

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

طیبه مناقبی^۱، یاسر مقصودی^۲، محمدجواد ولدان زوج^{۳*}

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 تداخل سنجی 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 تداخل سنجی 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 سه مرحله‌ای استفاده شده است. جهت ارزیابی الگوریتم ارائه شده از داده‌های سنجنده هواپرد $ESAR$ 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 $4/39$ متر و ضریب تعیین $0/66$ در اندازه‌گیری ارتفاع در پانزده ناحیه از پیش تعیین شده در مقایسه با ارتفاع مرجع لیدار می‌شود.

کلید واژه‌ها: ارتفاع جنگل، الگوریتم وارونگی سه مرحله‌ای، بهینه‌سازی پلاریمتریک، پلاریزاسیون دوگانه، تداخل سنجی پلاریمتری.

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

تلفن: ۰۲۱۸۸۸۷۷۰۷۱

۱- مقدمه

زیست توده^۱ جنگل، پارامتری تاثیرگذار در مطالعات آب و هوا و زیست محیطی در مقیاس محلی و جهانی محسوب می شود [۱]. نظر به زمان بر بودن و هزینه بالای روش های 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 شبانه روز، منبعی کارآمد جهت تولید داده مورد نیاز جهت کمی سازی مشخصه های بیوفیزیکی جنگل نظیر زیست توده است. پارامتر زیست توده جنگل به دو روش مستقیم و غیر مستقیم قابل اندازه گیری است. برآورد مستقیم زیست توده در جنگل های انبوه تحت تاثیر عواملی نظیر طول موج^۳ داده راداری، چگالی جنگل، نوع جنگل و ... به دلیل محدودیت اشباع شدگی با خطای بالایی همراه است [۲]. از این رو استفاده از پارامتر ارتفاع جنگل^۴ برای برآورد غیر مستقیم زیست توده با استفاده از معادلات آلومتریک^۵ مورد توجه قرار گرفت [۳]. در میان روش های موجود برآورد ارتفاع، تکنیک تداخل سنجی پلاریمتری راداری با روزه 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 تداخل سنجی، امکان تفکیک

مراکز فاز و مطالعه ساختار قائم اهدافی مانند جنگل را که در راستای قائم گسترده شده اند فراهم می سازد. الگوریتم های مبتنی بر این تکنیک که مطالعه ساختار و پارامترهای جنگل را تنها با استفاده از زوج داده اخذ شده در یک باند، انجام می دهند، تصاویر با طول موج بلند را انتخاب می کنند [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 تداخل نمای مجزا برای پایه های پلاریزاسیون سطحی و حجمی، مراکز فاز ساختار قائم جنگل را در نزدیکی سطح زمین و تاج درختان به دست می آورد [۸]. اگرچه سادگی روش مذکور مزیت غیر قابل انکار آن محسوب می شود، اما خطای برآورد به دلیل عدم انطباق مراکز فاز محاسباتی و بر سطح زمین و تاج پوشش گیاهی، همیشه ارتفاع درخت را کمتر از مقدار واقعی برآورد می کنند. معرفی مدل فیزیکی جنگل به صورت پراکنش نامنظم حجمی بر روی زمین^۸ (*RVoG*) غیر قابل نفوذ، مقدمه ای برای ارائه روش های جدید برآورد ارتفاع با استفاده از تکنیک *PolInSAR* شد [۸]. روش دستگاه معادلات غیر خطی شش معادله و شش مجهول، مبتنی بر مدل نام برده، به روش تکرار و با استفاده از مقادیر اولیه مجهولات، ارتفاع جنگل را برآورد می کند [۴]. در این روش که بر مبنای مقادیر مختلط همدوسی^۹ در سه پایه پلاریزاسیون مستقل عمل می کند، نیاز به مقادیر اولیه مجهولات و روند زمان بر حل معادلات از معایب غیر قابل اغماض است. در ادامه، روش حل سه مرحله ای^{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

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 سه مرحله‌ای 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 به عنوان 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

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 سه مرحله‌ای در برآورد ارتفاع جنگل با استفاده از داده تداخل‌سنجی با پلاریزاسیون دوگانه^۶ (DP) نیز به کار گرفته شد [۱۰]. در این روش که بر مبنای روش سه مرحله‌ای است، یک الگوریتم جستجو جهت به دست 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

