



Forest Aboveground Biomass Estimation Using Satellite Imagery and Random Forest Regression Model

Sina Gheysarbeigi¹ | Mahtab Pir Bavaghar² | Ahmad Valipour³

1. Department of Forestry, Faculty of Natural Resources, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran.
2. Corresponding Author, Department of Forestry and Dr. Hedayat Ghazanfari Center for Research and Development of Northern Zagros Forestry, Faculty of Natural Resources, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran. E-mail: m.bavaghar@uok.ac.ir
3. Department of Forestry and Dr. Hedayat Ghazanfari Center for Research and Development of Northern Zagros Forestry, Faculty of Natural Resources, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran.

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received: 11 Dec 2023
Received in revised form: 14 Mar 2024
Accepted: 16 Mar 2024
Available online: 06 Apr 2024

Keywords:
Above ground biomass,
Sentinel 2 images,
Random forest,
Zagros.

ABSTRACT

Accurate assessment of forest above-ground biomass is essential for sustainable forest management. Estimation of forest biomass is necessary for studies such as estimation of greenhouse gases, carbon stored in forest resources and climate change models. Also, the forest biomass represents the production rate per unit area. The optical image data of Sentinel-2 satellite was used to estimate the above-ground biomass of the forest in the area of 285 hectares of the forests in Ilam province. 124 square-shaped sample plots with a 20×20 m dimension were located on the ground using a cluster method. Some characteristics of a total of 508 trees (both single stems and coppice forms), including the major and minor crown diameters were measured within each sample plot. Depending on whether the trees are single stem and multi-stem clumps, suitable allometric equations were used to calculate the above-ground biomass based on the measured characteristics. Finally, the total above-ground biomass was calculated for all trees in each sample plot. In order to estimate the above-ground biomass, MSI sensor images of Sentinel 2 satellite were used at the level of L2A corrections. Using spectral ratios, vegetation indices were calculated. In the next step, the corresponding spectral values of the sample plots were extracted from the main bands, and vegetation indices. A random forest regression model was used to estimate forest above-ground biomass. 70% of the samples were used for training the model, and the models were validated using the remaining 30% of the data. The results with $R^2=0.80$ and $RMSE=28.70$ t/ha showed the acceptable performance of model for estimating the above-ground biomass of the forest. By using the Gini statistic, it was shown that RVI, GNDVI, NDVI, and DVI vegetatuin inices played a larger role in the estimation of biomass.

Cite this article: Gheysarbeigi, S., Pir Bavaghar, M., Valipour, A. (2024). Forest Aboveground Biomass Estimation Using Satellite Imagery and Random Forest Regression Model. *Geography and Environmental Sustainability*, 14 (1), 85-100. DOI: 10.22126/GES.2024.9971.2715



© The Author(s).
DOI: 10.22126/GES.2024.9971.2715

Publisher: Razi University



بر آورد زیتوده روی زمینی جنگل با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و مدل رگرسیون جنگل تصادفی

سینا قیصر بیگی^۱ | مهتاب پیرباوقار^۲ | احمد ولی پور^۳

۱. گروه جنگلداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران.
 ۲. نویسنده مسئول، گروه جنگلداری و مرکز پژوهش و توسعه جنگلداری زاگرس شمالی دکتر هدایت غضنفری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران. رایانامه: m.bavaghar@uok.ac.ir
 ۳. گروه جنگلداری و مرکز پژوهش و توسعه جنگلداری زاگرس شمالی دکتر هدایت غضنفری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران.

چکیده	اطلاعات مقاله
<p>ارزیابی دقیق زیتوده روی زمینی جنگل برای مطالعات میزان گازهای گلخانه‌ای، برآورد کربن ذخیره شده در منابع جنگلی، مدل‌های تغییر آب‌وهوا و در نتیجه مدیریت پایدار جنگل‌ها امری ضروری است. زیتوده جنگل بیانگر توان تولید در واحد سطح می‌باشد. در این پژوهش از داده‌های تصاویر نوری ماهواره سنتینل-۲ برای برآورد زیتوده روی زمینی جنگل در سطح ۲۸۵ هکتار از جنگل‌های استان ایلام استفاده شد. ۱۲۴ قطعه نمونه مربعی شکل به ابعاد ۲۰ در ۲۰ متر به روش خوشه‌ای روی زمین پیاده شد. مشخصه‌های قطر بزرگ و قطر کوچک تاج مجموع ۵۰۸ پایه درختی (تک‌پایه و جست‌گروه) در قطعات نمونه اندازه‌گیری شدند. بسته به تک‌پایه و جست‌گروه بودن پایه‌های درختی از معادلات آلومتریک مناسب برای محاسبه زیتوده روی زمینی بر اساس مشخصه‌های اندازه‌گیری شده استفاده شد. در نهایت مجموع زیتوده روی زمینی جنگل برای همه پایه‌های درختی موجود در هر قطعه نمونه محاسبه شد. با استفاده از نسبت‌گیری‌های طیفی، شاخص‌های گیاهی مرتبط با پوشش گیاهی از باندهای سنجنده MSI ماهواره سنتینل ۲ تهیه شدند. در گام بعد ارزش‌های طیفی متناظر قطعات نمونه از باندهای اصلی و شاخص‌های گیاهی استخراج شدند. از مدل رگرسیون جنگل تصادفی برای برآورد زیتوده روی زمینی جنگل استفاده شد. از ۷۰ درصد نمونه‌ها برای آموزش مدل استفاده شد و اعتبارسنجی مدل با استفاده از ۳۰ درصد باقیمانده داده‌ها انجام شد. نتایج حاصل با میزان $RMSE=28/70$ و $R^2=0/80$ تن در هکتار نشان از عملکرد قابل قبول مدل در برآورد زیتوده روی زمینی جنگل بود. نتایج بررسی میزان اهمیت متغیرها با استفاده از آماره جینی نشان داد که شاخص‌های NDVI، GNDVI، RVI و DVI اهمیت بیشتری در ارائه مدل برآورد زیتوده داشتند.</p>	<p>نوع مقاله: مقاله پژوهشی تاریخچه مقاله: تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۹/۲۰ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۱۲/۲۴ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۲/۲۶ دسترسی آنلاین: ۱۴۰۳/۰۱/۱۸ کلیدواژه‌ها: زیتوده روی زمینی جنگل، تصاویر سنتینل ۲، جنگل تصادفی، زاگرس.</p>

استناد: قیصر بیگی، سینا؛ پیرباوقار، مهتاب؛ ولی پور، احمد (۱۴۰۳). برآورد زیتوده روی زمینی جنگل با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و مدل رگرسیون جنگل تصادفی. *جغرافیا و پایداری محیط*، ۱۴ (۱)، ۸۵-۱۰۰. DOI: 10.22126/GES.2024.9971.2715



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه رازی

مقدمه

در دهه‌های اخیر فعالیت‌ها و اقدامات بشر سبب انتشار آلاینده‌های مختلفی همانند گاز دی‌اکسیدکربن به اتمسفر شده است و افزایش دمای هوای کره زمین و تغییرات اقلیمی با پیامدهای منفی از نتایج آن می‌باشد. بوم‌سازگان‌های جنگلی با جذب کربن و ذخیره آن به صورت زیتوده، از اهمیت زیادی در تعدیل تغییرات اقلیم جهانی زمین برخوردار هستند. سطح اعظم زیتوده یک جنگل در بخش فوقانی زمین قرار دارد، براین اساس و همچنین به دلیل دشواری اندازه‌گیری زیتوده زیرزمینی در بیشتر پژوهش‌ها، تخمین برآورد زیتوده در ارتباط با اندازه‌گیری بخش روی زمینی درختان مدنظر قرار می‌گیرد (وفایی و همکاران، ۱۳۹۶؛ Lu et al., 2014).

ارزیابی دقیق زیتوده روی زمینی جنگل (AGB¹) برای مدیریت پایدار جنگل‌ها امری ضروری است. زیتوده جنگل بیانگر توان تولید در واحد سطح می‌باشد (Ruiz-Peinado et al., 2012). برآورد زیتوده جنگل در بسیاری از مطالعات زیست‌محیطی همانند پژوهش‌های مرتبط با کربن ذخیره شده در منابع جنگلی، میزان گازهای گلخانه‌ای و مدل‌های تغییر آب‌وهوا نقش مهمی دارد. جنگل‌زدایی و در نتیجه کاهش سطح جنگل‌ها، باعث آزاد شدن دی‌اکسیدکربن به اتمسفر می‌گردد و از عوامل تغییرات در اقلیم‌ها و بوم‌سازگان‌هاست و نگرانی‌هایی را در رابطه با تغییرات محیطی به وجود می‌آورد (Ronoud et al., 2021). ارزیابی زیتوده روی زمینی به پژوهشگران کمک می‌کند تا پاسخ‌های بوم‌سازگان‌ها و سهم آنها در تغییرات آب‌وهوایی چرخه کربن جهانی را درک و کنترل کنند و برآورد کربن زمینی را انجام دهند (Chinembiri et al., 2013; Gara et al., 2014; Güneralp et al., 2014).

برآورد زیتوده جنگل هم از طریق اندازه‌گیری‌های مستقیم و میدانی در عرصه جنگل و هم از طریق استفاده از روش‌های سنجش‌ازدوری امکان‌پذیر است. گرچه فعالیت‌های میدانی در عرصه جنگل برآورد دقیق‌تری از مقدار زیتوده ارائه می‌دهد، اما یک روش سخت، طاقت‌فرسا، پرهزینه و زمان‌بر است (وفایی و همکاران، ۱۳۹۶). بررسی‌ها نشان می‌دهد که امکان تخمین پارامترهای مختلف جنگل از تلفیق دو روش سنجش‌ازدور و استفاده از داده‌های میدانی به‌منظور برآورد هرچه دقیق‌تر مشخصه‌های فیزیکی جنگل موردتوجه قرار گرفته است. اغلب این تحقیقات نشان داده که در صورت ترکیب این اطلاعات نتایج بهتری به دست خواهد آمد (Nilsson et al., 2004).

