

برآورد زی توده روی زمینی درختان جنگل با استفاده از تصویرهای نوری و راداری (مطالعه موردی: حوضه ناو اسالم گیلان)

ساسان وفایی^۱، جواد سوسنی^{۲*}، کامران عادل^۳، هادی فدایی^۴ و حامد نقوی^۳

۱- دانشجوی دکتری جنگل‌داری، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران

۲- نویسنده مسئول، استادیار، گروه جنگل‌داری، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران. پست الکترونیک: soosani.j@lu.ac.ir

۳- استادیار، گروه جنگل‌داری، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران

۴- دکترای سنجش از دور، دانشکده انفورماتیک، دانشگاه کیوتو، کیوتو، ژاپن

تاریخ دریافت: ۹۵/۰۶/۲۹

تاریخ پذیرش: ۹۵/۰۹/۰۳

چکیده

استفاده از داده‌های سنجش از دور یکی از روش‌های کاربردی در برآورد مقدار زی توده گیاهی است. در این پژوهش، داده‌های راداری ماهواره آوس-۲، با قطبش کامل و تصویرهای نوری ماهواره سنتینل-۲، برای برآورد زی توده روی زمینی درختان در جنگل‌های سری یک حوضه ناو اسالم گیلان استفاده شد. مقدار بازپراکنش در قطبش‌های مختلف، خصوصیات بافت و ویژگی‌های تجزیه هدف از تصویرهای راداری و باندهای اصلی و مصنوعی به دست آمده از تصویرهای نوری در سه ترکیب مختلف شامل تصویرهای راداری، تصویرهای نوری و ترکیب تصویرهای راداری و نوری، به عنوان ورودی‌های مدل شبکه عصبی مصنوعی و رگرسیون خطی چندگانه در نظر گرفته شدند. به منظور اندازه‌گیری زمینی زی توده از ۱۴۹ قطعه نمونه استفاده شد. ارزیابی شبکه‌های عصبی و رگرسیون خطی چندگانه با استفاده از آماره‌های R^2 و $RMSE$ نشان داد که در تمامی حالت‌ها مدل شبکه‌های عصبی نسبت به رگرسیون خطی کارایی بهتری در برآورد زی توده روی زمینی درختان داشت. نتایج بهترین شبکه عصبی نشان داد که ترکیب داده‌های نوری و راداری با مقدار R^2 و $RMSE$ به ترتیب $0/86$ و $31/62$ مگاگرم در هکتار ($15/34$ درصد) می‌تواند زی توده درختی را برآورد کند. همچنین، نتایج استفاده از تصویرهای راداری و نوری به طور مجزا نشان داد که مقدار R^2 و $RMSE$ برای مدل‌سازی زی توده توسط تصویرهای راداری به ترتیب $0/57$ و $49/17$ مگاگرم در هکتار ($23/85$ درصد) و برای تصویرهای نوری $0/72$ و $39/53$ مگاگرم در هکتار ($19/17$ درصد) بود که نشان‌دهنده برتری مدل‌سازی زی توده روی زمینی توسط تصویرهای نوری بود. نتایج کلی نشان از برآوردهای دقیق‌تر زی توده در صورت استفاده هم‌زمان از تصویرهای راداری و نوری و استفاده از مدل شبکه عصبی مصنوعی داشت.

واژه‌های کلیدی: آوس، رادار با روزنه مجازی، سنتینل، سنجش از دور، شبکه عصبی مصنوعی.

مقدمه

فتوسنتز مقادیر زیادی از دی‌اکسید کربن را جذب می‌کند. بنابراین، ارزیابی و برآورد زی توده ذخیره شده در جنگل به عنوان یک ابزار کلیدی برای درک چرخه جهانی کربن

زی توده جنگل یکی از مهم‌ترین منابع اصلی کربن زیست‌سپهر است، زیرا پوشش گیاهی جنگل به واسطه فرایند

در نظر گرفته شده است (Baghdadi et al., 2014). بیشتر زی توده یک جنگل در بخش فوقانی درختان (از طوقه تا جوانه انتهایی) وجود دارد و همچنین تمرکز روش‌های برآورد زی توده در ارتباط با اندازه‌گیری بخش بالایی درختان است. تخمین زی توده جنگل می‌تواند از طریق اندازه‌گیری‌های زمینی و یا استفاده از روش‌های سنجش از دوری و سیستم اطلاعات جغرافیایی باشد (Vashum & Jayakumar, 2012). اگرچه اندازه‌گیری زمینی منجر به تخمین‌های دقیق‌تری از مقدار زی توده جنگل می‌شود، اما یک روش طاقت‌فرسا، هزینه‌بر، زمان‌بر و به‌ویژه تخریبی است.

اگرچه در بسیاری از تحقیقات، برآورد مقدار زی توده به کمک داده‌های نوری رضایت‌بخش بوده است، اما برآورد این مشخصه مهم جنگل در بسیاری از مناطق از جمله جنگل‌های با تاج‌پوشش مترکم و تنک، با تنوع زیاد و ساختار پیچیده و در نواحی کوهستانی چالش‌برانگیز است (Attarchi & Gloaguen, 2014). به‌علاوه، در بسیاری از مناطق جنگلی وجود ابرهای دائمی استفاده از تصویرهای نوری را محدود می‌کند. خوشبختانه پیشرفت فناوری سنجش از دور و امکان استفاده از امواج مایکروویو از جمله امواج راداری در طول موج‌های P ، L و تا حدودی C که در تاج‌پوشش نفوذ می‌کند و اطلاعاتی از سطوح زیرین تاج‌پوشش ارایه می‌دهد، بر محدودیت‌های استفاده از تصویرهای نوری، چیره شده است (Darvishi, 2014).

در دو دهه اخیر، پژوهشگران داخل و خارج کشور (Carreiras et al., 2006; Shataee et al., 2012; Kalbi et al., 2014) پتانسیل استفاده از طول موج‌های نوری را در برآورد مشخصه‌های مختلف جنگل از جمله تاج‌پوشش، سطح مقطع و حجم به‌کار گرفتند. همچنین، در برخی مطالعات، ارتباط بازپراکنش طول موج‌ها را با مقدار زی توده با استفاده از سیستم‌های راداری بررسی کردند (Rauste, 2005; Cartus et al., 2012). نتایج استفاده از داده‌های راداری ماهواره آلوس (ALOS) در برآورد زی توده در مناطق مختلف دنیا از جمله سوئد (Eriksson et al., 2007)، استرالیا (Lucas et al., 2010)، آمریکای شمالی (Cartus et al., 2012)، برزیل (Baghdadi et al., 2014) و مالزی (Hamdan et al., 2015) نشان از کاربرد مناسب این داده‌ها دارد.

