

برآورد زی توده جنگل با استفاده از تصاویر نوری و ماکروویو (مطالعه موردی: سری گرازبن، جنگل خیرود)

منصوره فاضلیان^۱، سارا عطارچی^{۲*}، وحید اعتماد^۳ و ورالو لیزنبرگ^۴

^۱ دانش‌آموخته کارشناسی ارشد سنجش از دور و GIS، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران

^۲ استادیار، گروه سنجش از دور و GIS، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران

^۳ دانشیار، گروه جنگلداری و اقتصاد جنگل، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج

^۴ دانشیار، گروه مهندسی جنگل، دانشگاه ایالتی سانتا کاتارینا، فلوریانس، برزیل

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۱/۱۲؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۵/۵)

چکیده

تخمین زی توده روی زمینی جنگل در سیاست‌های منطقه‌ای کربن و مدیریت پایدار جنگل اهمیت بسیاری دارد. با توجه به اینکه جنگل‌ها بزرگ‌ترین ذخیره‌گاه‌های کربن به شمار می‌آیند، ارزیابی زی توده در برآورد انرژی ذخیره‌شده و تأثیر آن بر تغییرات اقلیمی در مقیاس جهانی بسیار حائز اهمیت است. سنجش از دور نوری و ماکروویو فعال، اهمیت زیادی در تخمین زی توده جنگلی دارند. هدف این تحقیق مدل‌سازی و تخمین زی توده با استفاده از شبکه عصبی پرسپترون چندلایه در سری گرازبن جنگل خیرود استان مازندران است. مدل‌سازی با استفاده از مجموعه داده نوری لندست و ماکروویو آلوس پالسار در دو سال ۲۰۰۷ و ۲۰۱۲ و با داشتن اطلاعات ۲۰۱ قطعه نمونه زمینی انجام گرفت. همچنین قابلیت محصول موزاییک جهانی آلوس پالسار با قدرت تفکیک ۲۵ متر در تخمین زی توده ارزیابی شد. افزون بر این، حد اثرگذاری عوامل محیطی شیب و جهت شیب در افزایش دقت مدل‌سازی بررسی شده است. در نهایت بهترین مدل با استفاده از تصویر محصول موزاییک آلوس پالسار سال ۲۰۱۲ با تفاوتی بسیار اندک از دیگر تصاویر نوری و راداری با مقدار $R^2=0/83$ و $RMSE=108/99$ تن در هکتار، به دست آمد. نتایج تحقیق نشان داد که تصاویر سنجنده‌های جدیدتر نتایج بسیار بهتری از نسل‌های قبل خود ارائه می‌دهند. البته برای اطمینان از این نتایج باید تحقیقات تکمیلی در این زمینه انجام گیرد.

واژه‌های کلیدی: آلوس پالسار، زی توده جنگل، شبکه عصبی، شیب و جهت شیب، لندست.

مقدمه

و ارزان‌ترین راهکار ممکن برای کاهش دی‌اکسید کربن در جو، جذب و ترسیب آن در فرم‌های مختلف زی توده گیاهی و خاک است (Forouze et al., 2008). بیشتر کربن موجود در زیست‌کره زمینی در جنگل‌ها و در بخش‌های مختلف اکوسیستم‌های جنگلی در زی توده بالای سطح زمین

تغییرات اقلیمی و گرمایش جهانی ناشی از افزایش گازهای گلخانه‌ای، از چالش‌های مهم جهان امروز به‌ویژه در توسعه پایدار است. گاز دی‌اکسید کربن حدود نیمی از سهم گازهای گلخانه‌ای را در افزایش دمای کره زمین به خود اختصاص می‌دهد. ساده‌ترین

متر) Landsat و Google Earth و تعداد محدودی قطعه نمونه زمینی انجام دادند و روشی ارائه کردند که به طور چشمگیری نیاز به داده‌های میدانی برای برآورد زی‌توده و کربن را در مقایسه با روش‌های موجود براساس شمارش همه درختان کاهش می‌دهد. در بسیاری از تحقیقات، برآورد مقدار زی‌توده به کمک داده‌های نوری رضایت‌بخش بوده است، اما در برخی از مناطق از جمله جنگل‌های متراکم کوهستانی، با تنوع گونه‌ای زیاد و ساختار پیچیده چالش‌برانگیز است (Attarchi & Gloaguen, 2014). زیرا پوشش ابر مداوم سبب محدودیت در دسترسی به داده‌های نوری می‌شود. همچنین سهم عمده زی‌توده درخت در تنه وجود دارد و امواج مرئی به دلیل کوتاه بودن طول موج، قادر به نفوذ در سطوح زیرین آن نیستند و در پوشش گیاهی متراکم زود به اشباع می‌رسند. تصاویر راداری به دلیل استفاده از هندسه پهلونگر و امواج ماکروویو با طول موج بلندتر نسبت به امواج مرئی با نفوذ در تاج پوشش جنگل می‌توانند اطلاعات خوبی از تنه درختان ارائه دهند. داده‌های رادار به دلیل توانایی نفوذ بهتر و ارائه اطلاعات دقیق‌تر ساختار پوشش گیاهی، در برآورد زی‌توده برتری دارند. مقدار نفوذپذیری امواج راداری با کاهش طول موج کاهش می‌یابد، در نتیجه سنجنده‌هایی که در طول موج‌های کوتاه‌تر فعالیت می‌کنند، قابلیت نفوذ در پوشش‌های گیاهی متراکم را ندارند و زودتر به اشباع می‌رسند. در بیشتر مطالعات تخمین زی‌توده رادارمبنا از داده‌های SAR باند L و به طور ویژه از سنجنده آلوس پالسا^۷ استفاده می‌کنند (Mitchard et al., 2011; Carreiras et al., 2012). به‌عنوان یک قاعده کلی، با افزایش زی‌توده در باندهای L و C، مقادیر شدت نیز ادامه می‌یابد تا در سطحی از زی‌توده مقادیر شدت نسبت به افزایش زی‌توده تغییر نمی‌کنند و واکنشی یکسان نشان می‌دهند. در اصطلاح گفته می‌شود که مقادیر ضرایب باز بخش در این سطح از زی‌توده به اشباع رسیده‌اند که این وضعیت در طول موج‌های کوتاه‌تر، زودتر رخ

(AGB)^۱ (کنده، تنه، پوست، شاخه و برگ)، زی‌توده زیر سطح زمین (BGB)^۲ (ریشه‌های دارای قطر بیشتر از ۲ میلی‌متر)، زی‌توده مرده و خاک ذخیره و ترسیب می‌شود. جنگل‌ها ۸۶ درصد کربن موجود در بالای سطح زمین را در بر دارند که بیشتر آن در چوب درختان ذخیره شده است، بنابراین زی‌توده جنگل‌ها از بزرگ‌ترین ذخیره‌گاه‌های کربن در اکوسیستم خشکی هستند که در کنترل غلظت دی‌اکسید کربن اتمسفر تأثیر اساسی دارند. داده‌های سنجش از دور از بهترین منابع برای تخمین زی‌توده به‌شمار می‌آیند. در روش‌های سنجش از دوری، زی‌توده از طریق ارتباط مستقیم با پاسخ‌های طیفی تصاویر نوری یا بازپخش تصاویر راداری^۳ با استفاده از مدل‌های پارامتریک و ناپارامتریک یا از راه ارتباط غیرمستقیم با شاخص‌های پوشش مانند سطح پوشش برگ^۴، شاخص‌های گیاهی^۵ یا شاخص‌های بافت^۶ تصاویر تخمین زده می‌شود (LU, 2006). روش‌های سنجش از دوری، کاربران را از داده‌های زمینی بی‌نیاز نمی‌کند، بلکه ابزاری برای کاهش عملیات زمینی است که کاربران را قادر می‌سازد با استفاده از داده‌های زمینی محدود، زی‌توده را در مناطقی وسیع با دقت بیشتر تخمین بزنند. سنجنده‌های فضا برد نوری به دلیل تکرارپذیری، آرشیو طولانی از سال ۱۹۷۰ نسبت به آرشیو تصاویر راداری که از سال ۱۹۹۰ موجود هستند، دسترسی رایگان و پردازش ساده‌تر (Cao et al., 2018)، پرکاربردترین سنجنده‌ها هستند. برای مثال Koju et al. (2017) تحقیقی آزمایشی در منطقه چیتوان نپال برای تخمین زی‌توده با استفاده از تصاویر نوری (۵/۰ متر) GeoEye-1، (۳۰

