نشریه علمی مهندسی فناوری اطلاعات مکانی

سال دهم، شماره سوم، پاییز ۱۴۰۱
Vol.10, No.3, Autumn 2022
۲۹ -۴۷
مقاله پژوهشی
DOR: 20.1001.1.20089635.1401.10.3.2.0

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
دانشکده مهندسی نقشه برداری

[DOR: 20.1001.1.20089635.1401.10.3.2.0]

[DOI: 10.52547/jgit.10.3.29]

بهبود الگوریتم سه مرحله‌ای جهت برآورد ارتفاع جنگل با استفاده از داده تداخل‌سنجی با پلاریزاسیون دوگانه

طیبه مناقبی[1]، یاسر مقصودی[2]، محمدجواد ولدان زوج[3*]

۱- دکتری سنجش از دور، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
۲- دانشیار گروه سنجش از دور و فتوگرامتری، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
۳- استاد گروه سنجش از دور و فتوگرامتری، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۷/۰۴/۱۸ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۱۰/۱۶

چکیده

این مقاله روشی جهت برآورد ارتفاع جنگل با استفاده از داده‌های تداخل‌سنجی راداری با پلاریزاسیون دوگانه تک فرکانس و تک خط مبنا ارائه می‌دهد. روش پیشنهادی بر مبنای یک مدل فیزیکی دو لایه‌ای حجمی بر روی زمین (*RVoG*) و با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی پلاریمتری راداری (*PolInSAR*) ارائه می‌شود. الگوریتم ارائه شده امکان بهره‌گیری از دو مزیت حد تفکیک مکانی بالاتر و عرض برداشت بیشتر تصاویر با پلاریزاسیون دوگانه نسبت به داده پلاریمتریک را در کاربرد برآورد ارتفاع جنگل فراهم می‌کند. در این پژوهش، از یک روش بهینه‌سازی پلاریمتریک برای انتخاب پایه پلاریزاسیون حجمی بهینه جهت بهبود نتایج الگوریتم وارونگی سه‌مرحله‌ای استفاده شده است. جهت ارزیابی الگوریتم ارائه شده از داده‌های سنجنده هوابرد *ESAR* در باند *L*، که در سال ۲۰۰۷ توسط آژانس هوایی اروپا از منطقه مطالعاتی رمینگ استرپ در جنوب سوئد اخذ شده‌اند، استفاده شده است. الگوریتم ارائه شده، قابلیت استفاده از داده راداری با پلاریزاسیون *HH/HV* را در برآورد ارتفاع درختان جنگل بدون کاهش محسوس دقت در مقایسه با داده کامل پلاریمتریک نشان می‌دهد. روش ارائه شده منجر به متوسط خطای ۴/۳۹ متر و ضریب تعیین ۰/۶۶ در اندازه‌گیری ارتفاع در پانزده ناحیه از پیش تعیین شده در مقایسه با ارتفاع مرجع لیدار می‌شود.

کلید واژه‌ها : ارتفاع جنگل، الگوریتم وارونگی سه‌مرحله‌ای، بهینه‌سازی پلاریمتریک، پلاریزاسیون دوگانه، تداخل‌سنجی پلاریمتری.

* نویسنده مکاتبه کننده: خیابان ولیعصر، بالاتر از میدان ونک، تقاطع میرداماد، دانشکده مهندسی نقشه برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی.
تلفن: ۰۲۱۸۸۸۷۷۰۷۱

Email: valadanzouj@kntu.ac.ir

۱- مقدمه

زیست‌توده[۱] جنگل، پارامتری تاثیرگذار در مطالعات آب و هوا و زیست محیطی در مقیاس محلی و جهانی محسوب می‌شود [۱]. نظر به زمان‌بر بودن و هزینه بالای روش‌های آماربرداری زمینی جنگل، استفاده از تکنیک سنجش از دور به عنوان راهکاری بهینه در زمینه مطالعات جنگل مطرح شد. در این میان، سنجش از دور راداری[۲] به دلیل مزایای غیر قابل انکاری نظیر تاثیرپذیری از هندسه و ماهیت هدف، امکان ارسال امواج با طول موج مشخص در شرایط آب و هوایی و ساعات مختلف شبانه‌روز، منبعی کارآمد جهت تولید داده مورد نیاز جهت کمّی‌سازی مشخصه‌های بیوفیزیکی جنگل نظیر زیست‌توده است. پارامتر زیست‌توده جنگل به دو روش مستقیم و غیر مستقیم قابل اندازه‌گیری است. برآورد مستقیم زیست‌توده در جنگل‌های انبوه تحت تاثیر عواملی نظیر طول موج[۳] داده راداری، چگالی جنگل، نوع جنگل و ... به دلیل محدودیت اشباع‌شدگی با خطای بالایی همراه است [۲]. از این رو استفاده از پارامتر ارتفاع جنگل[۴] برای برآورد غیر مستقیم زیست‌توده با استفاده از معادلات آلومتریک[۵] مورد توجه قرار گرفت [۳]. در میان روش‌های موجود برآورد ارتفاع، تکنیک تداخل‌سنجی پلاریمتری راداری با روزنه مجازی[۶] (*PolInSAR*) با تاثیرپذیری از هندسه و ماهیت عوارض، به عنوان ابزاری قوی، دقیق و سریع مورد توجه محققین این عرصه قرار گرفته است [۴ و ۵ و ۶]. این تکنیک با تلفیق اطلاعات پلاریمتری و تکنیک تداخل‌سنجی، امکان تفکیک مراکز فاز و مطالعه ساختار قائم اهدافی مانند جنگل را که در راستای قائم گسترده شده‌اند فراهم می‌سازد. الگوریتم‌های مبتنی بر این تکنیک که مطالعه ساختار و پارامترهای جنگل را تنها با استفاده از زوج داده اخذ شده در یک باند، انجام می‌دهند، تصاویر با طول موج بلند را انتخاب می‌کنند [۶ و ۷]. تصاویر اخذ شده در باندهای L و P به دلیل نفوذ در تاج پوشش گیاهی، قابلیت برداشت اطلاعاتی از جنگل در امتداد قائم را دارند. روش اختلاف مدل رقومی ارتفاعی[۷]، مبتنی بر تکنیک مذکور، با تشکیل دو تداخل‌نمای مجزا برای پایه‌های پلاریزاسیون سطحی و حجمی، مراکز فاز ساختار قائم جنگل را در نزدیکی سطح زمین و تاج درختان به‌دست می‌آورد [۸]. اگرچه سادگی روش مذکور مزیت غیر قابل انکار آن محسوب می‌شود، اما خطای برآورد به دلیل عدم انطباق مراکز فاز محاسباتی وبر سطح زمین و تاج پوشش گیاهی، همیشه ارتفاع درخت را کمتر از مقدار واقعی برآورد می‌کنند. معرفی مدل فیزیکی جنگل به‌صورت پراکنش نامنظم حجمی بر روی زمین[۸] (*RVoG*) غیر قابل نفوذ، مقدمه‌ای برای ارائه روش‌های جدید برآورد ارتفاع با استفاده از تکنیک *PolInSAR* شد [۸]. روش دستگاه معادلات غیر خطی شش معادله و شش مجهول، مبتنی بر مدل نام‌برده، به روش تکرار و با استفاده از مقادیر اولیه مجهولات، ارتفاع جنگل را برآورد می‌کند [۴]. در این روش که بر مبنای مقادیر مختلط همدوسی[۹] در سه پایه پلاریزاسیون مستقل عمل می‌کند، نیاز به مقادیر اولیه مجهولات و روند زمان‌بر حل معادلات از معایب غیر قابل اغماض است. در ادامه، روش حل سه‌مرحله‌ای[۱۰] بدون نیاز به مقادیر اولیه و در یک روند هندسی مبتنی بر روابط

[۱] *Biomass*

[۲] *RADAR remote sensing*

[۳] *Wave length*

[۴] *Forest height*

[۵] *Allometric*

[۶] *Polarimetric Interferometry SAR*

[۷] *DEM differencing algorithm*

[۸] *Random Volume over Ground*

[۹] *Complex coherence value*

[۱۰] *Three-stage algorithm*

مدل *RVoG*، مقادیر ارتفاع درختان جنگل و متوسط ضریب میرایی[۱] را محاسبه می‌کند. عدم نیاز به مقادیر اولیه مجهولات و تکرار محاسبات، سبب شد تا این روش مورد توجه بسیاری از پژوهشگران این عرصه قرار گیرد. روش ترکیبی[۲] نیز روشی مبتنی بر مدل فیزیکی *RVoG* جنگل است که با فرض حداقل میرایی، مقدار ارتفاع را با استفاده از دامنه همدوسی محاسبه می‌کند و سپس نتایج حاصل را به صورت وزن‌دار با نتایج حاصل از روش اختلاف *DEM* ترکیب می‌کند [۹]. فرض حداقل میرایی، تعیین تجربی پارامتر وزن بین مقادیر ارتفاع حاصل از فاز و دامنه همدوسی و نیز عدم دسترسی به پایه‌های پلاریزاسیون صرفاً سطحی و حجمی، محدودیت‌هایی است که استفاده از روش ترکیبی را تحت تاثیر قرار می‌دهد. عرض برداشت[۳] بیشتر و همچنین بالا بودن حد تفکیک مکانی[۴] در داده‌های پلاریمتری اینترفرومتری دوگانه نسبت به داده‌های پلاریمتری کامل[۵] (*QP*)، استفاده از این داده‌ها را در کاربرد ارتفاع جنگل نیز ارزشمند ساخت. به این ترتیب روش هندسی سه‌مرحله‌ای در برآورد ارتفاع جنگل با استفاده از داده تداخل‌سنجی با پلاریزاسیون دوگانه[۶] (*DP*) نیز به‌کار گرفته شد [۱۰]. در این روش که بر مبنای روش سه‌مرحله‌ای است، یک الگوریتم جستجو جهت به‌دست آوردن مقدار همدوسی حجمی مورد استفاده قرار گرفت. عدم دسترسی به مقادیر دقیق نسبت بازپراکنش سطحی به حجمی[۷] در حداقل دو کانال، سبب محدودیت استفاده از روش مذکور می‌شود. با این حال پژوهش انجام شده نشان داد که داده‌های راداری *DP* که شامل پایه پلاریزاسیون *HV* می‌شوند، قابلیت رقابت با داده *QP* را دارند. بهبود روش سه مرحله‌ای با تکیه بر نحوه انتخاب محدوده مقدار ضریب میرایی متوسط، الگوریتم دیگری بود که منجر به افزایش دقت استخراج ارتفاع درختان شد [۱۱]. در این روش، انتخاب میرایی با استفاده از یک شاخص هندسی، به صورت هوشمند و به عنوان تابعی از میزان نفوذ سیگنال راداری در پوشش حجمی تعریف شد. همچنین بهینه‌سازی همدوسی حجمی و تعیین پایه‌ای با بالاترین مرکز فاز به عنوان پایه صرفاً حجمی، روش دیگری بود که بهبود دقت برآورد ارتفاع جنگل را در روش سه مرحله‌ای تضمین نمود [۱۲]. دو روش اخیر با تکیه بر فرضیات روش سه مرحله‌ای مبنی بر انتخاب مقدار میرایی و پایه پلاریزاسیون حجمی سعی در بهبود نتایج این روش داشتند.

