



University of Tehran

## Accuracy investigation of forest canopy height estimation by ICESat-2 satellite in Kheyroud forest

Mahan Ghorbani<sup>1</sup> | Ali Asghar Darvish Sefat<sup>2</sup> | Manochehr Namiranian<sup>3</sup>  
Manizheh Rajabpour Rahmati<sup>4</sup>

1. Department of Forestry and Forest Economics, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.

Email: [mahan\\_ghorbani@ut.ac.ir](mailto:mahan_ghorbani@ut.ac.ir)

2. Corresponding Author, Department of Forestry and Forest Economics, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.

Email: [adarvish@ut.ac.ir](mailto:adarvish@ut.ac.ir)

3. Department of Forestry and Forest Economics, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.

Email: [mnamiri@ut.ac.ir](mailto:mnamiri@ut.ac.ir)

4. CIRAD, CNRS, INRAE, TETIS, University of Montpellier, AgroParisTech, CEDEX 5, 34093 Montpellier, France.

Email: [manizheh.rajab-pourrahmati@inrae.fr](mailto:manizheh.rajab-pourrahmati@inrae.fr)

---

---

### ARTICLE INFO

### ABSTRACT

#### Article type:

Research Article

#### Article History:

Received: 02 December 2023

Revised: 22 January 2024

Accepted: 27 April 2024

Published online: 04 June 2024

#### Keywords:

*ATLAS sensor,*  
*Forest canopy height,*  
*ICESat-2,*  
*Space-borne LiDAR.*

Knowing the forest canopy height is essential for evaluating the health and dynamics of forest ecosystems, as well as for monitoring and modeling the carbon cycle and biodiversity. However, measuring canopy height through ground surveys is costly and time-consuming. Since 2018, the ICESat-2 satellite, equipped with the ATLAS laser sensor, has enabled the direct measurement of tree height. Although ICESat-2 is specifically designed to estimate ice height, it also provides significant data on vegetation height on the Earth's surface. This study aims to investigate the ability of the ATLAS sensor to accurately estimate forest canopy height in northern Iran. For this purpose, the vegetation height data from the ATLAS sensor (ATL08) was evaluated in the Kheyroud experimental forest. To validate the accuracy of the estimated forest canopy height by ATLAS, the forest height data obtained from the satellite were compared with the maximum tree height measured in 121 plots collocated with LiDAR footprints. The estimated forest canopy height by ATLAS and the maximum measured height of trees were compared using a t-test. The RMSE, rRMSE, and  $R^2$  values were 0.87 m, 2.7%, and 0.98, respectively, indicating the high accuracy of the ATLAS sensor in forest canopy height estimation. The results of the t-test showed that the mean difference between the measured maximum height of trees in the plots and the corresponding values extracted from ICESat-2 satellite data is not statistically significant ( $P > 0.05$ ). This study demonstrates that the satellite estimates forest canopy height with very good accuracy in the forests of northern Iran, with a slight overestimation in areas with low-height trees.

---

**Cite this article:** Ghorbani, M., Darvish Sefat, A.A., Namiranian, M., Rajabpour Rahmati, M. (2024). Accuracy investigation of forest canopy height estimation by ICESat-2 satellite in Kheyroud forest. *Journal of Forest and Wood Products*, 77 (1), 85-96.  
DOI: <http://doi.org/10.22059/jfwpp.2024.368338.1269>



© The Author(s) **Publisher:** The University of Tehran Press.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jfwpp.2024.368338.1269>

---



دانشگاه تهران

## نشریه جنگل و فرآورده‌های چوب

شاپا الکترونیکی: ۰۵۳۰-۲۳۸۳

سایت نشریه: <https://jfwpp.ut.ac.ir>

# بررسی صحت برآورد ارتفاع تاج پوشش جنگل توسط ماهواره ICESat-2 در جنگل خیرود

ماهان قربانی<sup>۱</sup> | علی اصغر درویش صفت<sup>۲\*</sup> | منوچهر نمیرانیان<sup>۳</sup> | منیژه رجب پور رحمتی<sup>۴</sup>

۱. گروه جنگلداری و اقتصاد جنگل، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: [mahan\\_ghorbani@ut.ac.ir](mailto:mahan_ghorbani@ut.ac.ir)
۲. نویسنده مسئول، گروه جنگلداری و اقتصاد جنگل، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: [adarvish@ut.ac.ir](mailto:adarvish@ut.ac.ir)
۳. گروه جنگلداری و اقتصاد جنگل، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: [mnamiri@ut.ac.ir](mailto:mnamiri@ut.ac.ir)
۴. مرکز سنجش از دور موسسه ملی تحقیقات کشاورزی، غذا و محیط زیست، موتیپلیه، فرانسه. رایانامه: [manizheh.rajab-pourrahmati@inrae.fr](mailto:manizheh.rajab-pourrahmati@inrae.fr)

### چکیده

### اطلاعات مقاله

آگاهی از ارتفاع تاج پوشش جنگل به منظور ارزیابی سلامت و پویایی بومسازگان جنگل، پایش و مدل سازی چرخه کربن و تنوع زیستی، امری ضروری است. اندازه گیری ارتفاع تاج پوشش جنگل مستلزم صرف هزینه و زمان زیاد است. از سال ۲۰۱۸ میلادی، ماهواره ICESat-2 که سنجنده لیزری ATLAS را حمل می کند، امکان اندازه گیری مستقیم ارتفاع درختان را فراهم کرده است. هرچند که ICESat-2 به طور خاص برای برآورد ارتفاع یخ های قطبی طراحی شده است، اما داده های ارتفاعی قابل توجهی از پوشش گیاهی سطح کره زمین را نیز ارائه می دهد. از این رو، هدف از این پژوهش بررسی قابلیت سنجنده ATLAS این ماهواره در برآورد دقیق ارتفاع تاج پوشش جنگل های شمال ایران است. برای این منظور، داده های ارتفاعی پوشش گیاهی سنجنده ATLAS (ATL08) در جنگل آموزشی-پژوهشی خیرود مورد ارزیابی قرار گرفت. برای بررسی میزان صحت برآورد شده تاج پوشش درختان توسط سنجنده ATLAS، داده های ارتفاعی حاصل از ماهواره با حداکثر ارتفاع اندازه گیری شده در ۱۲۱ لکه زمینی مقایسه و آماره های RMSE و rRMSE محاسبه شدند. همچنین با استفاده از آزمون t میانگین این داده ها از نظر آماری مقایسه شدند. مقادیر RMSE، rRMSE و  $R^2$  به ترتیب ۰/۸۷ متر و ۲/۷ درصد و ۰/۹۸ نشان دهنده دقت بالای سنجنده در اندازه گیری ارتفاع تاج پوشش جنگل بود. نتایج آزمون t نیز نشان داد که میانگین این داده ها از نظر آماری اختلاف معنی داری ندارد ( $P > 0/05$ ). نتایج این پژوهش نشان داد که حتی با وجود بیش برآورد ارتفاع تاج پوشش جنگل در مناطقی با درختان کم ارتفاع، این ماهواره ارتفاع تاج پوشش جنگل در مناطق جنگلی شمال ایران را با صحت بسیار خوبی برآورد می کند.