1. Above Ground Biomass
2. Below Ground Biomass
3. Radio Detection and Ranging
4. LAI (Leaf Area Index)
5. VI (Vegetation Index)
6. Texture Parameter
7. ALOS PALSAR (Advanced Land Observation Satellite Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar)

باند‌های اصلی نشان دادند که باند مادون قرمز نزدیک (باند ۴)، دارای بیشترین همبستگی است و در نهایت مدل رگرسیونی با $R^2=0/16$ و $RMSE=43/21$ تن در هکتار، براساس باند ۴ تصویر لندست ارائه داد. هدف اصلی تحقیق حاضر برآورد زی توده روی زمینی درختان سری گرازین جنگل آموزشی خیرود با در نظر گرفتن مقدار حساسیت بازپخش‌های سنجنده آلوس و پاسخ‌های طیفی سنجنده لندست با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی است. مدل سازی با استفاده از ۲۰۱ قطعه نمونه زمینی و ایجاد ارتباط غیرخطی توسط شبکه عصبی پرسپترون چندلایه با ویژگی‌های طیفی و شاخص‌های گیاهی به دست آمده از تصویر لندست و مقادیر بازپخش و ویژگی‌های بافت تصویر آلوس در دو سال ۲۰۰۷ و ۲۰۱۲ انجام گرفت. همچنین قابلیت محصول موزاییک جهانی آلوس پالسا با قدرت تفکیک ۲۵ متر در برآورد زی توده با تصویر اصلی آلوس پالسا مقایسه شد. با توجه به شرایط توپوگرافی منطقه، برای دستیابی به مدل مطلوب، طبقه‌بندی داده‌ها براساس شرایط محیطی تأثیرگذار بر مقدار بازپخش تصاویر ماکروویو و پاسخ طیفی تصاویر نوری مانند شیب و جهت شیب صورت گرفت. در نهایت مدل بهینه تخمین زی توده برای منطقه تحقیق ارائه شد.

مواد و روش‌ها

منطقه پژوهش

این پژوهش در سری گرازین جنگل آموزشی و پژوهشی دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران در هفت کیلومتری شرق شهرستان نوشهر (منطقه خیرودکنار) در استان مازندران انجام گرفت. پوشش گیاهی منطقه از نوع درختان پهن برگ است. گونه‌های ممرز، راش و بلوط به ترتیب با ۵۰/۲۶، ۳۱/۲۷ و ۵/۹ درصد بیشترین میزان را در سری شامل می‌شوند. بخش گرازین در سیستم اقلیمی دومارتن، با داشتن ضریب خشکی ۸۲/۶ دارای اقلیم

می‌دهد. به همین دلیل طول موج‌های بلندتر مانند باند L به دلیل اینکه دیرتر به اشباع می‌رسند در مطالعات زی توده ترجیح داده می‌شوند (Carreiras et al., 2012; Mitchard et al., 2009). از طرفی به دلیل هندسه تصویربرداری رادار، کاربرد این داده‌ها در مناطق کوهستانی و مرتفع، محدود می‌شود. مشکل دیگر تصاویر راداری اثر اسپکل است که به دلیل بازپخش‌های پراکنده از عوارض ایجاد می‌شود. این پدیده جزئی از ماهیت تصاویر راداری است که با ایجاد نقطه‌های پراکنده در تصویر بر قدرت تفکیک رادیومتریک آن اثر می‌گذارد و کیفیت تصویر را کاهش می‌دهد.

برآورد زی توده درختان جنگل‌های شمال، سهم این جنگل‌ها را در جذب و ترسیب کربن اتمسفری در عرصه جهانی مشخص می‌کند و سبب معرفی جنگل‌های هیرکانی به جامعه جهانی برای دریافت و تخصیص اعتبار به منظور توسعه هرچه بیشتر می‌شود. مطالعات جامعی در زمینه برآورد زی توده جنگل‌های هیرکانی صورت نگرفته، اما به صورت پراکنده در قسمت‌های مختلف مطالعاتی انجام گرفته است، از جمله (Attarchi & Gloaguen (2014)، در جنگل لوه، بخشی از جنگل‌های کوهستانی هیرکانی با زی توده زیاد، پژوهشی در زمینه بهبود تخمین زی توده درختی روی زمین در شرایط سخت و ناهموار با استفاده از تصاویر سنجنده‌های PALSAR و ETM+ ارائه دادند. براساس نتایج، مدل رگرسیونی خطی چندگانه مقدار زی توده را با ضریب تعیین ۰/۷۶ و جذر میانگین مربعات خطا برابر با ۲۵/۰۴ تن در هکتار در ترکیبی از داده‌های راداری آلوس پالسا و داده‌های چند طیفی لندست سنجنده ETM+ برآورد کرد. (Ronoud & Darvishsefat (2018) با استفاده از تصاویر TM لندست ۵، زی توده روی زمینی راشستان‌های خالص سری گرازین و نمخانه را با برداشت ۶۵ قطعه نمونه بررسی کردند. آنان با بررسی همبستگی بین زی توده و ارزش‌های طیفی متناظر در

شاخه‌های افقی و سطح خاک است و می‌تواند نتیجه تعامل بین زمین و تنه درخت باشد. قطبش HV نیز ارتباط قوی با پخش حجمی دارد (Oliver & Quegan, 2004). از آنجا که موجودی تصویر آلوس پالسا از منطقه پژوهش فقط محدود به سال ۲۰۰۷ بود، برآورد زی توده با استفاده از تصویر اصلی آلوس پالسا معطوف به این سال است. تصویر ماکروویو برای مجموعه داده سال ۲۰۱۲ از محصول موزاییک جهانی سنجنده PALSAR ماهواره آلوس-۲ با قدرت تفکیک مکانی ۲۵ متر تهیه و ارزیابی شد. این محصول، یک تصویر SAR یکپارچه جهانی است که با استفاده از موزاییک کردن تصاویر SAR اندازه‌گیری شده توسط ضریب بازپخش PALSAR / PALSAR-2 ایجاد شده است. تصاویر این محصول به صورت سالانه عرضه می‌شود.

تصویر نوری نیز از ماهواره لندست، سنجنده TM و OLI، از محصول بازتاب سطح لندست^۱ و google earth engine سایت^۲ USGS که در سطح BOA هستند، اخذ شده است. گیاهان علاوه بر انعکاس در باند سبز دارای انعکاس زیادی در باند مادون قرمز نزدیک هستند؛ بنابراین می‌توان از انعکاس طیفی در محدوده مرئی و مادون قرمز برای بررسی مقدار زی توده استفاده کرد. خلاصه‌ای از اطلاعات تصاویر مورد استفاده در تحقیق در جدول ۱ قرار دارد.

