



نخستین مجله

ایران GIS

سنجش از دور و GIS ایران سال دوازدهم، شماره دوم، تابستان ۱۳۹۹  
Iranian Remote Sensing & GIS Vol.12, No. 2, Summer 2020

57-72



## A Novel Method for Forest Height Estimation Using PolInSAR Data

Amir Aghabalaei.\*<sup>1</sup>, Hamid Ebadi.<sup>2</sup>, Yasser Maghsoudi.<sup>3</sup>

1. Ph.D. Student, Photogrammetry and Remote Sensing Department, Faculty of Geodesy and Geomatics Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran
2. Professor, Photogrammetry and Remote Sensing Department, Faculty of Geodesy and Geomatics Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran
3. Associate Professor, Photogrammetry and Remote Sensing Department, Faculty of Geodesy and Geomatics Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

### Abstract

Monitoring the earth and its biosphere is an essential task in any scale to achieve a sustainable development. Therefore, forests, as an invaluable natural resource, have an important role to control the climate changes and the carbon cycle. For this reason, biomass and consequently forest height have been known as the key information for monitoring the forest and its underlying surface. Several studies, it has been shown that Synthetic Aperture RADAR (SAR) imaging systems can greatly help to this purpose. In this framework, a novel technique called Polarimetric SAR Interferometry (PolInSAR) is an appropriate and an available tool for forest height estimation, due to its sensitivity to location and vertical distribution of the forest structural components. Based on this, from a view point, the methods employed in this field can be divided into two categories: a) based on Random Volume over Ground (RVoG) inversion model, and b) based on model-based decomposition techniques of PolInSAR data. In this study, in order to improve the forest height estimation, a novel method based on the combination of two mentioned categories has been proposed. The performance and the efficiency of the proposed method were demonstrated by four datasets related to the Pine and the deciduous forests which simulated from the PolSARProSim software in L and P bands.

**Keywords:** Forest height estimation, Polarimetric SAR Interferometry (PolInSAR), Random Volume over Ground (RVoG) inversion model, (PolInSAR), Model-based PolInSAR decomposition.



نسخه از دور

GIS ایران



سنجش از دور و GIS ایران سال دوازدهم، شماره دوم، تابستان ۱۳۹۹  
Iranian Remote Sensing & GIS Vol.12, No. 2, Summer 2020

۷۲-۵۷

## ارائه روشی نوین جهت برآورد ارتفاع جنگل با استفاده از داده‌های تداخل‌سنجی پلاریمتریک راداری

امیر آقابالائی<sup>۱\*</sup>، حمید عبادی<sup>۲</sup>، یاسر مقصودی<sup>۳</sup>

۱. دانشجوی دکتری گروه فتوگرامتری و سنجش‌ازدور، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

۲. استاد گروه فتوگرامتری و سنجش‌ازدور، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

۳. دانشیار گروه فتوگرامتری و سنجش‌ازدور، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

### چکیده

پایش زمین، در هر مقیاسی جهت نیل به توسعه پایدار لازم و ضروری است. از این رو، جنگل‌ها به‌عنوان یک منبع طبیعی ارزشمند، نقش مهمی در کنترل تغییرات آب‌وهوایی و چرخه کربن دارند. به‌همین دلیل، زیست‌توده و به تبع آن ارتفاع جنگل جزو اطلاعات کلیدی برای پایش جنگل و زمین زیر آن به شمار می‌آیند. در مطالعات بسیاری نشان داده شده است که سامانه تصویربرداری رادار با روزه مجازی (SAR) می‌تواند کمک شایانی به این هدف کنند. در این راستا، تکنیک جدیدی که تداخل‌سنجی پلاریمتریک SAR (PolInSAR) نامیده می‌شود، ابزاری مناسب و در دسترس جهت برآورد ارتفاع جنگل است، چراکه به موقعیت و توزیع قائم اجزای ساختاری جنگل حساس است. بر این اساس، از یک نقطه نظر، روش‌های به‌کار برده شده در این حوزه را می‌توان به دو دسته تقسیم کرد: الف) بر اساس مدل معکوس‌گیری حجم تصادفی بر زمین (RVoG)، و ب) بر اساس تکنیک‌های تجزیه مدل‌مبنای داده‌های PolInSAR. در این تحقیق، برای بهبود برآورد ارتفاع جنگل روشی نوین بر اساس ترکیب دو دسته روش اشاره شده پیشنهاد شده است. عملکرد و کارآمدی روش پیشنهادی، توسط چهار مجموعه داده شبیه‌سازی شده از نرم‌افزار PolSARProSim در دو نوع جنگل به ترتیب با گونه‌های درختی کاج و برگ‌ریز و در باندهای L و P اثبات شد. به‌طوری‌که در منطقه جنگلی با گونه‌های درختی کاج، در باند L و به‌ویژه با استفاده از روش ترکیبی (فاز و کوهرنسی) ۳/۳۸ متر بهبود در برآورد ارتفاع حاصل شد. در باند P نیز بالاخص با استفاده از روش دامنه کوهرنسی، ۲/۷۴ متر بهبود حاصل شد. همچنین در منطقه جنگلی با درختان برگ‌ریز، در باند L و P به ترتیب ۴/۷۷ متر و ۲/۳۸ متر بهبود در برآورد ارتفاع به‌ترتیب با استفاده از روش‌های تفاضلی مدل رقومی ارتفاعی (DEM) و دامنه کوهرنسی به‌دست آمد.

**کلید واژه‌ها:** برآورد ارتفاع جنگل، تداخل‌سنجی پلاریمتریک راداری (PolInSAR)، مدل معکوس‌گیری حجم تصادفی بر زمین (RVoG)، تجزیه مدل‌مبنای PolInSAR.

\* نویسنده مکاتبه‌کننده: تهران، خیابان ولیعصر (عج)، بالاتر از میدان ونک، تقاطع میرداماد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، تلفن: ۰۲۱۸۸۸۷۷۰۷۱.

## ۱- مقدمه

مدیریت و پایش جنگل و زمین زیر آن، یکی از کاربردهای عملی و مهم سامانه‌های سنجش از دور راداری است. چرا که جنگل نقش کلیدی در چرخه جهانی کربن و تغییرات آب‌وهوایی دارد. از این‌رو، ارتفاع جنگل نه تنها پارامتر مهمی برای تجزیه و تحلیل کمی این منبع طبیعی است، بلکه شاخصی ضروری برای برآورد زیست‌توده<sup>۱</sup> (که در مدل‌های آلومتریک<sup>۲</sup> استفاده می‌شود) است (Mette et al., 2004). بنابراین، سامانه‌های تصویربرداری رادار با روزه مجازی (SAR)<sup>۳</sup> به دلیل نفوذ قابل توجه امواج ماکروویو در تاج پوشش<sup>۴</sup> بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرند (Wenxue et al., 2016).

در دو دهه اخیر، سامانه‌های پیشرفته SAR که تداخل‌سنجی پلاریمتریک راداری (PolInSAR)<sup>۵</sup> نامیده می‌شوند، عملی‌ترین ابزار را جهت بازیابی ارتفاع جنگل مخصوصاً در مناطق وسیع فراهم کرده‌اند. از آن‌جا که سامانه‌های PolInSAR بر مبنای ترکیب کوهرنت<sup>۶</sup> سامانه‌های تصویربرداری پلاریمتری SAR (PolSAR)<sup>۷</sup> و تداخل‌سنجی SAR (InSAR)<sup>۸</sup> هستند، پتانسیل خوبی در برآورد ارتفاع جنگل از خود نشان داده‌اند، چرا که این سامانه‌ها به ساختار قائم و مشخصه‌های فیزیکی حالت پراکنش<sup>۹</sup> حساس هستند (Zhang et al., 2017). به‌علاوه این‌که، سامانه‌های PolInSAR برای باندهای مختلف (مثلاً باندهای L و P) و نیز سکوه‌های مختلف (مثلاً هواپرد<sup>۱۰</sup> و فضاپرد<sup>۱۱</sup>) آزمایش و ارزیابی شده‌اند (Papathanassiou and Cloude, 2001).

