



برآورد زی توده چوبی روی زمینی با به کارگیری داده‌های راداری در جنگل‌های آمیخته هیرکانی (مطالعه موردی: جنگل خیرود نوشهر مازندران)

قاسم رونود^{۱*}، علی اصغر درویش صفت^۲، مایکل شپمن^۳، منوچهر نمیرانیان^۲ و یاسر مقصودی^۴

^۱ دانشجوی دکتری گروه جنگلداری و اقتصاد جنگل، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج

^۲ استاد گروه جنگلداری و اقتصاد جنگل، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج

^۳ استاد آزمایشگاه‌های سنجش از دور، دانشگاه زوریخ، زوریخ، سوئیس

^۴ دانشیار دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۸/۰۳؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۰/۱۸)

چکیده

در این پژوهش، قابلیت داده‌های راداری قطبش کامل ماهواره ALOS-2 در برآورد زی توده چوبی روی زمینی جنگل‌های آمیخته هیرکانی بررسی شد. به منظور آماربرداری ابتدا با جنگل‌گردشی مناطق مناسب با شیب کم شناسایی و ۱۲۷ قطعه نمونه مربع شکل با مساحت ۹۰۰ متر مربع در آن پیاده شد. قطر برابر سینه و ارتفاع درختان قطورتر از ۷/۵ سانتی‌متر اندازه‌گیری و حجم هر درخت با استفاده از این دو مشخصه محاسبه شد. برای محاسبه زی توده در هر قطعه نمونه از رابطه تبدیل حجم به زی توده (با ضرب حجم در چگالی بحرانی چوب) استفاده شد. میانگین زی توده روی زمینی محاسباتی در منطقه پژوهش ۳۱۸/۰۴ تن در هکتار است. به منظور پردازش داده‌های ALOS-2، کانال‌های قطبشی کالیبراسیون و چنددیده شدند. برای کاهش نویز، فیلتر باکس کار با ابعاد پنجره ۵×۵ پیکسل اعمال شد و در نهایت متغیرهای استخراج شده تصحیح هندسی شدند. شدت بازپخش در فرم گامانات برای قطبش‌های مختلف، مؤلفه‌های تجزیه هدف Freeman-Durden و مشخصه‌های حاصل از روابط ریاضی بین کانال‌های قطبشی متغیرهای استخراج شده در این تحقیق بودند. به منظور مدل‌سازی برآورد زی توده با استفاده از متغیرهای ذکر شده، سه الگوریتم ناپارامتریک شامل k نزدیک‌ترین همسایه (k -NN)، جنگل تصادفی (RF) و رگرسیون بردار پشتیبان (SVR) اجرا شد. نتایج مدل‌سازی با استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی نشان داد که زی توده روی زمینی می‌تواند با ضریب تبیین ۰/۳۸ و جذر میانگین مربعات خطای نسبی ۲۳/۷۷ درصد برآورد شود؛ در حالی که الگوریتم‌های k نزدیک‌ترین همسایه (k -NN) با ضریب تبیین ۰/۳۸ و جذر میانگین مربعات خطای ۲۴/۳۸ درصد و رگرسیون بردار پشتیبان با مقادیر ضریب تبیین ۰/۳۵ و جذر میانگین مربعات خطای ۲۵/۲ درصد صحت کمتری در برآورد زی توده داشتند. به طور کلی نتایج این پژوهش نشان‌دهنده قابلیت متوسط داده‌های قطبش کامل راداری ALOS-2 در برآورد زی توده چوبی روی زمینی در شرایط جنگل‌های آمیخته هیرکانی است.

واژه‌های کلیدی: ALOS-2، جنگل‌های آمیخته، رادار، زی توده چوبی روی زمینی، قطبش.

مقدمه

کاربردهای علم سنجش از دور است و مشخصه‌ای مانند زی توده چوبی روی زمینی^۱ از پارامترهای لازم برای درک حد پایداری اکوسیستم‌های جنگلی است (Behera et al., 2016). زی توده روی زمینی در

کسب اطلاعات درباره مشخصه‌های کمی توده‌های جنگلی، برای برنامه‌ریزی، پایش، حفاظت و مدیریت جنگل‌ها ضروری است. پایش جنگل از مهم‌ترین

فراهم‌سازی اطلاعات ساختار عمودی توده‌های جنگلی نیستند. در چنین شرایطی، استفاده از داده‌های ماهواره‌ای راداری ممکن است گزینه عملی‌تری برای برآورد و تهیه نقشه مشخصه‌های توده‌های مناطق جنگلی در وسعت وسیع باشد. از این‌رو استفاده از این داده‌ها برای برآوردهای منظم مشخصه‌های منابع جنگلی و تهیه ورودی‌های با صحت زیاد برای مدل‌های چرخه کربن مقرون‌به‌صرفه و کارآمد است (Lu et al., 2016).

داده‌های راداری را می‌توان به دو صورت هواپرد و فضاپرد در طول موج‌های مختلفی دریافت کرد که یکی از پرکاربردترین آنها باند L با طول موج تقریبی ۲۲/۹ سانتی‌متر است. یکی از مزایای این طول موج این است که در اثر برخورد با تاج‌پوشش از برگ و شاخه‌های کوچک‌تر از طول موج این باند عبور می‌کند و به ساختار عمودی جنگل دسترسی می‌یابد. سامانه‌های راداری موج با قطبش افقی یا عمودی را ارسال و دریافت می‌کنند و برخی نیز می‌توانند هر دو نوع انرژی را ارسال و دریافت کنند. بنابراین قطبش یک تصویر رادار می‌تواند HH (ارسال و دریافت موج با پلاریزاسیون افقی) یا HV (ارسال موج با پلاریزاسیون افقی و دریافت موج با پلاریزاسیون عمودی) و به همین ترتیب VV یا VH باشد (Maghsodi & Mahdavi, 2015). در این میان اگر یک سامانه راداری هر چهار کانال قطبشی را داشته باشد، آن داده قطبش کامل نامیده می‌شود که در مقایسه با داده‌های با دو قطبش مزایای بیشتری دارد، زیرا امکان بررسی اثر انواع بازپراکنش ناشی از نوع قطبیدگی طول موج‌ها در تحلیل وضعیت مختلف توده را فراهم می‌کند که تحقیقات بسیاری این برتری را نشان داده‌اند (Fransson et al., 2016; Li et al., 2016;) (Bharadwaj et al., 2015). زی‌توده چوبی روی‌زمینی جنگل هنگام استفاده از تصاویر راداری به‌طور معمول از طریق به‌کارگیری مدل‌های رگرسیونی بر مبنای روابط تجربی بین زی‌توده چوبی و متغیرهای دورسنجی

دهه‌های اخیر توجه بسیاری از محققان را جلب کرده است (Ronoud et al., 2021; Cassol et al., 2019; Moradi et al., 2018; Ronoud et al., 2017; Fransson et al., 2016; Behera et al., 2016; Lu et al., 2016)، چراکه از سویی بیانگر مقدار کربن ذخیره‌شده در اکوسیستم‌های جنگلی است و از سویی دیگر برای مدل‌سازی اکولوژیکی این اکوسیستم‌های پیچیده ضرورت دارد. به‌دلیل تأثیر مهم جنگل‌ها در چرخه کربن جهانی، عدم قطعیت‌ها در برآورد زی‌توده چوبی روی‌زمینی صحت محاسبه ذخیره کربن را تحت تأثیر قرار می‌دهد که ممکن است سبب عدم قطعیت‌های معنی‌دار در مدل‌های خروجی شود. این موضوع اهمیت ایجاد و به‌کارگیری روش‌های پایش و برآورد زی‌توده چوبی روی‌زمینی با صحت زیاد را روشن می‌کند (Ronoud & Darvishsefat., 2018; Lu et al., 2016).

آماربرداری زمینی مشخصه‌های جنگلی برای فراهم کردن اطلاعات به‌روز و مکرر در مورد وسعت، توزیع مکانی و پویایی پوشش جنگلی مناطق وسیع اغلب ناکافی، پرهزینه و زمان‌بر است (Darvishsefat et al., 2017). رویکردی اقتصادی‌تر در ترکیب سیستماتیک داده‌های رصد کره زمین یعنی داده‌های دورسنجی با داده‌های اندازه‌گیری‌شده زمینی نهفته است (Lu et al., 2016). داده‌های متنوعی برای برآورد و تهیه نقشه مشخصه‌های جنگلی وجود دارد، از جمله داده‌های لیزر اسکنر هوایی، داده‌های سنجش از دوری نوری و داده‌های راداری هواپرد و فضاپرد (Chen et al., 2021; Nasiri et al., 2020). دورسنجی هواپرد در مقایسه با دورسنجی فضاپرد به‌ویژه برای مناطق وسیع به‌نسبت پرهزینه است؛ در کنار آن استفاده از داده‌های ماهواره‌ای نوری به‌ویژه در شرایطی مانند آب‌وهوای جنگل‌های شمال ایران که گاهی پوشیده از ابر است با محدودیت‌هایی روبه‌رو می‌شود (Fazelian et al., 2020). افزون‌بر این در داده‌های ماهواره‌ای نوری، بیشتر بازتاب‌ها از سطح فوقانی تاج‌پوشش انعکاس می‌یابند و قادر به

قطبش کامل^۷ در خارج از کشور انجام گرفته است (Cassol et al., 2019; Behera et al., 2016; Fransson et al., 2016; Li et al., 2016; Bharadwaj et al., 2015; Santoro et al., 2015; Sinha et al., 2014; Bispo et al., 2015) ولی متأسفانه در داخل کشور با توجه به محدودیت دسترسی به این‌گونه تصاویر راداری و شرایط مشکل آماربرداری در عرصه جنگل، پژوهش‌های بسیار اندکی در این زمینه صورت گرفته است که از تصاویر راداری با قطبش دوگانه یا قطبش کامل استفاده کرده‌اند (Poorazimy et al., 2020; Nouri et al., 2019; Ghasemi et al., 2012; Amini & Sumantyo, 2009).

