algorithm.

## بحث و نتیجه‌گیری

لازمه تعریف یک سیاست اقلیمی مناسب داشتن اطلاعات قابل اطمینان از زی توده بوم‌سازگان‌های جنگلی است. تهیه اطلاعات دقیق از مشخصه زی توده به روش آماربرداری زمینی فرآیندی بسیار دشوار، زمان‌بر، پرهزینه و به نیروی انسانی زیادی نیاز دارد (۲۹)؛ بنابراین استفاده از داده‌های سنجش‌ازدوری در برآورد زی توده بوم‌سازگان‌های جنگلی امری ضروری به نظر می‌رسد. هدف از این پژوهش برآورد زی توده روی زمینی توده‌های جنگلی دست‌کاشت عرب داغ استان گلستان با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای سنتینل ۲ و الگوریتم رندوم فارست می‌باشد. بررسی نتایج حاصل از بررسی آماره‌های توصیفی داده‌های زمینی نشان داد که اطلاعات زمینی دارای واریانس و دامنه تغییرات بالا بوده و بیان‌کننده شرایط ناهمگن منطقه مورد مطالعه از نظر پراکنش مکانی مشخصه مورد بررسی می‌باشد. مطابق با نتایج پژوهش‌های بالووی و همکاران (۲۰۱۸) و گوش و بهرا (۲۰۱۸) دو شاخص‌های NDVI و GNDVI دارای بیش‌ترین ضریب همبستگی با زی توده روی زمینی داشتند (۳۰ و ۳۱) (جدول ۵) و با نتایج رنود و درویش صفت (۲۰۱۸) که بیان کردند باند NIR دارای بیش‌ترین ضریب همبستگی بود مطابقت ندارد هم‌چنین مطابق با نتایج رنود و همکاران که بیان کردند باند مادون‌قرمز نزدیک بیش‌ترین میزان همبستگی (۰/۴۳) را با زی توده روی زمینی دارد که با نتایج رنود و درویش صفت (۲۰۱۸) مطابقت دارد (۳۲). تفاوت نتایج حاصل از این پژوهش با سایر مطالعات انجام‌شده می‌تواند به عوامل مختلفی از جمله داده‌های ماهواره‌ای مورد استفاده توده جنگلی مورد بررسی (سوزنی‌برگ یا پهن‌برگ) برگردد. با توجه به نتایج این پژوهش در جنگل‌های دست‌کاشت سوزنی‌برگ، می‌توان نتیجه‌گیری نمود که

الگوریتم رندوم فارست با ضریب تبیین ۰/۵۱ و مجذور میانگین مربعات حدود ۱۹/۹۷ تن در هکتار توانسته زی توده روی زمینی توده‌های دست‌کاشت را برآورد کند. ضریب تبیین حاصل شده در این پژوهش (۰/۵۱) در مقایسه با مطالعات مرادی و همکاران (۲۰۱۸) (۰/۲۹۵) (۱۱)، رنود و همکاران (۲۰۲۲) (۰/۳۸) (۱۲) بالاتر بود که می‌تواند به عواملی مانند تفاوت در داده‌های ماهواره‌ای مورد استفاده و نوع توده جنگلی برگردد که سایر مطالعات در توده‌های جنگلی هیرکانی نامنظم آمیخته و چند اشکوبه انجام شده است که در مقایسه با توده‌های دست‌کاشت یک اشکوبه کاملاً متفاوت می‌باشد. نتایج این پژوهش با نتایج ورامش و محترم عنبران (۲۰۲۳) تفاوت زیادی نداشت (۱۳). مجذور میانگین مربعات خطای حاصل شده در این پژوهش (۳۵/۸۳ درصد) در مقایسه با نتایج آکسوی (۲۰۲۳) (۲۶/۲۱ درصد) (۳۳)، چن و همکاران (۲۰۲۳) (۱۸/۹۷ درصد) (۱۵)، سوردانا و همکاران (۲۰۲۳) (۱۳/۶۳ درصد) (۳۴) و زو همکاران (۲۰۲۰) (۱۲/۳۶ درصد) (۳۵) پایین‌تر بود که می‌تواند به نوع داده‌های مورد استفاده، خطای پستی‌وبلندی، میزان مشخصه‌های کمی ساختار توده مورد بررسی، ناهمگن بودن منطقه مورد مطالعه از نظر پراکنش و اندازه قطعات نمونه برگردد. عدم تفاوت معنی‌داری در سطح احتمال ۹۵ درصد بین مقادیر زی توده برآورد شده با مقادیر واقعی زی توده زمینی، میانگین تقریباً صفر باقی‌مانده‌ها و توزیع نرمال آن‌ها و هم‌چنین میزان ضریب تبیین بالای بین مقادیر زی توده اندازه‌گیری شده برآورد شده در داده‌های آموزش نشان‌دهنده برازش مناسب الگوریتم رندوم فارست می‌باشد.