تاکنون روش‌های زیادی جهت برآورد ارتفاع جنگل با استفاده از داده‌های PolInSAR تک خط مبنایی<sup>۱۲</sup> ارائه شده‌اند که از یک نقطه نظر می‌توان آن‌ها را به دو دسته تقسیم کرد: الف) روش‌هایی که بر مبنای مدل حجم تصادفی بر زمین (RVoG)<sup>۱۳</sup> هستند، و ب) روش‌هایی که بر اساس تکنیک تجزیه مدل مبنایی<sup>۱۴</sup>ی داده‌های PolInSAR هستند.

از جمله روش‌های دسته اول، که بر مبنای مدل RVoG هستند، می‌توان به (Liao et al., 2019;

Managhebi et al., 2018; Papathanassiou and Papathanassiou and Cloude, 2001) اشاره کرد. در (Cloude, 2001) یک مدل پراکنش کوهرنسی پلاریمتریک برای پوشش‌های گیاهی جهت برآورد پارامترهای جنگل از مشاهدات تداخل‌سنجی معرفی، بحث و ارزیابی شد. بر اساس مدل پیشنهاد شده، یک الگوریتم بازیابی که امکان برآورد پارامترهای جنگل مانند ارتفاع درخت، میرایی میانگین و توپوگرافی زمین را از داده‌های PolInSAR تک خط مبنایی می‌دهد، ارائه شد. Liao و همکاران (Liao et al., 2019) یک رویکرد بهبود یافته جهت برآورد زیست‌توده را به‌وسیله جمع‌آوری اطلاعات چندگانه از داده‌های PolInSAR معرفی کردند. رویکرد پیشنهاد شده، شامل تجزیه پس‌پراکنش<sup>۱۵</sup> زمین-حجم بود و پس‌پراکنش حجمی را با ارتفاع بازیابی شده جنگل ترکیب می‌کرد. در سال ۲۰۱۸، مناقبی و همکاران (Managhebi et al., 2018) با معرفی یک شاخص هندسی جدید، مطابق با نفوذ سیگنال در جنگل، یک روش پیشرفته جهت بهبود نتایج الگوریتم معکوس‌گیری سه مرحله‌ای (Cloude and Papathanassiou, 2003) با استفاده از تکنیک PolInSAR بر مبنای مدل RVoG ارائه کردند. روش‌های دسته اول، اگرچه ساده‌اند، ولی به دلیل میرایی امواج الکترومغناطیس سبب برآورد کمتری برای ارتفاع جنگل نسبت به مقدار واقعی آن می‌شوند. به‌عبارت دیگر، این روش‌ها به دلیل وجود جزء پراکنش حجمی قوی، اغلب نتایج خوبی را برای جنگل‌های متراکم حاصل نمی‌کنند.

- |                                    |                     |
|------------------------------------|---------------------|
| 1. Biomass                         | 2. Allometric       |
| 3. Synthetic Aperture RADAR        |                     |
| 4. Canopy                          |                     |
| 5. Polarimetric SAR Interferometry |                     |
| 6. Coherent                        | 7. Polarimetry SAR  |
| 8. Interferometry SAR              |                     |
| 9. Scattering                      | 10. Airborne        |
| 11. Spaceborne                     | 12. Single-Baseline |
| 13. Random Volume over Ground      |                     |
| 14. Model Based                    | 15. Backscatter     |

این کوهرنسی‌ها، روشی جدید برای برآورد ارتفاع جنگل بر اساس مدل RVoG و تکنیک تجزیه مدل مبنای داده‌های PolInSAR ارائه می‌شود. ساختار این تحقیق به این صورت است: در بخش اول، به مقدمه و پیشینه این تحقیق پرداخته شد. پیش‌زمینه نظری این تحقیق، شامل مدل معکوس‌گیری RVoG، روش‌های مرسوم بازیابی ارتفاع جنگل، تکنیک تجزیه مدل مبنای داده‌های PolInSAR و مدل تجزیه دو مولفه‌ای Freeman (2007)، در فصل دوم بیان خواهد شد. فصل سوم به تشریح روش پیشنهادی این تحقیق می‌پردازد. مجموعه داده‌ها و منطقه مطالعاتی در فصل چهارم توضیح داده می‌شوند. در فصل پنجم، نتایج تجربی این تحقیق ارائه، بحث و بررسی می‌شوند. نهایتاً، در فصل ششم به نتیجه‌گیری پرداخته خواهد شد.

## ۲- پیش‌زمینه نظری<sup>۷</sup> این تحقیق

در این بخش، مدل معکوس‌گیری RVoG، روش‌های مرسوم بازیابی ارتفاع جنگل، تکنیک تجزیه مدل مبنای داده‌های PolInSAR و نیز مدل تجزیه دو مولفه‌ای Freeman (2007) توضیح داده خواهند شد.

### ۲-۱- مدل معکوس‌گیری<sup>۸</sup> حجم تصادفی بر زمین (RVoG)

مدل معکوس‌گیری RVoG، یک مدل فیزیکی پایه است که اغلب برای برآورد ارتفاع جنگل استفاده می‌شود. این مدل، پارامترهای ساختار قائم جنگل را به مشاهدات کوهرنسی تداخل‌سنجی مرتبط می‌کند (Cloude, 2010). در این مدل فرض می‌شود که لایه تاج‌پوشش، یک حجم همگن است و از ذرات (که به صورت تصادفی جهت‌گیری کرده‌اند) و نیز یک نفوذ ثابتی از امواج (بر یک سطح زمینی غیرقابل نفوذ) تشکیل شده است (Papathanassiou and Cloude, 2001). این مدل به صورت شماتیک در شکل (۱) نشان داده شده است.

از جمله روش‌های دسته دوم، که بر مبنای تکنیک‌های تجزیه مدل مبنای داده‌های PolInSAR هستند، می‌توان به (Ballester-Berman and Lopez-Sanchez, 2010; Latrache et al., 2018; Tan et al., 2019) اشاره کرد. Ballester-Berman and Lopez-Sanchez (2010) مفهوم تجزیه پلاریمتریک Freeman-Durden (1998) را بر روی داده‌های PolInSAR اجرا و پیاده‌سازی کردند. هدف از این کار، تشریح هر cross-correlation تداخل‌سنجی به صورت مجموع سهم‌های مربوط به فرآیندهای پراکنش مستقیم، دو انعکاسی<sup>۱</sup> و حجم تصادفی<sup>۲</sup> بود. در (Latrache et al., 2018)، رویکردی جهت بازیابی ارتفاع جنگل با استفاده از یک تکنیک تجزیه مدل پراکنش وقتی<sup>۳</sup> با داده‌های PolInSAR ارائه شد. روش ارائه شده، تجزیه مدل پراکنش وقتی را با روش دامنه کوهرنسی (Cloude, 2005) ترکیب کرد. در سال ۲۰۱۹، Tan و همکاران (Tan et al., 2019) یک تکنیک تجزیه سه مولفه‌ای بهبود یافته را با استفاده از تصویر PolInSAR پیشنهاد دادند. روش پیشنهاد شده، با استفاده از مجموعه کوهرنسی و یک روش Newton-Raphson، دقت برآورد ارتفاع جنگل را بهبود داد. روش‌های دسته دوم، رویکرد جدیدی برای برآورد ارتفاع جنگل به وجود آورده‌اند. در این روش‌ها فرض بر این است که سهم حجمی، ابری از استوانه‌های نازک است که به صورت یکسان و تصادفی توزیع شده‌اند. بنابراین، این روش‌ها فقط برای مناطق جنگلی با تقارن بازتابی پراکنش مناسب‌اند و نمی‌توان آن‌ها را برای هر منطقه جنگلی تعمیم داد (Minh et al., 2014).

