

## بررسی اثر تاج پوشش جنگل در دو حالت

### با برگ (leaf-on) و بدون برگ (leaf-off) بر داده‌های PALSAR-2

### به منظور برآورد زیتوده در جنگل‌های هیرکانی

پریسا گلشانی<sup>۱</sup>

یاسر مقصودی<sup>۲</sup>

هرمز سهرابی<sup>۳</sup>

تاریخ دریافت مقاله: ۹۸/۰۳/۱۶

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۹/۰۲/۱۲

\*\*\*\*\*

#### چکیده

با توجه به اهمیت عوامل بیوفیزیکی جنگل و پایش تغییرات آنها برای مدیریت جنگل‌ها، توسعه مدل‌های صحیح برای برآورد این عوامل ضروری است. با در نظر گرفتن محدودیت‌های آماربرداری‌های زمینی، استفاده از روش‌های سنجش از دور برای برآورد این عوامل ارجح است. استفاده از داده‌های رادار به صورت محدود در جنگل‌های هیرکانی برای برآورد زیتوده استفاده شده است. در مطالعه حاضر، پتانسیل داده‌های پلاریمتری PALSAR-2 برای برآورد زیتوده در جنگل‌های هیرکانی بررسی شد. آماربرداری در چهار رویشگاه مختلف شامل جنگل حفاظت شده، جنگل طبیعی، جنگل تخریب شده و جنگل کاری آمیخته انجام و مقدار زیتوده در پلات‌های آماربرداری محاسبه شد. پس از استخراج داده‌های PolSAR با استفاده از تصاویر اخذ شده در فصل بهار و زمستان، میزان و نوع رابطه آن‌ها با زیتوده بررسی شد. نتایج نشان داد طبقه‌بندی جنگل‌های مورد مطالعه براساس محدوده زیتوده و درصد تاج پوشش برای توسعه مدل‌ها ضروری است به گونه‌ای که برای هر نوع خاص جنگل، نوع متفاوتی از مشخصه‌های پلاریمتری کارایی دارند. همچنین نتایج نشان داد داده‌های حاصل از تصاویر اخذ شده در فصل بهار در حالت با برگ تاج پوشش ارتباط مناسب‌تری با زیتوده دارند. نتایج مدل‌سازی با استفاده از رگرسیون خطی چندگانه نشان داد مؤلفه‌های حاصل از تجزیه پلاریمتری برای برآورد زیتوده مناسب‌تر عمل می‌کنند و برای هر رویشگاه، مشخصه‌های متفاوتی قابل استفاده هستند. نتایج کلی این مطالعه و مقایسه آن با مطالعات دیگر بیانگر آن است که طبقه بندی پوشش درختی براساس میزان زیتوده (حجم) در هکتار، وضعیت تاج پوشش و همچنین وضعیت توپوگرافی منطقه به منظور توسعه مدل‌های برآورد زیتوده ضروری به نظر می‌رسد. همچنین نتایج نشان داد برای رویشگاه‌های مختلف با مشخصات و خصوصیات متفاوت نوع خاصی از داده‌های پلاریمتری با زیتوده همبستگی نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: پلاریمتری، جنگل هیرکانی، زیتوده، PALSAR-2

\*\*\*\*\*

۱- دانشجوی دکتری، گروه جنگلداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس Pgolshani67@gmail.com

۲- دانشیار گروه سنجش از دور، دانشکده مهندسی ژئودزی و ژئوماتیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی (نویسنده مسئول) ymaghsoudi@kntu.ac.ir

۳- دانشیار گروه جنگلداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس hsohrabi@modares.ac.ir

## ۱- مقدمه

اطلاعات زیتوده جنگل و کمی کردن تغییرات آن برای حمایت از مدیریت پایدار منابع جنگلی، ارزیابی بهره‌وری، پایداری جنگل، بازخورد آن نسبت به تغییر اقلیم و اجرای موفق استراتژی‌های مدیریت کربن جنگل مورد نیاز است. (رائوست، ۲۰۰۵؛ لو، ۲۰۰۶؛ واشوم و جایاکومار ۲۰۱۲؛ گزو، ۲۰۱۶).

اندازه‌گیری مستقیم زیتوده مخرب و هزینه‌بردار است، از طرف دیگر تخمین زیتوده با استفاده از روش‌های مبتنی بر آماربرداری زمینی دارای محدودیت‌های مختلفی است. این محدودیت‌ها را می‌توان در مقیاس‌های بزرگ با استفاده از فنون سنجش از دور حل کرد (قاسمی، صاحبی و محمدزاده، ۲۰۱۱: ۱۷۷). کمی‌سازی دقیق و صریح محلی منابع جنگلی از نقطه نظر متغیرهای کلیدی مانند زیتوده و حجم به هدف مهمی در جامعه سنجش از دور تبدیل شده است. نتایج پژوهش‌های قبلی نشان می‌دهد پاسخ طیفی ثبت شده در یک تصویر نوری ارتباط تنگاتنگی با تنه و شاخه‌های درختان ندارد. به صورت خلاصه استفاده از تصاویر نوری به منظور بازیابی متغیرهای مربوط به جنگل مانند میزان حجم در هکتار، زیتوده و سطح مقطع دارای محدودیت‌هایی به شرح زیر است: (لی توئن، ۱۹۹۲: ۴۰۳؛ برادویچ، کومار، کوشفاها، بیچلر، ۲۰۱۵: ۱۸۷؛ هاید، نلسون، کیمز و لوین، ۲۰۱۷: ۲۹)

۱. بازیابی این متغیرها در توده‌های آمیخته دشوار است.
۲. پس از کامل شدن تاج پوشش، مسئله اشباع رخ خواهد داد.
۳. امواج نوری قابلیت نفوذ در لایه‌های داخل جنگل را ندارند.
۴. به هنگام کامل نبودن تاج پوشش، وجود زیرآشکوب اثر مخرب خواهد داشت.

بنابراین به دست آوردن میزان زیتوده تنها بر اساس الگوی پاسخ طیفی که از سنجش از دور نوری حاصل می‌شود دشوار است.

داده‌های رادار<sup>۱</sup> به عنوان تنها راه آسان برای دستیابی به داده‌های سنجش از دور، برای دوره مشخصی از زمان هستند، چراکه داده‌های راداری توانایی اخذ اطلاعات با پوشش گسترده در مناطق وسیع در مورد ویژگی‌های زمین در تمام

شرایط آب و هوایی و نفوذ در ابر و تاج پوشش را دارند. بنابراین داده‌های رادار با توجه به مزیت‌های مختلف آن در کسب داده به منظور تخمین عوامل بیوفیزیکی جنگل، برای سیستم MRV<sup>۲</sup> ارجح هستند (گیز، براون و فولی، ۲۰۰۷: ۸؛ مورل، ساعتچی، مالچی، بری، بانین و همکاران، ۲۰۱۱: ۱۷۷۸؛ هامدان، حاسمادی، عزیز، نوریزاه و زولحایدی، ۲۰۱۵: ۳۸۸؛ برادویچ، کومار، کوشفاها، بیچلر، ۲۰۱۵: ۱۸۷).

داده‌های راداری در محدوده بین ۱ میلی‌متر و ۱ متر، ارتباط بیشتری با متغیرهای جنگل نسبت به داده‌های نوری دارند زیرا این داده‌ها مشخصات دی‌الکتریکی، شیمیایی و ژئومتریکی پارامترهای جنگل را در نظر می‌گیرند. سنسورهای راداری امواج را اکثراً در باندهای L، C، X و P ثبت می‌کنند. باندهای X و C توسط تاج پوشش و شاخه‌های کوچک پراکنده می‌شود در حالی که باند L ظرفیت نفوذ بهتری داشته و از لایه‌های سطحی عبور کرده و توسط تنه و شاخه‌های اصلی پراکنده می‌شود. با اینکه کارآمدی داده‌های باند L برای بازیابی متغیرهای جنگل به خوبی شناخته شده است، ارزیابی و بهترین مدل‌ها توسط نوع و ساختار جنگل‌ها و شرایط محیطی تحت تأثیر واقع می‌شود.