به این ترتیب، با توجه به اهمیت مطالعه چرخه کربن در سطح محلی، ناحیه‌ای و جهانی و اثرگذاری پارامتر زیست‌توده در این چرخه، مطالعه پیش رو با هدف کمی‌سازی پارامتر مذکور به دنبال استفاده از داده‌های تداخل‌سنجی پلاریمتریک راداری است. با توجه به سادگی روش هندسی سه مرحله‌ای در برآورد زیست‌توده و نیز مزایای استفاده از داده پلاریمتری دوگانه، هدف اصلی این پژوهش ارائه الگوریتمی جهت بهبود نتایج حاصل از الگوریتم سه‌مرحله‌ای با استفاده از داده راداری *DP* است. از آن‌جایی که مقدار همدوسی صرفاً حجمی تاثیر بسزایی در دقت برآورد ارتفاع دارد، لذا تمرکز این مقاله بر محاسبه همدوسی حجمی بهینه به‌عنوان جایگزینی برای همدوسی حجمی در روش سنتی است. به این ترتیب روش پیشنهادی در صدد ایجاد شرایطی برای استفاده از داده *DP* به عنوان جایگزینی برای داده *QP* است تا به این ترتیب ضمن کاهش هزینه‌های دسترسی به داده، از مزایای داده *DP* مانند عرض برداشت بیشتر و حد تفکیک مکانی مناسب‌تر استفاده نماید. همچنین روش ارائه شده

---
۱ *Mean extinction coefficient*
۲ *Hybrid phase/ magnitude algorithm*
۳ *Swath width*
۴ *Spatial resolution*
۵ *Quad pol*
۶ *Dual pol*
۷ *Ground to volume backscattering ratio*

[DOR: 20.1001.1.20089635.1401.10.3.2.0]
[DOI: 10.52547/jgit.10.3.29]

ضعف روش‌های موجود بهینه‌سازی را در نیاز به مقادیر اولیه پارامترهای مجهول مرتفع ساخته و بدون نیاز به مقدار اولیه پارامترها و صرفاً با استفاده از یک جستجوی کلی در میان پایه‌های پلاریزاسیون مشاهداتی قادر به برآورد بهترین پایه صرفاً حجمی است.

۲- تئوری‌های مورد نیاز

در این بخش ضمن اشاره‌ای کوتاه به روابط مشاهدات *PolInSAR* ، مدل *RVoG* و روش حل سه‌مرحله‌ای به تفصیل ارائه می‌شود.

۲-۱- تکنیک *PolInSAR* در تصاویر پلاریمتری کامل

در یک زوج تصویر *QP*، با داشتن ۴ کانال مجزا، کلیه مشاهدات مورد استفاده در تکنیک *PolInSAR*، از ماتریس همدوسی ۶×۶ که به صورت رابطه (۱) تعریف می‌شود، استخراج می‌شوند [۸].

$$T_6 = \left\langle kk^t \right\rangle = \begin{bmatrix} T_{11} & \Omega_{12} \\ \Omega_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \;,\; k = \begin{bmatrix} k_1 \\ ... \\ k_2 \end{bmatrix},$$
رابطه(۱)
$$k_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[S_{HH} + S_{VV} \quad S_{HH} - S_{VV} \quad 2S_{HV} \right]^t$$

در رابطه (۱)، T_6 ماتریس همدوسی شش بعدی برای تصاویر QP است و <> به معنی میانگین در همسایگی مکانی و زمانی در نظر گرفته شده‌است. همچنین در رابطه (۱)، T_{11} و T_{22} به ترتیب ماتریس‌های همدوسی پلاریمتری تصاویر دو سر خط مبنای مکانی[۱]، Ω_{12} ماتریس همدوسی پلاریمتری تداخل‌سنجی و k بردار پائولی[۲] ۱×۶ متشکل از بردارهای پائولی تصاویر در دو سر خط مبنای مکانی است. در این رابطه، S_{AB} معرفی مقدار بازپراکنش مختلط در کانالی است که پلاریزاسیون ارسال و دریافت در آن به ترتیب با A و B نشان داده شده‌است به طوری‌که H و V به ترتیب بیان‌گر پلاریزاسیون‌های خطی افقی[۳] و قائم[۴] باشد.

همچنان که در بخش گذشته نیز اشاره شد، استفاده از پایه‌های پلاریزاسیون مختلف در تکنیک *PolInSAR*، اجازه تفکیک مراکز فاز مختلف را در راستای قائم می‌دهد. به این ترتیب برای مطالعه اهدافی که در راستای قائم گسترده شده‌اند، بهره‌گیری از مقادیر مختلط همدوسی در پایه‌های مختلف راه‌گشا است. این مقدار مختلط در هر کانال به صورت رابطه (۲) محاسبه می‌شود.

$$\gamma = |\gamma| e_{i\varphi} = \frac{\left\langle S_1 S_2^* \right\rangle}{\sqrt{\left\langle S_1 S_1^* \right\rangle \left\langle S_2 S_2^* \right\rangle}}$$
رابطه(۲)

در رابطه (۲)، γ مقدار مختلط همدوسی، $|\gamma|$ دامنه همدوسی، φ فاز همدوسی، S_1 و S_2 مقادیر مختلط بازپراکنش در کانال‌های منتخب تصاویر دو سر خط مبنا و * معرف مزدوج ترانهاده عدد مختلط است. به این ترتیب این مقدار مختلط برای هر یک از پایه پلاریزاسیون‌های موجود قابل محاسبه است.

۲-۲- مدل دو لایه‌ای حجمی تصادفی بر روی زمین

مدل فیزیکی *RVoG*، جنگل را به صورت یک لایه حجمی متشکل از اجزایی با توجیه تصادفی واقع بر سطح زمینی مسطح و غیرقابل نفوذ تعریف می‌کند [۱۳]. بر طبق مدل *RVoG*، مقدار مختلط همدوسی در هر پایه پلاریزاسیون به صورت تابعی از فاز زمین، همدوسی صرفاً حجمی[۵] و نسبت بازپراکنش سطحی به حجمی در پایه مذکور است. رابطه (۳)، ارتباط بین پارامترهای مذکور را نشان می‌دهد [۴ و ۱۳].

$$\gamma(w) = e^{j\varphi_0} \frac{\gamma_v + \mu(w)}{1 + \mu(w)}$$
رابطه(۳)

---

[۱] *Spatial baseline*

[۲] *Pauli vector*

[۳] *Horizontal*

[۴] *Vertical*

[۵] *Volume only coherence*

[DOR: 20.1001.1.20089635.1401.10.3.2.0]
[DOI: 10.52547/jgit.10.3.29]

در رابطه(۳)، $\gamma(w)$ همدوسی در یک پایه پلاریزاسیون مشخص، φ_0 فاز زمین و $\mu(w)$ نسبت بازپراکنش سطحی به حجمی در پایه مذکور است. مقدار $\mu(w)$، بین صفر تا بی‌نهایت برای پایه‌های پلاریزاسیون صرفاً حجمی تا صرفاً سطحی متغیر است. رابطه(۳) نشان می‌دهد که در هر پیکسل با ماهیت *RVoG*، مقادیر همدوسی در پایه‌های پلاریزاسیون مختلف در دایره مختلط واحد[1] (*CUC*)، بر روی یک خط مستقیم قرار دارند.

همچنین مقدار γ_v به صورت تابعی از ضریب ثابت میرایی و ارتفاع جنگل، مطابق رابطه (۴) قابل برآورد است [۴].

$$\gamma_v = \frac{2\sigma}{\cos\theta_0 (e^{\frac{2\sigma h_v}{\cos\theta_0}} - 1)} \int_0^{h_v} e^{jk_z z} e^{\frac{2\sigma z}{\cos\theta_0}} \qquad \text{(۴)رابطه}$$

در رابطه (۴)، σ ضریب ثابت میرایی متوسط موج، θ زاویه فرود[2] موج ارسالی و k_z عدد موج قائم[3] است .

به این ترتیب و با توجه به روابط (۳) و (۵)، ملاحظه می‌شود که در هر پیکسل برای محاسبه مقدار ارتفاع جنگل با استفاده از مدل *RVoG*، ۴ مجهول وجود دارد که عبارتند از: فاز زمین، ضریب ثابت میرایی، نسبت باز پراکنش سطحی به حجمی در هر پایه پلاریزاسیون و ارتفاع لایه حجمی. با توجه به غیر خطی بودن رابطه(۴)، برآورد پارامترهای مذکور با استفاده از معادلات متشکل از مقادیر همدوسی در پایه پلاریزاسیون‌های مختلف، مستلزم استفاده از بسط سری تیلور و درنتیجه دسترسی به مقادیر اولیه پارامترهاست. روش سه‌مرحله‌ای که در بخش بعد به آن پرداخته می‌شود، روشی است که به شکل هندسی و بدون نیاز به مقادیر اولیه پارامترها، مقادیر مجهولات را با دقت قابل قبولی برآورد می‌کند و از این رو مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است.

۲-۳- روش وارونگی سه مرحله‌ای در برآورد ارتفاع جنگل

روش هندسی سه‌مرحله‌ای، 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 [۵]. در این روش برآورد مجهولات به ترتیب در سه مرحله تحت عناوین برازش خط در دایره *CUC*، رفع ابهام و برآورد فاز زمین، برآورد توأم مقادیر میرایی و ارتفاع جنگل انجام می‌شود. در ادامه هر یک از این مراحل به تفصیل ارائه می‌شود.

