

# برآورد ارتفاع درختان جنگل با استفاده از مد DCP داده‌های Compact PolInSAR

امیر آقابالائی<sup>۱</sup>

حمید عبادی<sup>۲</sup>

یاسر مقصودی<sup>۳</sup>

تاریخ دریافت مقاله: ۹۷/۰۷/۰۳

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۸/۰۲/۲۷

\*\*\*\*\*

## چکیده

چندین مطالعه انجام شده در دهه اخیر نشان داده است که سامانه‌های تصویربرداری رادار با روزه مجازی (SAR) در مد Compact پلاریمتری (CP) می‌توانند بر معایب سامانه‌های تصویربرداری SAR در مد تمام پلاریمتریک (FP) غلبه کرده و عملکرد قابل قبولی را در کاربردهای مختلف سنجش از دور مانند مدیریت و پایش منابع مهم طبیعی از جمله جنگل‌ها ارائه دهند. در این راستا، فناوری نوینی به نام تداخل سنجی پلاریمتریک SAR (PolInSAR)، به عنوان ابزاری توانمند در این حوزه، بسیار مورد توجه قرار گرفته است. در این مقاله، عملکرد داده‌های Compact PolInSAR (C-PolInSAR) در مد ارسال و دریافت قطبش دایروی (DCP) جهت برآورد ارتفاع درختان جنگل مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. برای این منظور، روش‌های مرسوم جهت بازیابی ارتفاع درختان در مناطق جنگلی، شامل روش تفاضلی مدل رقومی ارتفاعی (DEM)، روش اندازه دامنه کوهرنسی و نیز روش ترکیبی (فاز و کوهرنسی)، بر روی این داده‌ها پیاده‌سازی شد. به منظور ارزیابی عملکرد داده‌های C-PolInSAR، نتایج حاصل از این داده‌ها با نتایج به دست آمده از داده‌های F-PollnSADR (Full PolInSAR) مقایسه و ارزیابی گردید. نتایج تجربی به دست آمده در این تحقیق بر دو مجموعه داده شبیه‌سازی شده از نرم‌افزار PolSARProSim در باندهای L و P نشان دادند که داده‌های C-PolInSAR در مد DCP، عملکرد و نتایج یکسانی نسبت به داده‌های F-PolInSAR با در نظر گرفتن HH+VV به عنوان قطبش پس‌پراکنش شده از زمین، در برآورد ارتفاع دارند. به ویژه آنکه، داده‌های C-PolInSAR در مد DCP بهبود ۰/۷۸ متری و ۰/۵۵ متری را به ترتیب در باندهای L و P نسبت به داده‌های F-PolInSAR با انتخاب HH-VV به عنوان قطبش زمین، در برآورد ارتفاع درختان حاصل کردند. علاوه بر این، به کارگیری داده‌های C-PolInSAR هنگامی که منابع سامانه‌های تصویربرداری پلاریمتریک محدود هستند، در دسترس نیستند، و نیز در طول موج‌های بلند، که قطبش ارسالی متأثر از چرخش فارادی است، می‌تواند یک راهکار مؤثر باشد. واژه‌های کلیدی: Compact PolInSAR (C-PolInSAR)، پلاریمتریک دایروی دوگانه (DCP)، برآورد ارتفاع جنگل، روش تفاضلی مدل رقومی ارتفاعی (DEM)، روش اندازه دامنه کوهرنسی، روش ترکیبی (فاز و کوهرنسی)

\*\*\*\*\*

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی نقشه برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی (نویسنده مسئول) a.ghabalaei@mail.kntu.ac.ir

۲- استاد، دانشکده مهندسی نقشه برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی ebadi@kntu.ac.ir

۳- دانشیار، دانشکده مهندسی نقشه برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی ymaghsoudi@kntu.ac.ir

## ۱- مقدمه

مختلف، و متعاقباً برآورد ارتفاع پوشش‌های گیاهی به وسیله فاز تداخل‌سنجی است.

از جمله مهمترین کاربردهای امیدبخش فناوری PolInSAR، برآورد ارتفاع درختان و بازیابی اطلاعات توپوگرافی<sup>۱۲</sup> است (Reigber, Papathanassiou, Cloude, & Moreira, 2001).

جهت نیل به این اهداف، لازم است تا یک نفوذ کافی از امواج الکترومغناطیس (EM)<sup>۱۳</sup> در پوشش‌های گیاهی وجود داشته باشد، که این کار با بهره‌گیری از امواج EM با فرکانس پایین قابل دستیابی است. در همین راستا، از یک طرف، در سامانه‌های SAR فضابرد<sup>۱۴</sup> در فرکانس پایین، بایستی چندین جنبه از سامانه در نظر گرفته شود: اثر یونسفر و چرخش فارادی<sup>۱۵</sup> مربوط به آن، ابعاد خیلی کوچک آنتن در مقایسه با طول موج و نیز عملکرد کلی سامانه. از طرف دیگر، سامانه‌های تمام پلاریمتری<sup>۱۶</sup> (FP)، علاوه بر مزایای قابل توجه، دارای معایبی از جمله حجم بالای داده جهت دانلود، پهنای نوار وسیع جهت پردازش و نیز هزینه بالا جهت طراحی سامانه هستند. جهت غلبه بر محدودیت‌های اشاره شده، مد جدیدی در سامانه‌های PolSAR پیشنهاد شده است که Compact پلاریمتری (CP) نامیده می‌شود. در معماری سامانه‌های CP، حسگر SAR یک موج قطبیده دایروی (در مدهای CTLR<sup>۱۷</sup> و DCP<sup>۱۸</sup>) و یا قطبیده خطی در جهت ۴۵ درجه (مد pi/4) را ارسال، و دو موج قطبیده به صورت افقی و عمودی (در مدهای CTRL و pi/4) و یا هر دو دایروی (در مد DCP) را دریافت می‌کند.

به ویژه آنکه، استفاده از مد DCP به دلیل ارسال و دریافت قطبش دایروی (راستگرد یا چپ‌گرد)، در مواردی که رادار دارای فرکانس پایین است، بسیار مناسب است، چراکه این نوع نحوه ارسال و دریافت قطبش، نسبت به چرخش فارادی، که به دلیل انتشار امواج با فرکانس پایین در یونسفر رخ می‌دهد، بی‌اثر است.

پایش و ارزیابی زیست‌کره<sup>۱</sup> زمین در هر مقیاس، لازمه چرخه جهانی کربن (GCC)<sup>۲</sup> است. در این راستا، جنگل‌ها نقش ضروری را در کنترل آب و هوا و نیز چرخه کربن بازی می‌کنند. به همین دلیل، به عنوان یکی از منابع طبیعی، جزء حیاتی‌ترین بستر جهت توسعه پایدار محیط زیست و پدیده‌های زیست محیطی<sup>۳</sup>، و درحقیقت زیربنایی برای هر کشور محسوب می‌شوند. با توجه به این موضوع، زیست توده<sup>۴</sup> و تبع آن ارتفاع درختان جنگل به عنوان اطلاعات کلیدی جهت پایش مناطق جنگلی شناخته می‌شوند.

به دلیل پوشش وسیع جنگل‌ها، فناوری سنسجش از دور عملی‌ترین ابزار جهت مطالعه این مناطق است. از میان داده‌های مختلف سنسجش از دوری، استفاده از داده‌های رادار با روزنه مجازی (SAR)<sup>۵</sup> به واسطه عدم وابستگی به خورشید و شرایط جوی بسیار مورد توجه می‌باشد. امروزه به طور وسیع مشخص شده است که فناوری تداخل‌سنجی پلاریمتری SAR<sup>۶</sup> (PolInSAR) سهم با ارزشی در بسیاری از حوزه‌های سنسجش از دوری به ویژه کاربردهای جنگلی دارد. این فناوری، دو فناوری پلاریمتری SAR<sup>۷</sup> (PolSAR) و تداخل‌سنجی SAR<sup>۸</sup> (InSAR) را ترکیب کرده و یک مرکز فاز پراکنشی<sup>۹</sup> به هر پیکسل اختصاص می‌دهد.