در کنار مطالعاتی که به بررسی امکان برآورد مشخصه‌های مختلف جنگل با استفاده از تصویرهای نوری و یا راداری پرداخته است، مطالعات دیگری امکان استفاده هم‌زمان از تصویرهای نوری و راداری به‌منظور برآورد هرچه دقیق‌تر مشخصه‌های فیزیکی جنگل را مورد توجه قرار داده‌اند. هدف این مطالعات ترکیب داده‌های نوری و راداری برای حداکثر استفاده از رفتار طیفی طول موج‌های مختلف و تلفیق اطلاعات طیفی این دو نوع داده است. نتایج اغلب این تحقیقات نشان داده که در صورت ترکیب اطلاعات سنجنده‌های مختلف، نتایج بهتری به‌دست خواهد آمد (Rauste, 2005; Cutler et al., 2012).

در راستای استفاده از ترکیب داده‌های نوری و راداری در برآورد زی توده جنگل در داخل کشور نیز مطالعاتی انجام شده است که متأسفانه به دلیل دسترسی محدود به داده‌های راداری به‌ویژه داده‌های ماهواره تازه پرتاب شده آلوس-۲، هزینه زیاد داده‌ها و تخصصی بودن پردازش این تصویرهای تحقیقات انگشت‌شماری در رابطه با امکان استفاده از داده‌های راداری در برآورد مشخصه‌های جنگل انجام شده است. در این راستا، تحقیقی در جنگل‌های کوهستانی حوزه شفارود و جنگل‌های دست‌کاشت جلگه‌ای، به‌منظور برآورد زی توده درختان با استفاده از ترکیب داده‌های نوری و راداری انجام شد. نتایج بهترین مدل برآورد با مقدار R^2 معادل $0/73$ و $RMSE$ برابر با $13/88$ مگاگرم در هکتار گزارش شد (Amini & Sadeghi, 2013). در تحقیقی دیگر در جنگل‌های خیرودکنار نوشهر، زی توده جنگل به کمک ترکیب داده‌های راداری ماهواره و نوری ماهواره آلوس با R^2 برابر با $0/58$ و $RMSE$ در حدود $45/4$ مگاگرم در هکتار برآورد شد (Ghasemi et al., 2013). همچنین مدل‌سازی زی توده درختی با استفاده از رگرسیون خطی و بهره‌گیری از تصویرهای سنجنده‌های PALSAR و ETM+

در نظر گرفته شده است (Baghdadi et al., 2014). بیشتر زی توده یک جنگل در بخش فوقانی درختان (از طوقه تا جوانه انتهایی) وجود دارد و همچنین تمرکز روش‌های برآورد زی توده در ارتباط با اندازه‌گیری بخش بالایی درختان است. تخمین زی توده جنگل می‌تواند از طریق اندازه‌گیری‌های زمینی و یا استفاده از روش‌های سنجش از دوری و سیستم اطلاعات جغرافیایی باشد (Vashum & Jayakumar, 2012). اگرچه اندازه‌گیری زمینی منجر به تخمین‌های دقیق‌تری از مقدار زی توده جنگل می‌شود، اما یک روش طاقت‌فرسا، هزینه‌بر، زمان‌بر و به‌ویژه تخریبی است.

اگرچه در بسیاری از تحقیقات، برآورد مقدار زی توده به کمک داده‌های نوری رضایت‌بخش بوده است، اما برآورد این مشخصه مهم جنگل در بسیاری از مناطق از جمله جنگل‌های با تاج‌پوشش مترکم و تنک، با تنوع زیاد و ساختار پیچیده و در نواحی کوهستانی چالش‌برانگیز است (Attarchi & Gloaguen, 2014). به‌علاوه، در بسیاری از مناطق جنگلی وجود ابرهای دائمی استفاده از تصویرهای نوری را محدود می‌کند. خوشبختانه پیشرفت فناوری سنجش از دور و امکان استفاده از امواج مایکروویو از جمله امواج راداری در طول موج‌های P ، L و تا حدودی C که در تاج‌پوشش نفوذ می‌کند و اطلاعاتی از سطوح زیرین تاج‌پوشش ارایه می‌دهد، بر محدودیت‌های استفاده از تصویرهای نوری، چیره شده است (Darvishi, 2014).

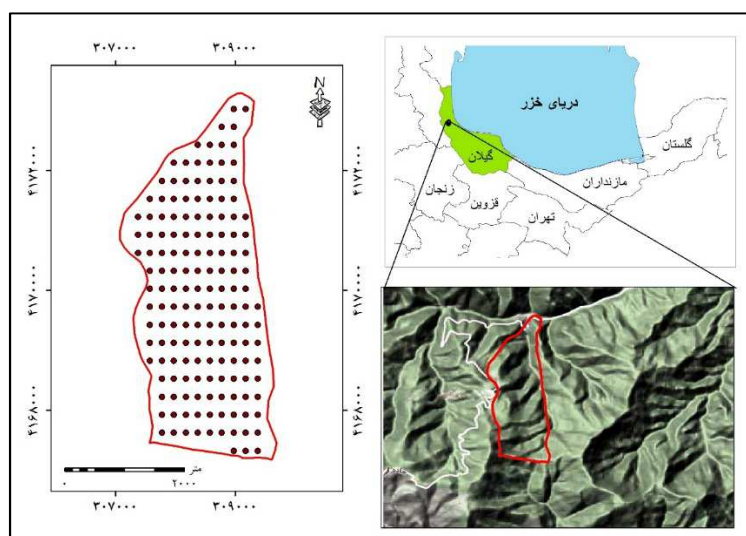
در دو دهه اخیر، پژوهشگران داخل و خارج کشور (Carreiras et al., 2006; Shataee et al., 2012; Kalbi et al., 2014) پتانسیل استفاده از طول موج‌های نوری را در برآورد مشخصه‌های مختلف جنگل از جمله تاج‌پوشش، سطح مقطع و حجم به‌کار گرفتند. همچنین، در برخی مطالعات، ارتباط بازپراکنش طول موج‌ها را با مقدار زی توده با استفاده از سیستم‌های راداری بررسی کردند (Rauste, 2005; Cartus et al., 2012). نتایج استفاده از داده‌های راداری ماهواره آلوس (ALOS) در برآورد زی توده در مناطق مختلف دنیا از جمله سوئد (Eriksson et al., 2007)، استرالیا (Lucas et al., 2010)، آمریکای شمالی (Cartus et al., 2012)، برزیل (Baghdadi et al., 2014) و مالزی (Hamdan et al., 2015) نشان از کاربرد مناسب این داده‌ها دارد.

