

## برآورد موجودی سرپای جنگل با استفاده از داده‌های لیدار فضایی ICESat/GLAS در جنگل‌های کوهستانی شمال ایران

منیژه رجب‌پور رحمتی<sup>۱</sup>، علی اصغر درویش صفت<sup>۲\*</sup>، نیکلاس بغدادی<sup>۳</sup>، منوچهر نمیرانیان<sup>۱</sup> و نصرت‌الله ضرغام<sup>۲</sup>  
 ۱. دانش‌آموخته دکتری جنگلداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران  
 ۲. استاد گروه جنگلداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، ایران  
 ۳. محقق مرکز تحقیقات سنجش از دور IRSTEA، مونته‌پلیه، فرانسه

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۳/۱۶

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۱۱/۱۵

### چکیده

اندازه‌گیری موجودی سرپای جنگل یکی از متغیرهای کمی مهم است که نقش بسیاری در برنامه‌ریزی و مدیریت جنگل دارد. در این تحقیق، تلاش شد تا این ویژگی در بخشی از جنگل‌های کوهستانی شمال ایران (نوشهر)، با استفاده از داده‌های لیدار فضایی برآورد شود. بدین منظور، طی پیش‌پردازش‌های اولیه روی داده‌های ICESat/GLAS از دو مأموریت متفاوت (L3K و L3I)، ضمن حذف داده‌های نامطلوب، سنجه‌های گوناگونی همچون گستره شکل موج ( $W_{ext}$ )، گستره لبه پیش‌تاز ( $H_{lead}$ )، گستره لبه پستی ( $H_{trail}$ ) و سنجه‌های ارتفاع در چارک‌های انرژی ( $H_{25}$ ،  $H_{75}$ ،  $H_{95}$  و  $H_{100}$ ) از شکل موج‌ها (waveform) استخراج شد. همچنین، با استفاده از روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) روی شدت سیگنال‌های شکل موج، ضمن حذف نویزها و فشرده‌سازی اطلاعات، مؤلفه‌های جدیدی تولید و به کار گرفته شد. با توجه به کوهستانی و شیب‌دار بودن منطقه و تأثیر آن در ویژگی‌های شکل موج، از مدل رقومی ارتفاع برای استخراج شاخص زمینی (TI) که بیانگر اطلاعات مربوط به توپوگرافی زمین است، استفاده شد. به منظور توسعه مدل‌های رگرسیونی و اعتبارسنجی آنها، حجم سرپای در ۶۰ قطعه نمونه زمینی به قطر هفتاد متر اندازه‌گیری شد. سپس مدل‌های رگرسیون چندگانه و شبکه عصبی مصنوعی براساس دو دسته متغیر شامل سنجه‌های استخراج شده از شکل موج و مؤلفه‌های حاصل از PCA برای برآورد حجم سرپای توسعه داده شدند و به روش اعتبارسنجی متقابل پنج‌گانه ارزیابی شدند. به طور کلی، هر دو روش رگرسیون چندگانه و شبکه عصبی مصنوعی نتایج تقریباً مشابهی داشتند. در این میان، روش شبکه عصبی مصنوعی براساس مؤلفه‌های حاصل از PCA قادر بود موجودی سرپای جنگل را با  $RMSE = 119/9 m^2/ha$  و  $R_a^2 = 0/73$  برآورد کند ( $RMSE\% = 26/6$ ). یکی از نکات مثبت این مدل در مقایسه با دیگر مدل‌ها، وابسته نبودن متغیرهای ورودی به کاررفته ( $PC_1$ ،  $PC_2$ ،  $PC_3$  و  $W_{ext}$ )، به شناسایی صحیح قله زمین است که در مناطق شیب‌دار مشکل و با خطا همراه است. نیاز نداشتن به داده کمی (مدل رقومی ارتفاع) و برآورد صحیح‌تر حجم جنگل در قطعه نمونه‌های تنگ با موجودی سرپای کم از دیگر نکات مثبت این مدل است.

**کلیدواژه‌ها:** حجم سرپای جنگل، لیدار فضایی، ICESat GLAS، رگرسیون چندگانه، شبکه عصبی مصنوعی.

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: کرج، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران. تلفن: ۰۲۶۲۲۲۲۳۰۴۴

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

## ۱- مقدمه و هدف

اندازه‌گیری موجودی سرپای جنگل اهمیت ویژه‌ای در برنامه‌ریزی و مدیریت جنگل دارد. حجم سرپا به‌همراه سن توده، معرف کیفیت رویشگاه است. همچنین، حجم جنگل برای تعیین مقدار زی‌توده و کربن ذخیره‌شده در جنگل استفاده می‌شود. برآورد مقدار کربن جنگل برای تعیین نقش آن در تغییر آب‌وهوا اهمیت بسیاری دارد. دقیق‌ترین روش برای تعیین حجم سرپا، اندازه‌گیری قطر برابر سینه (DBH) و ارتفاع درخت است (نمیرانیان، ۱۳۸۵). در سطوح گسترده جنگل، از روش‌های نمونه‌برداری و معادلات رگرسیونی برای برآورد حجم جنگل استفاده می‌شود. اما این روش در سطوح وسیع و کوهستانی با توده‌های جنگلی ناهمگن، بسیار پرهزینه و زمان‌بر است. با استفاده از فنون دورسنجی در برخی شرایط رویشگاهی می‌شود شاخص‌های بیوفیزیکی جنگل شامل ارتفاع، حجم، زی‌توده و مانند آن را با صرف زمان و هزینه کمتر و با دقت مناسب، در سطوح وسیع برآورد کرد. در سال‌های اخیر، پیشرفت‌های بسیاری برای کسب اطلاعات بُعد سوم پدیده‌ها با استفاده از فنون دورسنجی صورت گرفته است. چنین اطلاعاتی با استفاده از فن فتوگرامتری (Gobakken et al., 2000; Miller et al., 2015)، اینترفرومتری راداری (Balzter et al., 2007; Attarchi & Gloaguen, 2014) و فن ارتفاع‌سنجی لیدار قابل دست‌یابی است. از این میان، لیدار به‌طور تخصصی برای اندازه‌گیری ارتفاع و بُعد سوم پدیده‌ها طراحی و استفاده شده است (خرمی و همکاران، ۱۳۹۳; Andersen et al., 2006; Lefsky et al., 2007; Chen, 2010; Chen & hay, 2011). کسب داده‌های لیدار هوایی بسیار پرهزینه است و امکان برداشت داده‌های سالیانه در سطوح گسترده وجود ندارد. ناسا ماهواره<sup>۱</sup> ICESat را در ژانویه ۲۰۰۳ به فضا پرتاب کرد تا امکان مشاهده‌های لیزری جهانی از پوشش ورقه‌های یخ قطبی، زمین، اقیانوس و اتمسفر را فراهم آورد (درویش‌صفت و همکاران، ۱۳۹۰). ماهواره<sup>۲</sup> ICESat شامل ابزار<sup>۲</sup> GLAS است که از ارتفاع‌سنجی