با توجه به رابطه (۳)، مکان هندسی مقادیر همدوسی در هر پیکسل با ماهیت دو لایه‌ای، در دایره *CUC* یک خط مستقیم است. به این ترتیب و با استفاده از مقادیر مختلط همدوسی در پایه پائولی امکان برازش خط به روش کمترین مربعات فراهم می‌شود. از آن‌جایی که هر یک از پایه‌های پائولی متناظر با یکی از مکانیسم‌های بازپراکنش‌های اصلی در هدف مورد نظر است لذا این پایه‌ها با گستردگی مرکز فاز در امتداد قائم گزینه‌های مناسبی برای به‌دست آوردن پارامترهای خط همدوسی هستند. مقدار مختلط همدوسی در هر یک از این سه کانال به سادگی و با استفاده از رابطه (۲) قابل محاسبه است. شکل (۱)، برازش خط به پایه‌های پائولی را نشان می‌دهد. مقدار همدوسی در هر پایه پلاریزاسیون تابعی از منابع ایجاد همبستگی است. این تابع مطابق رابطه(۵) نمایش داده می‌شود.

$$\gamma = \gamma_{SNR}\gamma_v\gamma_t\gamma_B \qquad \text{(۵)رابطه}$$

در رابطه (۵)، γ_{SNR}ناشی از نسبت سیگنال به نویز، γ_v ناشی از بازپراکنش حجمی، γ_t ناشی از فاصله زمانی بین برداشت تصاویر در دو سر خط مبنا یا به عبارتی خط مبنای زمانی[4] است و بالاخره γ_B همدوسی ناشی

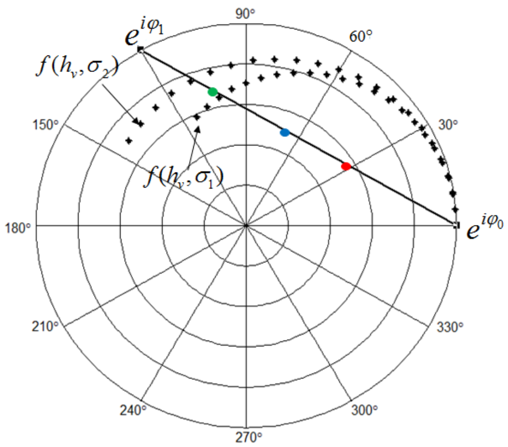
[1] *Complex unit circle*
[2] *Incidence angle*
[3] *Vertical wavenumber*
[4] *Temporal baseline*

[DOR: 20.1001.1.20089635.1401.10.3.2.0]
[DOI: 10.52547/jgit.10.3.29]

[DOR: 20.1001.1.20089635.1401.10.3.2.0]
[DOI: 10.52547/jgit.10.3.29]

از خط مبنای مکانی است که مقدار آن در منطقه مسطح برابر با یک است. γ_{SNR} در مقایسه با سه منبع دیگر قابل چشم‌پوشی است و γ_t نیز در صورت کوتاه بودن فاصله زمانی اخذ تصاویر قابل صرف‌نظر کردن است. همچنین γ_v، در پایه پلاریزاسیون سطحی برابر با یک است. به این ترتیب، مقدار دامنه همدوسی بر روی زمین با شرط باز زمانی کوتاه بین تصاویر و مسطح بودن سطح زمین، نزدیک به یک است. از این رو، دو نقطه تقاطع خط برازش داده شده با *CUC*، کاندیدای همدوسی سطحی هستند.

رفع ابهام بین دو نقطه تقاطع خط همدوسی و دایره و تعیین فاز زمین، هدف مرحله دوم این روش است. بدیهی است که فاصله بین مقادیر مختلط همدوسی در کانال‌های *HH+VV* و *HH-VV* تا همدوسی سطحی یا همدوسی روی سطح زمین کم‌تر از فاصله مذکور بین همدوسی در پایه *HV* و زمین است. به این ترتیب تعیین فاز زمین کار چندان مشکلی نخواهد بود. همدوسی زمین در شکل(۱) با $e^{i\varphi_0}$ نشان داده شده‌است.



شکل ۱: نمایی از انجام روش سه‌مرحله‌ای در پیکسلی با فاز زمینی صفر. همدوسی در آرایه‌های بردار پائولی به ترتیب با دایره توپر به رنگ‌های آبی، قرمز و سبز نشان داده شده‌است. $e^{i\varphi_0}$ همدوسی زمین است. منحنی‌های نمایش‌دهنده همدوسی حجمی بازای مقادیر ثابت میرایی به صورت دایره‌های توپر و با اسامی $f(h_v,\sigma_1)$ و $f(h_v,\sigma_2)$ نمایش داده شده‌است.

برآورد مقادیر ارتفاع و میرایی در مرحله سوم و با استفاده از همدوسی صرفاً حجمی مشاهده شده[1] انجام می‌شود. بنابراین لازمه انجام مرحله سوم، انتخاب یک پایه پلاریزاسیون به‌عنوان پایه پلاریزاسیون حجمی است. هر یک از آرایه‌های بردار پائولی، بیان‌گر یکی از مکانیزم‌های بازپراکنش شامل مکانیسم پراکنش سطحی[2]، دووجهی[3] و حجمی[4] است. از این رو در روش سه‌مرحله‌ای متدوال مقدار همدوسی در پایه *HV* به عنوان همدوسی حجمی (γ_v) در نظر گرفته می‌شود. به این ترتیب و با استفاده از رابطه (۴)، دو مجهول ارتفاع و میرایی قابل برآورد خواهند بود. به عبارت دیگر، با توجه به مقدار مختلط همدوسی، رابطه (۴) منجر به دو معادله در بخش حقیقی وموهومی می‌شود که می‌توانند برای حل دو مجهول h_v و σ به‌کار گرفته شوند. به دلیل غیرخطی بودن رابطه (۴)، حل دستگاه دو معادله و دو مجهول حاصل مستلزم دسترسی به مقادیر اولیه

[1] *Observed volume only coherence*
[2] *Surface scattering*
[3] *Dihedral scattering*
[4] *Volume scattering*

پارامترها و نیز انجام روند محاسبات زمان‌بر تکراری تا رسیدن به دقت قابل قبول است. الگوریتم سه‌مرحله‌ای، روشی هندسی را برای برآورد مجهولات بدون نیاز به مقادیر اولیه و تکرار محاسبات پیشنهاد داده‌است. برای این منظور منحنی‌های مکان هندسی همدوسی حجمی با استفاده از رابطه (۴)، بازای مقادیر ثابت میرایی و با تغییر مقادیر ارتفاع لایه حجمی به‌دست می‌آید. شکل(۱)، مراحل سه‌گانه روش هندسی سه مرحله‌ای را نشان می‌دهد. بدیهی است که مکان هندسی همدوسی حجمی محاسباتی از سویی بر روی منحنی میرایی ثابت و از سوی دیگر بر روی خط همدوسی است. بنابراین در این مرحله نیز همدوسی حجمی محاسباتی به اشتراک این دو مکان هندسی یعنی به تقاطع منحنی‌ها و خط محدود می‌شود. همچنان که در شکل(۱) دیده می‌شود، هر یک از منحنی‌های میرایی ثابت، خط همدوسی را در نقطه‌ای قطع می‌کنند و هر یک از این نقاط قطع در یک جدول بررسی[1] (*LUT*)، ذخیره می‌شود. در پایان مقدار همدوسی حجمی برآورد شده، $\gamma_{\hat{v}}$، بر اساس کمینه فاصله بین همدوسی‌های موجود در *LUT* و همدوسی حجمی مشاهداتی به‌دست می‌آید. بدیهی است که مقادیر ارتفاع و میرایی متناظر با همدوسی حجمی محاسباتی انتخاب شده، پاسخ مسئله خواهد بود. نکته قابل تامل این‌که در میان نقاط تقاطع به‌دست آمده از مرحله سوم، نقاطی که در حد فاصل همدوسی حجمی مشاهداتی و فاز زمین قرار گرفته‌اند، پاسخ‌های غیر قابل قبول مسئله هستند و از روند تصمیم‌گیری خارج می‌شوند. به عبارت دیگر، مقادیر μ از همدوسی صرفاً حجمی تا همدوسی صرفاً سطحی بین صفر تا بی‌نهایت تغییر می‌کند و همیشه مثبت است. به این ترتیب قرار گرفتن $\gamma_{\hat{v}}$ بین γ_{w_s} و γ_{HV}، مستلزم تخصیص مقداری منفی برای نسبت بازپراکنش سطحی به حجمی در γ_{HV} است که با تعریف ذکر شده برای این پارامتر هم‌خوانی ندارد. با این توضیحات، در شکل(۱) منحنی مکان هندسی بازای $\sigma = \sigma_1$، غیر قابل قبول است.

ملاحظه می‌شود که نتایج حاصل از الگوریتم سه‌مرحله‌ای به شدت متاثر از انتخاب پایه پلاریزاسیون حجمی است. در این مقاله ضمن بررسی امکان انتخاب یک پایه پلاریزاسیون حجمی بهینه، کاربرد الگوریتم بهینه‌سازی در نتایج حاصل از روش سه مرحله‌ای روی داده‌های *QPolInSAR* و *DPolInSAR* مورد بررسی و مقایسه قرار می‌گیرد.

۳- الگوریتم پیشنهادی بهینه‌سازی همدوسی حجمی

روش سه‌مرحله‌ای به دلیل ارائه یک راه حل هندسی برای برآورد پارامترهای مجهول در مدل *RVoG* و عدم نیاز به معرفی مقادیر اولیه پارامترها و اطلاعات کمکی، روشی مناسب برای برآورد ارتفاع درختان جنگل با استفاده از داده‌های تک‌خط مبنای *PolInSAR* است. با این‌حال فرض انتخاب پایه پلاریزاسیون *HV* به عنوان پایه پلاریزاسیون حجمی، نتایج را به شدت تحت تاثیر قرار می‌دهد. شکل (۱) به خوبی بیانگر این مسئله است که جابجایی مقدار همدوسی حجمی مشاهداتی بر روی خط همدوسی، تاثیر بسزایی در مقدار ارتفاع برآورد شده خواهد داشت. به این ترتیب، در سال‌های اخیر، مسئله پیدا کردن مقدار بهینه همدوسی حجمی مورد توجه قرار گرفت [۱۰ و ۱۴]. استفاده از روش جستجو بر روی خط ابهام[2] می‌تواند منجر به بهترین مقدار همدوسی صرفاً حجمی شود، اما نیاز به معرفی مقادیر دقیق μ در حداقل دو پایه پلاریزاسیون، کاربرد روش مذکور را به‌شدت محدود می‌کند [۱۰]. از این رو در این مقاله روشی ارائه می‌شود که با جستجو در میان کلیه کانال‌های مشاهداتی، همدوسی را در پایه پلاریزاسیون بهینه صرفاً حجمی محاسبه کرده و در مرحله سوم از روش وارونگی[3] سه‌مرحله‌ای مورد

[1] *Dihedral scattering*

[2] *Ambiguous line*

[34] *Inversion Method*

[DOR: 20.1001.1.20089635.1401.10.3.2.0]
[DOI: 10.52547/jgit.10.3.29]

استفاده قرار می‌دهد. نکته قابل ذکر این‌که، در داده‌های پلاریمتری با پلاریزاسیون دوگانه، به دلیل محدود شدن تعداد کانال‌ها و به عبارت دیگر محدودیت انتخاب پایه پلاریزاسیون، بهینه‌سازی همدوسی جایگاه ویژه‌ای پیدا می‌کند. در حال حاضر داده‌های راداری با پلاریزاسیون دوگانه با هزینه‌ای مناسب‌تر نسبت به داده‌های با پلاریزاسیون کامل وجود دارند و از این رو با توجه به عرض برداشت بیشتر داده‌های *DP*، استفاده از این تصاویر در صورت تامین دقت مورد نیاز، مقرون به صرفه است.