فاز تداخل‌سنجی در قطبش<sup>۱۰</sup>‌های مختلف می‌تواند اطلاعاتی از ارتفاع اهداف را در هر پیکسل به وسیله مدل‌های مناسب پراکنش ثمر دهد (K. P. Papathanassiou & Cloude, 2001). به عبارت دیگر، ایده اصلی فناوری PolInSAR تمایز بین مرکز فاز تاج پوشش<sup>۱۱</sup> و مرکز فاز زمینی با استفاده از قطبش‌های

12- Topography  
13- Electro Magnetic  
14- Spaceborne  
15- Faraday Rotation  
16- Full Polarimetry  
17- Circular Transmit-Linear Receive  
18- Dual Circular Polarization

1- Biosphere  
2- Global Carbon Cycle  
3- Ecologic  
4- Biomass  
5- Synthetic Aperture RADAR  
6- Polarimetric SAR Interferometry  
7- Polarimetry SAR  
8- Interferometry SAR  
9- Scattering  
10- Polarization  
11- Canopy

جنگل با استفاده از داده‌های C-PolInSAR، عنوان تحقیقی دیگر است که در (Truong-Loi & Dubois-Fernandez, 2010) انجام شد. در این تحقیق، امکان‌سنجی برآورد ارتفاع پوشش‌های حجمی مانند گیاهان با استفاده از این داده‌ها مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. برای این منظور، روش‌های مختلف بازبایی از داده‌های C-PolInSAR باهم مقایسه و عملکرد سامانه‌های CP نسبت به سامانه‌های FP ارزیابی شد. در سال ۲۰۱۱، Liu و همکاران (Liu, Yang, Xu, & Liao, 2011)، عملکرد داده‌های C-PolInSAR را در طبقه‌بندی<sup>۱۱</sup> داده‌های هوابرد<sup>۱۲</sup> CETC38 در کشور چین بر اساس طبقه‌بندی‌کننده پیشینه شباهت ویشارت<sup>۱۳</sup> مورد بحث و بررسی قرار دادند و تأکید نویسندگان آن، بر مقایسه بین نتایج طبقه‌بندی مدهای C-PolInSAR و مدهای بازسازی مربوطه در مقابل سامانه‌های Dual PolInSAR (D-PolInSAR) و F-PolInSAR بود.

همچنین در سال ۲۰۱۴، دقت برآورد ارتفاع پوشش‌های گیاهی با داده‌های C-PolInSAR و مدل همگن RVoG مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت.

(Arnaubec, Roueff, Dubois-Fernandez, & Réfrégier, 2014)

در این مقاله، از محدوده کرامر راثو (CR)<sup>۱۴</sup> جهت تعیین میزان کاهش دقت در برآورد ارتفاع پوشش‌های گیاهی به وسیله داده‌های C-PolInSAR بهره گرفته شد. در تحقیقی دیگر (Lavalle, Solimini, Pottier, & Desnos, 2008b)، روشی جدید جهت بهره‌برداری از داده‌های PolInSAR به منظور برآورد کمی ارتفاع درختان جنگل و در حالت کلی، پارامترهای جنگل ارائه شد. رویکرد در نظر گرفته شده در آن تحقیق قصد داشت تا داده‌های شبیه‌سازی شده از مدل پراکنش همدوس<sup>۱۵</sup> نرم‌افزار PolSARProSim و مقادیر حقیقی را برهم منطبق کند. برای نیل به این هدف، ابتدا یک تجزیه و تحلیل مدل پارامتریک جهت مطالعه وابستگی کوهرنسی تداخل-سنجی در مقابل ارتفاع درختان جنگل، چگالی تاج پوشش و

یکی از موضوعات جدی تحقیقاتی در حوزه سنجش‌از دور راداری، ارزیابی عملکرد سامانه‌های CP نسبت به سامانه‌های FP در کاربردهای مختلف است. تاکنون چند مطالعه در خصوص به کارگیری داده‌های CP در حوزه PolInSAR در مناطق جنگلی انجام شده است. Dubois-Fernandez و همکاران (Dubois-Fernandez, Angelliaume, Souyris, & Garestier, 2007) در سال ۲۰۰۷ عملکرد داده‌های با قدرت تفکیک مکانی بالای PolInSAR در باند P را بر روی پوشش‌های گیاهی منطقه جنگلی نزر<sup>۱</sup> در جنوب کشور فرانسه مورد امکان‌سنجی قرار دادند. در این راستا، پتانسیل این داده‌ها جهت بازبایی پارامترهای جنگل از داده‌های SAR، به‌ویژه CP، با استفاده از سه روش مختلف مورد بررسی قرار گرفت:

معکوس‌گیری رادیومتریک<sup>۲</sup> از المان cross-polarized، معکوس‌گیری برمبنای مدل حجم تصادفی بر روی زمین (RVoG)<sup>۳</sup> و نیز روشی برمبنای پارامتر ناهم‌سنگردی<sup>۴</sup>. در تحقیقی دیگر (Guo et al., 2014)، روش‌های تجزیه هدف<sup>۵</sup> PolInSAR بر روی داده‌های C-PolInSAR اجرا شد. برای این منظور، ماتریس cross-correlation داده‌های PolInSAR تک خط مبنایی<sup>۶</sup> به سه ماتریس ۲×۲ پراکنش مربوط به پراکنش‌های سطحی<sup>۷</sup>، دو انعکاسی<sup>۸</sup> و حجم تصادفی<sup>۹</sup> تجزیه شد. در نهایت، یک روش عددی جهت حل سیستم معادلات غیرخطی فرآیند تجزیه هدف اجرا شد. همچنین در (Lavalle, Solimini, Pottier, & Desnos, 2008a)، الگوریتم بازسازی داده‌های FP از داده‌های CP توسعه داده شد و نتایج بر داده‌های شبیه‌سازی شده PolInSAR با استفاده از درجه کوهرنسی<sup>۱۰</sup> تداخل سنجی مورد ارزیابی قرار گرفت. ارائه یک روش بهینه‌سازی جهت برآورد ارتفاع درختان

- 1- Nezer
- 2- Radiometric Inversion
- 3- Random Volume over Ground
- 4- Anisotropy
- 5- Target Decomposition
- 6- Single Baseline
- 7- Surface Scattering
- 8- Double Bounce Scattering
- 9- Random Volume Scattering
- 10- Coherency

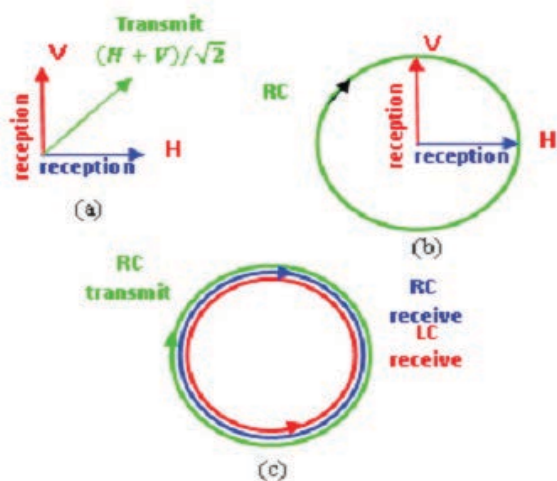
- 11- Classification
- 12- Airborne
- 13- Wishart Maximum Likelihood
- 14- Cramer-Rao
- 15- Coherent Scattering Model

جهت برآورد ارتفاع با استفاده از داده‌های F-PolInSAR و C-PolInSAR در بخش چهارم توضیح داده خواهد شد. و نهایتاً، در بخش پنجم به نتیجه‌گیری پرداخته می‌شود.