لیزری برای اندازه‌گیری فاصله سنجنده تا سطح زمین استفاده می‌کند. این فاصله از طریق اندازه‌گیری زمان طی‌شده برای انتقال پالس لیزر و بازتابی انعکاس از زمین و با آگاهی از سرعت نور محاسبه می‌شود. از این قابلیت در تحقیقات بسیاری برای برآورد بیشترین ارتفاع تاج‌پوشش جنگل (Lefsky et al., 2007; Chen, Rosette et al., 2014; Fayad et al., 2010)، حجم (Healey et al., 2009; Nelson, 2008b) و زی‌توده جنگل (al., 2012; Zhifeng et al., 2010) در شرایط گوناگون از جنگل‌های دست‌کاشت تا جنگل‌های طبیعی سوزنی‌برگ، پهن‌برگ و آمیخته استفاده شده است. نکته مهم در ارتباط با داده‌های GLAS، افزایش گستره شکل‌موج روی سطح شیب‌دار (به‌ویژه، به‌دلیل بزرگ بودن سطح لکه زمینی که حدود ۷۰ متر است) و مشکل در شناسایی نوک تاج‌پوشش و قله زمین به‌دلیل اختلاط در انرژی بازگشتی از زمین و پوشش گیاهی است (Lefsky et al., 2007; Lefsky et al., 2007; Chen, 2010). در این ارتباط، بیشتر محققان از روش‌های رگرسیونی پارامتری، براساس سنجه‌های استخراج‌شده از شکل‌موج یا در ترکیب با اطلاعات توپوگرافی استخراج‌شده از مدل رقومی زمین، برای برآورد ارتفاع تاج‌پوشش جنگل استفاده کرده‌اند (Lefsky et al., 2005; Lefsky et al., 2007; Rosette et al., 2010; Duncanson et al., 2010; Chen, 2008a). محققان اندکی نیز از روش‌های غیرپارامتری مانند رندوم‌فارست (Fayad et al., 2014; Pourrahmati et al., 2016) و شبکه عصبی مصنوعی (Fu et al., 2009; Nelson et al., 2009) برای برآورد ارتفاع تاج‌پوشش جنگل، حجم یا زی‌توده روی زمینی استفاده کرده‌اند. هدف اصلی این تحقیق بررسی امکان برآورد حجم سرپای جنگل با استفاده از داده‌های لیدار فضایی ICESat/GLAS به دو روش پارامتری رگرسیون چندگانه و غیرپارامتری شبکه عصبی مصنوعی و مقایسه نتایج آنهاست.

1. Ice, Cloud, and land Elevation Satellite
2. Geoscience Laser Altimeter System (GLAS)

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- منطقه مورد بررسی

این تحقیق در بخشی از جنگل‌های پهن‌برگ کوهستانی شهرستان نوشهر در محل لکه‌های زمینی GLAS (مربوط به مأموریت‌های L3I و L3K) به صورت دو خط‌نمونه شمالی-جنوبی از جلگه تا ارتفاع ۲۰۰۰ متر، با توپوگرافی شدید و شیب متوسط ۳۵ درصد انجام شد. در این پژوهش، بیشتر لکه‌های زمینی برداشت شده (غیر از اندکی) در ارتفاع‌های میان‌بند و بالابند قرار گرفته است. جنگل مورد بررسی شامل رویشگاه‌های پهن‌برگ آمیخته با گونه‌های غالب راش ( *Fagus orientalis* ) و ممرز (*Carpinus betulus*) در ارتفاعات میان‌بند و گونه‌های لور (*Carpinus orientalis*) و اوری (*Quercus macranthera*) در ارتفاعات بالابند است و برای آنها طرح جنگلداری تهیه نشده است.

### ۲-۲- داده‌های مورد استفاده

#### - داده‌های ICESat/GLAS

ابزار GLAS دارای سه سیستم لیزر مشابه (لیزر یک، دو و سه) است که در هر زمان تنها یکی از آنها فعالیت می‌کند. لیزر، ۴۰ بار در ثانیه، پالس‌های کوچک الکترومغناطیس را به سوی کره زمین ارسال می‌کند و لکه‌هایی از سطح زمین با قطر ۷۰ متر را با فاصله ۱۷۰ متر از یکدیگر، در طول مسیر روشن می‌کند<sup>۱</sup> (NSIDC, 2012). دو نوار از داده‌های سنجنده GLAS مربوط به اکتبر ۲۰۰۷ (مأموریت L3I) و اکتبر ۲۰۰۸ (مأموریت L3K) برای تحلیل مورد استفاده قرار گرفت. از بین پانزده محصول داده‌های GLAS تولیدشده به وسیله مرکز NSIDC، فقط محصولات GLA01 و GLA14 به کار برده شد. GLA01 شامل شدت<sup>۲</sup> سیگنال‌های شکل‌موج‌های ارسال شده و دریافت شده

1. National Snow and Ice Data Center (NSIDC)
2. Intensity

است. محصول GLA14 نیز شامل داده‌های مکانی دقیق مرکز لکه زمینی (طول و عرض جغرافیایی)، ارتفاع زمین از سطح دریا در مرکز لکه زمینی، اطلاعات مورد نیاز برای پردازش اولیه شکل‌موج‌ها و مانند آن است.

#### - مدل رقومی ارتفاع

مدل رقومی ارتفاع (DEM) با اندازه تفکیک ۱۰ متری که از نقشه‌های توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰ با خطوط تراز ۱۰ متری تهیه شد. این مدل برای استخراج شاخص زمینی (TI) به کار رفت که بیانگر شرایط توپوگرافی زمین است.

#### - داده‌های میدانی

متناسب با زمان کسب داده‌های لیدار، آماربرداری زمینی در فصل‌های سبز (درختان برگ‌دار) انجام شد. بدین منظور، ۳۳ قطعه‌نمونه در شهریور ۱۳۹۲ و ۲۷ قطعه‌نمونه در اردیبهشت ۱۳۹۳ (در مجموع، شصت قطعه‌نمونه) روی زمین در محل لکه‌های زمینی لیدار تعیین شد. اطلاعات مورد نیاز در محل هر لکه ثبت و حجم در هکتار محاسبه شد (بخش ۲-۳-۱).

### ۲-۳- روش تحقیق

#### ۲-۳-۱- اندازه‌گیری میدانی

چنانکه بیان شد، تعداد شصت قطعه‌نمونه روی زمین در محل لکه‌های زمینی لیدار اندازه‌گیری شد. در هر قطعه‌نمونه، قطر برابرسینه همه درختان ( $cm > 5/7$  DBH) موجود در یک قطعه‌نمونه به شعاع ۳۵ متر (اندازه تقریبی لکه‌های زمینی لیدار) و ارتفاع یازده درخت اندازه‌گیری شد. به منظور محاسبه ارتفاع کل درختان هر قطعه‌نمونه، مدل‌های رگرسیونی گوناگونی بین ارتفاع و قطر برابرسینه آزمون شد. این روابط برای چهار گونه راش (*Fagus orientalis*)، ممرز (*Carpinus betulus*)، توسکا ییلاقی (*Alnus subcordata*) و بلندمازو (*Quercus castanifolia*) و دو گروه از گونه‌ها که از نظر شکل ساقه و ارتفاع مشابه‌اند، شامل گروه ۱. دربرگیرنده گونه‌های نمودار (*Tilia begonifolia*)، افرا پلت (*Acer velutinum*)، بارانک (*Sorbus torminalis*)

به منظور انتخاب بهترین مدل رگرسیونی، معیارهای آماری متداولی چون ضریب تعیین تعدیل شده ( $R^2_a$ )، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) و معیار اطلاعاتی آکائیکه<sup>۱</sup> (AIC) ارزیابی شدند (Burnham & Anderson, 2002). افزون بر معیارهای آماری، منحنی ارتفاع برای هریک از این شش گروه ترسیم و عملکرد زیستی مدل‌ها نیز بررسی شد. براساس مدل‌های آماری به دست آمده (جدول ۱)، ارتفاع همه درختان در قطعه نمونه‌ها برآورد شد. سپس برای محاسبه حجم، معادلات حجم تهیه شده برای شش گروه گونه‌ای یادشده از سوی سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری کشور (سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری کشور، ۱۳۶۴ و ۱۳۸۱) به کار رفت (جدول ۲).