در جنگل‌های هیرکانی با R^2 و $RMSE$ برابر با ۰/۷۶ و ۲۴/۰۵ مگاگرم در هکتار همراه بود (Attarchi & Gloaguen, 2014). همان‌طور که بیان شد، در داخل کشور مطالعات اندکی با استفاده از داده‌های راداری انجام شده است؛ بنابراین، هدف از پژوهش پیش‌رو در گام اول بررسی امکان به‌کارگیری داده‌های ماهواره‌ای راداری جدید ماهواره آلوس-۲ برای اولین بار در داخل کشور (به‌دلیل پرتاب ماهواره در دو سال اخیر) و همچنین داده‌های جدید ماهواره نوری سنتینل-۲ (Sentinel-2) در برآورد زی توده روی زمینی درختان جنگل‌های ناو اسالم بود. در گام بعد نیز هدف مقایسه کارایی روش پارامتریک رگرسیون خطی چندگانه با روش ناپارامتریک شبکه‌های عصبی مصنوعی در مدل‌سازی و برآورد زی توده روی زمینی درختان در جنگل‌های مذکور

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

این پژوهش در دامنه شرقی سری یک حوضه ۷ (ناو) اسالم با مساحت حدود ۱۱۰۰ هکتار انجام شد (شکل ۱). این سری جزئی از حوضه آبخیز ناورود به‌شمار می‌آید که در سیستم تصویر UTM در زون ۳۹ و بین ۳۰۷۰۷۷ تا ۳۰۹۶۹۳ متر شرقی و ۴۱۶۷۱۷۴ تا ۴۱۷۳۲۹۰ متر شمالی در استان گیلان واقع شده است. حداقل ارتفاع از سطح دریا منطقه ۲۰۰ متر و حداکثر آن ۱۱۰۰ متر است و جهت غالب آن شمال و شمال غربی است. مهم‌ترین گونه‌های درختی موجود در منطقه شامل افرا، راش، ممرز، نمدار و توسکای قشلاقی می‌باشند.



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه و قطعات نمونه برداشت‌شده در ایران و استان گیلان

تصویرهای مورد استفاده

Imager) از ماهواره سنتینل-۲ به تاریخ ۳۱ خرداد ۱۳۹۵ بود که در محدوده‌های مرئی و مادون قرمز نزدیک طیف الکترومغناطیس با اندازه تفکیک مکانی ۱۰ متر تصویربرداری می‌کند. مشخصات تصویرها در جدول ۱ آمده است.

در این تحقیق از تصویرهای مایکروویو مربوط به داده‌های رادار با روزه مجازی (SAR) سنجنده پالسا-۲ از ماهواره آلوس-۲ به تاریخ ۱۱ خردادماه ۱۳۹۴ و دارای قطبش کامل (HH, HV, VV, VH) استفاده شد. تصویرهای نوری اخذشده مربوط به سنجنده (Multi Spectral) MSI

جدول ۱- مشخصات تصویرهای ماهواره‌ای مورد استفاده

ماهواره	سنجنده	فرمت	تاریخ برداشت	تفکیک	سطح تصحیحات	زاویه فرود
سنتینل-۲	MSI	JP2	20-6-2016	۱۰ متر	LIC	--
آلوس-۲	PALSAR-2	CEOS	01-06-2015	۶ متر	LI.1	۳۵/۳

روش پژوهش

مراحل انجام این تحقیق به‌طور کلی شامل سه بخش برداشت اطلاعات میدانی، پیش‌پردازش و پردازش تصویرهای ماهواره‌ای و مدل‌سازی مقدار زی‌توده جنگل بود. به‌منظور جمع‌آوری داده‌های زمینی، یک شبکه آماربرداری با ابعاد ۲۰۰×۳۰۰ متر به روش منظم تصادفی برای جنگل مورد مطالعه طراحی و در عرصه پیاده شد. در مجموع، ۱۴۹ قطعه‌نمونه مربعی شکل ۹ آری در پاییز ۱۳۹۴ برداشت شد. ابعاد قطعه‌نمونه‌های برداشت شده با در نظر گرفتن اندازه سلول تصویرهای سنتینل-۲ و با ضریب سه برابر اندازه سلول تصویرهای و به ابعاد ۳۰×۳۰ متر انتخاب شد. به عبارتی، برابر با تعداد ۹ سلول (ماتریس ۳×۳) از تصویرهای (تصویرهای سنتینل-۲ با اندازه سلول ۱۰ متری) بود. بر روی تصویرهای مختلف به‌منظور بازبینی دقیق مراکز قطعات نمونه زمینی، از سامانه موقعیت‌یاب جهانی تفاضلی (DGPS) استفاده شد و مشخصه‌های گونه، قطر (قطرهای بیشتر از ۷/۵ سانتی‌متر) و ارتفاع نزدیک‌ترین درخت به مرکز و قطورترین درخت داخل هر قطعه‌نمونه اندازه‌گیری و ثبت شد. با استفاده از جدول حجم دوعامله مربوط به جنگل‌های منطقه، حجم درختان شاهد محاسبه و به کمک رابطه رگرسیونی (رابطه ۱) با ضریب تبیین ۰/۹۸ و متوسط خطای ۱۳ درصد، حجم سایر درختان محاسبه شد.

$$V = 0.0003DBH^{2.3145} \quad \text{رابطه (۱)}$$

که در آن: V حجم (مترمکعب) و DBH قطر برابر سینه (سانتی‌متر مربع) است.

به‌منظور برآورد زی‌توده درختان و در نتیجه زی‌توده سرپای هر قطعه‌نمونه، با توجه به جرم حجمی گزارش شده برای گونه‌های مختلف منطقه مورد مطالعه (که این گزارش‌ها مربوط به تجزیه نمونه‌های چوبی جنگل مورد مطالعه بود)، زی‌توده سرپای هر قطعه‌نمونه برحسب مگا گرم در هکتار محاسبه شد.

پیش‌پردازش و پردازش تصویرهای ماهواره‌ای
پیش‌پردازش و پردازش تصویرهای نوری

تصویرهای نوری ماهواره سنتینل-۲ از سازمان فضایی اروپا در سطح تصحیحات (LIC) دریافت شد. این سطح از تصحیحات شامل تصحیحات رادیومتری، هندسی و همچنین تصحیح خطای جابه‌جایی ناشی از توپوگرافی و در نهایت، تبدیل ارزش رقومی (DN) پیکسل‌ها به مقدار بازتاب در بالای اتمسفر (TOA) یا به عبارتی مقدار بازتاب در سطح سنجنده می‌شود. در مرحله بعد لازم بود که مقادیر بازتاب بالای اتمسفر به بازتاب سطح زمین (BOA) تبدیل شوند. بنابراین، به‌منظور کسب مقدار بازتاب در سطح زمین از روش تصحیح اتمسفری Dark Object Subtraction استفاده شد. برای استخراج هر چه کامل‌تر اطلاعات از تصاویر، پردازش‌های متناسب با هدف بر روی باندهای طیفی انجام شد. نسبت‌گیری‌های طیفی و تهیه شاخص‌های گیاهی مرتبط با زی‌توده شامل VI، IV، NDVI، TTVI، EVI، SAVI، DVI، PVI1، PVI2، PVI3 و تجزیه مؤلفه‌های اصلی بر روی ۴ باند اصلی (اولیه) از جمله پردازش‌های انجام گرفته در این تحقیق بودند.

