



Investigation the Effect of the Forest Height and Forest Density on the Accuracy of Forest Height Estimation Methods Using PolInSAR Data

Tayebe Managhebi ^{*,1}, Akram JafarAghae ²

1, *. Iranian Space Research Center, tb.managhebi@gmail.com, Corresponding author
2.K.N. Toosi University of Technologi, saharazdikast@gmail.com

Available in:
Journal.isrc.ac.ir

Journal of
Space Science, Technology
& Applications (Persian)

Vol. 2, No. 1, pp.: 132-146
2022

DOI:
10.22034/JSSTA.2022.298650.1030

Article Info

Received: 2021-8-7
Accepted: 2022-4-3

Keywords

Forest density, Forest height,
Inversion method, PolInSAR
technique

How to Cite this article

Tayebe Managhebi, Akram JafarAghae, "Investigation the Effect of the Forest Height and Forest Density on the Accuracy of Forest Height Estimation Methods Using PolInSAR Data", *Journal of Space Science, Technology and Applications*, vol 2 (1), p.: 132-146, 2022.

Abstract

Forest biomass is one of the most important parameters in the ecosystem changes assessment and global carbon cycle modelling. In the other hand, the forest height is an effective parameter in the allometric equations which are used for biomass estimation. In this research, the effect of two physical factors forest height and forest density, will be evaluated in the applicability of the four common inversion algorithms for forest height estimation based on the polarimetric Interferometry SAR (PolInSAR) technique. The applicability of the digital elevation model (DEM) differencing, volume coherence amplitude, hybrid and three-stage methods are studied for different forest height and forest density by using simulated polarimetric interferometric SAR data in L-band. The experimental results of the forest height estimation in simulated data with a density of 100 to 900 trees per hectare and a height of 10 to 18 meters show that the results of the hybrid method show high sensitivity to changes in both height and density. The root mean square of error was 5.8, 5.6, 3.2 and 4 m for data with variable height and 11.6, 6.7, 5.8 and 5.3 m for data with different densities, respectively.

بررسی اثر ارتفاع و تراکم جنگل بر دقت روش‌های برآورد ارتفاع جنگل با استفاده از داده‌های PolInSAR

طیبه مناقبی^{۱*}، اکرم جعفرآقایی^۲

۱. * پژوهشگاه فضایی ایران، tb.managhebi@gmail.com (نویسنده مسئول)
۲. دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، sahanazdikast@gmail.com



دسترس پذیر در نشانی:
Journal.isrc.ac.ir

دو فصلنامه
علوم، فناوری و
کاربردهای فضایی

سال دوم، شماره ۱، صفحه ۱۴۶-۱۳۲
بهار و تابستان ۱۴۰۱

DOI:
10.22034/JSSTA.2022.298650.1030

تاریخچه داوری

دریافت: ۱۴۰۰/۰۵/۱۶

پذیرش: ۱۴۰۱/۰۱/۱۴

واژه‌های کلیدی

برآورد ارتفاع جنگل، الگوریتم
وارونگی، تراکم جنگل، تکنیک
تداخل‌سنجی پلاریمتریک

نحوه استناد به این مقاله

طیبه مناقبی، اکرم جعفرآقایی، "بررسی اثر ارتفاع و تراکم جنگل بر دقت روش‌های برآورد ارتفاع جنگل با استفاده از داده‌های PolInSAR"، دو فصلنامه علوم، فناوری و کاربردهای فضایی، جلد دوم، شماره اول، صفحات ۱۳۲-۱۴۶، ۱۴۰۱.

چکیده

زیست توده جنگل، یکی از پارامترهای مهم در بررسی تغییرات اکوسیستم و مدل‌سازی عمومی چرخه کربن است. از سوی دیگر، ارتفاع جنگل پارامتری مهم در معادلات آلومتریک به منظور برآورد زیست توده است. در این مقاله، اثر دو پارامتر فیزیکی ارتفاع و تراکم درختان در دقت برآورد ارتفاع با استفاده از چهار روش مرسوم برآورد ارتفاع جنگل با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی پلاریمتریک راداری که عبارتند از الگوریتم وارونگی تفاضل مدل رقومی ارتفاعی، الگوریتم وارونگی ارتفاع بر اساس دامنه همدوسی حجمی، الگوریتم ترکیبی و بالاخره الگوریتم سه مرحله‌ای، مورد بررسی قرار می‌گیرد. داده مورد استفاده برای ارزیابی عملکرد روش‌های چهارگانه یاد شده در برآورد ارتفاع جنگل، داده‌های شبیه‌سازی باند L برای پانزده مجموعه زوج تصویر پلاریمتریک راداری با تراکم‌ها و ارتفاعات مختلف است. نتایج تجربی حاصل از برآورد ارتفاع در داده‌های شبیه‌سازی با تراکم ۱۰۰ تا ۹۰۰ اصله درخت در هکتار و ارتفاع ۱۰ تا ۱۸ متر نشان می‌دهد که نتایج حاصل از روش ترکیبی نسبت به تغییرات ارتفاع و چگالی حساسیت بالایی نشان می‌دهد. جذر میانگین مجموع مربعات خطاها برای داده‌های با ارتفاع متغیر به ترتیب برای روش‌های وارونگی تفاضل مدل رقومی ارتفاعی، الگوریتم وارونگی ارتفاع بر اساس دامنه همدوسی حجمی، الگوریتم ترکیبی و الگوریتم سه مرحله‌ای مقادیر ۵/۸، ۵/۶، ۳/۲ و ۴ متر و برای داده‌های با تراکم مختلف به ترتیب مقادیر ۱/۶، ۶/۷، ۵/۸ و ۵/۳ متر به دست آمد.

را سهولت می‌بخشد [۴]. تکنیک تداخل‌سنجی پلاریمتریک برخلاف روش‌های تداخل‌سنجی که تنها یک گزینه برای تولید تداخل‌نما^۷ دارند، می‌تواند بسته به نیاز، پایه پلاریزاسیون^۸‌های خاصی را برای تولید تداخل‌نما استفاده کند و به این ترتیب با غلبه بر محدودیت‌های هر دو تکنیک پلاریمتری و تداخل‌سنجی، کاربردهای گسترده‌ای در زمینه اندازه‌گیری ویژگی‌های پوشش گیاهی در امتداد قائم نظیر ارتفاع درختان در جنگل [۵] و برآورد زیست توده [۶] پیدا کند. در دو دهه اخیر، روش‌های مختلفی با استفاده از این تکنیک، برای برآورد ارتفاع درختان پیشنهاد شده است.

برآورد ارتفاع بر مبنای اختلاف فاز تداخل‌نماهای حاصل از پایه پلاریزاسیون‌های متناظر با سطح زمین و تاج پوشش گیاهی، اساس روش تفاضلی مدل رقومی ارتفاعی^۹ است که به دلیل محاسبات ساده و تعبیر فیزیکی قابل قبول استراتژی مورد استفاده، مورد توجه قرار گرفته است [۷]. در سال ۲۰۰۱، هم‌زمان با معرفی مدل دو لایه‌ای پراکنش حجمی تصادفی بر روی سطح زمین^{۱۰} (RVoG)، روش برآورد دیگری توسط پاپاتاناسیو^{۱۱} و همکاران معرفی شد که با استفاده از حل دستگاه معادلات غیرخطی به روش تکرار، ارتفاع درختان را برآورد می‌کند [۲]. هرچند حل هم‌زمان مجهولات در یک دستگاه معادلات مزیت چشم‌گیری دارد اما قادر به پوشاندن ضعف آن در مواجهه با محاسبات پیچیده حل دستگاه معادلات غیرخطی و لزوم انتخاب صحیح و دقیق مقادیر اولیه معادلات برای همگرا شدن پاسخ معادلات، نیست. قابلیت اجرای ساده و صرفه‌جویی در زمان؛ روش هندسی سه‌مرحله‌ای^{۱۲} برای برآورد پارامترهای مدل RVoG را با اقبال محققین در سال ۲۰۰۳ روبه‌رو ساخت [۳]. به‌گونه‌ای که این روش مبنای کار بسیاری از روش‌ها در سال‌های متمادی بوده است [۸، ۹]. برازش خط به مقادیر مختلط همدوسی^{۱۳} در دایره مختلط واحد^{۱۴} (CUC) به روش کمترین مربعات^{۱۵}، تعیین مقدار فاز متناظر با زمین و بالاخره تعیین

اکوسیستم جنگل به واسطه اهمیتی که در چرخه کربن، اقلیم منطقه، مسائل زیست محیطی از جمله فرسایش خاک، بروز سیلاب، آلودگی هوا، رانش زمین و ... دارد، یکی از موضوعات مهم در مدیریت پایدار زمین به‌شمار می‌رود و از این‌رو، با اقبال جامعه محققین روبه‌رو شده است. در این میان، زیست توده^۱ جنگل و ارتفاع آن، از جمله مهم‌ترین پارامترهای جنگل هستند که پیش آن بهره‌گیری از تکنیک‌های نوین مطالعه جنگل را می‌طلبد [۱]. بدیهی است که اندازه‌گیری‌های زمینی، علاوه بر صرف هزینه بالا و اتلاف زمان، مستلزم دسترسی به اعماق جنگل در نواحی مختلف آب و هوایی است که امکان مطالعه جامع را سلب می‌کند.