اساساً در روش‌های مبتنی بر RVoG، برآورد کوهرنسی‌های خالص حجمی (فقط حجمی)<sup>۴</sup> و خالص زمینی (فقط زمینی)<sup>۵</sup> نقش مهمی در فرآیند بازیابی ارتفاع دارند. به عنوان مثال، در روش تفاضلی مدل رقومی ارتفاعی (DEM)<sup>۶</sup> (Cloude, 2005)، معمولاً کوهرنسی کانال‌های HV و HH-VV به ترتیب به عنوان کوهرنسی‌های فقط حجمی و فقط زمینی در نظر گرفته می‌شوند. در این تحقیق، جهت بهبود برآورد واقعی از

1. Double-Bounce                      2. Random Volume  
3. Adaptive                              4. Volume Only  
5. Ground Only                        6. Digital Elevation Model  
7. Theoretical Background



شکل ۱. مدل معکوس‌گیری RVoG

هدف اصلی روش‌هایی که از مدل RVoG جهت برآورد ارتفاع استفاده می‌کنند، بازیابی ارتفاع طی (h<sub>v</sub>) یک فرآیند معکوس‌گیری است. برای این منظور، معمولاً سه روش مرسوم بازیابی ارتفاع جنگل که عبارت‌اند از روش تفاضلی DEM، روش دامنه کوه‌رنسی و روش ترکیبی (فاز و کوه‌رنسی) (Cloude, 2005) به کار برده می‌شوند. در ادامه هر یک از این روش‌ها بیان و تشریح خواهند شد.

#### ۲-۱-۱- روش‌های مرسوم بازیابی ارتفاع جنگل

در این قسمت، روش‌های مرسوم بازیابی که از مدل RVoG تبعیت می‌کنند، بیان و تشریح خواهند شد.

#### ۲-۱-۱-۱- روش تفاضلی DEM

در این روش، دو پلاریزاسیون<sup>۲</sup> که به صورت مجزا از بالای تاج پوشش و از روی سطح زمین پراکنش می‌کنند، مشخص شده و در نتیجه برآورد مستقیمی از ارتفاع به صورت زیر به دست می‌آید:

$$h_v = \frac{\arg(\gamma_{\bar{w}_V}) - \arg(\gamma_{\bar{w}_G})}{k_z}, \quad k_z = \frac{4\pi\Delta\theta}{\lambda \sin \theta_0} \quad (2)$$

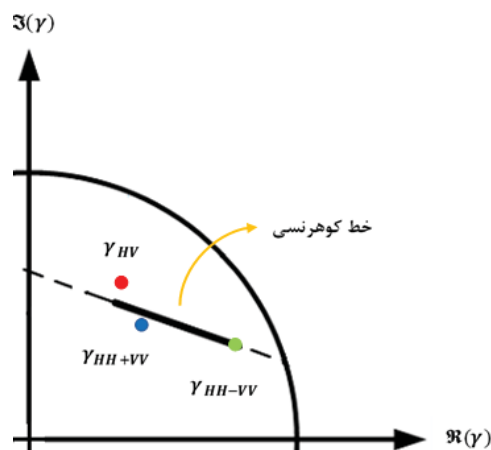
که در آن،  $\bar{w}_V$  و  $\bar{w}_G$  به ترتیب پلاریزاسیون‌های اشباع حجمی (فقط حجمی) و اشباع زمینی (فقط زمینی) هستند. همچنین، عدد موج قائم تداخل‌سنجی،  $\Delta\theta$  اختلاف زاویه بین نقاط انتهایی خط مبنا از پیکسل زمینی،  $\lambda$  طول موج و  $\theta_0$  زاویه فرود<sup>۳</sup> می‌باشند.

مطابق با مدل RVoG، کوه‌رنسی مختلط تداخل‌سنجی ( $\gamma$ ) به صورت زیر بیان می‌شود (Papathanassiou and Cloude, 2001):

رابطه (۱)

$$\gamma(\bar{w}) = \exp(i\varphi_0) \frac{\gamma_V + m(\bar{w})}{1+m(\bar{w})} = \exp(i\varphi_0) \left[ \gamma_V + \frac{m(\bar{w})}{1+m(\bar{w})} (1 - \gamma_V) \right]$$

که در آن  $\bar{w}$  مکانیزم پراکنش، و  $\varphi_0$  فاز مربوط به توپوگرافی زمین است.  $m$  نسبت دامنه زمین به حجم است که برای نفوذ در کل حجم به حساب می‌آید. نهایتاً،  $\gamma_V$  اشاره به کوه‌رنسی مختلط فقط حجمی دارد که تابعی از ضریب متوسط میرایی ( $\sigma$ ) و ارتفاع ( $h_v$ ) است. همان‌طور که از معادله (۱) مشاهده می‌شود، مقادیر مختلط کوه‌رنسی به صورت هندسی بر روی یک خط راست در دایره مختلط واحد (CUC)<sup>۱</sup> قرار می‌گیرند (شکل (۲) را ببینید).



شکل ۲. تفسیر هندسی مکان هندسی کوه‌رنسی‌ها در بخشی از CUC.  $\Re$  و  $\Im$  به ترتیب بیانگر قسمت‌های حقیقی و موهومی کوه‌رنسی هستند

1. Complex Unit Circle      2. Polarization  
3. Incidence Angle

## ۲-۱-۱-۲- روش دامنه کوهرنسی

این روش، معمولاً در مناطقی با کوهرنسی پایین استفاده می‌شود، چراکه در این مناطق برآورد فاز زمین ( $\varphi_0$ ) کاری سخت و دشوار است. در این حالت، می‌توان از راه‌حل‌های ارتفاعی استفاده کرد. یک راه‌حل ممکن، صرف‌نظر کردن کامل از فاز کوهرنسی و انتخاب یک پلاریزاسیون با نسبت پراکنش زمین به حجم ( $m$ ) پایین است. سپس، دامنه کوهرنسی در این پلاریزاسیون جهت برآورد ارتفاع به صورت زیر مورد استفاده قرار می‌گیرد:

$$\min_{h_V} L_1 = \left\| \left| \gamma_{\overline{w}_V} \right| - \left| \frac{p}{p_1} \frac{e^{p_1 h_V} - 1}{e^{p h_V} - 1} \right| \right\| \quad (3)$$

که در آن:

$$p = \frac{2\sigma}{\cos\theta_0}, \quad p_1 = p + ik_z \quad (4)$$

## ۲-۱-۱-۳- روش ترکیبی (فاز و کوهرنسی)

این روش، بر اساس ترکیب دو روش تفاضلی DEM و دامنه کوهرنسی است. این روش، از نظر زمان محاسباتی خیلی سریع بوده و به سادگی قابل پیاده‌سازی است. علاوه بر این، روش ترکیبی نسبت به تغییرات در میرایی موج و یا ساختار قائم تاج پوشش مقاوم است. این روش، نیازمند انتخاب دو تداخل‌نما<sup>۱</sup> است: اولی، برای یک پلاریزاسیون فقط حجمی و دومی، برای یک پلاریزاسیون فقط زمینی. بنابراین، ارتفاع به صورت زیر برآورد می‌شود:

$$h_V = \frac{\arg(\gamma_{\overline{w}_V}) - \hat{\phi}}{k_z} + \varepsilon \frac{2\text{sinc}^{-1}(|\gamma_{\overline{w}_V}|)}{k_z} \quad (5)$$

که در آن:

$$\hat{\phi} = \arg(\gamma_{\overline{w}_V} - \gamma_{\overline{w}_G} (1 - L_{\overline{w}_G})) , \quad 0 \leq L_{\overline{w}_G} \leq 1$$

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

$$A = |\gamma_{\overline{w}_G}|^2 - 1$$

$$B = 2\Re((\gamma_{\overline{w}_V} - \gamma_{\overline{w}_G})\gamma_{\overline{w}_G}^*)$$

$$C = |\gamma_{\overline{w}_V} - \gamma_{\overline{w}_G}|^2$$

رابطه (۶)