پیش‌پردازش و پردازش تصویرهای راداری

مطابق با جدول ۱، تصویرهای راداری ماهواره آلوس ۲ در سطح تصحیحات ۱/۱ دریافت شد. در این سطح از

و در مدل‌سازی زی‌توده روی زمینی درختان مورد استفاده قرار گرفت.

مدل‌سازی مقدار زی‌توده جنگل

به‌منظور برآورد زی‌توده، مدل‌سازی با سه ترکیب مختلف از داده‌ها شامل (۱) ویژگی‌های استخراج شده از تصاویرهای نوری (۱۷ ویژگی)، (۲) ویژگی‌های استخراج شده از تصاویرهای SAR (۴۰ ویژگی) و (۳) ترکیب ویژگی‌های استخراج شده از تصاویرهای نوری و راداری انجام شد. سپس میانگین ارزش ویژگی‌های به‌دست‌آمده از تصاویرهای ماهواره‌ای و متناظر با قطعات نمونه زمینی، با استفاده از نقشه قطعات نمونه طراحی شده، از تصویرها استخراج شد. در ادامه، متغیرهای استخراج شده از تصاویرهای نوری و راداری به‌عنوان متغیرهای ورودی (مستقل) مدل شبکه عصبی مصنوعی و رگرسیون خطی چندگانه مورد استفاده قرار گرفت.

برای ترکیب متغیرهای استخراج شده، از یک شبکه عصبی پرسپترون سه‌لایه شامل لایه ورودی، پنهان و خروجی استفاده شد که توسط قاعده پستانتشار خطا آموزش داده شد. تعداد نرون‌ها در لایه ورودی برابر با تعداد ویژگی‌های استخراج شده و تعداد نرون‌های خروجی برابر با تعداد خروجی (مقدار زی‌توده) بود. تعداد نرون‌های پنهان نیز با سعی و خطا مشخص شد (Vafaei et al., 2016). بنابراین، سه مدل شبکه عصبی به‌ترتیب با ۱۷، ۴۰ و ۵۷ نرون در لایه ورودی (ویژگی‌های استخراج شده از تصویرها) و یک نرون (مقدار زی‌توده) به‌عنوان خروجی شبکه در نظر گرفته شد و در ادامه، شروع پردازش داده‌ها با یک لایه پنهان و آزمایش تعداد نرون مختلف (روش سعی و خطا) در این لایه آغاز شد. به‌منظور آموزش و ارزیابی شبکه، کل داده‌ها به‌طور تصادفی به سه بخش آموزشی، اعتبارسنجی و آزمون تقسیم شدند. به‌این‌ترتیب که ۲۰ درصد از کل داده‌ها برای آزمون مدل کنار گذاشته شدند، سپس از ۸۰ درصد باقی‌مانده، ۶۵ درصد برای آموزش داده‌ها و ۱۵ درصد آن‌ها به‌عنوان داده‌های اعتبارسنجی انتخاب شدند. در رویکرد یادگیری شبکه، مقادیر اولیه وزن‌های شبکه

تصحیحات هیچ پردازشی بر روی تصویرهای انجام نشده و به‌صورت Single Look Complex (SLC) بودند. بنابراین، به‌منظور افزایش کیفیت رادیومتریکی (حذف تداخل‌ها و کاهش لکه‌های نویزی) تصویرهای مورد نظر چنددیده (Multilooking) شدند. لازم به ذکر است که برای انجام چنددیده کردن، ابعاد ۱۰ متری برای سلول‌های تصویر خروجی انتخاب شد تا با تصویرهای سنتینل-۲ یکسان شوند. یکی از مهم‌ترین تفاوت‌های بارز در نمایش تصویرهای راداری در مقایسه با تصویرهای نوری، وجود لکه‌های نویزی در داده‌های راداری است که به‌دلیل تداخل همدوس امواج انعکاس یافته از بسیاری پراکنش‌گرهای اصلی ایجاد می‌شود. در پژوهش پیش‌رو، فیلترهای کاهش نویز استاندارد همانند فیلترهای میانگین، میانه، مد، فراست، لی و لی بهبودیافته مورد استفاده قرار گرفت. به‌منظور ارزیابی کمی عملکرد هر فیلتر، از شاخص‌های میانگین و انحراف معیار تصویرهای نسبت‌گیری شده به‌دست‌آمده از اعمال فیلترها با تصویرهای اصلی استفاده شد (Amini & Sadeghi, 2013). به‌منظور استخراج ضرایب پراکندگی، تصویرهای شدت با استفاده از زاویه فرود و مدل رقومی ارتفاع با اندازه سلول ۳۰ متر (SRTM) به ضریب پراکندگی سیگما صفر (σ^0) برحسب دسی‌بل تبدیل شد، اما با توجه به کوهستانی بودن منطقه و تأثیر عامل توپوگرافی در تغییر مکانسیم بازپراکنش و پیرو آن پراکنش حجمی درختان، ضریب پراکندگی سیگما صفر به گاما صفر (γ^0) تبدیل شد.

علاوه بر استفاده از بازپراکنش قطبش‌های مختلف تصویرهای SAR، ویژگی تجزیه بافت برای هر یک از تصویرهای بازپراکنش، استخراج شد. محاسبه ویژگی‌های بافت که شامل فیلترهای هم وقوع مختلف از جمله همبستگی، میانگین، واریانس، آنتروپی، کنتراست، همگنی، عدم تجانس، گشتاور ثانوی بود، با استفاده از پنجره ۳×۳ انجام شد. همچنین ویژگی‌های زاویه آلفا (α)، آنتروپی (H) و ناهمسانگردی (A) با استفاده از الگوریتم تجزیه هدف Cloude & Pottier از تصویرهای پلاریمتری نیز استخراج

چندگانه، بر اساس آماره‌های ریشه میانگین مربعات خطا ($RMSE$)، درصد ریشه میانگین مربعات خطا ($RMSE\%$) و ضریب تبیین (R^2) بین مقادیر مشاهده شده و مقادیر پیش‌بینی شده انجام شد.

نتایج

جدول ۲ خلاصه‌ای از آماره‌های زی‌توده قطعات نمونه را نشان می‌دهد. کمترین و بیشترین مقدار زی‌توده به ترتیب ۴۵/۶۷ و ۴۳۶/۱۷ مگاگرم در هکتار بود. نتایج آزمون نرمالیت کولموگروف - سمیرنوف نشان داد که مشخصه ذکر شده دارای توزیع نرمال نبود، بنابراین برای تحلیل رگرسیون، با استفاده از روش تبدیل لگاریتمی نرمال شد.

به صورت تصادفی انتخاب شد و برای نرخ یادگیری شبکه و تعداد چرخه به ترتیب ۰/۰۱ و ۱۰۰۰ چرخه مورد توجه قرار گرفت و از توابع انتقال سیگموئیدی نیز به عنوان توابع فعال‌سازی استفاده شد.