^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

طوری که 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.

$$\gamma = |\gamma| e_{i\phi} = \frac{\langle S_1 S_2^* \rangle}{\sqrt{\langle S_1 S_1^* \rangle \langle S_2 S_2^* \rangle}} \quad \text{رابطه (۲)}$$

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].

$$\gamma(w) = e^{i\phi_0} \frac{\gamma_v + \mu(w)}{1 + \mu(w)} \quad \text{رابطه (۳)}$$

^۳ Horizontal

^۴ Vertical

^۵ Volume only coherence

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 6×6 که به صورت رابطه (۱) تعریف می‌شود، استخراج می‌شوند [۸].

$$T_6 = \langle kk' \rangle = \begin{bmatrix} T_{11} & \Omega_{12} \\ \Omega_{21} & T_{22} \end{bmatrix}, \quad k = \begin{bmatrix} k_1 \\ \dots \\ k_2 \end{bmatrix}, \quad \text{رابطه (۱)}$$

$$k_i = \frac{1}{\sqrt{2}} [S_{HH} + S_{VV} \quad S_{HH} - S_{VV} \quad 2S_{HV}]$$

در رابطه (۱)، T_6 ماتریس همدوسی شش بعدی برای تصاویر QP است و $\langle \rangle$ 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 2×1 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

^۱ Spatial baseline

^۲ Pauli vector

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 سه مرحله‌ای، 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 به دست 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.

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

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^۴ است و بالاخره γ_B همدوسی ناشی

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^۱ (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].

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

در رابطه (۴)، σ ضریب ثابت میرایی متوسط موج، θ زاویه فرود^۲ موج ارسالی و k_z عدد موج قائم^۳ 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 بازپراکنش 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 در نتیجه دسترسی به مقادیر اولیه پارامترهاست. روش سه مرحله‌ای که در بخش بعد به آن پرداخته می‌شود، روشی است که به شکل هندسی و بدون نیاز به مقادیر اولیه پارامترها، مقادیر مجهولات را

^۱ Complex unit circle

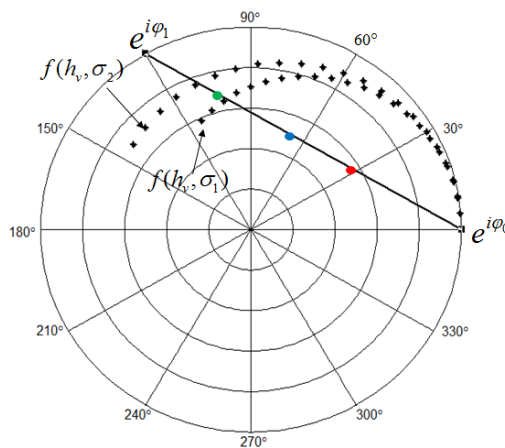
^۲ Incidence angle

^۳ Vertical wavenumber

^۴ Temporal baseline

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 شده است.

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.



شکل ۱: نمایی از انجام روش سه مرحله‌ای در پیکسلی با فاز زمینی صفر. همدوسی در آرایه‌های بردار پائولی به ترتیب با دایره توپر به رنگ‌های آبی، قرمز و سبز نشان داده شده است. $e^{i\varphi_0}$ 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 شده است.

سه مرحله‌ای متوال 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 و موهومی می‌شود که می‌توانند برای حل دو مجهول h_v و σ به کار گرفته شوند. به دلیل غیرخطی بودن رابطه (۴)، حل دستگاه دو معادله و دو مجهول حاصل مستلزم دسترسی به مقادیر اولیه

برآورد مقادیر ارتفاع و میرایی در مرحله سوم و با استفاده از همدوسی صرفاً حجمی مشاهده شده^۱ انجام می‌شود. بنابراین لازمه انجام مرحله سوم، انتخاب یک پایه پلاریزاسیون به عنوان پایه پلاریزاسیون حجمی است. هر یک از آرایه‌های بردار پائولی، بیان‌گر یکی از مکانیزم‌های بازپراکنش شامل مکانیسم پراکنش سطحی^۲، دووجهی^۳ و حجمی^۴ است. از این رو در روش