## ۲- مبانی تحقیق

### ۲-۱- Compact پلاریمتری

اخیراً یک فناوری ترکیبی<sup>۳</sup> بین FP و DP در حوزه سنجش از دور SAR بسیار مورد توجه قرار گرفته است که Compact پلاریمتری (CP) نامیده می‌شود. این نوع سامانه‌های SAR، رابطه با ارسال یک موج قطبیده کلی (نه عمودی و نه افقی) و دریافت در دو قطبش (هر دو خطی و یا هر دو دایروی) است (Raney, 2007; Souyris, Imbo, Fjortoft, Mingot, & Lee, 2005). در این پیکره‌بندی، پیچیدگی و هزینه سامانه SAR کاهش یافته، و در مقابل، عرض نوار و اخذ اطلاعات در خصوص مکانیزم‌های پراکنش به دو برابر افزایش می‌یابد. بنابراین، سامانه‌های CP در مواردی می‌توانند جایگزین سامانه‌های FP شوند. انواع مدها و حالت‌های مختلف ارسال و دریافت قطبش در این سامانه‌ها در نگاره (۱) نمایش داده شده است.



نگاره ۱: سه پیکره‌بندی سامانه‌های CP

(a): مد  $\pi/4$ ، (b) مد CTLR، و (c) مد DCP<sup>۴</sup>

(Boularbah, Ouarzeddine, & Belhadj-Aissa, 2012)

شیب زمین استفاده مورد قرار گرفت. سپس جدایی مراکز فاز پراکنش، بر داده‌های PALSAR اخذ شده از جنگل آمازون<sup>۱</sup> نشان داده شد. و نهایتاً، یک معکوس‌گیری اولیه از ارتفاع درختان بر مبنای حساسیت کوه‌رنسی در مقابل ارتفاع اجرا شد. علاوه بر تحقیقات مذکور، از جمله پژوهش‌های انجام شده در سال‌های اخیر با استفاده از داده‌های C-PolInSAR در حوزه جنگل می‌توان به این موارد اشاره کرد: تحقیق Han و همکاران (Han, Jiang, Wang, & Liu, 2018) که در سال ۲۰۱۸ به منظور بازیابی پارامترهای جنگل با اجرای روش تجزیه هدف Freeman-Durden بر روی داده‌های C-PolInSAR صورت گرفت. و نیز پژوهشی که در (Ramachandran & Dikshit, 2018) جهت بررسی و ارزیابی عملکرد داده‌های TomoSAR در مد CP به منظور بازسازی بازتاب پذیری<sup>۲</sup> سه بعدی حجم جنگل و برآورد ساختار قائم آن انجام شد. در یک جمع‌بندی می‌توان گفت که مطالعات اشاره شده در قبل، هیچ کدام به بررسی نحوه عملکرد مد DCP سامانه‌های CP جهت بازیابی پارامترهای جنگل از جمله ارتفاع نپرداخته‌اند. از اینرو، هدف اصلی این تحقیق امکان‌سنجی و بررسی قابلیت به کارگیری مد DCP داده‌های C-PolInSAR جهت برآورد ارتفاع درختان جنگل می‌باشد.

برای این منظور، داده‌های مورد نیاز این پژوهش توسط نرم‌افزار PolSARProSim (Williams et al., 2007) شبیه‌سازی شدند. در مرحله بعد، الگوریتم‌های رایج جهت بازیابی ارتفاع درخت بر روی این مجموعه داده‌ها اجرا، و نتایج به دست آمده با نتایج حاصل از مجموعه داده‌های F-PolInSAR مقایسه شدند.

مقاله پیش رو در پنج بخش تهیه و تدوین شده است. بخش اول مختصراً به مقدمه، مروری بر مطالعات و تحقیقات گذشته و نهایتاً ضرورت و اهداف تحقیق پرداخت. در بخش دوم، مبانی تحقیق، شامل مروری کوتاه بر Compact پلاریمتری و فناوری PolInSAR، بیان روش‌های مرسوم جهت برآورد ارتفاع درخت و نیز چرخش فارادی توضیح داده می‌شود. در بخش سوم، داده‌ها و منطقه مورد مطالعه بیان و شرح داده خواهند شد. پیاده‌سازی و ارزیابی نتایج به دست آمده در این تحقیق

3- Hybrid

4- Circular Transmit Linear Receive

5- Dual Circular Polarimetric

1- Amazon

2- Reflectivity

$$s_1 = w_1^1 \frac{(s_{hh}^1 + s_{vv}^1)}{\sqrt{2}} + w_1^2 \frac{(s_{hh}^1 - s_{vv}^1)}{\sqrt{2}} + w_1^3 \sqrt{2} s_{hv}^1 = \underline{w}_1^T \underline{k}_1$$

$$s_2 = w_2^1 \frac{(s_{hh}^2 + s_{vv}^2)}{\sqrt{2}} + w_2^2 \frac{(s_{hh}^2 - s_{vv}^2)}{\sqrt{2}} + w_2^3 \sqrt{2} s_{hv}^2 = \underline{w}_2^T \underline{k}_2$$

$$\Rightarrow \tilde{\gamma}(\underline{w}_1, \underline{w}_2) = \frac{E(s_1 s_2^*)}{\sqrt{E(s_1 s_1^*)} \sqrt{E(s_2 s_2^*)}} \quad (2)$$

بردارهای وزن  $\underline{w}_1$  و  $\underline{w}_2$  مکانیزم‌های پراکنش انتخاب شده توسط کاربر را در دو انتهای خط مبنا (در هندسه عمود بر جهت پرواز<sup>۴</sup>) مشخص می‌کنند. در حالت کلی، بردارهای وزن می‌توانند متفاوت باشند و هر دو به صورت بردارهای مختلط واحد به صورت معادله زیر پارامتری شوند.

(S. Cloude & Papathanassiou, 2003; S. R. Cloude & Papathanassiou, 1998):

$$\underline{w} = [w^1 \quad w^2 \quad w^3] = [\cos \alpha \quad \sin \alpha \cos \beta e^{i\phi} \quad \sin \alpha \sin \beta e^{i\mu}]^T \quad (3)$$

در حالت کلی، محصولات PolInSAR با برآورد مدل مبنای<sup>۵</sup> پارامترها به دست می‌آیند. در نتیجه، استفاده از یک مدل پراکنش  $M$  با پارامترهای  $\underline{p}$ ، ابتدا مشاهدات یک مجموعه  $\underline{q}$  ساخته شده و سپس برآورد پارامترها توسط معکوس‌گیری مدل به صورت معادله زیر به دست می‌آیند:

$$\underline{p} = M^{-1} \underline{q} \quad (4)$$

معمولاً فرآیند معکوس‌گیری با استفاده از یک روش کمترین مربعات<sup>۶</sup> (LS) تقریب زده می‌شود، یعنی پارامترها طوری انتخاب شوند که اختلاف بین مشاهدات و پیش‌بینی‌های مدل کمینه شوند.

به عنوان مثال، با توجه به معادلات به دست آمده از مدل کوهرنسی دو لایه‌ای (K. P. Papathanassiou & Cloude, 2001) RVoG می‌توان معادله (۴) را به صورت معادله زیر بازنویسی کرد:

$$\begin{cases} \gamma_1 e^{i\delta_1} = \frac{e^{i\phi_0} (\gamma(h_v, \sigma) + \mu_1)}{1 + \mu_1} = f_1(\phi_0, h_v, \sigma) \\ \gamma_2 e^{i\delta_2} = \frac{e^{i\phi_0} (\gamma(h_v, \sigma) + \mu_2)}{1 + \mu_2} = f_2(\phi_0, h_v, \sigma) \\ \gamma_3 e^{i\delta_3} = \frac{e^{i\phi_0} (\gamma(h_v, \sigma) + \mu_3)}{1 + \mu_3} = f_3(\phi_0, h_v, \sigma) \end{cases} \Rightarrow \underline{p} = \begin{bmatrix} \phi_0 \\ h_v \\ \sigma \end{bmatrix} \cdot \underline{q} = \begin{bmatrix} \tilde{\gamma}_1 \\ \tilde{\gamma}_2 \\ \tilde{\gamma}_3 \end{bmatrix} \quad (5)$$

همچنین، بردارهای پراکنش مربوط به مدهای مختلف سامانه‌های تصویربرداری CP در جدول (۱) نشان داده شده است.

