



بررسی قابلیت داده‌های تک‌قطبشی TanDEM-X در برآورد ارتفاع تاج‌پوشش جنگل‌های هیرکانی (مطالعه موردی: جنگل شصت کلاته)

مریم پورعظیمی^{۱*}، شعبان شتایی جویباری^۲، جهانگیر محمدی^۳ و حسین آقابائی^۴

^۱ دانش‌آموخته کارشناسی ارشد جنگلداری، دانشکده علوم جنگل، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان

^۲ استاد گروه جنگلداری، دانشکده علوم جنگل، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان

^۳ استادیار گروه جنگلداری، دانشکده علوم جنگل، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان

^۴ استادیار گروه علوم اطلاعات جغرافیایی و رصد زمین، دانشکده علوم رصد زمین، دانشگاه تونته، هلند

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۸/۱۴؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰/۲۷)

چکیده

در این پژوهش، قابلیت داده‌های راداری تک‌قطبشی ماهواره TanDEM-X در برآورد ارتفاع تاج‌پوشش جنگل‌های هیرکانی بررسی شد. دو رویکرد تداخل‌سنجی تفاضلی با به‌کارگیری مدل رقومی زمین حاصل از داده‌های لیدار هوابرد و مدل Sinc حاصل ساده‌سازی مدل پراکنش حجمی نامنظم روی سطح Random Volume over Ground (RVoG) مقایسه شد. منطقه پژوهش در بخشی از طرح جنگلداری دکتر بهرام‌نای گرگان (شصت کلاته) واقع شده است. آمار زمینی ۳۰۸ قطعه نمونه دایره‌ای به مساحت ۰/۱ هکتار برای ارزیابی دقت رویکردهای استفاده‌شده در برآورد ارتفاع تاج‌پوشش به‌کار گرفته شد. به این منظور میانگین ارتفاع لوری در محل قطعات نمونه محاسبه شد. دامنه همدوسی برای برآورد ارتفاع تاج‌پوشش با استفاده از مدل Sinc به‌کار برده شد و با حذف اثر توپوگرافی از فاز رفع ابهام‌شده که با فاز حاصل از زمین در مناطق باز تطبیق یافته بود، ارتفاع تاج‌پوشش به روش تداخل‌سنجی تفاضلی به‌دست آمد. پس از تصحیح هندسی تصاویر، میانگین ارتفاع تاج‌پوشش برآوردی در محل قطعات نمونه استخراج شد. نتایج ارزیابی مستقیم ارتفاع تاج‌پوشش برآوردی نسبت به واقعیت زمینی نشان داد که رویکرد تداخل‌سنجی تفاضلی نسبت به مدل Sinc با مقادیر مجذور میانگین مربعات خطای مطلق RMSE و نسبی rRMSE به ترتیب ۲/۸۶ متر و ۱۲/۲۸ درصد و ضریب تبیین ۰/۳۳ از دقت بیشتری برخوردار است. این درحالی است که نتایج قابل مقایسه‌ای با استفاده از مدل Sinc به‌دست آمد (RMSE = ۳/۴۱ m و rRMSE = ۱۴/۶۴٪). به‌طور کلی تحقیق حاضر پتانسیل نسبی داده‌های با طول موج کوتاه TanDEM-X و مدل‌های مبتنی بر همدوسی را به‌منظور برآورد ارتفاع تاج‌پوشش جنگل‌های هیرکانی در سطح وسیع نشان می‌دهد، اگرچه تنها ۱۵ درصد از تغییرات میانگین ارتفاع لوری به‌وسیله مدل Sinc بیان شد. از این‌رو پژوهش‌های بیشتری برای درک عوامل تأثیرگذار بر صحت نتایج از جمله نوع گونه، شیب و مشخصه‌های برداشت تصویر ضروری به نظر می‌رسد.

واژه‌های کلیدی: ارتفاع لوری، تداخل‌سنجی، مدل RVoG، مدل Sinc، همدوسی.

مقدمه

کاربردهای آن می‌توان به مواردی همچون تعیین حجم چوب، ضریب شکل، جدول‌های محصول و تعیین حاصلخیزی رویشگاه اشاره کرد (Namiranian, 2006). نقشه‌های ارتفاع تاج‌پوشش عنصری مهم در

ارتفاع تاج‌پوشش جنگل از مهم‌ترین مشخصه‌های ساختاری است که به‌طور مؤثری در مدیریت و برنامه‌ریزی جنگل استفاده می‌شود. از جمله

همچنین به دلیل قابلیت نفوذ به درون توده‌های جنگلی، حاوی اطلاعات ساختار عمودی جنگل هستند (Tian et al., 2012; Sinha et al., 2015;). نوع قطبش^۱، زوایای فرودی^۲، حساسیت به خصوصیات دی‌الکتریک^۳ و زبری سطح^۴ نیز از ویژگی‌های متمایز داده‌های راداری است (Maghsoudi & Mahdavi, 2015). به‌طور کلی دو رویکرد تفسیر مستقیم ضرایب بازپخش راداری و برآورد ارتفاع تاج‌پوشش مبتنی بر داده‌های رادار به‌منظور تخمین مشخصه‌های ساختاری جنگل استفاده شده است. در رویکرد اول اغلب، اشباع سیگنال راداری اتفاق می‌افتد که کارایی این داده‌ها را برای مناطق دارای زیست‌توده روی زمینی زیاد محدود می‌کند (Lu et al., 2016; Poorazimy et al., 2021; Ronoud et al., 2020). اگرچه میزان سطح اشباع توسط طول موج به‌کاررفته، نوع قطبش، مشخصه‌های ساختاری جنگل و شرایط محیطی تحت تأثیر قرار می‌گیرد. رویکرد دوم تداخل‌سنجی SAR (InSAR) است که از زوج تصاویر راداری به‌منظور برآورد ارتفاع تاج‌پوشش استفاده می‌کند و مورد تحقیق پیش رو است. بیشتر روش‌های تداخل‌سنجی از همدوسی که اندازه مختلط (دامنه و فاز) همبستگی بین دو تصویر راداری است، به‌منظور برآورد ارتفاع تاج‌پوشش جنگل استفاده می‌کنند. تحقیقات مختلفی قابلیت استفاده از دامنه همدوسی، فاز و ترکیب آنها را برای برآورد ارتفاع تاج‌پوشش در مناطق جنگلی نشان داده‌اند (Solberg et al., 2010; Solberg et al., 2013; Schlund et al., 2015; Abdullahi et al., 2016). همچنین نتایج قابل اعتمادی براساس روش‌های مدل‌مبنا با استفاده از فرکانس‌های متفاوت راداری و در دامنه وسیعی از شرایط رویشگاهی