#### نوع مقاله:

پژوهشی

#### تاریخ های مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۹/۱۱

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۱۱/۰۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۲/۰۸

تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۰۳/۱۵

#### کلیدواژه:

ارتفاع تاج پوشش جنگل،

سنجنده ATLAS

لا پیدار فضایی،

ICESat-2

استناد: قربانی، ماهان؛ درویش صفت، علی اصغر؛ نمیرانیان، منوچهر؛ رجب پور رحمتی، منیژه (۱۴۰۳). بررسی صحت برآورد ارتفاع تاج پوشش جنگل توسط ماهواره ICESat-2 در

جنگل خیرود. نشریه جنگل و فرآورده های چوب، ۷۷ (۱)، ۹۶-۸۵. DOI: <http://doi.org/10.22059/jfwpp.2024.368338.1269>

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

© نویسندگان.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jfwpp.2024.368338.1269>



## ۱. مقدمه

ارتفاع درختان از جمله مشخصه‌های مهم و کلیدی جنگل است و در محاسبه دیگر متغیرهای کمی جنگل از جمله، حجم، ضریب شکل، جدول محصول و حاصلخیزی رویشگاه کاربرد دارد [۱]. همچنین اطلاع از ارتفاع تاج پوشش به منظور ارزیابی سلامت و پویایی بوم‌سازگان جنگل، پایش و مدل‌سازی چرخه کربن و تنوع زیستی امری ضروری است [۲، ۳]. اندازه‌گیری ارتفاع درختان جنگل به‌ویژه در سطوح وسیع، نیازمند زمان و هزینه فراوانی است. با توسعه روش‌های نوین سنجش از دور رقومی مانند عکس‌های هوایی رقومی، تصاویر ماهواره‌ای و لایدار هوایی و فضایی، تحول شگرفی در زمینه اندازه‌گیری مشخصه‌های کمی جنگل به‌ویژه ارتفاع درختان حاصل شد [۴، ۵، ۶].

یکی از جدیدترین فناوری‌های برداشت اطلاعات ارتفاعی در سنجش از دور، سامانه‌های فعال لایدار (Light Detection and Ranging=LiDAR) است که امکان اندازه‌گیری مستقیم ارتفاع را فراهم می‌کند [۷]. دستاوردهای سامانه‌های لایدار هوایی در پایش اطلاعات پوشش گیاهی و همچنین نیاز به مشاهدات جهانی در این زمینه، منجر به توسعه اجرای مأموریت سامانه فعال لایدار فضایی ICESat (Ice, Cloud, and land Elevation Satellite) شد [۸-۱۰]. اولین ماهواره خورشید آهنگ ICESat شامل سنجنده<sup>۱</sup> GLAS در سال ۲۰۰۳ توسط ناسا به فضا پرتاب شد و برای اندازه‌گیری و پایش تغییرات لایه‌های یخ، توپوگرافی زمین، ارتفاع امواج سطح اقیانوس‌ها و ارتفاع پوشش گیاهی تا سال ۲۰۰۹ فعال بود [۷]. ماهواره ICESat-2 که سنجنده<sup>۲</sup> ATLAS را حمل می‌کند، در سال ۲۰۱۸ به فضا پرتاب شد. این سنجنده نیز یک ارتفاع‌سنج لیزری با ابعاد لکه زمینی<sup>۳</sup> بسیار کوچک‌تر نسبت به سنجنده<sup>۱</sup> GLAS (به قطر حدود ۱۷ متر در مقابل ۷۰ متر در ICESat) است [۱۱]. این سنجنده می‌تواند ابزاری قدرتمند در برآورد ارتفاع تاج پوشش درختان و ساختار عمودی جنگل باشد. با توجه به نو بودن سامانه‌های لایدار به‌ویژه لایدار فضایی، تاکنون تحقیقات محدودی در رابطه با استفاده از این سامانه‌ها در برآورد مشخصه‌های مختلف جنگل در ایران انجام شده است. از جمله می‌توان به تحقیق Khorrami و همکاران (۲۰۱۴) در برآورد ارتفاع پایه‌های درختی پلت و ممرز با استفاده از داده‌های لایدار هوایی اشاره کرد که یکی از پیشگامان استفاده از این سامانه‌ها در جنگل‌های ایران بود [۴]. Rajab Pourrahmati و همکاران (۲۰۱۵) نیز به برآورد ارتفاع تاج پوشش جنگل در مناطق کوهستانی با استفاده از داده‌های ماهواره ICESat پرداختند [۱۲]. Fayad و همکاران (۲۰۱۴) از دو روش رگرسیون خطی چندگانه و رندوم‌فارست برای برآورد حداکثر ارتفاع تاج پوشش با استفاده از داده‌های ماهواره ICESat در جنگل‌های استوایی و انبوه French Guiana استفاده کردند [۱۳]. Lefsky و همکاران (۲۰۰۷) ارتفاع تاج پوشش را براساس سنجه‌های حاصل از شکل موج (waveform) سنجنده<sup>۱</sup> GLAS در توده‌های سوزنی‌برگ، پهن‌برگ و توده‌های آمیخته مناطق معتدله آمریکای شمالی و جنگل‌های پهن‌برگ همیشه سبز استوایی در برزیل برآورد کردند [۱۴]. Wang و همکاران (۲۰۱۹)، قابلیت داده‌های ICESat-2 را برای برآورد ارتفاع پدیده‌های سطح زمین در مقایسه با داده‌های لایدار هوایی ارزیابی کردند [۱۵]. در این مطالعه، نقش عوامل مختلفی مانند نسبت سیگنال به نویز (SNR<sup>۴</sup>)، شیب، ارتفاع و نوع پوشش گیاهی در تعیین دقت برآورد ارتفاع سطح زمین در سه منطقه جنگلی، توندرا و بدون پوشش گیاهی در ایالت آلاسکا مورد بررسی قرار گرفت. مدل رقومی زمین (DTM<sup>۵</sup>) و مدل ارتفاع پوشش گیاهی (CHM<sup>۶</sup>) با استفاده از ابرنقاط فوتون‌های بازگشتی سامانه لایدار هوایی به‌عنوان واقعیت زمینی تهیه شدند. از مقایسه داده‌های حاصل از ICESat-2 با واقعیت زمینی، عوامل خطا و میزان آن تعیین و شیب زمین به‌عنوان مهمترین عامل ایجاد خطا معرفی شد. نتایج این مطالعه نشان داد که با افزایش شیب، به‌ویژه بیشتر از ۲۰ درجه، میزان خطا در برآورد ارتفاع به‌شدت افزایش می‌یابد. همچنین در مناطق جنگلی و توندرا، خطای برآورد ارتفاع زمین نیز با افزایش ارتفاع و تراکم پوشش گیاهی افزایش می‌یابد. Lin و همکاران (۲۰۲۰) با ترکیبی از داده‌های ICESat-2، تصاویر نوری استریو ماهواره چینی Ziyuan3 (ZY-3) و داده‌های ماهواره Landsat-8، نقشه پیوسته ارتفاع تاج پوشش جنگل را در

<sup>1</sup> Geoscience Laser Altimetry System (GLAS)

<sup>2</sup> Advanced Topographic Laser Altimeter System (ATLAS)