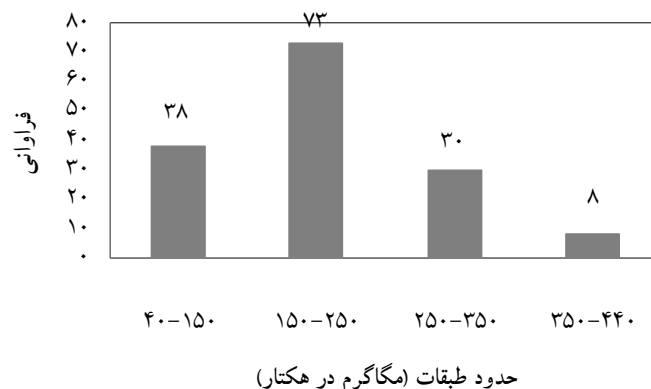
به منظور مقایسه مدل شبکه‌های عصبی مصنوعی با تجزیه و تحلیل‌های رگرسیون خطی چندگانه، با استفاده از همان داده‌های استفاده شده در آموزش شبکه عصبی (۸۰ درصد داده‌ها)، رگرسیون خطی چندگانه بین ویژگی‌های استخراج شده و متغیر زی‌توده برقرار شد. بدین منظور، مدل‌سازی زی‌توده با استفاده از تحلیل رگرسیون گام‌به‌گام و انتخاب بهترین زیرمجموعه داده‌ها بر اساس ضریب تبیین، نتایج تجزیه واریانس رگرسیون و آزمون انفرادی ضرایب (F) رگرسیون انجام شد. در نهایت، انتخاب بهترین مدل‌ها از مجموعه مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی و رگرسیون خطی

جدول ۲- آمار توصیفی مقدار زی‌توده اندازه‌گیری شده در قطعات نمونه (N=149)

متغیر	کمینه	بیشینه	میانگین	انحراف معیار	چولگی	کشیدگی
زی‌توده (مگاگرم در هکتار)	۴۵/۶۷	۴۳۶/۱۷	۲۰۶/۵۴	۷۸/۰۱	-۰/۰۴۱	۰/۵۰۰

مگاگرم در هکتار) در شکل ۲ ارایه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، بیشتر داده‌ها در طبقه ۱۵۰ تا ۲۵۰ مگاگرم در هکتار قرار گرفتند.

فراوانی زی‌توده روی زمینی درختان اندازه‌گیری شده در قطعات نمونه (۱۴۹ قطعه نمونه) و با توجه به طبقه‌بندی چهار طبقه‌ای (۴۰-۱۵۰، ۱۵۰-۲۵۰، ۲۵۰-۳۵۰ و ۳۵۰-۴۴۰



شکل ۲- فراوانی تعداد قطعات نمونه در طبقات زی‌توده روی زمینی درختان (n=۱۴۹)

ارزیابی کمی فیلترهای مختلف حذف لکه‌های نویزی تصویرهای SAR نشان داد که فیلتر فراست با حفظ میانگین (میانگین بیشتر و نزدیک به یک) و همچنین انحراف معیار کمتر، بهترین کارایی را در حذف لکه‌های نویزی در منطقه مورد مطالعه داشت.

مشخصات بهترین شبکه‌های عصبی انتخاب شده پس از آزمون و خطا و نتایج ارزیابی مدل در جدول ۳ ارائه شده است. مطابق با جدول ۳، در صورت استفاده از اطلاعات طیفی و ویژگی‌های استخراج شده از آن، شبکه با یک لایه میانی و تابع محرک تانژانت سیگموئید با ۱۵ نرون در لایه

میانی، بهترین برآورد را نسبت به اجراهای متعدد شبکه (با توجه به کمترین مقدار $RMSE$ و بیشترین مقدار R^2) دارا بود. در رابطه با استفاده از تصویرهای راداری نیز بهترین تحلیل، با مقدار R^2 و $RMSE$ به ترتیب ۰/۵۷ و ۴۹/۱۷ مگاگرم در هکتار (۲۳/۸۵٪) در شبکه‌ای با ۱۵ نرون در یک لایه میانی به دست آمد. بیشترین مقدار R^2 با مقدار ۰/۸۶ و کمترین مقدار $RMSE$ با مقدار ۳۱/۶۲ مگاگرم در هکتار (۱۵/۳۴ درصد) در برآورد زی توده، از ترکیب تصویرهای نوری و راداری به عنوان ورودی‌های مدل به دست آمد.

جدول ۳- نتایج به دست آمده از مدل‌سازی زی توده جنگل با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی

مدل	ورودی مدل	ساختار شبکه	R^2	$RMSE$ (مگاگرم در هکتار)	$RMSE\%$
۱	تصویرهای نوری سنتینل-۲ و ویژگی‌های استخراج شده	۱-۱۲-۱۷	۰/۷۲	۳۹/۵۳	۱۹/۱۷
۲	تصویرهای راداری پالسا-۲ و ویژگی‌های استخراج شده	۱-۱۵-۴۰	۰/۵۷	۴۹/۱۷	۲۳/۸۵
۳	ترکیب تصویرهای سنتینل-۲ و پالسا-۲ و ویژگی‌های استخراج شده	۱-۱۶-۵۷	۰/۸۶	۳۱/۶۲	۱۵/۳۴

بر اساس تحلیل رگرسیون گام به گام (جدول ۴)، بهترین مدل‌های رگرسیونی برای ترکیب مختلف متغیرهای مستقل ارائه شد. مطابق با جدول ۴، مدل رگرسیون خطی چندگانه با استفاده از تصویرهای نوری با مقدار R^2 و $RMSE$ به ترتیب ۰/۷۱ و ۳۷/۸۵ مگاگرم در هکتار (۱۸/۳۶ درصد) توانست مقدار زی توده را برآورد کند. همچنین با

استفاده از تصویرهای راداری، ویژگی‌های بازپراکنش HV، VH، HH/VH و کنتراست VV، مهم‌ترین متغیرهای تأثیرگذار در مدل بودند و نتایج بهترین مدل برای برآورد زی توده با استفاده از تصویرهای SAR با مقدار R^2 برابر با ۰/۴۴ و $RMSE$ برابر با ۵۳/۵۱ مگاگرم در هکتار (۲۵/۹۶ درصد) بود.