برآورد زیتوده با کمک سنجش‌ازدور و تصاویر نوری، راداری و لایدار در اکوسیستم‌های مختلف، نتایج متفاوتی به همراه داشته است به‌طوری‌که برآورد این مشخصه در جنگل‌های بسیار متراکم و همچنین در جنگل‌های تنک و دارای ساختار پیچیده و جنگل‌های کوهستانی، همواره چالش‌برانگیز بوده است (David et al., 2022; Kronseder et al., 2012; Attarchi, 2014). اگرچه داده‌های تصویری ابرطیفی اطلاعات طیفی زیادی را فراهم می‌آورند و در برآورد زیتوده دقت بیشتری دارند (Adão et al., 2017)، اما محدودیت‌هایی از جمله افزایش هزینه‌های تصویر، حجم داده، افزونگی داده‌ها و هزینه‌های پردازش داده‌ها را دارد (Bajwa et al., 2018). در سه دهه گذشته، بیشتر از تصاویر ماهواره Landsat برای تخمین زیتوده روی زمینی جنگل به دلیل دسترسی به بایگانی وسیع تصاویر با وضوح مکانی متوسط و قابلیت دسترسی آزاد مورد استفاده قرار گرفته است (Powell et al. 2010).

ماهواره Sentinel-2 (مجهز به سنجنده چند طیفی MSI)، بهبود چشم‌گیری در پوشش طیفی، وضوح مکانی و فرکانس زمانی نسبت به نسل فعلی لندست فراهم کرده است (Gómez et al., 2019) و پتانسیل بالایی برای کاربردها در مدیریت زمین، صنعت کشاورزی (امنیت غذایی)، جنگلداری (AGB) و کنترل بلایا ارائه می‌دهد (Aschbacher & Milagro-Pérez, 2012). پیکربندی طیفی سنجنده MSI ماهواره Sentinel-2 به دلیل وجود بلند لبه قرمز با برخی از داده‌های ماهواره‌های تجاری مانند Worldview-2 و RapidEye قابل مقایسه است، اما با ترکیب باندهای مادون قرمز موج کوتاه (SWIR) از قابلیت بالاتری برخوردار است (Ramoelo et al. 2014).

همچنین این سنجنده، دارای قدرت تفکیک مکانی و باندهای طیفی بیشتر (مانند باند لبه قرمز - باندهای مادون قرمز

نزدیک با پهنای باریک) نسبت به تصاویر ماهواره Landsat است؛ بنابراین انتظار می‌رود با استفاده از قابلیت این سنجنده، فرصت‌های جدیدی برای برآورد دقیق زیتوده در جنگل‌های زاگرس فراهم شود. ورامش و عنبران (۱۴۰۲) به بررسی پتانسیل ماهواره سنتینل ۲ در برآورد زیتوده جنگلی در جنگل‌های فندوقلو اردبیل پرداختند. نتایج نشان‌دهنده قابلیت تصاویر سنتینل-۲ در برآورد زیتوده روی زمینی بود. وفایی و همکاران (۱۳۹۶)، از داده‌های راداری ماهواره ALOS-2 با قطبش کامل و تصاویر نوری ماهواره Sentinel-2 برای برآورد زیتوده روی زمینی درختان در بخشی از جنگل‌های هیرکانی استفاده کردند.

باتوجه به نتایج، بهترین مدل برای برآورد زیتوده ترکیب داده‌های نوری و راداری و استفاده از مدل شبکه عصبی مصنوعی گزارش شده است. دیوید و همکاران (۲۰۲۲) به برآورد زیتوده روی زمینی جنگل‌های مناطق خشک آفریقای جنوبی با ترکیب داده‌های SAR سنتینل ۱ و تصاویر چند طیفی سنتینل ۲ و استفاده از روش‌های آماری پارامتری (رگرسیون خطی) و ناپارامتری (جنگل تصادفی) پرداختند. نتایج نشان داد که ترکیب داده‌های راداری و تصاویر چند طیفی و استفاده از روش رگرسیون جنگل تصادفی با ضریب تعیین ۰/۹۵ منجر به نتایج بهتری از برآورد زیتوده شد (David et al., 2022).

سینگ و همکاران (۲۰۲۲) طی یک مطالعه در بخشی از جنگل‌های مداری در فصول خشک و مرطوب با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای منبع باز به این نتیجه رسیدند که برای داده‌های ماهواره‌ای Sentinel-2 فصل مرطوب، روش جنگل تصادفی ($R^2=0/91$) و شبکه عصبی مصنوعی ($R^2=0/77$) برای تخمین زیتوده در منطقه مورد مطالعه مناسب‌تر بودند. برای داده‌های ماهواره‌ای فصل خشک، هیچ یک از مدل‌ها نتوانستند زیتوده را به درستی برآورد کنند (Singh et al., 2022). ژانگ و همکاران (۲۰۱۸) با استفاده از روش‌های پارامتری رگرسیون چندگانه خطی و روش‌های ناپارامتری رگرسیون یادگیری ماشین همانند ماشین بردار پشتیبان، جنگل تصادفی، k نزدیکترین همسایه و شبکه عصبی مصنوعی به برآورد زیست‌توده گیاه با استفاده از تصاویر ماهواره لندست پرداختند (Zhang et al., 2018).

نتایج نشان داد که استفاده از روش‌های ناپارامتری نسبت به روش معمول رگرسیون خطی چندگانه، برآورد بسیار بهتری از زیتوده گیاه ارائه دادند. بررسی پژوهش‌ها نشان می‌دهد برآورد زیتوده روی زمینی جنگل تحت شرایط متفاوت رویشگاهی و استفاده از تصاویر ماهواره‌ای مختلف و الگوریتم‌های مختلف پیش‌بینی، متفاوت بوده است و استفاده از روش‌های آماری ناپارامتری در اکثر موارد، منجر به برآورد بهتری از زیتوده شده است (Zhang & Wang, 2022). در بیشتر پژوهش‌ها در میان روش‌های آماری ناپارامتری، استفاده از روش رگرسیون جنگل تصادفی نتایج بهتری ارائه داده است (Mutanga et al., 2012; Singh et al., 2022; David et al., 2022). روش‌های آماری ناپارامتری به دلیل عملکرد بهتر در روابط غیرخطی پیچیده معمولاً منتج به نتایج بهتری می‌شوند (شمس‌الدینی و احمدی، ۱۳۹۹).

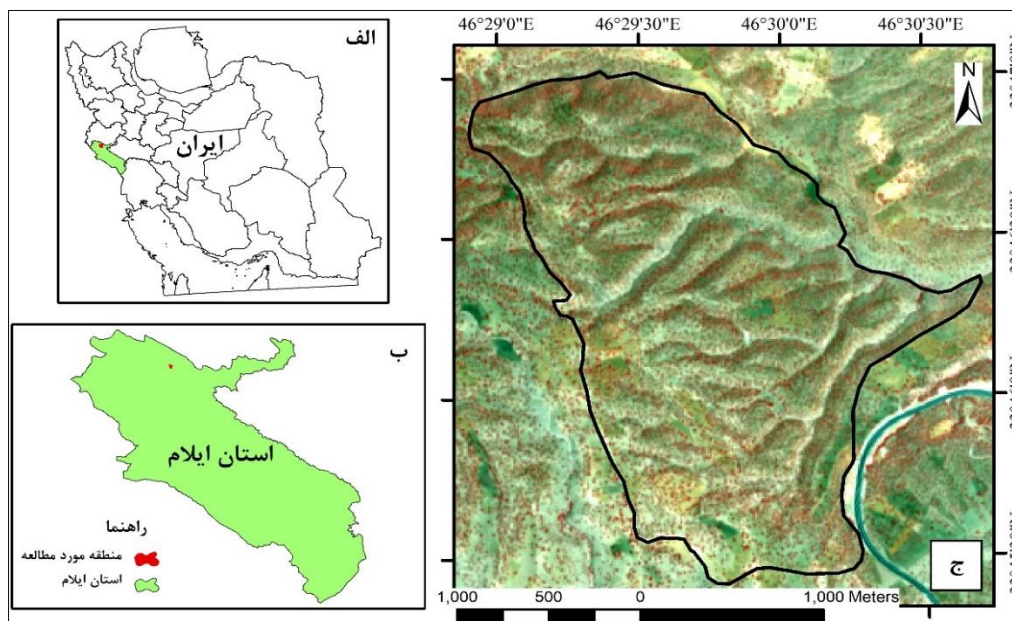
جنگل‌های زاگرس وسیع‌ترین رویشگاه جنگلی ایران هستند و نقش مهمی در حفاظت آب‌و خاک ایفا می‌کنند. این جنگل‌ها به دلیل دخالت‌های بی‌رویه انسان و عوامل رویشگاهی، محیطی و آب‌وهوایی، دستخوش تغییرات زیادی شده‌اند (محمودی و همکاران، ۱۳۹۹). با توجه به اهمیت نقش حفاظتی جنگل‌های زاگرس و لزوم اطلاع از میزان زیتوده جنگل به عنوان شاخصی برای مدیریت بهتر این جنگل‌ها، برآورد زیتوده در جنگل‌های زاگرس از اهمیت بالایی برخوردار است. در تحقیق حاضر، مدل برآورد زیتوده روی زمینی جنگل با استفاده از تصاویر ماهواره سنتینل ۲ مورد بررسی قرار گرفت. برآورد زیتوده با این روش هم منجر به قطع درختان و تخریب رویشگاه نمی‌شود و هم مستلزم هزینه کمتری است. از آنجا که در جنگل‌های زاگرس پژوهش‌های اندکی در این زمینه انجام شده است، در این پژوهش تلاش می‌شود تا با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای سنتینل ۲ و استفاده از روش ناپارامتری رگرسیون جنگل تصادفی، برآورد زیتوده بخشی از جنگل‌های زاگرس برآورد شود.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه، منطقه‌ای جنگلی در شهرستان چرداول در شمال شرقی استان ایلام است. این منطقه دارای آب‌وهوای مدیترانه‌ای با متوسط دمای سالانه ۲۳/۵ درجه سانتیگراد و میزان بارش سالیانه ۵۶۰ میلی‌متر است. شهرستان چرداول با