<sup>3</sup> Footprint

<sup>4</sup> Signal to Noise Ratio

<sup>5</sup> Digital Terrain Model

<sup>6</sup> Canopy Height Model

منطقه‌ای در کشور چین تهیه کردند [۱۶]. ابتدا مدل رقومی ارتفاع زمین (DEM<sup>۱</sup>) با اندازه سلول ۳۰ در ۳۰ متر با استفاده از فوتون‌های بازگشتی داده‌های ماهواره ICESat-2 در محل لکه‌های زمینی این ماهواره تهیه شد. سپس مدل رقومی سطح زمین (DSM<sup>۲</sup>) با استفاده از تصاویر نوری استریو ماهواره ZY-3 با ابعاد پیکسل ۳۰ در ۳۰ متر در محل همان لکه‌های زمینی تهیه شد. به‌منظور اعتبارسنجی مدل DSM تهیه شده، از داده‌های (GEDI<sup>۳</sup>) با اندازه لکه زمینی ۲۵ متر استفاده شد. در ادامه از تفاضل دو مدل DEM و DSM در محل لکه‌های زمینی، مدل ارتفاع تاج‌پوشش (CHM<sup>۴</sup>) به‌دست آمد. در پایان، نقشه پیوسته ارتفاع تاج‌پوشش به کمک شبکه عصبی مصنوعی و استفاده از مدل CHM و شاخص‌های گیاهی Landsat-8 تهیه گردید. نتایج ارزیابی صحت این نقشه با استفاده از نمونه‌برداری زمینی نشان داد که از این رویکرد می‌توان برای تهیه نقشه ارتفاع تاج‌پوشش جنگل استفاده کرد. Wang Li و همکاران (۲۰۲۰) برای بررسی امکان تهیه نقشه پیوسته ارتفاع تاج‌پوشش جنگل، با استفاده از داده‌های ماهواره‌های ICESat-2، Sentinel-1&2 و Landsat-8 و الگوریتم‌های یادگیری ماشین در منطقه کوهستانی شرق چین اقدام به مدل‌سازی رابطه ارتفاع تاج‌پوشش جنگل و شاخص‌های گیاهی کردند [۱۷]. در نهایت با بکارگیری الگوریتم رندوم‌فارست، نقشه پیوسته ارتفاع تاج‌پوشش جنگل را ارائه دادند. بررسی نتایج حاصل از مدل، دقت بالایی را در برآورد ارتفاع تاج‌پوشش با این رویکرد نشان داد. Zhang و همکاران (۲۰۲۱) با هدف برآورد شاخص سطح برگ، از داده‌های ماهواره ICESat-2 و الگوریتم شمارش فوتون‌های لیزری در جنگل‌های بارانی آمازون و جنگل کوه‌های داکسینگان (چین) استفاده کردند [۱۸]. برای این منظور ابتدا به کمک الگوریتم‌های رفع نویز، فوتون‌های خالص بازگشتی را از داده‌های اولیه سنجنده ATLAS استخراج کردند. در ادامه با استفاده از الگوریتم‌های طبقه‌بندی داده‌های لیزری، فوتون‌های بازگشتی سطح زمین را از فوتون‌های بازگشتی تاج‌پوشش درختان تفکیک کردند. سپس با استفاده از مدل ارائه شده Tang و همکاران (۲۰۱۲) شاخص سطح برگ را برآورد کردند. به‌منظور اعتبارسنجی نتایج، از محصول شاخص سطح برگ ماهواره MODIS و شاخص سطح برگ برآورد شده از ماهواره Sentinel-2 استفاده کردند [۱۹]. نتایج نشان داد که شاخص سطح برگ برآورد شده از داده‌های ماهواره ICESat-2 با مقدار RMSE برابر با ۲/۴۳۳ به‌دست آمده قابل اعتماد است. Rajab Pourrahmati و همکاران (۲۰۲۳) تأثیر نوع جنگل در دقت برآورد ارتفاع جنگل توسط داده‌های GEDI را بررسی کردند [۲۰]. GEDI در حال حاضر، تنها سامانه لایدار فضایی است که با اندازه لکه زمینی حدود ۲۵ متر، فقط برای بررسی ساختار عمودی پوشش گیاهی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این تحقیق، میزان دقت برآورد ارتفاع جنگل توسط GEDI تحت عواملی چون نوع پرتو سنجنده، میزان حساسیت پرتو (حداکثر درصد تاج‌پوشش که پرتو GEDI قادر به نفوذ در آن است)، زمان برداشت داده، همچنین شاخص‌های استخراج شده از این سنجنده مانند شاخص سطح گیاه (PAI<sup>۵</sup>) و مقدار تاج‌پوشش<sup>۶</sup>، در سه نوع جنگل پهن‌برگ، سوزنی‌برگ و آمیخته مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج نشان داد که GEDI ارتفاع تاج‌پوشش در جنگل سوزنی‌برگ را (متر ۶/۶۱ = جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)) نسبت به جنگل پهن‌برگ (متر ۸/۳۰ = RMSE) و آمیخته (متر ۷/۹۴ = RMSE)، دقیق‌تر برآورد می‌کند.

در مواردی که داده‌های دورسنجی با مشخصه‌های اندازه‌گیری شده زمینی همبستگی خوبی داشته باشند، می‌توانند نقش مهمی در پایش جنگل داشته باشند. از این‌رو و با توجه به جدید بودن فناوری لایدار فضایی، نوع و نحوه ارائه داده‌های ارتفاعی ماهواره ICESat-2، ابعاد و فراوانی لکه‌های زمینی سنجنده این ماهواره نسبت به قبل و همچنین نوپا بودن کاربرد فناوری سامانه‌های لایدار فضایی در ایران، لازم است قابلیت سنجنده ATLAS این ماهواره در برآورد دقیق ارتفاع تاج‌پوشش جنگل‌های شمال ایران مورد ارزیابی قرار گیرد.

<sup>1</sup> Digital Elevation Model

<sup>2</sup> Digital Surface Model

<sup>3</sup> Global Ecosystem Dynamics Investigation

<sup>4</sup> Canopy Height Model

<sup>5</sup> Plant Area Index

<sup>6</sup> Canopy cover

<sup>7</sup> Root Mean Squared Error

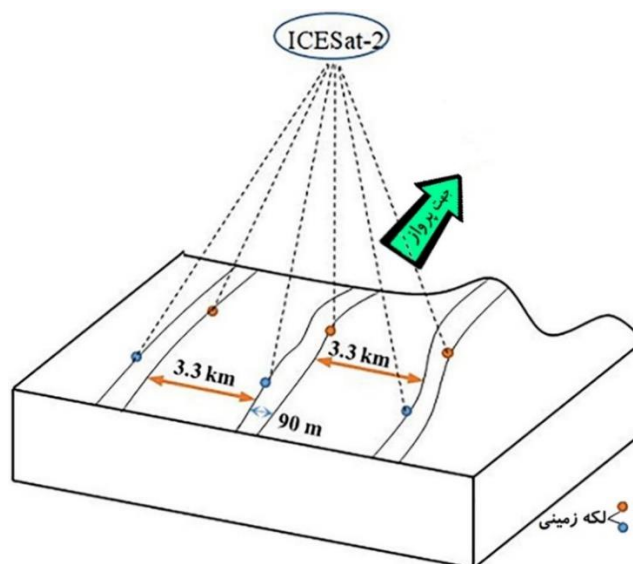
## ۰۲. روش‌شناسی پژوهش

### ۲-۱. منطق مورد مطالعه

منطقه پژوهش، بخش‌هایی از جنگل آموزشی-پژوهشی خیرود واقع در شرق شهرستان نوشهر در استان مازندران است. مساحت کل جنگل حدود ۸۰۰۰ هکتار است که بین ۵۱ درجه و ۳۳ دقیقه تا ۵۱ درجه و ۴۲ دقیقه طول شرقی و ۳۶ درجه و ۲۸ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۳۷ دقیقه عرض شمالی قرار دارد. ایجاد اقلیم‌های خرد و محلی ناشی از پستی بلندی‌های زیاد باعث تنوع گونه‌های درختی در منطقه شده است. مهم‌ترین جوامع جنگلی در این جنگل شامل: راشستان (Fagetum-Hyrcanum)، بلوط-ممرزستان (Querceto-Carpinetum)، راش-ممرزستان (Fageto-Carpinetum) و راشستان مخلوط (Fagetum Mix) می‌باشد [۲۱-۲۳]. گونه غالب این منطقه راش است و گونه‌های ممرز، توسکا، بلوط و افرا نیز به‌همراه آن مشاهده می‌شود. این جنگل پهن‌برگ دارای ساختار دانه‌زاد ناهمسال نامنظم است. براساس طرح‌های بهره‌برداری موجود، برای این جنگل متوسط ارتفاع توده حدود ۳۰ متر است و از نظر انبوهی تاج‌پوشش، این منطقه با داشتن درصد تاج‌پوشش بالای ۷۵ درصد، به‌عنوان جنگل بسیار انبوه شناخته می‌شود [۲۱-۲۳]. قطعات نمونه تحقیق حاضر در ۹ پروفیل شمالی جنوبی در دامنه ارتفاعی ۹۰۰ تا ۲۲۰۰ متر از سطح دریا در چهار بخش نمخانه، گرازبن، چلیبر و بهاربن قرار دارند (شکل ۲).