با توجه به مزایای داده‌های راداری در بررسی اکوسیستم‌های جنگلی به‌ویژه قابلیت نفوذ طول موج‌های بلند راداری مثل باند L در تاج‌پوشش و دسترسی به ساختار عمودی درختان، تعداد اندک پژوهش‌ها در جنگل‌های شمال ایران با داده‌های قطبش کامل و از سویی با عنایت به اینکه جنگل‌های باستانی شمال ایران از جمله جنگل‌های معتدله پهن‌برگ هستند که اثر بسزایی در ذخیره کربن، جلوگیری از فرسایش خاک، حفظ تنوع زیستی، تولید چوب و ... دارند و نیز با لحاظ ضرورت کسب اطلاعات با صحت مناسب در زمینه مدیریت بهینه و پایش این منابع جنگلی مشهود است. هدف اصلی این پژوهش بررسی قابلیت داده‌های قطبش کامل فضا برد ALOS-2 برای برآورد زی توده چوبی روی زمینی با استفاده از الگوریتم‌های ناپارامتریک یادگیری ماشین^۸ شامل k نزدیک‌ترین همسایه^۹ (k-NN)، جنگل تصادفی^{۱۰} (RF) و رگرسیون بردار پشتیبان^{۱۱} (SVR) در توده‌های آمیخته جنگل خیرود نوشهر در استان مازندران است.

حاصل از پردازش تصاویر رادار صورت می‌گیرد. این متغیرهای دورسنجی ممکن است شامل شدت بازپراکنش^۱ در کانال‌های قطبشی مختلف، مؤلفه‌های حاصل از به کارگیری روش‌های تجزیه هدف^۲ پلاریمتری و متغیرهای حاصل از روابط ریاضی مختلف میان کانال‌های قطبشی باشند (Cassol et al., 2019; Sinha et al., 2015; Bispo et al., 2014). داده راداری باند L در سال‌های اخیر برای مدل‌سازی و برآورد زی توده چوبی روی زمینی استفاده شده است؛ چراکه اندازه طول موج پالس راداری آن (طول موج ۲۲/۹ سانتی‌متر) با ابعاد عناصر چوبی جنگل مانند تنه و شاخه‌ها (Cassol et al., 2019) به‌ویژه توده‌های جنگلی شمال ایران تناسب دارد.

ماهواره خورشیدآهنگ^۳ ALOS-2 که سنجنده راداری آن PALSAR نام دارد، در سال ۲۰۱۴ توسط سازمان فضایی ژاپن در ارتفاع ۶۲۸ کیلومتری از زمین در مدار قرار گرفت. دوره بازدید یک نقطه زمینی (زمان تصویربرداری مجدد از یک منطقه) در این ماهواره چهارده روز است که برتری سنجنده آن در اخذ داده‌های تداخل‌سنجی^۵ را نشان می‌دهد. سنجنده PALSAR با باند L (طول موج ۲۲/۹ سانتی‌متر) دارای قابلیت راست و چپ‌بینی در حدود زاویه فرود ۸ تا ۷۰ درجه است. این سنجنده در مدهای متفاوتی فعالیت می‌کند، از جمله مد Stripmap که در آن داده‌ها در چهار قطبش (HH+HV+VH+VV) با اندازه تفکیک مکانی در جهت آزیموت ۳ متر و در جهت برد^۶ ۱ متر جمع‌آوری می‌شود (Maghsodi & Mahdavi, 2015). پژوهش‌های متعددی در زمینه برآورد زی توده چوبی روی زمینی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای راداری

7. Quad-pol
8. Machine learning
9. k-Nearest Neighbor (k-NN)
10. Random Forest (RF)
11. Support Vector Regression (SVR)

1. Backscattering intensity
2. Target decomposition
3. Advanced Land Observing Satellite (ALOS)
4. Phased Array L-band Synthetic Aperture Radar (PALSAR)
5. Interferometry
6. Range direction

مواد و روش‌ها

منطقه پژوهش

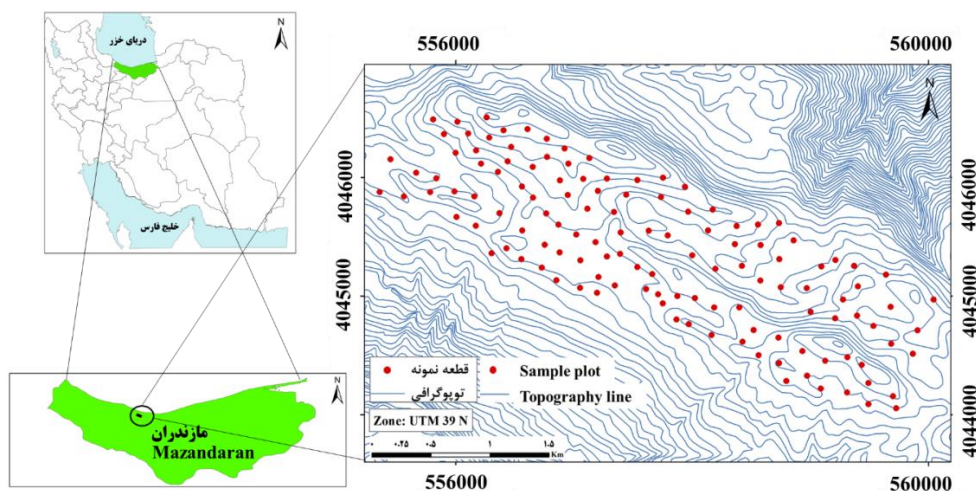
منطقه پژوهش بخشی از جنگل آموزشی-پژوهشی خیرود واقع در هفت کیلومتری شهرستان نوشهر در استان مازندران است که بین ۵۱ درجه و ۳۲ دقیقه تا ۵۱ درجه و ۴۳ دقیقه طول شرقی و ۳۶ درجه و ۲۷ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۴۰ دقیقه عرض شمالی قرار دارد. مساحت این جنگل حدود ۸۰۰۰ هکتار است و این پژوهش در بخش‌هایی از سری‌های گرازین و چلیر این جنگل در مساحت تقریبی ۸۰۰ هکتار صورت گرفت. ارتفاع مناطق آماربرداری شده از سطح دریا از حدود ۱۲۰۰ متر تا حدود ۱۴۰۰ متر متغیر است. گونه‌های غالب منطقه راش شرقی (*Fagus orientalis* Lipsky)، ممرز (*Carpinus betulus* L.)، افرا (*Acer sp.*) و توسکا (*Alnus*

(*subcordata* C.A.Mey) هستند. در این تحقیق سعی شد تا قطعات نمونه در مناطق به نسبت مسطح و کم‌شیب پیاده شوند تا اثر شیب بر میزان بازپراکنش سیگنال‌های راداری حداقل شود. شکل ۱ موقعیت منطقه و پراکندگی قطعات نمونه روی نقشه توپوگرافی را با فاصله خطوط ۲۰ متری نشان می‌دهد.

شیوه اجرای پژوهش

داده سنجش از دوری

به منظور برآورد زی توده چوبی روی زمینی از داده قطبش کامل راداری فضا برد ماهواره ALOS-2 در تاریخ چهارم اردیبهشت ۱۳۹۴ با قدرت تفکیک مکانی حدود ۶ متر استفاده شد. این داده‌ها در مد تصویربرداری Stripmap هستند و چهار کانال قطبشی HH, HV, VH, VV دارند. مشخصات کامل داده دورسنجی در جدول ۱ آمده است.