۳-۱- بهینه‌سازی همدوسی در داده پلاریزاسیون کامل

همچنان که در بخش ۱ عنوان شد، ترکیب تکنیک‌های تداخل‌سنجی و پلاریمتری امکان استفاده از پایه‌های پلاریزاسیون مختلف را در تکنیک تداخل‌سنجی فراهم می‌کند. در هر یک از تصاویر *QP* دو سر خط مبنا، با در دست داشتن بردار پائولی و با استفاده از بردار یکه واحد، امکان تولید پایه‌های پلاریزاسیون جدید برای آن تصاویر وجود خواهد داشت. به عبارت دیگر با تصویر کردن بردار پائولی بر روی بردار یکه واحد مقدار بازپراکنش در پایه جدید مطابق رابطه (۶) قابل محاسبه است [۸].

در رابطه (۶)، μ پایه پلاریزاسیون جدید و w بردار یکه واحد است که به صورت رابطه (۷) تعریف می‌شود [۸].

مقادیر ۴ پارامتر موجود در رابطه (۷)، مطابق رابطه (۸) تعریف می‌شود.

به این ترتیب با انتخاب مقادیر مختلف ۴ پارامتر w مطابق رابطه (۸)، بردارهای یکه مختلفی جهت تصویر کردن بردار پائولی و به‌دست آوردن پایه‌های پلاریزاسیون جدید به دست خواهد آمد. مشاهدات در *PolInSAR*، مقادیر مختلط همدوسی در پایه‌های پلاریزاسیون مختلف است که به صورت رابطه (۹) قابل محاسبه است [۸].

رابطه (۹) را می‌توان به صورت رابطه (۱۰) بازنویسی کرد.

رابطه(۶)
$$\mu = w_i^t k_i \;, \; i = 1,2$$

رابطه(۷)
$$w = \begin{bmatrix}\cos\alpha & \sin\alpha\cos\beta e^{i\psi} & \sin\alpha\sin\beta e^{i\delta}\end{bmatrix}^t$$

رابطه(۸)
$$\begin{cases} 0 \le \alpha \le \dfrac{\pi}{2} \\ 0 \le \beta \le \dfrac{\pi}{2} \\ -\pi \le \psi \le \pi \\ -\pi \le \delta \le \pi \end{cases}$$

رابطه(۹)
$$\gamma(w_1, w_2) = |\gamma| e^{i\varphi} = \frac{\langle \mu_1 \mu_2^* \rangle}{\sqrt{\langle \mu_1 \mu_1^* \rangle \langle \mu_2 \mu_2^* \rangle}}$$

رابطه(۱۰)
$$\gamma(w_1, w_2) = |\gamma| e^{i\varphi} = \frac{\langle w_1^* k_1 k_2^* w_2 \rangle}{\sqrt{\langle w_1^* k_1 k_1^* w_1 \rangle \langle w_2^* k_2 k_2^* w_2 \rangle}} = \frac{w_1^* \Omega_{12} w_2}{\sqrt{w_1^* T_{11} w_1 w_2^* T_{22} w_2}}$$

رابطه(۱۰) پایه انجام کلیه روش‌های بهینه‌سازی پلاریزاسیون[۱] است [۸ و ۱۵]. به عبارت دیگر کلیه روش‌های بهینه‌سازی پلاریزاسیون بسته به نوع کاربردی که هدف بهینه‌سازی آن‌ها قرار گرفته است، بردار یکه ویژه‌ای را برآورد می‌نمایند. همچنان که در بخش ۲-۳ عنوان شد، یکی از منابع ایجاد خطا در

۱ *Polarization optimization*

نتایج روش سه‌مرحله‌ای انتخاب نادرست پایه پلاریزاسیون حجمی مشاهداتی است. از این رو به‌دست آوردن پایه پلاریزاسیونی که اختلاف فاز تداخل‌نمای متناظر با آن از فاز زمین، بیش از مقدار اختلاف فاز γ_{HV} و φ_0 باشد، هدف بهینه‌سازی در این مقاله است. به عبارت دیگر، برای بهبود نتایج روش سه مرحله‌ای به‌جای این‌که مقدار همدوسی در کانال *HV* به‌عنوان همدوسی صرف حجمی مشاهداتی در نظر گرفته شود، مقادیر همدوسی مشاهداتی بر روی خط ابهام مورد بررسی و مطالعه قرار می‌گیرد. خط ابهام طبق تعریف عبارت است از بخشی از خط همدوسی که در حد فاصل γ_{HV}و $e^{i\varphi_1}$ قرار گرفته است. برای این منظور از یک روش بهینه‌سازی پلاریزاسیون جستجوی کلی[1] (*ESPO*) استفاده می‌شود [۱۲]. همچنان که از رابطه(۹) برمی‌آید، بهینه‌سازی *ESPO* در داده پلاریمتری کامل منجر به جستجوی مقادیر ۴ گانه پارامترهای تعیین کننده بردار یکه واحد می‌شود. به عبارت دیگر، روش‌های بهینه‌سازی بر پایه *ESPO* با تولید کلیه پایه‌های پلاریزاسیون و محاسبه تابع هزینه[2] برای آن‌ها، بهترین پایه را برای مقصود مورد نظر انتخاب می‌کنند [۱۲و ۱۶].

۳-۱- الگوریتم بهینه‌سازی همدوسی حجمی در داده پلاریزاسیون دوگانه

در داده‌های پلاریمتری با پلاریزاسیون دوگانه، به دلیل محدود شدن تعداد کانال‌ها و به عبارت دیگر محدودیت انتخاب پایه پلاریزاسیون، بهینه‌سازی همدوسی جایگاه ویژه‌ای پیدا می‌کند. در حال حاضر داده‌های راداری با پلاریزاسیون دوگانه با هزینه‌ای مناسب‌تر نسبت به داده‌های *QP* وجود دارند. از این رو، با توجه به عرض برداشت بیشتر داده‌های *DP* و هزینه کمتر آن‌ها، کارآیی داده *DP* در برآورد ارتفاع جنگل با استفاده از تکنیک *PolInSAR* اهدف این مقاله است. در ادامه الگوریتم پیشنهادی بهینه‌سازی همدوسی حجمی در داده *DP* ارائه می‌شود.

در صورت استفاده از تصاویر *DP*، ابعاد ماتریس همدوسی ۴×۴ است و به صورت رابطه (۱۱) محاسبه می‌شود.

$$T_4 = \langle kk^t \rangle = \begin{bmatrix} T_{11} & \Omega_{12} \\ \Omega_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \quad \text{رابطه(۱۱)}$$

که در آن بردارپائولی ۱×۲ برای هر یک از تصاویر دو سر خط مبنا به صورت رابطه (۱۲) نوشته می‌شود.

$$k_i = \sqrt{2}\begin{bmatrix} S_{HH} & S_{HV} \end{bmatrix}^t \ , \ i = 1,2 \quad \text{رابطه(۱۲)}$$

در رابطه(۱۲)، t ترانهاده بردار را نشان می‌دهد و S_{HH} و S_{HV} به ترتیب معرف کانال‌های پایه‌های پلاریزاسیون *HH* و *HV* هستند. اگر چه استفاده از داده دوگانه *VV* و *VH* نیز جهت کاربرد مورد نظر بلامانع است. نکته قابل توجه اینکه با توجه به ماهیت فیزیکی جنگل و اهمیت بازپراکنش حجمی در آن، داده *DP* مورد استفاده در الگوریتم‌های استخراج پارامترهای جنگل باید شامل کانال *HV* یا *VH* باشد.

به شکل مشابهی، بردار تصویرکننده w در تصاویر *DP*، به صورت رابطه (۱۳) و در ابعاد ۱×۲ تعریف می‌شود [۱۶]

$$w = \begin{bmatrix} \cos\alpha & \sin\alpha e^{i\psi} \end{bmatrix}^t \ , \ \begin{cases} 0 \le \alpha \le \dfrac{\pi}{2} \\ -\pi \le \psi \le \pi \end{cases} \quad \text{رابطه(۱۳)}$$

به این ترتیب، در داده *DP*، مسئله *ESPO* از یک جستجوی ۴ بعدی به یک جستجوی ۲ بعدی کاهش پیدا می‌کند.

واضح است که پایه پلاریزاسیون بهینه در مسئله انتخاب پلاریزاسیون صرفاً حجمی مشاهداتی، کانالی است که مقدار همدوسی محاسباتی در آن بر روی خط ابهام قرار داشته باشد و دورترین مقدار مشاهداتی به $e^{i\varphi_0}$ باشد. مسئله مذکور را می‌توان به شکل ساده‌تری نیز عنوان کرد. جستجو برای پیدا کردن همدوسی حجمی بهینه می‌تواند تنها بر اساس فاز همدوسی انجام شود. در اینصورت پایه منتخب پایه‌ای

---

[1] *Exhaustive Searching Polarization Optimization*

[2] *Cost function*

[DOR: 20.1001.1.20089635.1401.10.3.2.0]
[DOI: 10.52547/jgit.10.3.29]

است که فاز همدوسی آن بیشترین فاصله را از φ_0 داشته باشد.