و زبان گنجشک (*Fraxinus excelsior*)، و گروه ۲. دربرگیرنده گونه‌های اوری (*Quercus macranthera*)، لور (*Carpinus orientalis*)، انجیلی (*Parotia persica*) و لرگ (*Diospyros lotus*)، توسعه داده شد. این شش گروه براساس شش جدول حجم تهیه شده برای جنگل‌های شمال ایران از سوی سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری کشور (سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری کشور، ۱۳۶۴ و ۱۳۸۱)، انتخاب شدند.

جدول ۱. شش مدل غیرخطی ارتفاع- قطر برابر سینه و نتایج آماری آنها (H: ارتفاع، DBH: قطر برابر سینه)

منبع	$R^2_a$	RMSE (m)	ضریب		مدل	گونه
			b	a		
Huang et al, 1992	۰/۶۵	۵/۴	۰/۰۲۵	۴۱/۷۹۴	$H = 1.3 + a(1 - e^{-b.DBH})$	راش
Fang & Bailey, 1998; Ahmadi et al., 2013	۰/۴۸	۳/۹	۱۴/۷۷۲	۳۳/۰۳۹	$H = 1.3 + a.DBH/b + DBH$	ممرز
Huang et al, 1992	۰/۳۰	۵/۷	۰/۰۳۵	۳۹/۵۷۴	$H = 1.3 + a(1 - e^{-b.DBH})$	بلندمازو
Huang et al, 1992	۰/۴۷	۳/۰	۰/۰۳۸	۳۹/۶۹۸	$H = 1.3 + a(1 - e^{-b.DBH})$	توسکا بیلاقی
Huang et al, 1992; Silva Scaranello et al., 2012	۰/۶۳	۵/۲	۰/۱۴۳	۲/۰۵۳	$H = 1.3 + DBH^2/(a + b.DBH)^2$	گروه یک
Huang et al, 1992	۰/۴۴	۲/۸	۰/۰۲۵	۱۳/۲۶۳	$H = 1.3 + a(1 - e^{-b.DBH})$	گروه دو

جدول ۲. شش مدل حجم تهیه شده از سوی سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری کشور

(H: ارتفاع (m)، DBH: قطر برابر سینه (cm)، V: حجم (m<sup>3</sup>))

منبع	ضریب			مدل	گونه
	c	b	A		
۰/۰۴۰۵	۰/۰۰۰۳۴۲۰۵۹	۰/۰۰۰۰۲۶۳۶۴	$V = (a.DBH^2 \times H)$	راش	
		۰/۰۰۰۰۰۲۳	$V = a(DBH^2 \times H)^b$	ممرز	
۰/۹۵۴۴	۰/۰۰۰۰۵۸	۰/۰۰۰۰۰۵۸	$V = a(DBH^2 \times H)^b$	بلندمازو	
		۰/۰۰۰۰۰۵۱	$V = a(DBH^2 \times H)^b$	توسکا بیلاقی	
1. Akaike Information Criterion (AIC)	۰/۹۵۳۹	۰/۰۰۰۰۰۵۶	$V = a(DBH^2 \times H)^b$	گروه یک	
		۰/۰۰۰۰۰۳۵	$V = a(DBH^2 \times H)^b$	گروه دو	

### ۲-۳-۲- پردازش و آماده‌سازی داده‌های لیدار

انرژی بازگشتی از پدیده‌های موجود در هر لکه زمینی لیدار به تولید یک شکل موج منجر می‌شود که بیانگر ساختار عمودی آن لکه است. به‌منظور حذف شکل‌موج‌هایی که تحت تأثیر ابر یا دیگر آثار اتمسفری قرار گرفتند و حفظ شکل‌موج‌هایی که اطلاعات صحیح و کاربردی دارند، پیش‌پردازش‌هایی روی آنها انجام شد (رجب‌پور رحمتی و همکاران، ۱۳۹۴).

هر شکل موج دریافت‌شده در نهایت، به شش تابع گوسی متناظر با سیگنال‌های بازگشتی از لایه‌های متفاوت، بین نوک درختان و زمین جنگل، تجزیه شده است. روی زمین مسطح، نخستین قله گوسی مربوط به انعکاس نوک تاج‌پوشش و آخرین قله گوسی مربوط به پایین‌ترین نقطه در لکه زمینی، یعنی زمین، است. از آنجاکه در مناطق کوهستانی و روی زمین شیب‌دار، آخرین قله گوسی نمی‌تواند الزاماً بیانگر زمین باشد، از بین دو قله گوسی آخر، قله گوسی با دامنه بزرگ‌تر یا به عبارتی با شدت انرژی بیشتر، قله زمین در نظر گرفته شد (Rosette et al., 2008a; Chen, 2010; Baghdadi, 2014, Fayad et al., 2014). نخستین قله گوسی نیز بیانگر نوک تاج‌پوشش است. بر این اساس طبق تحقیق رجب‌پور رحمتی و همکاران (۱۳۹۴)، سنجه‌هایی چون گستره شکل‌موج (فاصله عمودی بین سیگنال آغازین و سیگنال پایانی در شکل‌موج)، گستره لبه پیش‌تاز (اختلاف ارتفاع عمودی

بین سیگنال آغازین و موقعیت مربوط به قله نوک تاج‌پوشش) و گستره لبه پشتی (اختلاف ارتفاع عمودی بین سیگنال پایانی و موقعیت مربوط به قله زمین) و همچنین، سنجه‌های ارتفاع در چارک‌های انرژی ( $H_{25}$ ،  $H_{50}$ ،  $H_{75}$  و  $H_{100}$ ) استخراج شد. بدین ترتیب که مجموع انرژی سیگنال‌های بازگشتی بین سیگنال آغازین و پایانی (گستره شکل‌موج) محاسبه شد و از سمت سیگنال پایانی، موقعیت سیگنالی که در آن ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد انرژی شکل‌موج (نسبت انرژی تجمعی تا آن نقطه به انرژی کل) رخ می‌دهد، شناسایی شد. فاصله عمودی بین هریک از این چارک‌های انرژی و قله زمین به ترتیب به‌منزله  $H_{25}$ ،  $H_{50}$ ،  $H_{75}$  و  $H_{100}$  محاسبه شد (رجب‌پور رحمتی، ۱۳۹۴)؛ Sun et al., 2008; Nelson et al., 2009). در جدول ۳، سنجه‌های استخراج‌شده از شکل‌موج‌ها و مشتقات آنها که در تحقیق حاضر استفاده شدند، مشاهده می‌شود.

افزون بر این، با استفاده از تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA)، ضمن فشرده‌سازی اطلاعات هر شکل‌موج و حذف نویزها، مؤلفه‌های جدیدی تولید شد که به‌صورت متغیر ورودی در مدل‌های برآورد حجم به‌کار رفت. بدین منظور، شدت انرژی سیگنال‌های شکل‌موج‌ها به‌منزله متغیرهای ورودی تحلیل PCA استفاده شد. برای این تحلیل لازم بود تعداد نمونه‌های همه شکل‌موج‌ها با هم برابر شود. بنابراین، بزرگ‌ترین گستره شکل‌موج (۴۰۰ نمونه) مبنا قرار داده شد و دیگر

جدول ۳. سنجه‌های استخراج‌شده از شکل‌موج‌ها و مشتقات آنها

سنجه	توصیف
$W_{ext(n)}, \ln(W_{ext})$	گستره شکل‌موج (اختلاف ارتفاع عمودی بین سیگنال آغازین و سیگنال پایانی)
$H_{lead(n)}, \ln(H_{lead})$	گستره لبه پیش‌تاز (اختلاف ارتفاع عمودی بین سیگنال آغازین و قله نوک تاج‌پوشش)
$H_{trail(n)}, \ln(H_{trail})$	گستره لبه پشتی (اختلاف ارتفاع عمودی بین سیگنال پایانی و قله زمین)
$H_{25(n)}, \ln(H_{25})$	ارتفاع نقطه‌ای از شکل‌موج که در آن ۲۵ درصد از انرژی بازگشتی رخ می‌دهد.
$H_{50(n)}, \ln(H_{50})$	ارتفاع نقطه‌ای از شکل‌موج که در آن ۵۰ درصد از انرژی بازگشتی رخ می‌دهد.
$H_{75(n)}, \ln(H_{75})$	ارتفاع نقطه‌ای از شکل‌موج که در آن ۷۵ درصد از انرژی بازگشتی رخ می‌دهد.
$H_{100(n)}, \ln(H_{100})$	ارتفاع نقطه‌ای از شکل‌موج که در آن ۱۰۰ درصد از انرژی بازگشتی رخ می‌دهد.