پایش تغییرات جنگل هستند که می‌توانند سهم بزرگی در مدل‌های سیکل کربن به خود اختصاص دهند (Nabuurs et al., 2007). همچنین برآورد زیست‌توده روی زمینی به طریقه روابط آلومتریک از مهم‌ترین کاربردهای ارتفاع تاج‌پوشش است (Caicoya et al., 2012; Abdullahi et al., 2016). اگرچه اندازه‌گیری زمینی مشخصه‌های جنگلی از جمله ارتفاع تاج‌پوشش از دقت بیشتری برخوردار است، فراهم‌آوری اطلاعات به‌روز و در توالی معین از گستره، توزیع مکانی و پویایی جنگل‌ها به‌ویژه در سطح وسیع کار دشواری است. به‌علاوه، شرایط رویشگاهی کوهستانی و شیب‌دار، تراکم زیاد درختان و چنداشکوبه بودن جنگل‌های هیرکانی سبب افزایش هزینه و زمان در اندازه‌گیری زمینی ارتفاع تاج‌پوشش می‌شود (Kargar & Sohrabi, 2019). از این‌رو فناوری‌های دورسنجی هوابرد و فضابرد به‌منزله رویکردی اقتصادی‌تر توسعه یافته‌اند که از آنها می‌توان برای بررسی مشخصه‌های کمی و کیفی اکوسیستم‌های جنگلی استفاده کرد. از جمله این منابع داده دورسنجی می‌توان به داده‌های لیدار، رادار و تصاویر ماهواره‌ای نوری اشاره داشت (David et al., 2022; Loh et al., 2022; Silveira et al., 2023). به‌کارگیری سنسور از دور هوابرد برای بررسی توده‌های جنگلی به‌ویژه برای مناطق وسیع پرهزینه بوده و محدود به پروازهای آزمایشی است (Chen et al., 2021). در میان داده‌های فضابرد، داده‌های نوری متأثر از اتمسفر هستند و انعکاس‌پذیری از لایه بالایی تاج‌پوشش صورت می‌پذیرد که حاوی کمترین اطلاعات از وضعیت ساختار و زیست‌توده روی زمینی است (Tsui et al., 2012; Lu et al., 2016; Miri et al., 2017; Darvishsefat et al., 2016). در مقابل داده‌های راداری رویکردی جایگزین را برای تهیه نقشه جنگل فراهم می‌سازند. این داده‌ها قدرت تفکیک زیادی دارند و به‌واسطه طول موج بلندتر، در شرایط آب‌وهوایی مختلف استفاده می‌شوند و

1. جهت بردار میدان الکتریکی موج نسبت به سطح مرجع Polarization
2. زاویه بین بردار جهت رنج و بردار نرمال زمینی Incidence angle
3. معیاری از پاسخ محیط به حضور میدان الکتریکی Dielectric Constant
4. درجه پستی و بلندی‌های سطح وابسته به Surface roughness طول موج و زاویه فرود

TanDEM-X به‌کار گرفته شد. در این تحقیق به‌واسطهٔ به‌کارگیری مدل رقومی ارتفاع دقیق حاصل از لیدار هوابرد به‌منظور حذف فاز توپوگرافی، ارتفاع تاج‌پوشش با دقت ۱۱ درصد تخمین زده شد. از دیگر محدودیت‌های برآورد ارتفاع تاج‌پوشش، پیچیدگی‌های محاسباتی برگردانی مدل است که مناسب عملکرد در سطح وسیع نیست. تحقیقات قبلی نشان داده است که ارتفاع تاج‌پوشش جنگل با دامنهٔ همدوسی همبستگی زیادی دارد که می‌تواند به‌وسیلهٔ مدل RVoG شرح داده شود (Olesk et al., 2015). با توجه به محدودیت‌های برگردانی مدل RVoG از جمله لزوم مشاهدات بیش از آنچه اغلب در دسترس است، مدل‌های ساده‌شدهٔ حاصل از RVoG به‌منظور برآورد ارتفاع تاج‌پوشش جنگل ایجاد شده که کاربرد آنها از جمله مدل Sinc در جنگل‌های بوره‌آل و خزان‌کننده در تحقیقات مختلفی نشان داده شده است (Praks et al., 2012; Kugler et al., 2014; Askne & Santoro, 2014; Solberg et al., 2018; Ronoud, 2022; Gómez et al., 2021). برای مثال Olesk et al. (2015) نشان دادند که همبستگی ارتفاع حاصل از مدل‌های مبتنی بر همدوسی و اندازه‌گیری‌های ارتفاع حاصل از لیدار هوابرد به ۰/۷۵-۰/۵۸ در شرایط دارای برگ و ۰/۸۷-۰/۹۴ در شرایط بی‌برگی در جنگل‌های آمیختهٔ خزان‌کننده می‌رسد. در جنگل‌های هیرکانی برای نخستین بار Ronoud (2022) قابلیت تنوعی از مدل‌های مبتنی بر همدوسی را در برآورد ارتفاع تاج‌پوشش مقایسه و بر پتانسیل دامنهٔ همدوسی به‌ویژه در نبود DTM دقیق تأکید کرد. با این حال استفاده از این مدل‌ها برای اندازه‌گیری و برآورد ارتفاع تاج‌پوشش در جنگل‌های شمال ایران تازگی دارد. هدف تحقیق حاضر، بررسی قابلیت داده‌های تک‌قطبشی ماهوارهٔ TanDEM-X به‌منظور برآورد ارتفاع تاج‌پوشش در بخشی از جنگل‌های هیرکانی شمال ایران در سطح قطعه نمونه است. با توجه به دسترسی به DTM دقیق حاصل از

به‌دست آمده است (Hajnsek et al., 2009; Praks et al., 2012; Kugler et al., 2014; Lee et al., 2015). مدل پراکنش حجمی نامنظم روی سطح (RVoG¹) از مهم‌ترین و متداول‌ترین مدل‌های بازیابی ارتفاع تاج‌پوشش جنگل است که همدوسی تداخل‌سنجی را تابعی از ارتفاع تاج‌پوشش در نظر می‌گیرد (Papathanassiou & Cloude, 2010). با این حال از جمله محدودیت‌های استفاده از همدوسی تداخل‌سنجی در برآورد ارتفاع تاج‌پوشش، ناهمبستگی زمانی در اخذ تصاویر فضابرد است. از سال ۲۰۱۰، زوج ماهوارهٔ TanDEM-X به‌منزلهٔ اولین تداخل‌سنج تک‌گذره^۲ به اخذ تصاویر با قدرت تفکیک زیاد و ناهمبستگی زمانی نزدیک به صفر پرداخته است. اگرچه استفاده از باند X در این تداخل‌سنج آن را به انتخاب کمتر بهینه‌ای در مطالعات جنگل تبدیل کرده، حساسیت زیادی به ارتفاع تاج‌پوشش جنگل در مناطق بوره‌آل و حتی تروپیکال نشان داده است (Caicoya et al., 2012; Cloude et al., 2013; Schlund et al., 2014). همچنین وجود داده‌های کاملاً پلاریزه یا دسترسی به مدل‌های توپوگرافی محلی^۳ (DTM) برای برآورد ارتفاع تاج‌پوشش جنگل ضروری است؛ این داده‌ها به‌طور گسترده به‌ویژه برای مأموریت‌های فضابرد در دسترس نیستند. علی‌رغم دانش موجود، با توجه به محدودیت‌های ذکرشده از جمله دسترسی به داده‌های تمام‌پلاریزه و DTM دقیق در ایران و نیز مشکلات آماربرداری در عرصه‌های جنگلی، برآورد ارتفاع تاج‌پوشش با روش InSAR اغلب در خارج از ایران و محدود به استفاده از داده‌های هوابرد است (Sharifi & Khazaei, 2013). اگرچه روش سنتی تداخل‌سنجی تفاضلی در تحقیق Zahriban et al. (2020) برای برآورد ارتفاع تاج‌پوشش جنگل‌های هیرکانی با استفاده از داده‌های