شکل ۱- موقعیت منطقه پژوهش در ایران و استان مازندران و پراکندگی قطعات نمونه تحقیق روی نقشه توپوگرافی با فاصله خطوط ۲۰ متری

Figure 1. The location of the study area in Iran and Mazandaran province and the distribution of the sample plots on the topographic map with a distance of 20 meters between the lines

جدول ۱- مشخصات داده ماهواره ALOS-2 به کار گرفته شده در تحقیق

Table 1. Attributes of ALOS-2 satellite data used in this research

زاویه خارج از نادیر (درجه) Off-nadir (degree)	جهت دید Pass direction	قطبش Polarisation	طول موج راداری Wavelength	تاریخ تصویر Date
30.4	بالارونده (راست) Ascending (right)	HH, HV, VH, VV	L (22.9 سانتی‌متر) L (22.9 cm)	۰۴/۰۲/۱۳۹۴ 24.02.2015

پیش پردازش و پردازش داده‌ها

برای پیش پردازش‌ها و پردازش‌های راداری مورد نظر از نسخه ۶ نرم افزار SNAP استفاده شد. بدین منظور در ابتدا پنجره کوچکی از تصویر اصلی متناسب با محدوده پراکنش قطعات نمونه انتخاب شد. به منظور حذف اثرهای وابسته به سنجنده از روی تصاویر راداری، کالیبراسیون همه کانال‌های قطبشی صورت گرفت. به این صورت که نرمال سازی رادیومتری برای جبران اثر پستی و بلندی‌های منطقه که سبب عدم بازپراکنش واقعی توده و مشکل در ثبت مقدار واقعی شدت بازپراکنش توده می‌شوند، با به کارگیری زاویه برخورد محلی در فرمت گامانات (γ^0) برای هر چهار کانال قطبشی تصویر راداری تحقیق صورت گرفت. در مرحله بعد، برای بهبود قدرت تفکیک رادیومتری و همچنین ایجاد پیکسل‌های مربع شکل، تصاویر دامنه کانال‌های قطبش تحقیق، یک بار در جهت آزیموت^۱ و دو بار در جهت برد چنددیده^۲ شدند. همچنین فیلتر باکس کار^۳ با ابعاد پنجره 5×5 برای کاهش نویز لکه‌ای روی تصاویر تحقیق اجرا شد. از مدل رقومی ارتفاعی حاصل از پردازش تصاویر راداری ALOS PALSAR با اندازه پیکسل $12/5$ متر برای تصحیح هندسی و زمین مرجع سازی تصاویر راداری تحقیق استفاده شد. سه نوع بازپراکنش حجمی^۴، دوجشه^۵ و تک جشه^۶ نیز براساس روش تجزیه هدف Freeman-Durden (Freeman & Durden, 1998) از داده‌های قطبشی این تحقیق استخراج شد. افزون بر تهیه مؤلفه‌های شدت بازپخش در فرم گامانات شامل گامانات HH، گامانات HV، گامانات VH و گامانات VV از روابط ریاضی بین کانال‌های قطبشی نیز استفاده شد (جدول ۲). به دلیل اهمیت ارتباط میان کانال‌های قطبشی با

زی توده روی زمینی، ابرنقاط رابطه میان زی توده چوبی اندازه گیری شده و ضریب بازپخش راداری (گامانات) در کانال‌های قطبشی HH، HV و VV نیز تهیه و بررسی شد. به دلیل شباهت بسیار زیاد دو کانال HV و VH فقط نمودار داده‌های کانال قطبشی HV آورده شده است. به دلیل اهمیت دو مؤلفه حجمی و دوجشه حاصل از روش تجزیه هدف Freeman-Durden، رابطه ابرنقاط بین این دو مؤلفه با زی توده چوبی روی زمینی در منطقه نیز تهیه شد. ارزش‌های دورسنجی متناظر با قطعات نمونه زمینی با استفاده از یک پنجره 5×5 در نرم افزار SNAP صورت گرفت، به طوری که میانگین این ارزش‌های متناظر استخراج شد.

داده زمینی و زی توده چوبی روی زمینی

با توجه به شیب زیاد منطقه و وجود دولین‌های فراوان، امکان تعیین قطعات نمونه به صورت تصادفی-منظم وجود نداشت. از این رو ابتدا با جنگل گردشی، مناطق مناسب شناسایی و سپس قطعات نمونه پیاده شدند. در این تحقیق در مجموع ۱۲۷ قطعه نمونه مربع شکل هر کدام به مساحت ۹۰۰ متر مربع (30×30 متر) در تابستان ۱۳۹۷ پیاده شدند. همچنین سعی شد قطعات نمونه در همه دامنه‌های حجمی منطقه پیاده شوند. در انتخاب قطعات نمونه هم سعی شد که بین مراکز آنها حدود ۲۰۰ متر فاصله باشد. در همه قطعات نمونه، نوع گونه، قطر برابرسینه و ارتفاع همه درختان قطورتر از $7/5$ سانتی متر اندازه گیری و ثبت شد. قطر برابرسینه درختان با استفاده از کالیبر چوبی و ارتفاع درختان با استفاده از متر لیزری TruPulse 360 laser range finder اندازه گیری شد. مختصات دقیق مرکز قطعات نمونه با دقت سانتی متر با استفاده از دستگاه DGPS Trimble R3 و به روش PPK= برداشت شد. حجم سرپای تک تک درختان با استفاده از رابطه ۱ محاسبه (Namiranian, 2006).

1. Azimuth direction
2. Multi-look
3. Box car filter
4. Volume
5. Double bounce
6. Single bounce

جدول ۲- متغیرهای دورسنجی برآوردکننده استفاده شده حاصل از تصاویر راداری ALOS-2 در تحقیق

Table 2. ALOS-2 variables for AGB estimation in this study

متغیر دورسنجی مربوط Remote sensing variable	متغیر برآوردکننده Estimator variable	متغیر دورسنجی مربوط Remote sensing variable	متغیر برآوردکننده Estimator variable
$HH-HV$		بازپراکنش حجمی Volume backscattering	مؤلفه‌های روش تجزیه هدف Freeman-Durden
$HV-HH$		بازپراکنش دوجبهه Double bounce backscattering	Components of the Freeman-Durden target decomposition algorithm
$VH-VV$		بازپراکنش تک‌جبهه Single bounce backscattering	
$VH \times VV$		گامانات HH $HH \gamma^0$	
$\frac{HH + HV}{2}$	متغیرهای حاصل از روابط ریاضی	گامانات HV $HV \gamma^0$	
$\frac{VH + VV}{2}$	بین کانال‌های قطبشی Variables resulting from mathematical operations among polarization channels	گامانات VH $VH \gamma^0$	مؤلفه‌های شدت بازپخش Backscattering intensity components
$VH - VV$		گامانات VV $VV \gamma^0$	
$\frac{\sqrt{HH \times HV}}{\sqrt{VH \times VV}}$			

چوب مورد نیاز است. چگالی بحرانی چوب گونه راش که برای درختان همین منطقه حاصل شده برابر با ۰/۵۶ است (Tarmian et al., 2009). چگالی بحرانی چوب گونه‌های دیگر موجود در منطقه از کتاب فیزیک چوب دکتر عنایتی استخراج و استفاده شد (Enayati, 2011). در نهایت مجموع زی‌توده درختان موجود در هر قطعه نمونه به دست آمد.

مدل‌سازی و برآورد زی‌توده چوبی روی زمینی

مدل‌سازی زی‌توده چوبی روی زمینی با استفاده از الگوریتم‌های ناپارامتریک یادگیری ماشین شامل k نزدیک‌ترین همسایه (k -NN)، جنگل تصادفی (RF) و رگرسیون بردار پشتیبان (SVR) در محیط نسخه ۱۲ نرم‌افزار Statistica صورت گرفت. در اجرای الگوریتم k -NN، به منظور تعیین تعداد K بهینه، از گزینه اعتبارسنجی متقابل یعنی به کارگیری همه قطعات نمونه برای مدل‌سازی و باقی گذاشتن یک قطعه نمونه برای اعتبارسنجی و تکرار فرایند ذکر شده استفاده شد. در این روش دامنه K از ۱ تا ۲۰ در نظر گرفته شد. ضمن بررسی مقدار K بهینه با

$$\text{رابطه ۱} \quad \text{Volume} = \frac{\pi}{4} * d_{1.30}^2 * h * f$$

که در آن Volume حجم درخت به متر مکعب (m^3)، $d_{1.30}$ قطر درخت در ارتفاع برابر سینه (۱/۳۰ متر) به متر (m)، h ارتفاع درخت به متر (m) و f ضریب شکل است که مقدار آن در این رابطه برای جنگل‌های شمال ایران ۰/۵ در نظر گرفته می‌شود (Namiranian, 2006).

پس از محاسبه حجم چوب در برای هر درخت، با استفاده از معادله تبدیل حجم به زی‌توده چوبی (رابطه ۲) (Brown & Lugo, 1984) که توسط سازمان خواربار جهانی نیز ارائه شده است، مقدار زی‌توده برای هر درخت (تن) برآورد شد:

$$\text{رابطه ۲} \quad \text{AGB (ton)} = \text{Volume} * \text{WD}$$

که در آن Volume حجم چوب به متر مکعب در هکتار (m^3/ha) و WD چگالی بحرانی متوسط چوب به تن در متر مکعب (ton/m^3) است. برای محاسبه زی‌توده چوبی برپایه حجم درخت چگالی بحرانی^۱

۱. چگالی بحرانی (پایه) عبارت است از نسبت وزن خشک چوب در رطوبت صفر به حجم اشباع از آب همان چوب. برای تعیین زی‌توده چوبی درختان جنگلی از چگالی بحرانی استفاده می‌شود.

چوب سرپا چوب اشباع در نظر گرفته می‌شود (Enayati, 2011).

گرفته شدند. شانزده متغیر دورسنجی شامل مؤلفه‌های شدت بازپخش در فرم گامانات، شامل گامانات HH، گامانات HV، گامانات VH و گامانات VV و همچنین مؤلفه‌های حاصل از اعمال روش تجزیه هدف Freeman-Durden و متغیرهای حاصل از روابط ریاضی بین چهار کانال قطبشی داده راداری ALOS-2 به کار گرفته شدند. به منظور بررسی استقلال مشاهدات و نرمال بودن باقی مانده‌های برآورد زی توده روی زمینی از آزمون دوربین-واتسون^۴ استفاده شد.