سنجش از دور به دلیل امکان مطالعه پدیده‌ها در وسعت زمان و مکان و بدون نیاز به حضور مستقیم در منطقه مطالعاتی، گزینه مناسبی در مطالعه پدیده‌های گسترده و پویا نظیر جنگل است. در میان داده‌های مختلف سنجش از دوری، داده رادار با روزنه مجازی^۲ (SAR) به دلیل تأثیر پذیری بازپراکنش^۳ ثبت شده از هندسه هدف، مستقل بودن از شرایط آب و هوایی و امکان نفوذ سیگنال ارسالی در پوشش گیاهی، گزینه مناسبی در مطالعه پارامترهای فیزیکی پوشش‌های گیاهی از جمله جنگل است.

از میان تکنیک‌های مختلف SAR، تکنیک تداخل‌سنجی پلاریمتریک راداری^۴ (PolInSAR)، دارای کاربرد وسیعی در اندازه‌گیری‌های مربوط به ویژگی‌های پوشش گیاهی مانند ارتفاع و زیست توده است [۲، ۳]. این تکنیک با غلبه بر محدودیت‌های هر دو تکنیک پلاریمتری^۵ (PolSAR) و تداخل‌سنجی^۶ (InSAR)، تلفیق مزایای هر دو تکنیک و با بهره‌گیری از امواج الکترومغناطیس با طول موج بلند و در نتیجه امکان نفوذ بالا در توده جنگل، دستیابی به اطلاعاتی از ساختار قائم درختان جنگل

9 DEM Differencing

10 Random Volume over Ground

11 Papathanassiou

12 ThreeStage

13 Complex Coherence

14 Complex Unit Circle

15 Least Square Method

1 Biomass

2 Synthetic Aperture Radar

3 Back Scattering

4 PolInSAR

5 Polarimetric SAR

6 Interferometry

7 Interferogram

8 Polarization Basis

برآورد ارتفاع جنگل در مناطق با ویژگی‌های مختلف است. بررسی اثر ارتفاع درختان در نتایج روش سه مرحله‌ای پیش از این، بر روی داده‌های شبیه‌سازی و داده‌های BioSAR2007 انجام شده است [۱۰]. هدف این مقاله، بررسی اثر دو پارامتر فیزیکی تراکم پوشش گیاهی جنگل و ارتفاع درختان بر روی نتایج حاصل از چهار روش تفاضلی مدل رقومی ارتفاعی، اندازه دامنه همدوسی، ترکیبی و سه مرحله‌ای است.

۲- مواد و روش‌ها

همچنان که در بخش مقدمه عنوان شد، این مقاله به بررسی اثر پارامترهای تراکم و ارتفاع جنگل در دقت نهایی چهار روش مرسوم از تکنیک تداخل‌سنجی پلاریمتریک راداری می‌پردازد. در ادامه، به بیان کلیت روش‌های مورد نظر پرداخته می‌شود.

۲-۱- الگوریتم وارونگی بر اساس تفاضل مدل رقومی ارتفاعی

روش وارونگی ارتفاع به لحاظ تئوری مبتنی بر اصل تداخل‌سنجی راداری در تولید مدل رقومی ارتفاعی بر اساس فاز تداخل نما است. این روش بر تفاضل مدل رقومی سطحی^۴ (DSM) و مدل رقومی ارتفاعی اولین بار در سال ۱۹۹۸ مطرح شد [۷]. در این روش، مدل رقومی سطحی تاج پوشش جنگل با استفاده از فاز تداخل نمای متناظر با پایه پلاریزاسیونی با مرکز فاز نزدیک به تاج پوشش گیاهی به دست می‌آید و مدل رقومی زمین نیز به همین شکل بر اساس تداخل‌نمای حاصل از پایه پلاریزاسیون سطحی به دست می‌آید. بنابراین، در این روش دو پایه پلاریزاسیون به ترتیب با مرکز فاز نزدیک به سطح زمین، که اصطلاحاً پایه صرفاً سطحی^۵ نامیده می‌شود، و پایه پلاریزاسیون با مرکز فاز نزدیک به تاج پوشش، که اصطلاحاً پایه صرفاً حجمی^۶ نامیده می‌شود، استفاده می‌شود. تفاضل دو تداخل نمای حاصل از پایه‌های نامبرده، امکان برآورد مستقیم ارتفاع درخت به صورت زیر میسر می‌کند [۷]:

هم‌زمان مقادیر میرایی و ارتفاع درختان، مراحل سه‌گانه این روش هستند. از معایب این روش، می‌توان به قابل اعتماد نبودن فاز زمین برآورد شده این روش در همه مناطق جنگلی و نیز فرض غالب بودن پراکنش حجمی در کانال HV در مرحله سوم اشاره نمود. در سال ۲۰۱۹، مناقبی و همکاران برای بهبود نتایج روش سه مرحله‌ای پیشنهاد بهینه‌سازی پایه پلاریزاسیون حجمی را عنوان کردند که منجر به بهبود سی درصدی دقت برآورد ارتفاع درختان جنگل شد [۸]. روش وارونگی ارتفاع مبتنی بر اندازه همدوسی^۱، با فرض کمینه بودن مقدار میرایی در امتداد قائم، ارتفاع جنگل را به صورت تابعی از مقدار دامنه همدوسی در پایه پلاریزاسیون صرفاً حجمی^۲ برآورد می‌کند [۴]. این روش که در سال ۲۰۰۵ عنوان شد، اگرچه تخمین بهتری از ارتفاع را نسبت به روش تفاضلی مدل رقومی ارتفاعی حاصل می‌کند اما فرض غیرواقعی میرایی صفر در امتداد نفوذ سیگنال، سبب کاهش محسوس دقت برآورد نتایج می‌شود. روش ترکیبی^۳، روش دیگر تخمین ارتفاع جنگل است که تلفیق هر دو روش مبتنی بر فاز و دامنه همدوسی را مدنظر قرار می‌دهد [۴]. به عبارت دیگر، در این روش از اطلاعات فاز و دامنه همدوسی به صورت توأم استفاده می‌شود. با این حال، همچنان انتخاب پایه‌هایی با مرکز فاز نزدیک به سطح زمین و تاج پوشش گیاهی چالش اصلی این روش است. علاوه بر آنچه عنوان شد، در روش ترکیبی وزن نتایج دو روش تفاضل مدل رقومی ارتفاعی و دامنه همدوسی به صورت تجربی تعیین می‌شود و یک تعبیر فیزیکی دقیق برای آن وجود ندارد.