1. Random Volume over Ground (RVoG)
2. Single-pass
3. Digital Terrain Model (DTM)

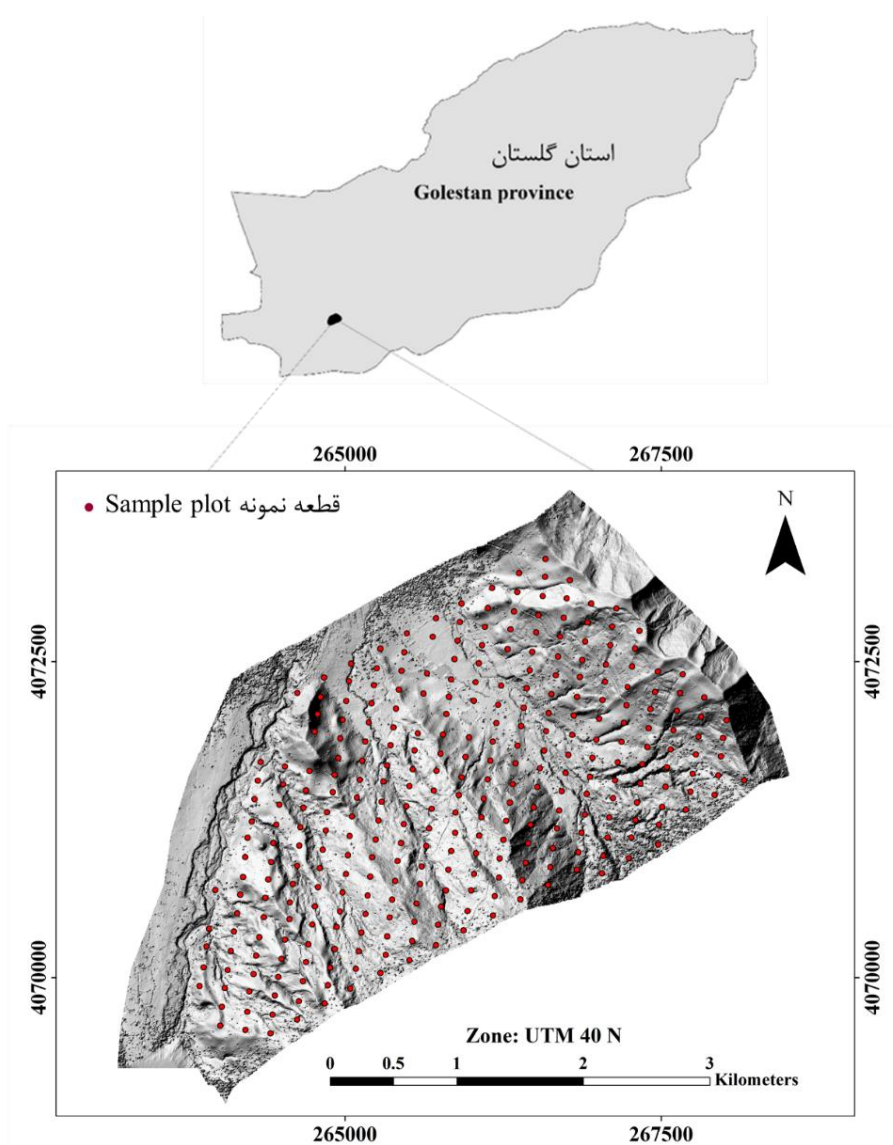
طبیعی و آبخیزداری استان گلستان در جنوب غربی شهرستان گرگان انجام گرفت. منطقه پژوهش در بخشی از سری ۱ و سری ۲ با مجموع مساحت ۱۱۰۰ هکتار در طول جغرافیایی "۵۴°۲۴'۱۳/۱۸" تا "۵۴°۲۱'۲۰'۳۷" شرقی و عرض جغرافیایی "۳۶°۴۴'۲۹/۵۵" تا "۳۶°۴۶'۳۹/۷۱" شمالی واقع شده است (شکل ۱). پوشش گیاهی غالب درختان پهن برگ خزان کننده است و منطقه در دامنه ارتفاعی ۲۹۹/۱۰۳ تا ۷۳۱/۷۳۴ متر از سطح دریا واقع شده است.

لیدار هوابرد، دو رویکرد تداخل سنجی تفاضلی و مدل ساده شده Sinc حاصل از RVoG مقایسه می شود. انتظار می رود که نتایج تحقیق حاضر گامی در زمینه امکان پذیری تهیه نقشه ارتفاع تاج پوشش جنگل در سطح وسیع باشد.

مواد و روش ها

منطقه پژوهش

این پژوهش در بخشی از طرح جنگلداری دکتر بهرام نیا واقع در حوضه آبخیز ۸۵ اداره کل منابع



شکل ۱- موقعیت منطقه پژوهش در استان گلستان و نحوه پراکنش قطعات نمونه روی نقشه سایه روشن پستی و بلندی ها
Figure 1. Study area in Golestan province, and distribution of sample plots on a Hillshade map

شیوه اجرای پژوهش داده زمینی

در این پژوهش از اطلاعات آماربرداری میدانی در قطعات نمونه تحقیق قبلی (Mohammadi, 2012) استفاده شد. این نمونه‌برداری در سال ۱۳۹۰ به روش منظم با شروع تصادفی با ابعاد شبکه ۲۰۰×۱۵۰ متر صورت پذیرفت و در مجموع ۳۰۸ قطعه نمونه دایره‌ای هر کدام به مساحت ۰/۱ هکتار پیاده‌سازی شد. همچنین موقعیت مراکز همه قطعات نمونه با استفاده از دستگاه GPS تفاضلی با خطای کمتر از ۱۰ سانتی‌متر ثبت شد و در همه قطعات نمونه مشخصه‌های قطر برابر سینه (با استفاده از خط‌کش دوبازو) و ارتفاع (با استفاده از دستگاه ور تکس لیزری VL402) تمام درختان با قطر برابر سینه بیشتر از ۱۲/۵ سانتی‌متر اندازه‌گیری شد. خلاصه آماری برخی از مشخصه‌های ساختاری جنگل در جدول ۱ آمده است. برای محاسبه میانگین ارتفاع در هر قطعه نمونه از ارتفاع لوری استفاده شد. ارتفاع لوری سهم هر درخت را در ارتفاع توده با توجه به سطح مقطع آن درخت وزن‌دهی می‌کند. از این‌رو ارتفاع لوری پایدارتر از میانگین ارتفاع

حسابی به‌ویژه در توده‌های ناهمسال مانند جنگل‌های منطقه پژوهش این تحقیق است (جدول ۱). رابطه ۱ نحوه محاسبه ارتفاع لوری را نشان می‌دهد که در آن H_{Lorey} ارتفاع لوری به متر، n تعداد کل درختان در هر قطعه نمونه و BA_i و H_i به ترتیب سطح مقطع و ارتفاع آمین درخت است (Namiranian, 2006).

$$H_{Lorey} = \frac{\sum_{i=1}^n BA_i * H_i}{\sum_{i=1}^n BA_i} \quad \text{رابطه ۱}$$

داده‌های سنجش از دوری

در این تحقیق از داده‌های راداری فضا برد TanDEM-X اخذ شده در تاریخ سوم اسفند ۱۳۸۹ در مد Stripmap استفاده شد. شایان ذکر است که داده مذکور نزدیک‌ترین به‌لحاظ زمانی به داده‌های لیدار هوآبرد و اندازه‌گیری‌های زمینی بود. این تصاویر در قطبش HH و در فرمت CoSSC^۱ فراهم شده بود. مشخصات داده‌های TanDEM-X به‌طور خلاصه در جدول ۲ آمده است.

جدول ۱- خلاصه آماری برخی مشخصه‌های ساختاری جنگل^۱

Table 1. Summary of some forest structural characteristics

انحراف معیار Standard deviation	میانگین Average	حداکثر Maximum	حداقل Minimum	مشخصه Attribute
8.24	34.48	67.18	18.05	متوسط قطر برابر سینه (سانتی‌متر) Mean diameter (cm)
11.60	26.28	71.71	0.45	حجم (متر مکعب) Volume (m ³)
3.55	23.24	33	7.19	میانگین ارتفاع لوری (متر) Lorey's mean height (m)

جدول ۲- مشخصات تصویر TanDEM-X

Table 2. TanDEM-X specifications

تاریخ اخذ تصویر Acquisition time	زاویه برخورد (درجه) Incidence angle (degree)	باز مکانی ^۲ (متر) Baseline (m)	ارتفاع ابهام (متر) Height of Ambiguity (m)	پلاریزاسیون Polarization
2011/02/22	46.22	198.59	40.39	HH

1. Co-registered Single-look Slant-range Complex (CoSSC)

2. Baseline بردار موقعیت دو آنتن

برآورد ارتفاع تاج پوشش جنگل با استفاده از داده‌های TanDEM-X

به منظور برآورد ارتفاع تاج پوشش جنگل با استفاده از داده‌های TanDEM-X دو رویکرد تداخل‌سنجی تفاضلی و مدل ساده‌شده Sinc حاصل از RVoG مقایسه شدند که در اینجا شرح داده می‌شوند.