طول جغرافیایی ۴۶ درجه و ۱۷ دقیقه تا ۴۶ درجه و ۵۶ دقیقه غربی و عرض جغرافیایی ۳۳ درجه و ۵۸ دقیقه تا ۳۳ درجه و ۳۸ دقیقه شمالی، از شهرستان‌های جنگلی استان ایلام می‌باشد (شکل ۱). پوشش گیاهی منطقه را بیشتر گونه بلوط ایرانی (*Quercus brantii*) تشکیل می‌دهد. این گونه به‌عنوان اصلی‌ترین گونه موجود در این منطقه است که تحت تاثیر عوامل طبیعی و مصنوعی به سمت شاخه زادش رفته است. منطقه مورد مطالعه با مساحت ۴۲۰ هکتار، دارای دامنه ارتفاعی ۸۷۵ تا ۱۲۲۶ متر، شیب متوسط ۱۵ درصد و پستی و بلندی ملایم است. تصویری از منطقه مورد مطالعه و گونه بلوط ایرانی در شکل ۲ ارائه شده است.



شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه در ایران (الف) استان ایلام (ب) و تصویر ماهواره‌ای منطقه مورد مطالعه - ترکیب رنگی RGB843 (ج) رنگ قرمز در ترکیب رنگی ارائه شده نشان‌دهنده پوشش گیاهی منطقه است.



شکل ۲. عکس منطقه مورد مطالعه و گونه بلوط ایرانی

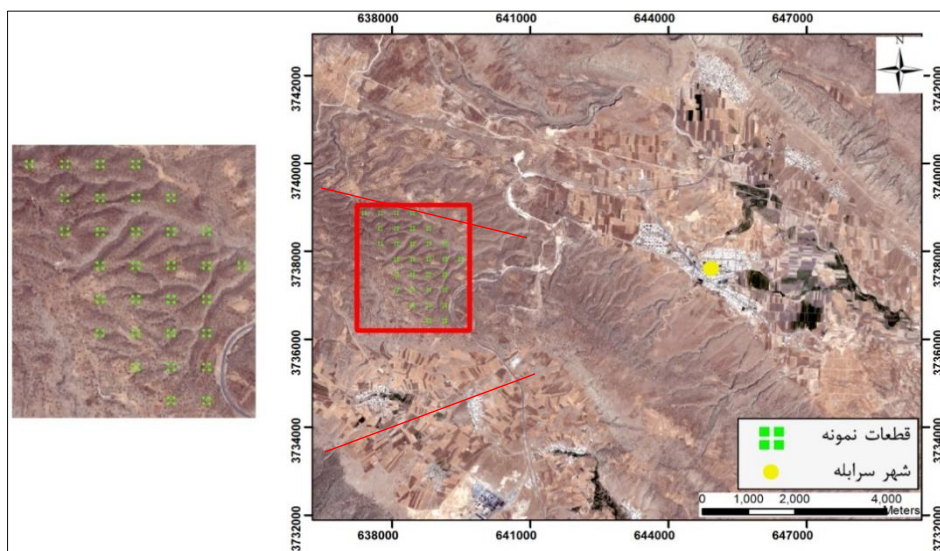
پیش‌پردازش و پردازش تصاویر ماهواره‌ای

تصاویر نوری ماهواره سنتینل ۲ از سازمان فضایی اروپا، در سطح تصحیحات L2A در تاریخ ۱۴۰۰/۰۵/۰۵ (۷ جولای ۲۰۲۱)

میلادی) تهیه گردید. علت انتخاب این تاریخ، خشک‌بودن پوشش کف جنگل و جلوگیری از اختلاط طیفی آن با پوشش جنگلی بود. این سطح از تصحیحات شامل تصحیحات رادیومتری، هندسی و همچنین تصحیح خطای جابه‌جایی ناشی از توپوگرافی و در نهایت تبدیل ارزش رقومی^۱ (DN) پیکسل‌ها به میزان بازتاب در پایین اتمسفر^۲ (BOA) می‌شود. اگرچه مطابق با تصحیحات گفته شده، با اطمینان بالا می‌توان تصاویر را مورد تجزیه و تحلیل قرارداد، اما کیفیت داده‌های مورد استفاده در این تحقیق، قبل از به‌کارگیری در تجزیه و تحلیل‌های رقومی، از نظر وجود خطاهای رادیومتری از طریق بزرگ‌نمایی تصویر و بررسی هیستوگرام آنها، همچنین تصاویر در ترکیب‌های مختلف رنگی و به‌صورت باندهای جداگانه مورد بررسی قرار گرفتند که این تصاویر فاقد هرگونه خطای رادیومتری بودند. انطباق لایه جاده‌ها و آبراهه‌های مستخرج از نقشه‌های رقومی مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ سازمان نقشه‌برداری کشور نیز نشان داد که دقت هندسی تصاویر نیز مورد قبول است (خطای کمتر از ۰/۳ پیکسل).

تهیه نقشه قطعات نمونه زمینی برداشت شده

به‌منظور جمع‌آوری داده‌های زمینی، یک شبکه آماری با ابعاد 350×350 متر به روش منظم با نقطه شروع تصادفی برای کل محدوده جنگل مورد مطالعه طراحی و در عرصه پیاده شد. در هر یک از نقاط محل تقاطع خطوط شبکه، چهار قطعه نمونه با ابعاد ۲۰ در ۲۰ متر (متناسب با ابعاد پیکسل تصاویر سنتینل ۲) و در مجموع ۱۲۴ قطعه نمونه برداشت شدند (شکل ۳). از آنجا که ۴ قطعه نمونه فاقد درخت بود، از محاسبات حذف شدند. با استفاده از GPS، مختصات یک گوشه قطعات نمونه در عرصه تعیین شد و به کمک قطب‌نما، شیب‌سنج و متر، قطعات نمونه مربعی روی زمین پیاده شدند و مشخصه‌های تمام گونه‌های درختی موجود در قطعات نمونه شامل قطر برابر سینه، قطر بزرگ تاج و قطر عمود بر آن اندازه‌گیری شد. همچنین نوع گونه و تک پایه یا جست‌گروه بودن آنها نیز در فرم آماری ثبت شدند.



شکل ۳. نمای گرافیکی موقعیت برداشت چهار نقطه در سطح هر قطعه نمونه

محاسبه زیتوده با استفاده از روابط آلومتری

پس از برداشت داده‌های زمینی از معادلات آلومتری که ارائه شده توسط ایرانمنش (۱۳۹۳: ۵۵) که برای بخشی از جنگل‌های زاگرس ارائه شده است، برای تعیین میزان زیتوده در دو فرم رویشی تک‌پایه و جست‌گروه برای محاسبه زیتوده استفاده شد (رابطه ۱ و ۲). از آنجا که امکان محاسبه دقیق زیتوده بر اساس قطع و توزین درختان در منطقه فراهم نبود، زیتوده برآورد شده توسط این معادلات به‌عنوان زیتوده اندازه‌گیری شده زمینی در نظر گرفته شده است (Li et al., 2022; Imran et al., 2020).

1. Digital Number
2. Bottom of Atmosphere

$$\text{biomass} = 0.881(x)^{3.228} \quad \text{رابطه (۱)}$$

در این رابطه x میانگین قطر تاج درخت تک پایه به متر می باشد.

$$\text{biomass} = 2.534(x)^{2.383} \quad \text{رابطه ۲}$$

در این رابطه x میانگین قطر تاج جست گروه به متر می باشد.

شاخص های پوشش گیاهی

به منظور کاهش اثر عوامل ناخواسته روی اطلاعات پوشش گیاهی و افزایش اطلاعات مربوط به پوشش گیاهی می توان با ترکیب حداقل دو باند، شاخص ترکیبی به نام شاخص پوشش گیاهی ایجاد کرد. شاخص های پوشش گیاهی، تبدیل های محاسباتی هستند که بر اساس رفتار طیفی گیاهان تعریف می شوند و برای ارزیابی و بررسی گیاهان در مشاهدات ماهواره ای چند طیفی طراحی شده اند. شاخص های گیاهی مورد استفاده در این پژوهش بر اساس مرور منابع در جدول ۱ ارائه شده است. به دلیل تراکم تاج پوشش کم تا متوسط در منطقه و به منظور در نظر گرفتن اختلاط طیفی خاک، از شاخص های خط خاک همانند SAVI، TSAVI و MSAVI هم در این تحقیق استفاده شد.