همان‌طور که از معادله (۵) مشاهده می‌شود، ارتفاع

به صورت مجموعی از دو جزء برآورد می‌شود. جزء اول،

فقط برآوردی از ارتفاع توسط اختلاف فاز بین نقطه

زمینی و نقطه کوهرنسی فقط حجمی است، که به وسیله جزء دوم تصحیح و افزایش می‌یابد. این تصحیح، با انطباق دامنه کوهرنسی مشاهده شده به مدل ساده تابع سینک<sup>۲</sup> برای میرایی برابر با صفر به دست می‌آید. این مرحله، نیازمند مقایسه با یک جدول جستجو (LUT)<sup>۳</sup> یک بعدی است، که محدوده این LUT توسط اولین صفر تابع سینک تنظیم می‌شود. در این روش، انتخاب پارامتر وزن‌دهی  $\varepsilon$  بسیار مهم است و بایستی به درستی انتخاب شود، تا معادله (۵) نسبت به تغییرات میرایی موج مقاوم باشد. در حالت میرایی برابر با صفر، به راحتی نشان داده می‌شود که باید  $\varepsilon = 0.5$  انتخاب شود، تا برآوردی واقعی از ارتفاع حاصل شود (البته به‌دون در نظر گرفتن ساختار قائم تاج پوشش). در حالت کلی میرایی برابر با غیر صفر،  $\varepsilon$  باید کاهش یابد، و در حالت حدی میرایی برابر با بینهایت،  $\varepsilon$  به سمت صفر، و مرکز فاز به سمت ارتفاع واقعی میل می‌کنند (Cloude, 2005).

در هر یک از روش‌های مذکور، پلاریزاسیون HV اغلب جهت برآورد کوهرنسی فقط حجمی ( $\gamma_{\overline{w}_V}$ ) (با این فرض که شامل هیچ سهمی از پراکنش زمینی نمی‌شود) در نظر گرفته می‌شود. از این رو، ارتفاع‌های برآورد شده همیشه با مقدار واقعی خود اختلاف دارند، چراکه سهم‌های پراکنش حجمی و زمینی، به دلیل وجود عمق نفوذهای متفاوت موج الکترومغناطیس، همیشه در تمام پلاریزاسیون‌ها باهم مخلوط می‌شوند (Fu et al., 2015). در نتیجه، کوهرنسی فقط حجمی لزوماً به پلاریزاسیون HV مربوط نمی‌شود. این مطلب، برای برآورد کوهرنسی فقط زمینی ( $\gamma_{\overline{w}_G}$ ) نیز صادق است.

## ۲-۲- تکنیک تجزیه مدل مبنای داده‌های PolInSAR

هدف از اجرای تکنیک‌های تجزیه مدل مبنای، ارائه تفسیری بر اساس قیود فیزیکی محسوسی است که

1. Interferogram  
3. Look Up Table

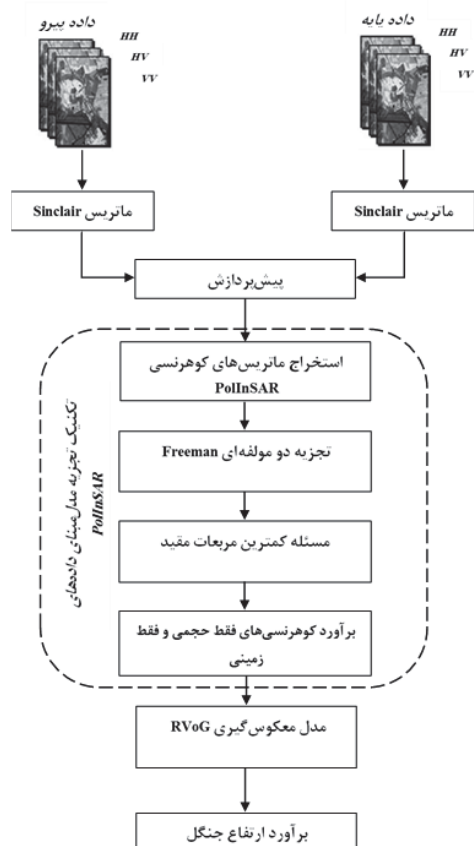
2. Sinc

رابطه (۸)

که در آن  $f_V$  و  $\rho$  به سهم جزء پراکنش حجمی مربوط می‌شوند و  $i = \sqrt{-1}$ .

### ۳- روش پیشنهادی این تحقیق

در این بخش، روشی نوین جهت برآورد ارتفاع جنگل از داده‌های PolInSAR تک خط مبنایی بر اساس مدل معکوس گیری RVoG و تکنیک تجزیه مدل مبنای داده‌های PolInSAR معرفی می‌شود. فلوجارت روش پیشنهادی این تحقیق جهت برآورد ارتفاع جنگل در شکل (۳) نشان داده شده است.



شکل ۳. فلوجارت روش پیشنهادی مورد استفاده در این تحقیق

1. Bragg
2. Single-Bounce

سبب عدم تغییر در پایه پلاریزاسیون موج می‌شوند. این تکنیک‌ها مجموعه گسترده‌ای از الگوریتم‌های پردازش آماری داده را پوشش می‌دهد، که برای اهداف تک و یا تصادفی قابل استفاده هستند (Cloude, 2010). روش‌های بسیاری جهت تجزیه مدل مبنای داده‌های PolInSAR وجود دارد، که از جمله آن‌ها می‌توان به (Freeman and Durden, 1998; Yamaguchi et al., 2005) اشاره کرد. در این تحقیق، مطابق با مدل معکوس گیری دولایه‌ای RVoG، مدل تجزیه دو مولفه‌ای Freeman (Freeman, 2007) برای تجزیه مدل مبنای داده‌های PolInSAR در نظر گرفته شد.

### ۲-۲-۱- مدل تجزیه دو مولفه‌ای Freeman

در سال ۲۰۰۷، Freeman (Freeman, 2007) یک تکنیک تجزیه دو مولفه‌ای را برای داده‌های PolSAR مشاهده شده از جنگل پیشنهاد کرد. این روش، دو مکانیزم پراکنش را در نظر می‌گیرد: الف) پراکنش حجمی با تقارن بازتابی، و ب) پراکنش زمینی که نشان دهنده پراکنش دو انعکاسی یا پراکنش براگ<sup>۱</sup> است. بر این اساس، ماتریس کوهرنسی زمینی ( $T_G$ ) به صورت زیر به دست می‌آید:

$$T_G = \frac{f_G}{2} \begin{bmatrix} 1 + \alpha + \alpha^* + |\alpha|^2 & 1 - \alpha + \alpha^* - |\alpha|^2 & 0 \\ 1 + \alpha - \alpha^* - |\alpha|^2 & 1 - \alpha - \alpha^* + |\alpha|^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a + ib & c + id & 0 \\ c - id & e + if & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

رابطه (۷)

که در آن  $f_G$  و  $\alpha$  به ترتیب جزء پراکنش دو انعکاسی یا تک انعکاسی<sup>۲</sup> هستند و  $i = \sqrt{-1}$ . متقابلاً، ماتریس کوهرنسی حجمی ( $T_V$ ) نیز به صورت زیر به دست می‌آید:

$$T_V = \frac{f_V}{2} \begin{bmatrix} 2 + \rho + \rho^* & -\rho + \rho^* & 0 \\ \rho - \rho^* & 2 - \rho - \rho^* & 0 \\ 0 & 0 & 2(1 - \rho) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l + im & n + io & 0 \\ n - io & p + iq & 0 \\ 0 & 0 & r + is \end{bmatrix}$$

correlation و به صورت زیر تجزیه شود:

$$\Omega_{12} = f_G \Omega_G + f_V \Omega_V \quad (12)$$

که در آن  $\Omega_G$  و  $\Omega_V$  به ترتیب ماتریس‌های کوهرنسی مربوط به اجزاء زمینی و حجمی هستند. تحت فرض استقلال پلاریزاسیون تمام منابع ناهمبستگی، جهت ساده‌سازی تقریب، معادله (۱۲) می‌تواند به صورت زیر بازنویسی شود (Neumann et al., 2010):

$$\Omega_{12} = f_G T_G \gamma_G + f_V T_V \gamma_V \quad (13)$$

که در آن  $\gamma_G$  و  $\gamma_V$  به ترتیب کوهرنسی‌های مختلط تداخل‌سنجی فقط زمینی و فقط حجمی هستند.