روش تحلیل

اعتبارسنجی نتایج

به منظور اعتبارسنجی زی توده چوبی روی زمینی برآورد شده از الگوریتم‌های ناپارامتریک به کار گرفته شده روی تصاویر راداری قطبش کامل ALOS-2، از حدود ۷۰ درصد داده‌ها برای مدل سازی استفاده شد و حدود ۳۰ درصد قطعات نمونه به صورت تصادفی انتخاب و به عنوان مجموعه داده‌های اعتبارسنجی از همه تجزیه و تحلیل‌ها کنار گذاشته شد. از سه آماره ضریب تبیین (R^2)، جذر میانگین مربعات خطا^۵ (RMSE) و جذر میانگین مربعات خطای نسبی^۶ (rRMSE) برای ارزیابی مدل‌های آماری تحقیق استفاده شد. (رابطه‌های ۴ تا ۶).

$$r^2 = \frac{\left[\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P}) \right]^2}{\left(\sqrt{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2} \right) \left(\sqrt{\sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P})^2} \right)} \quad \text{رابطه ۴}$$

$$RMSE = \left[N^{-1} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2 \right]^{-0.5} \quad \text{رابطه ۵}$$

$$rRMSE = \frac{RMSE}{\bar{O}} \times 100 \quad \text{رابطه ۶}$$

که N تعداد قطعات نمونه، O_i مقادیر

اعتبارسنجی ده قسمتی، همه متریک‌های فاصله‌ای از جمله اقلیدسی، مربع اقلیدسی^۱، منهتن^۲ و چبایچو^۳ به کار گرفته و نتایج با هم مقایسه شد. در اجرای الگوریتم جنگل تصادفی، یکی از پارامترهای تأثیرگذار، تعداد برآوردکننده متغیرهای مستقلی است که در هر گره به منظور شروع برآورد متغیر وابسته استفاده می‌شوند (K) (Mohammadi et al., 2017). به طور معمول مجذور تعداد متغیرهای مستقل مدل می‌تواند یک K بهینه باشد. به منظور برآورد دقیق‌تر در این مطالعه از رابطه^۳ استفاده شد (Poorazimy et al., 2017). پارامتر مهم دیگر تعیین تعداد درختان بهینه است که به این منظور، ابتدا این الگوریتم با ۵۰۰ درخت اجرا و نمودار میانگین مربعات خطای داده‌های آموزش و آزمون نسبت به تعداد درختان تهیه شد. با تفسیر نمودار ذکر شده، جایی که افزایش تعداد درختان تأثیری بر روند کاهش میانگین مربعات خطای داده‌های آموزش و آزمون نداشت، به عنوان تعداد درخت بهینه انتخاب شد.

$$\text{رابطه ۳} \quad K = \sqrt{\pm \text{تعداد متغیرهای مستقل}}$$

در اجرای الگوریتم رگرسیون بردار پشتیبان (SVR) باید مقدار بهینه C (پارامتر کرنل) تعیین شود. برای تعیین مقادیر بهینه C و ϵ نیز از روش اعتبارسنجی متقابل تعبیه شده در نرم افزار *Statistica* با اعتبارسنجی ده قسمتی و تکرار ۲۰۰۰ و جستجوی شبکه با دامنه ۱ تا ۱۶ برای C که برابر با دامنه متغیرهای ورودی است و دامنه ۰/۱ تا ۱ برای ϵ با فواصل ۰/۱ برای کرنل‌های خطی، چندجمله‌ای درجه ۲، تابع مبتنی بر شعاع و سیگموئید استفاده شد که مقدار پارامتر گاما برای سه کرنل آخر ۰/۰۶۲۵ در نظر گرفته شد (Poorazimy et al., 2020).

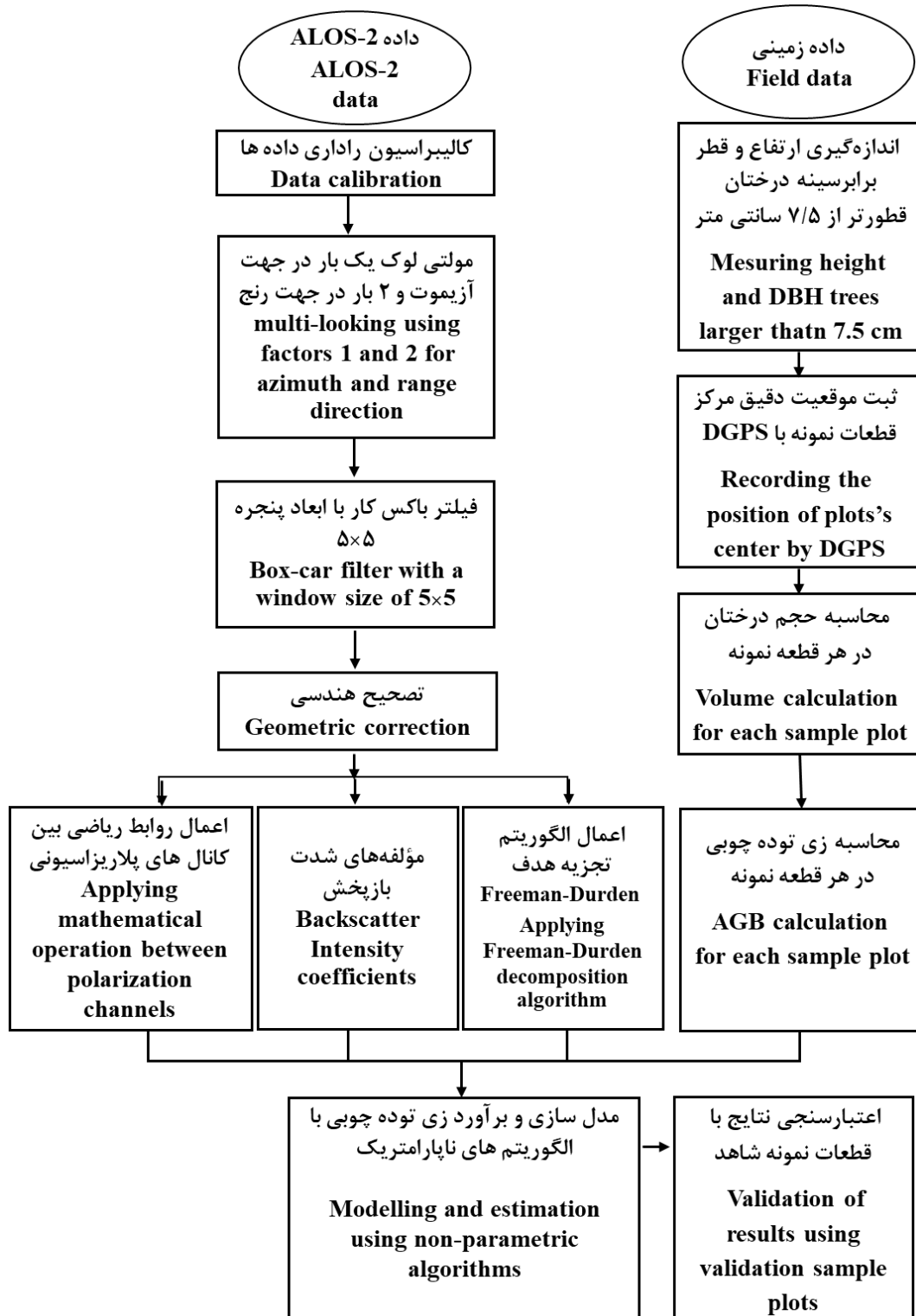
در این پژوهش زی توده چوبی روی زمینی، متغیر وابسته و متغیرهای دورسنجی، متغیر مستقل در نظر

4. Durbin-Watson test
5. Root Mean Square Error (RMSE)
6. relative Root Mean Square Error (rRMSE)

1. Euclidean Squared
2. Cityblock (Manhattan)
3. Chebychev

مقادیر اندازه‌گیری زی توده چوبی روی‌زمینی است. نمایی از فرایند تحقیق در شکل ۲ آورده شده است.

اندازه‌گیری‌شده زی توده چوبی روی‌زمینی، P_i مقادیر برآوردشده زی توده چوبی روی‌زمینی و \bar{O} میانگین



شکل ۲- نمای کلی مراحل تحقیق
Figure 2. The flowchart of applied methodology

نتایج

کمترین مقدار زی توده چوبی روی زمینی در منطقه ۱۹۴/۶۵ تن در هکتار و بیشترین مقدار آن ۵۸۰/۰۴ تن در هکتار است. میانگین زی توده چوبی روی زمینی در منطقه نیز ۳۱۸/۰۴ تن در هکتار است. مشخصات توصیفی بیانگر میانگین زی توده چوبی روی زمینی در سطح قطعه نمونه در جدول ۳ آمده است. از آنجا که بین مقدار زی توده چوبی روی زمینی و حجم ارتباط نزدیکی وجود دارد، مشخصات توصیفی این متغیر کمی در جدول ۳ آمده است.

نتایج برآورد زی توده چوبی حاصل از به کارگیری الگوریتم k نزدیک ترین همسایه (k -NN) با متریک های فاصله ای مختلف در جدول ۴ آمده است. بهترین نتیجه مربوط به متریک فاصله ای منهن با مقادیر ضریب تبیین ۰/۳۸ و جذر میانگین مربعات

خطای نسبی با ۲۴/۳۸ درصد است. برآورد زی توده چوبی با متریک فاصله ای چبایچو هم با مقادیر ضریب تبیین ۰/۲۹ و جذر میانگین مربعات خطای نسبی برابر با ۲۵/۹۵ ضعیف ترین نتایج را در بین متریک های مختلف این الگوریتم برای برآورد زی توده چوبی روی زمینی دارد.