مطالعات انجام‌شده، توانایی تصاویر SAR<sup>۳</sup> در تخمین عوامل بیوفیزیکی جنگل، مخصوصاً زیتوده را نشان داده است. مطالعات پیشین نشان داده‌اند که طول‌موج‌های بلندتر (باندهای L و P) و پلاریزاسیون HV بیشترین حساسیت را به زیتوده دارند. در دو دهه گذشته تمرکز بر استفاده از داده‌های باند L رادار روزنه مجازی، به دلیل حساسیت بالای آن به سطوح زیتوده و در دسترس بودن آن از مأموریت ماهواره‌های JERS-1 و ALOS (نوع PALSAR<sup>۴</sup>) افزایش پیدا کرده است (تاناسه، پانسیرا، لوول، تیان، هاگر، والکر، ۲۰۱۴: ۹۳). برخی از مطالعات از مشخصات پلاریمتری تصاویر پلاریمتری برای تخمین مشخصات توده‌های جنگلی استفاده کردند. در واقع پلاریمتری حساس به ساختار عمودی

2- Measurement, Reporting and Verification

3- Synthetic Aperture Radar

4- Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar

1- Radio Detection and Ranging

تأثیر شرایط مختلف تاج پوشش (با برگ و بدون برگ) در تغییر نقطه اشباع و دقت تخمین زیتوده مورد بررسی قرار نگرفته است. طول موج‌های بلند قابلیت نفوذ بیشتر در تاج پوشش را دارند، اما تاج پوشش‌های متراکم، معمولاً در جنگل‌های با زیتوده بالا موجب تضعیف بازپراکنش حجمی می‌شود (جاشی، میچارد، ساماچر، جانسن، ساعتچی و فنسولت، ۲۰۱۵: ۴۴۴). بررسی تحقیقات صورت گرفته نیز نشان می‌دهد که عوامل زیادی از جمله زبری سطح، ویژگی دی‌الکتریک، قدرت تفکیک در راستای آزیموت و فاصله، هندسه تصویر، اعوجاج‌ها، چندمنظر بودن، زاویه فرود موج و پلاریزاسیون بر پیچیدگی‌های تصاویر پلاریمتری SAR اثرگذار هستند. بنابراین، این داده‌ها نیازمند پردازش‌های پیچیده، دقیق و خاص هستند تا بتوان بیشترین و مفیدترین اطلاعات را از این داده‌ها استخراج کرد. پیچیدگی‌های ذاتی تخمین زیتوده در مناطق مختلف و اکوسیستم‌های گوناگون نیز باعث می‌شود تحت شرایط مختلف رویشگاه یا فصل مورد نظر برای برآورد، مدل تخمین متفاوتی شناسایی شود. این حقیقت که بازیابی عوامل بیوفیزیکی جنگل با استفاده از داده‌های رادار مرتبط است با نوع جنگل، ساختار جنگل و شرایط محیطی، موجب گزارش‌های مختلف در مورد صحت مدل‌های توسعه یافته توسط محققان شده است.

هدف اصلی مطالعه حاضر، ارزیابی پتانسیل ویژگی‌های پلاریمتری و بازپراکنش داده‌های ALOSPALSAR-2 با پلاریزاسیون چهارگانه در حالت‌های تاج‌پوشش با برگ و بدون برگ به منظور تخمین زیتوده در جنگل‌های شمال ایران است. همچنین کارایی روش رگرسیون خطی برای برآورد زیتوده ارزیابی خواهد شد.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد پژوهش در بخشی از جنگل‌های استان مازندران واقع شده است (نگاره ۱). این منطقه بخشی از

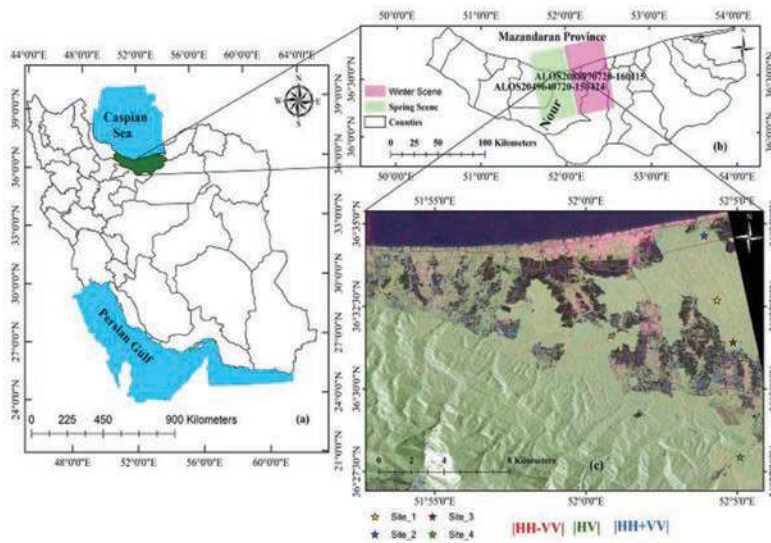
و مشخصات فیزیکی محیط پراکنش‌گرها است (نومن، فرو-فمیل و ریگریگ، ۲۰۱۰: ۱۰۱۶). همچنین امکان استفاده از تجزیه‌گرهای پلاریمتری و دیگر توصیف‌گرهای پلاریمتری برای کمی‌سازی توزیع مکانیزم‌های بازپراکنش مختلف است (لی و پاتیر، ۲۰۰۹: ۶۹). تجزیه‌گرهای PolSAR اجازه جداسازی مشارکت بازپراکنش‌ها از محیط‌های با پوشش گیاهی را می‌دهد (آتروپو، راتوست، هامه و پراکس، ۲۰۱۷: ۲).

بکارگیری داده‌های رادار برای تخمین زیتوده در جنگل‌های شمال ایران به صورت محدودی استفاده شده است (امینی و صادقی، ۱۳۹۱؛ رضائی و صاحبی، ۱۳۹۴؛ شریفی، ۱۳۹۴؛ قاسمی، صاحبی و علیزاده، ۲۰۱۳؛ اتارچی و گلگون، ۲۰۱۴؛ وفایی و همکاران، ۲۰۱۸). در مطالعات انجام شده، استفاده از تصاویر فضابرد SAR به داده‌های تک‌زمانی و تک‌پلاریزه یا دوپلاریزه محدود شده است، در صورتی که تصویر پلاریمتری به دلیل داشتن خصوصیات امواج میکروویو و دارا بودن اطلاعاتی به مراتب بیشتر نسبت به داده‌های معمولی SAR نقش مهمی در کاربردهای سنجش از دوری ایفا می‌کنند. سیستم‌های با پلاریمتری کامل، اجازه بازسازی همه ماتریس‌های بازپراکنش موج را می‌دهند. همچنین امکان محاسبه تجزیه پلاریمتری و دیگر توصیف‌گرهای پلاریمتری برای کمی‌سازی مشارکت مکانیزم‌های بازپراکنش مختلف ایجاد می‌شود (لی و پاتیر، ۲۰۰۹: ۶۹).

بررسی این منابع نشان دهنده رابطه بین ضرایب بازپراکنش باند L و زیتوده جنگل است، اما تأثیر فصول مختلف در پهنه‌بندی زیتوده با باند L انجام نشده است. مدل‌های رگرسیونی مبتنی بر داده‌های تک‌زمانی، تحت تأثیر شرایط آب و هوایی مانند باران بوده و قابلیت تعمیم‌پذیری زمانی و مکانی خود را از دست می‌دهند؛ در حالی که مدل‌های چندزمانی<sup>۲</sup> این شرایط را جبران کرده و به منظور تعمیم مکانی و زمانی مناسب‌تر عمل می‌کنند (ینگلهارت، کیوک و سیگرگ، ۲۰۱۱: ۱۲۶۱). علاوه بر این در مطالعات انجام شده

1- Mono temporal

2- Multi-temporal



نگاره ۱: (a) موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه در ایران؛  
 (b) پوشش تصاویر ALOS PALSAR-2 در استان مازندران؛  
 (c) موقعیت رویشگاه‌های مورد آماربرداری روی تصویر Pauli مستخرج از ویژگی‌های PolSAR

جدول ۱: مشخصات معادلات آلومتری برای سه گونه در جنگل‌های هیرکانی (لاویج و واتاشان)

گونه	مدل	a	b	R <sup>۲</sup>
راش (Fagus orientalis)	$AGB=aD^bD^b$	۰/۳۵۳	۲/۱۹۱	۰/۹۶
بلوط (Quercus castaneifolia)	$AGB=aD^bD^b$	۰/۷۴۳	۲/۰۱۲	۰/۹۷
ممرز (Carpinus betulus)	$AGB=aD^bD^b$	۴/۰۴۶	۱/۵۹۹	۰/۹۴