در رویکرد تداخل‌سنجی تفاضلی، پس از برآورد فاز زمین حاصل از DTM لیدار هواپرد به فاز رفع ابهام‌شده ناشی از اندازه‌گیری‌های SAR در مناطق باز ($\gamma > 0.90$)، اثر توپوگرافی حذف و فاز رفع ابهام‌شده به ارتفاع تاج پوشش h_v تبدیل شد (رابطه ۳).

$$\text{رابطه ۳} \quad h_v = \frac{\arg(\gamma) - \hat{\phi}}{k_z} \quad k_z = \frac{4\pi\Delta\theta}{\lambda \sin\theta}$$

که در آن $\hat{\phi}$ فاز برآوردی حاصل از زمین، k_z شماره موج عمودی، $\Delta\theta$ زاویه جدایی باز مکانی از نقطه پخش زمینی، λ طول موج و θ زاویه برخورد است (Cloude, 2010).

مدل ساده‌شده Sinc حاصل از RVoG، مدلی نیمه‌تجربی است که با وجود پارامترهای کم از جمله ارتفاع ابهام HOA ، امکان برگردانی مدل و بازیابی ارتفاع تاج پوشش h_{sinc} را فراهم می‌کند. این مدل یک پارامتر تجربی C_{sinc} را معرفی می‌کند که فاقد معنای فیزیکی است و همچنین فرض می‌کند که میرایی ناچیز و معادل صفر است (رابطه ۴، Olesk et al., 2015).

$$\text{رابطه ۴} \quad |\gamma_{sinc}| = 0.95 \cdot \text{sinc}\left(C_{sinc} \pi \frac{h}{HOA}\right)$$

اعتبارسنجی

میانگین ارتفاع تاج پوشش برآوردشده به روش تداخل‌سنجی تفاضلی و مدل Sinc در محل قطعات نمونه استخراج شد تا کارایی هر دو رویکرد نسبت به میانگین ارتفاع لوری اندازه‌گیری‌شده در محل قطعات نمونه ارزیابی شود. در این پژوهش از معیارهای مجذور میانگین مربعات خطا^۱ و میانگین تفاوت‌ها^۲

به منظور برآورد دقیق فاز زمین و نظر به تک‌قطبشی بودن TanDEM-X، DTM اخذشده از داده‌های لیدار هواپرد استفاده شد. این داده‌ها در سال ۱۳۹۰ توسط دستگاه Riegl LMS Q560 در میانگین ارتفاع پرواز ۱۰۰۰ متر از سطح دریا و میانگین تراکم ۴-۵ پالس در هر متر مربع برداشت شده بودند. مدل رقومی ارتفاع مذکور با استفاده از جداسازی نقاط زمینی در محیط نرم‌افزار Fusion تهیه شد (Mohammadi, 2012). براساس ارزیابی دقت صورت‌گرفته با استفاده از نقاط کنترل زمینی ثبت‌شده با DGPS، میانگین اختلاف ارتفاع ۴۰ سانتی‌متری نقاط کنترل زمینی با مقادیر ارتفاعی DTM، حاکی از دقت زیاد DTM استفاده‌شده است.

پیش‌پردازش داده‌های TanDEM-X

نقطه شروع برای پژوهش‌های تداخل‌سنجی محاسبه همدوسی مختلط بین دو تصویر است که اندازه نرمال‌شده همبستگی بین دو سیگنال مختلط راداری است که به وسیله باز مکانی جدا شده‌اند و دامنه عددی آن بین ۰ و ۱ است. رابطه ۲ نحوه محاسبه همدوسی را نشان می‌دهد که در آن γ همدوسی بین پیکسل‌های متناظر دو تصویر راداری، E اپراتور امید ریاضی، S_1 و S_2 مقادیر مختلط پیکسل‌های متناظر دو تصویر راداری و $*$ اپراتور مزدوج مختلط است (Maghsoudi & Mahdavi, 2015).

$$\text{رابطه ۲} \quad \gamma = \frac{E\{S_1 S_2^*\}}{\sqrt{E\{|S_1|^2\} \cdot E\{|S_2|^2\}}}$$

به این منظور تداخل‌نما ایجاد و اثر زمین مسطح که اختلاف فاز در نقاط مسطح به دلیل هندسه تصویربرداری رادار است حذف شد. همچنین فیلتر Goldstein با ابعاد 3×3 پیکسل به منظور کاهش نویز لکه اعمال شد. در نهایت از روش Range-Doppler به منظور تصحیح هندسی تصاویر استفاده شد (Small, 2008).

2. Root Mean Square Error (RMSE)
3. Mean Difference (MD)

1. Speckle تغییرات عمده در درجات خاکستری پیکسل‌های مجاور تصویر راداری

با استفاده از رویکرد تداخل‌سنجی تفاضلی، ارتفاع تاج‌پوشش با $RMSE=2/86$ متر برآورد شد. بدین‌وسیله ۳۳ درصد از تغییرات میانگین ارتفاع لوری اندازه‌گیری‌شده در زمین توضیح داده شد و $rRMSE$ برابر با $12/28$ درصد حاصل شد. در مقابل دقت مدل Sinc در برآورد ارتفاع تاج‌پوشش به نسبت کمتر و R^2 $RMSE=3/41$ متر و $rRMSE=14/64$ بود. حاصل‌شده نیز $0/15$ بود. کم‌برآوردی ارتفاع تاج‌پوشش به میزان $MD=-0/03$ متر و $MD=-0/04$ متر به ترتیب برای برآوردها با استفاده از تداخل‌سنجی تفاضلی و مدل Sinc مشاهده شد.

ابرنقاط ارتفاع تاج‌پوشش جنگل برآوردشده در مقابل مقادیر اندازه‌گیری‌شده زمین برای هر دو رویکرد به کاررفته در شکل‌های ۲ و ۳ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود تداخل‌سنجی تفاضلی از عملکرد بهتری نسبت به تنها استفاده از همدوسی تداخل‌سنجی برخوردار است.

نقشه ارتفاع تاج‌پوشش به دست‌آمده از رویکرد تداخل‌سنجی تفاضلی و مدل Sinc به ترتیب در شکل‌های ۴ و ۵ آورده شده است. حداکثر ارتفاع تاج‌پوشش برآوردی در نقشه حاصل‌شده به روش تداخل‌سنجی تفاضلی و مدل Sinc به ترتیب $49/54$ و $35/8$ متر است.

به صورت مطلق و نسبی و همچنین ضریب تبیین^۱ برای ارزیابی استفاده شد (رابطه‌های ۵-۷).

$$\text{رابطه ۵} \quad rRMSE \% = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - Y_i)^2 / n}}{\bar{Y}_i} \times 100$$

$$\text{رابطه ۶} \quad rMD \% = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - Y_i) / n}{\bar{Y}_i} \times 100$$

$$\text{رابطه ۷} \quad R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y}_i)(\hat{Y}_i - \bar{Y}_i)]^2}{(\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y}_i)^2)(\sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - \bar{Y}_i)^2)}$$

n تعداد قطعات نمونه زمینی، \hat{Y}_i مقادیر پیش‌بینی‌شده، \bar{Y}_i میانگین مقادیر پیش‌بینی‌شده، Y_i مقادیر مشاهده‌شده و \bar{Y}_i میانگین مقادیر مشاهده‌شده است.