### ۲-۲. داده‌های سنجنده ATLAS ماهواره ICESat-2

سنجنده ATLAS ماهواره ICESat-2 یک ارتفاع‌سنج لیزری با ابعاد لکه زمینی (footprint) بسیار کوچک‌تر نسبت به سنجنده GLAS (ماهواره ICESat) و به قطر حدود ۱۷ متر است [۱۶]. این سنجنده در مقایسه با سنجنده GLAS، تعداد لکه‌های زمینی بیشتری را نیز برداشت می‌کند. سنجنده به‌طور مستمر پرتوهای لیزری با طول موج ۵۳۲ نانومتر را در سه دسته دوتایی به‌سمت زمین ارسال (۱۰ هزار پرتو در ثانیه) و انرژی بازگشتی آن‌ها را ثبت می‌کند. عملاً در هر دور گردش ماهواره به‌دور کره زمین، سطح زمین در سه نوار دوتایی به فاصله ۳/۳ کیلومتر از هم برداشت می‌شود (شکل ۱).



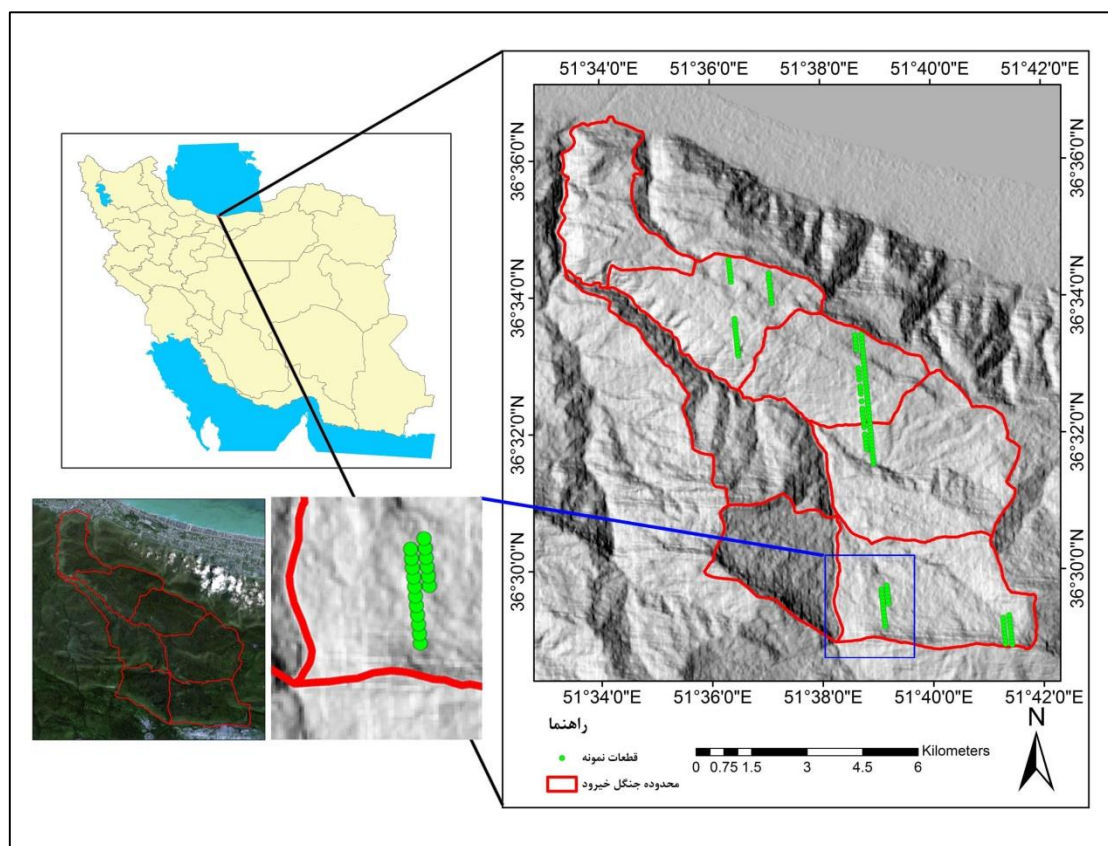
شکل ۱. چگونگی برداشت داده توسط ماهواره ICESat-2

فاصله بین دو پرتو در هر نوار در عرض برداشت، ۹۰ متر است. فاصله بین لکه‌های زمینی در طول مسیر برداشت ۷۰ متر (در مقایسه با ICESat که ۱۷۰ متر بود) و کم و بیش منجر به برداشت پیوسته ارتفاع توسط سنجنده ATLAS شده است. با محاسبه دقیق مدت زمان رفت و برگشت فوتون‌های لیزر براساس سرعت نور، می‌توان ارتفاع ناهمواری‌های سطح زمین و پوشش گیاهی را محاسبه کرد. از پردازش فوتون‌های بازگشتی به سنجنده، اطلاعات و محصولات متنوعی برای بررسی و سنجش عوارض

سطح زمین در اختیار کاربران قرار می‌گیرد. محصول ATLO8 سنجنده ATLAS حاوی داده‌های ارتفاعی پوشش گیاهی و ATL03 حاوی مختصات لکه‌های زمینی هستند که در مطالعات علوم جنگل کاربرد دارند [۲۴-۲۵]. در این پژوهش، از داده Hcanopy موجود در محصول ATLO8 سنجنده ATLAS مربوط به ماه آگوست سال ۲۰۲۰ میلادی استفاده شد. Hcanopy بیانگر ارتفاع تاج‌پوشش درختان در محل لکه زمینی است که توسط ۹۸ درصد فوتون‌های بازگشتی برآورد می‌شود. این ارتفاع از تفاضل ارتفاع سطح بالایی پوشش گیاهی از ارتفاع برآوردشده سطح زمین توسط همین سنجنده، محاسبه می‌شود [۲۶].

## ۲-۳. آمار برداری زمینی

عملیات میدانی برداشت داده‌ها در بخش‌های نمخانه، گرازبن، چلیبر و بهاربن جنگل خیرود در تابستان ۱۴۰۰ انجام شد. برای این منظور، ابتدا مختصات مراکز لکه‌های زمینی از داده ماهواره‌ای استخراج و بر روی نقشه توپوگرافی ثبت شد. سپس این مراکز با استفاده از GPS (Garmin Map 64s) در جنگل شناسایی و پیاده‌سازی شدند. شیب کلی، ارتفاع و قطر تمام درختان موجود در قطعات نمونه دایره‌ای به مرکزیت مراکز فوق و به قطر ۱۷ متر (هم‌اندازه با لکه‌های زمینی سنجنده ATLAS) اندازه‌گیری شدند. تعداد ۱۲۱ قطعه نمونه در منطقه برداشت شد (شکل ۲). انتخاب و برداشت قطعات نمونه به گونه‌ای بود که تمام کلاسه‌های ارتفاعی منطقه را در برگیرند.