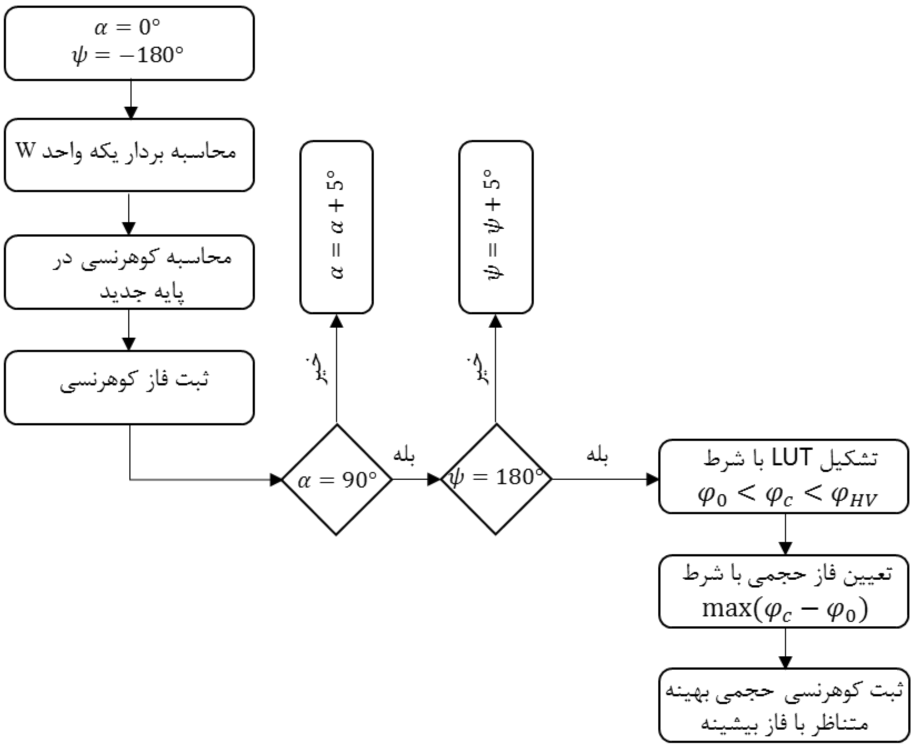
با فرض کوتاه بودن خط مبنای مکانی و زمانی، می‌توان مسئله بهینه‌سازی را با مکانیسم واحد در دو سر خط مبنا (*Equal Scattering Mechanism*(*ESM*)) حل کرد. با فرض *ESM*، فاز تداخل‌سنجی در هر پایه پلاریزاسیون محاسباتی به صورت رابطه(۱۴) به‌دست می‌آید.

رابطه(۱۴) $$\varphi_c = \arg(\gamma(w)) = \arg\left(w^*\Omega_{12}w\right),\ w_1 = w_2 = w$$

در رابطه(۱۴)، φ_c، فاز تداخل‌سنجی محاسبه شده بازای پایه پلاریزاسیون w است. کلیه زاویای تداخل‌سنجی ممکن بازای مقادیر مختلف پارامترهای معرفی شده در رابطه (۸)، محاسبه می‌شود و بر اساس تابع هزینه رابطه (۱۵) ارزش‌گذاری می‌شود.

رابطه(۱۵) $$\Delta\varphi = \varphi_c - \varphi_0$$

بدیهی است که فاز حجمی بهینه، φ_{opt}، بازای بیشینه رابطه(۱۵) حاصل خواهد شد. شکل(۲) روند انتخاب پایه پلاریزاسیون بهینه حجمی را در داده *PolInSAR* دوگانه نشان می‌دهد.



شکل ۲: روند نمای الگوریتم پیشنهادی بهینه‌سازی همدوسی حجمی به روش *ESPO* در داده *DP*

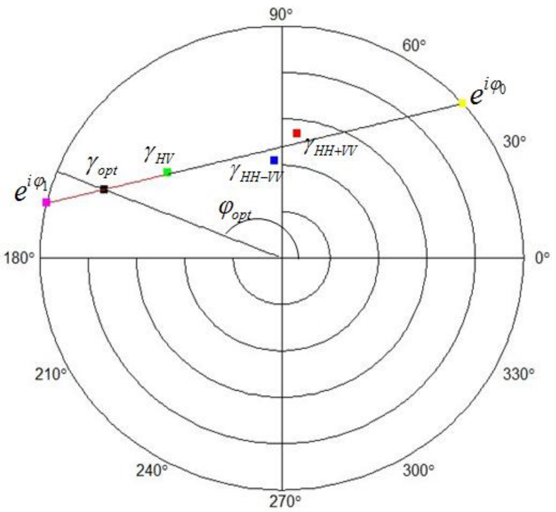
اکنون برای به‌دست آوردن همدوسی حجمی بهینه کافی است تقاطع خط $\varphi = \varphi_{opt}$ با خط همدوسی در *CUC* محاسبه شود. تقاطع دو خط مذکور، همدوسی حجمی مشاهداتی بهینه است. به این ترتیب، در مسئله پیدا کردن کانال حجمی مشاهداتی بهینه، از بالاترین مرکز فاز برای محاسبه همدوسی حجمی استفاده می‌شود. شکل(۳)، نمایش موقعیت همدوسی حجمی بهینه بر روی خط همدوسی در مقایسه با همدوسی حجمی مورد استفاده در روش مرسوم سه‌مرحله‌ای در دایره مختلط واحد را نشان می‌دهد.

همچنان که در شکل(۳) دیده می‌شود موقعیت همدوسی حجمی بهینه نسبت به γ_{HV} در فاصله

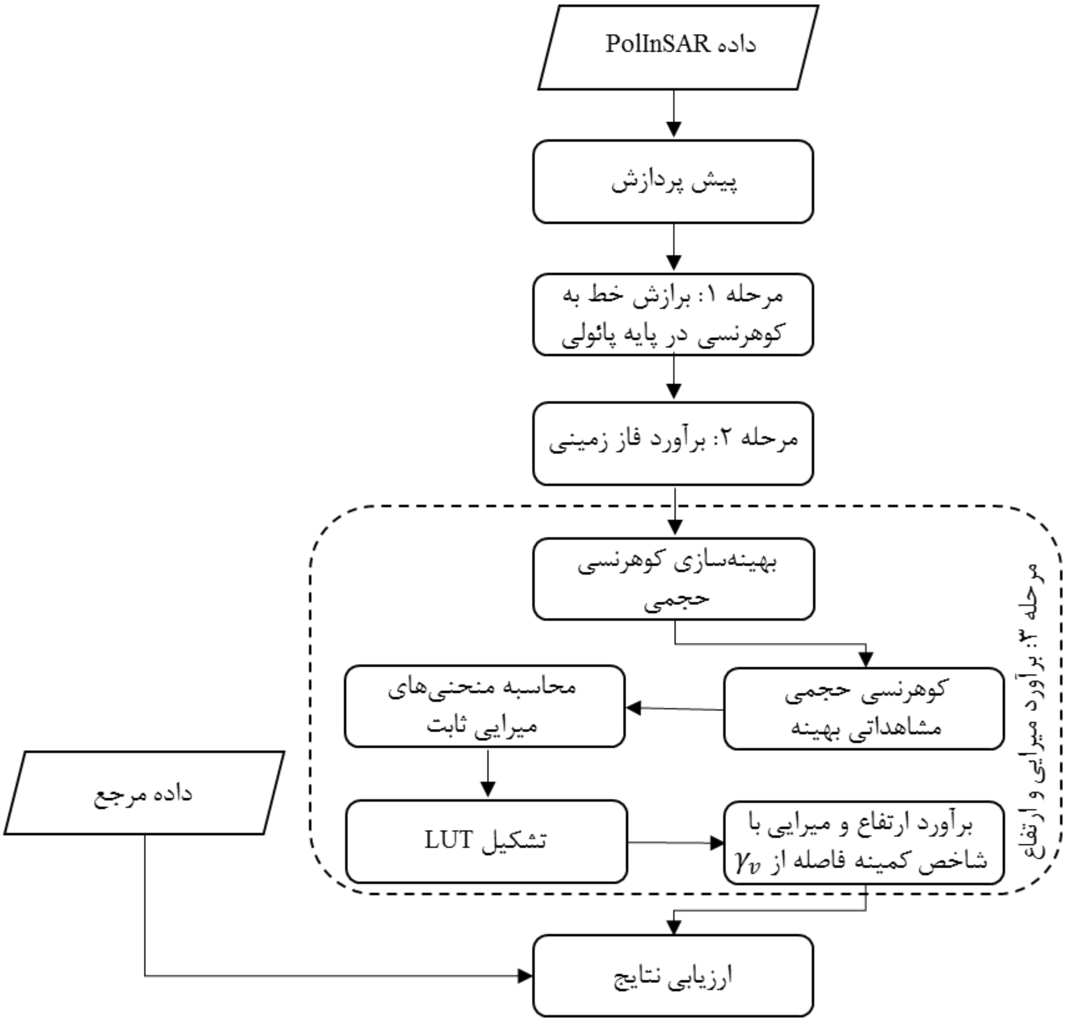
دورتری از همدوسی زمینی قرار گرفته‌است. به عبارت دیگر روش بهینه‌سازی پیشنهادی در بین پایه‌های پلاریزاسیون مشاهداتی، پایه‌ای را به عنوان همدوسی حجمی در نظر می‌گیرد که دارای بالاترین مرکز فاز است. به این ترتیب الگوریتم سه‌مرحله‌ای بهبود یافته با استفاده از همدوسی حجمی بهینه قابل پیاده‌سازی و اجرا خواهد بود.

شکل(۴)، روندنمای الگوریتم بهبودیافته پیشنهادی را برای استخراج ارتفاع جنگل با استفاده از تکنیک *PolInSAR* نشان می‌دهد. انتظار می‌رود که با توجه به بهبود همدوسی حجمی، نتایج روش پیشنهادی نسبت به روش سه‌مرحله‌ای مرسوم از بهبود دقت قابل توجهی برخوردار باشد.

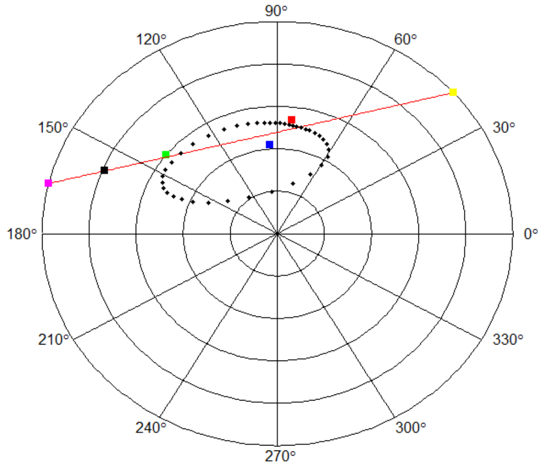
شکل(۵) و (۶)، به ترتیب محدوده‌های همدوسی را برای دو داده *QP* و *DP* در یک پیکسل مشترک نشان می‌دهد. با توجه به محدوده نمایش داده شده در شکل ۵ و ۶ ملاحظه می‌شود که محدوده همدوسی در داده *DP* محدودتر از داده *QP* است و همدوسی بهینه برآورد شده در هر دو داده دارای مرکز فازی بالاتر از فاز همدوسی در کانال *HV* است. طبیعی است که انتظار می‌رود نتایج ارتفاع جنگل برآورد شده حاصل از داده *QP*، از دقت بالاتری نسبت به نتایج حاصل از استفاده از داده *DP* برخوردار باشد. با این‌حال در بخش بعد نتایج مربوط به هر دو داده را با استفاده از همدوسی حجمی بهینه شده مورد مقایسه قرار می‌دهیم.