محاسبه زی توده با داده‌های زمینی

از آنجا که منطقه پژوهش در جنگل علمی-پژوهشی واقع بوده و اطلاعات لازم و کافی در مورد قطر و حجم درختان براساس نوع گونه موجود است، استفاده از معادلات تبدیل حجم به زی توده در این پژوهش، راه حل منطقی‌تری به نظر می‌رسد. حجم درختان نیز توسط معادلات جدول حجم سری گرازبن

مرطوب سرد نوع (ب) است (Etemad, 2002). این بخش در ارتفاع بین ۸۴۰ تا ۱۳۵۰ متر از سطح دریا و در محدوده راشستان‌های هیرکانی واقع شده است که به علت دخالت‌های بی‌رویه و مستمر گذشته، فراوانی ممرز در توده‌های راش، به‌وفور مشاهده می‌شود.

شیوه اجرای پژوهش

داده‌های آماربرداری زمینی شامل ۲۰۱ قطعه نمونه دایره‌ای است که در تابستان ۲۰۱۲ در تحقیقی دیگر (Bayat et al., 2013) جمع‌آوری شد. از این تعداد، ۳۵ قطعه نمونه که در مناطق دارای شیب تند بودند حذف و بقیه استفاده شدند. مساحت هر قطعه نمونه روی زمین افقی ۱۰۰۰ مترمربع است. مختصات مرکز هر قطعه نمونه به وسیله GPS دستی ثبت شده و نوع گونه و مشخصات همه درختان موجود با قطر برابر سینه بیش از ۷ سانتی‌متر اندازه‌گیری شد. همچنین اطلاعات آماربرداری در تابستان سال ۲۰۰۳ نیز در محل همین قطعات نمونه نیز موجود است. در نتیجه اطلاعات حجم درختان در سال ۲۰۰۷ نیز براساس رویش حجمی سالانه هر گونه و با استفاده از اطلاعات آماری سال‌های ۲۰۰۳ و ۲۰۱۲ محاسبه شد. در طی آماربرداری زمینی در محل قطعات نمونه، اطلاعات مربوط به درصد شیب و جهت شیب نیز برداشت شد. داده‌های مربوط به جهت شیب در چهار جهت شمالی، جنوبی، شرقی و غربی و داده‌های مربوط به درصد شیب از صفر تا ۱۰۰ درصد ثبت شدند. از این داده‌ها در طبقه‌بندی قطعات نمونه براساس جهت و مقدار شیب استفاده شده است.

تصویر ماکروویو اخذ شده از منطقه متعلق به سنجنده ALSAR ماهواره آلوس است که در باند L و با دو قطبش HH و HV تصویربرداری می‌کند. در طول L امواج به داخل تاج پوشش نفوذ می‌کند و اطلاعاتی از تنه‌ها حاصل می‌شود که مؤلفه‌های اصلی زی توده هستند. قطبش HH دارای برهمکنش زیاد با

(Mg/m^3) است. چگالی متوسط چوب گونه راش $0/56$ ، ممرز $0/68$ ، بلوط $0/75$ و دیگر گونه‌ها $0/57$ است (Enayeti, 2010). Mass of Wood نیز برابر با وزن زی توده برحسب تن (Mg) است. با توجه به اینکه مساحت هر قطعه نمونه برابر با یک‌دهم هکتار است، مجموع زی توده هر قطعه نمونه با ضرب در عدد ۱۰ برحسب تن در هکتار محاسبه می‌شود. تعدادی از مؤلفه‌های آمار توصیفی زی توده اندازه‌گیری شده در جدول ۲ مشاهده می‌شود.

براساس قطر برابر سینه درخت به دست آمد. سپس با استفاده از معادله تبدیل حجم به زی توده روی زمینی که توسط Hardy, 1996 ارائه شده است، مقدار زی توده در هر قطعه نمونه برحسب تن در هکتار برآورد شد.

$$\text{Mass of wood} = \text{Net Wood Volume} \times \text{Wood Density}$$

در این رابطه Net Wood Volume، حجم چوب برحسب متر مکعب (m^3) و Wood Density، چگالی متوسط چوب برحسب مگاگرم در مترمکعب

جدول ۱- تصاویر سنجش از دوری استفاده شده در تحقیق

ماهواره	سنجنده	تاریخ برداشت	اندازه تفکیک (متر)	سطح تصحیحات	باند
آلوس	PALSAR	۲۰۰۷/۰۹/۰۸	۱۲/۵	L۱/۱	HH, HV
آلوس	PALSAR	۲۰۰۷	۲۵	L۱/۵	HH, HV
آلوس-۲	PALSAR	۲۰۱۵	۲۵	L۱/۵	HH, HV
لندست ۵	TM	۲۰۰۷/۰۸/۰۸	۳۰	L۱/۱	R, G, B, NIR
لندست ۸	OLI	۲۰۱۳/۰۸/۱۵	۳۰	L۱/۱	R, G, B, NIR

جدول ۲- آمار توصیفی زی توده قطعه نمونه‌های اندازه‌گیری شده زمینی برحسب تن در هکتار در سال‌های ۲۰۰۳، ۲۰۰۷ و ۲۰۱۲

آماره	۲۰۰۳	۲۰۰۷	۲۰۱۲
میانگین	۳۰۱/۸۱	۳۱۷/۴۰	۳۲۸/۶۳
انحراف معیار	۱۱۴/۷۷	۱۱۵/۴۰	۱۱۸/۲۳
کمترین	۵۱/۳۸	۶۵/۹۸	۷۵/۴۸
بیشترین	۶۶۸/۵۶	۷۷۲/۶۷	۸۱۲/۶۹
مجموع	۶۰۶۶۴/۴۱	۶۳۷۹۷/۴۹	۶۶۰۵۴/۳۶
تعداد	۲۰۱	۲۰۱	۲۰۱

پردازش تصویر

تصویر لندست به کاررفته در این پژوهش از مجموعه داده بازتاب سطح سنجنده OLI اخذ شد. این مجموعه داده به بازتاب سطح تبدیل و از لحاظ هندسی تصحیح شده و ابر، برف و سایه با استفاده از

الگوریتم CFMASK^۱ در هر پیکسل ماسک شدند.

مطابق جدول ۲ تصویر آلوس در سطح ۱/۱ اخذ شد. در این سطح از تصحیحات هیچ‌گونه پردازشی

1. C Function of Mask

فیلترهای حوزه مکان است. این فیلترها به‌طور مجزا در هر دو قطبش HH و HV بر تصویر آلوده پالسار و محصول موزاییک آن اعمال شدند. به‌منظور بررسی عملکرد هر فیلتر از شاخص حذف اسپکل و حفظ میانگین (SMPI)^۶ استفاده شده که توسط Shamsoddini & Trinder (2010) ارائه شده است. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از ارزیابی فیلترها توسط شاخص SMPI، فیلتر boxcar برای تصویر آلوده پالسار و فیلتر Lee sigma برای محصول موزاییک آن انتخاب شد.

استخراج ویژگی

ویژگی‌های استخراج‌شده از تصاویر بازتاب سطح سنجنده لندست شامل چهار باند طیفی قرمز، آبی، سبز، مادون‌قرمز و هفت شاخص LAI^۸، NDVI^۷، EVI^{۱۲} و DVI^{۱۳} هستند. شاخص‌های گیاهی قادر به حداقل رساندن اثر سایه و مشکلات ناشی از اشباع هستند و به همین دلیل در برآورد زی‌توده بسیار مورد توجه قرار دارند.