نتایج

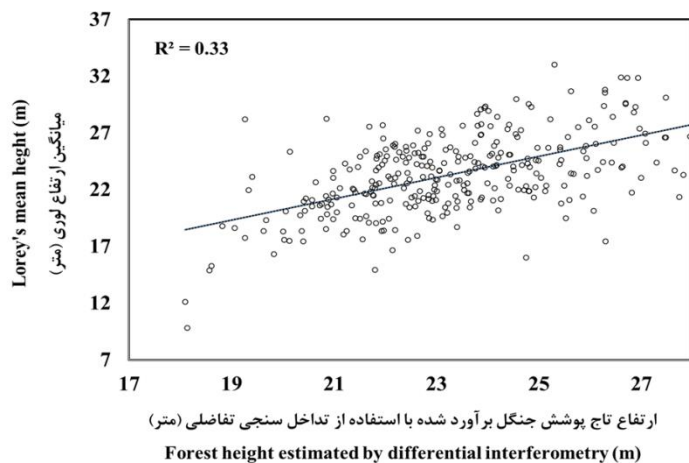
آماره‌های توصیفی میانگین ارتفاع لوری در محل قطعات نمونه حاصل از اندازه‌گیری زمینی در جدول ۱ آورده شده است که بر این اساس، کمترین مقدار آن $7/19$ متر و بیشترین مقدار آن 33 متر است. همچنین میانگین ارتفاع لوری در منطقه پژوهش $23/24$ متر است. در ادامه نتایج برآورد ارتفاع تاج‌پوشش جنگل با استفاده از دو رویکرد تداخل‌سنجی تفاضلی و مدل Sinc بررسی می‌شود (جدول ۳).

جدول ۳- نتایج برآورد ارتفاع تاج‌پوشش جنگل با استفاده از داده‌های TanDEM-X

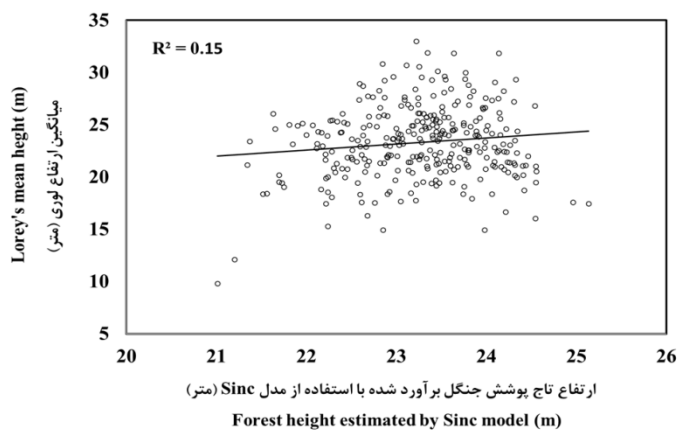
Table 3. Forest height estimation accuracy using TanDEM-X data^۱

ضریب تبیین (R^2)	میانگین تفاوت‌های نسبی (%) (rMD)	میانگین تفاوت‌ها (متر) (MD)	مجدور میانگین مربعات خطای نسبی (%) (rRMSE)	مجدور میانگین مربعات خطا (متر) (RMSE)	رویکرد استفاده‌شده Approach
0.33	-0.14	-0.03	12.28	2.86	تداخل‌سنجی تفاضلی Differential interferometry
0.15	-0.16	-0.04	14.64	3.41	مدل Sinc Sinc model

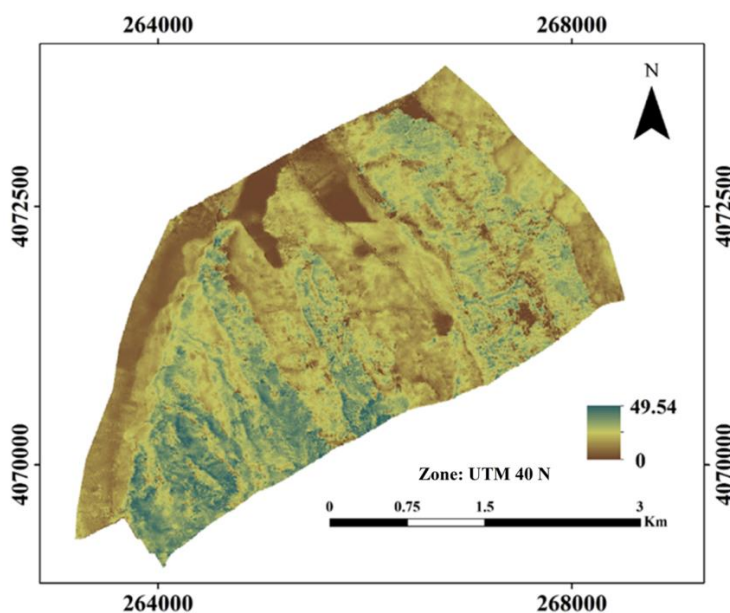
1. Coefficient of Determination (R^2)



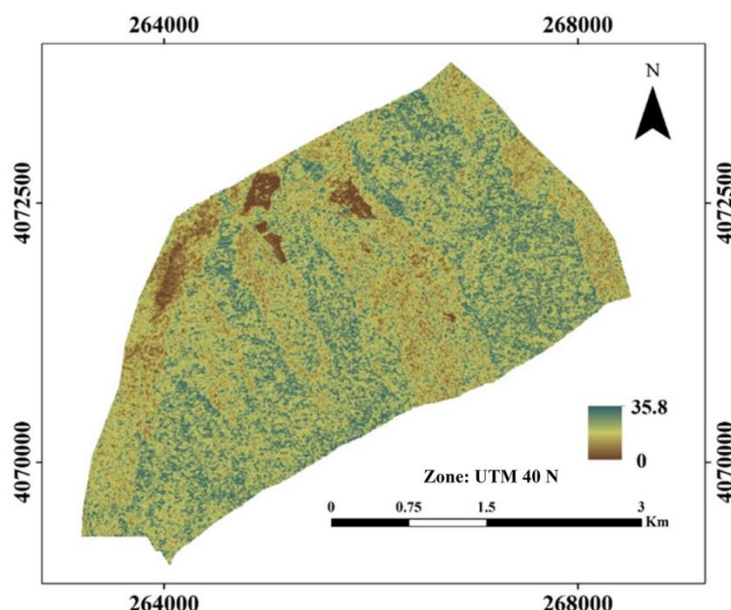
شکل ۲- ابرنقاط ارتفاع تاج پوشش جنگل برآورد شده با استفاده از تداخل سنجی تفاضلی در مقابل مقادیر اندازه گیری شده زمینی
Figure 2. Scatter plot of observed versus estimated forest height using differential interferometry



شکل ۳- ابرنقاط ارتفاع تاج پوشش جنگل برآورد شده با استفاده از مدل Sinc در مقابل مقادیر اندازه گیری شده زمینی
Figure 3. Scatter plot of observed versus estimated forest height using Sinc model



شکل ۴- نقشه ارتفاع تاج پوشش جنگل برآورد شده با استفاده از تداخل سنجی تفاضلی
Figure 4. The map of forest height estimated by differential interferometry



شکل ۵- نقشه ارتفاع تاج‌پوشش جنگل برآوردشده با استفاده از مدل Sinc
Figure 5. The map of forest height estimated by Sinc model