^۱ Observed volume only coherence

^۲ Surface scattering

^۳ Dihedral scattering

^۴ Volume scattering

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 سه مرحله‌ای به شدت متأثر 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 سه مرحله‌ای 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 این حال فرض انتخاب پایه پلاریزاسیون *HV* به عنوان پایه پلاریزاسیون حجمی، نتایج را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد. شکل (۱) به خوبی بیانگر این مسئله است که جابجایی مقدار همدوسی حجمی مشاهداتی بر روی خط همدوسی، تأثیر 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^۲ 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 به شدت 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^۳ سه مرحله‌ای مورد

پارامترها و نیز انجام روند محاسبات زمان‌بر تکراری تا رسیدن به دقت قابل قبول است. الگوریتم سه مرحله‌ای، 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 به دست 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^۱ (*LUT*)، ذخیره می‌شود. در پایان مقدار همدوسی حجمی برآورد شده، $\gamma_{\bar{v}}$ ، بر اساس کمینه فاصله بین همدوسی‌های موجود در *LUT* و همدوسی حجمی مشاهداتی به دست می‌آید. بدیهی است که مقادیر ارتفاع و میرایی متناظر با همدوسی حجمی محاسباتی انتخاب شده، پاسخ مسئله خواهد بود. نکته قابل تأمل این‌که در میان نقاط تقاطع به دست 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 $\gamma_{\bar{v}}$ 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

^۲ Ambiguous line

^{۳۴} Inversion Method

^۱ Dihedral scattering

تصاویر وجود خواهد داشت. به عبارت دیگر با تصویر کردن بردار پائولی بر روی بردار یک واحد مقدار بازپراکنش در پایه جدید مطابق رابطه (۶) قابل محاسبه است [۸].

در رابطه (۶)، μ پایه پلاریزاسیون جدید و w بردار یک 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 به دست 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.

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 یک واحد، امکان تولید پایه‌های پلاریزاسیون جدید برای آن

$$\mu = w_i^t k_i, i = 1, 2 \quad \text{رابطه (۶)}$$

$$w = [\cos \alpha \quad \sin \alpha \cos \beta e^{i\psi} \quad \sin \alpha \sin \beta e^{i\delta}]^T \quad \text{رابطه (۷)}$$

$$\begin{cases} 0 \leq \alpha \leq \frac{\pi}{2} \\ 0 \leq \beta \leq \frac{\pi}{2} \\ -\pi \leq \psi \leq \pi \\ -\pi \leq \delta \leq \pi \end{cases} \quad \text{رابطه (۸)}$$

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

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

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

رابطه (۱۰) پایه انجام کلیه روش‌های بهینه‌سازی پلاریزاسیون^۱ است [۸ و ۱۵]. به عبارت دیگر کلیه

^۱ Polarization optimization

تکنیک *PolInSAR* اهداف این مقاله است. در ادامه الگوریتم پیشنهادی بهینه‌سازی همدوسی حجمی در داده *DP* ارائه می‌شود.

در صورت استفاده از تصاویر *DP* ابعاد ماتریس همدوسی 4×4 است و به صورت رابطه (۱۱) محاسبه می‌شود.

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

که در آن بردار پائولی 2×1 برای هر یک از تصاویر دو سر خط مبنا به صورت رابطه (۱۲) نوشته می‌شود.

$$k_i = \sqrt{2} [S_{HH} \ S_{HV}]^T, i=1,2 \quad \text{رابطه (۱۲)}$$

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 VH و VV 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 2×1 تعریف می‌شود [۱۶]

$$w = [\cos \alpha \ \sin \alpha e^{i\psi}]^T, \begin{cases} 0 \leq \alpha \leq \frac{\pi}{2} \\ -\pi \leq \psi \leq \pi \end{cases} \quad \text{رابطه (۱۳)}$$

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

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 φ_0 و γ_{HV} باشد، هدف بهینه‌سازی در این مقاله است. به عبارت دیگر، برای بهبود نتایج روش سه مرحله‌ای به جای 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 $e^{i\varphi_0}$ قرار گرفته است. برای این منظور از یک روش بهینه‌سازی پلاریزاسیون جستجوی کلی^۱ (*ESPO*) استفاده می‌شود [۱۲]. همچنان که از رابطه (۹) برمی‌آید، بهینه‌سازی *ESPO* در داده پلاریزتری 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^۲ برای آن‌ها، بهترین پایه را برای مقصود مورد نظر انتخاب می‌کنند [۱۲ و ۱۶].