## ۲-۲- داده‌های زمینی

داده‌های زمینی در طی ماه‌های مهر، آبان و آذر سال ۱۳۹۶ جمع‌آوری شد. در این مطالعه ۱۱۵ پلات دایره‌ای با مساحت ۰/۱ هکتار در ۴ رویشگاه که ساختار و میزان زیتوده متفاوتی داشتند ثبت شد. در هر پلات گونه درختان و همچنین میزان قطر برابر سینه برای قطرهای بالای مقدار آستانه (۷/۵ سانتیمتر) ثبت شد. مطالعات نشان داده است تغییرات زیتوده جنگل می‌تواند به صورت مستقیم یا غیرمستقیم از داده‌های آماربرداری جنگل با استفاده از معادلات آلومتری، ضریب بسط زیتوده و یا ضرایب تبدیل مانند چگالی چوب به دست آید. در مرحله بعد، مناسب‌ترین مدل آلومتری توسعه یافته برای گونه‌های مورد نظر در جنگل‌های منطقه انتخاب و میزان زیتوده برای قطعات نمونه محاسبه می‌شود. مطابق جدول شماره ۱ برای گونه‌های بلوط و ممرز از معادلات اختصاصی قطر به منظور برآورد زیتوده استفاده شد. این معادلات توسط (شاهرخ‌زاده، سهرابی و کاپنهور، ۲۰۱۵: ۲۴). در جنگل‌های هیرکانی (لاویج و واتاشان) با استفاده از روش

جنگل‌های جلگه‌ای پهن‌برگ خزان‌کننده هیرکانی می‌باشد. ارتفاع از سطح دریا در این منطقه بین مقادیر ۲۰- تا ۵۰ متر متغیر می‌باشد. میزان بارش سالیانه در نوار شمالی استان ۹۷۷ میلی‌متر می‌باشد. سطح زمین در مناطق مورد نمونه‌برداری مسطح می‌باشد؛ بنابراین توپوگرافی در تشکیل تصاویر SAR اثر مخرب نداشته است. جنگل‌های مورد مطالعه به ۴ طبقه متفاوت تقسیم‌بندی شد: (۱) جنگل‌های حفاظت شده (رویشگاه سفیدپلت)، (۲) جنگل‌های طبیعی، (۳) جنگل‌های مخروطه، (۴) جنگل‌کاری ناخالص. درصد تشکیل دهنده گونه‌های درختی مورد نمونه‌برداری در رویشگاه شماره ۱ تا ۳ شامل Populus caspica (21%)، Carpinus betulus (19%)، Acer velutinum (17%)، Alnus subcordata (13%)، Quercus castanifolia (10%)، Pterocaria fraxinifolia (8%)، Parotia persica (5%)، Diospyros lotus (4%)، Fraxinus excelsior (1%) و دیگر گونه‌ها (2%)، گونه‌های تشکیل‌دهنده جنگل‌کاری نیز شامل (Acer velutinum (51%)، Alnus subcordata (25%)، Quercus castaneifolia (17%) و Pterocaria fraxinifolia (6%)

فصلنامه علمی - پژوهشی اطلاعات جغرافیایی (پژوهش)  
 بررسی اثر تاج پوشش جنگل در دو حالت با برگ / ... / ۵۵

جدول ۲: خلاصه‌ای از مشخصات آماره‌های پلات‌های برداشت شده در ۴ رویشگاه

تعداد پلات	نوع جنگل	محدوده زیتوده (تن در هکتار)	میانگین زیتوده (تن در هکتار)	انحراف از معیار	درصد تاج پوشش
۴۰	جنگل حفاظت شده	۶۶۳-۱۸۲	۲۱۶/۶۷	۱۴۴/۷	< ۹۰٪
۲۰	جنگل طبیعی	۵۶۸-۰	۲۳۸/۷۲	۱۶۵/۰۸	۷۵٪ - ۸۵٪
۲۰	جنگل تخریب شده	۱۰۵-۰	۶۲/۵۳	۲۶/۶۳	۶۰٪ - ۷۰٪
۲۶	جنگل کاری	۹۲-۰	۵۸/۳۱	۲۳/۱۰	< ۹۰٪

جدول ۳: مشخصات اصلی تصاویر بکار رفته در این مطالعه

شماره تصویر	شماره شناسایی تصویر	تاریخ برداشت	زاویه برخورد	پلاریزاسیون	قدرت تفکیک مکانی	حالت تصویربرداری
۱	ALOS2049640720-150424	۱۳۹۴/۰۲/۰۴	۳۳/۸۷	HH, HV VH, VV	۶ متر	نواری
۲	ALOS2088970720-160115	۱۳۹۴/۱۰/۲۵	۳۶/۵۱	HH, HV VH, VV	۶ متر	نواری

به منظور مشاهده جزئیات بیشتر با استفاده از باند L بهبود یافته است. سیستم آنتن گیرنده دوگانه برای حفظ قدرت تفکیک مکانی بالا برای باند اتخاذ شده است. نتیجه این اتخاذ در عرض برداشت و قدرت تفکیک مکانی در جدول شماره ۲ ارائه شده است. در این مطالعه از تصاویر با حالت نواری (Strip map) که دارای عرض برداشت ۵۰ کیلومتر است استفاده شد. زاویه برخورد ۱ از ۳۲/۳۳ درجه تا ۳۵/۳۲ درجه (۳۳/۸۷ درجه در مرکز تصویر) متفاوت بود. یکی از تصاویر در فصل بهار و در حالت بابرگ تاج پوشش (۴ اردیبهشت سال ۱۳۹۴) و تصویر دیگر در فصل زمستان و در حالت بدون برگ تاج پوشش (۲۵ دی سال ۱۳۹۴) برداشت شده است. این داده در جدول ۳ ارائه شده است.

۲-۴- روش پردازش تصاویر

استفاده از تجزیه پلاریمتری که از تصاویر با پلاریزاسیون کامل قابل دستیابی است دارای عملکرد مناسب برای ارزیابی نحوه بازپراکنش از جنگل است. داده‌های SAR با پلاریزاسیون کامل قابلیت توصیف کامل از فرایند بازپراکنش و فراهم نمودن اطلاعات در قالب ماتریس بازپراکنش را دارد به طوری که ماتریس بازپراکنش می‌تواند به بخش‌های

نمونه برداری مخرب توسعه یافته است. با توجه به اینکه این مدل‌ها به صورت اختصاصی تهیه شده است می‌توان برای سه گونه مشخص شده از اطلاعات این مطالعه استفاده کرد. برای سایر گونه‌ها از معادله‌های آلمتری عمومی استفاده شد (زیانیس و منکوسینی، ۲۰۰۴: ۳۲۲).

جدول ۲ خلاصه مشخصات آماره‌های مربوط به پلات‌ها را نمایش می‌دهد.

۲-۳- داده‌های سنجنش از دور (تصاویر ALOS-2/PALSAR-2)

این مطالعه مبتنی بر داده‌های پلاریمتری باند L (1.26GHz) سنجنده PALSAR-2 ارائه شده توسط سازمان فضایی ژاپن (JAXA) انجام شد. ماهواره ALOS مجهز به سنجنده PALSAR-2، به عنوان دستگاه مشاهده برای بررسی دقیق زمین است. با باند L رادار، PALSAR-2 دارای مزیت ثبت تغییر شکل زمین و شرایط پوشش گیاهی و جنگل است. ALOS-2 به منظور استفاده برای اهداف مختلف شامل درک اثرات تغییر شکل زمین بر زیرساخت‌های اجتماعی مانند پل‌ها و سدها، پایش جنگل‌زدایی غیرقانونی در مناطق جنگل‌های بارانی تروپیکال و تعیین مؤثر وضعیت محصولات کشاورزی کاشته شده مانند مزارع برنج، طراحی شده است. توان تفکیک مکانی ALOS-2 نسبت به ALOS-1

جدول ۴: مشخصات پلاریمتری استخراج شده از داده‌های PALSAR-2

تعداد	علامت	توضیح	مشخصه
۳	[S]	ماتریس بازپراکنش	مشخصات اصلی
۳	[T]	ماتریس کوهرنسی	
۴	Yama]odd, [Yama]dbl, [Yama]vol, [Yama]hlx]	(Yamaguchi, 2006)	روش‌های تجزیه پلاریمتری
۴	VanZyl]odd, [VanZyl]dbl, [VanZyl]vol]	(van Zyl 1992)	
۴	Free]odd, [Free]dbl, [Free]vol]	(Freeman and Durden 1998)	
۴	SRC]odd, [SRC]dbl, [SRC]vol]	(Cloude 1985)	
۴	Anisotropy, Entropy, Alpha	(Shane R Cloude and Pottier 1997)	
۴	Touzi]alpha, [Touzi]phi, [Touzi]psi, [Touzi]tau]	(Touzi 2007)	
۱۰	SPAN, RVI, BMI, CSI, Pedestal Hieght, RFDI, VSI, Band Ratios	SPAN, RVI <sup>۱</sup> , BMI <sup>۲</sup> , CSI <sup>۳</sup> , Pedestal Hieght, RFDI <sup>۴</sup> , VSI <sup>۵</sup> , Band Ratios	توصیف‌گرهای پلاریمتری

برای پلاریزاسیون HV قبل از ۱۶م ژانویه ۲۰۰۹ و ۸۳/۰ بعد از ۱۷م ژانویه ۲۰۰۹ مطابق با پلاریزاسیون است. شدت‌های  $\sigma^0$  به مقادیر  $\gamma^0 \cos(\theta)$  برای کاهش اثر زاویه وقوع روی بازپراکنش رادار برای اهداف با بازپراکنش حجمی غالب تبدیل می‌شود (مرموز، تونز، ویلارد، رجو-مچین، سیفرت-گرانزین، ۲۰۱۴:۱۱۱). پس از فرایندهای کالیبراسیون رادیومتری و چند منظر سازی<sup>۷</sup>، ماتریس کوهرنسی تشکیل شد.