بنابراین، با ترکیب معادلات (۱۱) و (۱۳) یک دستگاه معادلات خطی به صورت زیر حاصل می‌شود:

$$\begin{bmatrix} A & B + iC & 0 \\ D + iE & F & 0 \\ 0 & 0 & G \end{bmatrix} = f_G \begin{bmatrix} a + ib & c + id & 0 \\ c - id & e + if & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \gamma_G + f_V \begin{bmatrix} l + im & n + io & 0 \\ n - io & p + iq & 0 \\ 0 & 0 & r + is \end{bmatrix} \gamma_V \quad (14)$$

معادله (۱۴)، یک دستگاه پنج معادله (عناصر ماتریس  $\Omega_{12}$ ) و دو مجهول ( $\gamma_G$  و  $\gamma_V$ ) است. ذکر این نکته ضروری است، که طبق معادله (۱) کوهرنسی‌های مختلط فقط زمینی و فقط حجمی می‌بایست بر روی خط مستقیم کوهرنسی در داخل CUC قرار بگیرند. بنابراین، حل دستگاه معادله (۱۴)، به حل یک مسئله کمترین مربعات مقید تبدیل می‌شود. جهت حل این مسئله مقید، از CVX (Grant and Boyd, 2014) (که بسته‌ای جهت تعیین و حل مسائل محدب است) استفاده شد. در ادامه، خروجی‌های فرآیند تجزیه مدل مبنای داده‌های PolInSAR ( $\gamma_G$  و  $\gamma_V$ ) در مدل معکوس‌گیری RVoG مورد استفاده قرار گرفتند، و

ابتدا، ماتریس‌های پس‌پراکنش Sinclair ( $S_i$ ) از هر دو داده پایه<sup>۱</sup> و پیرو<sup>۲</sup> به صورت داده‌های مختلط تک منظره (SLC)<sup>۳</sup> استخراج می‌شوند. سپس در مرحله پیش‌پردازش، داده‌های SLC تولید شده به صورت‌های رادیومتریکی و پلاریمتریکی، کالیبره و سپس هم‌مرجع<sup>۴</sup> می‌شوند. نهایتاً، تغییرات فاز پس‌زمینه، با ضرب تداخل‌نما در مزدوج مختلط فازی که به اصلاح "زمین مسطح"<sup>۵</sup> نامیده می‌شود، حذف می‌شود.

در ادامه، ماتریس‌های کوهرنسی PolInSAR، شامل ماتریس‌های کوهرنسی پلاریمتریک ( $T_{11}$  و  $T_{22}$ ) و cross-correlation ( $\Omega_{12}$ )، به صورت زیر استخراج می‌شوند (Cloude and Papathanassiou, 1998):

$$T_6 = \langle \vec{k}_6 \vec{k}_6^{*t} \rangle = \begin{bmatrix} T_{11} & \Omega_{12} \\ \Omega_{12}^{*t} & T_{22} \end{bmatrix}, \quad \vec{k}_6 = \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \end{bmatrix} \quad (9)$$

که در آن (...) میانگین‌گیری زمانی یا مکانی را نشان می‌دهد.  $\vec{k}_6$  بردار تداخل‌سنجی پلاریمتریک هدف، و  $\vec{k}_1$  و  $\vec{k}_2$  بردارهای هدف هستند. نهایتاً،  $*t$  اشاره به عملگر ترانهاده مزدوج دارد.

سپس، بر اساس فرضیه ثابت پلاریمتریک (Ferro-Famil et al., 2003)، یک برآورد بیشینه شباهت<sup>۶</sup> از ماتریس کوهرنسی پلاریمتریک ( $\hat{T}$ ) به صورت زیر به دست می‌آید (Ferro-Famil and Neumann, 2008):

$$\hat{T} = \frac{T_{11} + T_{22}}{2} \quad (10)$$

سپس، این ماتریس با استفاده از مدل تجزیه دو مولفه‌ای Freeman (Freeman, 2007) به اجزاء زمینی و حجمی تجزیه می‌شود:

$$\hat{T} = f_G T_G + f_V T_V \quad (11)$$

که در آن  $T_G$  و  $T_V$  به ترتیب ماتریس‌های کوهرنسی زمینی و حجمی هستند. همچنین،  $f_G$  و  $f_V$  به ترتیب فاکتورهای سهم مربوط به اجزاء زمینی و حجمی هستند.

به‌طور مشابه، ماتریس کوهرنسی cross-correlation ( $\Omega_{12}$ ) می‌تواند به صورت یک ترکیب خطی از ماتریس‌های تداخل‌سنجی پلاریمتریک cross-

- |                        |                       |
|------------------------|-----------------------|
| 1. Master              | 2. Slave              |
| 3. Single Look Complex | 4. Co-Register        |
| 5. Flat Earth          | 6. Maximum Likelihood |



فرض بر این است که عملیات هم‌مرجع‌سازی<sup>۱</sup> داده‌های پایه و پیرو نسبت به هم به بهترین شکل صورت گرفته است و اثرات ناشی از آن تا حد لازم حذف شده است. همچنین فرض بر آن است که هیچ‌گونه عدم همبستگی زمانی<sup>۲</sup> بین داده‌ها وجود ندارد. مشخصات کامل داده‌های اول و دوم مورد استفاده در این تحقیق، در جداول (۱) نشان داده شده است.

سناریوی شبیه‌سازی شده از داده‌های فوق، مربوط به یک منطقه جنگلی با درختان کاج است. تصاویر شبیه‌سازی شده منطقه مورد مطالعه در شکل (۴) نمایش داده شده است.

سپس روش‌های تفاضلی DEM، دامنه کوه‌رنسی و نیز ترکیبی (فاز و کوه‌رنسی) بر کوه‌رنسی‌های برآورده شده اجرا و پیاده‌سازی شدند. نهایتاً، ارتفاع جنگل با استفاده از هر سه روش برآورد شد.

#### ۴- داده‌ها و منطقه مطالعاتی

در این تحقیق، از شبیه‌ساز نرم‌افزار PolSARPro جهت تولید مجموعه داده‌های PolInSAR در دو باند L و P استفاده شد. این شبیه‌ساز، قابلیت تولید داده‌های PolInSAR با زوایای فرود، طول موج‌ها و نیز پارامترهای زمینی (شامل نرمی، زبری و رطوبت) مختلف را دارد. در استفاده از داده‌های شبیه‌سازی شده

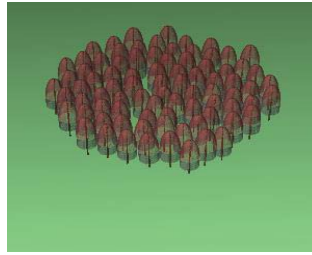
جدول ۱. مشخصات مجموعه داده‌های اول و دوم مورد استفاده در این تحقیق