$Ln$ : لگاریتم طبیعی (لگاریتم در مبنای  $e=2.718$ ،  $n=0, 1, 2, 3, \dots, 100$  و بیانگر این است که سنجه به‌کاررفته، به توان آن عدد رسیده است.

برای تولید مدل‌های رگرسیونی چندگانه، ترکیبات گوناگون مدل‌ها براساس آنچه تشریح شد، در نرم‌افزار آماری R بر داده‌های این پژوهش (اطلاعات استخراج‌شده از لیدار، شاخص زمینی و داده‌های میدانی) برازش و ضرایب رگرسیون محاسبه شد. در توسعه مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی، برای رسیدن به ساختار مناسب شبکه، مدل‌های گوناگون با تعداد لایه‌های پنهان و تعداد گره‌های متفاوت طراحی و آزموده شد. در این پژوهش، تابع تانژانت هیپربولیک در لایه پنهان و تابع خطی در لایه خروجی به کار رفت. معمولاً تابع انتقال در رگرسیون برای تولید خروجی گره‌های داخلی از نوع تابع تانژانت هیپربولیک و برای رسیدن به خروجی شبکه از نوع خطی است (Kaastra & Boyd, 1996). از بسته 'monmlp' (Cannon, 2012) در نرم‌افزار R برای طراحی شبکه عصبی مصنوعی استفاده شد.

روش اعتبارسنجی متقابل  $k$ -چرخشی<sup>۳</sup> برای ارزیابی اعتبار مدل‌ها به کار رفت. در این حالت، کل مشاهدات به  $k$  بخش مساوی تقسیم می‌شود. سپس عمل آموزش یا توسعه مدل و آزمون طی  $k$  تکرار انجام می‌شود. به این ترتیب که در هر تکرار، یک  $k$ ام از داده‌ها (غیرتکراری) برای آزمون و باقی آنها برای آموزش در نظر گرفته شد. مزیت این شیوه اعتبارسنجی این است که همه داده‌ها به طور برابر برای آموزش و آزمون به کار گرفته می‌شوند، تعداد داده‌های به کاررفته برای آزمون مدل افزایش می‌یابد و به این ترتیب مانع بیش‌برازش می‌شود (Rao et al., 2008). در تحقیق حاضر،  $k=5$  در نظر گرفته شد. بنابراین در هر چرخش، ۸۰ درصد از داده‌ها برای آموزش و توسعه مدل و ۲۰ درصد دیگر برای آزمون و اعتبارسنجی مورد استفاده قرار گرفت.

شکل موج‌ها براساس آن تنظیم شدند. به این ترتیب که از سیگنال آغازین تا ۴۰۰ نمونه پس از آن در هر شکل موج تفکیک شد. از آنجاکه تعداد مشاهدات این تحقیق (۶۰) کمتر از تعداد نمونه‌های شکل موج (۴۰۰) است، از هر ۱۰ نمونه، یکی از آنها حفظ شد و به این ترتیب، تحلیل PCA با استفاده از ۴۱ نمونه به کمک بسته 'FactoMineR' (Husson et al., 2015) در نرم‌افزار R انجام شد.

## ۲-۳-۳- برآورد حجم براساس مدل رگرسیونی چندگانه و شبکه عصبی مصنوعی

مدل رگرسیونی چندگانه (MLR) و شبکه عصبی مصنوعی (ANN) بسیاری با مجموعه‌های گوناگونی از سنج‌های استخراج‌شده از شکل‌موج‌ها و همچنین، مؤلفه‌های حاصل از PCA، برای برآورد موجودی سربای جنگل توسعه داده شد. افزون بر این، برای در نظر گرفتن اثر شیب زمین در مدل‌های یادشده، شاخص زمینی با استفاده از مدل رقومی زمین با اندازه تفکیک مکانی ۱۰ متر برای هر لکه زمینی استخراج شد. به این ترتیب که اختلاف بین بیشترین و کمترین ارتفاع‌های زمینی در پنجره‌ای به ابعاد  $7 \times 7$  پیکسل به مرکزیت لکه زمینی لیدار، به منزله شاخص زمینی تعیین شد.

برای انتخاب و ورود متغیرهای مستقل در توسعه مدل‌ها براساس سنج‌های استخراج‌شده از شکل‌موج‌ها، افزون بر انتخاب و ترکیب سنج‌ها به صورت تجربی، همه سنج‌ها (جدول ۳) به صورت متغیرهای مستقل در رگرسیون گام‌به‌گام وارد شدند تا بهترین ترکیب سنج‌ها طی رویکرد حذف پسرو<sup>۱</sup> و انتخاب پیشرو<sup>۲</sup>، براساس معیار اطلاعاتی آکائیکه (AIC) به دست آید. در ارتباط با مدل‌هایی که براساس مؤلفه‌های حاصل از PCA تولید شدند نیز به همین ترتیب عمل شد. دسته‌ای از مدل‌ها از ترکیب سه مؤلفه نخست حاصل از PCA که ۷۷/۵ درصد از واریانس داده‌ها را دربرداشتند و ترکیب آنها با دو سنج مهم  $W_{ext}$  و  $TI$  به دست آمد. همچنین، از رگرسیون گام‌به‌گام برای انتخاب بهترین ترکیب مؤلفه‌ها استفاده شد.

1. Backward Elimination
2. Forward Selection
3. K-Fold Cross-Validation
4. Segment

### ۳- نتایج

#### ۳-۱- برآورد حجم به روش رگرسیون چندگانه

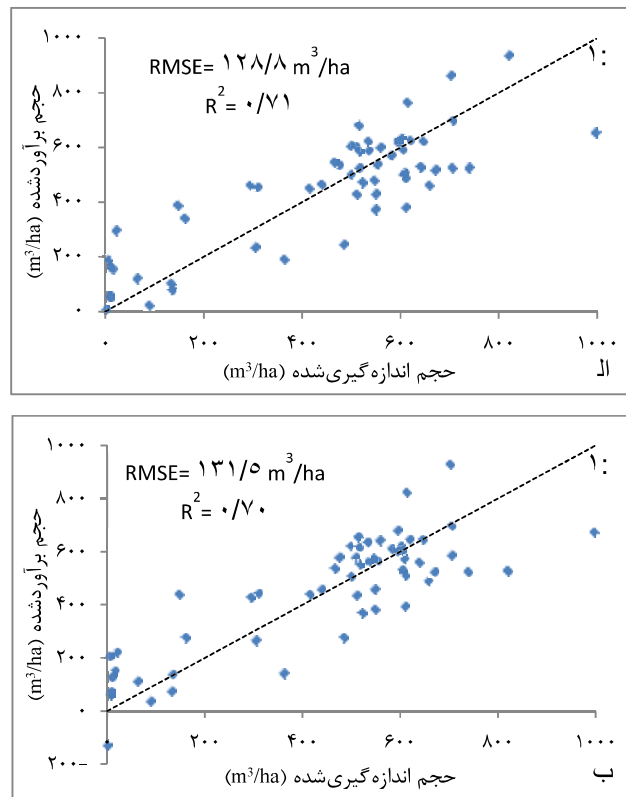
نتایج دو مدل از بهترین مدل‌های رگرسیونی چندگانه براساس سنجه‌های استخراج‌شده از شکل موج و مؤلفه‌های حاصل از تحلیل PCA در جدول ۴ آورده شده است. چنانچه مشاهده می‌شود، بهترین نتیجه براساس سنجه‌های شکل موج با استفاده از مجموعه سنجه‌های  $W_{ext}$ ,  $TI$ ,  $H_{lead}$ ,  $H_{trail}$  و  $H_{\Delta}$  با  $RMSE$  و  $R_a^2$  به ترتیب ۱۲۸/۸ مترمکعب درهکتار و ۰/۶۸ به دست آمد. ارتفاع برآوردشده با استفاده از این مدل در برابر ارتفاع اندازه‌گیری شده در شکل ۱(الف) مشاهده می‌شود. در مدل رگرسیونی چندگانه براساس مؤلفه‌های حاصل از PCA، بهترین نتیجه زمانی به دست آمد که