ماتریس باز پراکنش [S] از داده‌های پلاریمتری PALSAR-2 که شامل فاز و شدت برای هر کانال است ایجاد می‌شود (رابطه ۱). المان‌های این ماتریس را اعداد مختلط تشکیل می‌دهد و حاوی اطلاعات دامنه و فاز چهار ویژگی پلاریمتری می‌باشد. ماتریس پراکنندگی تنها برای توصیف پراکنده‌سازهای خالص به کار می‌رود و قادر به توصیف پراکنده‌سازهای غیرمنفرد نمی‌باشد (لی و پوتیر، ۲۰۰۹: ۲۱۴). پراکنده‌سازهای غیرمنفرد به علت حضور نویز اسپیکل تنها از لحاظ آماری قابل توصیف هستند. به منظور کاهش نویز، نمایش مرتبه دوم ماتریس پراکنندگی یعنی ماتریس همبستگی [T] برای آنالیز این پراکنده‌سازها به کار می‌رود. با در نظر گرفتن بردار هدف k حاوی مؤلفه‌های Pauli، این ماتریس از رابطه (۲) به دست می‌آید.

بازپراکنش سطحی، دوجشه و حجمی تجزیه شود. مشخصات پلاریمتری SAR قابل تقسیم‌بندی به سه بخش است: مشخصاتی که به صورت مستقیم از داده‌های اصلی به دست می‌آید، اجزایی که از روش‌های تجزیه ماتریس پراکنش ایجاد می‌شود و مشخصاتی که جزء توصیف‌گرهای رادار محسوب می‌شود (مقصودی، ۲۰۱۱:۸). جدول ۴ مشخصات استخراج شده از تصاویر پلاریمتریک را نشان می‌دهد که رابطه آن‌ها با زیتوده جنگل بررسی خواهد شد. در سنجش از دور راداری، به خصوص هنگام استفاده از تصاویر SAR، فرایند تصحیح رادیومتری مرتبط با تبدیل اعداد رقومی (DN) به سطح مقطع راداری نرمال شده<sup>۶</sup> (NRCS) یا ضرایب بازپراکنش است (سومارک، ۲۰۱۶:۱۹). ضریب بازپراکنش راداری با استفاده از رابطه ۱ استخراج می‌شود:

$$\sigma^0 = 10 \cdot \log_{10}(I^2 + Q^2) + CF - A$$

رابطه ۱

در این رابطه I و Q بخش‌های حقیقی و موهومی تولید SLC (سطح ۱، ۱) و A فاکتور تبدیل برابر با ۳۲/۰ است. CF فاکتور کالیبراسیون، HH/۲ برای پلاریزاسیون HH، و ۸۰/۲

- 1- Radar Vegetation Index
- 2- Biomass Index
- 3- Canopy structure Index
- 4- Radar Forest Degradation Index
- 5- Volume Scattering Index
- 6- Normalized Radar Cross Section

7- Multi looking

روی داده‌های تصحیح شده اعمال شد. مراحل پردازش تصاویر و استخراج مقادیر متناظر برای پلات‌های برداشت شده از نرم افزارهای SNAP، PolSAR و Arc Map استفاده شد.

سپس از داده‌های پلاریمتری سه دسته ویژگی مختلف استخراج می‌شود. دسته اول ویژگی‌هایی هستند که به طور مستقیم از مقادیر شدت هر پیکسل در داده اصلی استخراج می‌شوند. دسته دوم ویژگی‌هایی که با استفاده از تفکیک‌کننده‌های PolSAR<sup>۳</sup> استخراج می‌شوند و دسته سوم استخراج ویژگی‌ها، با استفاده از روش‌های مختلف تجزیه هدف<sup>۴</sup> به دست خواهند آمد. روش‌های تجزیه پلاریمتری Van Zyl و Cloude از مقادیر ویژه یا بردارهای ویژه ماتریس کوهرنسی استفاده می‌کند و روش‌های تجزیه پلاریمتری Yamaguchi و Freeman-Durden بر مبنای مدل هستند (لی و پاتیر، ۲۰۰۹: ۱۸۱).

### ۳- نتایج

#### ۳-۱- بررسی رابطه بین زیتوده و عناصر ماتریس بازپراکنش

##### [S] در دو فصل بهار و زمستان

در مرحله نخست، میانگین ضرایب بازپراکنش ( $\sigma^0$ ) در باندهای HH, HV, VV برای محدوده هر پلات نمونه استخراج شد. نگاره ۲ رابطه بین زیتوده اندازه‌گیری شده در زمین و ضرایب بازپراکنش را در چهار رویشگاه توصیف شده نشان می‌دهد. رگرسیون خطی ساده به منظور بررسی روابط بین مقادیر زیتوده و ضرایب بازپراکنش در دو فصل زمستان و بهار استفاده شد. همانطور که در تصاویر مشخص است بسته به نوع رویشگاه، میزان درصد تاج‌پوشش و محدوده زیتوده، میزان همبستگی دارای تغییرات است. این تغییرات در دو فصل مختلف نیز متفاوت است. به طور کلی برای این بخش، میزان همبستگی بین مقادیر زیتوده و ضرایب بازپراکنش مربوط به فصل بهار قوی‌تر از فصل زمستان ارزیابی می‌شود. لازم به ذکر است که به دلیل فقدان رابطه معنی دار بین زیتوده و ضرایب باند VV، از گنجاندن

$$[S] = \begin{bmatrix} S_{HH} & S_{HV} \\ S_{VH} & S_{VV} \end{bmatrix}$$

$$k_p = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} S_{HH} + S_{VV} \\ S_{HH} - S_{VV} \end{bmatrix}$$

$$T = \langle k_p \cdot k_p^{*T} \rangle$$

رابطه ۲

$$[T] = \begin{bmatrix} \frac{1}{2}(|(S_{HH} + S_{VV})|^2) & \frac{1}{2}((S_{HH} + S_{VV})(S_{HH} - S_{VV})^*) & |(S_{HH} + S_{VV})S_{HV}^*| \\ \frac{1}{2}(|(S_{HH} - S_{VV})(S_{HH} + S_{VV})^*|) & \frac{1}{2}(|S_{HH} - S_{VV}|^2) & |(S_{HH} - S_{VV})S_{HV}^*| \\ (|S_{HV}(S_{HH} + S_{VV})|^2) & (|S_{HV}(S_{HH} - S_{VV})^*|) & 2(|S_{HV}|^2) \end{bmatrix}$$

رابطه ۳

در این روابط، (...) نشان دهنده میانگین‌گیری مکانی، و «\*» و «T» به ترتیب نشانگر مزدوج مختلط و ترانپوز می‌باشد. هر کدام از اجزای ماتریس کوهرنسی نشان دهنده نوع خاصی از مکانیزم‌های بازپراکنش است. T11، T22 و T33 به عنوان اجزای قطری ماتریس کوهرنسی به ترتیب نشان دهنده بازپراکنش‌های سطحی، دو جهته و حجمی می‌باشد.