جدول ۱: بردارهای پراکنش مربوط به مدهای مختلف CP

مد	قطبش‌ها	بردار پراکنش
pi/4	pi/4 H, pi/4 V	$\vec{k}_{\pi/4} = \frac{1}{\sqrt{2}} [s_{hh} + s_{vv}]$
CTRL_R	RH, RV	$\vec{k}_{RCH} = [RH] = \frac{1}{\sqrt{2}} [s_{hh} - i s_{vv}]$
CTRL_L	LH, LV	$\vec{k}_{LCH} = [LH] = \frac{1}{\sqrt{2}} [s_{hh} + i s_{vv}]$
DCP_L	LL, LR	$\vec{k}_{LLR} = \frac{1}{2} [s_{hh} + s_{vv} - i 2 s_{hv}]$
DCP_R	RR, RL	$\vec{k}_{RRR} = \frac{1}{2} [s_{hh} - s_{vv} + i 2 s_{hv}]$

## ۲-۲- تداخل‌سنجی پلاریمتریک (PolInSAR) SAR

الگوریتم‌های PolInSAR از کوهرنسی سیگنال به جای توان پس‌پراکنش<sup>۱</sup> استفاده می‌کنند (Askne, Dammert, Ulander, & Smith, 1997; Hagberg, Ulander, & Askne, 1995; Touzi, Lopes, Bruniquel, & Vachon, 1999; Zebker & Villasenor, 1992)

با دو داده مختلط تک منظره (SLC)<sup>۲</sup> هم مرجع شده<sup>۳</sup> کانال‌های  $s_1$  و  $s_2$ ، که به ترتیب متعلق به ابتدا و انتهای خط مبنا هستند، کوهرنسی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\tilde{\gamma} = \gamma e^{i\phi} = \frac{E(s_1 s_2^*)}{\sqrt{E(s_1 s_1^*)} \sqrt{E(s_2 s_2^*)}} \quad (1)$$

که در آن امید ریاضی و  $0 \leq \gamma \leq 1$  است.

در حالت کلی، برای مجموعه داده‌های FP، سه کانال SLC کالیبره شده  $s_{hh}$ ،  $s_{vv}$  و  $s_{hv}$  به عنوان ورودی الگوریتم‌های PolInSAR در نظر گرفته شده، و قبل از محاسبه کوهرنسی، تصاویر این سه کانال بر روی بردارهای وزن مختلط تعریف شده توسط کاربر ( $\underline{w}_1$  و  $\underline{w}_2$ ) به صورت زیر تولید می‌شوند:

4- Across Track  
 5- Model Based  
 6- Least Square

1- Back Scattering  
 2- Single Look Complex  
 3- Co-Register

$w_s$  منفردی وجود ندارد که برآوردی اریب<sup>۳</sup> از  $\phi_0$  حاصل کند. به همین دلیل، دومین راه، حذف نااریبی باقی مانده با استفاده از مدل RVoG و با به کارگیری یک جفت مقادیر مختلط کوهرنسی است.

از آنجاکه معادله (۵)، یک خط راست در صفحه مختلط را نشان می‌دهد، در نتیجه یک الگوریتم ساده جهت برآورد  $\phi_0$ ، برازش یک خط راست مناسب به یک جفت مقادیر کوهرنسی در  $w_s$  و  $w_v$  (که به ترتیب بردارهای وزن در قطبش‌های اشباع شده سطحی و اشباع شده حجمی هستند) می‌باشد.

تقاطع این خط با دایره واحد صفحه مختلط کوهرنسی، دو نقطه کاندیدا برای فاز زمین حاصل می‌کند. جهت حل ابهام بین این دو نقطه، فرض می‌شود که  $w_s$  نسبت به  $w_v$  مرکز فاز نزدیکتری به فاز زمین دارد. در این حالت، جهت برآورد  $\phi_0$  می‌توان مسئله را با استفاده از دو معادله اول معادله (۵) (برای  $\gamma_1$  و  $\gamma_2$ ) و قرار دادن  $\mu_1 = 0$  حل کرد. این کار منجر به حل یک معادله درجه دوم به صورت زیر می‌شود:

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

$$0 \leq L_{w_s} \leq 1$$

$$AL_{w_s}^2 + BL_{w_s} + C = 0 \Rightarrow L_{w_s} = \frac{-B - \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \quad (7)$$

$$A = |\tilde{\gamma}_{w_s}|^2 - 1$$

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

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

در حالت کلی‌تر، می‌توان از سه کوهرنسی و یا بیشتر جهت برازش خط استفاده کرد. این کار می‌تواند با برازش کمترین مربعات ساده بین اجزای حقیقی<sup>۴</sup> و موهومی<sup>۵</sup>، و یا با برازش کمترین مربعات کلی به کوهرنسی‌ها انجام شود. سپس، خط به دست آمده جهت یافتن دو نقطه تلاقی با دایره واحد به کار می‌رود، و حل ابهام بین این دو نقطه با

توجه شود که شش پارامتر مجهول و شش معادله مشاهداتی (سه کوهرنسی مختلط) وجود دارد. همچنین واضح است که سه مقدار کوهرنسی بایستی طوری انتخاب شوند که تا آنجا که ممکن است، پایداری مسئله معکوس‌گیری بیشینه شود. این کار می‌تواند از طریق یک دانش فیزیکی از مسئله (مثلاً استفاده از کانال HV برای کانال حجمی و استفاده از کانال HH برای یک کانال اشباع شده<sup>۱</sup> سطحی) و یا استفاده از یک بهینه‌کننده مناسب انجام شود. از محصولات قابل اهمیت معادله (۵)، دو المان اول بردار  $p$  می‌باشند که به ترتیب فاز زمین ( $\phi_0$ ) و ارتفاع پوشش‌های گیاهی ( $h_v$ ) نامیده می‌شوند. اگرچه، روش‌هایی جهت برآورد میزان نفوذ در شاخ و برگ (S. Cloude, Corr, & Williams, 2004) و پارامترهای سطح (S. Cloude, Krieger, & Papathanassiou, 2005) پیشنهاد شده‌اند.

همچنین می‌توان برآورد پارامترها را از طریق روش‌های مختلف معکوس‌گیری، به صورتی که در ادامه نشان داده خواهد شد، به دست آورد.

جهت شروع، نیاز به برآورد  $\phi_0$  است. دو راه اساسی جهت انجام این کار وجود دارد. اولین راه، انتخاب یک کانال قطبش از طریق انتخاب یک بردار وزن  $w_s$  (جایی که فرض می‌شود نسبت پراکنش سطح به حجم<sup>۲</sup> ( $\mu$ ) خیلی بزرگ است) می‌باشد. برای مثال در باند P، اغلب کانال HH (S. Cloude, Papathanassiou, & Reigber, 2000) و در باند L، کانال HH و یا در صورت در دسترس بودن داده‌های FP، کانال HH-VV می‌تواند انتخاب شود. پس در این حالت،  $\hat{\phi}$  (برآورد  $\phi_0$ ) به سادگی به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\hat{\phi} = \arg(\tilde{\gamma}_{w_s}) \quad (6)$$

در اینجا، هدف یافتن بهترین بردار وزن  $w_s$  است. تجزیه و تحلیل‌های گسترده از مجموعه داده‌های PolInSAR در باندهای L و P نشان داده‌اند که در حالت کلی، هیچ بردار

3- Un-bias

4- Real

5- Imagery

1- Dominated

2- Surface to Volume Ratio

ارتفاع می‌شود. یک راه‌حل دیگر، صرف‌نظر کردن کامل از فاز کوهرنسی و انتخاب یک کانال قطبش با نسبت پراکنش سطح به حجم پایین (مثلاً کانال HV) می‌باشد. سپس، دامنه کوهرنسی در این کانال جهت برآورد ارتفاع مورد استفاده قرار می‌گیرد.