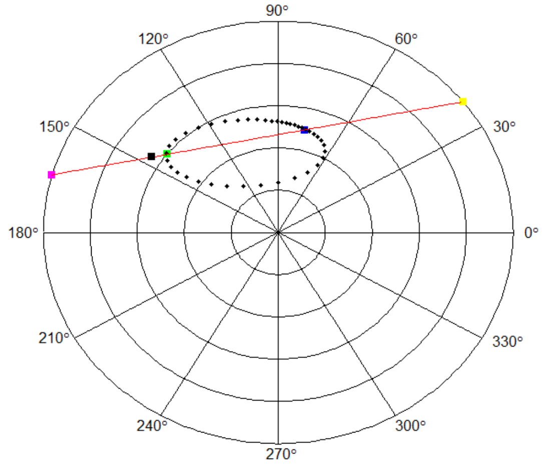
شکل ۳: نمایش موقعیت همدوسی حجمی بهینه بر روی خط همدوسی در مقایسه با همدوسی حجمی مورد استفاده در روش مرسوم سه‌مرحله‌ای در داده *QP*. مقادیر همدوسی در پایه‌های پائولی به ترتیب با رنگ‌های آبی، قرمز و سبز نشان داده شده‌است. همدوسی زمینی با نام $e^{i\varphi_0}$ و با رنگ زرد نمایش داده شده‌است. همدوسی حجمی بهینه حاصل از روش *ESPO* با رنگ مشکی و با عنوان γ_{opt} دیده می‌شود [۱۲].



شکل ۴: روندنمای الگوریتم بهبود یافته سه‌مرحله‌ای با استفاده از بهینه‌سازی همدوسی حجمی



شکل ۵: نمایش محدوده همدوسی در داده *QP*. مقادیر همدوسی در پایه پائولی به ترتیب با مربع‌های توپر آبی، قرمز و سبز نمیش داده شده‌است. پایه حجمی بهینه با مربع توپر مشکی نمایش داده شده است.



شکل ۶: نمایش محدوده همدوسی در داده *DP*. مقادیر همدوسی در دو پایه پالاریزاسیون *HH* و *HV* به ترتیب با مربع‌های توپر آبی و سبز نمایش داده شده‌است. پایه حجمی بهینه با مربع توپر مشکی نمایش داده شده است.

۴- مواد و روش‌ها

در این بخش علاوه بر معرفی منطقه مطالعاتی و داده‌های مورد استفاده، روش پیشنهادی در بهبود الگوریتم وارونگی سه‌مرحله‌ای و استفاده از داده *DP* ارائه می‌شود.

۴-۱-منطقه مطالعاتی

منطقه مطالعاتی در این پژوهش منطقه مطالعاتی جنگلی رمنینگ‌استورپ[۱] در جنوب سوئد به مختصات جغرافیایی ´۲۸ °۵۸ شمالی و ´۳۸ °۱۳ شرقی است که در کمپین راداری سال ۲۰۰۷[۲] آژانس فضایی اروپا[۳]

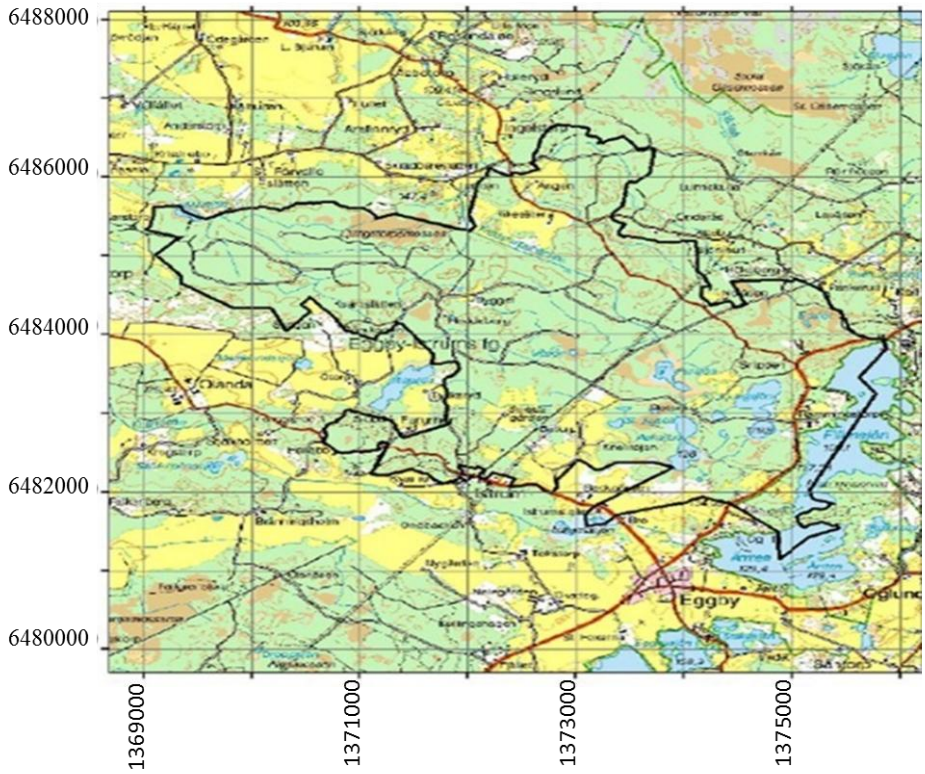
۱ *Remningstorp*

۲ *Campaign BioSAR 2007*

۳ *European Space Agency*

[DOR: 20.1001.1.20089635.1401.10.3.2.0]
[DOI: 10.52547/jgit.10.3.29]

مورد استفاده قرار گرفته‌است. منطقه مورد نظر با وسعت ۱۲۰۰ هکتار در منطقه‌ای نسبتا مسطح قرار دارد که ارتفاع آن از سطح آب‌های آزاد بین ۱۲۰ تا ۱۴۵ متر است. شکل(۷) موقعیت این منطقه را در سوئد نشان می‌دهد.



شکل ۷: منطقه مطالعاتی رمنینگ‌استورپ در سوئد، منطقه مطالعاتی با مرز مشکی مشخص شده‌است و سیستم مختصات مورد استفاده *RT90* سوئد است [۱۷]

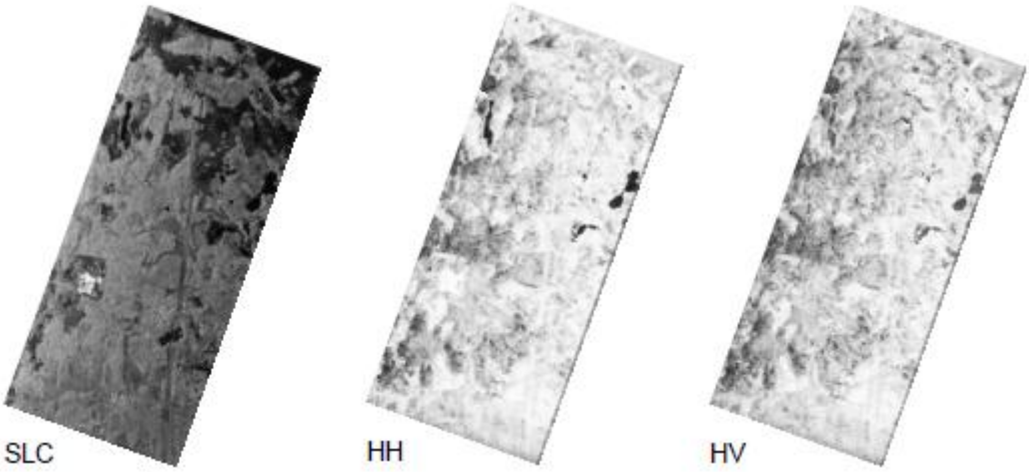
۴-۲ داده مورد استفاده

در این پژوهش از داده تک خط مبنا و تک فرکانس سنجنده هوابرد[۱] *ESAR* در باند *L* استفاده شده‌است. حد تفکیک مکانی سنجنده در جهت آزیموت[۲] ۱/۵ متر و حد تفکیک مکانی آن در جهت رنج[۳] ۰/۷۴ متر می‌باشد. نکته قابل تأمل این‌که کلیه تصاویر راداری اخذ شده با هدف *PolInSAR* در این کمپین دارای پوشش مشابه هستند و دقیقا از یک منطقه اخذ شده‌اند. با این حال باز مبنای مکانی و زمانی بین زوج داده‌ها متفاوت است. زوج داده پلاریمتری مورد استفاده در باند *L* و در تاریخ دوم می سال ۲۰۰۷ اخذ شده‌اند و لذا باز زمانی آن‌ها قابل اغماض است. همچنین محدوده‌هایی که پوشش جنگل در آن‌ها همگن است به‌عنوان محدوده‌های منتخب و با ذکر ویژگی‌های فیزیکی آن‌ها و با مختصات معلوم محدوده در قسمت داده زمینی قرار داده شده‌است. در مجموع ۵۳ محدوده در این داده معرفی شده‌است که جهت ارزیابی نتایج می‌توان از تعدادی از آن‌ها استفاده نمود. گونه غالب در این منطقه درختان کاج، صنوبر و درختان پهن برگ غیر همسال است. در انتخاب محدوده‌ها به گونه‌ای عمل شده است که در هر استند گونه‌های درختان

[۱] *Airborne*
[۲] *Azimuth Resolution*
[۳] *Range Resolution*

[DOR: 20.1001.1.20089635.1401.10.3.2.0]
[DOI: 10.52547/jgit.10.3.29]

نسبتا همگن و از یکی از سه دسته نامبرده باشد [۱۸]. از این رو اگر چه محدوده جنگل، آمیخته است اما محدوده‌های مورد استفاده در ارزیابی، نسبتا خالص هستند. تصویر دامنه بازپراکنش در پایه HH و دامنه همدوسی در پایه‌های HH و HV در شکل(۸) نمایش داده شده است.



شکل ۸: نمایش داده راداری مورد استفاده. از چپ به راست: مقدار دامنه در پایه HH، مقدار دامنه همدوسی در پایه HH و مقدار دامنه همدوسی در پایه HV.