جدول ۱. شاخص های پوشش گیاهی مورد استفاده در پژوهش حاضر

نام شاخص	معادله	مرجع
NDVI	$\text{NDVI} = \frac{\text{NIR} - \text{RED}}{\text{NIR} + \text{RED}}$	Rouse et al., 1974
TNDVI	$\text{NDVI} = \sqrt{\frac{\text{NIR} - \text{RED}}{\text{NIR} + \text{RED}} + 0.5}$	Tucker, 1979
GEMI	$\text{GEMI} = \frac{\mu(1 - 0.25\mu) - (\text{RED} - 0.125)}{1 - \text{RED}}$ $\mu = \frac{(\text{NIR}^2 - \text{RED}^2) + 1.5\text{NIR} + 0.5\text{RED}}{\text{NIR} + \text{RED} + 0.5}$	Pinty & Verstraete, 1992
REIP	$\text{REIP} = 700 + 40 * [(\frac{\text{R}_1 + \text{NIR}}{2} - \text{R}_2) / (\text{R}_3 - \text{R}_2)]$	Guyot et al, 1988
SAVI	$\text{AVI} = \frac{\text{NIR} - \text{RED}}{(\text{NIR} + \text{RED} + L)} \times (1 + L)$ L=0.5 پوشش گیاهی متوسط	Huete, 1988
TSAVI	$\text{SAVI} = \frac{a(\text{NIR} - a\text{RED} - b)}{\text{RED} + a\text{NIR} - ab + 0.08(1 + a^2)}$	Guyot et al., 1988
ARVI	$\text{ARVI} = \frac{\text{NIR} - \text{RED} - y(\text{RED} - \text{BLUE})}{\text{NIR} + \text{RED} - y(\text{RED} - \text{BLUE})}$	Huete et al., 1997
GNDVI	$\text{GNDVI} = \frac{\text{NIR} - [540:570]}{\text{NIR} + [540:570]}$	Ahamed et al, 2011
DVI	$\text{DVI} = \text{NIR} - \text{RED}$	Tucker, 1979
RVI	$\text{RVI} = \text{NIR}/\text{RED}$	Huete et al., 1997
MSAVI	$\text{MSAVI} = \frac{2\text{NIR} + 1 - \sqrt{(2\text{NIR} + 1)^2 - 8(\text{NIR} - \text{RED})}}{2}$	Qi et al, 1994
WDVI	$\text{WDVI} = \text{NIR} - a. \text{RED}$	Buschmann, 1993

تحلیل توصیفی داده ها و بررسی میزان همبستگی زیتوده و شاخص های گیاهی مورد بررسی

با هدف توصیف آماری نمایه زیتوده روی زمینی جنگل، آماره های میانگین، انحراف معیار، کمینه و بیشینه زیتوده محاسبه شده از معادلات آلومتریک محاسبه شد. برای آگاهی از میزان همبستگی بین زیتوده با شاخص های پوشش گیاهی از ضریب همبستگی پیرسون استفاده شد.

تحلیل داده‌ها با استفاده از روش رگرسیون جنگل تصادفی^۱

جنگل تصادفی یک روش ناپارامتری و یکی از روش‌های الگوریتم یادگیری ماشینی^۲ است که از تعداد زیادی درخت تصمیم‌گیری درست شده است (Breiman, 2001). در این روش با تغییر مداوم متغیرهای مستقل مؤثر و مرتبط با متغیر پیوسته یا هدف، به طور تصادفی تعداد زیادی درخت تصمیم‌گیری تولید و از ترکیب نتایج تمام درختان برای پیش‌بینی استفاده می‌شود.

در رگرسیون جنگل تصادفی اهمیت نسبی هر متغیر مستقل و تأثیر آن بر پیش‌بینی نیز محاسبه می‌شود. در فرایند این الگوریتم، دو پارامتر مهم تعداد درخت (ntree) و تعداد متغیر در هر گره^۳ از درخت (mtry) تعریف می‌شوند. برای تعیین تعداد بهینه درختان پیش‌بینی، یک تعداد اولیه بزرگ در نظر گرفته می‌شود و میزان بهینه درخت بر اساس کاهش میزان خطا انتخاب می‌گردد. در این پژوهش تعداد ۵۰۰ درخت اولیه در نظر گرفته شد. پارامتر مهم بعدی تعداد متغیر پیش‌بینی است. بهترین تعداد متغیر اندازه گره بر اساس آزمون و خطا تعیین می‌شود. در ساخت هر درخت در هر مرتبه به طور تصادفی تعدادی از متغیرهای ورودی شرکت می‌کنند. در طی فرایند داده‌ها به دودسته تقسیم می‌شوند. حدود دو سوم از داده‌ها برای آموزش مدل و حدود یک‌سوم از داده‌ها به‌عنوان نمونه‌های خارج از کیسه^۴ برای اعتبارسنجی و آزمون مدل در نظر گرفته می‌شوند. در این پژوهش از ۷۰ درصد داده‌های موجود به‌عنوان داده‌های آموزش^۵ و از ۳۰ درصد باقیمانده به‌عنوان داده‌های خارج از کیسه برای ارزیابی استفاده شد (Breiman, 2001). میزان اهمیت هر یک از متغیرها در مدل بر اساس محاسبه شاخص جینی^۶ تعیین شد.

اعتبارسنجی مدل

اعتبارسنجی مدل با استفاده از ۳۰ درصد داده‌هایی که در مرحله ساخت مدل، استفاده نشده بودند انجام شد و میزان جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) و میانگین خطای مطلق (MSE) (رابطه‌های ۳ و ۴) برای هر مدل محاسبه شد و هر مدلی که دارای پایین‌ترین میزان این ضرایب باشد به‌عنوان بهترین مدل انتخاب می‌شوند (بهمنی و رضانی، ۱۳۹۳، مرادی، ۱۳۹۹).

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(Biomass_i - \widehat{Biomass}_i)^2}{n}} \quad \text{رابطه (۳)}$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Biomass_i - \widehat{Biomass}_i| \quad \text{رابطه (۴)}$$

$Biomass_i$: زیتوده اندازه‌گیری شده (حاصل از معادلات آلومتریک)؛ $\widehat{Biomass}_i$: زیتوده برآورد شده (حاصل از ارزش‌های تصاویر ماهواره‌ای)؛ n : تعداد نمونه‌های ارزیابی.

نتایج

نتایج آماره‌های توصیفی داده‌های زمینی مقادیر زیتوده در محل قطعات نمونه

نتایج آماره‌های توصیفی مقادیر زیتوده برای ۱۲۰ قطعه نمونه که با استفاده از معادلات آلومتریک محاسبه شد در جدول ۲ ارائه شده است. کمترین مقدار زیتوده روی زمینی جنگل در قطعات نمونه، برابر با ۰/۶۱ و بیشترین مقدار آن برابر ۲۶۸/۸۸

1. Random Forest
2. Machin learning
3. Node
4. Out of bag
5. Training Sample
6. Gini index

تن در هکتار می‌باشد. میانگین زیتوده روی زمینی در هر درخت در فرم‌های رویشی تک‌پایه و جست‌گروه به ترتیب ۶/۶۵۷ و ۲۳۱/۲ کیلوگرم اندازه‌گیری شد. میانگین زیتوده در کل جنگل‌های مورد مطالعه ۵۴/۱۵ تن در هکتار است.

جدول ۲. آماره‌های توصیفی مقادیر زیتوده روی زمینی قطعات نمونه و مقادیر ارزش‌های طیفی متناظر آنها

متغیرها	کمینه (Min)	بیشینه (Max)	میانگین (Mean)	انحراف معیار (Std.Deviation)
Biomass-ton/ha	۰/۶۱	۲۶۸/۸۸	۵۴/۱۵	۴/۴۲

نتایج تحلیل همبستگی پیرسون

نتایج تحلیل همبستگی زیتوده روی زمینی و باندهای اصلی سنتینل-۲ نشان داد که زیتوده با بیشتر باندهای مرئی و باند ۱۱ طول‌موج کوتاه (SWIR) دارای همبستگی منفی است (جدول ۳). منفی بودن همبستگی در اینجا به این مفهوم است که با افزایش مقادیر زیتوده میزان بازتاب در باندهای مختلف کاهش می‌یابد. همبستگی بین زیتوده روی زمینی جنگل با باند ۱۲ طول‌موج کوتاه، مثبت و معنی‌دار است (۰/۲۹۸) و با مادون‌قرمز نزدیک (باند ۸a) دارای همبستگی مثبت و غیرمعنی‌دار است (جدول ۳). مثبت بودن همبستگی نیز بدین معنی است که با افزایش زیتوده روی زمینی جنگل میزان بازتاب در باندهای طیفی مورد نظر افزایش می‌یابد.

هرچند برخلاف انتظار همبستگی میان باند مادون‌قرمز نزدیک و زیتوده روی زمینی جنگل پایین بود؛ اما نتایج بررسی همبستگی بین زیتوده روی زمینی جنگل با شاخص‌های پوشش گیاهی حاصل از تصاویر ماهواره سنتینل-۲ نشان می‌دهد زیتوده با شاخص‌های NDVI، SAVI، ARVI، DVI، GEMI، GNDVI، MSAVI، RVI، TNDVI، WDVI دارای همبستگی متوسط و مثبت معنی‌داری در سطح اطمینان ۹۹ درصد ($P < 0.01$) است.