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

در داده‌های پلاریزتری 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، کارایی داده *DP* در برآورد ارتفاع جنگل با استفاده از

^۱ Exhaustive Searching Polarization Optimization

^۲ Cost function

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

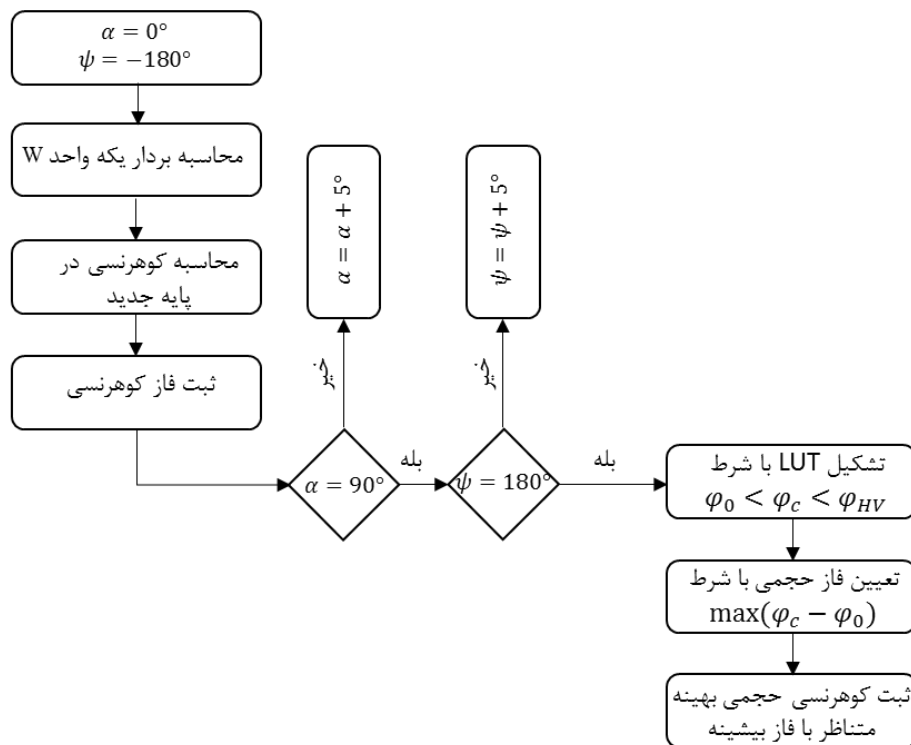
$$\Delta\varphi = \varphi_c - \varphi_0 \quad \text{رابطه (۱۵)}$$

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

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.

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



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

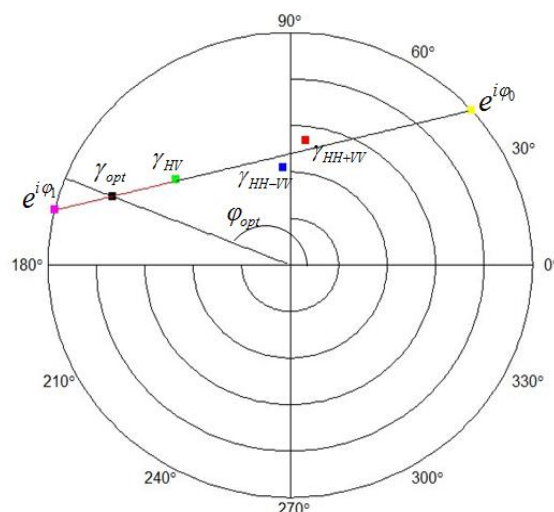
می‌شود. شکل (۳)، نمایش موقعیت همدوسی حجمی بهینه بر روی خط همدوسی در مقایسه با همدوسی حجمی مورد استفاده در روش مرسوم سه‌مرحله‌ای در دایره مختلط واحد را نشان می‌دهد. همچنان که در شکل (۳) دیده می‌شود موقعیت همدوسی حجمی بهینه نسبت به γ_{HV} در فاصله