نتایج به کارگیری الگوریتم ناپارامتریک جنگل تصادفی (RF) در برآورد زی توده چوبی روی زمینی با استفاده از ۳ تا ۷ برآوردکننده از در جدول ۵ آورده شده است. بهترین نتیجه مربوط به الگوریتم جنگل تصادفی با هفت برآوردکننده با مقادیر ضریب تبیین ۰/۳۸ و جذر میانگین مربعات خطای نسبی برابر با ۲۳/۷۷ درصد است. ضعیف ترین نتیجه مربوط به به کارگیری سه برآوردکننده با مقادیر ضریب تبیین ۰/۳۶ و جذر میانگین مربعات خطای نسبی برابر با ۲۴/۱۲ درصد است.

جدول ۳- مشخصات توصیفی زی توده چوبی روی زمینی و حجم در سطح قطعه نمونه در منطقه پژوهش

Table 3. Descriptive attributes of AGB and volume of sample plots in the study area

دامنه تغییرات Range	انحراف معیار Standard deviation	میانگین Mean	حداکثر Maximum	حداقل Minimum	مشخصه Attribute
385.39	94.63	318.04	580.04	194.65	زی توده (تن در هکتار) Biomass (Ton per hectare)
144.28	194.65	555.05	834.71	347.59	حجم (متر مکعب در هکتار) Volume (m ³ per hectare)

جدول ۴- نتایج برآورد زی توده چوبی روی زمینی با الگوریتم k نزدیک ترین همسایه (k -NN) و تصاویر راداری ALOS-2Table 4. The results of k -NN algorithm for AGB estimation using ALOS-2 data

ضریب تبیین (R^2) Coefficient of Determination (R^2)	جذر میانگین مربعات خطای نسبی (%) relative Root Mean Square Error (%)	جذر میانگین مربعات خطا (تن در هکتار) Root Mean Square Error (Ton per hectare)	K بهینه Optimal K	متریک فاصله ای Distance metrics
0.37	24.77	79.90	20	اقلیدسی Euclidean
0.37	24.68	79.62	20	مربع اقلیدسی Euclidean Squared
0.37	24.38	78.65	20	منهن Manhatan
0.29	25.95	83.73	20	چبایچو Chebychev

جدول ۵- نتایج برآورد زی‌توده چوبی روی زمینی با الگوریتم جنگل تصادفی (RF) و تصاویر راداری ALOS-2
Table 5. The results of Random Forest algorithm for AGB estimation using ALOS-2 data

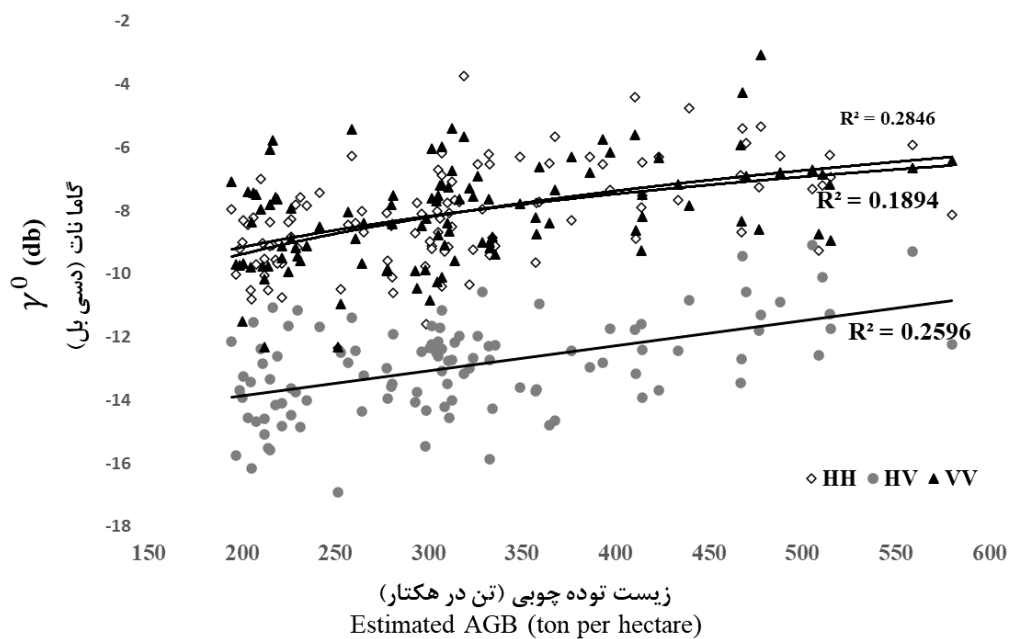
ضریب تبیین (R ²) Coefficient of Determination (R ²)	جذر میانگین مربعات خطا (تن)		تعداد برآوردکننده (k) Number of predictor (k)	تعداد درخت بهینه Optimal number of trees
	جذر میانگین مربعات خطا (%) relative Root Mean Square Error (%)	در هکتار Root Mean Square Error (Ton per hectare)		
0.36	24.12	77.81	3	430
0.37	23.99	77.41	4	430
0.36	23.97	77.34	5	430
0.37	23.87	77.02	6	430
0.38	23.77	76.67	7	430

ابرنقاط رابطه میان زی‌توده چوبی اندازه‌گیری شده و ضریب بازپخش راداری (گامانات) در کانال‌های قطبشی HH، HV و VV در شکل ۳ آورده شده است. بر این اساس، قطبش VV همبستگی قوی‌تری (ضریب تبیین برابر با ۰/۲۸۴۶) از دیگر قطبش‌ها در توده‌های جنگلی منطقه پژوهش دارد. افزون‌بر این قطبش HV جایگاه بعدی و نزدیک به قطبش VV را از لحاظ همبستگی (ضریب تبیین برابر با ۰/۲۵۹۶) دارد. قطبش HH نیز کمترین همبستگی (ضریب تبیین برابر با ۰/۱۸۹۴) را با زی‌توده چوبی روی زمینی اندازه‌گیری شده دارد.

در جدول ۶ نتایج برآورد زی‌توده چوبی روی زمینی جنگل با استفاده از الگوریتم رگرسیون بردار پشتیبان و کرنل‌های مختلف آن آمده است. براساس یافته‌ها، بهترین نتیجه در این الگوریتم مربوط به کرنل تابع مبتنی بر شعاع است که مقادیر ضریب تبیین و جذر میانگین مربعات خطای نسبی آن به ترتیب ۰/۳۵ و ۲۴/۵ درصد است. دو کرنل خطی و چندجمله‌ای درجه ۲ با مقادیر ضریب تبیین و جذر میانگین مربعات خطای نسبی به ترتیب صفر و ۳۵/۵ درصد، ضعیف‌ترین کرنل‌های به‌کارگرفته شده در این الگوریتم هستند و عملاً کارایی ندارند.

جدول ۶- نتایج برآورد زی‌توده چوبی روی زمینی با الگوریتم رگرسیون بردار پشتیبان (SVR) و تصاویر راداری ALOS-2
Table 6. The results of SVR algorithm for AGB estimation using ALOS-2 data

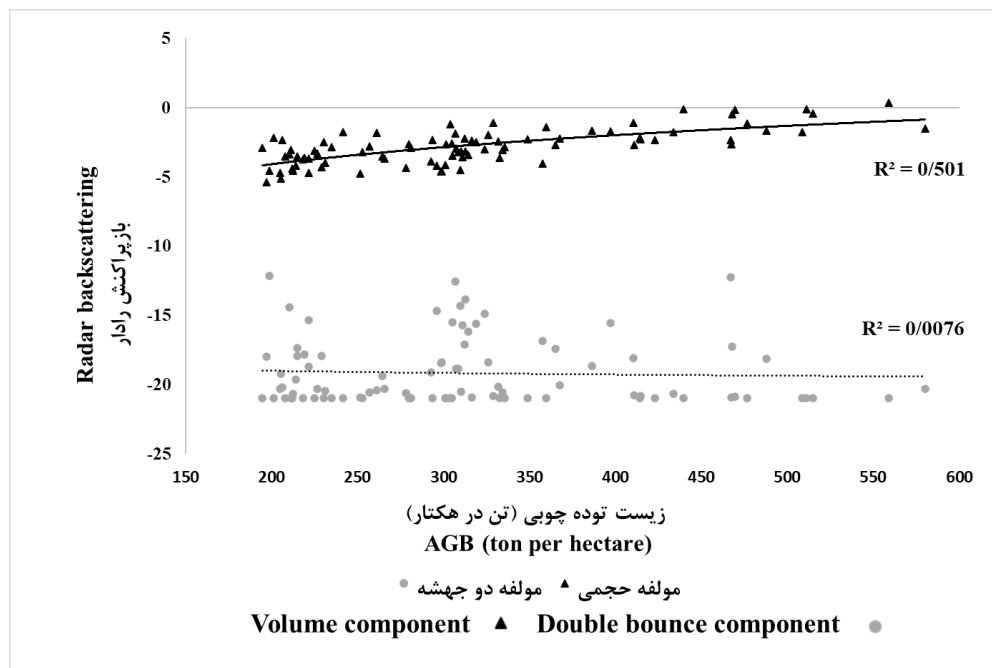
ضریب تبیین (R ²) Coefficient of Determination (R ²)	جذر میانگین مربعات خطای نسبی	جذر میانگین مربعات خطا	نوع کرنل Kernel's type
	(%) relative Root Mean Square Error (%)	(تن در هکتار) Root Mean Square Error (Ton per hectare)	
0	35.5	114.53	خطی Linear
0	35.5	114.53	چندجمله‌ای درجه دو Polynomial
0.35	24.5	79.27	تابع مبتنی بر شعاع Radial basis Function kernel
0.34	25.2	81.34	سیگموئید Sigmoid



شکل ۳- رابطه میان زی توده چوبی و ضریب بازپخش راداری (گامانات) در کانال‌های قطبشی مختلف تصویر تحقیق
Figure 3. Relationship between AGB and backscattering coefficient in the polarisation channels

است. مشاهده می‌شود که مؤلفه حجمی رابطه قوی‌تری (ضریب تبیین برابر با ۰/۵۰۱) از مؤلفه دوجبهشه (ضریب تبیین برابر با ۰/۰۷۶) با زی توده چوبی روی زمینی در جنگل منطقه پژوهش دارد.