بدیهی است که دقت نتایج حاصل از هر یک از روش‌های یاد شده، متأثر از ویژگی‌های امواج ارسالی و ویژگی‌های هدف است. به این ترتیب، انتخاب صحیح طول موج راداری مورد استفاده و پایه پلاریزاسیون بهینه از یک سو و تاثیر پارامترهای فیزیکی جنگل نظیر تراکم و ارتفاع درختان از سوی دیگر، چالش‌های مهمی در تکنیک تداخل‌سنجی پلاریمتریک محسوب می‌شوند که دقت نتایج را تحت‌الشعاع قرار می‌دهند. بنابراین، بررسی دقیق پارامترهای اثرگذار گام مهمی در معرفی روش‌های بهینه

4 Digital Surface Model
5 Surface Only
6 Volume Only

1 Coherence Amplitude
2 Volume Only Coherence
3 Hybrid Method

درخت هم جابه‌جا شود. از این‌رو، نتایج حاصل از این روش عمدتاً ارتفاع جنگل را کمتر از مقدار واقعی برآورد می‌کند.

$$h_v = \frac{\arg(\gamma_{w_v}) - \arg(\gamma_{w_s})}{k_z}$$

$$k_z = \frac{4\pi}{\lambda \sin \theta}$$

۲-۲- الگوریتم وارونگی ارتفاع براساس دامنه همدوسی حجمی

اساس این روش مبتنی بر انتخاب پایه پلاریزاسیونی است که نسبت بازپراکنش سطحی به حجمی در آن صفر باشد. در این روش، با فرض کمینه میرایی در امتداد نفوذ سیگنال و در نتیجه ثابت گرفتن تابع ساختار $f(z) = 1$ ، ارتباط بین ارتفاع درخت و اندازه دامنه همدوسی صرفاً حجمی به صورت رابطه (۳) خواهد بود [۱۱]:

$$h_v = \frac{2\text{sinc}^{-1}(|\tilde{\gamma}_{w_v}|)}{k_z} \quad (۳)$$

این روش اگر چه نسبت به روش تفاضلی مدل ارتفاعی رقومی، تخمین بهتری از ارتفاع ارائه می‌دهد، اما همچنان در خطای آن در برآورد ارتفاع درختان جنگل بالا است و ارتفاع بیشتر از مقدار واقعی تخمین زده می‌شود. هم‌چنین، این روش نسبت به تغییرات تراکم و نیز ساختار قائم پوشش گیاهی حساس است. به همین منظور در ادامه، روش سومی برای برآورد ارتفاع معرفی شد که به‌صورت ترکیبی از فاز و دامنه همدوسی استفاده می‌کند.

۲-۳- الگوریتم وارونگی ارتفاع ترکیبی

با ترکیب دو روش تفاضل مدل رقومی ارتفاعی و دامنه همدوسی حجمی، روش سومی توسعه یافت که به تغییرات در ساختار قائم پوشش گیاهی، پایداری و مقاوم‌تر است. در این روش در مرحله برآورد فاز زمین، برخلاف روش مدل رقومی ارتفاعی که در آن تنها به مرکز فاز پایه انتخابی صرفاً سطحی اتکا دارد

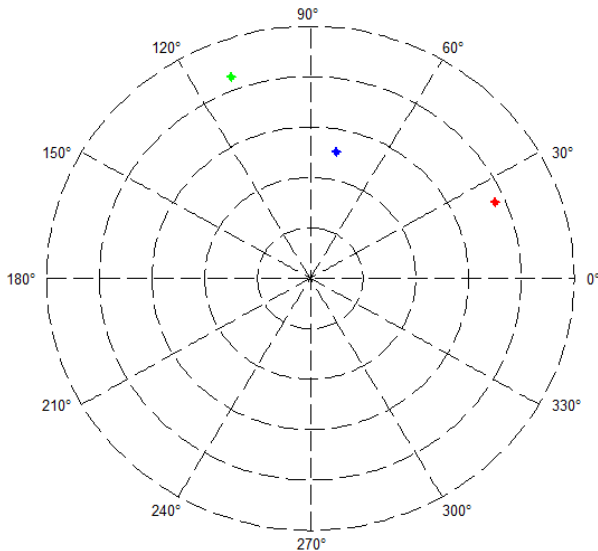
که در آن، h_v ارتفاع لایه حجمی، k_z عدد موج قائم^۱، \arg عملگر فاز عدد مختلط همدوسی، $\Delta\theta$ اختلاف زاویه فرود^۲ در دو سر خط مبنای مکانی^۳، θ زاویه فرود، λ طول موج، w_v پایه پلاریزاسیون صرفاً حجمی و بالاخره w_s پایه پلاریزاسیون صرفاً سطحی و بالاخره γ عدد مختلط همدوسی است که در هر پیکسل از زوج تصویر راداری به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\gamma = |\gamma|e^{i\varphi} = \frac{E(S_1S_2^*)}{E(S_1S_1^*)E(S_2S_2^*)} \quad (۲)$$

که در آن، $|\gamma|$ دامنه همدوسی، φ فاز همدوسی، * عملگر ترانهاده مختلط و S_1 و S_2 سیگنال مختلط متناظر با زوج تصویر راداری است.

نکته قابل تامل اینکه، دقت نتایج در این روش متأثر از طول موج ارسالی و میزان نفوذ کانال‌های w_v و w_s در پوشش گیاهی است. به عبارت دیگر، نتایج در صورتی از دقت مطلوب برخوردارند که مرکز فاز کانال حجمی در بالای تاج و مرکز فاز کانال سطحی نزدیک سطح زمین باشد. به این ترتیب، نسبت بازپراکنش سطحی به حجمی در کلنال‌های w_v و w_s به ترتیب صفر و بی‌نهایت است ولی در عمل، به واسطه وجود یک مولفه بازپراکنش حجمی نسبتاً قوی در تمام پایه‌های پلاریزاسیون در یک هدف حجمی مانند پوشش گیاهی، مرکز فاز w_s بالاتر از سطح زمین قرار دارد. هم‌چنین، فاز تداخل‌نمای حاصل از w_v ، به دلیل نفوذ این کانال در پوشش گیاهی می‌تواند تا نصف ارتفاع

همدوسی در پایه‌های پلاریزاسیون موجود در بردار پائولی^۱ را در دایره مختلط واحد نشان می‌دهد.



شکل ۱. نمایش مقادیر همدوسی پایه‌های پلاریزاسیون بردار پائولی در دایره مختلط واحد. مقادیر مختلط همدوسی در پایه‌های HH-VV، HV و HH+VV به ترتیب با رنگ‌های قرمز، آبی و سبز نشان داده شده است.

این پایه‌ها که هر یک دارای یک تعبیر فیزیکی هستند، نمایندگان مکانیسم‌های بازپراکنش دووجهی^۲، سطحی^۳ و حجمی^۴ در تصویر راداری هستند. به این ترتیب برای دستیابی به مقدار فاز زمین مسطح خطی بر مقادیر سه‌گانه همدوسی برازش داده می‌شود که مکان هندسی مقادیر همدوسی در تمامی پایه‌های پلاریزاسیون در نقطه مذکور است. در شکل ۲، خط همدوسی با رنگ آبی نمایش داده شده است.

فاز زمین مسطح با روشی هندسی برآورد می‌شود [۴]. مبنای این روش هندسی بر مدل RVoG است.

مدل فیزیکی RVoG، پوشش جنگل را به صورت یک لایه حجمی مشتعل بر اجزایی با توجیه تصادفی بر روی سطح زمین تعریف می‌کند [۱۲]. بر طبق مدل RVoG، زمین زیرین جنگل مسطح و غیرقابل نفوذ است و مقدار مختلط همدوسی در هر پایه پلاریزاسیون به صورت تابعی از فاز زمین، همدوسی صرفاً حجمی و نسبت بازپراکنش سطحی به حجمی در پایه مذکور تعریف می‌شود. رابطه ۳، ارتباط بین پارامترهای مذکور را نشان می‌دهد [۱۲، ۲].

$$\gamma(w) = e^{i\varphi_0} \frac{\gamma_v + \mu(w)}{1 + \mu(w)} \quad (4)$$

که در آن، $\gamma(w)$ همدوسی مختلط در پایه پلاریزاسیون دلخواه w ، φ_0 فاز زمین و $\mu(w)$ نسبت بازپراکنش سطحی به حجمی در پایه مذکور است. مقدار $\mu(w)$ ، عددی حقیقی بین صفر تا بی‌نهایت است که در محدوده پایه‌های پلاریزاسیون صرفاً حجمی تا صرفاً سطحی متغیر است. رابطه ۴ نشان می‌دهد که در هر پیکسل از جنگل، مقادیر مختلط همدوسی در پایه‌های پلاریزاسیون مختلف در CUC، بر روی یک خط مستقیم قرار دارند. برای درک بهتر این مفهوم رابطه ۴، به صورت زیر بازنویسی می‌شود:

$$\gamma(w) = e^{i\varphi_0} (\gamma_v + L(w)(1 - \gamma_v)) \quad (5)$$

$$L(w) = \frac{\mu(w)}{1 + \mu(w)}$$

بر این اساس، مقایر همدوسی را می‌توان در CUC که محور افقی آن محور جزء حقیقی و محور عمودی آن، بخش موهومی همدوسی هست، نشان داد. دلیل واحد بودن شعاع این دایره، بیشینه مقدار دامنه همدوسی است که یک است. شکل ۲، مقادیر

3 Surface Scattering
4 Volume Scattering

1 Pauli
2 Double bounce Scattering

شکل ۳، برآورد فاز زمین مسطح را به صورت هندسی نشان می‌دهد. بر اساس روابط ریاضی، فاز زمین مسطح به صورت زیر قابل محاسبه است [۴]:

(۶)

$$\hat{\phi} = \arg(\tilde{\gamma}_{w_v} - \tilde{\gamma}_{w_s}(1 - L_{w_s}))$$

$$AL_{w_s}^2 + BL_{w_s} + C = 0 \Rightarrow L_{w_s} = \frac{-B - \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A}$$

$$A = |\gamma_{w_s}|^2 - 1$$

$$B = 2\text{Re}((\tilde{\gamma}_{w_v} - \tilde{\gamma}_{w_s})\gamma_{w_s}^*)$$

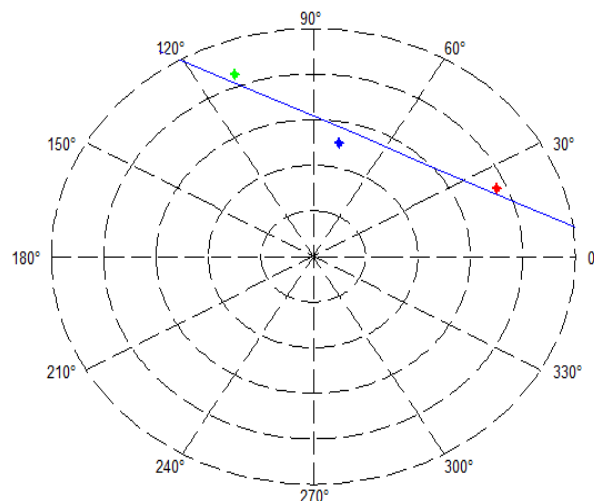
$$C = |\tilde{\gamma}_{w_v} - \tilde{\gamma}_{w_s}|^2$$

که در آن $\hat{\phi}$ ، فاز زمین برآورد شده با استفاده از روش هندسی اشاره شده است.

به این ترتیب، مدل ترکیبی بر اساس مقادیر ارتفاع مستخرج از روش اول و دوم و با وزن دهی به آن‌ها، ارتفاع جنگل را به صورت زیر محاسبه می‌کند [۴]:

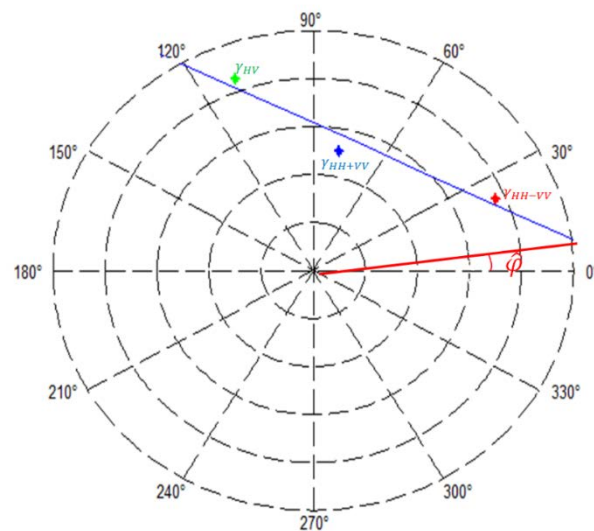
$$h_v = \frac{\arg(\gamma_{w_v}) - \hat{\phi}}{k_z} + \varepsilon \frac{2\text{sinc}^{-1}(|\tilde{\gamma}_{w_v}|)}{k_z} \quad (۷)$$

که در آن ε ، پارامتر تنظیم کننده وزن مولفه‌های ترکیبی مدل است. همان‌گونه که دیده می‌شود، ارتفاع حاصل از روش ترکیبی از طریق جمع وزن دار دو مولفه حاصل می‌شود. مولفه اول، ارتفاع حاصل از روش مدل ارتفاعی رقومی است که به تنهایی منجر به تخمین ارتفاع در مقداری کمتر از مقدار واقعی آن می‌شود. مولفه دوم که با وزن ε به معادله اضافه می‌شود، حاصل تخمین ارتفاع به روش اندازه دامنه همدوسی حجمی است. انتخاب بهینه و



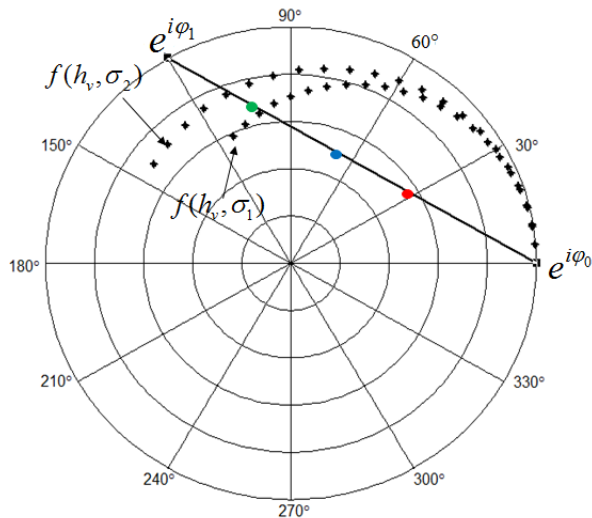
شکل ۲: برازش خط به پایه‌های پلاریزاسیون بردار پائولی در CUC

فرض روش ترکیبی در تعیین مقدار فاز متناظر با زمین مسطح، همدوسی بیشینه (یک) در روی زمین است. از این رو، تقاطع خط برازش داده شده با دایره مختلط واحد به عنوان کاندیداهای فاز زمین مسطح انتخاب می‌شوند. بدیهی است که از بین دو نقطه تقاطع، نقطه‌ای که به همدوسی در بازپراکنش سطحی غالب (پایه HH-VV و HH+VV) نزدیک‌تر است به عنوان همدوسی زمین مسطح زیرین جنگل انتخاب می‌شود. به این ترتیب، $\hat{\phi}$ معرف فاز زمین خواهد بود.



شکل ۳. برآورد فاز زمین مسطح در روش ترکیبی

به دو معادله خواهد شد که برای حل دو مجهول میرایی و ارتفاع جنگل به کار گرفته می‌شود. با این حال، باید توجه داشت که حل معادله ۸ به دلیل غیرخطی بودن ماهیت معادله، مستلزم انتخاب مقادیر اولیه مجهولات و استفاده از روند تکرار در حل معادله است. برای گریز از این روند، روش سه مرحله‌ای یک استراتژی هندسی را برای حل مجهولات به کار گرفته است که در ضمن سادگی، نیاز مسئله به مقادیر اولیه مجهولات را برطرف می‌کند. برای این منظور، ابتدا باید از میان مشاهدات انجام شده، یک کانال به عنوان پایه پلاریزاسیون صرفاً حجمی انتخاب شود که همچنان که پیش از این نیز اشاره شد، پایه HV به دلیل بازپراکنش حجمی غالب در محدوده‌های پوشش گیاهی برای این هدف انتخاب می‌شود. اکنون باید مقادیر میرایی و ارتفاع متناظر با این پایه منتخب محاسبه شوند. برای این منظور، از منحنی‌های میرایی ثابت در CUC استفاده می‌شود.



شکل ۴. پیاده‌سازی مرحله سوم از روش سه مرحله‌ای. منحنی‌های میرایی ثابت با رنگ مشکی و مقادیر همدوسی در پایه‌های پائولی به ترتیب با رنگ قرمز، آبی و سبز نمایش داده شده‌اند.

در شکل ۴، همدوسی در پایه‌های پلاریزاسیون بردار پائولی با دایره‌های توپر به رنگ قرمز، آبی و سبز نمایش داده شده است. در این شکل، خط توپر مشکی مکان هندسی مقادیر همدوسی در دایره CUC است که از برازش به پایه‌های پائولی به دست

صحيح پارامتر ϵ در این مدل بسیار مهم است که به صورت تجربی، 0.4 در نظر گرفته می‌شود.

این الگوریتم که در سال ۲۰۰۵ مطرح شد، به منظور برقراری تعادل بین دقت و سهولت محاسبه، نسبت به دو روش قبلی بیشتر مورد توجه قرار گرفته است.