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

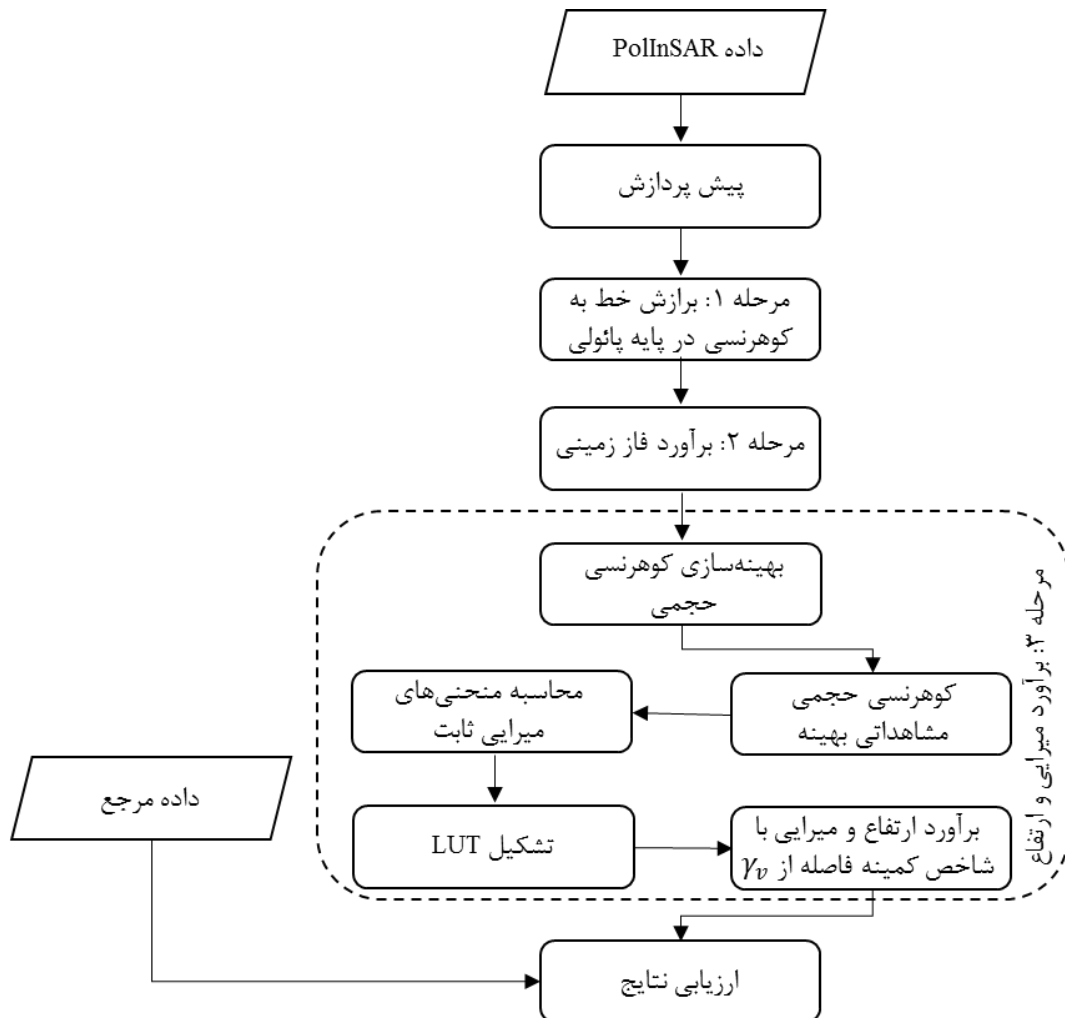
شکل (۵) و (۶)، به ترتیب محدوده‌های همدوسی را برای دو داده QP و DP در یک پیکسل مشترک نشان می‌دهد. با توجه به محدوده نمایش داده شده در شکل ۵ و ۶ ملاحظه می‌شود که محدوده همدوسی در داده DP محدودتر از داده QP است و همدوسی بهینه برآورد شده در هر دو داده دارای مرکز فازی بالاتر از فاز همدوسی در کانال HV است. 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 این حال در بخش بعد نتایج مربوط به هر دو داده را با استفاده از همدوسی حجمی بهینه شده مورد مقایسه قرار می‌دهیم.

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 سه مرحله‌ای بهبود یافته با استفاده از همدوسی حجمی بهینه قابل پیاده‌سازی و اجرا خواهد بود.