یک محدودیت این روش آن است که همچنان برآورد ارتفاع نسبت به تغییرات چگالی و ساختار قائم حساس باقی می‌ماند. در این حالت، دو راه‌حل وجود دارد: در راه حل اول، مقدار میرایی<sup>۳</sup> برابر با صفر قرار داده می‌شود و مدل ساده کوهرنسی تابع سینک<sup>۴</sup> به دست می‌آید. در راه حل دوم، می‌توان یک میرایی میانگین را به صورت جدول جستجو (LUT)<sup>۵</sup> به کار برد. در هر دو راه‌حل، برآورد ارتفاع به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\min_{h_v} L_1 = \left\| \left| \tilde{\gamma}_{w_v} \right| - \left| \frac{p e^{p_1 h_v} - 1}{p_1 e^{p h_v} - 1} \right| \right\|$$

$$\text{where } \begin{cases} p = \frac{2\bar{\sigma}}{\cos \theta} \\ p_1 = p + i k_z \end{cases} \quad (9)$$

$$k_z = \frac{4\pi \Delta \theta}{\lambda \sin \theta} \approx \frac{4\pi B_n}{\lambda R \sin \theta}$$

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

می‌توان یک روش ترکیبی بر اساس تلفیق روش دامنه کوهرنسی و روش تفاضلی DEM مورد استفاده قرار داد. این روش ترکیبی، از نظر زمان محاسباتی، خیلی سریع‌تر بوده و به سادگی پیاده‌سازی می‌شود. علاوه بر این، این روش نسبت به تغییرات میرایی و یا ساختار قائم تاج پوشش مقاوم است و برآوردهای ارتفاع را با دقت ۱۰ درصد حاصل می‌کند (K. Papathanassiou, Cloude, Lisen, Mette, & Pretzsch, 2005). این روش، نیازمند انتخاب دو تداخل‌نما<sup>۶</sup> است: یکی برای کانال اشباع شده سطحی ( $w_s$ ) و دیگری برای کانال اشباع شده حجمی ( $w_v$ ). بنابراین، ارتفاع می‌تواند به صورت زیر برآورد شود:

مرتب‌سازی رنک<sup>۱</sup> مقادیر کوهرنسی حل می‌شود. معمولاً فرض می‌شود که کانال HV نسبت به کانال HH، در تاج پوشش گیاهان بیشتر است و این موضوع می‌تواند جهت حل ابهام بین دو نقطه تلاقی مورد استفاده قرار گیرد. با برآورد فاز زمین به دست آمده، مرحله بعد، برآورد ارتفاع است که در ادامه، به شرح و توضیح روش‌های مرسوم در بازیابی و برآورد ارتفاع پوشش‌های گیاهی پرداخته می‌شود.

### ۲-۳-۲- روش‌های مرسوم برآورد ارتفاع درخت

#### ۲-۳-۱- روش تفاضلی مدل رقومی ارتفاعی (DEM)<sup>۲</sup>

در این روش، همان ایده به کار برده شده در برآورد فاز زمین مورد استفاده قرار می‌گیرد تا یک کانال قطبش را که به صورت منفرد از بالای تاج پوشش گیاهان پراکنش می‌کند، مشخص کرده، و در نتیجه یک برآورد مستقیم از ارتفاع به صورت زیر حاصل کند:

$$h_v = \frac{\arg(\gamma_{w_v}) - \phi}{k_z} \quad (8)$$

$$k_z = \frac{4\pi \Delta \theta}{\lambda \sin \theta} \approx \frac{4\pi B_n}{\lambda R \sin \theta}$$

که در آن،  $w_v$  قطبش انتخابی کاربر است و فرض می‌شود در بالای پوشش‌های گیاهی قرار دارد. این کانال، اغلب کانال HV در نظر گرفته می‌شود، چراکه این کانال توسط پراکنش حجمی اشباع می‌شود.

### ۲-۳-۲- روش دامنه کوهرنسی

در اینجا، مسئله برآورد فاز زمین در مناطقی با کوهرنسی پایین با استفاده از معادله (۷) مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد. چراکه ممکن است در شرایطی، حل ابهام بین دو نقطه تلاقی با دایره واحد، کاری سخت و دشوار باشد. در این حالت، می‌توان از راه‌حل‌های ارتفاعی استفاده کرد. یعنی با اجرای این راه‌حل‌ها برای هر دو نقطه تلاقی، نقطه‌ای را حذف کرد که سبب یک راه‌حل ابهام‌آمیز جهت برآورد

3- Extinction

4- SINC

5- Look Up Table

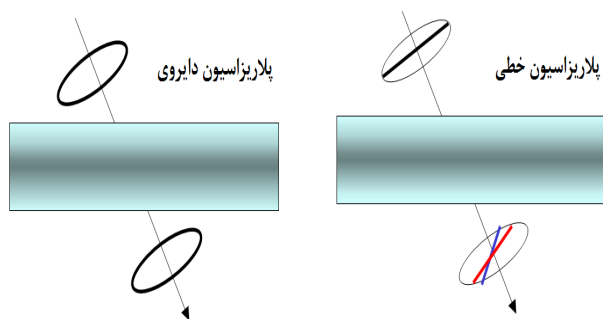
6- Interferogram

1- Rank

2- Digital Elevation Model

اگر موجی به صورت دایروی قطبیده باشد، این تبدیل برای قطبش‌های دایروی بی‌اثر است. به عبارت دیگر، زمانی که یک موج قطبیده دایروی ارسال می‌شود، مشخصه‌های دایروی‌اش در عبور از میان یونسفر حفظ می‌شود.

بنابراین، موج فرودی هرچقدر هم که در یونسفر باشد، بر روی سطح زمین نیز قطبیده دایروی خواهد بود. از اینرو، میدان پراکنش شده از سطح، همیشه مربوط به پاسخ سطح نسبت به یک موج قطبیده دایروی خواهد بود. درحالی که اثر فارادی بر موجی که به صورت خطی قطبیده باشد، چرخشی از صفحه قطبش است. به عبارت دیگر، انتشار امواج قطبیده خطی از میان یونسفر، میدان پراکنش شده را دوران خواهد داد. همچنین، در راه برگشت این امواج از میان یونسفر، موج پراکنش شده دوباره توسط اثر فارادی دوران می‌یابد. نگاره (۲) نحوه اثرگذاری یونسفر بر امواج قطبیده خطی و دایروی را نشان می‌دهد.



نگاره ۲: اثر چرخش فارادی بر امواج EM

زاویه مربوط به شیفت یا چرخش فاز، زاویه فارادی نامیده می‌شود که به کل چگالی الکترون (TEC) و فرکانس موج EM وابسته است. اثر این چرخش بر ماتریس پراکنش می‌تواند به صورت زیر مدل شود:

$$M = \begin{bmatrix} \cos \Omega & \sin \Omega \\ -\sin \Omega & \cos \Omega \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_{hh} & s_{hv} \\ s_{vh} & s_{vv} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \Omega & \sin \Omega \\ -\sin \Omega & \cos \Omega \end{bmatrix} \quad (11)$$

که در آن  $\Omega$  زاویه چرخش یکطرفه فارادی است.