۴-۲- الگوریتم وارونگی ارتفاع سه مرحله‌ای

روش سه مرحله‌ای، یک روش هندسی مبتنی بر مدل RVoG است که بدون نیاز به مقادیر اولیه پارامترهای مجهول، اطلاعات اضافی و روند تکرار در محاسبات، قادر به برآورد مقادیر فاز زمین و ارتفاع لایه حجمی در هر پیکسل است [۳]. در این روش، برآورد مجهولات در سه مرحله تحت عناوین برازش خط در دایره CUC، رفع ابهام و برآورد فاز زمین، برآورد توام مقادیر میرایی و ارتفاع جنگل انجام می‌شود. مطابق رابطه ۵، مکان هندسی مقادیر مختلط همدوسی در CUC یک خط مستقیم است بنابراین، مشابه روش ترکیبی می‌توان مرکز فاز زمین را با استفاده از برازش خط به مقادیر همدوسی در پایه‌های پلاریزاسیون پائولی محاسبه کرد. به این ترتیب، طی مرحله ۱ و ۲ مطابق شکل ۳، مقدار فاز زمین با شرط بیشینه بودن همدوسی در سطح زمین زیرین جنگل قابل برآورد است. در مرحله سوم، از این الگوریتم مقادیر میرایی و ارتفاع لایه حجمی هم‌زمان و با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شوند:

$$\gamma_v = e^{i\varphi_0} \frac{P_1(e^{P_2 h_v} - 1)}{P_2(e^{P_1 h_v} - 1)} \quad (8)$$

$$P_1 = \frac{2\sigma}{\cos\theta}$$

$$P_2 = \frac{2\sigma}{\cos\theta} + jk_z$$

که در آن، σ ضریب ثابت میرایی متوسط موج و θ زاویه فرود موج ارسالی است. با توجه به اینکه مقدار همدوسی عددی مختلط شامل قسمت‌های حقیقی و موهومی است، رابطه ۸ منجر

برای این منظور، ارتفاع درختان در بازه ۱۰ تا ۲۰ متر و تراکم آنها در بازه ۱۰۰ تا ۹۰۰ تنه درخت در هر هکتار، تنظیم و بدین ترتیب برای ارتفاع، ۵ سری داده و برای تراکم، ۹ سری داده شبیه‌سازی و تولید شد. پارامترهای سنجنده و جنگل نیز به شرح جدول ۱ و جدول ۲ است.

جدول ۱. پارامترهای سنجنده در تولید داده‌های شبیه‌سازی شده

| پارامتر سنجنده | مقدار مفروض |
|--|-------------|
| ارتفاع سکو (متر) | ۳۰۰۰ |
| زاویه فرود (درجه) | ۴۵ |
| طول خط مبنای افقی (متر) | ۱۰ |
| طول خط مبنای مکانی (متر) | ۱ |
| فرکانس موج (گیگا هرتز) | ۱/۳ |
| حد تفکیک در راستای آزیموت ^۲ (متر) | ۱/۵ |
| حد تفکیک در راستای رنج ^۳ (متر) | ۱/۰۶ |

جدول ۲. پارامترهای فیزیکی زمین و جنگل

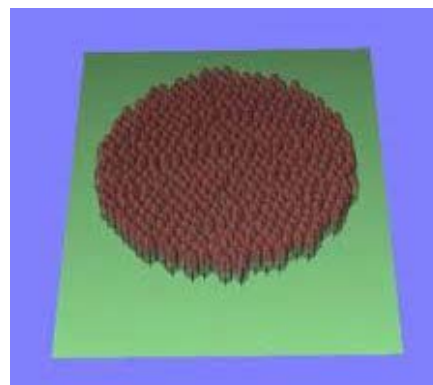
| پارامتر سنجنده | مقدار مفروض |
|---------------------------------------|---|
| زبری سطح زمین (۰ تا ۱۰) | ۰ |
| محتوای رطوبت سطح زمین (۱ تا ۱۰) | ۱ |
| درصد شیب زمین در راستای آزیموت (درصد) | ۰ |
| درصد شیب زمین در راستای رنج (درصد) | ۰ |
| نوع گونه درختان (۴ نوع) | ۴ |
| تراکم جنگل (تعداد اصله در هکتار) | ۵۰۰، ۶۰۰، ۷۰۰، ۸۰۰، ۹۰۰ ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰، ۴۰۰ |
| ارتفاع متوسط جنگل (متر) | ۱۰، ۱۲، ۱۴، ۱۶، ۱۸، ۲۰ |

همچنان که پیش از این ذکر شد، هدف از این مقاله، بررسی تاثیر دو پارامتر فیزیکی ارتفاع و تراکم جنگل در دقت برآورد ارتفاع جنگل با استفاده از سه روش مبتنی بر فاز، مبتنی بر دامنه و روش ترکیبی است. از این‌رو، همان‌طور که از جدول ۱ و

آمده است. روش سه مرحله‌ای برای محاسبه مقادیر ارتفاع و میرایی از تقریب هندسی مقدار همدوسی در پایه HV استفاده می‌کند. برای این منظور، مقادیر همدوسی با ثابت گرفتن مقدار میرایی و تغییر مقادیر ارتفاع بر اساس رابطه ۸ محاسبه می‌شوند. این منحنی‌ها در شکل ۴ با رنگ مشکی نمایش داده شده‌اند. بدیهی است که تقریب هندسی مقدار همدوسی در پایه مشاهداتی HV نزدیک‌ترین همدوسی محاسباتی به این نقطه است. برای این منظور، جدول جستجویی^۱ (LUT) از مقادیر همدوسی محاسباتی تشکیل می‌شود که به ازای هر منحنی همدوسی ثابت، نقطه تقاطع منحنی با خط برازش داده شده و نیز مقادیر میرایی و ارتفاع متناظر با آن در آن ثبت می‌شود. در پایان، نزدیک‌ترین نقطه LUT به همدوسی مشاهداتی HV به عنوان برآورد هندسی این همدوسی انتخاب می‌شود و مقادیر میرایی و ارتفاع متناظر با آن پاسخ مسئله وارونگی خواهد بود.

۵-۲- داده‌های مورد استفاده

به منظور بررسی اثر پارامترهای فیزیکی ارتفاع و تراکم جنگل، از داده‌های شبیه‌سازی شده PolInSAR در نرم افزار PolSARpro استفاده شد. شکل ۵، نمایی از داده شبیه‌سازی شده در نرم افزار PolSARpro را نشان می‌دهد.



شکل ۵. داده شبیه‌سازی شده جنگل در نرم افزار PolSARpro

خروجی شبیه‌ساز شامل ۴ پایه پلاریزاسیون مختلط تک منظر^۱ (SLC) برای هریک از تصاویر پایه^۲ و پیرو^۳ به همراه عدد موج قائم، فایل فاز زمین مسطح^۴ و پاره‌ای فایل‌های توصیفی و تنظیمات است. با توجه به این‌که تصاویر تولید شده، نسبت به هم ثبت هندسی^۵ شده‌اند، از این‌رو، مرحله ثبت هندسی تصاویر از روند پیش‌پردازش داده‌ها حذف می‌شود. تولید ماتریس پراکنش^۶ هریک از تصاویر پایه و پیرو و حذف اثر زمین مسطح، مقدمه تولید فایل‌های همدوسی در پلایه‌های پائولی است. بر اساس مقادیر مختلط همدوسی تولید شده در پایه‌های پلاریزاسیون بردار پائولی، هر یک از سه روش وارونگی ارتفاع، قابل پیاده‌سازی است.

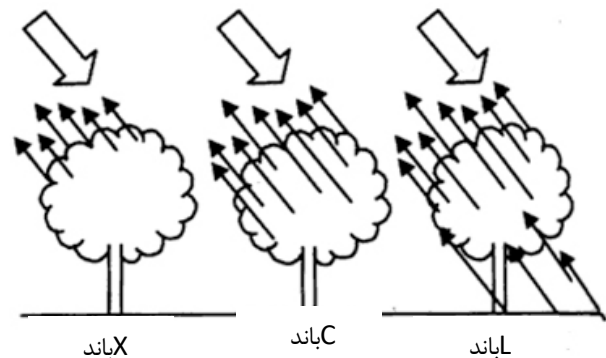
۳- نتایج و بحث

نتایج حاصل از روش‌های چهارگانه وارونگی ارتفاع به تفکیک اثر ارتفاع و تراکم درختان در ادامه آورده شده است.