همچنین اندازه‌گیری‌های لیدار[۱] به عنوان داده مبنای ارتفاعی و برای ارزیابی نتایج مورد استفاده قرار گرفته‌است. داده لیدار منطقه با حد تفکیک مکانی ۰/۵ متر برای کل منطقه مطالعاتی برداشت شده‌است. داده لیدار مورد استفاده با استفاده از جاسازی سنجنده در هلیکوپتر و از ارتفاع ۵۰۰ متری زمین، به صورت ابر نقطه با تراکم ۵ نقطه در هر متر مربع برداشت شده‌است. ارتفاع جنگل در محدوده‌های منتخب با میانگین‌گیری حسابی از ارتفاع مشاهداتی به‌دست می‌آید و به‌عنوان داده مرجع جهت ارزیابی الگوریتم‌های پیشنهادی مورد استفاده قرار می‌گیرد. نکته قابل توجه اینکه در میانگین‌گیری ارتفاعات مشاهداتی حاصل از لیدار و ارتفاع محاسباتی حاصل از الگوریتم ارائه شده، تنها درختانی که دارای ارتفاع بیش از ۵ متر هستند وارد محاسبات شده‌اند. به این ترتیب احتمال خطا در ثبت ارتفاع لیدار از عوارضی غیر از درختان، مانند بوته‌ها و یا ثبت از تنه درختان، به حداقل می‌رسد.

۵- پیاده‌سازی و ارزیابی نتایج

در این مقاله، الگوریتم پیشنهادی و روش مرسوم سه‌مرحله‌ای بر روی داده پلاریمتری کامل و داده پلاریمتری دوگانه اجرا شد. ار آن‌جایی که تصاویر برداشت شده در کمپین مورد استفاده نسبت به تصویر پایه هم مرجع[۲] هستند، نیازی به انجام مرحله هم‌مرجع سازی در پیش پردازش داده‌ها نیست. لذا مراحل تولید ماتریس همدوسی پلاریمتری تداخل‌سنجی و نیز تولید مقادیر مختلط همدوسی در پایه‌های پائولی بدون انجام هر گونه پیش‌پردازشی در محیط نرم‌افزار پلسارپرو[۳] انجام شد. با توجه به حدتفکیک مکانی سنجنده و نیز

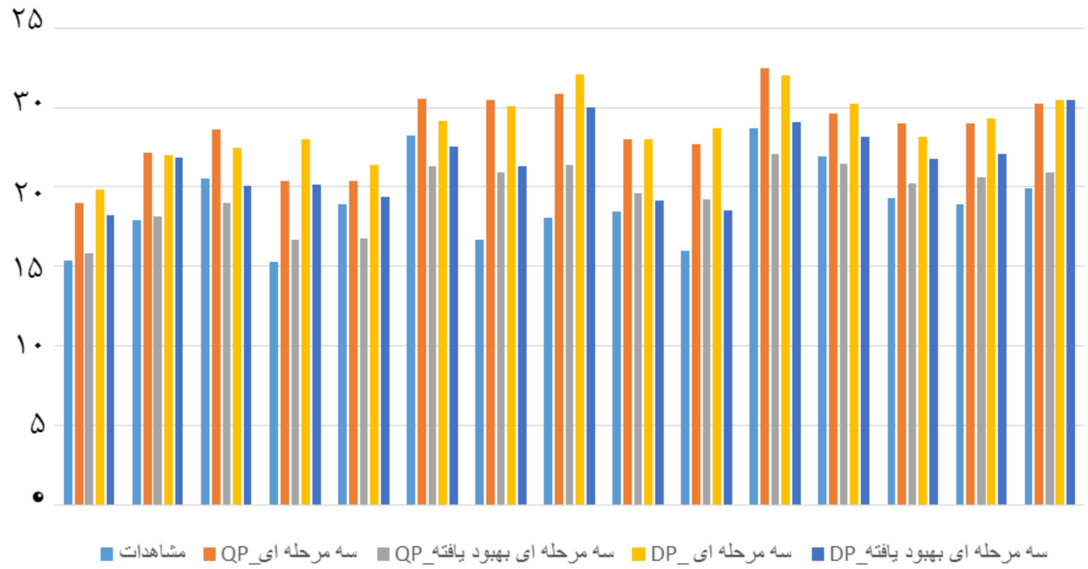
[۱] *LiDAR Measurement*

[۲] *Coregistered*

[۳] *PolSARPro*

[DOR: 20.1001.1.20089635.1401.10.3.2.0]
[DOI: 10.52547/jgit.10.3.29]

همگونی توزیع گونه‌های درخت در محدوده‌های مورد استفاده، ابعاد پنجره میانگین‌گیری در تولید مقادیر همدوسی و ماتریس همدوسی، ۱۱×۱۱ انتخاب شد. به این ترتیب در واقع فیلتر میانگین با ابعاد ۱۱×۱۱ بر روی مقادیر همدوسی محاسباتی، سبب کاهش اسپکل خواهد شد. به این ترتیب مقادیر ورودی الگوریتم سه‌مرحله‌ای و الگوریتم بهینه‌سازی همدوسی حجمی فراهم شد. جهت زمین مرجع نمودن تصاویر، جداولی در کمپین *BioSAR2007* ارائه شده‌است که امکان زمین مرجع(*Georeferencing*) نمودن تصاویر را در محیط برنامه‌نویسی متلب فراهم می‌کند. از این رو عملیات زمین مرجع نمودن و کلیه مراحل پیاده‌سازی الگوریتم وارونگی ارتفاع در محیط نرم افزار متلب صورت گرفت و جهت ارزیابی نتایج نیز از فایل *DSM* منطقه استفاده شد. در این بخش نتایج حاصل از اجرای دو الگوریتم سه‌مرحله‌ای و سه‌مرحله‌ای بهبود یافته به تفکیک داده *QP* و *DP* ارائه می‌شود. شکل ۹ ارتفاعات برآورد شده در ۱۵ استند انتخابی، با استفاده از الگوریتم پیشنهادی و روش مرسوم را در داده پلاریمتری کامل و دوگانه نشان می‌دهد. برای بررسی نتایج حاصل از الگوریتم‌های وارونگی روی داده *DP* تنها از باندهای *HH* و *HV* داده حقیقی استفاده شد. بدیهی است که با بهبود دقت همدوسی حجمی مشاهداتی، نتایج حاصل بهبود می‌یابد.



شکل ۹: مقایسه ارتفاع مشاهداتی و ارتفاعات محاسباتی با استفاده از داده‌های پلاریمتری کامل و دوگانه در ۱۵ استند منتخب وبا استفاده از هر دو روش سه‌مرحله‌ای مرسوم و روش سه‌مرحله‌ای بهبودیافته با استفاده از بهینه‌سازی همدوسی

ملاحظه می‌شود که روش سه‌مرحله‌ای مرسوم، مقادیر ارتفاع را بیش از مقدار واقعی[1] آن‌ها برآورد می‌کند. علت عمده این مسئله انتخاب غیر دقیق مقدار همدوسی حجمی است [۶]. به‌گونه‌ای که در تصاویری با عدم همبستگی زمانی[2] بالا، این خطا افزایش می‌یابد. از آن‌جایی که دامنه همدوسی حجمی متاثر از ارتفاع درختان جنگل است و با افزایش ارتفاع جنگل، دامنه کاهش می‌یابد، لذا انتخاب همدوسی با دامنه کم منجر به برآورد ارتفاع با مقداری بیش از مقدار واقعی خواهد

۱ *Over Estimation*

۲ *Temporal Decorrelation*

[DOR: 20.1001.1.20089635.1401.10.3.2.0]
[DOI: 10.52547/jgit.10.3.29]

[DOR: 20.1001.1.20089635.1401.10.3.2.0]
[DOI: 10.52547/jgit.10.3.29]

شد. شکل ۹ نشان می‌دهد که با نزدیک شدن مقدار همدوسی حجمی به محیط دایره *CUC*، ارتفاع برآورد شده به مقدار واقعی نزدیک می‌شود و در نهایت دقت نتایج روش سه مرحله‌ای بهبود یافته، در مقایسه با روش سه‌مرحله‌ای مرسوم در هر دو داده *DP* و *QP* به ترتیب ۲/۴ متر و ۲/۷ متر بهبود می‌یابد. مقایسه نتایج در داده دوگانه نیز مؤید بهبود نتایج الگوریتم وارونگی سه مرحله‌ای در اثر بهینه‌سازی همدوسی حجمی به روش پیشنهادی است. همچنین مقایسه شکل(۹) نشان می‌دهد اگرچه در داده پلاریمتری دوگانه امکان استفاده از همه پایه‌های پلاریزاسیون برای تعیین همدوسی حجمی بهینه وجود ندارد، اما با این‌حال نتایج حاصل قادر به برآورد ارتفاع درختان جنگل با تفاوت دقتی کمتر از ۲ متر نسبت به داده پلاریمتری کامل است. همچنین بهینه‌سازی همدوسی حجمی در داده پلاریمتری دوگانه نیز منجر به بهبود نتایج شده‌است. به این ترتیب روش پیشنهادی می‌تواند امکان بهره‌گیری از مزایای داده پلاریمتری دوگانه را در برآورد ارتفاع جنگل فراهم نماید.

جدول(۱) مقادیر *RMSE* و ضریب تعیین را برای ۴ حالت فوق الذکر نشان می‌دهد.

جدول ۱. مقادیر ضریب تعیین و جذرمیانگین خطای محاسبه شده در ۱۵ ناحیه منتخب

	سه مرحله‌ای-*QP*	سه مرحله‌ای بهبودیافته-*QP*	سه مرحله‌ای-*DP*	سه مرحله‌ای بهبودیافته-*DP*
جذر میانگین خطا	۲/۰۲	۴/۹۸	۶/۷۳	۴/۳۹
ضریب تعیین	۰/۶۸۲۹	۰/۶۵۹۳	۰/۵۹۶۱	۰/۶۶۶۱

نکته قابل تامل این‌که مقدار ضریب تعیین[۱] که همبستگی آماری بین ارتفاع محاسباتی و مشاهداتی را نشان می‌دهد، در دو روش تفاوت چندانی ندارد. به‌عبارت دیگر خطای بالای روش سه‌مرحله‌ای در مقایسه با روش پیشنهادی، یک خطای سیستماتیک است که منبع آن انتخاب همدوسی حجمی مشاهداتی با فازی پایین تر از مقدار واقعی است.