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

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

$$0 \leq L_{w_s} \leq 1$$

$$AL_{w_s}^2 + BL_{w_s} + C = 0 \Rightarrow L_{w_s} = \frac{-B - \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \quad (10)$$

$$A = |\tilde{\gamma}_{w_s}|^2 - 1$$

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

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

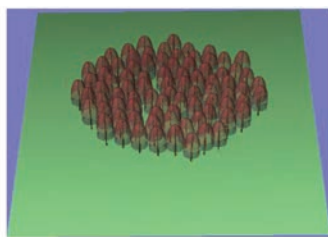
همانطورکه در معادله فوق مشاهده می‌شود، ارتفاع به صورت مجموعی از دو جزء به دست می‌آید که جزء اول، فقط برآوردی از ارتفاع توسط اختلاف فاز بین نقطه زمینی و نقطه کوهرنسی فقط حجمی<sup>۱</sup> را حاصل می‌کند. در این روش، برخلاف روش تفاضلی DEM، نیازی نیست که  $w_r$  الزاماً در بالای پوشش‌های گیاهی باشد و این خطا توسط جزء دوم معادله تصحیح می‌شود. این تصحیح توسط انطباق دامنه کوهرنسی مشاهده شده به مدل ساده تابع سینک برای میرایی صفر به دست می‌آید. این مرحله نیازمند مقایسه با یک LUT یک بعدی است، که محدوده این LUT توسط اولین صفر تابع سینک تنظیم می‌شود. در ضمن، انتخاب پارامتر  $\varepsilon$ ، که دو جزء معادله (۱۰) را وزندهی می‌کند، بسیار مهم است و بایستی به درستی انتخاب شود تا معادله نسبت به تغییرات میرایی مقاوم باشد.

## ۲-۴- چرخش فارادی

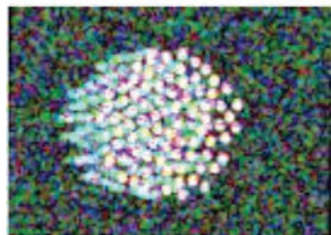
یکی از جنبه‌هایی که باید در سامانه‌های راداری با فرکانس‌های پایین (به ویژه باند P) در نظر گرفته شود، اثر یونسفر است. هنگامی که یک موج EM از میان یونسفر عبور می‌کند، تحت تأثیر تبدیلی قرار می‌گیرد که به حالت قطبش موج EM بستگی دارد.

این تبدیل را اثر فارادی یا چرخش فارادی می‌نامند.

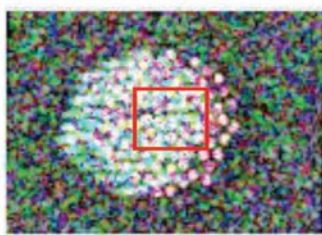




(الف)



(پ)



(ب)

نگاره ۳: منطقه مطالعاتی:

(الف) تصویر جنگل کاج شبیه‌سازی شده،  
(ب) تصویر رنگی بر مبنای پائولی<sup>۱</sup> در باند L و  
(پ) تصویر رنگی بر مبنای پائولی در باند  
P (HH-VV : قرمز، HH+VV: آبی، HV: سبز).

جدول ۲: مشخصات داده‌های مورد استفاده در این تحقیق

مشخصه	مقدار	واحد
هندسی	ارتفاع سکو <sup>۲</sup>	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) گیگا هرتز
	قدرت تفکیک در راستای آزیموت <sup>۴</sup>	۱/۵ متر
سطح زمین	قدرت تفکیک در راستای رنج <sup>۵</sup>	۱/۰۶۰۶۶ متر
	ویژگی‌های سطح	۰ (بسیار نرم)
	محتوای رطوبت زمین	۴
	شیب زمین در راستای آزیموت	۰/۲ درصد
جنگل	شیب زمین در راستای رنج	۱۰ درصد
	گونه‌های درختی	۱ (کاج)
	ارتفاع درختان	۱۸ متر
	چگالی جنگل	۳۰۰ ساقه بر هکتار
مساحت جنگل	۰/۲۸۲۷۴۵ هکتار	

بر اساس چرخش فارادی، پراکنش در دو زمان مختلف در یک منطقه، مکانیزم‌های پراکنش مختلفی ایجاد خواهد کرد. بنابراین، میدان‌های پراکنش شده کاملاً متفاوت بوده و در نتیجه الگوریتم‌های PolInSAR قابل اجرا و پیاده‌سازی نخواهند بود. از اینرو، به منظور عدم تغییرپذیری از یونسفر، به ویژه در فرکانس‌های پایین رادار، بایستی از قطبش‌های دایروی استفاده کرد.

### ۳- داده‌ها و منطقه مطالعاتی

در این تحقیق، از شبیه‌ساز نرم‌افزار PolSARProSim جهت تولید مجموعه داده‌های PolInSAR در مدهای FP و CP (مد DCP)، و در باندهای L و P استفاده شده است. این شبیه‌ساز قابلیت تولید داده‌های PolInSAR با زوایای فرود<sup>۱</sup>، طول موج‌ها و نیز پارامترهای زمینی (شامل نرمی، زبری و رطوبت) مختلف را دارد.

مشخصات کامل داده‌های مورد استفاده در این تحقیق، در جدول (۲) نشان داده شده است.

داده‌های شبیه‌سازی شده فوق، مربوط به یک منطقه جنگلی با درختان کاج میباشد. تصاویر شبیه‌سازی شده منطقه مورد مطالعه در نگاره (۳) نمایش داده شده است.

3- Platform

4- Azimuth

5- Rang

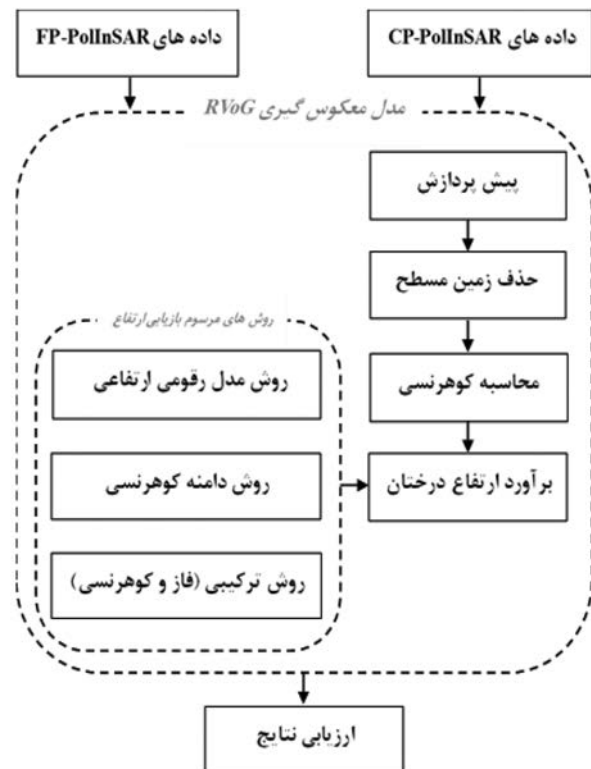
1 - Pauli

2- Incidence Angle

#### ۴- پیاده‌سازی و ارزیابی نتایج

##### ۴-۱- پیاده‌سازی

روش به کار گرفته شده در این تحقیق، اساساً بر مبنای مدل معکوس‌گیری RVoG است که فلوچارت کلی آن در نگاره (۴) نشان داده شده است.



نگاره ۴: فلوچارت کلی روش این تحقیق

اولین مرحله از فلوچارت فوق، پیش پردازش<sup>۱</sup> و آماده‌سازی داده‌ها است. در عمل، بزرگترین منبع خطا در کار با داده‌های PolInSAR، ناهمبستگی زمانی<sup>۲</sup> است. در این تحقیق فرض بر آن است که هم مرجع کردن داده‌ها، به صورت کامل انجام می‌شود. این کار در نرم‌افزار PolSARProSim امکان‌پذیر است، چراکه هندسه واقعی به کار برده شده است. مرحله بعد، حذف تغییرات فاز پس‌زمینه<sup>۳</sup> است که به اصطلاح حذف "زمین مسطح"<sup>۴</sup> نامیده می‌شود. سپس مقدار مختلط

کوهرنسی با استفاده از رابطه (۱) محاسبه می‌شود. نهایتاً با استفاده از روش‌های مرسوم بازیابی ارتفاع، که در بخش قبل توضیح داده شد، ارتفاع درختان جنگل برآورد می‌شود. در این تحقیق به منظور بررسی و ارزیابی نحوه عملکرد داده‌های C-PolInSAR در مد DCP جهت برآورد ارتفاع درختان جنگل، سه روش تفاضلی DEM، اندازه دامنه کوهرنسی و ترکیبی (فاز و کوهرنسی) بر روی قسمتی از منطقه مطالعاتی، که در نگاره (۳) به وسیله یک مربع قرمز رنگ مشخص شده است، اجرا و پیاده‌سازی شد. در هر سه روش، کانال LL+RR به عنوان قطبش انتخابی به منظور برآورد کوهرنسی حجمی<sup>۵</sup> و کانال LR به عنوان قطبش انتخابی جهت برآورد کوهرنسی زمین<sup>۶</sup> در نظر گرفته شد و کوهرنسی‌های برآورد شده، به عنوان ورودی هر سه روش مذکور، جهت برآورد ارتفاع درختان در نظر گرفته شدند. نتایج حاصل از داده‌های C-PolInSAR در مد DCP در باندهای L و P در مقایسه با نتایج به دست آمده از داده‌های FP-PolInSAR به ترتیب در نگاره‌های (۵) و (۶) نمایش داده شده است.