تصویر ماکروویو سنجنده PALSAR دارای دو قطبش HH و HV است. ویژگی‌های استخراج‌شده از این تصویر شامل مقدار بازپخش در هر قطبش، میانگین، نسبت و تفاضل بازپخش‌هاست. همچنین ده ویژگی بافتی میانگین، واریانس، همگنی، کنتراست، عدم تشابه، بیشترین احتمال، انتروپی، انرژي، لحظه دوم و همبستگی با استفاده از سطوح خاکستری

روی تصاویر انجام نگرفت و تصاویر به‌صورت تک دیده (SLC)^۱ در جهت برد مایل^۲ و شامل مختصات، دامنه و فاز است. با توجه به کوهستانی بودن منطقه و تأثیر عوامل توپوگرافی در پخش پرتوهای بازگشتی و به‌تبع آن تفاوت‌های فاحش در اندازه زاویه دید، از ضریب بازپخش گاماسفر^۳ (رابطه ۳) با استفاده از ضریب بازپخش سیگما^۴ (طبق رابطه ۲ و مدل رقومی ارتفاع SRTM^۴ با اندازه تفکیک مکانی ۳۰ متر استفاده شده است.

رابطه ۲

$$\sigma^{\circ} = 10 \times \log_{10}(I^2 + Q^2) + CF - 32.0$$

$$\gamma^{\circ} = \sigma^{\circ} \frac{A_{flat}}{A_{slope}} \left(\frac{\cos \theta_{ref}}{\cos \theta_{loc}} \right)^n$$

رابطه ۳

γ° = ضریب بازپخش نرمال‌شده توپوگرافی، σ° = ضریب بازپخش رادار، A_{flat} = اندازه پیکسل سنجنده پالسار با فرض قرار گرفتن در زمین صاف، A_{slope} = اندازه پیکسل واقعی محلی سنجنده پالسار برای سطوح کوهستانی، θ_{loc} = زاویه فرود محلی (زاویه میان راستای موج و خط عمود بر هر عارضه زمینی)، θ_{ref} = زاویه فرود در مرکز تصویر. توان n نیز عمق تاج پوشش نوری است که بین صفر تا ۱ متغیر است (Attarchi & Gloaguen, 2014). همدوسی راداری نیز با توجه به اینکه در این تحقیق نیاز نبود، انجام نگرفت. با توجه به توپوگرافی منطقه، تصحیحات توپوگرافی نیز با استفاده از مدل رقومی ارتفاع SRTM در نرم‌افزار ASF Map-Ready انجام گرفت. در این الگوریتم مناطقی که در سایه قرار گرفته‌اند، درون‌یابی شده و درجات روشنایی میانگین‌گیری‌شده به آنها نسبت داده می‌شود.

در تصاویر SAR، تداخل امواج و عوارض توپوگرافی سطح زمین تأثیر نامطلوبی بر تصاویر می‌گذارد که به اثر لکه‌ای^۵ یا اسپکل معروف است. یکی از روش‌های مرسوم رفع این مسئله، استفاده از

1. Single Look Complex
2. Slant range
3. Gamma-nought
4. Shuttle Radar Topography Mission
5. Speckle noise
6. Speckle Suppression and Mean Preservation Index
7. Normalized Difference Vegetation Index
8. Leaf Area Index
9. Ratio Vegetation Index
10. Simple Vegetation Index
11. Soil Adjusted Vegetation Index
12. Enhanced Vegetation Index
13. Difference Vegetation Index

نورون لایه خروجی برابر با خروجی‌هایی است که انتظار می‌رود شبکه عصبی آنها را مشخص کند که در اینجا همان مقدار زی توده است که برابر با یک لایه خروجی است. تعداد نورون‌های لایه پنهان نیز با سعی و خطا مشخص می‌شود. قبل از آموزش، برای وارد کردن داده‌ها به شبکه عصبی مصنوعی، به منظور استانداردسازی و یکسان‌سازی واحدها ابتدا داده‌های ورودی و خروجی در بازه $\{-1, 1\}$ نرمال شدند. حد آستانه خطا 0.01 و تعداد تکرار نیز 10000 در نظر گرفته شد. 60 درصد از داده‌های زمینی شامل زی توده 100 قطعه نمونه، به عنوان نمونه آموزشی وارد شبکه عصبی شد و عملکرد شبکه توسط 40 درصد داده‌های زمینی شامل زی توده 67 قطعه نمونه به عنوان نمونه آزمایشی ارزیابی شد. برای بیان نتایج اعتبارسنجی مدل‌های شبکه عصبی به منظور معرفی مدل بهینه با بهترین برازش، از آماره‌های ضریب تبیین R^2 (رابطه ۵)، خطای جذر میانگین مربعات (RMSE) (رابطه ۶) و خطای نسبی جذر میانگین مربعات (RRMSE) براساس رابطه ۷ استفاده شد.

$$R^2 = 1 - \left(\frac{\sum(t - o)^2}{\sum(o)^2} \right) \quad \text{رابطه ۵}$$

$$RMSE = \left(\frac{1}{n} \sum(t - o)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad \text{رابطه ۶}$$

$$RRMSE = \left(\frac{\frac{1}{n} \sum(t - o)^2}{\bar{t}} \right)^{\frac{1}{2}} \times 100 \quad \text{رابطه ۷}$$

در این فرمول t مقدار واقعی و \bar{t} میانگین آن است. O نیز مقدار پیش‌بینی شده توسط مدل شبکه عصبی آن در مجموعه داده است.

نتایج

زی توده هر قطعه نمونه با استفاده از رابطه ۱ براساس اطلاعات حجم درختان توسط قطر برابرسینه

هم‌رخداد (GLCM^۱) محاسبه شد. آنالیز بافت روش مناسبی برای استخراج اطلاعات از تصاویر ماکروویو است. شاخص‌های بافت وابسته به مشخصات منطقه پژوهش و تصویر مورد استفاده هستند. شناسایی شاخص بافت مناسب وابسته به اندازه پنجره مناسب و انتخاب باند مناسب است. اندازه پنجره کوچک موجب بزرگنمایی اختلاف پیکسل‌های مجاور و افزایش خطا می‌شود و اندازه پنجره بزرگ با هموارسازی بیش از حد اختلافات در پیکسل‌های تصویر، سبب می‌شود که نتوان اطلاعات لازم را از تصویر استخراج کرد. همه ویژگی‌های استخراج شده از تصاویر لزوماً در برآورد زی توده تأثیرگذار نیستند؛ از این‌رو در انتخاب ویژگی‌ها برای مدل‌سازی دو شرط بیشترین همبستگی با زی توده و کمترین همبستگی با یکدیگر باید رعایت شود. به همین دلیل برای تعیین رابطه متغیرهای مستقلی که همبستگی زیادی با زی توده داشتند، از آزمون تشخیص هم‌خطی با استفاده از عامل تورم واریانس (VIF) بر اساس رابطه ۴ استفاده شد.

$$VIF = 1/(1 - R^2) \quad \text{رابطه ۴}$$

مدل‌سازی با شبکه عصبی

مهم‌ترین ویژگی شبکه عصبی عدم وابستگی آن به توزیع آماری داده‌های ورودی است که سبب برتری آن بر دیگر روش‌های آماری است (Civco & Wang, 1994). در این تحقیق از یک شبکه عصبی پرسپترون سه لایه شامل لایه ورودی، لایه پنهان و لایه خروجی استفاده شده است که توسط قاعده پس انتشار خطا^۲ به عنوان پرکاربردترین روش در روند شبیه‌سازی متغیر هدف (به خصوص در اهداف بیوفیزیکی)، آموزش داده شده است (Beale et al., 1996). در این شبکه تعداد نورون‌های لایه ورودی برابر با تعداد متغیرهای مستقل و تعداد

1. Gray Level Co-occurrence Matrix
2. Multilayer feed forward back propagation

وابسته انتخاب شدند.