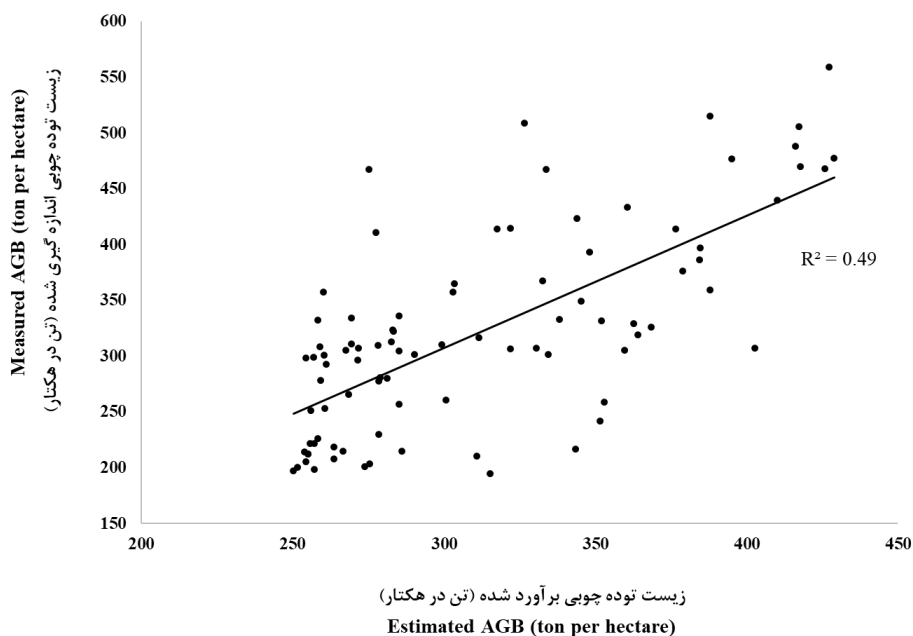
به دلیل اهمیت دو مؤلفه حجمی و دوجبهشه حاصل از روش تجزیه هدف Freeman-Durden، نمودار رابطه بین این دو مؤلفه با زی توده چوبی روی زمینی در منطقه پژوهش در شکل ۴ آورده شده



شکل ۴- رابطه بین مؤلفه‌های حاصل از روش تجزیه هدف Freeman-Durden و زی توده چوبی در منطقه پژوهش
Figure 4. Relationship between Freeman-Durden components and AGB in the study area

دیگر الگوریتم‌های ناپارامتریک به کار گرفته شده در پژوهش ارائه داد در شکل ۵ آورده شده است. نتایج بررسی آزمون دوربین واتسون نشان می‌دهد که مقدار این آماره برابر با $1/85$ است که نرمال بودن مقادیر باقی‌مانده‌های برآورد زی‌توده روی زمینی با الگوریتم جنگل تصادفی (RF) را نشان می‌دهد.

ابرنقاط میان زی‌توده چوبی اندازه‌گیری شده و زی‌توده چوبی برآورد شده با استفاده از داده‌های راداری ماهواره فضا برد ALOS-2 و الگوریتم ناپارامتریک جنگل تصادفی که بهترین نتایج (ضریب تبیین برابر با $0/38$ و مقدار جذر میانگین مربعات خطای نسبی برابر با $23/77$ درصد) را در مقایسه با



شکل ۵- مقادیر زی‌توده چوبی اندازه‌گیری شده در برابر مقادیر زی‌توده چوبی برآورد شده با الگوریتم جنگل تصادفی (RF)
Figure 5. The measured AGB versus estimated AGB using Random Forest algorithms (RF)

ماشین شامل k نزدیک‌ترین همسایه (k -NN)، جنگل تصادفی (RF) و رگرسیون بردار پشتیبان (SVR) استفاده شد.

نتایج بررسی داده‌های زمینی نشان می‌دهد که قطعات نمونه برداشت شده دامنه مناسبی از زی‌توده چوبی را در بر گرفته است. پراکنش مناسب قطعات نمونه در طبقات مختلف زی‌توده از این حیث مهم است که می‌توان برآوردها را در همه دامنه‌های حجمی موجود در منطقه انجام داد و قابلیت تصویر تحقیق را در برآورد زی‌توده چوبی به خوبی بررسی کرد.

همان‌طور که در نتایج نیز مشخص است، الگوریتم ناپارامتریک جنگل تصادفی (RF) عملکرد بهتری (با مقادیر ضریب تبیین $0/38$ و جذر میانگین مربعات خطای نسبی برابر با $23/77$ درصد) از دیگر

بحث

این پژوهش از محدود تحقیقات در زمینه برآورد زی‌توده چوبی روی زمینی در جنگل‌های آمیخته خزان‌کننده شمال کشور با استفاده از داده‌های قطبش کامل راداری فضا برد ALOS-2 است، چراکه دسترسی به این داده‌های راداری مشکل است و آماربرداری در شرایط جنگل‌های شمال ایران نیز با مشکلات زیادی همراه است. در این پژوهش برای برآورد زی‌توده چوبی روی زمینی از مؤلفه‌های شدت بازپخش در فرم گامانات شامل گامانات HH، گامانات HV، گامانات VH و گامانات VV، مؤلفه‌های حاصل از اعمال روش تجزیه هدف Freeman-Durden و متغیرهای حاصل از روابط ریاضی بین چهار کانال قطبشی تصویر تحقیق با اعمال الگوریتم‌های ناپارامتریک یادگیری

زی توده چوبی همبستگی بیشتری داشته‌اند (Li et al., 2016; Santos et al., 2003). براساس نتایج این تحقیق به نظر می‌رسد که با توجه به نوع جنگل، تراکم درختان و تاج پوشش جنگل در توده‌های جنگلی منطقه پژوهش، استفاده از بازپراکنش قطبش‌های HV و VV برای برآورد زی توده چوبی روی زمینی نتایج قابل قبولی را ارائه دهد.

نتایج بررسی اعمال روش تجزیه هدف Freeman-Durden نشان می‌دهد که براساس آنچه انتظار می‌رفت مؤلفه حجمی این روش، برآوردکننده خوبی برای برآورد زی توده چوبی روی زمینی به شمار می‌رود، چراکه همبستگی خوبی با مشخصه این تحقیق دارد؛ درحالی که مؤلفه دوجهشه رابطه بسیار ضعیفی با زی توده چوبی در شرایط توده‌های جنگلی منطقه پژوهش دارد که دور از انتظار نیز نیست، زیرا با توجه به میزان تاج پوشش بیش از ۸۵ درصدی و تراکم زیاد درختان، شرایط برای بازپراکنش‌های دوجهشه بین تنه درختان و سطح زمین فراهم نیست. سودمندی روش تجزیه هدف Freeman-Durden، به‌ویژه مؤلفه حجمی آن در برآورد زی توده چوبی روی زمینی در پژوهش‌های متعددی تأیید شده است (Bharadwaj et al., 2015; Freeman & Durden, 1998). برتری این روش توانایی آن در اندازه‌گیری سهم سه نوع بازپراکنش حجمی، دوجهشه و تک‌جهشه در پیکسل‌های تصاویر رادار است.