۲/۳۸ درصد شد. همچنین ضریب تبیین اندک مدل Sinc برتری رویکرد تداخل‌سنجی تفاضلی را در برآورد ارتفاع تاج‌پوشش نشان می‌دهد ($R^2=0/15$). مدل Sinc در تحقیقات متعددی برای برآورد ارتفاع تاج‌پوشش جنگل استفاده شده و نتایج مقبولی ارائه داده است (Askne & Santoro, 2014; Chen et al., 2016; Olesk et al., 2016; Schlund et al., 2019; Gómez et al., 2021). برای مثال Ronoud (2022) در تحقیقی قابلیت سه مدل مبتنی بر کوه‌رنسی شامل Sinc را در توده‌های آمیخته کوهستانی جنگل خیرود بررسی کرد. براساس نتایج حاصل ارتفاع تاج‌پوشش با دقتی مشابه تحقیق حاضر به دست آمد ($RMSE=5/26$ متر و $rRMSE=15/1$ درصد را نشان داد. در تحقیقی دیگر Gómez et al. (2021) ارتفاع تاج‌پوشش جنگل با مقادیر R^2 و $RMSE$ به ترتیب ۳/۳ متر و ۰/۶۱ را برآورد کردند. شایان ذکر است که این پژوهش در جنگل‌های آمیخته پهن‌برگ مدیترانه‌ای اسپانیا با تغییرات توپوگرافی چشمگیر و ارتفاع کمتر از ۲۰ متر درختان انجام گرفت. همچنین آنها نشان دادند که استفاده از تصویری با مقدار باز مکانی زیاد و ارتفاع ابهام کمتر و شیب‌های کمتر از ۱۰

بحث

تهیه نقشه ارتفاع تاج‌پوشش جنگل در سطح وسیع از جمله نیازهای مدیریت پایداری جنگل شمرده می‌شود. به دنبال مسئله عدم تطابق زمانی در زوج تصاویر تداخل‌سنجی فضا برد، داده‌های راداری TanDEM-X با حداقل ناهمبستگی زمانی پتانسیل بالقوه‌ای را در مطالعات ساختار عمودی جنگل معرفی می‌کند. اگرچه محدودیت دسترسی به داده‌های کاملاً پلاریزه TanDEM-X که در حال حاضر رایگان نیست و محدود به برداشتهای آزمایشی است، چالش جدی در به‌کارگیری این داده‌هاست. در این پژوهش دو رویکرد تداخل‌سنجی تفاضلی با استفاده از مدل رقومی زمین حاصل از داده‌های لیدار هوآبرد و همچنین مدل Sinc که از ساده‌سازی مدل RVoG به دست آمده بود، در برآورد ارتفاع تاج‌پوشش بخشی از جنگل‌های هیرکانی استفاده شد. نتایج این تحقیق نشان داد که رویکرد تداخل‌سنجی تفاضلی با $rRMSE$ و R^2 به ترتیب ۱۲/۲۸ درصد و ۰/۳۳ از دقت بیشتری در برآورد ارتفاع تاج‌پوشش جنگل نسبت به استفاده از مدل Sinc برخوردار است. در حالی که استفاده از مدل Sinc سبب افزایش $rRMSE$ ارتفاع تاج‌پوشش برآوردی به میزان

دارد (Schlund et al., 2019; Olesk et al., 2015). پراکنش از سطح زمین نیز عاملی تأثیرگذار شناخته می‌شود، به‌ویژه متوسط شیب در منطقه پژوهش حائز اهمیت و نیازمند بررسی‌های بیشتر است. برای مثال Gómez et al. (2021) نشان دادند که شیب عاملی تأثیرگذار بر صحت برآورد ارتفاع تاج‌پوشش جنگل است، به طوری که بهترین نتایج برای شیب‌های کمتر از ۱۰ درصد حاصل شد. در پژوهش‌های دیگر در جنگل‌های کوهستانی شیب را عامل خطای برآورد و کاهش ضریب تبیین می‌دانند (Olesk et al., 2015; Gómez et al., 2021). منطقه پژوهش در تحقیق حاضر با متوسط شیب حداقل ۱۵ و حداکثر ۴۵ درصد از این قاعده مستثنا نیست. پیچیدگی و تنوع در ساختار عمودی توده‌های جنگلی از دیگر عوامل مؤثر بر صحت برآورد ارتفاع تاج‌پوشش جنگل است. به طوری که هرچه توده ناهمگن‌تر باشد، میرایی سیگنال بیشتر می‌شود و بازپراکنش ضعیف‌تری صورت می‌گیرد. به عبارت دیگر بازپراکنش حجمی در درون تاج‌پوشش به ناهمگنی عمودی توده جنگلی بستگی دارد (Erasmi et al., 2019). منطقه تحت بررسی در این پژوهش نیز در توده‌های ناهمسال و آمیخته قرار دارد. از این‌رو آمیختگی و ناهمگنی می‌تواند از دلایل اثرگذار بر صحت نتایج حاصل از تداخل‌سنجی تفاضلی و مدل Sinc در این پژوهش باشد. با وجود این، نتایج استفاده از مدل مبتنی بر همدوسی Sinc در برآورد ارتفاع تاج‌پوشش جنگل در تضاد با تحقیقات قبلی بود که در همین منطقه صورت گرفته بود. برای مثال Zahriban et al. (2020) نشان دادند که متغیر همدوسی تأثیر معنی‌داری در برآورد مشخصه‌های ساختاری جنگل به‌ویژه ارتفاع تاج‌پوشش ندارد. در حالی که Erasmi et al. (2019) حساسیت همدوسی تداخل‌سنجی به ساختار جنگل را با $RMSE=15\%$ نشان دادند. در این پژوهش از داده‌های ماهواره راداری TanDEM-X در جنگل‌های معتدله آلمان استفاده شد و معنی‌داری همدوسی تداخل‌سنجی نسبت به مشخصه‌های ضرایب

درصد سبب بهبود نتایج می‌شود. اثر باز مکانی و همچنین فصل اخذ تصویر بر ارتفاع تاج‌پوشش برآوردی مبتنی بر همدوسی رادار در تحقیقات مختلف نشان داده شده است (Solberg et al., 2014; Kugler et al., 2017; Khati et al., 2014; Olesk et al., 2015). نفوذ سیگنال و خصوصیات پخشی که توسط سنجنده مشاهده می‌شود تحت شرایط بی‌برگی و دارای برگ متفاوت است. تصویر استفاده‌شده در این تحقیق در شرایط بی‌برگی اخذ شده است. با کم بودن تراکم برگ در تاج‌پوشش، روزه افزایش می‌یابد و تنوع پلاریتریک بیشتر می‌شود. در نتیجه صحت برآورد ارتفاع تاج‌پوشش تحت تأثیر قرار می‌گیرد که به کم‌برآوردی به روش تداخل‌سنجی تفاضلی منجر می‌شود. با وجود این، صحت برآورد ارتفاع تاج‌پوشش تحقیق حاضر در شرایط بی‌برگی در محدوده صحت گزارش‌شده توسط Zahriban et al. (2020) ($rRMSE=11\%$) و $RMSE=2/8$ (متر) در شرایط دارای برگ بود. احتمالاً تغییرات فصلی اثرگذاری کمی بر برآوردها در این دو تحقیق داشته است. از سوی دیگر تعداد کم قطعات نمونه (۱۱۲ قطعه نمونه) در مقایسه با تحقیق حاضر ممکن است بر دامنه اطمینان نتایج اثر بگذارد. شایان ذکر است که در تحقیق حاضر فاز زمین حاصل از DTM لیدار هوابرد به فاز رفع ابهام‌شده حاصل از اندازه‌گیری‌های SAR در مناطق باز برآزش یافته بود که احتمالاً می‌توانست بخشی از عدم قطعیت‌ها را کاهش دهد و به دقتی مشابه تحقیق Zahriban et al. (2020) منجر شود. از جنبه استفاده از مدل مبتنی بر همدوسی Sinc به منظور برآورد ارتفاع تاج‌پوشش جنگل، Olesk et al. (2015) نشان دادند که اخذ تصویر در شرایط بی‌برگی بهتر از فصل تابستان است، جایی که میزان همدوسی به دلیل تعامل سیگنال با تاج‌پوشش جنگل کاهش می‌یابد. در حالی که نفوذ بیشتر باند X به تاج‌پوشش جنگل در شرایط بی‌برگی، سبب بازپراکنش چشمگیری از پخش حجمی می‌شود. شایان ذکر است که میزان نفوذ به ساختار توده و خصوصیات آن بستگی