سپس عملکرد هر کدام از تصاویر به صورت جداگانه و حالت‌های مختلف ترکیب تصاویر در مدل‌سازی توسط شبکه عصبی بررسی شد. همان‌طور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود، شبکه عصبی با استفاده از متغیرهای تصاویر لندست و آلوس پالسا با داده‌های سال ۲۰۰۷ تا حدودی توانسته‌اند زی‌توده را با ضریب تعیین مناسب اما خطای زیاد مدل‌سازی کنند، اما متغیرهای تصویر موزایک آلوس قابلیت چندانی در مدل‌سازی زی‌توده نداشته است. مدل‌سازی توسط متغیرهای تصویر موزایک آلوس در داده‌های سال ۲۰۱۲ با $R^2=0/83$ و $RMSE=108/99$ عملکرد خوبی در برآورد زی‌توده نشان داد. محصول موزایک جهانی آلوس با افزایش ضریب R^2 و کاهش $RMSE$ در مدل‌سازی داده‌های سال ۲۰۱۲ عملکرد بهتری داشته است.

(DBH) گونه راش، مرز و دیگر گونه‌ها به وسیله داده‌های آماربرداری زمینی در دو سال ۲۰۰۳ و ۲۰۱۲ محاسبه شد. به دلیل محدودیت در دسترسی به تصاویر SAR ماهواره آلوس، تصاویر استفاده‌شده در این تحقیق مربوط به سال ۲۰۰۷ است و مقدار زی‌توده نیز برای سال ۲۰۰۷، با استفاده از مقادیر دو سال ۲۰۰۳ و ۲۰۱۲ محاسبه شد. از مجموع ۲۰۱ قطعه نمونه زمینی موجود، ۱۶۷ قطعه نمونه وارد مدل‌سازی شدند. ۳۵ قطعه نمونه حذف شده عمدتاً در مناطق دارای شیب تند قرار داشتند یا دارای خطای اندازه‌گیری بودند؛ به همین منظور برای به حداقل رساندن خطا و یافتن مدل بهینه حذف شدند. پس از انتخاب ویژگی‌های تصاویر نوری و ماکروویو با استفاده از شاخص VIF، بهترین ویژگی‌ها به‌عنوان متغیر مستقل با شرط داشتن کمترین همبستگی با یکدیگر و بیشترین همبستگی با زی‌توده به‌عنوان متغیر

جدول ۳- گزارش عملکرد شبکه عصبی با تصاویر نوری و ماکروویو و ترکیب تصاویر در داده‌های سال ۲۰۰۷ و ۲۰۱۲

				۲۰۰۷			
%RMSE	RMSE (mg/ha)	R ²	۲۰۱۲	%RMSE	RMSE (mg/ha)	R ²	۲۰۰۷
				۳۷/۱۸	۱۱۴/۰۶	۰/۸۳	Landsat ۵
				۴۲/۱۲	۱۳۱/۹۲	۰/۷۹	ALOS
				۴۳/۴۱	۱۳۵/۹۵	۰/۷۶	Landsat ۵ & mosaic
				۴۷/۹۱	۱۵۰/۰۲	۰/۷۱	ALOS & Landsat ۵
				۵۳/۸۳	۱۶۸/۶۳	۰/۶۴	ALOS & mosaic
				۵۶/۳۶	۱۷۶/۵۰	۰/۶۰	ALOS & Landsat ۵ & mosaic
				۵۷/۴۴	۱۷۹/۸۸	۰/۵۸	Mosaic

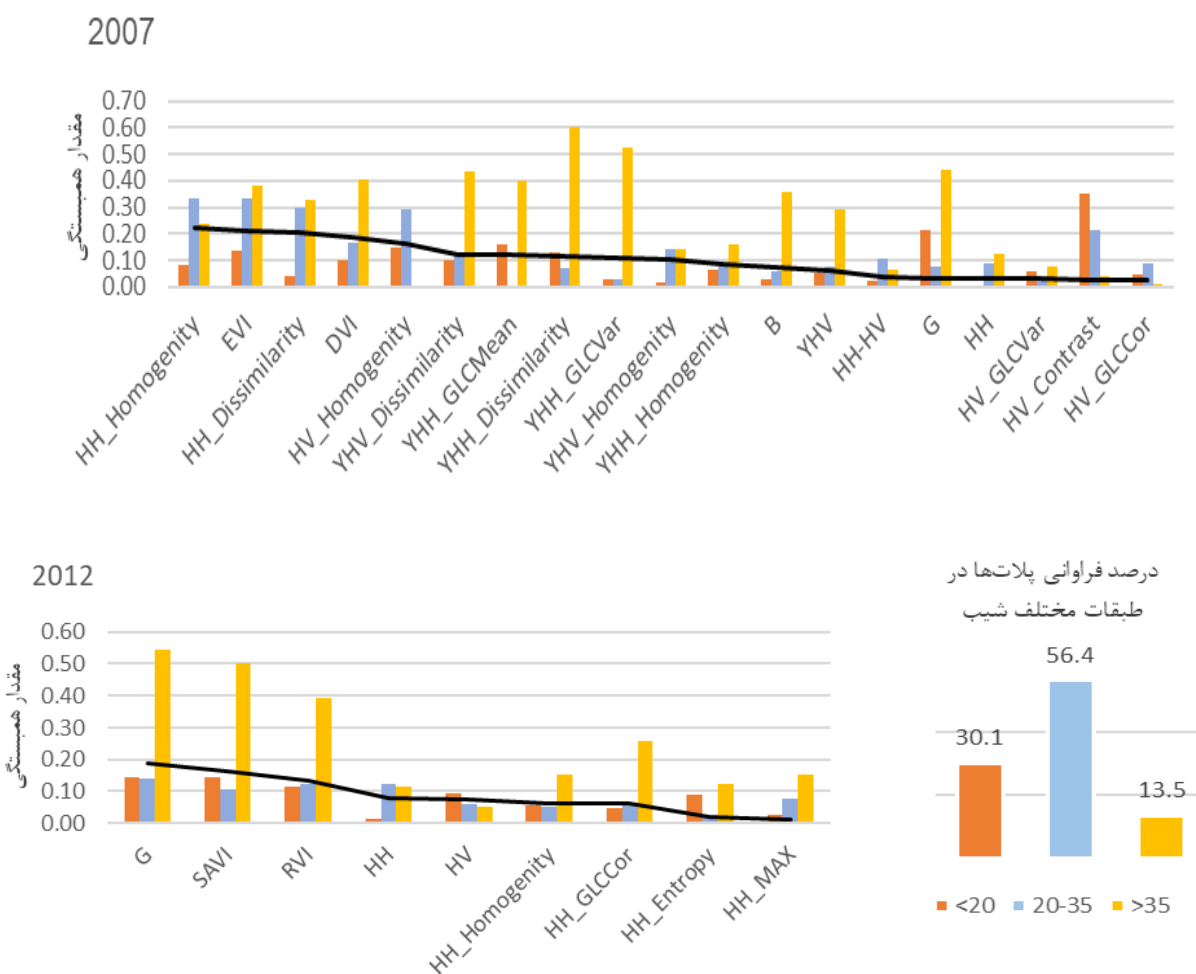
ریشه دوم و لگاریتم) انجام گرفت، ولی تأثیری در افزایش همبستگی داده‌ها با زی‌توده نداشت. مطابق شکل ۱ در طبقه شیب کم و متوسط که حدود ۸۷ درصد قطعه نمونه‌ها در این طبقه شیب قرار دارند، همبستگی تغییر چشمگیری نداشت. در طبقه شیب بیشتر از ۳۵ درصد، همبستگی زیادی با زی‌توده مشاهده می‌شود، اما از آنجا که تنها ۱۳/۵ درصد از

برای رسیدن به نتایج بهتر در مدل‌سازی و تخمین زی‌توده، طبقه‌بندی داده‌ها براساس مقدار و جهت شیب صورت گرفت و همبستگی زی‌توده قطعه نمونه‌ها در طبقات مختلف قبل و بعد از طبقه‌بندی بررسی شد. نتایج نشان می‌دهد که همبستگی زیادی بین متغیرها و زی‌توده وجود ندارد. به همین دلیل عملیات نرمال‌سازی و تبدیلات داده (مجذور، معکوس،