۳-۱- اثر ارتفاع درختان در دقت برآورد ارتفاع در روش‌های وارونگی

برای بررسی تأثیر ارتفاع، بازه ارتفاعی ۱۰ تا ۲۰ متر شامل ارتفاعات ۱۰، ۱۲، ۱۴، ۱۶، ۱۸ و ۲۰ متر با تراکم ۹۰۰ تنه درخت در هکتار انتخاب شد. هم‌چنین، در انجام محاسبات مربوط به هر سه روش تفاضل مدل رقومی ارتفاعی، دامنه همدوسی حجمی و روش ترکیبی، پایه پلاریزاسیون HV به عنوان پایه پلاریزاسیون صرفاً حجمی در نظر گرفته شد و فاز زمین مسطح در روش تفاضل مدل رقومی ارتفاعی بر اساس پایه پلاریزاسیون HH-VV به عنوان پایه صرفاً سطحی اندازه‌گیری شد. نتایج حاصل از اعمال چهار روش مذکور در ۶ سری داده شبیه‌سازی شده در شکل ۷ نمایش داده شده است.

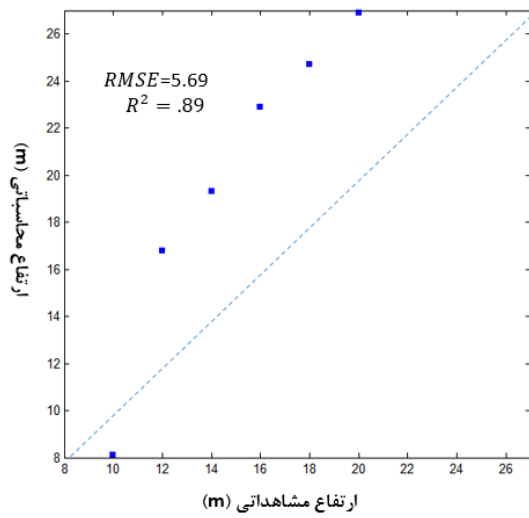
جدول ۲ برمی‌آید، مقادیر سایر پارامترها در تمامی داده‌های شبیه‌سازی شده ثابت در نظر گرفته شده است و تنها دو پارامتر مورد مطالعه تغییر داده شده است. هم‌چنین، در تولید مجموعه داده‌های با ارتفاع متغیر، عدد تراکم روی ۹۰۰ تنه در هکتار، و در تولید مجموعه داده‌های با تراکم متغیر، عدد ارتفاع جنگل روی ۱۸ متر تنظیم شده است. گونه درختان جنگل نیز در هر دو مجموعه داده، نوعی درخت جنگلی برگ‌ریز یا فصلی انتخاب شده است. هم‌چنین، به دلیل نفوذ امواج راداری باند L در توده جنگل، در تولید داده‌های شبیه‌سازی از این باند استفاده شده است. به عبارت دیگر، نفوذ این امواج در پوشش گیاهی و در عین حال امکان انتخاب یک پایه به عنوان پایه پلاریزاسیون صرفاً حجمی، ویژگی منحصر به فرد این باند است که سبب تمایز آن از باند P (با نفوذ بالا) شده و منجر به استفاده آن در کاربردهای برآورد ارتفاع جنگل شده است. به عبارت دیگر، در باند P به دلیل نفوذ بیشتر امواج در توده گیاهی، انتخاب یک باند به عنوان پلاریزاسیون صرفاً حجمی با چالش جدی مواجه است. در شکل ۶، تفاوت نفوذ سیگنال در توده جنگل در طول موج L نسبت به دیگر باندها نمایش داده شده است.



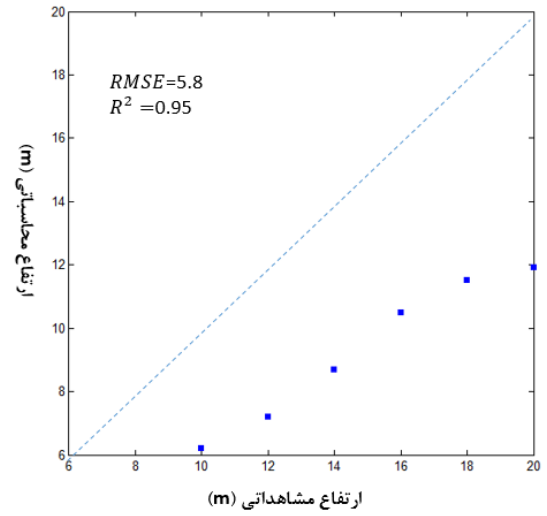
شکل ۶. تمایز نفوذ سیگنال راداری باند L در جنگل نسبت به باندهای با طول موج کمتر

4 Flat Earth
5 Coregister
6 Scattering Matrix

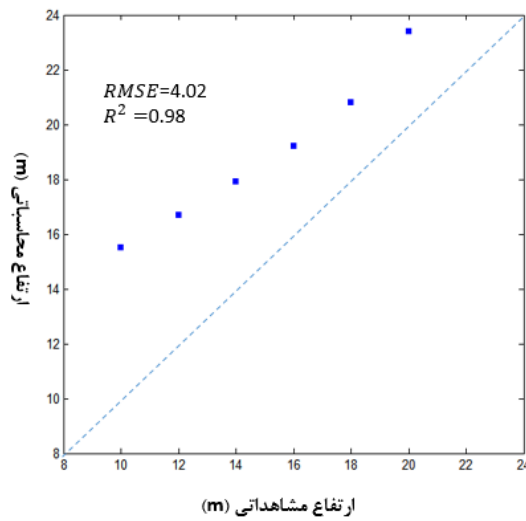
1 Single Look Complex
2 Master
3 Slave



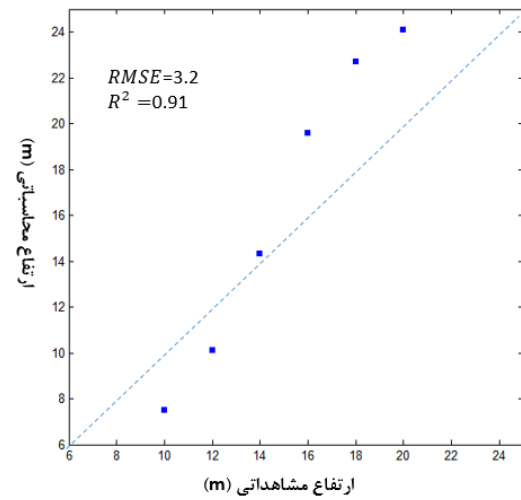
ب



الف



د



ج

شکل ۷. ارتفاع محاسباتی برای هدف جنگل با تراکم ثابت و ارتفاعات متغیر با استفاده از الف) روش تفاضل مدل رقومی ارتفاعی، ب) روش دامنه همدوسی حجمی و ج) روش ترکیبی و د) روش سه مرحله‌ای

استفاده از فاز تداخل‌نما در پایه‌های HH-VV و HV، به عنوان پایه‌های منتخب سطحی و حجمی مد نظر قرار می‌گیرد. بدیهی است که هر اندازه مرکز فاز پایه‌های منتخب سطحی و حجمی به ترتیب به سطح زیرین و تاج پوشش جنگل نزدیک‌تر باشد، دقت برآورد مدل رقومی سطحی متناظر با تاج پوشش گیاهی و مدل رقومی ارتفاعی متناظر با سطح زمین بالاتر خواهد رفت که منجر به بهبود دقت برآورد ارتفاع جنگل خواهد شد. همچنان که در شکل ۶الف ملاحظه می‌شود، افزایش ارتفاع جنگل منجر به کاهش دقت در این روش شده است. با افزایش ارتفاع جنگل احتمال نفوذ سیگنال HH-VV به توده جنگل و در نهایت سطح زیرین کاهش می‌یابد و مرکز فاز حاصل از پایه سطحی HH-VV از سطح زمین فاصله می‌گیرد. از این رو، اگر چه با افزایش ارتفاع جنگل مرکز فاز حجمی تفاوت چندانی نخواهد کرد، اما مرکز فاز پایه سطحی از زمین فاصله بیشتری می‌گیرد و اختلاف ارتفاع برآورد شده و ارتفاع واقعی بیشتر خواهد شد. خطای برآورد ارتفاع جنگل با استفاده از روش دوم تقریباً با تغییر ارتفاع ثابت مانده است. از آن جایی که در روش دوم، ارتفاع جنگل بر اساس دامنه همدوسی صرفاً حجمی محاسبه می‌شود، تعیین دقیق پایه حجمی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است و خطا متاثر از این پایه پلاریزاسیون است. همچنان که توضیح داده شد، برخلاف پایه سطحی، تغییر ارتفاع تاثیر چندانی در پایه حجمی ندارد و از این رو، تغییر ارتفاع تاثیر قابل توجهی در افزایش خطا نداشته است. با این حال باید توجه داشت که افزایش ارتفاع، فرض میرایی صفر در مسیر نفوذ سیگنال را زیر سوال می‌برد و از این رو با افزایش ارتفاع میزان خطای برآورد نیز افزایش اندکی را نشان می‌دهد. از آن جایی که در روش ترکیبی برخلاف روش اول، فاز زمین مسطح بر اساس الگوریتم متفاوتی به دست می‌آید و صرفاً بر اساس یک پایه پلاریزاسیون تعیین نمی‌شود، بنابراین، در نتایج نهایی خطای کم برآورد کردن ارتفاع مشابیه آنچه که در روش اول دیده شد، مشهود نیست. اما در مورد خطای مربوط به انتخاب پایه پلاریزاسیون حجمی که روش دوم را نیز تحت تاثیر قرار می‌داد، روش ترکیبی نیز متاثر شده و خطای مربوطه در نتایج نیز دیده می‌شود.