برگردانی ارتفاع تاج‌پوشش و همچنین عمومیت نداشتن دسترسی به تصاویر کاملاً پلاریزه، تهیه نقشه ارتفاع تاج‌پوشش در مقیاس گسترده را با چالش روبه‌رو می‌سازد. در این تحقیق قابلیت ماهواره TanDEM-X با ناهمبستگی زمانی نزدیک به صفر به‌منظور برآورد ارتفاع تاج‌پوشش جنگل‌های هیرکانی ارزیابی شد. به این منظور دو رویکرد تداخل‌سنجی تفاضلی با به‌کارگیری DTM دقیق حاصل از داده‌های لیدار هوابرد و مدل ساده‌شده Sinc حاصل از RVoG مقایسه شدند. به‌طور کلی رویکرد تداخل‌سنجی تفاضلی ارتفاع تاج‌پوشش را با دقت بیشتری برآورد کرد. همچنین پتانسیل نسبی مدل Sinc نشان داده شد؛ اگرچه برآوردها از ضریب تبیین کمی برخوردار بودند. از این‌رو مطالعات بیشتر به‌منظور بررسی اثر گونه و شیب در صحت برآوردهای ارتفاع تاج‌پوشش جنگل و کسب نتایج بهتر ضروری به نظر می‌رسد.

بازپخش راداری در برآورد ساختار عمودی جنگل تأیید شد. شایان ذکر است که دامنه دقت برآورد ارتفاع تاج‌پوشش جنگل با استفاده از مدل‌های خطی و Sinc در محدوده ۵-۱۴ متر گزارش شده است و نتایج این تحقیق نیز همسو با آنهاست؛ اگرچه ضریب تبیین کم، لزوم تحقیقات بیشتر را نمایان می‌سازد (Schlund et al., 2019).

نتیجه‌گیری

ارتفاع تاج‌پوشش جنگل متغیری مهم در پایش، حفظ و ارزیابی ساختار جنگل متنوع است و در بهبود عدم قطعیت‌های حاصل از تغییرپذیری مکانی و زمانی چرخه جهانی کربن تأثیر مهمی دارد. پژوهش‌های مختلف پتانسیل روش‌های تداخل‌سنجی پلاریمتریک و تداخل‌سنجی تفاضلی را در برآورد ارتفاع تاج‌پوشش جنگل نشان داده‌اند. با وجود این عواملی مانند پیچیدگی محاسباتی مدل‌های پخش به‌منظور

References

- Abdullahi, S., Kugler, F., & Pretzsch, H. (2016). Prediction of stem volume in complex temperate forest stands using TanDEM-X SAR data. *Remote Sensing of Environment*, 174, 197–211. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.12.012>
- Askne, J.I., & Santoro, M. (2014). On the estimation of boreal forest biomass from TanDEM-X data without training samples. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 12(4), 771–775. DOI: 10.1109/LGRS.2014.2361393
- Caicoya, A.T., Kugler, F., Hajnsek, I., & Papathanassiou, K. (2012). Boreal forest biomass classification with TanDEM-X. In *2012 IEEE international geoscience and remote sensing symposium*, IEEE, 3439–3442. DOI: 10.1109/IGARSS.2012.6350681
- 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. <https://doi.org/10.3390/rs13020174>
- Cloude, S.R., Chen, H., & Goodenough, D. G. (2013). Forest height estimation and validation using Tandem-X polinsar. In *2013 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium-IGARSS*, IEEE, 1889–1892. DOI: 10.1109/IGARSS.2013.6723172
- Cloude, S.R. (2010). *Polarization: Applications in Remote Sensing*, Oxford University Press: New York, NY, USA.
- Darvishsefat, A.A., Arjhang Choobar, R., Bonyad, A.E., & Ronoud, G. (2016). Mapping the poplar plantations using Landsat-8 data (Case Study: Talesh and Sumehsara region, Guilan province). *Iranian Journal of Forest*, 8(3), 301–312. (In Persian).
- David, R.M., Rosser, N.J., & Donoghue, D.N. (2022). Improving above ground biomass estimates of Southern Africa dryland forests by combining Sentinel-1 SAR and Sentinel-2 multispectral imagery. *Remote Sensing of Environment*, 282, 113232. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2022.113232>

- 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. <https://doi.org/10.3390/rs11242966>
- Gómez, C., Lopez-Sanchez, J.M., Romero-Puig, N., Zhu, J., Fu, H., He, W., Xie, Y., & Xie, Q. (2021). Canopy Height Estimation in Mediterranean Forests of Spain with TanDEM-X Data. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 14, 2956-2970. DOI: 10.1109/JSTARS.2021.3060691
- Hajnsek, I., Kugler, F., Lee, S.K., & Papathanassiou, K. P. (2009). Tropical-forest-parameter estimation by means of Pol-InSAR: The INDREX-II campaign. *IEEE transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 47(2), 481-493. DOI: 10.1109/TGRS.2008.2009437
- Kargar, M.R., & Sohrabi, H. (2019). Using canopy height model derived from UAV images to tree height estimation in Sisangan forest. *Journal of RS and GIS for Natural Resources*, 10(3), 106-119 (In Persian).
- Khati, U., Singh, G., & Ferro-Famil, L. (2017). Analysis of seasonal effects on forest parameter estimation of Indian deciduous forest using TerraSAR-X PolInSAR acquisitions. *Remote Sensing of Environment*, 199, 265-276. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.07.019>
- Kugler, F., Schulze, D., Hajnsek, I., Pretzsch, H., & Papathanassiou, K.P. (2014). TanDEM-X Pol-InSAR performance for forest height estimation. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 52(10), 6404-6422. DOI: 10.1109/TGRS.2013.2296533
- Lee, S.K., & Fatoyinbo, T.E. (2015). TanDEM-X Pol-InSAR inversion for mangrove canopy height estimation. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 8(7), 3608-3618. DOI: 10.1109/JSTARS.2015.2431646
- 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. <https://doi.org/10.1080/17538947.2014.990526>
- Loh, H.Y., James, D., Ioki, K., Wong, W.V.C., Tsuyuki, S., & Phua, M.H. (2022). Estimating aboveground biomass changes in a human-modified tropical montane forest of Borneo using multi-temporal airborne LiDAR data. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 28, 100821. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2022.100821>
- Maghsoudi, Y., & Mahdavi, S. (2015). The principle of Radar Remote Sensing. K.N.Toosi University of Technology Press, Tehran, 290p (In Persian).
- Miri, N., Darvishsefat, A.A., Zargham, N., & Shakeri, Z. (2017). Estimation of leaf area index in Zagros forests using Landsat 8 data. *Iranian Journal of Forest*, 9(1), 29-42. (In Persian)
- Mohammadi, J. (2012). *Improving in Estimation of Some Forest Structure Quantitative Characteristics by Combining the Lidar and Digital Aerial Images in Shast Kalate Hardwood Forests of Gorgan*. A thesis of PhD student. Gorgan University of agriculture Science and natural resources, 287p (In Persian).
- Nabuurs, G.J., Masera, O., Andrasko, K., Benitez-Ponce, P., Boer, R., Dutschke, M., Elsiddig, E., Ford-Robertson, J., Frumhoff, P., Karjalainen, T., & Krankina, O. (2007). IPCC forestry. *Climate change*, 541-584.
- Namiranian, M. (2006), "Measurement of the tree and forest biometry", University of Tehran Press: Tehran, 594p. (In Persian)
- Olesk, A., Praks, J., Antropov, O., Zalite, K., Arumäe, T., & Voormansik, K. (2016). Interferometric SAR coherence models for characterization of hemiboreal forests using TanDEM-X data. *Remote Sensing*, 8(9), 700. <https://doi.org/10.3390/rs8090700>
- Olesk, A., Voormansik, K., Vain, A., Noorma, M., & Praks, J. (2015). Seasonal differences in forest height estimation from interferometric TanDEM-X coherence data, *IEEE. Journal of Selected Topics*