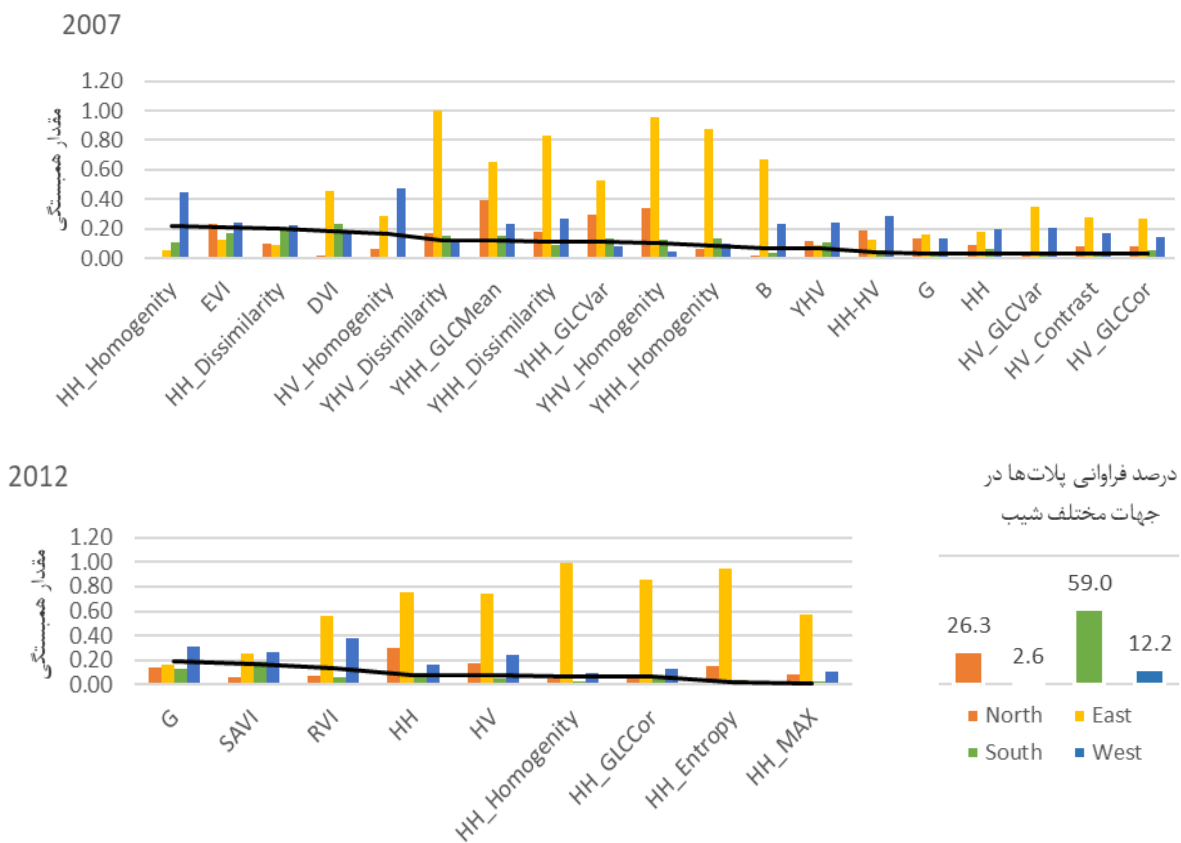
به خود اختصاص می دهد، افزایش چندانی نداشته است؛ اما در مقابل شیب های شرقی و غربی همبستگی خوبی را نشان می دهند؛ اما از آنجا که فراوانی قطعه نمونه ها در این دو جهت شیب تنها ۱۵ درصد از کل قطعه نمونه هاست، می توان نتیجه گرفت که این افزایش همبستگی در این طبقات تأثیر چندانی در افزایش دقت مدل سازی نخواهد داشت.

قطعه نمونه ها به این طبقه اختصاص دارند، می توان نتیجه گرفت که طبقه بندی براساس مقدار شیب تأثیر چندانی در بهبود مدل سازی و تخمین زی توده نخواهد داشت.

همان طور که در شکل ۲ مشاهده می شود، براساس ارزیابی همبستگی پس از طبقه بندی قطعه نمونه ها بر مبنای جهت شیب، همبستگی در شیب های شمالی و جنوبی که حدود ۸۵ درصد قطعه نمونه ها را



شکل ۱- همبستگی زی توده قطعه نمونه ها با ویژگی های تصویر در درجات مختلف شیب نسبت به همبستگی قبل از طبقه بندی در سال های ۲۰۰۷ و ۲۰۱۲ (منحنی مشکی بیان کننده همبستگی زی توده قطعه نمونه ها با ویژگی های تصویر قبل از طبقه بندی است).



شکل ۲- همبستگی زی توده قطعه نمونه‌ها با ویژگی‌های تصویر در جهت‌های مختلف شیب نسبت به همبستگی قبل از طبقه‌بندی در سال‌های ۲۰۰۷ و ۲۰۱۲ (منحنی مشکی بیان‌کننده همبستگی زی توده قطعه نمونه‌ها با ویژگی‌های تصویر قبل از طبقه‌بندی است).

قطعیت‌هایی روبه‌روست؛ از طرفی دسترسی به محصول اصلی این سنجنده نیز محدود است. تصحیح توپوگرافی تصویر نیز توسط مدل رقومی زمین SRTM انجام شد اما نتایج آن چندان قابل قبول نبود که دلیل آن، استفاده از DEM با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر است که اندازه پیکسل آن تقریباً دوبرابر اندازه پیکسل تصویر اصلی است. به همین دلیل تصویر بسیار همگن شده و در محل‌هایی که دو قطعه نمونه اختلاف زی توده بسیار زیادی را نشان می‌دهند، اختلاف ضرایب بازپخش بسیار ناچیز است. به همین دلیل قطعه نمونه‌هایی که در ارتفاعات و توپوگرافی شدید قرار داشتند حذف شدند و به ضریب گاماناف برای کاهش اثر توپوگرافی بسنده شده است.

بحث

منابع داده برای مدل‌سازی زی توده شامل نمونه‌های اندازه‌گیری شده زمینی، داده‌های سنجنش از دور و ویژگی‌های استخراج شده از آنها، مدل رقومی زمین و برخی داده‌های جانبی است. کیفیت و صحت داده‌ها و پردازش اصولی آنها پیش‌نیاز تهیه یک مدل تخمین زی توده و اعتبارسنجی آن است. با وجود تلاش برای همزمان بودن تصاویر با داده‌های زمینی مربوط، تصویر ماکروویو در مجموعه داده سال ۲۰۱۲ دارای سه سال اختلاف با داده‌های زمینی است. تصویر ماکروویو سال ۲۰۱۲ به صورت محصول موزاییک جهانی آلوس-۲ است. از آنجا که این محصول به صورت سالانه تهیه می‌شود، همواره با عدم