سنجه  $W_{ext}$  و شاخص زمینی (TI) همراه با سه مؤلفه اصلی نخست (دربرگیرنده ۷۷/۵ درصد واریانس داده‌ها) وارد مدل شدند (شکل ۱(ب)). اهمیت مدل‌های توسعه داده‌شده با استفاده از آزمون  $F$ ، و اهمیت هریک از متغیرهای پیش‌بینی‌کننده براساس آزمون  $t$ - استیودنت بررسی شد. محاسبه آماره  $t$  ضرایب رگرسیون که بیانگر اهمیت نسبی هریک از سنجه‌های مورد استفاده در مدل است، نشان داد که در همه مدل‌های رگرسیونی توسعه داده‌شده، به‌طور کلی، دو سنجه  $W_{ext}$  و  $TI$  سهم بیشتری در تشریح مدل دارند. براساس نتایج آزمون  $t$ - استیودنت، سنجه‌های  $H_{lead}$  در مدل ۱ و مؤلفه  $PC_2$  در مدل ۲ جدول ۴ مهم شناخته نشدند.

جدول ۴. نتایج آماری دو مدل رگرسیونی چندگانه برای برآورد موجودی سرپا

کد	مدل	ضرایب	RMSE (متر)	$R_a^2$	MAE (متر)	RMSE (درصد)	P-value
۱	$V = aW_{ext} - bTI + cH_{lead} + dH_{trail} + eH_{\Delta} - f$	$a = 7/723^*$ $b = -4/406^{**}$ $c = 1/475^{ns}$ $d = 18/920^{***}$ $e = 19/482^{***}$ $f = -286/360^{**}$	۱۲۸/۸	۰/۶۸	۱۰۲/۵	۲۸/۵	$5/986e-12$
۲	$H_{max} = aPC_1 + bPC_2 + cPC_3 + dW_{ext} + eTI + f$	$a = -158/252^{**}$ $b = 37/088^{ns}$ $c = -252/133^{***}$ $d = 26/421^{***}$ $e = -5/875^{**}$ $f = -546/437^{***}$	۱۳۱/۵	۰/۶۷	۱۰۳/۹	۲۹/۱	$4/234e-12$

\*\*\*: اهمیت در سطح ۰/۰۰۱، \*\*: معنی‌داری در سطح ۰/۰۵، \*: اهمیت در سطح ۰/۰۱، ns: بی‌اهمیت



شکل ۱. حجم سرپای برآورد شده به روش رگرسیون چندگانه براساس سنجش‌های شکل موج (الف) و مؤلفه‌های PCA (ب) در برابر حجم سرپای اندازه‌گیری شده

از سه سنجه  $W_{ext}$ ،  $TI$  و  $H_{\Delta}$ ، حجم سرپای با صحت مشابهی برآورد گردید (مدل ۲ جدول ۵، شکل ۲(ب)). طراحی‌های گوناگون شبکه عصبی مصنوعی برای برآورد موجودی سرپای، با استفاده از کل مؤلفه‌های حاصل از PCA یا مجموعه مؤلفه‌های انتخاب شده براساس رگرسیون گام‌به‌گام، با نتایج خوبی همراه نبود و مقدار خطای برآورد (RMSE) زیاد بود. به همین دلیل، شبکه با سه مؤلفه نخست PCA که دارای بیشترین اطلاعات داده است، همچنین ترکیب آنها با دو سنجه مهم  $W_{ext}$  و  $TI$ ، طراحی شد. بهترین نتیجه با استفاده از شبکه‌ای سه‌لایه‌ای با متغیرهای ورودی  $PC_1$ ،  $PC_2$ ،  $PC_3$  و  $W_{ext}$  به دست آمد. با استفاده از این مدل، موجودی سرپای جنگل با RMSE و  $R^2_a$  به ترتیب  $119/9 m^3/ha$  و  $0/73$  برآورد شد (شکل ۳).

### ۳-۲- برآورد حجم به‌روش شبکه عصبی مصنوعی

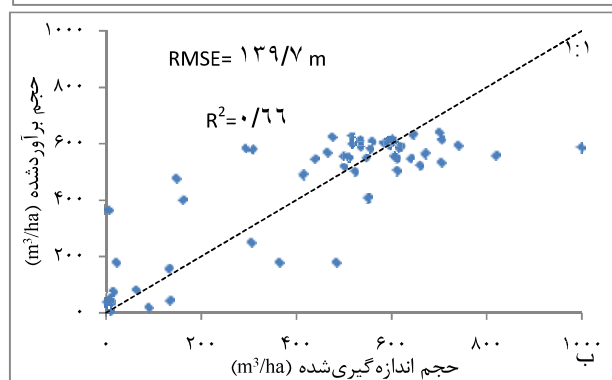
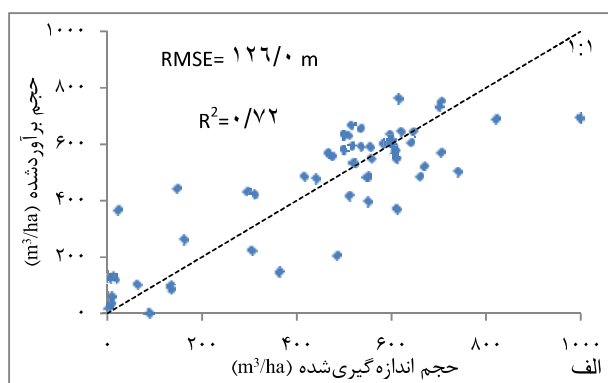
برای تعیین ساختار بهینه شبکه عصبی مصنوعی، شبکه با تعداد لایه‌های پنهان (۱ تا ۲)، گره‌ها (بسته به تعداد ورودی‌ها) و تکرارهای متفاوت، ارزیابی شد. اگرچه تلاش شد تا روش انتخاب سنجه‌ها براساس تجربه به دست آمده از مدل‌های رگرسیونی چندگانه و آگاهی از اهمیت سنجه‌ها در برآورد مشخصه مورد نظر صورت گیرد، شبکه‌های بسیار زیادی، براساس مجموعه‌های گوناگون سنجه‌ها و تغییرات ساختاری شبکه، طراحی شد. طبق نتایج به دست آمده، با استفاده از یک شبکه عصبی سه‌لایه‌ای (یک لایه پنهان) با متغیرهای ورودی  $W_{ext}$ ،  $TI$ ،  $H_{lead}$ ،  $H_{trail}$  و  $H_{\Delta}$ ، می‌شود حجم سرپای جنگل را با  $RMSE = 126/0 m^3/ha$  و  $R^2_a = 0/69$  برآورد کرد (شکل ۲(الف)). این درحالیست که تنها با استفاده



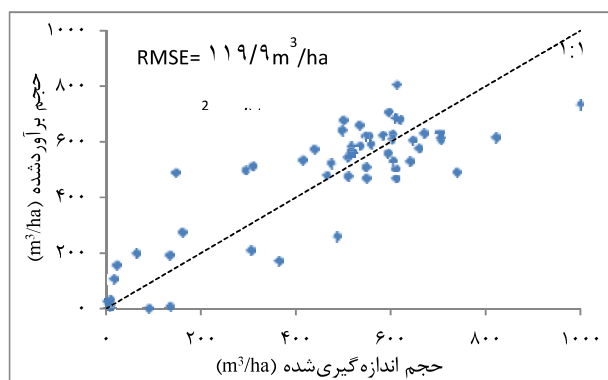
برآورد موجودی سرپای جنگل با استفاده از داده‌های لیدار فضایی ICESat/GLAS ...