جدول ۳- تحلیل همبستگی پیرسون بین زیتوده و باندهای اصلی و شاخص‌های گیاهی

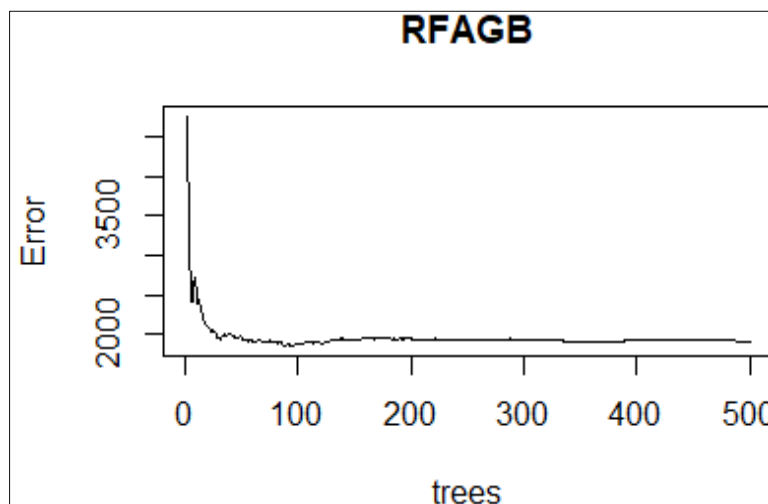
IV	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B11	B12	B8a	NDVI
Biomass	-0.394**	-0.401**	-0.402**	-0.299**	-0.176**	-0.109*	0.199*	0.236**	0.298**	0.078*	0.525**
IV	SAVI	ARVI	DVI	GEMI	GNDVI	MSAVI	REIP	RVI	TNDVI	TSAVI	WDVI
Biomass	0.370**	0.503**	0.498**	0.441**	0.473**	0.515**	0.069**	0.529**	0.512**	0.258**	0.511**

*** و ** و * : به ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد، معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد و غیرمعنی‌دار

IV: independent Variable

نتایج تحلیل رگرسیون جنگل تصادفی

نتایج بهترین مدل رگرسیون جنگل تصادفی با در نظر گرفتن ۵۰۰ درخت (ntree) و ۹ متغیر در هر درخت (mtry) منجر به کمترین میزان خطا شد. نتایج اعتبارسنجی بر اساس نمونه‌های آزمون (اعتبارسنجی) در جدول ۴ ارائه شده است. شکل ۴، روند تغییرات میزان خطا بر اساس تعداد درخت را نشان می‌دهد.

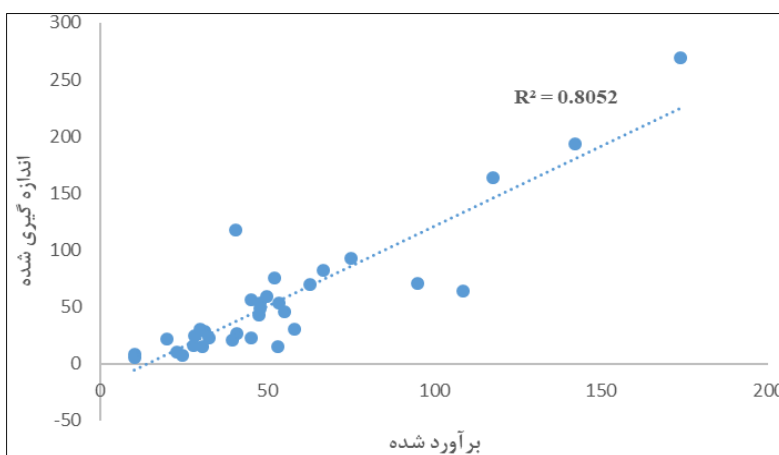


شکل ۴. روند تغییرات میزان خطا با افزایش تعداد درخت در مدل درخت تصادفی

جدول ۴. نتایج برآورد زیتوده روی زمینی جنگل با استفاده از رگرسیون جنگل تصادفی بر اساس نمونه‌های آموزشی و آزمون

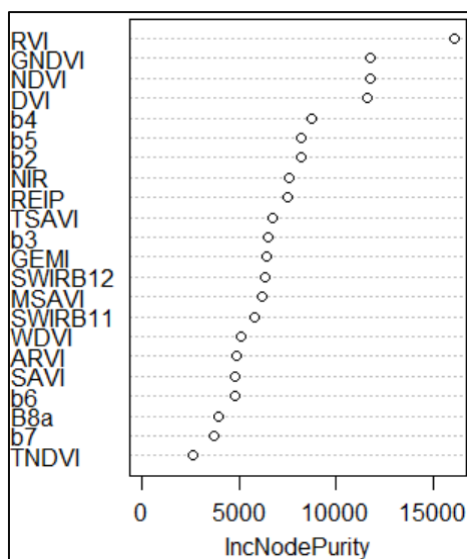
MAE (t/ha)	RMSE (t/ha)	R ²	
۱۳/۰۰	۱۹/۰۷	۰/۸۹	آموزش
۱۹/۰۲	۲۸/۷	۰/۸۰	آزمون

نتایج استفاده از روش جنگل تصادفی در برآورد زیتوده روی زمینی با میزان ضریب تعیین ۰/۸۰ و خطای ۲۸/۷ تن در هکتار نشان از عملکرد قابل قبول این روش نسبت دارد. نمودار مقادیر برآورد شده در مقابل مقادیر اندازه‌گیری شده بر اساس نمونه‌های آزمون در شکل ۵ ارائه شده است.



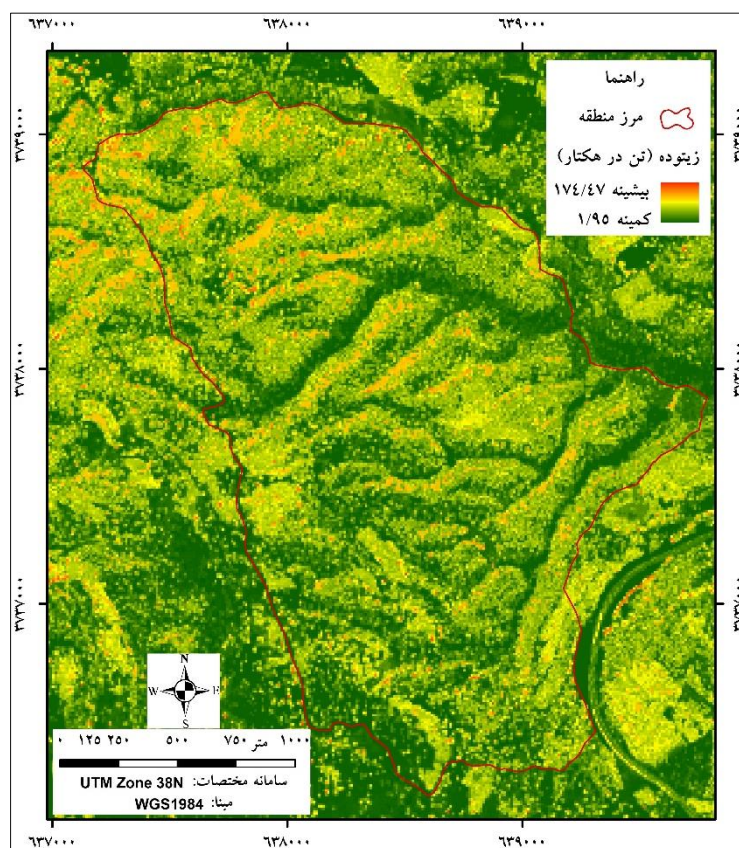
شکل ۵. نمودار مقادیر برآورد شده در مقابل مقادیر اندازه گیری شده داده های آزمون مدل

به منظور تعیین بااهمیت‌ترین متغیرها در فرایند پیش‌بینی از آماره IncNodePurity که بر اساس شاخص جینی محاسبه می‌شود، استفاده شد (شکل ۶). هر چه متغیر اهمیت بالاتری در پیش‌بینی داشته باشد، عدد بالاتری را بر اساس این شاخص به خود اختصاص می‌دهد. در این پژوهش شاخص‌های RVI، GNDVI، NDVI، DVI و اهمیت بیشتری در ارائه مدل برآورد زیتوده داشتند.



شکل ۶. میزان اهمیت متغیرهای مستقل بر اساس شاخص IncNodePurity

نقشه برآورد زیتوده روی زمینی برای منطقه مورد مطالعه با استفاده از روش جنگل تصادفی که در نرم‌افزار R تهیه شد، در شکل ۷ ارائه شده است.



شکل ۷. نقشه برآورد زیتوده روی زمینی جنگل مورد مطالعه با استفاده از روش رگرسیون جنگل تصادفی

بحث

در این پژوهش میانگین زیتوده روی زمینی در هر درخت بلوط (گونه برودار) در فرم‌های رویشی تک‌پایه و جست‌گروه به ترتیب ۶۵۷/۶ و ۲۳۱/۲ کیلوگرم بود که بیانگر سه برابر بودن متوسط زیتوده در تک‌پایه‌ها نسبت به جست‌گروه‌هاست. ایرانمنش (۱۳۹۳) متوسط زیتوده روی زمینی در جنگل‌های چهارمحال بختیاری برای هر پایه درختی برودار در دو فرم رویشی تک‌پایه و جست‌گروه را به ترتیب ۳۷۴/۱ و ۱۴۶/۳ کیلوگرم محاسبه کردند که نشان‌دهنده ۲/۵ برابر بودن متوسط زیتوده در فرم تک‌پایه نسبت به جست‌گروه‌هاست. صفری و همکاران (۱۳۹۹) در مطالعه‌ای میانگین زیتوده برای کل تک‌پایه و جست‌گروه‌های برودار در دو منطقه از جنگل‌های زاگرس در استان کرمانشاه (مناطق گهواره و سرفیروزآباد) که اغلب جنگل‌های تنکی دارد را به ترتیب ۲۰/۵ و ۱۲/۶ تن در هکتار ارائه داده‌اند. نتایج پژوهش‌ها تأییدکننده این مطلب است که با تغییر ساختار درختان از تک‌پایه به جست‌گروه میزان زیتوده کاهش می‌یابد.