شکل ۲. نقشه پستی و بلندی منطقه و پراکنش قطعات نمونه در محدوده جنگل خیرود و موقعیت آن در ایران

## ۲-۴. روش تحقیق

در این پژوهش، برای بررسی میزان صحت ارتفاع برآورد شده تاج‌پوشش درختان توسط سنجنده ATLAS، داده‌های ارتفاعی حاصل از ماهواره با حداکثر ارتفاع اندازه‌گیری شده در هر یک از قطعات نمونه (لکه زمینی) مقایسه و آماره‌های RMSE و

rRMSE (جذر میانگین مربعات خطای نسبی) محاسبه (رابطه‌های ۱ و ۲) [۲۷] و سپس با استفاده از آزمون  $t$  میانگین داده‌ها از نظر آماری مقایسه شدند.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (m_i - e_i)^2} \quad \text{رابطه ۱}$$

$$rRMSE = \frac{RMSE}{\bar{m}} \times 100 \quad \text{رابطه ۲}$$

در روابط فوق،  $N$ : تعداد کل نمونه‌ها،  $m$  و  $e$  به ترتیب حداکثر ارتفاع اندازه‌گیری شده درختان در هر قطعه نمونه و حداکثر ارتفاع مستخرج از داده‌های ماهواره و  $\bar{m}$ : میانگین حداکثر ارتفاع اندازه‌گیری شده درختان در قطعات نمونه می‌باشد.

### ۳. یافته‌های پژوهش

تعداد قطعات نمونه برداشت شده در دامنه‌های مختلف شیب، طبقات مختلف ارتفاع از سطح دریا و همچنین تعداد درخت در قطعه نمونه در جدول ۱ ارائه شده است. مقادیر حداکثر، حداقل و متوسط تعداد درختان در قطعات نمونه به ترتیب ۲۹، ۱ و ۵/۴۵ درخت می‌باشد. همچنین آماره‌های توصیفی حداکثر ارتفاع درختان در قطعات نمونه برای مقادیر اندازه‌گیری شده و مقادیر استخراج شده از داده‌های سنجنده ATLAS در جدول ۲ ارائه شده است که نشان‌دهنده اختلاف بسیار کم میانگین و انحراف معیار هر کدام از این داده‌ها می‌باشد.

جدول ۱. الف) توزیع قطعات نمونه در طبقات مختلف شیب، ب) توزیع قطعات نمونه در طبقات مختلف ارتفاعی و ج) تعداد درخت در قطعه نمونه

الف)		ب)		ج)	
شیب (درصد)	تعداد قطعات نمونه	ارتفاع از سطح دریا (متر)	تعداد قطعات نمونه	تعداد درخت در قطعه	تعداد قطعات نمونه
کمتر از ۱۵	۱۷	۹۰۰ تا ۱۱۰۰	۳۵	۱ تا ۵	۷۸
۱۵ تا ۳۰	۴۲	۱۱۰۰ تا ۱۳۰۰	۵۲	۵ تا ۱۰	۳۳
۳۰ تا ۴۵	۴۶	۱۳۰۰ تا ۱۵۰۰	۱۷	۱۰ تا ۱۵	۶
۴۵ تا ۶۰	۱۳	۱۸۰۰ تا ۲۰۰۰	۹	۱۵ تا ۲۰	۲
بیشتر از ۶۰	۳	۲۰۰۰ تا ۲۲۰۰	۸	۲۰ تا ۳۰	۲
مجموع	۱۲۱	مجموع	۱۲۱	مجموع	۱۲۱

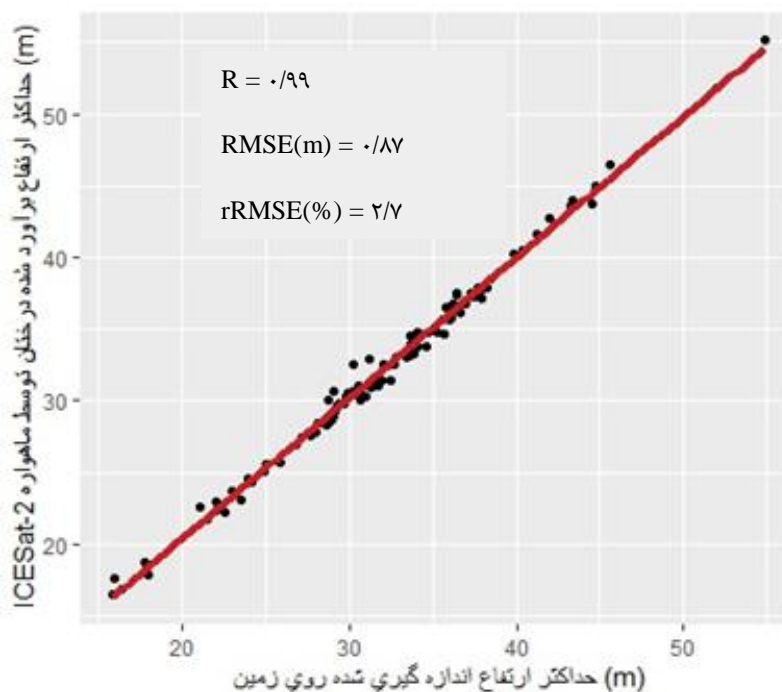
جدول ۲. آماره‌های توصیفی حداکثر ارتفاع درختان در قطعات نمونه

کمینه (متر)	بیشینه (متر)	میانگین (متر)	انحراف معیار (متر)
۱۵/۴۳	۵۵/۱۲	۳۲/۲۵	۷/۴۴
۱۲/۷۹	۵۴/۸۶	۳۱/۹۹	۷/۷۵

اندازه‌گیری شده در قطعات نمونه  
مستخرج از داده‌های ماهواره ICESat-2

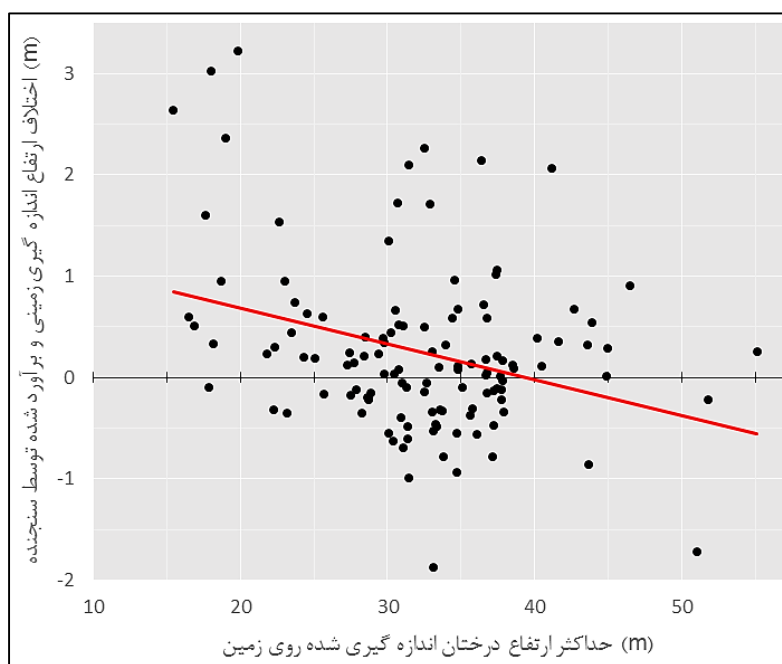
نمودار ابر نقاط مقدار حداکثر ارتفاع اندازه‌گیری شده در هر قطعه نمونه و مقادیر Hcanopy ماهواره ICESat-2 مربوط به قطعات در شکل ۳ ارائه شده است. نتایج این نمودار و آماره‌های RMSE و rRMSE (به ترتیب ۰/۸۷ متر و ۲/۷ درصد) نشان‌دهنده دقت بالای سنجنده در اندازه‌گیری ارتفاع تاج پوشش جنگل می‌باشد و مقادیر حداکثر ارتفاع تاج پوشش جنگل حاصل از نمونه‌برداری زمینی و Hcanopy ماهواره ICESat-2 اختلاف بسیار کمی دارند.