براساس نتایج این تحقیق انتظار می‌رود که استفاده از داده‌های راداری ALOS-2 در مقایسه با داده‌های راداری با طول موج کوتاه و همچنین داده‌های نوری، موجب دقت بیشتر برآورد زی توده چوبی روی زمینی شود. این برتری به این دلیل است که داده‌های باند L ماهواره ALOS-2 (با طول موج ۲۲/۹ سانتی‌متر) قدرت نفوذ در تاج پوشش تا سطح زمین و فراهم‌سازی اطلاعات ساختار عمودی توده‌های جنگلی را دارند، برخلاف داده‌های راداری با طول موج کوتاه که به میزان بسیار کمی به تاج جنگل نفوذ

الگوریتم‌های آماری استفاده شده دارد. الگوریتم آماری جنگل تصادفی (RF)، الگوریتم یادگیری یکپارچه‌ای برای رگرسیون براساس درختان تصمیم^۱ است و پژوهش‌های زیادی برتری عملکرد الگوریتم ناپارامتریک جنگل تصادفی (RF) را در برآورد مشخصه‌های بیوفیزیکی جنگل در مقایسه با دیگر الگوریتم‌های ناپارامتریک به کار گرفته شده تأیید کرده‌اند (Ghosh & Behera, 2018; Pandit et al., 2018; Chrysafis et al., 2017). یکی از دلایل این برتری این است که الگوریتم جنگل تصادفی (RF) در مجموعه داده‌های مدل‌سازی کمتر تحت تأثیر نویز قرار می‌گیرد و قابلیت تعمیم‌پذیری زیادی دارد (Li et al., 2019; Lu et al., 2016). افزون بر این، یکی دیگر از دلایل منحصربه‌فردی و موفق بودن این الگوریتم این است که در هر گره تقسیم شده^۲ به‌جای انتخاب همه متغیرها، آنها را به‌صورت تصادفی انتخاب می‌کند و تصادفی بودن درخت رگرسیون به بهبود دقت برآورد این الگوریتم می‌انجامد. همچنین این الگوریتم همانند برخی دیگر از الگوریتم‌های ناپارامتریک می‌تواند تعداد زیادی متغیر پیش‌بینی‌کننده را استفاده و مدیریت کند و برای تعیین روابط غیرخطی پیچیده بین متغیرها کاربرد دارد، حتی اگر متغیرها با یکدیگر همبستگی زیادی داشته باشند.

براساس تحلیل‌های آماری تحقیق می‌توان دریافت که بازپراکنش قطبش VV بیشترین همبستگی را با زی توده روی زمینی اندازه‌گیری شده در منطقه داشته است و بازپراکنش قطبش HV نیز همبستگی‌ای مشابه VV دارد. بیشتر تحقیقات درباره برآورد زی توده چوبی روی زمینی با استفاده از داده‌های راداری نشان داده‌اند که بازپراکنش قطبش HV همبستگی بیشتری با زی توده چوبی دارد که نتایج این پژوهش به آنها نزدیک‌تر است (Ronoud et al., 2021; Ma et al., 2017; Behera et al., 2016; Ghasemi et al., 2012)؛ درحالی که در برخی پژوهش‌ها، بازپراکنش قطبش‌های VV و HH با

1. Decision trees
2. Split node

هندسی در تصاویر راداری می‌شوند (McNeill & Pairman, 2005). ناهمواری و شیب از جمله عوامل مؤثر بر صحت برآورد مشخصه‌های کمی جنگل به‌ویژه زی‌توده چوبی است و با افزایش آن، صحت برآوردها به‌شدت کاهش می‌یابد.

یکی دیگر از دلایل احتمالی مؤثر بر صحت برآورد زی‌توده چوبی در این تحقیق، چندآشکوبه بودن و تنوع در ساختار عمودی توده‌های جنگلی است؛ چنانکه هرچه تعداد آشکوب‌ها بیشتر و توده ناهمگن‌تر باشد، نفوذ سیگنال کمتر و میرایی آن بیشتر خواهد بود و در نتیجه بازپراکنش کمتری صورت خواهد گرفت. به‌عبارت دیگر بازپراکنش حجمی در درون تاج‌پوشش به ناهمگنی عمودی توده جنگلی بستگی دارد (Erasmi et al., 2019). یکی دیگر از عوامل مؤثر بر بازپراکنش‌ها نیز نوع گونه درختان است، زیرا تفاوت در نوع گونه، سبب تفاوت در ویژگی‌های ساختاری و مقدار آب موجود در برگ‌ها و شاخه‌ها می‌شود که خود بر حد نفوذ سیگنال، مقدار میرایی و انعکاس از سطح زمین تأثیر می‌گذارد. از آنجا که قطعات نمونه تحقیق حاضر در توده‌های آمیخته و ناهمسال واقع شده‌اند، آمیختگی و ناهمگنی را می‌توان از دیگر عوامل نتایج متوسط برآورد در این پژوهش دانست.

نتیجه‌گیری

به‌طور کلی نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که داده‌های قطبش کامل راداری ALOS-2 برای برآورد زی‌توده چوبی روی زمینی در شرایط جنگل‌های آمیخته خیرود از قابلیت متوسطی برخوردارند. شایان ذکر است که شناسایی منابع عدم قطعیت و سهم آنها در خطای نسبی برآورد زی‌توده چوبی از اهمیت زیادی برخوردار است. از این‌رو تحلیل عدم قطعیت برای تحقیقات آینده در زمینه ارزیابی پتانسیل داده‌های راداری در برآورد زی‌توده چوبی ضروری به‌نظر می‌رسد.

می‌کنند و کانال‌های قطبشی کمتری در مقایسه با داده‌های ماهواره ALOS-2 دارند. همچنین دلیل ضعف داده‌های نوری در برآورد زی‌توده چوبی این است که این داده‌ها توانایی کسب اطلاعات ساختار عمودی جنگل را ندارند و فقط از سطح تاج‌پوشش انعکاس می‌یابند.

فاصله زمانی سه‌ساله بین تصویر تحقیق و آماربرداری زمینی این پژوهش نیز بر صحت زی‌توده چوبی برآوردی تأثیرگذار بوده و از منابع افزایش عدم قطعیت برآورد مشخصه‌های جنگلی است (Lu et al., 2016). برای مثال در پژوهش Hernández-Stefanoni et al. (2020) که فاصله زمانی بین داده‌های دورسنجی و داده‌های زمینی آن از ۶-۱ سال بوده است، حدود ۶/۲ درصد خطا ایجاد شد. یکی از راه‌های کاهش عدم قطعیت، استفاده از مدل‌های پیش‌بینی‌کننده تغییرات زی‌توده در طول زمان است (Hernández-Stefanoni et al., 2020) که متأسفانه به دلیل نداشتن اطلاعات دقیق از میزان رشد و مقدار زی‌توده در جنگل‌های منطقه پژوهش، از دامن زدن به عدم قطعیت بیشتر در برآوردها چشم‌پوشی شد. از سوی دیگر خطاهای احتمالی در اندازه‌گیری و ثبت متغیر پژوهش یعنی ارتفاع و قطر برابرینه درختان و همچنین خطا در محاسبه حجم درختان (با توجه به نبود مقدار دقیق ضریب شکل) و در نتیجه مقدار زی‌توده چوبی براساس معادله حجم از دیگر عوامل افزایش عدم قطعیت برآورد است (Lu et al., 2016).

در این تحقیق سعی شد که قطعات نمونه در مناطق مسطح یا با شیب کم پیاده شوند، اما با توجه به کوهستانی بودن جنگل‌های هیرکانی به‌ویژه در جنگل خیرود باز هم شیب‌های تا ۳۰ درصد در میان قطعات نمونه وجود داشت. از سوی دیگر در بین قطعات نمونه و اطراف منطقه پژوهش دره، یال و دولین‌های فراوانی وجود دارد که نمی‌توان از تأثیر آنها بر تصویر رادار چشم‌پوشی کرد، چراکه پستی و بلندی‌ها سبب ایجاد اعوجاج‌های رادیومتریک و

سپاسگزاری

شماره ۹۷۰۱۱۶۳۷ انجام گرفت. نگارندگان مراتب سپاس و قدردانی خود را ابراز می دارند.

این پژوهش در قالب طرح پژوهشی مصوب صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور به

References

- Amini, J., & Sumantyo, J.T.S. (2009). Employing a method on SAR and optical images for forest biomass estimation. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 47(12), 4020-4026.
- Behera, M.D., Tripathi, P., Mishra, B., Kumar, S., Chitale, V.S., & Behera, S. K. (2016). Above-ground biomass and carbon estimates of *Shorea robusta* and *Tectona grandis* forests using QuadPOL ALOS PALSAR data. *Advances in Space Research*, 57(2), 552-561.
- Bharadwaj, P.S., Kumar, S., Kushwaha, S.P.S., & Bijker, W. (2015). Polarimetric scattering model for estimation of above ground biomass of multilayer vegetation using ALOS-PALSAR quad-pol data. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 83, 187-195.
- Bispo, P.C., Santos, J.R., Valeriano, M.M., Touzi, R., & Seifert, F.M. (2014). Integration of polarimetric PALSAR attributes and local geomorphometric variables derived from SRTM for forest biomass modeling in central Amazonia. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 40(1), 26-42.
- Brown, S., & Lugo, A.E. (1984). Biomass of tropical forests: a new estimate based on forest volumes. *Science*, 223(4642), 1290-1293.
- Cassol, H.L.G., Carreiras, J.M.D.B., Moraes, E.C., Silva, C.V.D.J., Quegan, S., & Shimabukuro, Y.E. (2019). Retrieving secondary forest aboveground biomass from polarimetric ALOS-2 PALSAR-2 data in the Brazilian Amazon. *Remote Sensing*, 11(1), 59.
- Chen, W., Zheng, Q., Xiang, H., Chen, X., & Sakai, T. (2021). Forest canopy height estimation using polarimetric interferometric synthetic aperture radar (PolInSAR) technology based on full-polarized ALOS/PALSAR data. *Remote Sensing*, 13(2), 174.
- Chrysafis, I., Mallinis, G., Siachalou, S., & Patias, P. (2017). Assessing the relationships between growing stock volume and Sentinel-2 imagery in a Mediterranean forest ecosystem. *Remote Sensing Letters*, 8(6), 508-517.
- Darvishsefat, A., Miri, N., Shakeri, Z., & Zargham, N. (2017). Estimation of leaf area index in Zagros forests using Landsat 8 data. *Iranian Journal of Forest*, 9(1), 29-42.
- Enayati, A.A. (2011). *Wood Physics*. Tehran: University of Tehran Press.
- Erasmi, S., Semmler, M., Schall, P., & Schlund, M. (2019). Sensitivity of bistatic TanDEM-X data to stand structural parameters in temperate forests. *Remote Sensing*, 11(24), 2966.
- Fazelian, M., Attarchi, S., Etemad, V., & Lisenberg, V. (2020). Forest biomass estimation using optical and microwave imagery (Case study: Garazbon Series, Kheirud Forest). *Iranian Journal of Forest*, 12(3), 391-405.
- Fransson, J.E., Santoro, M., Wallerman, J., Persson, H.J., Monteith, A.R., Eriksson, L.E., & Ulander, L.M. (2016). Estimation of forest stem volume using ALOS-2 PALSAR-2 satellite images. In *2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, 5327-5330.
- Freeman, A., & Durden, S.L. (1998). A three-component scattering model for polarimetric SAR data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36(3), 963-973.
- 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.
- Ghosh, S.M., & Behera, M.D. (2018). Aboveground biomass estimation using multi-sensor data synergy and machine learning algorithms in a dense tropical forest. *Applied Geography*, 96, 29-40.