جدول ۴- نتایج به دست آمده از مدل‌سازی زی توده جنگل با استفاده از رگرسیون خطی چندگانه

مدل	متغیرهای مستقل	متغیرهای معنی دار ($p < 0.05$)	F	VIF	R^2	$RMSE$ (مگاگرم در هکتار)	$RMSE\%$
۱	تصویرهای سنتینل-۲ و ویژگی‌ها	NIR, NDVI, PCA1, PVI2	۵۷/۷۸**	۳/۸	۰/۶۱	۴۶/۶۶	۲۲/۶۳
۲	تصویرهای پالسا-۲ و ویژگی‌ها	HV, VH, HH/HV, Contrast VV	۲۳/۷۵**	۲/۷	۰/۴۴	۵۳/۵۱	۲۵/۹۶
۳	ترکیب تصویرهای سنتینل-۲ و پالسا-۲	Contrast VV, HV, HH, Red, PCA1, Entropy	۵۹/۱۲**	۱/۴	۰/۷۱	۳۷/۸۵	۱۸/۳۶

** معنی دار در سطح اطمینان ۹۹ درصد

بحث

در این مطالعه با توجه به عدم وجود روابط آلومتریکی مناسب برای برآورد زی توده روی زمینی جنگل‌های منطقه مورد مطالعه، زی توده درختان با استفاده از برآورد حجم درختان و تبدیل آن به زی توده به کمک جرم حجمی گزارش شده محاسبه شد. در ادامه تفسیر نتایج مربوط به اهداف این مطالعه تشریح شده است.

تصویرهای نوری و راداری

با توجه به نتایج، بهترین مدل برای برآورد مقدار زی توده با بیشترین R^2 و کمترین $RMSE$ ، ترکیب داده‌های نوری و راداری و استفاده از مدل شبکه عصبی مصنوعی بود. مقایسه نتایج به دست آمده از این تحقیق با سایر تحقیقات در برخی موارد چالش برانگیز است چراکه در بیشتر تحقیقات با استفاده از یک، دو و یا چند مدل مختلف امکان برآورد مشخصه‌های کمی جنگل ارزیابی شده است و همچنین تصویرهای مورد استفاده مربوط به سنجنده‌های مختلف نوری، راداری و با اندازه تفکیک مکانی و رادیومتریکی متفاوت می‌باشد که مقایسه نتایج را دشوار کرده است. بنابراین، در ادامه بحث، مقایسه نتایج با توجه به مقدار آماره‌های R^2 و $RMSE$ انجام شد. در این رابطه، تحقیقات انجام شده در جنگل‌های هیرکانی از جمله نتایج تحقیق Attarchi و Gloaguen (۲۰۱۴) نشان داد که در صورت استفاده از تصویرهای راداری سنجنده پالسار در کنار تصویرهای نوری سنجنده ETM+، مقدار R^2 و $RSME$ برآورد از ۰/۵۹ و ۳۱/۵ مگاگرم در هکتار به ۰/۷۶ و ۲۵/۰۴ مگاگرم در هکتار بهبود خواهد یافت که با نتایج پژوهش پیش‌رو همخوانی دارد، اما Ghasemi و همکاران (۲۰۱۳) با استفاده از داده‌های نوری و راداری ماهواره ALOS نشان دادند که ترکیب تصویرهای نوری و راداری موجب بهبود برآورد زی توده روی زمینی جنگل‌های خیرودکنار مازندران نشده است. در تحقیقی دیگر که توسط Amini و Sadeghi (۲۰۱۳) انجام شد، استفاده هم‌زمان از داده‌های راداری (سنجنده پالسار) و نوری (سنجنده AVNIR-2) نتایج بهتری با مقدار R^2 و $RMSE$ به ترتیب

۰/۷۳ و ۱۳/۸۸ مگاگرم در هکتار نسبت به استفاده جداگانه تصویرها داشت. لازم به ذکر است که تحقیق ذکر شده در جنگل‌های بدون شیب و جنگل‌های دست‌کاشت انجام شد که به همین دلیل، نسبت به پژوهش پیش‌رو دارای اختلاف دقت چشمگیر و بیشتری است.

با توجه به جدول ۴، نتایج استفاده مستقل از تصویرهای نوری نشان داد که در بهترین حالت دقت برآورد زی توده با R^2 و $RMSE\%$ به ترتیب ۰/۷۲ و ۱۹/۱۷٪ همراه بود که نسبت به مطالعه Attarchi و Gloaguen (۲۰۱۴) که از تصویرهای Landsat استفاده کردند و مقدار R^2 برابر با ۰/۵۹ به دست آمد، از دقت بیشتری برخوردار بود. از دلایل بهبود دقت کسب شده می‌توان به تفکیک مکانی بالاتر تصویرهای سنتینل-۲ نسبت به تصویرهای لندست و همچنین روند محاسبه زی توده در این مطالعه نسبت به روابط آلومتریکی جهانی اشاره کرد. همچنین، در مطالعه Ghasemi و همکاران (۲۰۱۳) مقدار R^2 ناشی از به‌کارگیری باندهای اصلی و شاخص‌های گیاهی تصویرهای نوری به‌عنوان ورودی مدل رگرسیون، با نتایج به دست آمده از استفاده ورودی‌های مشابه در پژوهش پیش‌رو همخوانی ندارد و نتایج به مراتب ضعیف‌تری به دست آمده است.

در رابطه با استفاده از تصویرهای SAR در برآورد زی توده، بهترین نتایج با مقدار R^2 برابر با ۰/۵۷ و مقدار $RMSE\%$ برابر با ۲۳/۸۵٪ به دست آمد. این نتایج، با نتایج سایر پژوهش‌ها در برآورد زی توده در جنگل‌های مشابه و به کمک داده‌ای راداری، با مقدار R^2 برابر با ۰/۶۱، نتایج ضعیف‌تری را نشان داد (Ghasemi et al., 2013). البته تبدیلات موجک بر روی تصویرها منجر به این مقدار دقت شده است، اما در صورت استفاده از بازپراکنش و ویژگی‌های تجزیه بافت (مشابه تجزیه‌های پژوهش پیش‌رو)، مقدار R^2 در بازه ۰/۱۲ - ۰/۳، گزارش شد که در پژوهش پیش‌رو نتایج به مراتب بهتری کسب شد. همچنین مقدار آماره‌های ارزیابی نسبت به مطالعه Attarchi و Gloaguen (۲۰۱۴) که به دقت R^2 برابر با ۰/۴۵ و $RMSE$ برابر با ۴۳/۲۵ مگاگرم در هکتار رسیدند، برتری اندکی

خطی بودن رابطه پیشنهادی از جمله محدودیت‌های رگرسیون خطی هستند. به‌علاوه، در روش شبکه عصبی مصنوعی، پژوهشگر امکان انتخاب و آزمون ساختارهای متنوع و اجزا مختلف شبکه را دارد. در این تحقیق به‌منظور استفاده از مدل رگرسیون خطی، متغیر زی‌توده که از توزیع نرمال برخوردار نبود، با استفاده از روش تبدیل لگاریتمی نرمال و مدل‌سازی بر اساس لگاریتم مقدار زی‌توده انجام شد، اما در روش شبکه عصبی مدل‌سازی با استفاده از همان مقادیر اولیه (نرمال نشده) زی‌توده انجام شد.