مشخصه	مقدار	واحد
هندسی	ارتفاع سکو	۳۰۰۰ متر
	زاویه فرود	۴۵ درجه
	خط مبنای افقی	۱۰ متر
	خط مبنای قائم	۱ متر
سامانه‌ای	فرکانس مرکزی	۱/۳ (باند L) و ۰/۴۳۳ (باند P)
	قدرت تفکیک مکانی در راستای آزیموت	۱/۵ متر
	قدرت تفکیک مکانی در راستای رنج	۱/۰۶۰۶۶ متر
سطح زمین	ویژگی‌های سطح	بسیار نرم
	محتوای رطوبت زمین	۴
	شیب زمین در راستای آزیموت	۰/۲ درصد
	شیب زمین در راستای رنج	۱۰ درصد
جنگل	گونه درختی	کاج
	ارتفاع درختان	۱۸ متر
	چگالی جنگل	۳۰۰ ساقه بر هکتار
	مساحت جنگل	۰/۲۸۲۷۴۵ هکتار

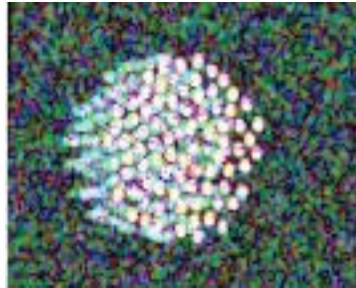
1. Co-registration

2. Temporal Decorrelation

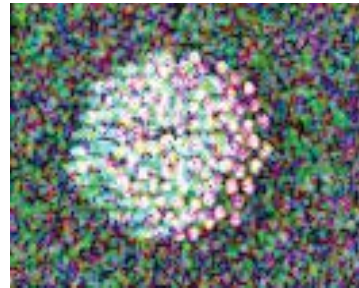
ارائه روشی نوین جهت برآورد ارتفاع جنگل ...



(الف)



(پ)



(ب)

شکل ۴. منطقه مطالعاتی اول و دوم: الف) تصویر جنگل کاج شبیه‌سازی شده، ب) تصویر رنگی بر مبنای Pauli در باند L، و پ) تصویر رنگی بر مبنای Pauli در باند P

همچنین جدول (۲) مشخصات کامل مجموعه

داده‌های سوم و چهارم را نشان می‌دهد.

جدول ۲. مشخصات مجموعه داده‌های سوم و چهارم مورد استفاده در این تحقیق

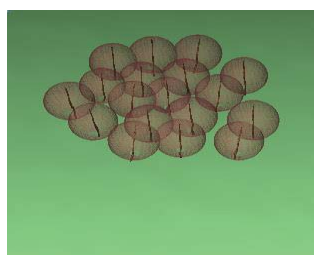
واحد	مقدار	مشخصه	
متر	۳۰۰۰	ارتفاع سکو	هندسی
درجه	۴۵	زاویه فرود	
متر	۱۰	خط مبنای افقی	
متر	۱	خط مبنای قائم	
گیگا هرتز	۱/۳ (باند L) و ۰/۴۳۳ (باند P)	فرکانس مرکزی	سامانه‌ای
متر	۱/۵	قدرت تفکیک مکانی در راستای آزیموت	
متر	۱/۰۶۰۶۶	قدرت تفکیک مکانی در راستای رنج	
-	بسیار زیر	ویژگی‌های سطح	سطح زمین
-	۸	محتوای رطوبت زمین	
درصد	۲	شیب زمین در راستای آزیموت	
درصد	۰/۱	شیب زمین در راستای رنج	
-	برگریز	گونه درختی	جنگل
متر	۱۸	ارتفاع درختان	
ساقه بر هکتار	۳۰۰	چگالی جنگل	
هکتار	۰/۲۸۲۷۴۵	مساحت جنگل	

روش‌های مرسوم بازیابی ارتفاع جنگل ارائه و ارزیابی می‌شوند. برای این منظور، روش پیشنهادی و روش‌های مرسوم بر داده‌های PolInSAR شبیه‌سازی شده بر روی هر چهار مجموعه داده در دو باند L و P اجرا و پیاده‌سازی شدند. اشکال (۵) و (۶) نتایج برآورد ارتفاع جنگل را با استفاده از هر روش در باند L و به ترتیب برای مناطق جنگلی با درختان کاج و برگ‌ریز نشان می‌دهند.

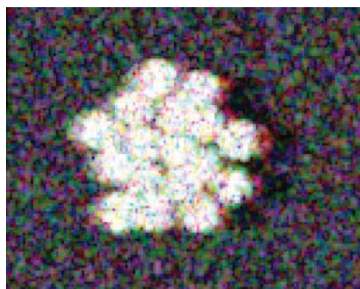
تصاویر شبیه‌سازی شده مجموعه داده‌های سوم و چهارم، که مربوط به یک منطقه جنگلی با درختان برگ‌ریز است، در شکل (۵) نمایش داده شده است.

#### ۵- نتایج تجربی این تحقیق، بحث و بررسی

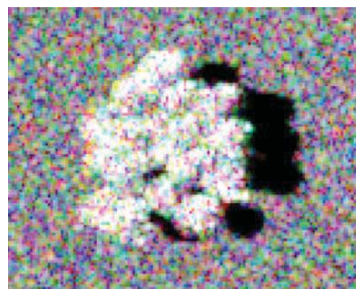
در این قسمت، نتایج به‌دست آمده از روش پیشنهادی و



(الف)

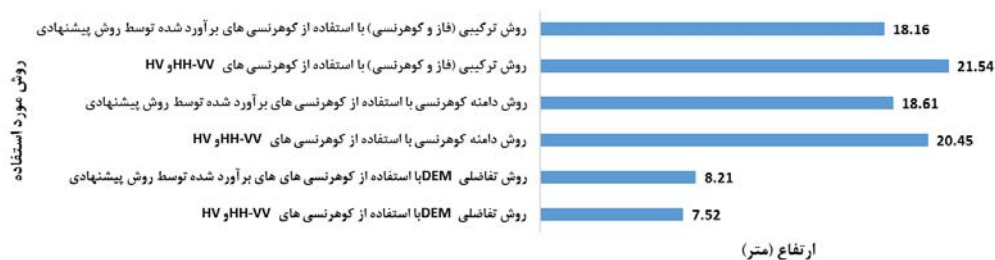


(پ)



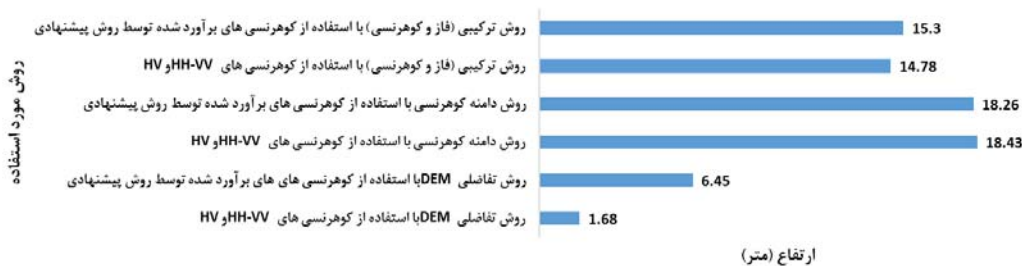
(ب)

شکل ۵. منطقه مطالعاتی سوم و چهارم: الف) تصویر جنگل با درختان برگ‌ریز شبیه‌سازی شده، ب) تصویر رنگی بر مبنای Pauli در باند L، و پ) تصویر رنگی بر مبنای Pauli در باند P



شکل ۵. نتایج برآورد ارتفاع جنگل در باند L در منطقه جنگلی با درختان کاج (ارتفاع واقعی = ۱۸ متر)

### ارائه روشی نوین جهت برآورد ارتفاع جنگل ...

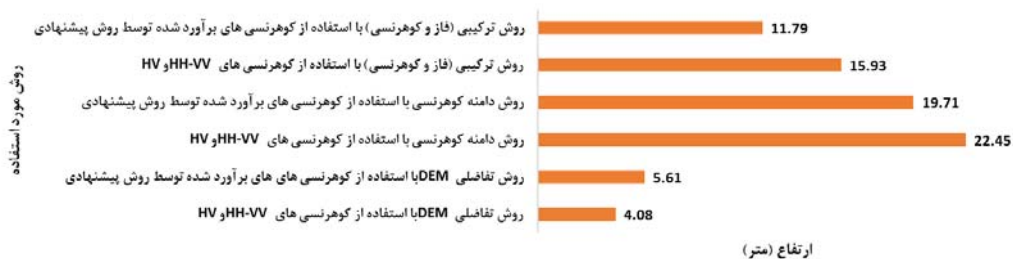


شکل ۶. نتایج برآورد ارتفاع جنگل در باند L در منطقه جنگلی با درختان برگ‌ریز (ارتفاع واقعی = ۱۸ متر)