جدول ۵. مشخصات سه مدل شبکه عصبی مصنوعی و نتایج آماری آنها برای برآورد موجودی سرپا

کد	ورودی شبکه	مشخصات شبکه			RMSE (متر)	$R^2_a$	MD (متر)	RMSE (درصد)
		تعداد لایه پنهان	تعداد گره پنهان	تعداد تکرار				
۱	$H_{\Delta}$ , $H_{trail}$ , $H_{lead}$ , $TI$ , $W_{ext}$	۱	۴	۱۵	۱۲۶/۰	۰/۶۹	۹۶/۶	۲۷/۹
۲	$H_{\Delta}$ , $TI$ , $W_{ext}$	۱	۳	۱۵	۱۳۹/۷	۰/۶۴	۱۰/۱۰	۴۰/۰
۳	$W_{ext}$ و $PC_1$ , $PC_2$ , $PC_3$	۱	۵	۱۵	۱۱۹/۹	۰/۷۳	۹۵/۵	۲۶/۶



شکل ۲. حجم سرپای برآوردشده به روش شبکه عصبی مصنوعی براساس سنجش‌های شکل‌موج با استفاده از مدل ۱ (الف) و ۲ (ب) جدول ۵ در برابر حجم سرپای اندازه‌گیری‌شده



شکل ۳. حجم سرپای برآوردشده به روش شبکه عصبی مصنوعی براساس مؤلفه‌های حاصل از PCA (مدل ۳ جدول ۵) در برابر حجم سرپای اندازه‌گیری‌شده

#### ۴- بحث و نتیجه گیری

برآورد موجودی سرپای جنگل با استفاده از داده‌های لیدار، به‌ویژه در جنگل‌های کوهستانی و پرشیب، بسیار چالش‌برانگیز است. در تحقیق حاضر، قابلیت داده‌های GLAS ماهواره ICESat برای برآورد حجم جنگل در جنگل‌های کوهستانی شمال ایران با توده‌های انبوه و شیب زیاد بررسی شد و برای کاهش اثر شیب زمین، اطلاعات مربوط به شرایط توپوگرافی از یک مدل رقومی ارتفاع استخراج (TI) و مورد استفاده قرار گرفت. دو روش آماری رگرسیون چندگانه و شبکه عصبی مصنوعی براساس سنجه‌های استخراج‌شده از شکل‌موج و مؤلفه‌های حاصل از PCA برای برآورد حجم جنگل استفاده شد.

در این ارتباط، به‌طور کلی هر دو روش رگرسیون چندگانه و شبکه عصبی مصنوعی براساس سنجه‌های شکل‌موج و مؤلفه‌های حاصل از PCA نتایج تقریباً مشابهی داشتند. به‌طوری‌که می‌شود موجودی سرپای جنگل را با خطای حدود  $130-120 \text{ m}^3/\text{ha}$  برآورد کرد. در روش رگرسیون چندگانه براساس سنجه‌های شکل‌موج، بهترین نتیجه با استفاده از مجموعه سنجه‌های  $H_{\Delta}$ ،  $H_{\text{trail}}$ ،  $H_{\text{lead}}$ ،  $TI$ ،  $W_{\text{ext}}$  به‌دست آمد ( $RMSE=128/8 \text{ m}^3/\text{ha}$  و  $R^2_a=0/68$ ). همان‌طور که پیش‌تر بیان شد، استخراج سنجه‌های  $H_{\text{trail}}$ ،  $H_{\text{lead}}$  و  $H_{\Delta}$  بر مبنای شناخت صحیح قله زمین استوار است که در مناطق کوهستانی و پرشیب با قطعیت همراه نیست. در مدل رگرسیونی چندگانه براساس مؤلفه‌های حاصل از PCA، امکان برآورد موجودی سرپای با  $RMSE=131/5 \text{ m}^3/\text{ha}$  با استفاده از سه مؤلفه اصلی نخست، سنجه  $W_{\text{ext}}$  و شاخص زمینی (TI) فراهم شد. اما در این مدل موجودی سرپای، در قطعه‌نمونه‌ای با حجم بسیار کم ( $0/69 \text{ m}^3/\text{ha}$ )، منفی برآورد شد.

در روش شبکه عصبی مصنوعی نیز بهترین نتیجه با استفاده از مجموعه سنجه‌های  $H_{\text{trail}}$ ،  $H_{\text{lead}}$ ،  $TI$ ،  $W_{\text{ext}}$  و  $H_{\Delta}$  به‌دست آمد ( $RMSE=126/0 \text{ m}^3/\text{ha}$  و  $R^2_a=0/69$ ). این نتیجه با استفاده از مؤلفه‌های حاصل از

PCA اندکی بهبود یافت. به‌طوری‌که فقط با استفاده از سه مؤلفه اصلی نخست PCA و سنجه  $W_{\text{ext}}$ ، موجودی سرپای با  $RMSE=119/9 \text{ m}^3/\text{ha}$  و  $R^2_a=0/73$  برآورد شد. برتری این مدل از دیگر مدل‌ها در متغیرهای ورودی آن است که استخراج آنها به‌دور از قطعیت نیست. ضمن اینکه این مدل فقط براساس اطلاعات استخراج‌شده از شکل‌موج توسعه پیدا کرده و از داده کمکی مدل رقومی ارتفاع استفاده نشده است. نکته دیگر اینکه این مدل، در مقایسه با دیگر مدل‌ها، حجم جنگل را، در قطعه‌نمونه‌های تنک با موجودی سرپای کم، بهتر برآورد کرده است.

روزت و همکاران<sup>۱</sup> (۲۰۰۸b) با استفاده از روش رگرسیونی، موجودی جنگل را در توده‌های آمیخته با غالبیت پهن‌برگ و شیب متوسط ۱۸ درصد، با  $RMSE=75/6 \text{ m}^3/\text{ha}$  و  $R^2_a=0/47$  برآورد کردند. نلسون و همکاران<sup>۲</sup> (۲۰۰۹) نیز موجودی سرپای جنگل را با استفاده از روش شبکه عصبی مصنوعی، براساس سنجه‌های استخراج‌شده از شکل‌موج‌ها با  $RMSE=87 \text{ m}^3/\text{ha}$  و  $R^2_a=0/75$  برآورد کردند. این تحقیق در سطح وسیع (۸۱۱۴۱۴ کیلومتر مربع)، با شرایط متنوع از جنگل‌های سوزنی‌برگ خزان‌کننده، سوزنی‌برگ همیشه‌سبز، پهن‌برگ و جنگل‌های مختلط که ۸۶/۱ درصد از لکه‌های زمینی GLAS در شیب کمتر- مساوی  $10^\circ$  قرار دارند، انجام شد. با توجه به شرایط متفاوت مناطق مورد مطالعه از نظر شیب، وسعت، تپ و تراکم جنگل، می‌شود بیان کرد این نتایج تقریباً مشابه نتایج به‌دست‌آمده در تحقیق حاضر است.