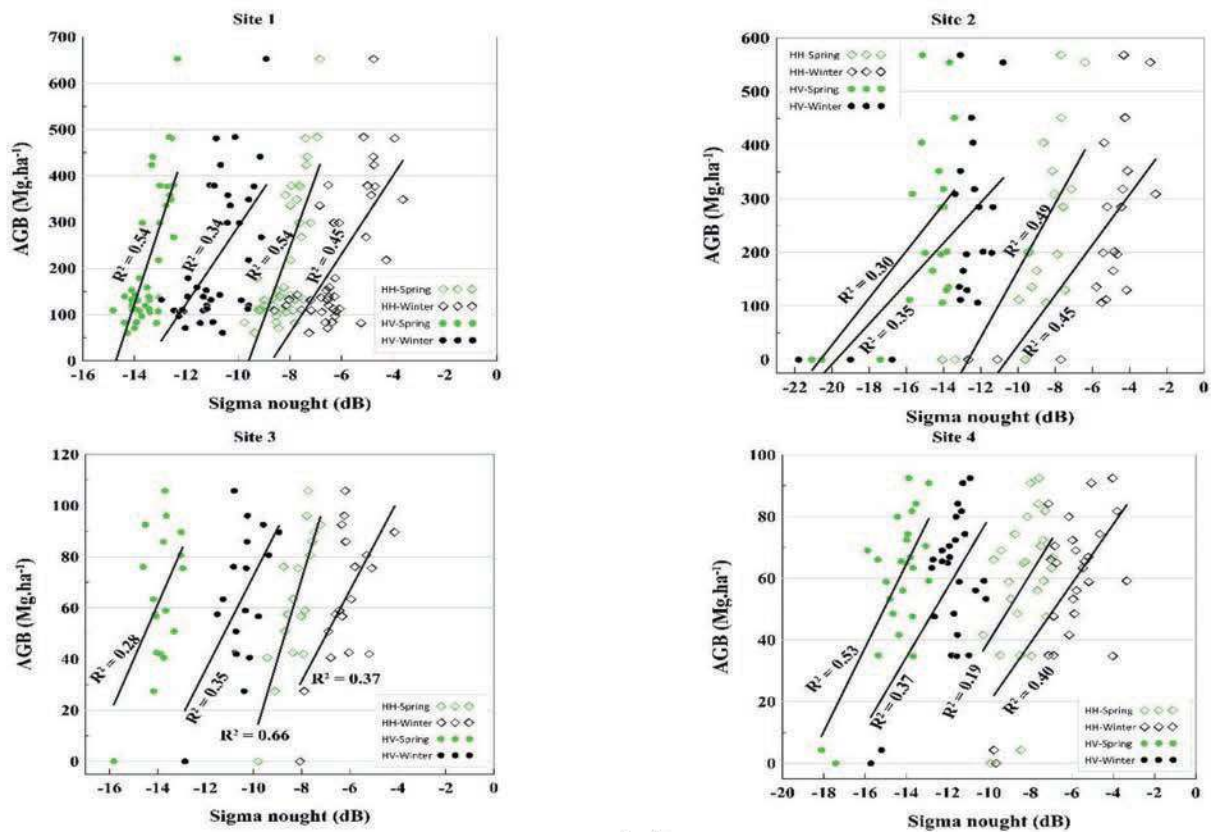
در مرحله بعد فیلتر اسپیکل روی داده‌ها اعمال شد. فیلتر شبه نوین اسپیکل با استفاده از فیلتر تطبیقی Refined Lee (لی، ۱۹۸۱) و ابعاد پنجره ۷×۷ انجام شد. کاهش جنبه‌های تصادفی متغیرهای پلاریمتری قبل از استخراج هر گونه مشخصه پلاریمتری لازم و ضروری است. این ظاهر به دلیل وجود انعکاس امواج با انرژی فرکانسی زیاد از اشیاء زمینی بوجود می‌آید (جاشی، میچارد، ساماچر، جانسن، ساعتچی و فثسولت، ۲۰۱۵: ۴۴۴۴). روش فیلتر تطبیقی Refined Lee قادر به حفظ بهینه جزئیات و نشانه‌های اهداف زمینی است در حالیکه قادر است اثرات شبه نوین اسپیکل را کاهش دهد (لی و پاتیر، ۲۰۰۹: ۱۷۳). در مرحله بعد مسطح‌سازی پستی و بلندی (Terrain Flattening) و تصحیح ژئومتری با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی SRTM<sup>۱</sup> انجام شد. تصحیح هندسی با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی منطقه<sup>۲</sup> برای تعیین موقعیت پیکسل‌های تصاویر SAR انجام می‌شود. تبدیل طول مایل به طول افق و فشرده‌سازی آزمون بخش‌هایی از فرایند تصحیح هندسی هستند. در مرحله آخر روش‌های تجزیه پلاریمتری

3- PolSAR discriminators

4- Target Decomposition

1- Shuttle Radar Topography Mission

2- Digital Elevation Model



نگاره ۲: همبستگی بین ضرایب بازپراکنش ماتریس [S] و میزان زیتوده (تن در هکتار) در ۴ رویشگاه مختلف

پلاریمتری صرف نظر شد. به طور کلی برای نتایج این بخش نیز، داده‌های ثبت شده در فصل بهار همبستگی بیشتری نسبت به داده‌های ثبت شده در فصل زمستان نشان دادند. همچنین نتایج نشان می‌دهد رفتار عناصر T22 و T33 در رویشگاه‌های مختلف و با توجه به ساختارهای متفاوت نسبت به زیتوده متغیر است به طوری که عنصر T33 در رویشگاه شماره ۱ و ۴ رابطه قوی‌تری با زیتوده نسبت به عنصر T22 دارد در صورتی که در رویشگاه‌های شماره ۲ و ۳ نتایج بر عکس است. در ارتباط با دلایل این رفتار اجزای پلاریمتری ماتریس کوهرنسی در بخش آخر بحث خواهد شد.

۳-۳- بررسی ارتباط بین زیتوده و مشخصات پلاریمتری مبتنی بر فاز (عناصر حاصل از روش‌های مختلف تجزیه پلاریمتری) در این مرحله پتانسیل حاصل از روش‌های تجزیه شامل Yamaguchi و Van Zyl, Cloude, Freeman برای تخمین

این نقاط در نمودارها صرف نظر شد. در کل، نتایج این بخش نشان داد واکنش ضرایب بازپراکنش به زیتوده تحت تأثیر نوع جنگل و ساختار تاج پوشش است. بنابراین، توسعه مدل برآورد زیتوده با استفاده از این داده‌ها بدون در نظر گرفتن نوع جنگل، ممکن است تخمین‌های درست و قابل اعتمادی را ارائه نکند.

### ۲-۳- بررسی نتایج ارتباط بین عناصر ماتریس کوهرنسی و زیتوده

در این بخش، نتایج ارتباط بین زیتوده و عناصر ماتریس [T3] در دو فصل مختلف بررسی شد. از رابطه خطی ساده به منظور بررسی رفتار ضرایب بازپراکنش عناصر قطری ماتریس کوهرنسی در مقابل زیتوده در دو فصل بهار و تابستان استفاده شد. لازم به ذکر است که به دلیل فقدان رابطه معنی‌دار بین عنصر T11 و زیتوده، از نشان دادن این جزء



### ۳-۵- نتایج حاصل از روش مدل‌سازی رگرسیون خطی چندمتغیره

به منظور مدل‌سازی با روش رگرسیون خطی، از متغیرهایی استفاده شد که دارای همبستگی معنی‌دار با زیتوده در هر رویشگاه بودند. مدل‌سازی به تفکیک رویشگاه و به تفکیک نوع داده‌های پلاریمتری انجام شد و در مرحله آخر بهترین متغیرها با توجه به میزان خطا و ضریب تبیین معرفی شد. جداول شماره ۵ تا ۸ نتایج این مدل‌سازی را نشان می‌دهد. نتایج این مدل‌سازی در رویشگاه شماره ۱ با ۴۰ مشاهده و روش ارزیابی LOOCV نشان داد که تصویر اخذ شده در فصل بهار زیتوده را با صحت بالاتری نسبت به تصویر اخذ شده در فصل زمستان برآورد می‌کند. برای داده‌های فصل بهار، بهترین نتیجه مربوط به تلفیق ضریب بازپراکنش باند HH و حاصلضرب جزء دوجهمه و جزء حجمی روش تجزیه پلاریمتری VanZyl مربوط می‌شود. همچنین نتایج نشان داد حاصلضرب بین اجزای پلاریمتری نتایج مناسب‌تری نسبت به استفاده جداگانه آنها در مدل دارد. برای داده‌های فصل زمستان بهترین مدل، حاصل استفاده همزمان جزء حجمی روش تجزیه پلاریمتری FreeMan و جزء دوجهمه روش تجزیه پلاریمتری Cloude می‌باشد. تلفیق داده‌های فصل بهار و زمستان موجب بهبود صحت تخمین مدل‌های اشتقاقی نشد.