شکل ۳. ابر نقاط و منحنی برازش حداکثر ارتفاع درختان در قطعات نمونه

ابر نقاط اختلاف برآورد ارتفاع درختان توسط سنجنده در مقابل حداکثر ارتفاع اندازه‌گیری شده درختان در قطعات نمونه در شکل ۴ ارائه شده است. براساس نتایج حاصل، هرچند که تعداد درختان در طبقه ارتفاعی بیش از ۴۰ متر کم هستند ولی مقدار اختلاف برآورد ارتفاع توسط سنجنده با افزایش ارتفاع درختان رابطه عکس دارد. از سوی دیگر، سنجنده ATLAS ارتفاع تاج‌پوشش جنگل را در مناطقی که ارتفاع درختان کم است، اندکی بیشتر برآورد می‌کند و در مناطقی که ارتفاع درختان در محدوده ۳۰ تا ۴۰ متر هستند، با ATLAS با خطای بسیار ناچیزی ارتفاع تاج‌پوشش جنگل را تخمین می‌زند.



شکل ۴. اختلاف برآورد ارتفاع درختان توسط سنجنده در مقابل حداکثر ارتفاع درختان در قطعات نمونه



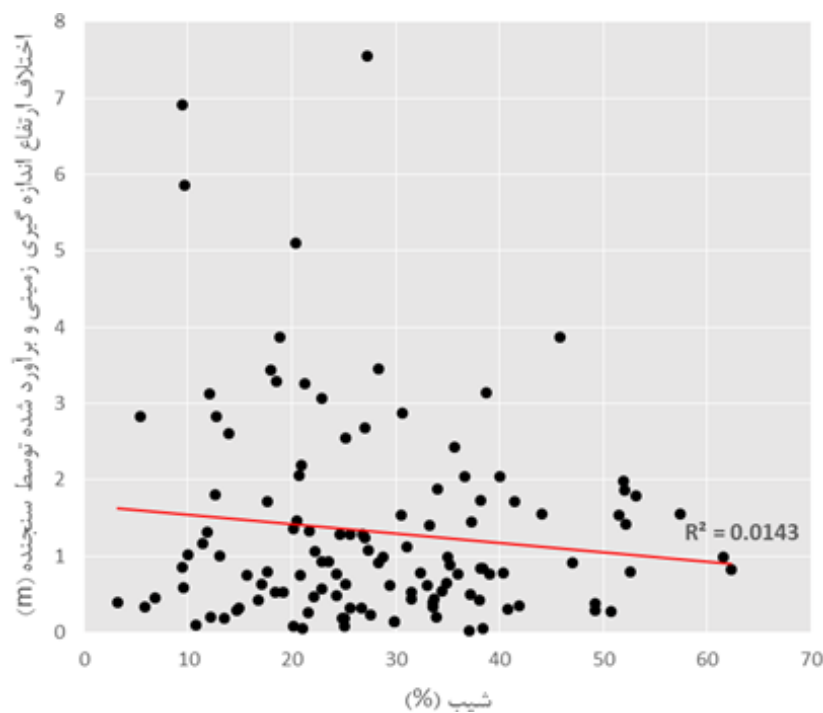
نتایج آزمون t نشان داد که میانگین داده‌های اندازه‌گیری شده با مقادیر متناظر مستخرج از داده‌های ماهواره ICESat-2 از نظر آماری اختلاف معنی‌داری ندارد ( $P > 0.05$ ) (جدول ۳).

جدول ۳. نتایج آزمون t برای مقایسه میانگین مقادیر حداکثر ارتفاع درختان اندازه‌گیری شده و مستخرج از داده‌های ماهواره ICESat-2

تفاوت میانگین‌ها	انحراف معیار تفاوت‌ها	t	درجه آزادی (df)	معنی داری (P)
-۰/۲۵۲۳۴	۰/۹۷۶۷۵	-۰/۲۵۸	۲۴۰	۰/۷۴۴

نتایج به‌دست آمده از این مطالعه توانایی زیاد و خارج از انتظار ماهواره ICESat-2 در برآورد حداکثر ارتفاع درختان این جنگل‌ها را نشان می‌دهد (شکل ۳). این نکته را می‌توان از همبستگی بالای ارتفاع تاج پوشش جنگل برآورد شده توسط سنجنده و برداشت‌های میدانی استنباط کرد (شکل ۳).

نمودار ابر نقاط اختلاف برآورد ارتفاع درختان توسط سنجنده در شیب‌های مختلف نشان‌دهنده عدم تأثیر شیب بر برآورد ارتفاع توسط سنجنده ATLAS می‌باشد (شکل ۵). هرچند براساس اطلاعات حاصل از این شکل، مقدار اختلاف برآورد ارتفاع توسط سنجنده با افزایش شیب زمین رابطه عکس دارد؛ اما با توجه به ضریب  $R^2$  منحنی رگرسیونی ( $0.014$ )، این ارتباط از نظر آماری معنی‌دار نمی‌باشد ( $P > 0.05$ ).



شکل ۵. اختلاف برآورد ارتفاع درختان توسط سنجنده در شیب‌های مختلف قطعات نمونه

#### ۴. بحث

در این پژوهش، توانایی سنجنده ATLAS در برآورد ارتفاع تاج پوشش جنگل در یک دامنه ارتفاعی ۲۲۰۰-۴۰۰ متر و در همه طبقات ارتفاعی از سطح دریا در جنگل آموزشی-پژوهشی خیرود مورد بررسی قرار گرفت. مقدار ضریب همبستگی به‌دست آمده در این پژوهش ( $0.99$ ) نشان‌دهنده همبستگی بالای حداکثر ارتفاع برآورد شده تاج پوشش جنگل توسط سنجنده و برداشت‌های میدانی و دقت این برآورد می‌باشد (شکل ۳). این امر را می‌توان تا حد زیادی به انتخاب فصل مناسب (تابستان) در تهیه داده‌های ماهواره ICESat-2 نسبت داد. در مطالعه Moudry و همکاران (۲۰۲۲) که با هدف ارزیابی اثرات شرایط محیطی و اتمسفری

مانند پخش اتمسفری، وجود برف و شیب زمین بر میزان دقت داده‌های سنجنده ATLAS انجام شد، تأثیر وجود برف در افزایش خطای برآورد ارتفاع تاج پوشش جنگل تأیید شده است [۲۸]. نتایج این مطالعه، ما را قادر می‌سازد تا نتایج قابل اعتمادی را از نظر عملکرد محصول زمینی ATL08 در شرایط جنگل‌های هیرکانی شمال ایران به دست آوریم.