نتایج بهترین مدل‌ها در دو روش شبکه عصبی مصنوعی و رگرسیون خطی نشان داد که ضرایب تبیین و جذر میانگین مربعات خطا دو مدل به‌ترتیب ۰/۸۶ و ۳۱/۶۲ مگاگرم در هکتار (۱۵/۳۴ درصد) در مدل شبکه عصبی مصنوعی و ۰/۷۱ و ۳۷/۸۵ مگاگرم در هکتار (۱۸/۳۶ درصد) در مدل رگرسیون خطی بود. نتایج تحقیقات مختلف نیز نشان از کارایی بهتر مدل شبکه‌های عصبی مصنوعی نسبت به مدل‌های رگرسیون خطی در برآورد مقدار مشخصه‌های جنگل، همچون زی‌توده، تعداد در هکتار و تاج‌پوشش داشته است (Ramezani & Sahebi, 2015; Vafaei *et al.*, 2016). لازم به ذکر است که برخلاف مزیت‌هایی که مدل شبکه‌های عصبی نسبت به روش‌های رگرسیونی دارند، عملکرد بهتر شبکه‌های عصبی مصنوعی منوط به آزمون و خطا اجزا مختلف ساختار شبکه از جمله تعداد لایه پنهان، تعداد نرون به‌کار گرفته شده در لایه پنهان، تابع فعال‌سازی، تابع انتقال و دیگر پارامترهای شبکه است که در مقابل استفاده از روش‌های رگرسیونی، روشی زمان‌بر و تجربی به‌حساب می‌آیند. به‌علاوه، شبکه‌های عصبی مصنوعی در اصلاح رویکرد "جعبه سیاه" دارند و تفسیر روابط بین پارامترها و رابطه بین ورودی‌ها و خروجی‌ها مشکل است، درحالی‌که روش‌های رگرسیونی به‌راحتی اهمیت متغیرهای ورودی و معنی‌دار را تشریح می‌کنند (Diane & Ahlfeld, 2009).

با توجه به نتایج پژوهش پیش‌رو می‌توان گفت که اطلاعات طیفی نقش مهم‌تر و کارایی بهتری نسبت به

داشت. از دلایل دقت بیشتر می‌توان به اندازه تفکیک بهتر ماهواره ALOS-2 نسبت به نسخه پیشین خود (ALOS) که در تحقیقات پیشین استفاده شده است، اشاره کرد. به‌علاوه، در پژوهش پیش‌رو از تصویرهای دارای قطبش کامل نسبت به تحقیقات Attarchi و Gloaguen (۲۰۱۴) و Ghasemi و همکاران (۲۰۱۳) که از تصویرهای با قطبش دوگانه HH و HV استفاده کردند، بهره برده شد. همچنین در این مطالعه، برآورد زی‌توده با استفاده از جرم حجمی برای هرگونه و مختص آن رویشگاه استفاده شد که نسبت به استفاده از روابط آلومتریک جهانی، دارای دقت مناسب‌تری است.

با توجه به ارزیابی مدل‌ها در برآورد زی‌توده، نتایج نشان داد که ضریب تبیین ناشی از به‌کارگیری تصویرهای نوری در بهترین مدل، ۱۴ درصد از ضریب تبیین به‌دست‌آمده از مدل‌سازی به کمک داده‌های راداری بالاتر بود. دلیل این امر می‌تواند اشباع‌پذیری بیشتر داده‌های رادار نسبت به داده‌های نوری در تخمین مقدار زی‌توده در جنگل‌های با مقدار زی‌توده زیاد باشد (Rauste, 2005; Lucas *et al.*, 2010). لازم به ذکر است که نتایج تحقیق Cutler و همکاران (۲۰۱۲) و Amini و Sadeghi (۲۰۱۳) با نتایج پژوهش پیش‌رو همخوانی ندارد، زیرا ایشان نتیجه گرفتند که برآورد زی‌توده با استفاده از تصویرهای راداری در مقابل استفاده از تصویرهای نوری با دقت بیشتری همراه بود. از سوی دیگر با مطالعه Attarchi و Gloaguen (۲۰۱۴)، هم‌راستا است.

مدل شبکه عصبی مصنوعی و رگرسیون خطی چندگانه با مقایسه R^2 و $RMSE$ مدل‌های مختلف مشخص شد که در تمامی حالت‌ها، مدل شبکه‌های عصبی نسبت به رگرسیون خطی کارایی بهتری در برآورد زی‌توده درختان داشت. لازم به ذکر است که شبکه‌های عصبی مصنوعی محدودیت‌های رگرسیون خطی را ندارند. به‌عنوان مثال، هیچ فرض اولیه‌ای بر توزیع داده‌ها اعمال نمی‌کند، ضمن اینکه هیچ محدودیتی نیز برای شکل تابعی رابطه ریاضی بین متغیرهای مستقل و وابسته اعمال نمی‌کند، درحالی‌که علاوه بر موارد ذکر شده، یکسان بودن واریانس خطاها و

- and GIS, 4(4): 69-82 (In Persian).
- Attarchi, S. and 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(5): 3693-3715.
 - Baghdadi, N., Maire, G.L., Bailly, J.S., Osé, K., Nouvellon, Y., Zribi, M., Lemos, C. and Hakamada, R., 2014. Evaluation of ALOS/PALSAR L-band data for the estimation of Eucalyptus plantations aboveground biomass in Brazil. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 8(8): 3802-3811.
 - Carreiras, J.M.B., Pereira, J.M.C. and Pereira J.S., 2006. Estimation of tree canopy cover in evergreen oak woodlands using remote sensing. *Forest Ecology and Management*, 223: 45-53.
 - Cartus, O., Santoro, M. and Kelldorfer, J., 2012. Mapping forest aboveground biomass in the northeastern United States with ALOS PALSAR dual-polarization. *Remote Sensing of Environment*, 124: 466-478.
 - Cutler, M.E.J., Boyd, D.S., Foody, G.M. and Vetrivel, A., 2012. Estimating tropical forest biomass with a combination of SAR image texture and Landsat TM data: an assessment of predictions between regions. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 70: 66-77.
 - Darvishi, M., 2014. *Remote Sensing with Imaging Radar (translation)*. Elm Press, Tehran, 427p (In Persian).
 - Diane, M.L. and Ahlfeld, D.P., 2009. Comparing artificial neural networks and regression models for predicting faecal coliform concentrations. *Hydrological Sciences Journal*, 52(4): 713-731.
 - Eriksson, L.E.B., Magnusson, M., Fransson, J.E.S., Sandberg, G. and Ulander, L.M.H., 2007. Stem volume estimation for boreal forest using ALOS PALSAR. *Proceedings of the 5th International Symposium Retrieval Biogeophysical Parameters from SAR Data Land Application*. Bari, Italy, 25-28 Sep. 2007: 4343-4346.
 - Ghasemi, N., Sahebi, M.R. and Mohammadzadeh, A., 2013. Biomass estimation of a temperate deciduous forest using Wavelet analysis. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 51(2): 765-776.