نتایج مدل‌سازی برای رویشگاه شماره ۲ نشان داد مدل‌های مشتق شده از داده‌های ماتریس بازپراکنش، ماتریس کوهرنسی و توصیف‌گرهای پلاریمتری نتایج مناسب‌تری در فصل بهار نسبت به فصل زمستان دارند؛ اما استفاده از داده‌های تجزیه پلاریمتری مربوط به تصویر اخذ شده در فصل بهار صحت بیشتری دارد. در این رویشگاه نیز اجزای تجزیه پلاریمتری نتایج مناسب‌تری نسبت به منابع دیگر یعنی ماتریس بازپراکنش، ماتریس کوهرنسی و توصیف‌گرها داشتند. در این رویشگاه بهترین مدل مربوط به تلفیق داده‌های فصل زمستان و بهار بود و مدل نهایی مشتق شده از جزء دوجهمه روش تجزیه پلاریمتری Cloude

زیتوده در دو فصل مورد ارزیابی قرار گرفت. در ابتدا، پتانسیل عوامل مبتنی بر بردارهای ویژه یعنی اجزای حاصل از روش‌های تجزیه Van Zyl, Cloude مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که جزء بازپراکنش حجمی روش Van Zyl نسبت به جزء بازپراکنش دوجهمه، در رویشگاه‌های شماره ۱ و ۴ مناسب‌تر عمل کرده است. در مقابل، جزء دوجهمه، در رویشگاه شماره ۲ نتایج مناسب‌تری ارائه کرده است. جزء بازپراکنش دوجهمه روش تجزیه پلاریمتری Cloude بهترین نتیجه را در رویشگاه شماره ۲ نشان داده است در حالی که جزء بازپراکنش حجمی نتایج متقاعد کننده ارائه نکرده است. همچنین، پتانسیل الگوریتم‌های تجزیه پلاریمتری مدل مینا، Yamaguchi و Freeman به منظور تخمین زیتوده ارزیابی شد. با توجه به مشخصات رویشگاه‌های مورد نمونه‌برداری، جزء بازپراکنش حجمی بهترین نتایج را در رویشگاه‌های شماره ۱ و ۴ داشته است در حالی که جزء دوجهمه در رویشگاه شماره ۲ مناسب‌تر عمل کرده است. جزء حجمی روش تجزیه پلاریمتری Free Man بهترین رابطه با زیتوده در ۴ رویشگاه برقرار کرده است در حالیکه جزء دوجهمه این روش نتایج رضایت بخشی را ارائه نکرده است. جزء دوجهمه پائین‌ترین ارتباط را با زیتوده نشان داد. در این مطالعه روش تجزیه پلاریمتری Free Man کمترین ارتباط را با زیتوده نشان داده است.

### ۳-۴- ارتباط زیتوده با توصیف‌گرهای پلاریمتری

ارتباط بین زیتوده و توصیف‌گرهای پلاریمتری شامل شاخص زیتوده (BMI)، توان کل (SPAN)، شاخص بازپراکنش حجمی (VSI)، شاخص راداری تخریب جنگل (RFDI)، شاخص ساختار تاج پوشش (CSI)، ارتفاع پایه (Pedestal Height) و نسبت بین باندها مورد بررسی قرار گرفت. بیشترین ارتباط همبستگی بین مشخصات SPAN و BMI در هر چهار رویشگاه مشاهده شد. نتایج این بخش نیز نشان می‌دهد که داده‌های ثبت شده در فصل بهار ارتباط مناسب‌تری با زیتوده برقرار کردند.

جدول ۵: نتایج حاصل از رگرسیون خطی چندگانه در سایت شماره ۱ در دو فصل بهار و زمستان

24 April (Spring)	Variables	LOOCV (Accuracy Assessment)		
		$R^2_{adj}$	RMSE	RMSE%
[S]	<i>HH, VH</i>	0.68	85.05	39.50
	<i>HH × VH</i>	0.73	77.52	35.77
[T]	<i>T22, T33</i>	0.64	91.72	42.33
	<i>T22 × T33</i>	0.67	85.57	39.49
Radar Parameters	<i>SPAN, VV/VH</i>	0.45	105.08	41.19
Decompositions	<i>Yamavol, Yamadbl</i>	0.70	83.25	38.42
	<i>Vanzylvol × dbl</i>	0.72	78.40	36.18
All	<i>HH, Vanzylvol × dbl</i>	0.74	75.54	34.68
15 January (Winter)				
[S]	<i>HH</i>	0.38	118.09	54.5
	<i>HH × HV</i>	0.42	115.59	53.65
[T]	<i>T22, T33</i>	0.57	106.8	49.6
	<i>T22 × T33</i>	0.59	97.69	45.08
Radar Parameters	<i>SPAN, CSI</i>	0.46	111.94	51.66
Decompositions	<i>Freevol, Cloudedbl</i>	0.60	97.94	45.20
All	<i>Freevol, Cloudedbl</i>	0.60	97.94	45.20

در مشارکت اجزای پلاریمتری بین رویشگاه‌های مختلف در بخش بحث توضیحات بیشتر ارائه خواهد شد. نتایج مدل‌سازی برای جنگل کاری با ۲۶ مشاهده در جدول شماره ۸ آمده است. نتایج نشان می‌دهد مدل‌های توسعه یافته در این رویشگاه دارای صحت بالاتری نسبت به سایر رویشگاه‌ها است. همچنین مدل توسعه یافته با داده‌های اخذ شده در فصل بهار دارای صحت تخمین بالاتری است. به طور کلی داده‌های حاصل از تجزیه پلاریمتری نقش پررنگ‌تری در برآورد زیتوده دارند.

#### ۴- بحث و نتیجه گیری

در مطالعه حاضر، پتانسیل ضرایب بازپراکنش، مؤلفه‌های حاصل از تجزیه پلاریمتری روش‌های مختلف تجزیه و همچنین پتانسیل توصیف‌گرهای پلاریمتری داده‌های PALSAR-2 به منظور برآورد زیتوده در جنگل‌های هیرکانی شمال ایران مورد بررسی قرار گرفت. به همین

(فصل بهار)، حاصلضرب اجزای حجمی و دوجهشه همین روش تجزیه برای فصل زمستان و همچنین میزان توان کل در فصل زمستان بود. نتایج حاکی از آن است که اجزای پلاریمتری نقش مهمتری در برآورد زیتوده دارند.

نتایج مدل‌سازی در سایت شماره ۳ متفاوت از سایت شماره ۱ و ۲ است. این تفاوت به دلیل وجود اختلاف در ساختار تاج پوشش و میزان محدوده زیتوده می‌باشد (مراجعه به جدول ۲). در این رویشگاه نیز همچنان داده‌های مشتق شده در فصل بهار دارای صحت تخمین بالاتری است. نتایج نشان می‌دهد که باند HH تصویر اخذ شده در فصل بهار به تنهایی بهترین مدل را ارائه می‌دهد به گونه‌ای که افزودن دیگر مؤلفه‌ها موجب بهبود مدل نمی‌شود. البته اجزای پلاریمتری نیز تقریباً نتایج یکسان داشتند. برای تصویر اخذ شده در فصل زمستان جزء حجمی روش تجزیه پلاریمتری Yamaguchi به تنهایی بالاترین میزان تخمین صحت را داشت. در رابطه با دلایل وجود اختلاف

جدول ۶: نتایج حاصل از رگرسیون خطی چندگانه در سایت شماره ۲ در دو فصل بهار و زمستان

24 April (Spring)	Variables	LOOCV (Accuracy Assessment)		
		$R^2_{adj}$	RMSE	RMSE%
[S]	<i>HH</i>	0.54	117.88	49.38
[T]	<i>T22</i>	0.63	105.38	44.14
Radar Parameters	<i>Ro12, VV/VH</i>	0.53	117.53	49.24
Decompositions	<i>Cloudedbl, Lambda</i>	0.75	90.35	37.84
All	<i>Cloudedbl, Lambda</i>	0.75	90.35	37.84
15 January (Winter)				
[S]	<i>HH</i>	0.49	126.59	53.03
[T]	<i>T22, T11</i>	0.67	108.13	45.29
Radar Parameters	<i>SPAN, Ro13</i>	0.47	132.75	55.61
Decompositions	<i>Yamadbl + vol, Cloudedbl × vol</i>	0.77	85.96	36.01
All	<i>Cloudedbl × vol, SPAN</i>	0.79	82.04	34.36
Spring + Winter	<i>CloudedblSpring, Cloudedbl × volWinter, SPAN Winter</i>	0.84	71.85	30.09

جدول ۷: نتایج حاصل از رگرسیون خطی چندگانه در سایت شماره ۳ در دو فصل بهار و زمستان

24 April (Spring)	Variables	LOOCV (Accuracy Assessment)		
		$R^2_{adj}$	RMSE	RMSE%
[S]	<i>HH</i>	0.63	17.17	27.07
[T]	<i>T22</i>	0.37	23.08	36.38
Radar Parameters	<i>BMI</i>	0.48	28.68	32.60
Decompositions	<i>Cloudedbl, Lambda</i>	0.58	17.97	28.33
All	<i>HH</i>	0.63	17.17	27.07
15 January (Winter)				
[S]	<i>VH</i>	0.40	21.54	34.13
[T]	<i>T11</i>	0.35	23.48	37.02
	<i>T11 + T22 + T33</i>	0.41	21.88	34.49
Polarimetric Parameters	<i>SPAN</i>	0.41	21.75	34.28
Decompositions	<i>Yamavol</i>	0.46	20.45	32.24
All	<i>Yamavol</i>	0.46	20.45	32.24