- Hernández-Stefanoni, J.L., Castillo-Santiago, M.Á., Mas, J.F., Wheeler, C.E., Andres-Mauricio, J., Tun-Dzul, F., George-Chacón, S.P., Reyes-Palomeque, G., Castellanos-Basto, B., Vaca, R., & Dupuy, J.M. (2020). Improving aboveground biomass maps of tropical dry forests by integrating LiDAR, ALOS PALSAR, climate and field data. *Carbon Balance and Management*, 15(1), 1-17.
- Li, W., Chen, E., Li, Z., Zhang, W., & Jiang, C. (2016). Assessing performance of tomo-sar and backscattering coefficient for hemi-boreal forest aboveground biomass estimation. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 44(1), 41-48.
- Li, Y., Li, C., Li, M., & Liu, Z. (2019). Influence of variable selection and forest type on forest aboveground biomass estimation using machine learning algorithms. *forests*, 10(12), 1073.
- Lu, D., Chen, Q., Wang, G., Liu, L., Li, G., & Moran, E. (2016). A survey of remote sensing-based aboveground biomass estimation methods in forest ecosystems. *International Journal of Digital Earth*, 9(1), 63-105.
- Ma, J., Xiao, X., Qin, Y., Chen, B., Hu, Y., Li, X., & Zhao, B. (2017). Estimating aboveground biomass of broadleaf, needleleaf, and mixed forests in Northeastern China through analysis of 25-m ALOS/PALSAR mosaic data. *Forest Ecology and Management*, 389, 199-210.
- Maghsodi, Y., & Mahdavi, S. (2015). *The principle of Radar Remote Sensing*. Tehran: Khaje Nasir Toosi University of Technology Press.
- McNeill, S., & Pairman, D. (2005). Stand age retrieval in production forest stands in New Zealand using C-and L-band polarimetric radar. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 43(11), 2503-2515.
- Mohammadi, J., Shataee, S., Namiranian, M., & Næsset, E. (2017). Modeling biophysical properties of broad-leaved stands in the hyrcanian forests of Iran using fused airborne laser scanner data and ultraCam-D images. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 61, 32-45.
- Moradi, F., Darvishsefat, A.A., Namiranian, M., & Ronoud, G. (2018). Investigating the capability of Landsat 8 OLI data for estimation of aboveground woody biomass of common hornbeam (*Carpinus betulus* L.) stands in Khyroud Forest. *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*, 26(3), 406-420.
- Namiranian, M. (2006). *Measurement of the tree and forest biometry*. Tehran. University of Tehran Press.
- Nasiri, V., Darvishsefat, A.A., Arefi, H., & Namiranian, M. (2020). Estimating Mean Tree Crown Diameter using UAV Imagery Based on Multi Resolution and Watershed Segmentation Methods (Case study: Kheyroud Forest). *Iranian Journal of Forest*, 12(1), 131-145.
- Nouri, A., Shataee, S., & Mohammadi, J. (2019). Capability of Alos-Palsar-2 radar quad polarization data for estimation of structural quantitative characteristics of planted forest, Arabdagh region, Iran. *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*, 27(4), 451-463.
- Pandit, S., Tsuyuki, S., & Dube, T. (2018). Estimating above-ground biomass in sub-tropical buffer zone community forests, Nepal, using Sentinel 2 data. *Remote Sensing*, 10(4), 601.
- Poorazimy, M., Shataee, S., Attarchi, S., & Mohammadi, J. (2017). Estimation of aboveground biomass using Alos-Palsar data in Hyrcanian forests (Case study: ShastKalateh, Gorgan). *Forest and Wood Products*, 70(3), 479-488.
- Poorazimy, M., Shataee, S., McRoberts, R.E., & Mohammadi, J. (2020). Integrating airborne laser scanning data, space-borne radar data and digital aerial imagery to estimate aboveground carbon stock in Hyrcanian forests, Iran. *Remote Sensing of Environment*, 240, 111669.
- Ronoud, G., & 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). *Geographic Space*, 17(60), 117-129.

- Ronoud, G., Darvishsefat, A.A., & Namiranian, M. (2017). Estimation of aboveground woody biomass of *Fagus orientalis* stands in Hyrcanian forest of Iran using OLI data (Case study: Gorazbon and Namkhaneh Districts, Kheyroud Forest). *Forest and Wood Products*, 70(4), 559-568.
- Ronoud, G., Fatehi, P., Darvishsefat, A.A., Tomppo, E., Praks, J., & Schaepman, M.E. (2021). Multi-Sensor Aboveground Biomass Estimation in the Broadleaved Hyrcanian Forest of Iran. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 47(6), 1-17.
- Santoro, M., Eriksson, L.E., & Fransson, J.E. (2015). Reviewing ALOS PALSAR backscatter observations for stem volume retrieval in Swedish forest. *Remote Sensing*, 7(4), 4290-4317.
- Santos, J.R., Freitas, C.C., Araujo, L.S., Dutra, L.V., Mura, J.C., Gama, F.F., & Sant'Anna, S.J. (2003). Airborne P-band SAR applied to the aboveground biomass studies in the Brazilian tropical rainforest. *Remote Sensing of Environment*, 87(4), 482-493.
- Sinha, S., Jeganathan, C., Sharma, L.K., & Nathawat, M.S. (2015). A review of radar remote sensing for biomass estimation. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 12(5), 1779-1792.
- Tarmian, A., Remond, R., Faezipour, M., Karimi, A., & Perré, P. (2009). Reaction wood drying kinetics: tension wood in *Fagus sylvatica* and compression wood in *Picea abies*. *Wood Science and Technology*, 43(1-2), 113-130.



Research Article

Woody Aboveground Biomass Estimation using Radar Data in the mixed Hyrcanian Forest (Case Study: Khayroud Forest of Nowshahr, Mazandaran)

Gh. Ronoud^{1*}, A.A. Darvishsefat², M.E. Schaepman³, M. Namiranian², and Y. Maghsoudi⁴

¹ Ph.D. student, University of Tehran, Dept. of Forestry and Forest Economics, Faculty of Natural Resources, Karaj, I. R. Iran

² Prof., University of Tehran, Dept. of Forestry and Forest Economics, Faculty of Natural Resources, Karaj, I. R. Iran

³ Prof., University of Zurich, Remote Sensing Laboratories, Winterthurerstrasse 190, 8057 Zurich, Switzerland

⁴ Assistant Prof., Khajeh Nasir Toosi University, Faculty of Surveying Engineering, Tehran, I. R. Iran

(Received: 25 October 2021; Accepted: 08 January 2022)

Abstract

This study investigates the capability of ALOS-2 full polarimetric radar data for estimating woody aboveground biomass (AGB) in a mixed Hyrcanian forest. For collecting ground data, the low slope areas selected and measured for a total of 127 square sample plots with an area of 900-m². Tree height and Diameter at Breast Height (DBH) were measured for each tree with DBH of larger than 7.5-cm and the volume of each tree was calculated using these two characteristics. We used volume to biomass equation (multiplying the volume by the wood-critical density) to calculate AGB in each sample plot. The average of observed AGB was 318.04-tons per hectare for the study area. To process ALOS-2 data, the polarization channels were calibrated and multi-looked. We used a Box-Car filter with window size of 5×5 pixels to reduce the noise. Finally, the extracted features were geometrically corrected. They are Backscattering intensity components in the form of gamma naught, Freeman-Durden target decompositions components and variables derived from mathematical relationships between polarization channels. In order to modeling the biomass estimation, three non-parametric algorithms including k- Nearest Neighbor (*k*-NN), Random Forest (RF) and Support Vector Regression (SVR) were used. The results showed that the AGB can be predicted by coefficient of determination (R^2)=0.38 and the relative Root Mean Square Error (rRMSE)=23.77% using RF algorithm. While *k*-NN algorithm with R^2 =0.38 and rRMSE=24.38% and SVR algorithm with R^2 =0.35 and rRMSE=25.2% were less accurate for AGB prediction. Generally, the results of this study indicate the moderate capability of fully polarized ALOS-2 radar data for AGB estimation in mixed Hyrcanian forests.

Keywords: Aboveground Woody Biomass, Radar, Polarization, ALOS-2, Mixed forests.