تصویرهای راداری در تخمین زی توده جنگل داشتند، اما با توجه به اینکه مدل ترکیبی به دست آمده از تصویرهای نوری و راداری، مقدار ضریب تبیین را بیشتر (حدود ۱۴ درصد) نسبت به استفاده از اطلاعات نوری ارایه داد، بنابراین استفاده از اطلاعات راداری مفید می باشد و همچنان که در مدل نهایی دیده شد، چهار متغیر (HH, Entropy, Contrast VV, HV) از شش متغیر تأثیرگذار در مدل، مربوط به متغیرهای استخراج شده داده های راداری بود. همچنین، مدل شبکه های عصبی مصنوعی به دلیل در نظر گرفتن روابط غیرخطی و توانایی قابل توجه در استنتاج نتایج از مجموعه داده های پیچیده می تواند در استخراج و شناسایی الگوها موفق باشد و مدلی مناسب برای مدل سازی مؤلفه های جنگل باشد (Ramezani & Sahebi, 2015; Vafaei *et al.*, 2016).

در پایان پیشنهاد می شود به منظور دستیابی به یک جمع بندی مناسب در خصوص کاربرد این تصویرها در مناطق مختلف جنگلی ایران، از تصویرهای نوری و راداری مشابه این تحقیق و همچنین دیگر سنجنده ها استفاده شده و با نتایج پژوهش پیش رو مقایسه شوند. خوشبختانه در دو سال اخیر امکان استفاده از تصویرهای ماهواره های مختلف از جمله ASTER, SENTINEL, ALOS و سایر ماهواره ها به صورت رایگان، امکان برآورد مشخصه های مختلف جنگل از جمله حجم و زی توده را بیش از پیش فراهم کرده است. همچنین، بر اساس نتایج پژوهش پیش رو که روش ناپارامتریک جواب قابل قبول تری ارایه داد، در سایر پژوهش ها نیز از مدل های ناپارامتری دیگر از جمله مدل جنگل تصادفی (RF)، ماشین بردار پشتیبان (SVM)، سیستم استنتاج عصبی فازی (ANFIS) و همچنین سایر روش های رگرسیون غیرخطی به منظور مدل سازی های هرچه دقیق تر استفاده شود.

References

- Amini, J. and Sadeghi, Y., 2013. Performance of SAR and optical images in modeling forest biomass. *Iranian Journal of Remote Sensing*

- Ramezani, M.R. and Sahebi, M.R., 2015. Forest biomass estimation using SAR and optical images. *Journal of Geospatial Information Technology*, 3(1): 15-26 (In Persian).
- Rauste, Y., 2005. Multi-temporal JERS SAR data in boreal forest biomass mapping. *Remote Sensing of Environment*, 97(2): 263- 275.
- Shataee, Sh., Kalbi, S., Fallah, A. and Pelz, D., 2012. Forest attribute imputation using machine-learning methods and ASTER data: comparison of k-NN, SVR and random forest regression algorithms. *International Journal of Remote Sensing*, 33(19): 5254-6280.
- Vafaei, S., Pourhashemi, M., Purbavaghar, M. and Jafari, E., 2016. Applying artificial neural network and multiple linear regression models for estimation of forest density in Marivan forests. *Iranian Journal of Forest*, 7(4): 539-555 (In Persian).
- Vashum, K.T. and Jayakumar, S., 2012. Methods to estimate above-ground biomass and carbon stock in natural forests- a review. *Ecosystem and Ecography*, 2(4): 1-7.
- Hamdan, O., Hasmadi, I.M., Aziz, H.Kh., Norizah, N. and Zulhaidi, M.S.H., 2015. L-band saturation level for above-ground biomass of Dipterocarp forests in Peninsular Malaysia. *Journal of Tropical Forest Science*, 27(3): 388-399.
- Kalbi, S., Fallah, A. and Shataee Joybari, Sh., 2014. Estimation of forest biophysical properties using SPOT HRG data (case study: Darabkola experimental forest). *Journal of Wood and Forest Science and Technology*, 20(4): 117-133 (In Persian).
- Lucas, R., Armston, J., Fairfax, R., Fensham, R., Accad, A., Carreiras, J., Kelley, J., Bunting, P.J., Clewley, D., Bray, S., Metcalfe, D.J., Dwyer, J.M., Bowen, M., Eyre, T.J., Laidlaw, M.J. and Shimada, M., 2010. An evaluation of the ALOS PALSAR L-band backscatter-above ground biomass relationship Queensland, Australia: impacts of surface moisture condition and vegetation structure. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 3(4): 576-593.

Estimation of aboveground biomass using optical and radar images (Case study: Nav-e Asalem forests, Gilan)

S. Vafaei¹, J. Soosani^{2*}, K. Adeli³, H. Fadaei⁴ and H. Naghavi³

1- Ph.D. Student Forestry, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Lorestan University, Khoram Abad, Iran

2* - Corresponding author, Assistant Prof., Department of Forestry, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Lorestan University, Khoram Abad, Iran. E-mail: soosani.j@lu.ac.ir

3- Assistant Prof., Department of Forestry, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Lorestan University, Khoram Abad, Iran

4- Ph.D. Remote Sensing, Faculty of Informatics, Kyoto University, Kyoto, Japan

Received: 19.09.2016

Accepted: 23.11.2016

Abstract

Using remote sensing data is an applied method to estimate above ground biomass. In this study, satellite radar data of ALOS-2, with the full polarization and the optical data of Sentinel-2, has been used to estimate the aboveground biomass in the Nav-e Asalem forests, Gilan province. The backscattering coefficients at different polarization, the texture measures and target decomposition features of SAR images, obtained original and synthetic bands from optical images in three different combinations of radar images, optical images and the composition of radar and optical images, as inputs to the Artificial Neural Network (ANN) and Multiple Linear Regression (MLR) models were used. In order to measure aboveground biomass, 149 sample plots were laid out. Evaluation of ANN and MLR models using R^2 and $RMSE$ statistics showed that in all cases the ANN was better performance to estimate the aboveground biomass than MLR. The best results showed that the ANN from combined optical and radar data with R^2 and $RMSE$, 0.86 and 31.62 Mg/ha (15.34%), respectively, can be the best applied method to estimate the aboveground biomass. The results of radar images and optical separately, with the R^2 and $RMSE$ for the modeling of aboveground biomass have been shown, respectively, 0.57 and 49.17 Mg/ha (23.85%) by radar images and 0.7 and 39.53 Mg/ha (19.17%) by the optical images, superior modeling to estimate aboveground biomass represents by optical imaging. The overall and more accurate results to estimate of aboveground biomass have been shown when we used combined radar and optical images with the ANN model.

Keywords: ALOS, Artificial Neural Network, remote sensing, SAR, Sentinel.