##### ۴-۲- ارزیابی نتایج

همانگونه که انتظار می‌رفت، دو داده C-PolInSAR (در مد DCP) و F-PolInSAR با نظر گرفتن HH+VV به عنوان قطبش پس‌پراکنش شده از زمین، نتایج یکسانی را در هر دو باند L و P جهت برآورد ارتفاع درختان جنگل حاصل کردند. علت را می‌توان با توجه به جدول (۱) توجیه کرد. چراکه طبق این جدول، قطبش LL+RR معادل با قطبش HV، و قطبش LR معادل با قطبش HH+VV می‌باشد. همچنین، همانطور که در نگاره‌های (۵) و (۶) مشاهده می‌شود، هر سه روش تفاضلی DEM، اندازه کوهرنسی و ترکیبی (فاز و کوهرنسی) نتایج بهتری را برای برآورد ارتفاع درختان نسبت به مقدار واقعی - شان (۱۸ متر) در باند L نسبت به باند P ثمر داده‌اند. چراکه در باند L، امواج EM نفوذ کمتری در تاج پوشش گیاهان دارند، بنابراین میرایی موج کمتر بوده و در نتیجه برآورد ارتفاع

5- Volume Coherence

6- Ground Coherence

1- Preprocessing

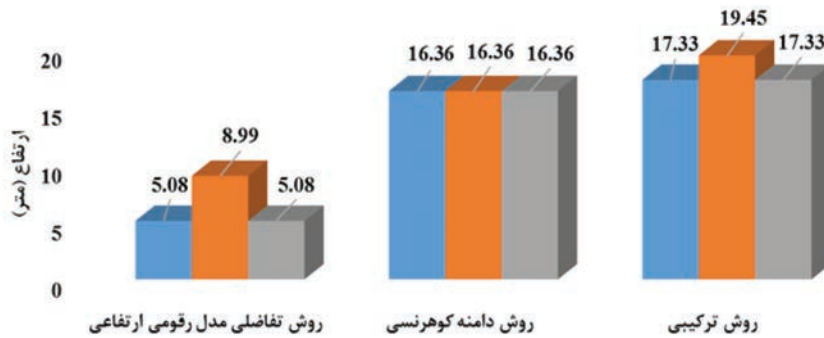
2- Temporal Decorrelation

3- Background

4- Flat Earth

ارتفاع درست = 18 متر

### برآورد ارتفاع درختان جنگل در باند L

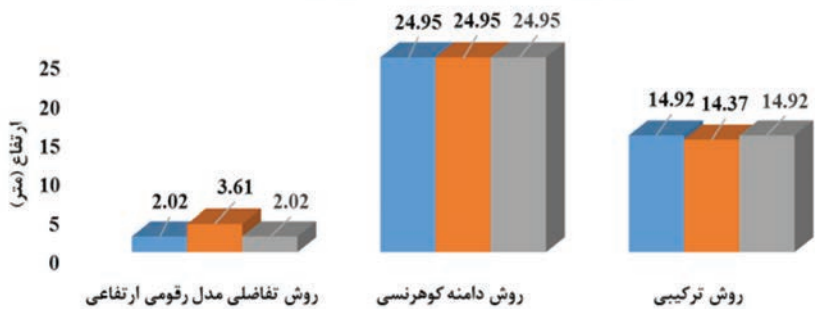


نگاره ۵: مقایسه روش های مختلف برآورد ارتفاع با استفاده از داده های F-PolInSAR و C-PolInSAR (مد DCP) در باند L.

داده های FP-PolInSAR با درنظر گرفتن HV به عنوان کوهرنسی حجمی و HH+VV به عنوان کوهرنسی زمین  
 داده های FP-PolInSAR با درنظر گرفتن HV به عنوان کوهرنسی حجمی و HH-VV به عنوان کوهرنسی زمین  
 داده های CP-PolInSAR با درنظر گرفتن LL+RR به عنوان کوهرنسی حجمی و LR به عنوان کوهرنسی زمین

ارتفاع درست = 18 متر

### برآورد ارتفاع درختان جنگل در باند P



نگاره ۶: مقایسه روش های مختلف برآورد ارتفاع با استفاده از داده های F-PolInSAR و C-PolInSAR (مد DCP) در باند P.

داده های FP-PolInSAR با درنظر گرفتن HV به عنوان کوهرنسی حجمی و HH+VV به عنوان کوهرنسی زمین  
 داده های FP-PolInSAR با درنظر گرفتن HV به عنوان کوهرنسی حجمی و HH-VV به عنوان کوهرنسی زمین  
 داده های CP-PolInSAR با درنظر گرفتن LL+RR به عنوان کوهرنسی حجمی و LR به عنوان کوهرنسی زمین

درختان نزدیکتر است و بالعکس. این ابهام در موقعیت فاز، جزء ذاتی در روش های تک خط مبنایی است و جهت غلبه بر آن بایستی از روش های تصحیح مدل مبنا استفاده کرد. ثانیاً، نتایج به دست آمده با روش دامنه کوهرنسی توسط هردو داده F-PolInSAR و C-PolInSAR (در مد DCP) بیش از مقدار واقعی است. علت آن است که این روش از فاز کوهرنسی صرف نظر می کند و به تغییرات میرایی و ساختار قائم حساس است. از اینرو، روش دامنه کوهرنسی جزء الگوریتم های ضعیف محسوب می شود، ولی با این حال می تواند یک راه حل پشتیبان به هنگام عدم اجرای سایر روش ها باشد.

دقیق تر می باشد. در ضمن، بدون درنظر گرفتن باندهای مورد استفاده، می توان موارد زیر را نتیجه گرفت:

اولاً، روش تفاضلی DEM کمترین مقدار برآورد را برای ارتفاع درختان در هردو داده F-PolInSAR و C-PolInSAR (در مد DCP) نسبت به مقدار واقعی آنها دارد. علت آن است که مرکز فاز HV (یا معادل آن LL+RR) هرچایی بین نصف ارتفاع درخت و بالای تاج پوشش درخت قرار گیرد. مکان واقعی این فاز، به دو ویژگی پوشش های گیاهی بستگی دارد: میانگین میرایی موج و 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

عنوان قطبش زمین، در برآورد ارتفاع درختان حاصل کردند. بنابراین استفاده از این داده‌ها به دلیل دارا بودن چندین مزیت مهم نسبت به دیگر سامانه‌های تصویربرداری SAR (که قبلاً اشاره شد) می‌تواند مفید باشد. علاوه بر این، به کارگیری این داده‌ها در طول موج‌های بلند، که قطبش ارسالی متأثر از چرخش فارادی است، بسیار مناسب است. در انتها پیشنهاد می‌گردد تا عملکرد داده‌های C-PolInSAR با روش‌های دیگری که جهت برآورد ارتفاع درختان جنگل به کار می‌روند، مقایسه و ارزیابی گردند.