در همه مدل‌های توسعه داده‌شده در این تحقیق، حجم سرپای در یکی از قطعه‌نمونه‌ها با شیب بیش از ۴۵ درصد و تراکم زیاد (حجم  $997 \text{ m}^3/\text{ha}$ )، کمتر از حد برآورد شده است. همچنین، در قطعه‌نمونه‌هایی با درختان کم‌ارتفاع (کمتر از ۱۰ متر)، موجودی کم

1. Rosette et al.  
2. Nelson et al.

داده‌های لیدار هوایی در برآورد ارتفاع پایه‌های درختی پلت و ممرز، مجله جنگل ایران، سال ششم، شماره ۲، صص. ۱۴۰-۱۲۷.

درویش‌صفت، ع.ا.، پیر باوقار، م.، رجب‌پور رحمتی، م. (مترجمان)، ۱۳۹۰، **سنجش از دور برای مدیران GIS**، انتشارات دانشگاه تهران، تهران، چاپ اول.

رجب‌پور رحمتی، م.، ۱۳۹۴، **برآورد ارتفاع تاج پوشش جنگل با استفاده از داده‌های ICESat GLAS (مطالعه موردی: جنگل‌های کجور)**، رساله دکتری، دانشگاه تهران.

رجب‌پور رحمتی، م.، درویش‌صفت، ع.ا.، بغدادی، ن.، نمیرانیان، م.، صوفی مریو، ح.، ۱۳۹۴، **برآورد ارتفاع تاج پوشش جنگل در مناطق کوهستانی با استفاده از داده‌های لیدار فضایی ICESat-GLAS (مطالعه موردی: حوزه ۴۶ جنگل‌های شمال ایران)**، فصلنامه علمی- پژوهشی تحقیقات جنگل و صنوبر ایران، سال بیست‌وسوم، شماره ۱، صص. ۹۰-۱۰۳.

سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری کشور، ۱۳۸۱، **جدول حجم گونه‌های جنگلی شمال کشور به جز راش**، دفتر فنی جنگلداری.

سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری کشور، ۱۳۶۴، **جدول حجم گونه راش برای جنگل‌های مازندران**، دفتر فنی جنگلداری.

نمیرانیان، م.، ۱۳۸۵، **اندازه‌گیری درخت و زیست‌سنجی جنگل**، انتشارات دانشگاه تهران، تهران.

Ahmadi, K., Alavi, S.J., Kouchaksaraei, M.T. & Aertsen, W., 2013, **Non-Linear Height-Diameter Models for Oriental Beech (Fagus Orientalis Lipsky) in the Hyrcanian Forests, Iran**, Biotechnology, Agronomy, Society and

( $20 \text{ m}^3/\text{ha}$ ) و شیب زیاد (۵۰-۴۰ درصد)، بیش‌برآورد مشاهده می‌شود که ممکن است نشان از ناتوانی داده‌های GLAS در برآورد موجودی سرپای در چنین توده‌هایی باشد. این نتیجه در مطالعات نلسون (۲۰۱۰) و نلسون و همکاران (۲۰۰۹) نیز گزارش شده است.

به‌طور کلی، طبق نتایج حاصل می‌شود بیان کرد که این مشخصه مهم جنگل را با داده‌ها، پردازش‌ها و روش‌های تحلیل به‌کاررفته، می‌شود با خطای حدود ۲۶/۶ درصد برآورد کرد. کسب این مقدار صحت برای بسیاری از مطالعات، به‌ویژه در سطوح وسیع و پایش‌های دوره‌ای در مقیاس متوسط، چه‌بسا بسیار بارز باشد، به‌ویژه آنکه این رویکرد برای برآورد مشخصه حجم جنگل، درمقایسه با روش‌های میدانی متداول در ایران تقریباً بدون هیچ هزینه‌ای و فقط با صرف زمان بسیار اندک اجرایی است. اختلاف زمانی پنج‌ساله بین داده لیدار و برداشت‌های میدانی احتمالاً یکی از منابع خطا در این تحقیق است، هرچند گونه‌های پهن‌برگ کندرشد موجود در جنگل مورد مطالعه با مرحله رویشی کلیماکس، رشد سالیانه بسیار کمی از نظر قطری و ارتفاعی دارند. دانش و تجربه به‌دست‌آمده در این تحقیق ممکن است زمینه‌ساز به‌کار بردن داده‌های نسل بعدی ماهواره ICESat-II باشد که از سال ۲۰۱۷ در اختیار خواهند بود.

#### ۵- سپاسگزاری

در این مقاله بخشی از نتایج حاصل از طرح پژوهشی شماره ۹۲۰۳۰۱۹۰ مصوب صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور ارائه شده است. لذا نویسندگان وظیفه خود می‌دانند که از حمایت‌های صندوق صمیمانه تشکر نمایند.

#### ۶- منابع

خرمی، ر.ع.، درویش‌صفت، ع.ا.، طبری کوچکسرای، م.، شتایی جویباری، ش.، ۱۳۹۳، **بررسی قابلیت**

- Chen, Q., 2010, **Retrieving Vegetation Height of Forests and Woodlands over Mountainous Areas in the Pacific Coast Region Using Satellite Laser Altimetry**, Remote Sensing of Environment, 14: 1610-1627. <http://www2.hawaii.edu/~qichen/cv/Chen%202010%20RSE.pdf>.
- Chen, G. & Hay, G.J., 2011, **A Support Vector Regression Approach to Estimate Forest Biophysical Parameters at the Object Level Using Airborne Lidar Transects and QuickBird Data**, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 77(7): 733-741. [https://clas-pages.uncc.edu/gang-chen/wp-content/uploads/sites/184/2012/12/Chen\\_2011\\_PERS\\_77.pdf](https://clas-pages.uncc.edu/gang-chen/wp-content/uploads/sites/184/2012/12/Chen_2011_PERS_77.pdf).
- Duncanson, L.I., Niemann, K.O. & Wulder, M.A., 2010, **Estimating Forest Canopy Height and Terrain Relief from GLAS Waveform Metrics**, Remote Sensing of Environment, 114: 138-154. [http://geog.uvic.ca/olaf/ON\\_personal/Publications\\_files/Duncanson\\_et\\_al\\_2010.pdf](http://geog.uvic.ca/olaf/ON_personal/Publications_files/Duncanson_et_al_2010.pdf).
- Fang, Z. & Bailey, R.L., 1998, **Height-Diameter Models for Tropical Forests on Hainan Island in Southern China**, Forest Ecology and Management, 110: 315-327. [http://dx.doi.org/10.1016/S0378-1127\(98\)00297-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0378-1127(98)00297-7).
- Fayad, I., Baghdadi, N., Bailly, J-S., Barbier, N., Gond, V., El Hajj, M., Fabre, F. & Bourguin, B., 2014, **Canopy Height Estimation in French Guiana with LiDAR ICESat/GLAS Data Using Principal Component Analysis and Random Forest Regressions**, Remote Sensing, 6: 11883-11914. <http://dx.doi.org/10.3390/rs61211883>.
- Fu, A., Guoqing, S. & Zhifeng, G., 2009, **Estimating Forest Biomass with GLAS Samples and MODIS Imagery in Northeastern China**, Proc. SPIE, 7498: 1-8.
- Gobakken, T., Bollandsås, O.M. & Næsset, E., 2015, **Comparing Biophysical Forest** Environment, 17(3): 431-440.
- Andersen, H.E., Reutebuch, S.E. & McGaughey, R.J., 2006, **A Rigorous Assessment of Tree Height Measurements Obtained Using Airborne Lidar and Conventional Field Methods**, Canadian Journal of Remote Sensing, 32(5): 355-366. [www.fs.fed.us/pnw/pubs/journals/pnw\\_2006\\_andersen001.pdf](http://www.fs.fed.us/pnw/pubs/journals/pnw_2006_andersen001.pdf).
- 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. <http://dx.doi.org/10.3390/rs6053693>.
- Baghdadi, N., Maire, G., Fayad, I., Bailly, J.S., Nouvellon, Y., Lemos & C., Hakamada, R., 2014, **Testing Different Methods of Forest Height and Aboveground Biomass Estimations from ICESat/GLAS Data in Eucalyptus Plantations in Brazil**, IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 7(1): 290-299. <http://dx.doi.org/10.1109/JSTARS.2013.2261978>.
- Balzter, H., Rowland, C.S. & Saich, P., 2007, **Forest Canopy Height and Carbon Estimation at Monks Wood National Nature Reserve, UK, Using Dual-Wavelength SAR Interferometry**, Remote Sensing of Environment, 108: 224-239. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2006.11.014>.
- Burnham, K.P. & Anderson, D.R., 2002, **Information and Likelihood Theory: A Basis for Model Selection and Inference, in Model Selection and Multimodel Inference: A Practical Information-Theoretic Approach**, 2nd ed. New York: Springer-Verlag Press, 49-97.
- Cannon, A.J., 2012, **Package 'Monmlp': Monotone Multi-Layer Perceptron Neural Network**, Comprehensive R Archive Network (CRAN), 1-14. <https://cran.r-project.org/web/packages/monmlp/monmlp.pdf>