همان‌گونه که در شکل ۷الف دیده می‌شود، تمامی داده‌های شبیه‌سازی شده، روش تفاضلی مدل رقومی ارتفاعی، ارتفاع را کمتر از مقدار مشاهداتی برآورد کرده است و دلیل این خطا عدم تطابق مراکز فاز پایه‌های انتخاب شده سطحی و حجمی بر زمین زیرین و تاج پوشش گیاهی است. به عبارت دیگر، در روش تفاضلی مدل رقومی ارتفاعی از پایه‌های پلاریزاسیون HH-VV و HV به عنوان پایه‌های پلاریزاسیون صرفاً سطحی و حجمی استفاده می‌شود و فرض بر آن است که مرکز فاز پایه‌های مذکور بر سطح زمین زیرین و تاج پوشش گیاهی قرار دارد. این در حالی است که قطعاً مرکز فاز زمینی به دست آمده بالاتر از سطح زمین و مرکز فاز تاج پوشش به دست آمده نیز پایین‌تر از سطح واقعی تاج پوشش گیاهی است. با این تفاسیر، روش مذکور همیشه ارتفاع را پایین‌تر از مقدار واقعی برآورد می‌کند. مطابق آنچه که در شکل ۷ب دیده می‌شود، نتایج روش اندازه دامنه همدوسی حجمی نیز در بیشتر داده‌های شبیه‌سازی شده بیانگر برآورد ارتفاع بیش از مقدار واقعی است و دلیل آن را می‌توان در فرض میرایی صفر جستجو کرد. نتایج روش ترکیبی نیز بسته به ارتفاع جنگل، رفتار متفاوتی را از خود نشان داده است که در شکل ۶ج نشان داده شده است. در این روش، در ارتفاعات کمتر از ۱۴ متر، مقدار ارتفاع محاسباتی کمتر از مقدار واقعی برآورد شده است و پس از آن به مقدار واقعی نزدیک شده و سپس مجدداً فاصله گرفته است. همچنین، بر اساس مقادیر ضریب تعیین می‌توان همبستگی مقادیر محاسباتی را با مقادیر مشاهداتی مورد بررسی قرار داد. مقدار این ضریب برای هر یکی از روش‌های تفاضل مدل رقومی ارتفاعی، اندازه دامنه همدوسی حجمی و روش ترکیبی به ترتیب برابر است با ۰/۹۵، ۰/۸۹ و ۰/۹۱. مقادیر ضریب تعیین گواهی آن است که ارتفاعات برآورد شده به روش‌های یاد شده از همبستگی مناسبی با ارتفاعات مشاهداتی برخوردار است و به عبارتی، آهنگ تغییرات محاسبات با آهنگ تغییرات مشاهدات هم‌خوانی دارد.

به این ترتیب، ملاحظه می‌شود که تغییرات ارتفاع جنگل در برآورد ارتفاع با استفاده از روش‌های پلاریمتریک ذکر شده اثر به‌سزایی دارد. در روش برآورد ارتفاع بر اساس اطلاعات فاز،

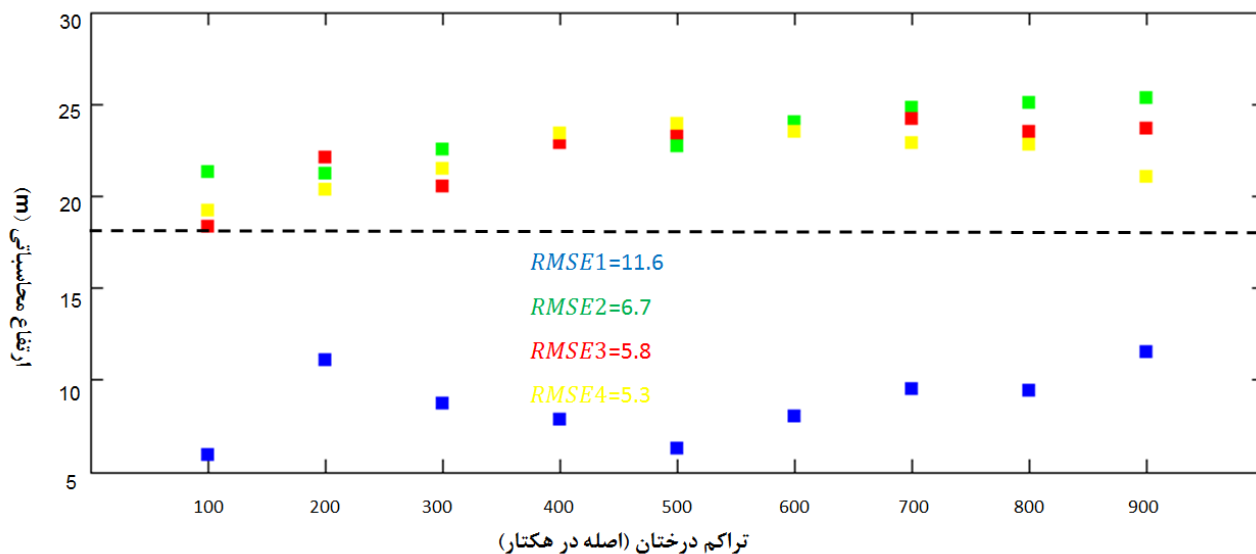
ملاحظه می‌شود که افزایش ارتفاع جنگل اگر چه بر روی تخمین مدل رقومی سطحی با استفاده از پایه پلاریزاسیون HV اثر چندانی ندارد، اما این تغییر ارتفاع قطعاً بر برآورد ارتفاع با استفاده از یک پایه مشاهداتی مانند HH-VV اثر خواهد گذاشت.

۲-۳- اثر تراکم درختان در دقت برآورد ارتفاع در روش‌های وارونگی

برای بررسی تأثیر تراکم، بازه تراکم از ۱۰۰ تا ۹۰۰ تنه درخت در هر هکتار با ارتفاع ثابت ۱۸ متر، تغییر داده شد. نتایج حاصل از اعمال چهار روش مذکور در ۹ سری داده شبیه‌سازی شده در شکل ۷ نمایش داده شده است.

به طور کلی بر اساس آن چه که در این بخش دیده شد، افزایش ارتفاع درختان دو فرض را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد و تأثیر آن در خطای ارتفاع برآورد شده بروز می‌کند. فرض اول، مرکز فاز نزدیک به سطح زمین در پایه پلاریزاسیون HH-VV است و فرض دوم میرایی صفر در امتداد نفوذ سیگنال است.

در روش سه مرحله‌ای که نتایج آن در شکل ۷ د ملاحظه می‌شود، ارتفاع برآورد شده بیشتر از ارتفاع واقعی است. علت بروز این خطا دو فرض انتخاب پایه HV به عنوان پایه صرفاً حجمی و نیز فرض میرایی ثابت در امتداد نفوذ سیگنال است. با توجه به نتایج روش سه مرحله‌ای در برآورد ارتفاع در جنگل‌های کم ارتفاع توفیق چندانی به دست نمی‌آورد.



شکل ۸. ارتفاع محاسباتی برای هدف جنگل با تراکم متغیر و ارتفاع ثابت با استفاده از سه روش تفاضل مدل رقومی ارتفاعی به رنگ آبی، روش دامنه همدوسی حجمی به رنگ سبز، روش ترکیبی به رنگ قرمز و روش سه مرحله‌ای به رنگ زرد

به‌دست می‌آید، بنابراین، انتظار می‌رود در این روش فاز زمین با دقت بهتری نسبت به روش تفاضل مدل رقومی ارتفاعی، ارتفاع را کمتر آید. نکته مهم اینکه فرض میرایی صفر در امتداد نفوذ سیگنال با افزایش تراکم جنگل زیر سوال می‌رود و سبب کاهش محسوس دقت برآورد ارتفاع با استفاده از روش دامنه همدوسی حجمی می‌شود. اما در روش سه مرحله‌ای فرض میرایی ثابت مطرح می‌شود که با تغییر تراکم، صحت فرض تحت تاثیر قرار نمی‌گیرد اگرچه طبیعتاً عدد میرایی برآورد شده متفاوت خواهد بود.