### منابع و مأخذ

1. Arnaubec, A., Roueff, A., Dubois-Fernandez, P. C., & Réfrégier, P. (2014). Vegetation height estimation precision with compact PolInSAR and homogeneous random volume over ground model. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 52(3), 1879-1891.
2. Askne, J. I., Dammert, P. B., Ulander, L. M., & Smith, G. (1997). C-band repeat-pass interferometric SAR observations of the forest. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 35(1), 25-35.
3. Boularbah, S., Ouarzeddine, M., & Belhadj-Aissa, A. (2012). Investigation of the capability of the Compact Polarimetry mode to Reconstruct Full Polarimetry mode using RADARSAT2 data. *Advanced Electromagnetics*, 1(1), 19-28.
4. Cloude, S., Corr, D., & Williams, M. (2004). Target detection beneath foliage using polarimetric synthetic aperture radar interferometry. *Waves in Random Media*, 14(2), S393-S414.
5. Cloude, S., & Papathanassiou, K. (2003). Three-stage inversion process for polarimetric SAR interferometry. *IEEE Proceedings-Radar, Sonar and Navigation*, 150(3), 125-134.
6. Cloude, S., Papathanassiou, K., & Reigber, A. (2000). Polarimetric SAR interferometry at P-band for vegetation structure extraction. Paper presented at the EUSAR 2000.
7. Cloude, S. R., Krieger, G., & Papathanassiou, K. P. (2005). A framework for investigating space-borne polarimetric interferometry using the ALOS-PALSAR sensor. Paper presented at the Geoscience and Remote

ثالثاً، نتایج حاصل از روش ترکیبی به وسیله هردو داده F-PolInSAR و C-PolInSAR (در مد DCP) نسبت به دو روش قبل، به دلیل اعمال توأمان فاز و اندازه کوهرنسی و نیز پارامتر تصحیح  $\epsilon$  بهبود داشته است. مقدار  $\epsilon$  در این تحقیق،  $0/4$  در نظر گرفته شده است. چراکه در حالت میرایی برابر با صفر، به راحتی نشان داده می‌شود که باید  $\epsilon$  برابر با  $0/5$  انتخاب شود که روش مذکور برآوردی واقعی از ارتفاع را حاصل کند (البته بدون در نظر گرفتن ساختار قائم تاج پوشش). در حالت کلی میرایی برابر با غیرصفر،  $\epsilon$  باید کاهش یابد. در حالت حدی میرایی برابر با بی‌نهایت،  $\epsilon$  به سمت صفر میل می‌کند و مرکز فاز به سمت ارتفاع واقعی میل می‌کند. اگرچه در باند L و پایین‌تر (مثلاً باند P)، میرایی کمتر از یک دسی‌بل (db) است. پس، در این حالت می‌توان با انتخاب  $\epsilon = 0/4$  خطای برآورد ارتفاع را به  $10$  درصد رساند. بنابراین، با در نظر گرفتن یک مقدار ثابت برای  $\epsilon$  می‌توان از مشکلات انطباق میرایی به تغییرات محلی جلوگیری، و در نتیجه زمان محاسباتی را ذخیره کرد.

### ۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، توانایی بالقوه سامانه‌های C-PolInSAR در مد DCP در باندهای L و P مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. برای این منظور، سه روش مرسوم بازیابی ارتفاع درخت شامل روش‌های تفاضلی DEM، دامنه کوهرنسی و ترکیبی (فاز و کوهرنسی) بر روی داده‌های شبیه‌سازی شده توسط نرم‌افزار PolSARProSim اجرا و پیاده‌سازی شدند. نتایج تجربی به دست آمده در این تحقیق در باندهای L و P نشان دادند که داده‌های C-PolInSAR در مد DCP عملکرد و نتایج یکسانی نسبت به داده‌های F-PolInSAR با نظر گرفتن HH+VV به عنوان قطبش پس‌پراکنش شده از زمین، در برآورد ارتفاع دارند.

به ویژه آنکه، داده‌های C-PolInSAR در مد DCP بهبود  $0/78$  متری و  $0/55$  متری را به ترتیب در باندهای L و P نسبت به داده‌های F-PolInSAR با انتخاب HH-VV به

perspectives. Paper presented at the Proceedings of 2nd ESA POLInSAR Workshop, Frascati, Italy.

17. Papathanassiou, K. P., & Cloude, S. R. (2001). Single-baseline polarimetric SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39(11), 2352-2363.

18. Ramachandran, N., & Dikshit, O. (2018). Experimental Validation of Compact Tomosar for Vegetation Characterization. Paper presented at the IGARSS 2018-2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium.

19. Raney, R. K. (2007). Hybrid-polarity SAR architecture. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 45(11), 3397-3404.

20. Reigber, A., Papathanassiou, K., Cloude, S., & Moreira, A. (2001). SAR tomography and interferometry for the remote sensing of forested terrain. *Frequenz*, 55(3-4), 119-122.

21. Souyris, J.-C., Imbo, P., Fjortoft, R., Mingot, S., & Lee, J.-S. (2005). Compact polarimetry based on symmetry properties of geophysical media: The  $\pi/4$  mode. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 43(3), 634-646.

22. Touzi, R., Lopes, A., Bruniquel, J., & Vachon, P. W. (1999). Coherence estimation for SAR imagery. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 37(1), 135-149.

23. Truong-Loi, M.-L., & Dubois-Fernandez, P. (2010). An optimized method to estimate forest height with compact polarimetric SAR interferometry. Paper presented at the Synthetic Aperture Radar (EUSAR), 2010 8th European Conference on.

24. Williams, M. L., Pottier, E., Ferro-Famil, L., Allain, S., Cloude, S., Hajnsek, I., . . . Desnos, Y. (2007). Forest coherent sar simulator within polsarpro: an educational toolbox for PolSAR and PolInSAR data processing. Paper presented at the Asian Conference on Remote Sensing, Kuala Lumpur, Malaysia.

25. Zebker, H. A., & Villasenor, J. (1992). Decorrelation in interferometric radar echoes. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, 30(5), 950-959.

Sensing Symposium, 2005. IGARSS'05. Proceedings. 2005 IEEE International.

8. Cloude, S. R., & Papathanassiou, K. P. (1998). Polarimetric SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36(5), 1551-1565.

9. Dubois-Fernandez, P., Angelliaume, S., Souyris, J.-C., & Garestier, C. (2007). The specificity of P band PolInSAR data over vegetation. Paper presented at the Science and Applications of SAR Polarimetry and Polarimetric Interferometry.

10. Guo, S., Li, Y., Yin, Q., Chen, H., Richardson, A., & Hong, W. (2014). Applying the Freeman-Durden decomposition to compact polarimetric SAR Interferometry. Paper presented at the Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2014 IEEE International.

11. Hagberg, J. O., Ulander, L. M., & Askne, J. (1995). Repeat-pass SAR interferometry over forested terrain. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 33(2), 331-340.

12. Han, K., Jiang, M., Wang, M., & Liu, G. (2018). Compact Polarimetric SAR Interferometry Target Decomposition With the Freeman-Durden Method. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 11(8), 2847-2861.

13. Lavallo, M., Solimini, D., Pottier, E., & Desnos, Y.-L. (2008a). Investigation on the performance of compact polarimetry in SAR interferometry. Paper presented at the Synthetic Aperture Radar (EUSAR), 2008 7th European Conference on.

14. Lavallo, M., Solimini, D., Pottier, E., & Desnos, Y.-L. (2008b). PolInSAR for Forest Biomass Retrieval: PALSAR Observations and Model Analysis. Paper presented at the IGARSS (3).

15. Liu, Y., Yang, W., Xu, X., & Liao, M. (2011). Investigation on compact polarimetry in SAR interferometry using CETC38 airborne data. Paper presented at the Radar (Radar), 2011 IEEE CIE International Conference on.

16. Papathanassiou, K., Cloude, S., Liseno, A., Mette, T., & Pretzsch, H. (2005). Forest height estimation by means of polarimetric SAR interferometry: actual status and