نتایج تحلیل همبستگی زیتوده روی زمینی و باندهای اصلی سنتینل-۲ نشان می‌دهد که زیتوده با باندهای مرئی دارای همبستگی منفی است. اصولاً انتظار می‌رود که همبستگی بین برخی باندها همانند باند سبز و زیتوده مثبت باشد که این همبستگی منفی را می‌توان به دلایلی همانند محتوای رطوبتی، اثرات سلیه و گیاهان زیر آشکوب توجه کرد (میری و همکاران، ۱۳۹۶؛ مرادی و همکاران، ۱۳۹۷). همبستگی بین زیتوده روی زمینی جنگل با باندهای طول‌موج کوتاه و بلند مادون‌قرمز نزدیک (باند ۸a) مثبت است. مثبت بودن همبستگی نیز بدین معنی است که با افزایش زیتوده روی زمینی جنگل میزان بازتاب در باندهای طیفی موردنظر افزایش می‌یابد.

نتایج تحقیقات مرادی و همکاران، (۱۳۹۷)، میری و همکاران (۱۳۹۶) و Lu et al. (2005) در راستای نتیجه تحقیق حاضر می‌باشد. همچنین بررسی نتایج همبستگی نشان می‌دهد که از بین کلیه باندهای اصلی، باند ۴ (طول‌موج قرمز) با میزان همبستگی ۰/۴۰۲- بالاترین میزان همبستگی را با زیتوده روی زمینی جنگل دارد. دلیل این امر این است که در

محدوده طیف مرئی، گیاهان سبز به دلیل جذب کلروفیلی بالا در محدوده طول موج قرمز، میزان انعکاس بسیار پایینی در این طول موج دارند. این نتیجه با نتیجه میررجبی و همکاران (۱۳۹۵) و میری و همکاران (۱۳۹۶) مطابقت دارد. هرچند برخلاف انتظار همبستگی میان باند مادون قرمز نزدیک و زیتوده روی زمینی جنگل پایین بود؛ اما نتایج بررسی همبستگی بین زیتوده روی زمینی جنگل با شاخص‌های پوشش گیاهی حاصل از تصاویر ماهواره سنتینل-۲ نشان می‌دهد زیتوده با شاخص‌های NDVI، SAVI، ARVI، DVI، GEMI، GNDVI، MSAVI، RVI، TNDVI، WDVی دارای همبستگی متوسط و مثبت معنی‌داری در سطح اطمینان ۹۹ درصد ($P < 0.01$) است. نتایج حاضر با مطالعات میری (۱۳۹۶) همخوانی دارد. شاخص‌های SAVI و MSAVI از جمله شاخص‌های خط خاک هستند و معمولاً در مناطق جنگلی کم‌تراکم با کاهش اثرات خاک پس‌زمینه باعث بهبود نتایج می‌شوند (ساعدموچشی، ۱۳۹۶). از بین شاخص‌های مورد استفاده در پژوهش حاضر شاخص‌های پوشش گیاهی RVI و NDVI به ترتیب با میزان همبستگی ۰/۵۲۹ و ۰/۵۲۵ بالاترین میزان همبستگی را با زیتوده روی زمینی جنگل دارد. این شاخص‌ها از متداول‌ترین شاخص‌ها برای مطالعات پوشش گیاهی به شمار می‌روند (Pandey et al., 2019).

نتایج استفاده از روش جنگل تصادفی در برآورد زیتوده روی زمینی نشان از عملکرد قابل قبول این روش دارد. نتایج تعیین بااهمیت‌ترین متغیرها در فرایند پیش‌بینی بر اساس شاخص جینی نشان داد شاخص‌های RVI، GNDVI و NDVI در مقایسه با بقیه شاخص‌ها و باندها بالاترین اهمیت را در این برآورد دارند. شاخص RVI یکی از مهم‌ترین متغیرها در ساخت مدل است. زو و سو (۲۰۱۷) شاخص RVI را یکی از متداول‌ترین و پر استفاده‌ترین شاخص‌ها برای برآورد زیتوده گیاهان معرفی کرده‌اند (Xue & Su, 2017). GNDVI شاخصی از میزان سبزی‌نگی یا فعالیت فتوسنتزی گیاه است. این شاخص بر اساس طول موج‌های مادون قرمز نزدیک و سبز محاسبه می‌شود و به تغییرات محتوای کلروفیل گیاهان حساسیت بالایی دارد. دیوید و همکاران (۲۰۲۲) نیز در پژوهش خود به این نتیجه رسیدند که استفاده از شاخص GNDVI در برآورد زیتوده جنگل‌های با تراکم متوسط تا زیاد نسبت به شاخص NDVI عملکرد بهتری دارد (David et al., 2022).

جی و پیترز (۲۰۰۷) در بررسی میزان حساسیت شاخص‌های گیاهی به این نتیجه رسیدند که در برخی شرایط همانند زمانی که میزان شاخص سطح برگ زیاد باشد، میزان حساسیت RVI نسبت به تغییرات بیشتر است و اگر میزان شاخص سطح برگ کمتر باشد حساسیت شاخص GNDVI بیشتر است (Ji & Peters, 2007). به نظر می‌رسد در رابطه با میزان زیتوده نیز این نتایج صادق است. شاخص NDVI نیز که یک شاخص بسیار متداول در زمینه ارزیابی پوشش گیاهی است و حاصل نسبت‌گیری باندهای قرمز و مادون قرمز نزدیک است، به دلیل اینکه تحت تأثیر فعالیت فتوسنتزی گیاهان است، به‌عنوان یکی از مهم‌ترین شاخص‌های اثرگذار در برآورد میزان زیتوده به شمار می‌رود (Luz et al., 2022; Barboza et al., 2023).

نتایج به‌دست‌آمده در این پژوهش نشان‌دهنده عملکرد قابل قبول رگرسیون جنگل تصادفی در برآورد میزان زیتوده روی زمینی است. ریشه میانگین مربعات خطا بر اساس داده‌های آزمون مدل، ۲۸/۷ تن در هکتار به دست آمد. این نتیجه نسبت به نتایج سارویی و همکاران (۱۳۹۹) که با استفاده از تصاویر راداری سنتینل ۱ در منطقه‌ای دیگر از شهرستان ایلام و با استفاده از دو روش K نزدیک‌ترین همسایه و رگرسیون بردار پشتیبان به برآورد زیتوده روی زمینی جنگل پرداختند (ریشه میانگین مربعات خطای ۵۲ تن در هکتار)، دقت بالاتری ارائه کرد.

علل مختلفی برای عدم دستیابی به میزان خطای کمتر می‌توان ارائه داد. اولین دلیل می‌تواند کافی نبودن داده‌های زمینی و دقت پایین زیتوده اندازه‌گیری شده با استفاده از معادلات آلومتریک باشد. در این پژوهش همانند بسیاری از پژوهش‌های دیگر در زمینه بررسی برآورد زیتوده با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای، از زیتوده برآورد شده توسط معادلات آلومتریک به‌عنوان داده‌زمینی استفاده شده است (Li et al., 2022; Imran & Ahmed, 2018; Imran et al., 2020). هر چند معادلات ارائه شده توسط ایرانمنش (۱۳۹۳) بر اساس گونه‌های موجود در بخشی از جنگل‌های زاگرس ارائه شده است؛ اما دقیقاً مربوط به منطقه مورد مطالعه نیست و بخشی از خطا می‌تواند به این علت باشد. علت دیگر می‌تواند به دلیل تراکم کم تا متوسط جنگل‌های منطقه مورد مطالعه باشد که اختلاط طیفی پوشش خاک و پوشش گیاهی می‌تواند دقت کار را کاهش دهد.

عامل دیگر می‌تواند به دلیل وجود برخی شاخه‌های خشکیده به دلیل وجود آفات و بیماری در منطقه مورد مطالعه باشد که بر بازتاب طیفی پوشش گیاهی اثرگذار است. نتایج استفاده از این پژوهش نشان داد که با استفاده از مدل‌های ناپارامتریک می‌توان به نتایج قابل قبولی دست‌یافت (میرجی و همکاران، ۱۳۹۶). در روش رگرسیون جنگل تصادفی تعداد زیادی از مدل‌های تقریباً غیرهمبسته (درختان) پیش‌بینی را انجام می‌دهند که معمولاً عملکرد بهتری نسبت به مدل‌های منفرد دارند. مدل‌های غیرهمبسته می‌توانند پیش‌بینی‌های گروهی را تولید کنند که از هر پیش‌بینی فردی دقیق‌تر است (Breiman, 2001; Li et al., 2022; Zhang et al., 2018; David et al., 2022)

نتیجه‌گیری

در این پژوهش مدل‌سازی زیتوده روی زمینی جنگل با استفاده از مدل رگرسیون جنگل تصادفی انجام شد. به دلیل دسترسی آسان و رایگان و از سوی دیگر قدرت تفکیک مکانی متوسط و همچنین باندهای طیفی مناسب از تصاویر ماهواره‌ای سنتینل ۲ برای برآورد زیتوده استفاده شد. نتایج تحلیل همبستگی زیتوده با باندهای اصلی و شاخص‌های گیاهی نشان داد که از بین کلیه باندهای اصلی، طول موج قرمز بالاترین همبستگی (-۰/۴۰۲) را با زیتوده دارد. جذب کلروفیلی بالا گیاهان سبز در محدوده طول موج قرمز و در نتیجه میزان انعکاس بسیار پایین طول موج قرمز، دلیل این امر است. از بین شاخص‌های مورد استفاده در پژوهش شاخص‌های RVI و NDVI با ضریب همبستگی ۰/۵۲۹ و ۰/۵۲۵، بالاترین میزان همبستگی را با زیتوده روی زمینی جنگل دارند. باتوجه به نتایج تجزیه و تحلیل‌های مدل رگرسیونی جنگل تصادفی، شاخص‌های RVI، NDVI و GNDVI بالاترین تأثیر را در برآوردها داشتند. یکی از محدودیت‌های پژوهش حاضر عدم دستیابی به معادلات آلومتریک ویژه منطقه مورد مطالعه است که ممکن است بر نتایج پژوهش تأثیرگذار باشد. از آنجاکه امکان ارائه معادلات آلومتریک برآورد زیتوده به دلیل لزوم قطع درختان، برای هر منطقه به صورت مجزا امکان‌پذیر نیست، ناگزیر از استفاده از معادلات آلومتریک جنگل‌های مشابه هستیم.