نتایج نشان داد که برآورد ارتفاع تاج پوشش جنگل توسط سنجنده ATLAS در این مطالعه، تحت تأثیر شیب زمین و ارتفاع درختان نمی‌باشد (شکل‌های ۴ و ۵). اگرچه نقش شیب در بروز خطای اندازه‌گیری ارتفاع تاج پوشش جنگل توسط ماهواره ICESat-2 در مناطق کوهستانی با شیب زیاد در بسیاری از تحقیقات مورد تأکید قرار گرفته است [۲۹، ۱۵]، ولی با یافته‌های پژوهش حاضر همسو نمی‌باشد. از سوی دیگر، سنجنده ATLAS، ارتفاع درختان کم ارتفاع را بیش از حد واقعی برآورد کرده است (شکل ۴). علت این امر را می‌توان به عدم تشخیص و تفکیک صحیح سطح زمین و فوتون‌های بازگشتی سطح زمین از فوتون‌های تاجی ارتباط داد. سنجنده ATLAS با محاسبه دقیق مدت زمان رفت و برگشت فوتون‌های لیزر براساس سرعت نور، ارتفاع ناهمواری‌های سطح زمین و پوشش گیاهی را محاسبه می‌کند. در مناطق جنگلی که درختان ارتفاع کمی دارند، تراکم زیاد فوتون‌های بازگشتی از تاج درختان و سطح زمین، منجر به کاهش توانایی سنجنده در تفکیک فوتون‌های این دو پدیده متفاوت می‌شود [۳۰]. با توجه به اهداف این مطالعه، از محصول برآورد ارتفاع تاج پوشش درختان (Hcanopy) استفاده شد که مقدار ارتفاع پوشش گیاهی در محل لکه‌های زمینی را ارائه می‌دهد. Feng و همکاران (۲۰۲۳) در پژوهش خود، ارتفاع تاج پوشش درختان و سطح زمین را براساس فوتون‌های بازگشتی به سنجنده ATLAS برآورد کردند و این مقادیر را در مقایسه با ارتفاع حاصل از سنجنده لیزری هواپرد LVIS (Land, Vegetation, and Ice Sensor) مورد ارزیابی قرار دادند [۲۹]. با وجود اینکه روش تحقیق در پژوهش حاضر و پژوهش Feng و همکاران (۲۰۲۳) از نظر دستیابی به ارتفاع برآورد شده توسط سنجنده متفاوت است، اما نتایج هر دو پژوهش نشان‌دهنده بیش برآورد (over estimate) ارتفاع درختان کم ارتفاع است [۲۹]. Rajab Pourrahmati و همکاران (۲۰۱۵) با استفاده از داده‌های ماهواره ICESat-1 ارتفاع تاج پوشش درختان جنگل‌های هیرکانی شمال ایران را با  $6/16$  RMSE= متر برآورد کردند [۱۲]. در پژوهش حاضر مقدار RMSE برآورد ارتفاع تاج پوشش جنگل در همین منطقه با استفاده از نسل جدید این ماهواره (ICESat-2) تنها  $0/87$  متر محاسبه گردید که نشان‌دهنده دقت بسیار زیاد ماهواره ICESat-2 در مقایسه با ماهواره اول می‌باشد. این نتیجه نشان‌دهنده پیشرفت قابل ملاحظه ماهواره ICESat-2 در برآورد ارتفاع تاج پوشش جنگل در مقایسه با ماهواره اول می‌باشد. Neuenschwander و همکاران (۲۰۲۱) در پژوهشی با عنوان کاربردهای ماهواره ICESat-2 در جنگلداری، صحت برآورد ارتفاع تاج پوشش جنگل توسط سنجنده ATLAS را تا حد زیادی متأثر از تنوع، ساختار جنگل و شرایط فیزیوگرافی سطح زمین دانسته‌اند [۲۶]. هرچند که ICESat-2 به‌طور خاص برای برآورد ارتفاع تاج پوشش جنگل طراحی نشده - است، اما نتایج ما نشان داد که حتی با وجود بیش برآورد ارتفاع تاج پوشش جنگل در مناطقی با درختان کم ارتفاع، این ماهواره ارتفاع تاج پوشش جنگل در مناطق جنگلی شمال ایران را با صحت بسیار خوبی برآورد می‌کند. Narine و همکاران (۲۰۲۳) با هدف تهیه چهارچوبی هدفمند برای ارائه نقشه تاج پوشش جنگل، اقدام به مقایسه ارتفاع برآورد شده درختان توسط ماهواره ICESat-2 و داده‌های سامانه لایدار هواپرد ALS در جنوب ایالات متحده آمریکا کردند [۳۱]. آنها با بیان اینکه ارتفاع برآورد شده درختان توسط داده‌های سامانه ALS همبستگی بالایی با ارتفاع دقیق درختان در جنوب آمریکا دارند ( $R= 0/82$ )، این داده‌ها را به‌عنوان مرجعی برای ارزیابی ارتفاع برآورد شده درختان توسط ماهواره ICESat-2 استفاده کردند. نتایج این پژوهش نشان داد که ارتفاع برآورد شده تاج پوشش جنگل توسط ماهواره ICESat-2 و سامانه لایدار هواپرد ALS همبستگی بالایی ( $R= 0/78$ ) دارند. نتایج حاصل از پژوهش Narine و همکاران تأیید کننده نتایج تحقیق حاضر و دقت بالای داده‌های ماهواره ICESat-2 در برآورد ارتفاع تاج پوشش جنگل است.

نتیجه این پژوهش از نظر دقت برآورد ارتفاع تاج پوشش جنگل خارج از انتظار به نظر می‌رسید، بنابراین تمامی مراحل با دقت مرور گردید و حتی به‌منظور تأیید نتایج از سازمان ارائه‌دهنده داده‌ها (مرکز ملی داده‌های برف و یخ ناسا: <https://nsidc.org/data/icesat-2>) استعلام لازم اخذ شد که این نتایج را امیدوارکننده و مورد انتظار اعلام کردند.

## ۵. نتیجه گیری و پیشنهادها

ارتفاع تاج پوشش مشخصه‌ای مهم و کاربردی برای برنامه‌ریزی، پایش و بررسی پویایی بوم‌سازگان جنگل محسوب می‌شود. اندازه‌گیری ارتفاع تاج پوشش جنگل مستلزم صرف هزینه و زمان زیاد است، ولی از سال ۲۰۰۳ میلادی، سامانه فعال لایدار فضایی ICESat امکان اندازه‌گیری مستقیم ارتفاع تاج پوشش را فراهم کرده است. نتایج این پژوهش که با هدف بررسی قابلیت نسل دوم این سامانه (ماهواره ICESat-2) در برآورد دقیق این مشخصه در ۱۲۱ توده در ارتفاعات مختلف جنگل‌های شمال ایران انجام شد، نشان‌دهنده دقت بالای سنجنده این ماهواره در اندازه‌گیری ارتفاع تاج پوشش جنگل بود (۲/۷ درصد = rRMSE). هرچند که این دقت زیاد همراه با اندکی بیش برآورد ارتفاع تاج پوشش در مناطقی با درختان کم ارتفاع بوده است، ولی به‌وضوح گویای این نکته است که این ماهواره، ارتفاع تاج پوشش جنگل در مناطق جنگلی شمال ایران را با صحت بسیار خوبی برآورد می‌کند و داده‌های آن می‌تواند به‌طور کاربردی مورد استفاده قرار گیرد.