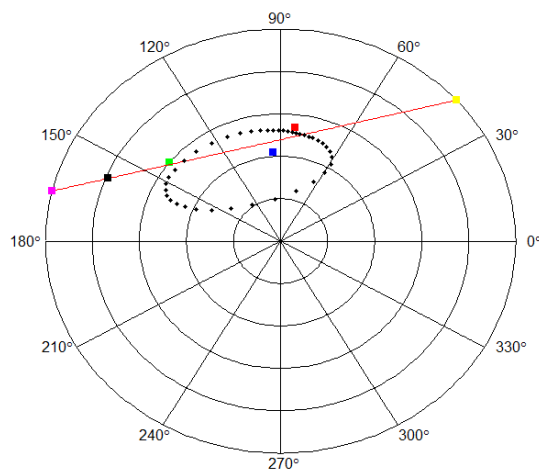
شکل (۴)، روندنمای الگوریتم بهبودیافته پیشنهادی را برای استخراج ارتفاع جنگل با استفاده از تکنیک $PolInSAR$ نشان می‌دهد. انتظار می‌رود که با توجه به بهبود همدوسی حجمی، نتایج روش پیشنهادی نسبت به روش سه مرحله‌ای مرسوم از بهبود دقت قابل توجهی برخوردار باشد.



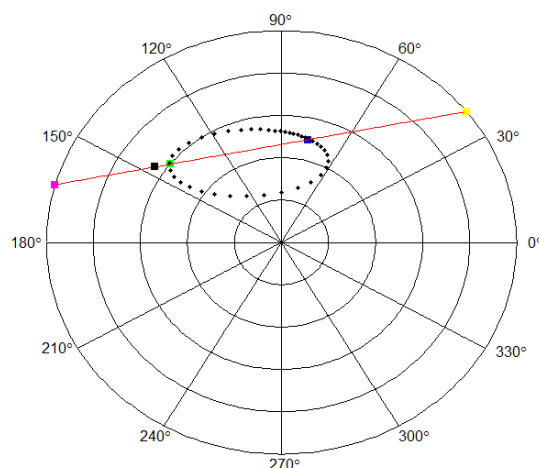
شکل ۳: نمایش موقعیت همدوسی حجمی بهینه بر روی خط همدوسی در مقایسه با همدوسی مورد استفاده در روش مرسوم سه مرحله‌ای در داده QP . مقادیر همدوسی در پایه‌های پائولی به ترتیب با رنگ‌های آبی، قرمز و سبز نشان داده شده‌است. همدوسی زمینی با نام $e^{i\phi_0}$ و با رنگ زرد نمایش داده شده‌است. همدوسی حجمی بهینه حاصل از روش $ESPO$ با رنگ مشکی و با عنوان γ_{opt} دیده می‌شود [۱۲].



شکل ۴: روندنمای الگوریتم بهبود یافته سه مرحله ای با استفاده از بهینه سازی همدوسی حجمی



شکل ۵: نمایش محدوده همدوسی در داده QP . مقادیر همدوسی در پایه پائولی به ترتیب با مربع‌های توپر آبی، قرمز و سبز نمایش 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.

۴-۱- منطقه مطالعاتی

منطقه مطالعاتی در این پژوهش منطقه مطالعاتی جنگلی رمنینگ‌استورپ^۱ در جنوب سوئد به مختصات جغرافیایی $۵۸^{\circ} ۲۸'$ شمالی و $۱۳^{\circ} ۳۸'$ شرقی است که در کمپین راداری سال ۲۰۰۷^۲ آژانس فضایی اروپا^۳

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.