نکته‌ای که باید در استفاده از روش‌های برآورد ارتفاع مبتنی بر مدل فیزیکی *RVoG* مدنظر داشت، توجه به فرضیاتی است که در این مدل در نظر گرفته می‌شود. به عبارت دیگر دقت نتایج متاثر از دو فرض اولیه این مدل، همدوسی بیشینه در پایه پلاریزاسیون صرفاً سطحی متناظر با زمین و خطی بودن مکان هندسی مقادیر همدوسی در دایره مختلط واحد، می‌باشد. از این رو در استفاده از روش سه مرحله‌ای و یا هر روش دیگری که مبتنی بر این مدل فیزیکی است انتظار نداریم که مقادیر ارتفاعی در کل تصویر قابل استخراج باشد. از این رو پیش از اعمال الگوریتم مزبور ضمن تفکیک منطقه جنگل در سطح تصویر، الگوریتم را تنها در مورد مناطقی اجرا می‌کنیم که در اصطلاح دارای دو مرکز فاز باشند. استخراج فاز زمین با استفاده از روش برازش خط در دو مرحله اول روش سه مرحله‌ای در مناطقی با یک مرکز فاز که دارای محدوده همدوسی به شکل نقطه‌ای هستند و یا در مناطقی با بیش از یک مرکز فاز که محدوده همدوسی آن‌ها از یک خط به سمت بیضی متمایل است، با خطای آشکاری روبرو است که کل نتایج را تحت تاثیر قرار خواهد داد.

۶- بحث و بررسی

تاکنون تحقیقات زیادی در زمینه استفاده از داده *PolInSAR* با پلاریزاسیون کامل جهت برآورد ارتفاع جنگل ارائه شده‌است [۶ و ۱۱ و ۱۲ و ۱۹]. در این پژوهش با هدف بهره‌مندی از مزایای داده *DP*، استفاده

[۱] *Determination of coefficient*

از داده پلاریمتری دوگانه جهت برآورد ارتفاع جنگل با استفاده از تکنیک *PolInSAR*، مورد بحث و بررسی قرار گرفت. همچنین الگوریتم بهینه‌سازی *ESPO* جهت بهبود نتایج حاصل از داده پلاریمتری دوگانه مورد استفاده قرار گرفت. نتایج حاصل از این بررسی بر روی داده حقیقی باند *L*، موید این مطلب است که داده پلاریمتری دوگانه در صورت استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی همدوسی حجمی به روش *ESPO* می‌تواند دقتی در حدود ۴/۴ متر داشته باشد. به این ترتیب با توجه به عرض برداشت بیشتر در داده پلاریمتری دوگانه نسبت به داده پلاریمتری کامل و نیز هزینه کمتر آن، ملاحظه می‌شود که علیرغم کاهش اطلاعات از چهار پایه پلاریزاسیون به دو پایه، با به‌کارگیری روش بهینه‌سازی ارائه شده، نتایج قابل قبولی در برآورد ارتفاع جنگل حاصل می‌شود. مزیت عمده روش بهینه سازی ارائه شده در عدم نیاز آن به معرفی مقادیر اولیه پارامترهاست که می‌تواند آن را از روش‌های مشابه [۱۰] متمایز سازد. اگرچه زمان مورد نیاز روش ارائه شده به جستجو و بررسی همه پایه‌های پلاریزاسیون، سبب بالارفتن زمان اجرای الگوریتم می‌شود و در صورت بررسی یک منطقه وسیع می‌تواند به یک نقطه ضعف تبدیل شود. از این رو پیشنهاد می‌شود کارآیی روش ارائه شده در جستجوی پایه پلاریزاسیون با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک نیز مورد ارزیابی قرار گیرد. همچنین پیشنهاد می‌شود که جهت بهبود برآورد فاز زمین در استفاده از داده پلاریمتری دوگانه، به جای برازش خط به پایه‌های پائولی، از قطر بزرگ بیضی ناحیه همدوسی استفاده شود. در چنین حالتی برآورد فاز زمین با دخالت تعداد بیشتری از پایه‌های پلاریزاسیون مشاهداتی انجام می‌شود که انتظار می‌رود موجب بالا رفتن دقت نتایج شود. همچنین پیشنهاد می‌شود بهینه‌سازی انجام شده در داده‌های کامپکت (*Compact-pol*) نیز صورت گرفته و نتایج روی این نوع از داده پلاریمتری نیز مورد بررسی قرار گیرد. نتایج حاصل از بهینه‌سازی *ESPO*، برای بهبود نتایج حاصل از روش اختلاف مدل رقومی ارتفاعی و روش ترکیبی در برآورد ارتفاع جنگل، نیز می‌تواند مورد استفاده و بررسی قرار گیرد.

مراجع

[1] J. P. M. Overman, H. J. L. Witte, and J. G. Saldarriaga, "Evaluation of regression models for above-ground biomass determination in Amazon rainforest": Journal of tropical Ecology, 10(2), 207-218, 1994.

[2] M. C.Dobson, F. T. Ulaby, T. LeToan, A. Beaudoin, E. S. Kasischke, and N. Christensen, "Dependence of radar backscatter on coniferous forest biomass": IEEE Transactions on Geoscience and remote Sensing, 30(2), 412-415, 1992.

[3] B. J. Enquist, J. H. Brown, and G. B. West, "Allometric scaling of plant energetics and population density": Nature, 395(6698), 163-165, 1998.

[4] K. P. Papathanassiou, and S. R. Cloude, "Single-baseline polarimetric SAR interferometry": IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 39(11), 2352-2363, 2001.

[5] S. R. Cloude, and K. P. Papathanassiou, "Three-stage inversion process for polarimetric SAR interferometry": IEE Proceedings-Radar, Sonar and Navigation, 150(3), 125-134, 2003.

[6] M. Lavalle, and S. Hensley, "Extraction of structural and dynamic properties of forests from polarimetric-interferometric SAR data affected by temporal decorrelation": IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 53(9), 4752-4767, 2015.

[7] F. Garestier, P. C. Dubois-Fernandez, and I. Champion, "Forest height inversion using high-resolution P-band Pol-InSAR data": IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 46(11), 3544-3559,

[DOR: 20.1001.1.20089635.1401.10.3.2.0]
[DOI: 10.52547/jgit.10.3.29]

2008.

[8] S. R. Cloude, and K. P. Papathanassiou, "Polarimetric SAR interferometry": IEEE Transactions on geoscience and remote sensing, 36(5), 1551-1565, 1998.

[9] F.Wenxue, G. Huadong, L. Xinwu, T. Bangsen, and S. Zhongchang,"Extended three-stage polarimetric SAR interferometry algorithm by dual-polarization data": IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 54(5), 2792-2802, 2015.

[10] T. Managhebi, Y. Maghsoudi, and M. J. Valadan Zoej, "An improved three-stage inversion algorithm in forest height estimation using single-baseline polarimetric sar interferometry data": IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 15(6), 887-891, 2018.

[11] T. Managhebi, Y. Maghsoudi, and M. J. Valadan Zoej, "A volume optimization method to improve the three-stage inversion algorithm for forest height estimation using PolInSAR data": IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 15(8), 1214-1218, 2018.

[12] R. N. Treuhaft, and P. R. Siqueira, "Vertical structure of vegetated land surfaces from interferometric and polarimetric radar": Radio Science, 35(1), 141-177, 2000.

[13] Q. Xie, J. Zhu, C. Wang, and H. Fu, "Boreal forest height inversion using E-SAR PolInSAR data based coherence optimization methods and three-stage algorithm": Third International Workshop on Earth Observation and Remote Sensing Applications (EORSA) (pp. 145-150), 2014.

[14] M. Qong, "Coherence optimization using the polarization state conformation in PolInSAR": IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2(3), 301-305, 2005.

[15] V. D. Navarro-Sanchez, J. M. Lopez-Sanchez, and F. Vicente-Guijalba, "A contribution of polarimetry to satellite differential SAR interferometry: Increasing the number of pixel candidates": IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 7(2), 276-280, 2009.

[16] I. Hajnsek, R. Scheiber, S. Lee, L. Ulander, A. Gustavsson, S. Tebaldini, and A. Monte Guarnieri, Technical assistance for the development of airborne SAR and geophysical measurements during the BioSAR 2007 experiment: ESA-ESTEC, 2008.

[17] I. Hajnsek, R. Scheiber, S. Lee, L. Ulander, A. Gustavsson, S. Tebaldini, and A. Monte Guarnieri, Technical assistance for the development of airborne SAR and geophysical measurements during the BioSAR 2007 experiment: ESA-ESTEC, 2007.

[18] T. Managhebi, Y. Maghsoudi, and M. J. Valadan Zoej, "Four-stage inversion algorithm for forest height estimation using repeat pass polarimetric SAR interferometry data": Remote Sensing, 10(8), 1174, 2018.

K. N. TOOSI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY
FACULTY OF GEODESY AND GEOMATICS ENGINEERING

Journal of Geospatial Information Technology
Vol.10, No.3, Autumn 2022

Research Paper

[DOR: 20.1001.1.20089635.1401.10.3.2.0]

[DOI: 10.52547/jgit.10.3.29]

Three-stage Inversion Improvement for Forest Height Estimation using Dual-PolInSAR Data

*Tayebeh Managhebi [1], Yaser Maghsoudi [2], Mohammad Javad Valadan Zouj [3]**

1- PHD graduated, Faculty of Geodesy and Geomatics, K. N. Toosi University of Technology
2- Associate professor, Faculty of Geodesy and Geomatics, K. N. Toosi University of Technology
3- Professor, Faculty of Geodesy and Geomatics, K. N. Toosi University of Technology

Abstract

This paper addresses an algorithm for forest height estimation using single frequency and single baseline dual polarization radar interferometry data. The proposed method is based on a physical two layer volume over ground model and is represented by using polarimetric synthetic aperture radar interferometry (PolInSAR) technique. The presented algorithm provides the opportunity to take advantages of the dual polarimetric data, i.e, better spatial resolution and wider swath width, in comparison with the full polarimetric data, in forest height estimation application. In this research, a polarimetric optimization method is utilized to choose the optimum volume polarization basis in order to improve the results of the three-stage inversion algorithm. For the performance analysis of the proposed approach, the L-band ESAR data of the European Space Agency from BioSAR 2007 campaign (ESA) which is acquired over the Remningstorp test site in southern Sweden, is employed. The experimental result shows the dual PolInSAR HH/HV data capability in the forest height estimation without decreasing the accuracy of the result compared with the full polarimetric data. The suggested method leads to the average root mean square error (RMSE) of 4.39 m and the determination of coefficient of 0.66 in the forest height estimation in 15 predetermined stands in comparison with the LiDAR reference heights.

Key words: *Dual polarimetry, Forest height, Polarimetric optimization, Polarimetric synthetic aperture radar interferometry, Three-stage inversion algorithm*

Correspondence Address: *Photogrammetry and Remote Sensing Group, Faculty of Geomatics Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran.*
Tel : +98 21 88877071.
Email : *valadanzouj@kntu.ac.ir*