به عوامل تأثیرگذار محیطی و داده‌های موجود، قطعه نمونه‌ها براساس درجه شیب و جهت شیب طبقه‌بندی شده است. سپس همبستگی ویژگی‌های تصویر با زی توده قطعه نمونه‌ها، قبل و بعد از طبقه‌بندی قطعه نمونه‌ها براساس دو شاخص درجه شیب و جهت شیب بررسی شد. نتایج حاکی از آن است که همبستگی قوی‌ای بین متغیرها و زی توده وجود ندارد. در این زمینه، عملیات نرمال‌سازی و تبدیلات داده (مجذور، معکوس، ریشه دوم و لگاریتم) انجام گرفت، ولی تأثیری در افزایش همبستگی داده‌ها با زی توده نداشت. این امر در بسیاری از تحقیقات پیشین (Ghasemi et al., 2012; Ramezani & Sahebi, 2015) از مشکلات مدل‌سازی زی توده به شمار می‌آید. در طبقه‌بندی قطعه نمونه‌ها براساس مقدار شیب، همبستگی در دو طبقه شیب کم و متوسط تغییر چندانی نداشته است، در صورتی که افزایش همبستگی در شیب‌های بیشتر از ۳۵ درصد مشاهده می‌شود که با فرض اولیه (کاهش همبستگی زی توده با مشخصه‌های استخراج‌شده از تصاویر) تطابق ندارد. با توجه به تصحیح توپوگرافی، احتمال دارد افزایش همبستگی در طبقه شیب‌های بیشتر از ۳۵ درصد دلایل مستقل از شیب داشته باشد. طبقه‌بندی براساس جهت شیب نیز نشان می‌دهد که شیب جنوبی، کمترین همبستگی را دارد و همبستگی داده‌ها در دو شیب شرقی و غربی نسبت به همبستگی کل داده‌ها قبل از طبقه‌بندی بیشتر است. با توجه به تصویربرداری مایل و مدار صعودی تصاویر SAR، انتظار می‌رود شیب‌های شرقی یا غربی که همسو و در جهت دید سنجنده هستند، بیشترین همبستگی را با ویژگی‌های تصاویر داشته باشند. شیب‌های شمالی و جنوبی نیز چون در جهت دید سنجنده قرار ندارد، احتمال می‌رود تحت تأثیر سایه و خطاهای توپوگرافی قرار بگیرند و همبستگی کمتری با ویژگی‌های تصویر داشته باشند. نتایج تحلیل همبستگی ویژگی‌های تصویر و زی توده قطعه نمونه‌ها تأییدکننده این ادعاست (نمودار ۳). نکته دیگری که ممکن است در

همان‌طور که ذکر شد، در استخراج ویژگی‌ها از تصاویر نوری لندست استفاده از نسبت و تفاضل باندها تا حدودی با کاهش اثر سایه، اطلاعات خوب و گاهی بهتری نسبت به خود باندها در اختیار قرار داده است. از این‌رو از شاخص‌های DVI که تفاضل باند مادون قرمز و قرمز را بررسی می‌کند، همبستگی بیشتری نسبت به هر باندها به تنهایی با زی توده نشان می‌دهد. شاخص‌های گیاهی EVI نیز که اثرهای اتمسفری در آن تعدیل شده‌اند، بیشترین همبستگی را با زی توده نشان می‌دهد. این مسئله بیانگر این است که حذف اثر اتمسفر بر تصاویر نوری دقت تخمین زی توده را افزایش می‌دهد. در این تحقیق با توجه به ابعاد پیکسل تصاویر و تغییرات مربوط به زی توده، اندازه 3×3 برای بافت تصویر انتخاب شد. مرحله انتخاب ویژگی‌ها نیز با محاسبه VIF برای هر متغیر به صورت گام‌به‌گام اجرا شد و در هر مرحله با حذف بزرگ‌ترین مقدار آماره VIF، این مقدار برای دیگر متغیرها نیز کاهش می‌یابد. در نهایت متغیرهایی با مقدار VIF کمتر از ۱۰ به عنوان ورودی‌هایی با حداقل هم‌خطی وارد شبکه عصبی شدند.

نتایج آزمون و خطا نشان داد که پنج نورون برای لایه پنهان بهترین نتیجه را در شبکه عصبی ارائه می‌دهد. بررسی نتایج شبکه عصبی در داده‌های سال ۲۰۰۷ نشان می‌دهد، مدل شبکه عصبی ابتدا توسط تصویر لندست و سپس تصویر آلوس به خوبی برآزش داده شده، اما مقدار خطای به نسبت نتایج را قابل قبول نمی‌داند؛ اما در داده‌های سال ۲۰۱۲، شبکه عصبی توسط تصویر محصول موزاییک آلوس به خوبی توانسته با ضریب تعیین زیاد و خطای کمتر، زی توده را مدل‌سازی کند. همان‌طور که در نتایج مشاهده می‌شود، عملکرد شبکه عصبی با استفاده از محصول موزاییک جهانی آلوس در داده‌های سال ۲۰۱۲ پیشرفت چشمگیری داشته است. دلیل این امر بهبود قابلیت‌های سنجنده پالسار در آلوس-۲ و کاهش رزولوشن مکانی از ۱۰ متر به ۳ متر است. برای رسیدن به نتایج بهتر در مدل‌سازی با توجه

سنجندۀ TM و در سال ۲۰۱۲ نیز متغیرهای تصویر موزاییک آلوس و سنجندۀ OLI، بهترین نتایج مدل سازی زی توده را نشان دادند. نتایج تحقیق نشان می دهد که طبقه بندی زی توده با توجه به سطح شیب و جهت شیب به دلیل تصحیحات توپوگرافی و همچنین فراوانی کمتر قطعه نمونه ها در شیب های شرقی، تأثیر چندانی در افزایش همبستگی متغیرهای مستقل تصویر با زی توده قطعه نمونه ها ندارد. نتیجه مهم دیگری که در ارزیابی قابلیت تصاویر مختلف به دست آمد، حاکی از برتری محصول موزاییک جهانی آلوس-۲ نسبت به محصول اصلی و موزاییک ماهواره آلوس-۱ در مدل سازی است. از جمله محدودیت های این تحقیق می توان به کوچک بودن مساحت قطعات نمونه در رابطه با اندازه پیکسل تصاویر و خطای GPS دستی، نبود تصاویر مناسب همزمان با داده های زمینی یا محدودیت دسترسی به آنها و همچنین اندازه سلول بزرگ DEM به کاررفته نام برد. همچنین قرارگیری منطقه پژوهش در باگ تصاویر فول پلاریمتریک آلوس دیگر محدودیت این تحقیق بود که دستیابی به اطلاعات ارزشمند منطقه در چهار قطبش مختلف را محدود کرد. برای غلبه به این محدودیت ها، آماربرداری با اندازه قطعه نمونه متناسب در منطقه ای که تصاویر ماکروویو آن موجود باشد پیشنهاد می شود. با توجه به اینکه زی توده وابسته به پوشش زمین، مقدار کلروفیل و تراکم جنگل است و همه این ویژگی ها بر انعکاس ثبت شده به وسیله سنجنده مؤثر است، مسئله اشباع زی توده در سیگنال برگشتی و باندهای طیفی نیز باید در نظر گرفته شود. از این رو برای افزایش دقت مدل سازی، دستیابی به سطح اشباع زی توده از بررسی چندین تصویر در زمان های نزدیک و در باندهای مختلف پیشنهاد می شود. همچنین برای رسیدن به نتایج مطمئن تر، پیشنهاد می شود که ابتدا مدل سازی در توده های حتی الامکان خالص انجام گیرد و در صورت کسب نتایج قوی، مدل سازی در توده های مخلوط ادامه یابد.