نتایج برآورد زیتوده روی زمینی با استفاده از رگرسیون جنگل تصادفی با میزان $RMSE=28/70$ $R^2=0/80$ تن در هکتار نشان داد که استفاده از روش ناپارامتری مدل رگرسیونی جنگل تصادفی که شمار زیادی از مدل‌های غیرهمبسته (درخت) پیش‌بینی را انجام می‌دهد؛ تونایی قابل قبولی در برآورد زیتوده جنگل دارد. یافته‌های پژوهش حاضر برای مدیران مناطق جنگلی زاگرس، امکان برآورد زیتوده روی زمینی جنگل و فراهم آوردن زمینه استراتژی‌های مدیریت پایدار جنگل‌ها را فراهم می‌سازد. به منظور افزایش دقت نتایج، استفاده هم‌زمان از داده‌های نوری و راداری ماهواره سنتینل برای برآورد زیتوده پیشنهاد می‌شود (Chang & Shoshany, 2016).

منابع

- ایرمنش، یعقوب (۱۳۹۳). ارزیابی روش‌های برآورد زیتوده و ترسیب کربن گونه بلوط ایرانی (*Quercus brantii*) در جنگل‌های استان چهارمحال و بختیاری. رساله دکتری جنگلداری، دانشگاه تربیت مدرس.
- سارویی، سعید؛ درویش‌صفت، علی؛ نمیرانیان، منوچهر (۱۳۹۹). مدل‌سازی برآورد زیست‌توده چوبی روی زمینی جنگل‌های شاخه‌زاد بلوط زاگرس با استفاده از داده‌های راداری ماهواره سنتینل-۱. نشریه سنجش‌ازدور و GIS/ایران، ۱۲ (۴)، ۳۵-۵۲. doi: 10.52547/gisj.12.4.35
- ساعدموچشی، آرمان؛ پیر باوقار، مهتاب؛ شعبانیان، نقی؛ فاتحی، پرویز (۱۳۹۸). امکان برآورد تنوع گونه‌های چوبی با استفاده از تصاویر نوری ماهواره سنتینل (مطالعه موردی: جنگلهای مرپوان). جنگل و فرآورده‌های چوب، ۲ (۷۲)، ۱۰۱-۱۱۰. doi: 10.2059/jfwp.2019.271590.984
- شمس‌الدینی، علی؛ احمدی، وانکو (۱۳۹۹). تخمین مکانی - زمانی آلاینده‌های منواکسید کربن و دی‌اکسید نیتروژن شهر تهران مبتنی بر داده‌های حاصل از سنجش‌ازدور و داده‌های کمکی. جغرافیا و پایداری محیط، ۱۰ (۳)، ۱۰۷-۱۲۴. doi: 10.22126/ges.2020.4227.2057
- صفری، امیر؛ سهرابی، هرمز (۱۳۹۹). بهره‌گیری از رویکرد بوت‌استرپ برای مقایسه روش‌های مدل‌سازی آماری در برآورد سنجش از دور زیتوده روی زمینی جنگل‌های زاگرس. نشریه سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیای در منابع طبیعی، ۲، ۴۹-۶۷. doi: 10.22126/ges.2020.4227.2057

10.30495/GIRS.2020.674654

محمودی، هیوا؛ پیرباوقار، مهتاب؛ فاتحی، پرویز (۱۳۹۹). پهنه‌بندی خطر کاهش گستره جنگل با استفاده از فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی.

جغرافیا و پایداری محیط، ۱۰ (۳)، ۹۱-۱۰۶. doi: 10.22126/ges.2020.5799.2299

مرادی، فردین، درویش‌صفت، علی‌اصغر، نمیرانیان، منوچهر؛ رنود، قاسم (۱۳۹۷). قابلیت داده‌های سنجنده OLI ماهواره لندست ۸ در برآورد زی‌توده روی زمینی توده‌های ممرز (*Carpinus betulus*) در جنگل خیرود. تحقیقات جنگل و صنوبر ایران، ۲۶ (۳)،

۴۲۰-۴۰۶. doi: 10.22092/ijfpr.2018.117743

مرادی، گلاله، پیر باوقار، مهتاب، شاکری، زاهد؛ فاتحی، پرویز (۱۳۹۹). برآورد شاخص سطح برگ در جنگل‌های زاگرس با استفاده از سنجنش از دور (منطقه موردی: بخشی از جنگل‌های بانه). پژوهش و توسعه جنگل، ۶ (۴)، ۶۷۹-۶۹۳. doi: 10.0466/jfrd.2020.120986

میررجبی، حسین؛ اولادی، جعفر؛ متاجی، اسداله (۱۳۹۵). برآورد ذخیره کربن روی زمینی در جنگل کاری شهری با استفاده از داده‌های

ماهواره‌ای (منطقه موردی: پارک جنگلی چیتگر تهران). بوم‌شناسی جنگل‌های ایران، ۴ (۷)، ۳۵-۴۲. <https://ifej.sanru.ac.ir/article-1-223-fa.pdf>

میری، ناصح، درویش‌صفت، علی‌اصغر، ضرغام، نصرت‌اله؛ شاکری، زاهد، (۱۳۹۶). برآورد شاخص سطح برگ در جنگل‌های زاگرس با داده‌های ماهواره لندست ۸. جنگل ایران، ۹ (۱)، ۲۹-۴۲. [https://www.jf-isaforestry.ir/article_47046.html?](https://www.jf-isaforestry.ir/article_47046.html?lang=fa)

lang=fa

وفایی، ساسان، سوسنی، جواد، عادل، کامران، فدایی، هادی؛ نقوی، حامد، (۱۳۹۶). برآورد زیتوده روی زمینی درختان جنگل با استفاده از تصویرهای نوری و راداری (منطقه موردی: حوضه ناو اسالم گیلان). تحقیقات جنگل و صنوبر ایران، ۲۵ (۲)، ۳۲۰-۳۳۱. doi: 10.22092/ijfpr.2017.111776

10.22092/ijfpr.2017.111776

References

- Adão, T., Hruška, J., Pádua, L., Bessa, J., Peres, E., Morais, R., & Sousa, J.J. (2017). Hyperspectral Imaging: A Review on UAV-Based Sensors, data processing and applications for agriculture and forestry. *Remote Sens*, 9, 1110. doi: 10.3390/rs9111110
- Ahamed, T., Tian, L., Zhang, Y., & Ting, K. C. (2011). A review of remote sensing methods for biomass feedstock production. *Biomass and bioenergy*, 35(7), 2455-2469. doi: 10.1016/j.biombioe.2011.02.028
- Aschbacher, J., & Milagro-Pérez, M.P. (2012). The european earth monitoring (GMES) programme status and perspectives. *Remote Sensing of Environment*, 120, 3-8. doi: 10.1016/j.rse.2011.08.028
- Attarchi, S., & Gloaguen, R. (2014). Improving the estimation of above ground biomass using dual polarimetric PALSAR and ETM+ data in the Hyrcanian mountain forest (Iran). *Remote Sensing*, 6, 3693-3715. doi: 10.3390/rs6053693
- Bajwa, S., Zhang, Y., & Shirzadifar, A. (2018). Hyperspectral Image Data Mining. *Fundamentals, Sensor Systems, Spectral Libraries, and Data Mining for Vegetation*. CRC Press, 273-302. doi: 10.1201/9781315164151-10
- Barboza, T. O., Ardigueri, M., Souza, G. F., Ferraz, M. A., Gaudencio, J. R., & Santos, A. F. (2023). Performance of Vegetation Indices to Estimate Green Biomass Accumulation in Common Bean. *AgriEngineering*, 5, 2, 840-854. doi: 10.3390/agriengineering5020052
- Breiman, L. (2001). Random forests. *Machine Learning*, 45, 5-32. doi: 10.1023/A:1010933404324
- Buschmann, C. (1993). Fernerkundung von Pflanzen: Ausbreitung, Gesundheitszustand und Produktivität. *Naturwissenschaften*, 80 (10), 439-453. <https://link.springer.com/article/10.1007/BF01136034>
- Chang, J., & Shoshany, M. (2016). Mediterranean shrublands biomass estimation using Sentinel-1 and Sentinel-2. In *2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)* (pp. 5300-5303). IEEE.
- Chinembiri, T.S., Bronsveld, M.C., Rossiter, D.G., & Dube, T. (2013). The precision of C stock estimation in the Ludhikola watershed using model-based and design-based approaches. *Natural Resources Research*, 22, 297-309. doi: 10.1007/s11053-013-9216-6.
- David, R. M., Rosser, N. J., & Donoghue, D. N. M. (2022). Improving above ground biomass estimates of Southern Africa dryland forests by combining Sentinel-1 SAR and Sentinel-2