به این ترتیب ملاحظه می‌شود که با تغییر تراکم جنگل، بسته به روشی که برای برآورد در نظر گرفته شده است، دقت نتایج متفاوت خواهد بود. بدیهی است که اگر چه ثابت فرض کردن پارامترهایی مانند میرایی سبب کاهش حجم محاسبات خواهد شد، اما با پیچیده شدن شرایط هدف مورد مطالعه فرضیات این چینی به راحتی نقض می‌شوند و منجر به کاهش دقت برآورد خواهند شد.

۴- نتیجه‌گیری

در برآورد ارتفاع جنگل با استفاده از تکنیک‌های راداری عوامل مختلفی می‌توانند موثر باشند که عمدتاً در قالب پارامترهای سنجنده، پارامترهای جنگل و پارامترهای زمین دسته‌بندی می‌شوند. در این مقاله، با هدف بررسی پارامترهای جنگل، اثر دو پارامتر تراکم و ارتفاع درختان در برآورد ارتفاع جنگل با استفاده از چهار الگوریتم مرسوم بررسی شد. یکی از نتایج مهم حاصل، با در نظر گرفتن شرایط تنظیمات اولیه، حساس بودن الگوریتم‌های دامنه همدوسی حجمی و ترکیبی به تغییرات تراکم در جنگل بود. همچنین، ملاحظه شد که نتایج روش ترکیبی در مقایسه با دو روش دامنه همدوسی و اختلاف مدل رقومی ارتفاعی از دقت بالاتری برخوردار است و در جنگل‌هایی با ارتفاع و تراکم کمتر دقت نتایج به مراتب بهتر خواهد بود. اگرچه روش ترکیبی در جنگل‌های با تراکم متفاوت، ضعیف‌تر از روش سه مرحله‌ای وارد شد. با این حال باید توجه داشت که در این مطالعه پارامترهای سنجنده نظیر زاویه فرود و

همان‌گونه که در شکل ۸ دیده می‌شود در تمامی داده‌های شبیه‌سازی شده، روش تفاضل مدل رقومی ارتفاعی، ارتفاع را کمتر از مقدار مشاهداتی برآورد می‌کند. همچنین، نتایج روش اندازه دامنه همدوسی حجمی و ترکیبی که به رنگ سبز و قرمز نشان داده شده است، در تمامی نمونه‌ها با تراکم‌های مختلف ارتفاع را بیشتر از مقدار واقعی، برآورد کرده‌اند. مشاهده نتایج جذر میانگین خطای کمترین مربعات^۱ (RMSE) مبین آن است که روش سه مرحله‌ای، نسبت به سه روش قبلی، تخمین بهتری را داشته است.

همچنان که پیش از این اشاره شد، در روش تفاضل مدل رقومی ارتفاعی، ارتفاع بر اساس اختلاف مرکز فاز پایه حجمی و سطحی به‌دست می‌آید. با افزایش تراکم جنگل میزان نفوذ سیگنال در توده جنگل کاهش می‌یابد و انتظار می‌رود مرکز فاز پایه سطحی از سطح زمین فاصله بیشتری داشته باشد و سبب برآورد غیر دقیق از ارتفاع جنگل شود. از سوی دیگر، افزایش تراکم سبب شکل‌گیری مرکز فاز حجمی در نزدیکی بالای تاج پوشش گیاهی می‌شود که سبب بهبود دقت برآورد ارتفاع جنگل خواهد شد.

نکته قابل تامل در این بررسی آن‌که با افزایش تراکم درختان، دقت نتایج روش دامنه همدوسی حجمی کاهش یافته است. همچنان که پیش از این نیز عنوان شد در روش دامنه همدوسی حجمی برای ساده کردن تابع ساختار، مقدار عددی میرایی صفر در نظر گرفته می‌شود که منجر به تابع ساختار برابر ۱ می‌شود بنابراین، انتظار می‌رود روش دامنه همدوسی حجمی و روش ترکیبی نسبت به تغییرات ساختار قائم جنگل، حساس باشند. این امر در نتایج ارائه شده در شکل ۷ نیز به خوبی نشان داده شده است. همچنان که مشاهده می‌شود، با افزایش ارتفاع درختان جنگل فرض میرایی صفر اعتبار خود را از دست داده و ارتفاع محاسباتی از خط $y=18$ ، که همان ارتفاع مشاهداتی در هر ۹ دسته داده شبیه‌سازی شده است، فاصله می‌گیرد.

در روش سه مرحله‌ای، برآورد فاز زمین با استفاده از برازش خط همدوسی و با فرض همدوسی بیشینه در زمین زیرین جنگل

1 Root Mean Squared Error

مراجع

- [1] S. Brown, Estimating biomass and biomass change of tropical forests: a primer. Vol. 134. 1997: Food & Agriculture Org.
- [2] K.P. Papathanassiou, S.R. Cloude, Single-baseline polarimetric SAR interferometry. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2001. 39 (11): p. 2352-2363.
- [3] S. Cloude, K. Papathanassiou, Three-stage inversion process for polarimetric SAR interferometry. IEE Proceedings-Radar, Sonar and Navigation, 2003. 150 (3): p. 125-134.
- [4] S.R. Cloude, Pol-InSAR training course. Radio Science, 2005.
- [5] K. Papathanassiou et al., Forest height estimation by means of polarimetric SAR interferometry: Actual status and perspectives. Processing of 2nd ESA POLInSAR Workshop. Frascati, Italy, Jan, 2005.
- [6] T. Mette, K. Papathanassiou, I. Hajnsek. Biomass estimation from polarimetric SAR interferometry over heterogeneous forest terrain. in IGARSS 2004. 2004 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. 2004. IEEE.
- [7] S.R. Cloude, K.P. Papathanassiou, Polarimetric SAR interferometry. IEEE Transactions on geoscience and remote sensing, 1998. 36 (5): p. 1551-1565.
- [8] T. Managhebi, Y. Maghsoudi, M.J.V. Zoj, A volume optimization method to improve the three-stage inversion algorithm for forest height estimation using PolInSAR data. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2018. 15 (8): p. 1214-1218.
- [9] F. Wenxue et al., Extended three-stage polarimetric SAR interferometry algorithm by dual-polarization data. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2015. 54 (5): p. 2792- 2802.
- [10] C. Wang et al., The impact of forest density on forest height inversion modeling from polarimetric InSAR data. Remote Sensing, 2016. 8 (4): p. 291.
- [11] K. Papathanassiou et al. Forest height estimation by means of polarimetric SAR interferometry: actual status and perspectives. in Proceedings of 2nd ESA POLInSAR Workshop, Frascati, Italy. 2005.
- [12] R.N. Treuhaft, P.R. Siqueira, Vertical structure of vegetated land surfaces from interferometric and polarimetric radar. Radio Science, 2000. 35 (1): p. 141-177.

طول موج که اثر به‌سزایی در میرایی دارند ثابت در نظر گرفته شده است. هم‌چنین، در این مطالعه صرفاً روش مرسوم انتخاب پایه پلاریزاسیون HV به عنوان پایه صرفاً حجمی مورد استفاده قرار گرفت در حالی که، بهینه‌سازی انتخاب پایه پلاریزاسیون حجمی در انتخاب بهتر این پایه اثر به‌سزایی دارد [۸].

پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌ها و بررسی‌های آتی، با تغییر پارامترهای سنجنده، زمین و جنگل، داده‌های مختلف شبیه‌سازی و نتایج آن‌ها بررسی شود. بررسی اثر این پارامترها در انتخاب استراتژی مناسب برای اخذ داده و انتخاب الگوریتم وارونگی ارتفاع نقش به‌سزایی خواهد داشت. بدین ترتیب، شیوه‌های خطادار یا نامناسب از همان ابتدا از بین راه‌های مختلف، فیلتر شده، با روش‌های هم‌سازتری برای نیل به اهداف مورد نیاز، برای انجام کار اقدام می‌شود.

تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.



COPYRIGHTS

© 2022 by the authors. Licensee Iranian Space Research Center of Iran. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)