نتایج تأثیرگذار باشد، آمیختگی نسبی جنگل از گونه های مختلف است. هرچند در بخش هایی از سری گرازبن توده های خالص یافت می شود، همین گونه های مختلف به دلیل داشتن رفتارهای مختلف در برخورد با امواج دریافتی، پاسخ های متفاوتی ارائه می دهند. با توجه به نتایج به دست آمده در داده های سال ۲۰۰۷، مدل سازی توسط متغیرهای تصویر لندست سنجندۀ TM، با $R^2=0/83$ و $RMSE=114/06$ به عنوان بهترین مدل انتخاب شد. در داده های سال ۲۰۱۲ نیز متغیرهای تصویر موزاییک آلوس ($R^2=0/83$ و $RMSE=108/99$) و سنجندۀ OLI ($R^2=0/82$ و $RMSE=112/50$)، بهترین نتایج مدل سازی زی توده را نشان می دهد. ضرایب تعیین یادشده نسبت به تحقیق Attarchi & Gloaguen (2014) در مدل سازی زی توده بخشی از جنگل های هیرکانی با استفاده از لندست ۷ با $R^2=0/59$ ، به طور معنی داری بیشتر است. از این گذشته این نتایج با یافته های Ronoud & Darvishsefat (2018) با استفاده از لندست ۵ به مقدار $R^2=0/16$ در همین منطقه (جنگل خیرود) و در توده های خالص راش و همچنین نتایج Moradi et al. (2018) با استفاده از لندست ۸ به مقدار $R^2=0/29$ در توده های خالص ممرز همین منطقه، تفاوت های بسیار چشمگیری دارد. این نکته موجب عدم اطمینان کافی به نتایج و ضرورت انجام تحقیقات بیشتر را مطرح می کند. شاید مهم ترین دلیل بسیار زیاد بودن ضرایب تعیین در این تحقیق، حذف ۳۵ قطعه نمونه به منظور بهینه کردن مدل باشد.

نتیجه گیری

در این تحقیق، زی توده در جنگل های گرازبن با استفاده از مجموعه داده نوری لندست و ماکروویو آلوس پالسر در دو سال ۲۰۰۷ و ۲۰۱۲ و با داشتن اطلاعات ۲۰۱ قطعه نمونه زمینی برآورد شد. در سال ۲۰۰۷، مدل سازی توسط متغیرهای تصویر لندست

References

- 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(5), 3693-3715.
- Bayat, M., Namiranian, M., Zobeiri, M., & Fathi, J. (2013). Determining growth increment and density of trees in forest, using permanent sample plots (case study: Gorazbon district of Kheyroud Forest). *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*, 21(3), 424-438.
- Beale, H.D., Demuth, H.B., & Hagan, M.T. (1996). *Neural network design*. USA: PWS Publishing Company, 217p.
- Cao, L., Pan, J., Li, R., Li, J., & Li, Z. (2018). Integrating airborne LiDAR and optical data to estimate forest aboveground biomass in arid and semi-arid regions of China. *Remote Sensing*, 10(4), 532.
- Carreiras, J.M., Vasconcelos, M. J., & Lucas, R. M. (2012). Understanding the relationship between aboveground biomass and ALOS PALSAR data in the forests of Guinea-Bissau (West Africa). *Remote Sensing of Environment*, 121, 426-442.
- Civco, D.L., & Waug, Y. (1994). Classification of multispectral, multitemporal, multisource spatial data using artificial neural networks. *Congress on Surveying and Mapping. USA*. (123-133).
- Enayeti, A.A. (2010). *Wood physics*. Tehran: University of Tehran Press.
- Etemad, V. (2002). Quantity and quality investigation seed of beech in forests of Mazandaran province. (Ph.D. Dissertation), Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, p 258.
- Forouze, M.R., Heshmati, G.A., Ghanbarian, G.A., & Mesbah, H. (2008). Comparison of carbon sequestration ability of three species of Sunflower, Black Guinea and Artemisia bushes in arid rangelands of Iran. (Case Study: Fars Grabegan Plain). *Journal of Environmental Studies*, 34(46), 65-72.
- Ghasemi, N., Sahebi, M. R., & Mohammadzadeh, A. (2012). Biomass estimation of a temperate deciduous forest using wavelet analysis. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, 51(2), 765-776.
- Hardy, C.C. (1996). *Guidelines for estimating volume, biomass, and smoke production for piled slash* (Vol. 364). USA: US Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station.
- Koju, U., Zhang, J., & Gilani, H. (2017). Exploring multi-scale forest above ground biomass estimation with optical remote sensing imageries. In IOP Conference Series: *Earth and Environmental Science* 57(1): 012011.
- Lu, D. (2006). The potential and challenge of remote sensing-based biomass estimation. *International journal of remote sensing*, 27(7), 1297-1328.
- Mitchard, E.T., Saatchi, S.S., Lewis, S.L., Feldpausch, T.R., Woodhouse, I.H., Sonké, B., & Meir, P. (2011). Measuring biomass changes due to woody encroachment and deforestation/ degradation in a forest-savanna boundary region of central Africa using multi-temporal L-band radar backscatter. *Remote Sensing of Environment*, 115(11), 2861-2873.
- Mitchard, E.T., Saatchi, S.S., Woodhouse, I.H., Nangendo, G., Ribeiro, N. S., Williams, M., & Meir, P. (2009). Using satellite radar backscatter to predict above-ground woody biomass: A consistent relationship across four different African landscapes. *Geophysical Research Letters*, 36(23).
- Moradi, F., Darvishsefat, A.A., Namiranian, M., & Ronoud, G. (2018). Investigating the capability of Landsat 8 OLI data for estimation of aboveground woody biomass of common hornbeam (*Carpinus betulus* L.) stands in Kheyroud Forest. *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*, 26(3), 406-420.
- Oliver, C., & Quegan, S. (2004). *Understanding synthetic aperture radar images*. SciTech Publishing.

Ramezani, M.R., & Sahebi, M.R. (2015). Forest biomass estimation using SAR and optical images. *Journal of Geospatial Information Technology*, 3(1), 15-26.

Ronoud, GH., & Darvishsefat, A.A. (2018). Estimating aboveground woody biomass of *Fagus orientalis* stands in Hyrcanian forest of Iran using Landsat 5 satellite data (case study: Khyroud forest). *Geographical-space*, 60(17), 117-129.

Shamsoddini, A., Trinder, J.C., Wagner, W. (2010). Image texture preservation in speckle noise suppression. *ISPRS TC VII Symposium, Part 7A*. (239-244).



Research Article

**Forest biomass estimation using optical and microwave imagery
(Case study: Garazbon Series, Kheirud Forest)**

M. Fazelian¹, S. Attarchi^{2*}, V. Etemad³, and V. Lisenberg⁴

¹ M.Sc., Dept. of Remote Sensing and GIS, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, I. R. Iran

² Assistant Prof., Department of Remote Sensing and GIS, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, I. R. Iran

³ Associate Prof., Department of Forestry, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, I. R. Iran

⁴ Associate Prof., Department of Forest engineering, Santa Catarina State University, Florianopolis, Brazil

(Received: 1 February 2020, Accepted: 26 July 2020)

Abstract

Estimation of forest aboveground biomass is important in regional carbon policies and sustainable forest management. Since forests are the largest carbon store, it is important to evaluate the forest biomass to estimate carbon storage and its impacts on climate change in global scale. Optical and active microwave remote sensing data both play important roles in forest biomass monitoring. Our aims in this research are biomass modeling and estimation using multilayer perceptron neural network in Gorazbon district, Kheyroud Forest in Mazandaran province. Estimation was performed using the Landsat and ALOS PALSAR dataset and also 201 ground sample plots in two years of 2007 and 2012. The capability of the ALOS PALSAR Global Mosaic product with 25 m resolution was also evaluated in biomass estimation. The effects of environmental factors such as slope and aspect were specifically evaluated on the accuracy of biomass estimation. Finally, the best model was presented in 2012 by ALOS PALSAR Global Mosaic product with $R^2 = 0.83$ and $RMSE = 108.99$ which has very little difference from other optical and radar images. According to the research results, newer sensors using up-to-date technology will deliver much better results compared to the previous generations. Of course, to ensure these results, it is necessary to conduct additional studies in this field as well.

Keywords: Biomass, Forest, slope & aspect, neural network, ALOSPALSAR, Landsat