- ICESat, Geophysical Research Letters, 32(22), 1-4.  
[http://www.fs.fed.us/global/iitf/pubs/ja\\_iitf\\_2005\\_Lefsky001.pdf](http://www.fs.fed.us/global/iitf/pubs/ja_iitf_2005_Lefsky001.pdf).
- Miller, D.R., Quineb, Ch.P. & Hadley, W., 2000, **An Investigation of the Potential of Digital Photogrammetry to Provide Measurements of Forest Characteristics and Abiotic Damage**, Forest Ecology and Management, 135: 279-288. [http://dx.doi.org/10.1016/S0378-1127\(00\)00286-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0378-1127(00)00286-3).
- Nelson, R., 2010, **Model Effects on GLAS-Based Regional Estimates of Forest, Biomass and Carbon**, International Journal of Remote Sensing, 31(5): 1359-1372. <http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20110015334.pdf>.
- Nelson, R., Ranson, K.J., Sun, G., Kimes, D.S., Kharuk, V. & Montesano, P., 2009, **Estimating Siberian Timber Volume Using MODIS and ICESat/GLAS**, Remote Sensing of Environment, 113: 691-701. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2008.11.010>.
- NSIDC, 2012, GLAS altimetry product usage guidance, Available at:  
[http://nsidc.org/data/docs/daac/glas\\_altimetry/pdf/NSIDC\\_AltUserGuide\\_Rel33.pdf](http://nsidc.org/data/docs/daac/glas_altimetry/pdf/NSIDC_AltUserGuide_Rel33.pdf).
- Rajabpour rahmati, M., Baghdadi, N., Darvishsefat, A.A., Namiranian, M., Fayad, I. Bailly, J.S. & Gond, V., 2016, **Capability of GLAS/ICESat Data to Estimate Forest Canopy Height and Volume in Mountainous Forests of Iran**, IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 8(11): 5246 - 5261. <http://dx.doi.org/10.1109/JSTARS.2015.2478478>.
- Rao, R.B., Fung, G. & Rosales, R., 2008, **On the Dangers of Cross-Validation, an Experimental Evaluation**, In: Proceedings of the SIAM International Conference on Data Mining, SDM, Atlanta, Georgia, USA, 588-596.
- Characteristics Estimated from Photogrammetric Matching of Aerial Images and Airborne Laser Scanning Data**, Scandinavian Journal of Forest Research, 30(1): 73-86.
- Healey, S.P., Patterson, P.L., Saatchi, S., Lefsky, M.A., Lister, A.J. & Freeman, E.A., 2012, **A Sample Design for Globally Consistent Biomass Estimation Using Lidar Data from the Geoscience Laser Altimeter System (GLAS)**, Carbon Balance and Management, 7:10. <http://www.cbmjournals.com/content/7/1/10>.
- Huang, S., Titus, S.J. & Wiens, D.P., 1992, **Comparison of Nonlinear Height-Diameter Functions for Major Alberta Tree Species**, Canadian Journal of Forest Research, 22: 1297-1304.
- Husson, F., Josse, J., Le, S. & Mazet, J., 2015, **Package 'FactoMineR': Multivariate Exploratory Data Analysis and Data Mining**, Comprehensive R Archive Network (CRAN), 1-95.
- Kaastra, I. & Boyd, M., 1996, **Designing a Neural Network for Forecasting Financial and Economic Time Series**, Neurocomputing, 10: 215-236. <http://www.eecs.harvard.edu/~parkes/cs286r/spring08/cours.pdf>.
- katz, J.O., 1992, **Developing Neural Network Forecasters for Trading**, Technical analysis for stocks and commodities, 10(4): 160-168.
- 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: 1-18. [http://www.fs.fed.us/global/iitf/pubs/ja\\_iitf\\_2007\\_lefsky001.pdf](http://www.fs.fed.us/global/iitf/pubs/ja_iitf_2007_lefsky001.pdf).
- Lefsky, M.A., Harding, D.J., Keller, M., Cohen, W.B., Carabajal, C.C., Espirito-Santo, F.D., Hunter, M.O., de Oliveira, R. & de Camargo, P.B., 2005, **Estimates of Forest Canopy Height and Aboveground Biomass Using**

- Rosette, J.A.B., North, P.R.J. & Suarez, J.C., 2008a, **Vegetation Height Estimates for a Mixed Temperate Forest Using Satellite Laser Altimetry**, International Journal of Remote Sensing, 29(5): 1475-1493. DOI: 10.1080/01431160701736380.
- Rosette, J.A.B., North, P.R.J. & Suarez, J.C., 2008b, **Satellite Lidar Estimation of Stemwood Volume; A Method Using Waveform Decomposition**, The photogrammetric Journal of Finland, 21(1): 76-85.  
[http://foto.hut.fi/seura/julkaisut/pjf/pjf\\_e/2008/Rosette\\_et\\_al\\_2008\\_PJF.pdf](http://foto.hut.fi/seura/julkaisut/pjf/pjf_e/2008/Rosette_et_al_2008_PJF.pdf).
- Silva Scaranello, M.A., Alves, L.F., Vieira, S.A., Camargo, P.B., Joly, C.A. & Martinelli, L.A., 2012, **Height-Diameter Relationships of Tropical Atlantic Moist Forest Trees in Southeastern Brazil**, Scientia Agricola, 69(1): 26-37.
- Sun, G., Ranson, K.J., Kimes, D.S., Blair, J.B. & Kovacs, K., 2008, **Forest Vertical Structure from GLAS: An Evaluation Using LVIS and SRTM Data**, Remote Sensing of Environment, 112: 107-117.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2006.09.036>.
- Zhifeng, G., Hong, CH. & Guoqing, S., 2010, **Estimating Forest Aboveground Biomass Using HJ-1 Satellite CCD and ICESat GLAS Waveform Data**, Science China Earth Sciences, 53(1): 16-25.