## ۶. منابع

- [1] Namiranian, M. (2006). Measurement of Tree and Forest Biometry. University of Tehran Press, Tehran. 594 p. (In Persian)
- [2] Cairns, M., Barker, J., Shea, R., & Haggerty, P. (1995). Carbon dynamics of Mexican tropical evergreen forests: influence of forestry mitigation options and refinement of carbonflux estimates. *Interciencia*, 20(6), 401-408.
- [3] Ahmed, R.U. (2012). Accuracy of Biomass and Structure Estimates from Radar and Lidar, A dissertation of doctor of philosophy, University of Massachusetts – Amherst.
- [4] Khorrami, R.A., Darvishsefat, A.A., Tabari Kochaksaraei, M., & Shataee Jouybari, Sh. (2014). Potential of LIDAR data for estimation of individual tree height of *Acer velutinum* and *Carpinus betulus*. *Iranian Journal of Forest*, 6(2), 127-140. (In Persian)
- [5] Perko, R., Raggam, H., Gutjahr, K., & Schardt, M. (2010). The capabilities of terrasars-x imagery for retrieval of forest parameters. In: ISPRS TC VII Symposium - 100Years ISPRS. July 5-7, 2010, Vienna, Austria. pp. 452-456.
- [6] Poli, D., & Caravaggi, I. (2012). Digital surface modelling and 3D information extraction from spaceborne very high resolution stereo pairs. JRC Scientific and Technical Reports, Ispra, Luxembourg.
- [7] Wang, X., Cheng, X., Gong, P., Huang, H., Li, Zh., & Li, X. (2011). Earth science applications of ICESat/GLAS: a review. *International Journal of Remote Sensing*, 32(23), 8837-8864.
- [8] Hese, S., Lucht, W., Schmullius, C., Barnsley, M., Dubayah, R., Knorr, D., Neumann, K., Riedel, T., & Schroter, K. (2005). Global biomass mapping for an improved understanding of the Co2 balance, The Earth observation mission Carbon-3D. *Remote Sensing of Environment*, 94, 94-104.
- [9] Pflugmacher, D., Cohen, W., Kennedy, R., & Lefsky, M., (2008). Regional applicability of forest height and aboveground biomass Models for the Geoscience Laser Altimeter System. *Forest Science*, 54(6), 647-657.
- [10] Hayashi, M., Saigusa, N., Oguma, H., & Yamagata, Y., (2013). Forest canopy height estimation using ICESat/GLAS data and error factor analysis in Hokkaido, Japan. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 8, 12-18.
- [11] Neuenschwander, A.L. and Pitts, K. (2019). The ATL08 land and vegetation product for the ICESat-2 Mission, *Remote Sensing of Environment*, 221: 247-259.
- [12] Rajab Pourrahmati, M., Darvishsefat, A.A., Baghdadi, N., Namiranian, M., & Soofi Mariv, H. (2015). Estimation of forest canopy height in mountainous areas using ICESat-GLAS data. *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*, 23(1), 90-103.
- [13] Fayad, I., Baghdadi, N., Bailly, J-S., Barbier, N., Gond, V., El Hajj, M., Fabre, F., & Bourguine, B. (2014). Canopy height estimation in French Guiana with LiDAR ICESat/GLAS data using principal component analysis and random forest regressions. *Remote Sensing*, 6(12), 11883-11914.

- [14] Lefsky, M.A., Keller, M., Pang, Y., De Camargo, P.B., & Hunter, M.O. (2007). Revised method for forest canopy height estimation from Geoscience Laser Altimeter System waveform. *Journal of Applied Remote Sensing*, 1(1), 1-18.
- [15] Wang, C., Zhu, X., Nie, Sh., Xiaohuan, X., Li, D., Zheng, W., & Chen, Sh. (2019). Ground elevation accuracy verification of ICESat-2 data: a case study in Alaska, USA. *Optics Express*, 27(26), 38168-38179.
- [16] Lin, X., Xu, M., Cao, C., Dang, Y., Bashir, B., Xie, B., & Huang, Zh. (2020). Estimates of forest canopy height using a combination of ICESat-2/ATLAS data and stereo-photogrammetry. *Remote Sensing*, 12(21), 3649.
- [17] Wang, L., Niu, Z., Shang, R., Qin, Y., Wang, L., & Chen, H. (2020). High-resolution mapping of forest canopy height using machine learning by coupling ICESat-2 LiDAR with Sentinel-1, Sentinel-2 and Landsat-8 data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 92, 102163.
- [18] Zhang J., Tian, J., Li, X., Wang, L., Chen, B., Gong, H., Ni, R., Zhou, B., & Yang, C. (2021). Leaf area index retrieval with ICESat-2 photon counting LiDAR. *International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation*, 103, 102488.
- [19] Tang, H., Dubayah, R., Swatantran, A., Hofton, M., Sheldon, S., Clark, D.B., & Blair, B. (2012). Retrieval of vertical LAI profiles over tropical rain forests using waveform lidar at La Selva, Costa Rica. *Remote Sensing of Environment*, 124, 242-250.
- [20] Rajab Pourrahmati, M., Baghdadi, N., & Fayad, I. (2023). Comparison of GEDI LiDAR Data Capability for Forest Canopy Height Estimation over Broadleaf and Needleleaf Forests. *Remote Sensing*, 15(6), 1522.
- [21] Faculty Members of Forestry and Forest Economics Department. (2013). 2nd Namkhaneh district revision forestry project, experimental and research forest Tehran University (Kheyroud Forest), Department of Natural Resources. 155 p. (In Persian)
- [22] Faculty Members of Forestry and Forest Economics Department. (2010). Gorazbon district revision forestry project, experimental and research forest Tehran University (Kheyroud Forest), Department of Natural Resources. 175 p. (In Persian)
- [23] Etemad, V., Namirani, M., Zobeiri, M., Majnounian, B., & Moradi, G. (2013). Qualitative and Quantitative Variation of Forest Stands after one Period of Forest Management Plan (Case study: Namkhaneh District Kheyroud Forest). *Journal of Forest and Wood Products*, 66(3), 243-256.
- [24] Magruder, L.A., Neumann, T., & Kurtz, N. (2021). ICESat-2 early mission synopsis and observatory performance. *Earth and Space Science*, 8, e2020EA001555.
- [25] Neumann, T.A., Martino, A.J., Markus, T., Bae, S., Bock, M.R., Brenner, A.C., Brunt, K.M., Cavanaugh, J., Fernandes, S.T., Hancock, D.W., Harbeck, K., Lee, J., Kurtz, N.T., Luers, Ph.J., Luthcke, S.B., Magruder, L., Pennington, T.A., Ramos-Izquierdo, L., Rebold, T., Skoog, J., & Thomas, T.C. (2019). The Ice, Cloud, and Land Elevation Satellite – 2 mission: A global geolocated photon product derived from the Advanced Topographic Laser Altimeter System. *Remote Sensing of Environment*, 233, 111325.
- [26] Neuenschwander, A.L., Pitts, K.L., Jelley, B.P., Robbins, J., Klotz, B., Popescu, S.C., Nelson, R.F., Harding, D., Pederson, D., & Sheridan, R. (2021). ATLAS/ICESat-2 L3A Land and Vegetation Height, Version 4. [Indicate subset used]. Boulder, Colorado USA. NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center. doi.org/10.5067/ATLAS/ATL08.004.
- [27] Ma, J., Zhang, W., Ji, Y., Huang, J., Huang, G., & Wang, L. (2023). Total and component forest aboveground biomass inversion via LiDAR-derived features and machine learning algorithms. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1258521.
- [28] Moudrý, V., Gdulová, K., Gábor, L., Šárovcová, E., Barták, V., Leroy, F., Špatenková, O., Rocchini, D., & Prošek, J. (2022). Effects of environmental conditions on ICESat-2 terrain and canopy heights retrievals in Central European Mountains. *Remote Sensing of Environment*, 279, 113112.
- [29] Feng, T., Duncanson, L., Montesano, P., Hancock, S., Minor, D., Guenther, E., & Neuenschwander, A.L. (2023). A systematic evaluation of multi-resolution ICESat-2 ATL08 terrain and canopy heights in boreal forests. *Remote Sensing of Environment*, 291, 113570.
- [30] Neuenschwander, A.L. (2021). ICESat-2 for Forestry Applications. In Proceedings of the SilviLaser Conference 2021. pp. 346-349.
- [31] Narine, L.L., Popescu, S.C., & Malambo, L. (2023). A Methodological Framework for Mapping Canopy Cover Using ICESat-2 in the Southern USA. *Remote Sensing*, 15(6), 1548.