همچنین مشاهده می‌شود که به‌صورت کلی، روش تفاضلی DEM کمترین مقدار برآورد را برای ارتفاع جنگل نسبت به سایر روش‌ها در هر دو منطقه جنگلی دارد. علت آن است که مرکز فاز کوهرنسی حجمی می‌تواند هرجایی بین نصف ارتفاع جنگل و بالای تاج پوشش قرار گیرد. مکان واقعی این فاز، به دو ویژگی پوشش‌های گیاهی بستگی دارد: الف) میانگین میرایی موج و ب) تغییر در ساختار قائم تاج پوشش. در درختان با تاج پوشش کم، میرایی موج کوچک و در نتیجه مرکز فاز (به علت ساختار) به تاج پوشش درختان نزدیک‌تر است، و بالعکس. این ابهام در موقعیت فاز، جزء ذاتی در روش‌های تک خط مبنایی است و جهت غلبه بر آن بایستی از روش‌های تصحیح مدل مبنای استفاده کرد.

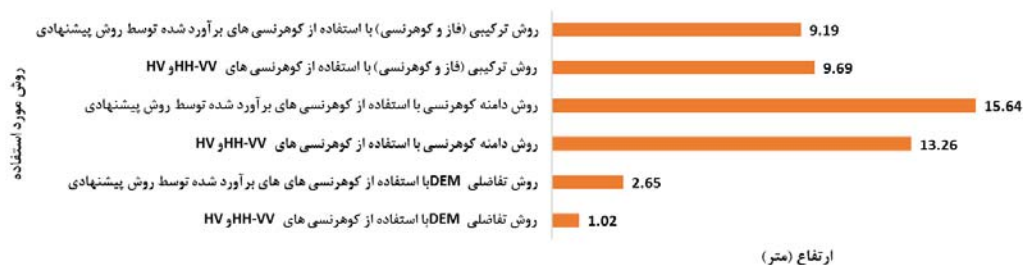
نتایج برآورد ارتفاع جنگل با استفاده از هر روش در باند P و در مناطق جنگلی با درختان کاج و برگ‌ریز به ترتیب در اشکال (۷) و (۸) نشان داده شده است.

همان‌طور که از اشکال (۵) و (۶) مشاهده می‌شود، استفاده از کوهرنسی‌های برآورد شده توسط روش پیشنهادی ( $\gamma_V$  و  $\gamma_G$ ) نتایج بهتری را در مقایسه با استفاده از کوهرنسی‌های HH-VV (به‌عنوان کوهرنسی زمینی) و HV (به‌عنوان کوهرنسی حجمی) در برآورد ارتفاع جنگل ثمر داده است. به‌عنوان مثال، در منطقه جنگلی با درختان کاج و در روش‌های تفاضلی DEM، دامنه کوهرنسی و ترکیبی (فاز و کوهرنسی) به‌ترتیب  $0/69$  متر،  $1/84$  متر و  $3/38$  متر بهبود در برآورد ارتفاع حاصل شده است. در ضمن مشاهده می‌شود که روش‌های دامنه کوهرنسی (در هر دو منطقه جنگلی) و ترکیبی (در منطقه جنگلی با درختان کاج) با استفاده از کوهرنسی‌های برآورد شده توسط روش پیشنهادی، نتایج نزدیک به هم و بسیار نزدیک به مقدار واقعی را در برآورد ارتفاع جنگل حاصل کرده‌اند. این موضوع نشان‌دهنده کارآمدی روش پیشنهادی در برآورد هرچه بهتر و دقیق‌تر کوهرنسی‌های فقط زمینی و فقط حجمی (که نقش مهمی در الگوریتم‌های مرسوم بازیابی دارند) است.



شکل ۷. نتایج برآورد ارتفاع جنگل در باند P در منطقه جنگلی با درختان کاج (ارتفاع واقعی = ۱۸ متر)

## امیر آقابالائی و همکاران



شکل ۸. نتایج برآورد ارتفاع جنگل در باند P در منطقه جنگلی با درختان برگ‌ریز (ارتفاع واقعی = ۱۸ متر)

به نفوذ بیشتر امواج الکترومغناطیس در باند P، انتظار می‌رود که میرایی موج نیز بیشتر باشد. بنابراین، با در نظر گرفتن یک مقدار اصلاح شده برای  $\epsilon$  می‌توان به نتایج بهتری در برآورد ارتفاع جنگل با استفاده از روش ترکیبی (فاز و کوهرنسی) دست یافت.

در انتها، جهت مقایسه هرچه بهتر روش پیشنهادی این تحقیق با نتایج سایر تحقیقات انجام شده در این حوزه، نتایج روش پیشنهادی با نتایج روش (Hosseini et al., 2016) نیز مقایسه و ارزیابی شد. در مقاله مذکور، حسینی و همکاران نیز روش‌های مورد استفاده در این تحقیق (شامل روش‌های تفاضلی DEM، دامنه کوهرنسی و ترکیبی) را جهت برآورد ارتفاع به کار بردند، با این تفاوت که از الگوریتم‌های شعاع عددی<sup>۱</sup> (Colin et al., 2005) و تنوع فاز<sup>۲</sup> (Tabb et al., 2002) جهت بهینه‌سازی کوهرنسی استفاده کردند. نتایج این مقایسه به صورت جدول (۳) قابل مشاهده است:

با توجه به اشکال (۷) و (۸)، همان‌گونه که انتظار می‌رفت، در باند P نیز روش پیشنهادی عملکرد بهتری را در برآورد ارتفاع جنگل با گونه‌های درختی مختلف (کاج و برگ‌ریز) حاصل کرده است. در ضمن مشاهده می‌شود که به صورت کلی، ارتفاع‌های برآورد شده توسط روش دامنه کوهرنسی با استفاده از کوهرنسی‌های برآورد شده و یا کوهرنسی‌های HH-VV و HV بیش از سایر روش‌ها است (بالاخص در منطقه جنگلی با درختان کاج)، چراکه که این روش، از فاز کوهرنسی صرف نظر می‌کند و به تغییرات میرایی و ساختار قائم حساس است.

همچنین مشاهده می‌شود که در باند P، روش ترکیبی با استفاده از کوهرنسی‌های برآورد شده توسط پیشنهادی نتایج خوبی را ثمر نداده است (بر خلاف باند L). دلیل این را می‌توان در پارامتر تصحیح  $\epsilon$  بررسی کرد. چراکه در این تحقیق مقدار این پارامتر،  $0.5$  در نظر گرفته شد، یعنی با فرض میرایی برابر با صفر. در صورتی که با توجه

جدول ۳. مقایسه نتایج روش پیشنهادی با نتایج روش (Hosseini et al., 2016)

بر روی داده‌های شبیه‌سازی شده یک منطقه جنگلی در باند P

ارتفاع واقعی	روش ترکیبی	روش دامنه کوهرنسی	روش تفاضلی DEM	روش پیشنهادی این تحقیق
۲۰ متر	۱۰/۰۹ متر	۲۰/۵۶ متر	۶/۴۹ متر	روش (Hosseini et al., 2016)
	۱۸/۳۵ متر	۲۸/۵۷ متر	۶/۳۶ متر	

1. Numerical Radius
2. Phase Diversity

نرم افزار PolSARPro در دو باند L و P نشان دادند که روش پیشنهادی این تحقیق نتایج بهتری را در برآورد ارتفاع جنگل حاصل می کند. به ویژه آن که روش پیشنهادی می تواند برآورد کوهرنسی های فقط زمینی و فقط حجمی را بهبود دهد.