الگوریتم رندوم فارست با استفاده از داده‌های سنتینل ۲، مقادیر زی توده روی زمینی درختان را بیش‌تر از مقدار واقعی برآورد نموده‌اند. با توجه به

داده‌های ماهواره‌ای سنجنده‌های مختلف با قدرت تفکیک رادیومتری و مکانی بالاتر جهت برآورد زی‌توده روی زمینی درختان در سایر جنگل‌ها دست‌کاشت و هم‌چنین طبیعی انجام شود تا بتوان از نتایج به‌دست‌آمده در برنامه‌ریزی، مدیریت پایدار منابع جنگلی و برنامه‌ها حفاظتی استفاده شود.

نتایج به‌دست‌آمده در این مطالعه و مقایسه آن با سایر مطالعات، در نهایت می‌توان نتیجه‌گیری که داده‌ها ماهواره سنتینل ۲ توانایی برآورد مشخصه زی‌توده روی زمینی توده‌های جنگلی دست‌کاشت عرب‌داغ استان گلستان را با دقت مناسب دارند. امید می‌رود که پژوهش‌های تکمیلی در مورد استفاده از سایر الگوریتم‌های ناپارامتریک مانند یادگیری عمیق و

### منابع

1. Stovall, A. E., Anderson-Teixeira, K. J., & Shugart, H. H. (2018). Assessing terrestrial laser scanning for developing non-destructive biomass allometry. *Forest Ecology and Management*. 427, 217-229.
2. Mate, R., Johansson, T., & Siteo, A. (2014). Biomass equations for tropical forest tree species in Mozambique. *Forests*. 5 (3), 535-556.
3. Keenan, R. J., Reams, G. A., Achard, F., de Freitas, J. V., Grainger, A., & Lindquist, E. (2015). Dynamics of global forest area: Results from the FAO Global Forest Resources Assessment 2015. *Forest Ecology and Management*. 352, 9-20.
4. FRWO. (2019). *Forests, range and watershed organization*.
5. Yuen, J. Q., Fung, T., & Ziegler, A. D. (2016). Review of allometric equations for major land covers in SE Asia: Uncertainty and implications for above- and below-ground carbon estimates. *Forest Ecology and Management*. 360, 323-340.
6. Wang, J., Zhang, C., Xia, F., Zhao, X., Wu, L., & Gadow, K. V. (2011). Biomass structure and allometry of *Abies nephrolepis* (Maxim) in Northeast China. *Silva Fennica*. 45 (2), 211-226.
7. Castillo, J. A. A., Apan, A. A., Maraseni, T. N., & Salmo III, S. G. (2017). Estimation and mapping of above-ground biomass of mangrove forests and their replacement land uses in the Philippines using Sentinel imagery. *ISPRS J. of Photogrammetry and Remote Sensing*. 134, 70-85.
8. Guerini Filho, M., Kuplich, T. M., & Quadros, F. L. D. (2020). Estimating natural grassland biomass by vegetation indices using Sentinel 2 remote sensing data. *International J. of Remote Sensing*. 41 (8), 2861-2876.
9. Vafaei, S., Soosani, J., Adeli, K., Fadaei, H., & Naghavi, H. (2017). Estimation of aboveground biomass using optical and radar images (case study: Nav-e Asalem forests, Gilan). *Iranian J. of Forest and Poplar Research*. 25 (2), 320-330.
10. Torabzadeh, H., Moradi, M., & Fatehi, P. (2019). Estimating aboveground biomass in zagros forest, Iran, using sentinel-2 data. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 42, 1059-1063.
11. 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 J. of Forest and Poplar Research*. 26 (3), 406-420.
12. Ronoud, GH., Darvishsefat, A. A., Schaepman, M. E., Namiranian, M., & Maghsoudi, Y. (2022). Woody aboveground biomass estimation using radar data in the mixed Hyrcanian forest (Case study: Khayroud forest of Nowshahr, Mazandaran). *Iranian J. of Forest*, 14 (3), 257-274.
13. Varamesh, S., & Mohtaram Anbaran, S. (2023). Investigation of the potential of sentinel-2 images in estimation of forest