منظور، آماربرداری در سه رویشگاه مختلف جنگل طبیعی و همچنین جنگل کاری انجام و مقدار زیتوده در قالب پلات‌های آماربرداری محاسبه شد (جدول ۲). پس از پردازش و استخراج داده‌های PolSAR با استفاده از تصاویر اخذ شده در فصل بهار و زمستان میزان و نوع این رابطه با زیتوده و این داده‌ها مورد بررسی قرار گرفت. همانطور که در نتایج گزارش شد، داده‌های اخذ شده در فصل بهار کارایی مناسب‌تر نسبت به داده‌های اخذ شده در فصل

جدول ۸: نتایج حاصل از رگرسیون خطی چندگانه در سایت شماره ۴ در دو فصل بهار و زمستان

24 April (Spring)	Variables	LOOCV (Accuracy Assessment)		
		R <sup>2</sup> <sub>adj</sub>	RMSE	RMSE%
[S]	HV	0.51	16.84	28.88
[T]	T33	0.47	17.38	29.80
Polarimetric Parameters	SPAN, HH/HV	0.57	15.56	26.69
Decompositions	VanZylVol, Alpha	0.59	15.25	26.16
All	Alpha, SPAN, HV	0.63	13.81	23.69
15 January (Winter)				
[S]	HV	0.27	21.06	36.12
[T]	T33	0.36	19.44	33.34
Polarimetric Parameters	SPAN	0.40	18.71	32.08
Decompositions	FreemanVol, Cloudedbl	0.44	18.15	31.12
All	FreemanVol, Cloudedbl	0.44	18.15	31.12

بارانی مورد بررسی قرار دادند که نتایج نشان داد زیتوده ارتباط مناسبی با داده‌های اخذ شده در فصل مرطوب در مقایسه با فصل خشک ندارد. در جنگل‌های بوره‌آل از داده‌های راداری به صورت سری زمانی به منظور برآورد زیتوده و بررسی اختلاف‌ها استفاده شده است. با توجه به اینکه تقریباً در این جنگل‌ها تاج پوشش شرایط ثابت در فصول مختلف دارد در نتیجه عامل مؤثر در ثبت داده‌ها میزان رطوبت محیط و شرایط سطح جنگل شامل زمین یخ زده/یخ نرده است. برای مثال مطالعه آنتروپو (۱:۲۰۱۷) که در جنگل‌های بورال با استفاده از داده‌های سری زمانی PALSAR-1 انجام شد نشان داد که بهترین نتیجه در شرایط با زمین یخ زده به دست می‌آید. هرچند نتیجه بررسی‌های چادری، تیل، اسمالیس (۱:۲۰۱۴) در جنگل‌های سیبری با استفاده از داده‌های PALSAR-1 نشان داد که تخمین حجم در شرایط غیر یخ زده بهتر است. از طرفی کاربرد تصاویر چندزمانی PALSAR-1 برای تخمین حجم تنه در جنگل‌های بوره‌آل و نیمه بوره‌آل توسط سنتورو، اریکسون، فرانسون (۲۰۱۵: ۴۲۹۰) نشان داد میزان RMSE با اعمال زاویه دید ۳۴/۳ درجه و پلاریزاسیون HV تحت شرایط غیر یخ زده ۴۴ درصد است. در جنگل‌های نیمه بورال، میزان کمتر

زمستان دارند. نتیجه مطالعه (یو و ساعتچی، ۲۰۱۶: ۱) نشان داده است ضرایب بازپراکنش باند L می‌تواند مرتبط با شرایط جنگل تغییر کند و نیاز به داده‌های زمانی برای برآورد زیتوده است. بنابراین حتماً تفاوت آشکار بین داده‌های اخذ شده در شرایط بابرگ و بدون برگ تاج پوشش در جنگل‌های خزان‌کننده وجود دارد.

علاوه بر تأثیر تاج پوشش روی بازپراکنش داده‌ها، شرایط سطح جنگل مانند میزان رطوبت در دو فصل متفاوت است. داده‌های رادار متأثر از ضریب دی‌الکتریک اهداف هستند و این ضریب مرتبط با میزان رطوبت تغییر می‌کند. در نتیجه تصاویر اخذ شده در فصل زمستان به عنوان یک فصل مرطوب در شمال ایران، تحت تأثیر رطوبت اهداف می‌باشد و این مسئله احتمالاً یک منبع خطا محسوب خواهد شد. همچنین در شرایط فقدان تاج پوشش انعکاس داده‌ها تأثیر بیشتری از شرایط سطح جنگل می‌پذیرد. مطالعه‌ای که به بررسی پتانسیل و اختلاف داده‌های رادار کسب شده در فصول مختلف در جنگل‌های هیرکانی بپردازد به ندرت یافت می‌شود، اما هم سو با نتایج این مطالعه، ویت گوین (۲۰۱۶: ۱۳۱) حساسیت زیتوده جنگل‌های تروپیکال را به داده‌های دوپلاریزه PALSAR-2 در دو فصل خشک و

زیتوده نشان نمی دهند اما با استفاده از روش تجزیه تبدیل موجک، میزان RMSE در جنگل های خیرودکنار نوشهر ۲۸/۲ تن در هکتار قابل برآورد است.

این نتیجه کمی بهتر از میزان RMSE به دست آمده برای رویشگاه شماره ۱ و ۲ و بالاتر از میزان خطا برای رویشگاه شماره ۳ می باشد. علیرضا شریفی و همکاران (۲۰۱۶) میزان RMSE را به منظور برآورد زیتوده با استفاده از داده های PALSAR و روش رگرسیونی RVM در جنگل های هیرکانی ۳۲/۰۵ تن در هکتار گزارش کردند که مشابه نتایج به دست آمده در این مطالعه می باشد هرچند روش رگرسیونی در دو مطالعه متفاوت است.

نتایج کلی این مطالعه و مقایسه آن با مطالعات دیگر نشان می دهد که طبقه بندی پوشش درختی براساس میزان زیتوده (حجم) در هکتار، وضعیت تاج پوشش و همچنین وضعیت توپوگرافی منطقه به منظور توسعه مدل های برآورد زیتوده ضروری به نظر می رسد. همچنین نتایج نشان داد برای رویشگاه های مختلف با مشخصات و خصوصیات متفاوت نوع خاصی از داده های پلاریمتری با زیتوده همبستگی نشان می دهد که در مطالعات قبلی به آن ها پرداخته نشده است. در این مورد در مطالعه گلشنی و همکاران (۲۰۱۹) توضیحات کامل ارائه شده است.

### سپاس گذاری

در مراحل انجام این پژوهش از راهنمایی های خانم دکتر مریم صالحی، خانم مهندس مهرنوش امتی و همچنین آقایان مهندس رضا بردباری و سجاد عینی استفاده شده است. بدینوسیله از کمک ایشان تشکر و قدردانی می شود.

### منابع و مأخذ

۱. امینی، صادقی؛ جلال، یاسر؛ ۱۳۹۱. "تصاویر ماهواره ای نوری و راداری در مدل سازی زیست توده جنگل های شمال ایران." سنجش از دور و GIS ایران ۴ (۴): ۶۹-۸۲.
۲. رضانی، صاحبی؛ محمدرضا، محمودرضا؛ ۱۳۹۴.

RMSE با اعمال پلاریزاسیون HH تحت شرایط یخ زده و با زاویه دید ۳۴/۳ درجه به دست آمد. همچنین می توان نتیجه گرفت که مناطق با میانگین زیتوده کمتر نسبت به مناطق با زیتوده بالا بیشتر تحت تأثیر شرایط رطوبت خاک جنگل قرار می گیرند.

نتایج مدل سازی با روش رگرسیونی خطی نیز نشان داد که میزان صحت برآورد زیتوده بستگی به محدوده زیتوده در رویشگاه ها دارد. به عنوان مثال برای رویشگاه شماره ۲ با میانگین زیتوده ۲۳۸ تن در هکتار، در بهترین حالت میزان خطای برآورد ۳۰/۰۹ درصد است در حالی که این مقدار با کاهش میانگین زیتوده کاهش می یابد به طوری که در رویشگاه شماره ۴ با میانگین زیتوده ۵۸ تن در هکتار به ۲۳/۶۹ درصد کاهش می یابد.