#### منابع

- Aghabalaei, A., Ebadi, H. & Maghsoudi, Y., 2019, **Forest height estimation based on the RVoG inversion model and the PolInSAR decomposition technique**, International Journal of Remote Sensing 41, 2684-2703.
- Ballester-Berman, J.D. & Lopez-Sanchez, J.M., 2010, **Applying the Freeman-Durden decomposition concept to polarimetric SAR interferometry**, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 48, 466-479.
- Cloude, S., 2010, **Polarisation: applications in remote sensing**, Oxford University Press.
- Cloude, S., Papathanassiou, K., 2003, **Three-stage inversion process for polarimetric SAR interferometry**, IEE Proceedings-Radar, Sonar and Navigation 150, 125-134.
- Cloude, S.R., 2005, **POL-InSAR training course**, Radio Science.
- Cloude, S.R., Papathanassiou, K.P., 1998, **Polarimetric SAR interferometry**, IEEE Transactions on geoscience and remote sensing 36, 1551-1565.
- Colin, E., Titin-Schnaider, C., Tabbara, W., 2005, **An interferometric coherence optimization method in radar polarimetry for high-resolution imagery**, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 44, 167-175.
- با توجه به جدول فوق، ملاحظه می شود که روش پیشنهادی این تحقیق نتایج بهتری را در برآورد ارتفاع نسبت به روش (Hosseini et al., 2016) به ویژه در روش های تفاضلی DEM و دامنه کوهرنسی به ترتیب با ۰/۱۳ متر و ۸/۰۱ متر بهبود حاصل کرده است. در ضمن علت عدم میزان کارآمدی مناسب روش پیشنهادی نسبت به روش (Hosseini et al., 2016) در استفاده از روش ترکیبی را می توان نفوذ بیش از حد امواج الکترومغناطیس در باند P دانست. چراکه در مدل RVoG فرض بر آن است که پراکنش حجمی قوی از بالای تاج پوشش درختان ناشی می شود. این درحالی است که در باند P، بیشترین پراکنش از قسمت های میانی و پایینی تاج پوشش ناشی می شود. به عبارت دیگر، در مشاهدات باند P، همه کانال ها شامل سهم پراکنش زمینی می شوند. بنابراین نتایج به دست آمده دارای خطا خواهند بود (Sun et al., 2019). علاوه بر این مقایسه، روش پیشنهادی این تحقیق بر روی داده های واقعی (غیر شبیه سازی شده) نیز بررسی و ارزیابی شده است که نتیجه آن را می توان در (Aghabalaei et al., 2019) ملاحظه کرد.

#### ۶- نتیجه گیری

پایش و مدیریت منابع طبیعی بالاخص جنگل ها، جهت برنامه ریزی و حفظ این منابع در توسعه پایدار از اهمیت زیادی برخوردار است. در این زمینه، ارتفاع جنگل، به عنوان یکی از ویژگی های مهم جنگل، نقش کلیدی در مدیریت و پایش جنگل دارد. جهت انجام این کار، تکنیک جدیدی که پلاریمتری تداخل سنجی راداری (PolInSAR) نامیده می شود، به طور گسترده جهت برآورد ارتفاع جنگل مورد استفاده قرار می گیرد. در این تحقیق، روشی نوین جهت برآورد ارتفاع جنگل بر اساس ترکیب مدل معکوس گیری حجم تصادفی بر زمین (RVoG) و تکنیک تجزیه مدل مبنای داده های PolInSAR ارائه شد. نتایج تجربی به دست آمده در این تحقیق بر روی چهار مجموعه داده شبیه سازی شده از

- Ferro-Famil, L. & Neumann, M., 2008, **Recent advances in the derivation of POL-inSAR statistics: Study and applications**, In: Synthetic Aperture Radar (EUSAR), 2008 7th European Conference on, pp. 1-4.
- Ferro-Famil, L., Reigber, A., Pottier, E. & Boerner, W.-M., 2003, **Scene characterization using subaperture polarimetric SAR data**, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 41, 2264-2276.
- Freeman, A., 2007, **Fitting a two-component scattering model to polarimetric SAR data from forests**, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 45, 2583-2592.
- Freeman, A. & Durden, S.L., 1998, **A three-component scattering model for polarimetric SAR data**, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 36, 96-973-3.
- Fu, H., Wang, C., Zhu, J., Xie, Q. & Zhao, R., 2015, **Inversion of vegetation height from PolInSAR using complex least squares adjustment method**, Science China Earth Sciences 58, 1018-1031.
- Grant, M., Boyd, S., 2014, **CVX: Matlab software for disciplined convex programming**, version 2.1.
- Hosseini, S.S., Ebadi, H. & Maghsoudi, Y., 2016, **Effectiveness of Coherence optimization on improvement of height estimation using PolInSAR techniques**, Engineering Journal of Geospatial Information Technology 4, 29-42.
- Latrache, H., Souissi, B. & Ouarzeddine, M., 2018, **Forest Height Estimation Using Adaptive Decomposition Method of Polinsar Data**, In: IGARSS 2018-2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, pp. 641-644.
- Liao, Z., He, B., Quan, X., van Dijk, A.I., Qiu, S. & Yin, C., 2019, **Biomass estimation in dense tropical forest using multiple information from single-baseline P-band PolInSAR data**, Remote sensing of environment 221, 489-507.
- Managhebi, T., Maghsoudi, Y. & Zoej, M.J.V., 2018, **An improved three-stage inversion algorithm in forest height estimation using single-baseline polarimetric SAR interferometry data**, IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters 15, 887-891.
- Mette, T., Papathanassiou, K., Hajnsek, I., Pretzsch, H. & Biber, P., 2004, **Applying a common allometric equation to convert forest height from Pol-InSAR data to forest biomass**, In: Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2004. IGARSS'04. Proceedings. 2004 IEEE International.
- Minh, N.P., Zou, B., Cai, H. & Wang, C., 2014, **Forest height estimation from mountain forest areas using general model-based decomposition for polarimetric interferometric synthetic aperture radar images**, Journal of Applied Remote Sensing 8, 083676.
- Neumann, M., Ferro-Famil, L. & Reigber, A., 2010, **Estimation of forest structure, ground, and canopy layer characteristics from multibaseline polarimetric inter-ferometric SAR data**, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 48, 1086-1104.
- Papathanassiou, K.P. & Cloude, S.R., 2001, **Single-baseline polarimetric SAR interferometry**, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 39, 2352-2363.

- Sun, X., Wang, B., Xiang, M., Fu, X., Zhou, L. & Li, Y., 2019, **S-RVoG Model Inversion Based on Time-Frequency Optimization for P-Band Polarimetric SAR Interferometry**, Remote Sensing 11, 1033.
- Tabb, M., Orrey, J., Flynn, T. & Carande, R., 2002, **Phase diversity: A decomposition for vegetation parameter estimation using polarimetric SAR interferometry**, In: Proc. EUSAR, pp. 721-724.
- Tan, N.N., Nghia, P.M. & Thuy, B.N., 2019, **Improved Three-Component Decomposition Technique for Forest Parameters Estimation from PolInSAR Image**, REV Journal on Electronics and Communications 8.
- Wenxue, F., Huadong, G., Xinwu, L., Bangsen, T. & Zhongchang, S., 2016, **Extended three-stage polarimetric SAR interferometry algorithm by dual-polarization data**, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 54, 2792-2802.
- Yamaguchi, Y., Moriyama, T., Ishido, M. & Yamada, H., 2005, **Four-component scattering model for polarimetric SAR image decomposition**, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 43, 1699-1706.
- Zhang, L., Duan, B. & Zou, B., 2017, **Research on Inversion Models for Forest Height Estimation Using Polarimetric SAR Interferometry**, ISPRS-International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLII, 659-663.