- biomass. *J. of Environmental Sciences Studies*. 8 (3), 7149-7157.
14. Wai, P., Su, H., & Li, M. (2022). Estimating aboveground biomass of two different forest types in myanmar from sentinel-2 data with machine learning and geostatistical algorithms. *Remote Sensing*. 14 (9), 2146.
  15. Chen, C., He, Y., Zhang, J., Xu, D., Han, D., Liao, Y., & Yin, T. (2023). Estimation of above-ground biomass for *Pinus densata* using multi-source time series in Shangri-La considering seasonal effects. *Forests*. 14 (9), 1747.
  16. McRoberts, R. E., Tomppo, E. O., Finley, A. O., & Heikkinen, J. (2007). Estimating areal means and variances of forest attributes using the k-Nearest Neighbors technique and satellite imagery. *Remote Sensing of Environment*. 111 (4), 466-480.
  17. Tomppo, E. O., Gagliano, C., De Natale, F., Katila, M., & McRoberts, R. E. (2009). Predicting categorical forest variables using an improved k-Nearest Neighbour estimator and Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment*. 113 (3), 500-517.
  18. Hallaj, M. H. S., & Rostaghi, A. A. (2011). Study on growth performance of Turkish pine (case study: Arabdagh afforestation plan, Golestan Province). *Iranian J. of Forest*. 3 (3), 201-212.
  19. Ali, H., Mohammadi, J., & Shataee Jouibary, S. (2023). Allometric models and biomass conversion and expansion factors to predict total tree-level aboveground biomass for three conifers species in Iran. *Forest Science*. 69 (4), 355-370.
  20. Tucker, C. J. (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote sensing of Environment*. 8 (2), 127-150.
  21. Huete, A. R. (1988). A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote sensing of environment*. 25 (3), 295-309.
  22. Jordan, C. F. (1969). Derivation of leaf-area index from quality of light on the forest floor. *Ecology*. 50 (4), 663-666.
  23. Qi, J., Chehbouni, A., Huete, A. R., Kerr, Y. H., & Sorooshian, S. (1994). A modified soil adjusted vegetation index. *Remote sensing of environment*. 48 (2), 119-126.
  24. Gitelson, A. A., Gritz, Y., & Merzlyak, M. N. (2003). Relationships between leaf chlorophyll content and spectral reflectance and algorithms for non-destructive chlorophyll assessment in higher plant leaves. *J. of plant physiology*. 160 (3), 271-282.
  25. Senseman, G. M., Bagley, C. F., & Tweddale, S. A. (1996). Correlation of rangeland cover measures to satellite-imagery-derived vegetation indices. *Geocarto International*. 11 (3), 29-38.
  26. Richardson, A. J., & Wiegand, C. L. (1977). Distinguishing vegetation from soil background information. *Photogrammetric engineering and remote sensing*. 43 (12), 1541-1552.
  27. Dang, A. T. N., Nandy, S., Srinet, R., Luong, N. V., Ghosh, S., & Kumar, A. S. (2019). Forest aboveground biomass estimation using machine learning regression algorithm in Yok Don National Park, Vietnam. *Ecological Informatics*. 50, 24-32.
  28. Liaw, A., & Wiener, M. (2002). Classification and regression by random Forest. *R news*. 2 (3), 18-22.
  29. Chi, H., Sun, G., Huang, J., Li, R., Ren, X., Ni, W., & Fu, A. (2017). Estimation of forest aboveground biomass in Changbai Mountain region using ICESat/GLAS and Landsat/TM data. *Remote Sensing*. 9 (7), 707.
  30. Baloloy, A. B., Blanco, A. C., Candido, C. G., Argamosa, R. J. L., Dimalag, J. B. L. C., Dimapilis, L. L. C., & Paringit, E. C. (2018). Estimation of mangrove forest aboveground biomass using multispectral bands, vegetation indices and biophysical variables derived from optical satellite imageries: rapideye, planetscope and sentinel-2. *ISPRS annals of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences*. 4, 29-36.
  31. Ghosh, S. M., & Behera, M. D. (2018). Aboveground biomass estimation using multi-sensor data synergy and machine learning algorithms in a dense tropical forest. *Applied Geography*. 96, 29-40.

32. 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.
33. Aksoy, H. (2023). Modeling of above-ground biomass of pure Calabrian pine (*Pinus brutia* Ten.) stands using Sentinel-2 time series and Sentinel-1 imagery; a case study from the south of Turkey. *Research Square*. Pp: 1-26.
34. Suardana, A. M. A. P., Anggraini, N., Nandika, M. R., Aziz, K., As-syakur, A. R., Ulfa, A., & Dewanti, R. (2023). Estimation and mapping above-ground mangrove carbon stock using sentinel-2 data derived vegetation indices in benoa bay of Bali province, Indonesia. *Forest and Society*. 7 (1), 116-134.
35. Zhu, Y., Feng, Z., Lu, J., & Liu, J. (2020). Estimation of forest biomass in Beijing (China) using multisource remote sensing and forest inventory data. *Forests*. 11 (2), 163-180.