- multispectral imagery. *Remote Sensing of Environment*, 282, 113232. doi: 10.1016/j.rse.2022.113232.
- Gara, T. W., Murwira, A., Chivhenge, E., Dube, T., & Bangira, T. (2014). Estimating wood volume from canopy area in deciduous woodlands of Zimbabwe. *Southern Forests: A Journal of Forest Science*, 76(4), 237–244. doi: 10.2989/20702620.2014.965981
- Gómez, D., Salvador, P., Sanz, J., & Casanova, J.L. (2019). Potato Yield Prediction Using Machine Learning Techniques and Sentinel 2 Data. *Remote Sensing*, 11 (15), 1745. doi: 10.3390/rs11151745
- Güneralp, İ., Filippi, A. M., & Randall, J. (2014). Estimation of floodplain aboveground biomass using multispectral remote sensing and nonparametric modeling. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 33, 119–126. doi: 10.1016/j.jag.2014.05.004.
- Guyot, G., Baret, F., & Major, D. J. (1988). High spectral resolution: Determination of spectral shifts between the red and infrared. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 11, 750–760. https://www.isprs.org/proceedings/XXVII/congress/part7/750_XXVII-part7-sup.pdf
<https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-2/instrument-payload/resolution-and-swath>.
- Huete, A. R. (1988). A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote sensing of environment*, 25(3), 295-309. doi: 10.1016/0034-4257(88)90106-X
- Huete, A. R., Liu, H. Q., Batchily, K. V., & Van Leeuwen, W. J. D. A. (1997). A comparison of vegetation indices over a global set of TM images for EOS-MODIS. *Remote sensing of environment*, 59 (3), 440-451. doi: 10.1016/S0034-4257(96)00112-5
- Imran, A. B., & Ahmed, S. (2018). Potential of Landsat-8 spectral indices to estimate forest biomass. *International Journal of Human Capital in Urban Management*, 3(4), 303-314. doi: 10.22034/IJHCUM.2018.04.04
- Imran, A. B., Khan, K., Ali, N., Ahmad, N., Ali, A., & Shah, K. (2020). Narrow band based and broadband derived vegetation indices using Sentinel-2 Imagery to estimate vegetation biomass. *Global Journal of Environmental Science and Management*, 6(1), 97-108. doi: 10.22034/GJESM.2020.01.08.
- Iranmanesh, Y. (2014). *Assessment on biomass estimation methods and carbon sequestration of Quercus brantii Lindl. in Chaharmahal & Bakhtiari forests*. (PhD Thesis), Tarbiat Modares University (In Persian).
- Ji, L., & Peters, A.J. (2007). Performance evaluation of spectral vegetation indices using a statistical sensitivity function. *Remote Sensing of Environment*, 106 (1), 59–65. doi: 10.1016/j.rse.2006.07.010
- Kronstedt, K., Ballhorn, U., Böhm, V., & Siegert, F. (2012). Above ground biomass estimation across forest types at different degradation levels in Central Kalimantan using LiDAR data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 18, 37-48. doi: 10.1016/j.jag.2012.01.010
- Lu, D. (2005). Aboveground biomass estimation using Landsat TM data in the Brazilian Amazon. *International Journal of Remote Sensing*, 26(12), 2509–2525. doi: 10.1080/01431160500142145
- Lu, Dengsheng, Chen, Q., Wang, G., Liu, L., Li, G., & Moran, E. (2016). A survey of remote sensing-based aboveground biomass estimation methods in forest ecosystems. *International Journal of Digital Earth*, 9 (1), 63–105. doi: 10.1080/17538947.2014.990526
- Luz, L. R., Giongo, V., Santos, A. M. D., Lopes, R. J. D. C., & Júnior, C. D. L. (2022). Biomass and vegetation index by remote sensing in different caatinga forest areas. *Ciência Rural*, 52. doi: 10.1590/0103-8478cr20201104
- Mahmoudi, H., Pir Bavaghar, M., & Fatehi, P. (2020). Deforestation Risk Zoning Using Analytical Hierarchy Process. *Geography and Environmental Sustainability*, 10(3), 91-106. doi: 10.22126/ges.2020.5799.2299 (In Persian).
- Miri, N., Darvishsefet, A., Shakeri, Z., & Zargham, N. (2017). Estimation of leaf area index in Zagros forests using Landsat 8 data. *Iranian Journal of Forest*, 9(1), 29-42. https://www.jf-isaforestry.ir/article_47046.html?lang=fa (In Persian).

- Mirrajabi, H., Oladi, J., & Mataji, A. (2016). Estimating above Ground Carbon Storage in Urban Afforestation Using Satellite Data (Case Study: Chitgar Forest Park in Tehran). *Ecology of Iranian Forests*, 4 (7), 35-42. <https://ifej.sanru.ac.ir/article-1-223-fa.pdf> (In Persian).
- 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. doi: 10.22092/ijfpr.2018.117743 (In Persian)
- Moradi, G., Pir Bavaghar, M., Shakeri, Z., & Fatehi, P. (2020). Leaf area index estimation in the northern Zagros forests using remote sensing (Case study: a part of Baneh forests). *Forest Research and Development*, 6(4), 679-693. doi: 10.30466/jfrd.2020.120986 (In Persian).
- Mutanga, O., Adam, E., & 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. doi: 10.1016/j.jag.2012.03.012
- Nilsson, M., Folving, S., Kennedy, P., Puumalainen, J., Chirici, G., Corona, P., Marchetti, M., Olsson, H., Ricotta, C., Ringvall, A., Stahl, G., & Tomppo, E. (2004). Combining remote sensing and field data for deriving unbiased estimates of forest parameters over large regions. (eds) *Advances in Forest Inventory for Sustainable Forest Management and Biodiversity Monitoring. Forestry Sciences*, vol 76. Springer, Dordrecht. doi: 10.1007/978-94-017-0649-0_2 10.1007/978-94-017-0649-0_2.
- Pandey, P. C., Srivastava, P. K., Chetri, T., Choudhary, B. K., & Kumar, P. (2019). Forest biomass estimation using remote sensing and field inventory: a case study of Tripura, India. *Environmental Monitoring and Assessment*, 191(9), 593. doi: 10.1007/s10661-019-7730-7
- Pinty, B., & Verstraete, M. (1992). GEMI: A Non-Linear Index to monitor global vegetation from satellites. *Vegetation*, 101, 15-20. doi: 10.1007/BF00031911
- Powell, S. L., Cohen, W. B., Healey, S. P., Kennedy, R. E., Moisen, G. G., Pierce, K. B., & Ohmann, J. L. (2010). Quantification of live aboveground forest biomass dynamics with Landsat time-series and field inventory data: A comparison of empirical modeling approaches. *Remote Sensing of Environment*, 114(5), 1053-1068. doi: 10.1016/j.rse.2009.12.018
- 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. doi: 10.1016/0034-4257(94) 90134-1
- Ramoelo, A., Cho, M., Mathieu, R., & Skidmore, A. K. (2014). The potential of Sentinel-2 spectral configuration to assess rangeland quality. *Proc.SPIE*, 9239, 92390C. doi: 10.1117/12.2067315
- Ronoud, G., Fatehi, P., Darvishsefat, A. A., Tomppo, E., Praks, J., & Schaepman, M. E. (2021). Multi-sensor aboveground biomass estimation in the broadleaved Hyrcanian forest of Iran. *Canadian journal of remote sensing*, 47 (6), 818-834. doi: 10.1080/07038992.2021.1968811
- Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A., & Deering, D. W. (1974). Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. *NASA Spec. Publ*, 351 (1), 309. <https://ntrs.nasa.gov/citations/19740022614>
- Ruiz-Peinado, R., Montero, G., & Del Rio, M. (2012). Biomass models to estimate carbon stocks for hardwood tree species. *Forest Systems*, 21(1), 42-52. doi: <http://dx.doi.org/10.5424/fs/2112211-02193>
- Saed Mocheshei, A., Pir Bavaghar, M., Shabaniyan, N., & Fatehi, P. (2019). Possibility of estimating the woody species diversity using Sentinel optical imagery (Case study: Marivan forests). *Forest and Wood Products*, 72(2), 101-110. doi: 10.22059/jfwp.2019.271590.984 (In Persian).
- Safari, A., & Sohrabi, H. (2020). Using the bootstrap approach for comparing statistical modeling methods to estimate remotely-sensed aboveground biomass in Zagros forests. *RS & GIS for natural resources*, 11 (2), 49-67 (In Persian).
- Saroei, S., Darvishsefat, A. A., & Namiranian, M. (2021). Modeling the Above-Ground Biomass Estimation in Zagros Oak Coppice Forests Using Radar Data of Sentinel-1 Satellite. *Iranian Journal of Remote Sensing & GIS*, 12 (4), 35-52. doi: 10.52547/gisj.12.4.35 (In Persian).
- Shamsoddini, A., & Ahmadi, W. (2020). Spatio – Temporal Estimation of Carbon Monoxide and Nitrogen Dioxide based on Remote Sensing Data and Ancillary Data in Tehran. *Geography*

- and *Environmental Sustainability*, 10(3), 107-124. doi: 10.22126/ges.2020.4227.2057 (In Persian).
- Singh, C., Karan, S. K., Sardar, P., & Samadder, S. R. (2022). Remote sensing-based biomass estimation of dry deciduous tropical forest using machine learning and ensemble analysis. *Journal of Environmental Management*, 308, 114639. doi:10.1016/j.jenvman.2022.114639
- Tucker, C. J. (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote sensing of Environment*, 8(2), 127-150. doi: 10.1016/0034-4257(79)90013-0
- 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 Journal of Forest and Poplar Research*, 25(2), 320-331. doi: 10.22092/ijfpr.2017.111776 (In Persian).
- Xue, J., & Su, B. (2017). Significant Remote Sensing Vegetation Indices: A Review of Developments and Applications. *Journal of Sensors*, 2017, 1353691. doi: 10.1155/2017/1353691.
- Zhang, C., Denka, S., Cooper, H., & Mishra, D. R. (2018). Quantification of sawgrass marsh aboveground biomass in the coastal Everglades using object-based ensemble analysis and Landsat data. *Remote Sensing of Environment*, 204, 366-379. doi: 10.1016/j.rse.2017.10.018.
- Zhang, Y., & Wang, R. (2022). Estimation of aboveground biomass of vegetation based on landsat 8 OLI images. *Heliyon*, 8(11), e11099. doi: 10.1016/j.heliyon.2022.e11099.