- in *Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 8(12), 5565-5572. DOI: 10.1109/JSTARS.2015.2501648
- Papathanassiou, K.P., & Cloude, S.R. (2001). Single-baseline polarimetric SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39(11), 2352-2363. DOI: 10.1109/36.964971
- 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 (In Persian).
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111669>
- Praks, J., Antropov, O., & Hallikainen, M.T. (2012). LIDAR-aided SAR interferometry studies in boreal forest: Scattering phase center and extinction coefficient at X-and L-band. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, 50(10), 3831-3843. DOI: 10.1109/TGRS.2012.2185803
- 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), 818-834. <https://doi.org/10.1080/07038992.2021.1968811>
- Ronoud, G., Darvishsefat, A.A., Schaepman, M.E., Namiranian, M., & Maghsoudi, Y. (2022). Woody Aboveground Biomass Estimation using Radar Data in the mixed Hyrcanian Forest (Case Study: Khayroud Forest of Nowshahr, Mazandaran). *Iranian Journal of Forest*, 14(3), 257-274. DOI: 10.22034/IJF.2022.310971.1808. (In persian)
- Schlund, M., Erasmi, S., & Scipal, K. (2019). Comparison of Aboveground Biomass Estimation From InSAR and LiDAR Canopy Height Models in Tropical Forests. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 17(3), 367-371. DOI: 10.1109/LGRS.2019.2925901
- Schlund, M., von Poncet, F., Hoekman, D.H., Kuntz, S., & Schullius, C. (2014). Importance of bistatic SAR features from TanDEM-X for forest mapping and monitoring. *Remote Sensing of Environment*, 151, 16-26. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.08.024>
- Schlund, M., von Poncet, F., Kuntz, S., Schullius, C., & Hoekman, D.H. (2015). TanDEM-X data for aboveground biomass retrieval in a tropical peat swamp forest. *Remote Sensing of Environment*, 158, 255-266. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.11.016>
- Sharifi Hashjin, Sh., & Khazaei, S. (2013). Impact of the Environmental Parameters on Tree Height Estimation Using Polarimetric Interferometry Synthetic Aperture Radar Techniques. *Passive Defence Science and Technology*, 4(2), 137-144.
- Small, D., & Schubert, A. (2008). *Guide to ASAR Geocoding*. ESA-ESRIN Technical Note RSL-ASAR-GC-AD. (Report No. 1). Switzerland: University of Zurich.
- Silveira, E.M., Radeloff, V.C., Martinuzzi, S., Pastur, G.J.M., Bono, J., Politi, N., ... & Pidgeon, A. M. (2023). Nationwide native forest structure maps for Argentina based on forest inventory data, SAR Sentinel-1 and vegetation metrics from Sentinel-2 imagery. *Remote Sensing of Environment*, 285, 113391. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2022.113391>
- 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. DOI: 10.1007/s13762-015-0750-0
- Solberg, S., Astrup, R., Breidenbach, J., Nilsen, B., & Weydahl, D. (2013). Monitoring spruce volume and biomass with InSAR data from TanDEM-X. *Remote sensing of Environment*, 139, 60-67. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.07.036>

- Solberg, S., Astrup, R., Gobakken, T., Næsset, E., & Weydahl, D. J. (2010). Estimating spruce and pine biomass with interferometric X-band SAR. *Remote Sensing of Environment*, 114(10), 2353–2360. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.05.011>
- Solberg, S., May, J., Bogren, W., Breidenbach, J., Torp, T., & Gizachew, B. (2018). Interferometric SAR DEMs for forest change in Uganda 2000–2012. *Remote Sensing*, 10(2), 228. <https://doi.org/10.3390/rs10020228>
- Solberg, S., Næsset, E., Gobakken, T., & Bollandsås, O.M. (2014). Forest biomass change estimated from height change in interferometric SAR height models. *Carbon Balance and Management*, 9(1), 1–12. DOI:10.1186/s13021-014-0005-2
- Tian, X., Su, Z., Chen, E., Li, Z., van der Tol, C., Guo, J., & He, Q. (2012). Estimation of forest aboveground biomass using multi-parameter remote sensing data over a cold and arid area. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 17, 102-110. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2012.03.007>
- Tsui, O.W., Coops, N.C., Wulder, M.A., Marshall, P.L., & Mc Cardle, A. (2012). Using multi-frequency radar and discrete-return LiDAR measurements to estimate aboveground biomass and biomass components in a coastal temperate forest. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 69, 121–133. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2012.02.009>
- Zahriban, M. (2020). Forest height Estimations Using TanDEM-X Data in Hyrcanian Forests. A thesis of PhD student. Gorgan University of agriculture Science and natural resources (In Persian).



Research Article

Feasibility of single-polarized TanDEM-X data for Hyrcanian forest height estimation (Case study: Shast-Kalateh forest)

M. Poorazimy^{1*}, Sh. Shataee Jouibary², J. Mohammadi³, and H. Aghababaei⁴

¹ MSc., Dept. of Forestry, Gorgan University of Agricultural Science and Natural Resources, I. R. Iran

² Prof., Dept. of Forestry, Gorgan University of Agricultural Science and Natural Resources, I. R. Iran

³ Assistant Prof., Dept. of Forestry, Gorgan University of Agricultural Science and Natural Resources, I. R. Iran

⁴ Assistant Prof., Dept. of Earth Observation Science, University of Twente, N. L. Netherland

(Received: 5 November 2022; Accepted: 17 January 2023)

Abstract

In this study, the capability of single-polarized TanDEM-X data was assessed for estimating the Hyrcanian forest height. Two approaches of Sinc interferometric coherence model based on Random Volume over Ground (RVoG) and differential interferometry utilizing airborne LiDAR-derived DTM were compared. The study was conducted in part of Dr. Bahram Nia's forest management plan (Shast-Kalateh). 308 circular sample plots with an area of 0.1 ha were used in evaluating the accuracy of predicted forest height using two different approaches. For this reason, Lorey's mean tree height weighted by basal area was calculated. The interferometric coherency was involved in the Sinc function for inverting forest height. We also removed topography from the SAR phase calibrated with LiDAR-derived DTM on open areas for estimating forest height based on differential interferometry. After terrain correction, the average predicted canopy height was extracted for each plot. Our results showed higher accuracy of differential interferometry than the Sinc model in forest height estimation when compared with ground reference data (RMSE=2.86 m and rRMSE=12.28%). Although, the accuracy of estimated forest height by the Sinc model was comparable with RMSE=3.41 m and rRMSE=14.46%. We found TanDEM-X data and coherence-based models a relatively promising approach in the Hyrcanian forest even though only 15% of Lorey's mean height change was explained by the Sinc model. Hence, further studies are needed to figure out the effects of species, slope, and image acquisition features on the results.

Keywords: Lorey's height, Interferometry, RVoG model, Sinc model. Coherency.