بنابراین می توان نتیجه گرفت کارایی داده های رادار به منظور مدل سازی زیتوده وابسته به میزان زیتوده نیز می باشد و میزان حجم در هکتار توده های جنگلی می تواند یکی از معیارهای طبقه بندی رویشگاه ها به هنگام برآورد باشد. برخلاف نتایج این مطالعه، در مطالعه وفایی و همکاران (۲۰۱۸) میزان خطا برای برآورد زیتوده در جنگل های هیرکانی با استفاده از داده های PALSAR-2 بالای ۶۰ درصد گزارش شده است. این اختلاف ممکن است در نتیجه نوع مشخصات راداری استخراج شده و همچنین اختلاف در توپوگرافی مناطق مورد مطالعه باشد. هرچند در مطالعه عطارچی و گلوگن (۲۰۱۴) که از تلفیق داده های دوپلاریزه راداری بانند L و تصاویر نوری برای برآورد زیتوده در جنگل های هیرکانی استفاده کرده است میزان خطا برای داده های PALSAR-1 به تنهایی ۴۳/۲۵ درصد گزارش شده است که همخوانی بیشتری با نتایج مطالعه حاضر دارد. اختلاف در میزان خطا در دو مطالعه نیز ممکن است ناشی از نوع متفاوت داده ها و پردازش آنها و همچنین تفاوت در مناطق مورد مطالعه باشد. همچنین در مطالعه قاسمی و همکاران (۲۰۱۳) گزارش شده است ضرایب بازپراکنش باندهای اصلی تصاویر PALSAR-1 ارتباط قابل قبولی با

for Aboveground Biomass of Dipterocarp Forests in Peninsular Malaysia.” *Journal of Tropical Forest Science* 27 (3): 388–99.

12. Joshi, Neha P, Edward T A Mitchard, Johannes Schumacher, Vivian K Johannsen, Sassan Saatchi, and Rasmus Fensholt. 2015. “L-Band SAR Backscatter Related to Forest Cover, Height and Aboveground Biomass at Multiple Spatial Scales across Denmark.” *Remote Sensing* 7 (4): 4442–72.

13. Lee, Jong-Sen, and Eric Pottier. 2009. *Polarimetric Radar Imaging: From Basics to Applications*. CRC press.

14. Maghsoudi, Yasser. 2011. “Analysis of Radarsat-2 Full Polarimetric Data for Forest Mapping,” no. 20347: 1–151.

15. Mermoz, Stéphane, Thuy Le Toan, Ludovic Villard, Maxime Roujou-Mouchain, and Joerg Seifert-Granzin. 2014. “Biomass Assessment in the Cameroon Savanna Using ALOS PALSAR Data.” *Remote Sensing of Environment* 155: 109–19. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.01.029>.

16. Morel, Alexandra C., Sassan S. Saatchi, Yadvinder Malhi, Nicholas J. Berry, Lindsay Banin, David Burslem, Reuben Nilus, and Robert C. Ong. 2011. “Estimating Aboveground Biomass in Forest and Oil Palm Plantation in Sabah, Malaysian Borneo Using ALOS PALSAR Data.” *Forest Ecology and Management* 262 (9): 1786–98. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2011.07.008>.

17. Neumann, Maxim, Laurent Ferro-Famil, and Andreas Reigber. 2010. “Estimation of Forest Structure, Ground, and Canopy Layer Characteristics from Multibaseline Polarimetric Interferometric SAR Data.” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 48 (3 PART 1): 1086–1104. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2009.2031101>.

18. Santoro, Maurizio, Leif E.B. Eriksson, and Johan E.S. Fransson. 2015. “Reviewing ALOS PALSAR Backscatter Observations for Stem Volume Retrieval in Swedish Forest.” *Remote Sensing* 7 (4): 4290–4317. <https://doi.org/10.3390/rs70404290>.

19. Shahrakhzadeh, Unes, Hormoz Sohrabi, Carolyn A Copenheaver, Unes Shahrakhzadeh, Hormoz Sohrabi, Carolyn A Copenheaver, Unes Shahrakhzadeh, et al.

”برآورد زیست توده جنگل با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای SAR و اپتیک.” نشریه علمی پژوهشی مهندسی فناوری اطلاعات مکانی ۳ (۱): ۱۵–۲۶.

۳. شریفی، علیرضا. ۱۳۹۴. ”تخمین زیست توده جنگل با استفاده از تصاویر چندپلاریزه SAR.” دانشگاه تهران، پایان‌نامه دکتری، ۱۸۲.

4. Antropov, Oleg. 2017. “Polarimetric ALOS PALSAR Time Series in Mapping Biomass of Boreal Forests,” 1–24. <https://doi.org/10.3390/rs9100999>.

5. Attarchi, Sara, and Richard Gloaguen. 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. <https://doi.org/10.3390/rs6053693>.

6. Chowdhury, Tanvir Ahmed, Christian Thiel, and Christiane Schmullius. 2014. “Growing Stock Volume Estimation from L-Band ALOS PALSAR Polarimetric Coherence in Siberian Forest.” *Remote Sensing of Environment* 155: 129–44. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.05.007>.

7. Cloude, Shane Robert. 1985. “Radar Target Decomposition Theorems.” *Institute of Electrical Engineering and Electronics Letter* 21 (1): 22–24.

8. Enghart, S., V. Keuck, and F. Siegert. 2011. “Aboveground Biomass Retrieval in Tropical Forests - The Potential of Combined X- and L-Band SAR Data Use.” *Remote Sensing of Environment* 115 (5): 1260–71. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.01.008>.

9. Freeman, Anthony, and Stephen L Durden. 1998. “A Three-Component Scattering Model for Polarimetric SAR Data.” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 36 (3): 963–73.

10. Ghasemi, Nafiseh, Mahmod Reza Sahebi, and Ali Mohammadzadeh. 2013. “Biomass Estimation of a Temperate Deciduous Forest Using Wavelet Analysis.” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 51 (2): 765–76. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2012.2205260>.

11. Hamdan, O, IMohd Hasmadi, H Khali Aziz, K Norizah, and M S Helmi Zulhaidi. 2015. “L-Band Saturation Level

POLSAR Images Based on the Coherency Matrix.” IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters 3 (3): 292–96. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2006.869986>.

26. Yu, Yifan, and Sassan Saatchi. 2016. “Sensitivity of L-Band SAR Backscatter to Aboveground Biomass of Global Forests.” Remote Sensing 8 (6): 522. <https://doi.org/10.3390/rs8060522>.

27. Zhang, Junjie, Gunho Sohn, and Mathieu Brédif. 2014. “A Hybrid Framework for Single Tree Detection from Airborne Laser Scanning Data: A Case Study in Temperate Mature Coniferous Forests in Ontario, Canada.” ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 98: 44–57. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.08.007>.

28. Zyl, Jakob J. van. 1992. “Application of Cloude’s Target Decomposition Theorem to Polarimetric Imaging Radar Data.” SPIE Conference on Radar Polarimetry 1748: 184. <https://doi.org/10.1117/12.140615>.

2015. “Above Ground Biomass and Leaf Area Equations for Three Common Tree Species of Hyrcanian Temperate Forests in Northern Iran.” Botany 93 (10): 663–70.

20. Sumareke, Agnes Mone. 2016. “MODELLING AND MAPPING ABOVEGROUND BIOMASS AND CARBON STOCK USING ALOS-2 PALSAR-2 DATA IN AYER HITAM TROPICAL RAINFOREST RESERVE IN MALAYSIA MODELLING AND MAPPING ABOVEGROUND BIOMASS AND CARBON STOCK USING ALOS-2 PALSAR-2 DATA IN AYER HITAM TROPICAL RAINFO.” Thesis Submitted to the Faculty of Geo-Information Science and Earth Observation of the University of Twente in Partial Fulfilment of the Requirements for the Degree of Master of Science in Geo-Information Science and Earth Observation.

21. Tanase, Mihai A., Rocco Panciera, Kim Lowell, Siyuan Tian, Jorg M. Hacker, and Jeffrey P. Walker. 2014. “Airborne Multi-Temporal L-Band Polarimetric SAR Data for Biomass Estimation in Semi-Arid Forests.” Remote Sensing of Environment 145: 93–104. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.01.024>.

22. Touzi, Ridha. 2007. “Target Scattering Decomposition in Terms of Roll-Invariant Target Parameters.” IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 45 (1): 73–84. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2006.886176>.

23. Vafaei, Sasan, Javad Soosani, Kamran Adeli, Hadi Fadaei, Hamed Naghavi, Tien Dat Pham, and Dieu Tien Bui. 2018. “Improving Accuracy Estimation of Forest Aboveground Biomass Based on Incorporation of ALOS-2 PALSAR-2 and Sentinel-2A Imagery and Machine Learning: A Case Study of the Hyrcanian Forest Area (Iran).” Remote Sensing 10 (2). <https://doi.org/10.1007/s11401-018-1063-7>.

24. Viet Nguyen, Luong, Ryutaro Tateishi, Akihiko Kondoh, Ram Sharma, Hoan Thanh Nguyen, Tu Trong To, and Dinh Ho Tong Minh. 2016. “Mapping Tropical Forest Biomass by Combining ALOS-2, Landsat 8, and Field Plots Data.” Land 5 (4): 31. <https://doi.org/10.3390/land5040031>.

25. Yamaguchi, Yoshio, Yuki Yajima, and Hiroyoshi Yamada. 2006. “A Four-Component Decomposition of