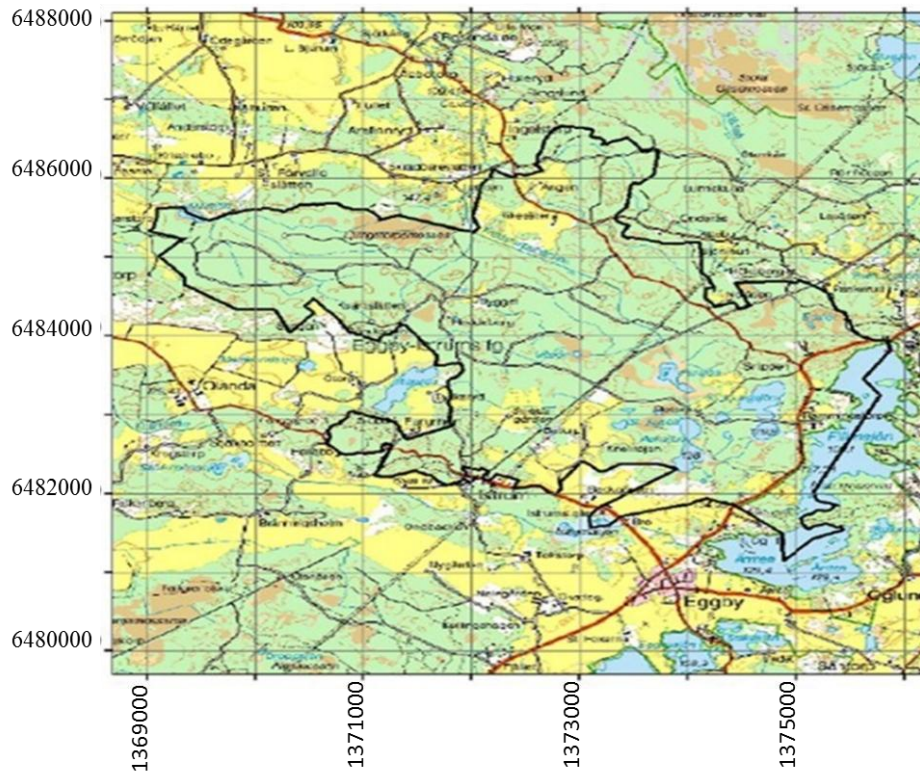
^۱ Remningstorp

^۲ Campaign BioSAR 2007

^۳ European Space Agency

۱۴۵ متر است. شکل (۷) موقعیت این منطقه را در سوئد نشان می‌دهد.

مورد استفاده قرار گرفته‌است. منطقه مورد نظر با وسعت ۱۲۰۰ هکتار در منطقه‌ای نسبتاً مسطح قرار دارد که ارتفاع آن از سطح آب‌های آزاد بین ۱۲۰ تا



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

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

۴-۲ داده مورد استفاده

در این پژوهش از داده تک خط مبنا و تک فرکانس سنجنده هواپرد^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 دقیقاً از یک منطقه اخذ

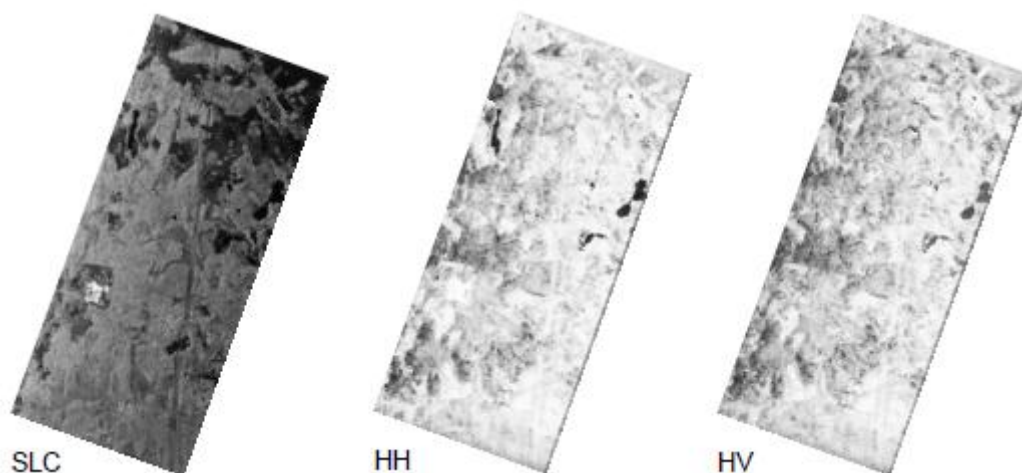
^۱ Airborne

^۲ Azimuth Resolution

^۳ Range Resolution

همدوسی در پایه‌های HH و HV در شکل (۸) نمایش داده شده است.

نسبتاً 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، نسبتاً خالص هستند. تصویر دامنه بازپراکنش در پایه HH و دامنه



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 .

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. از 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

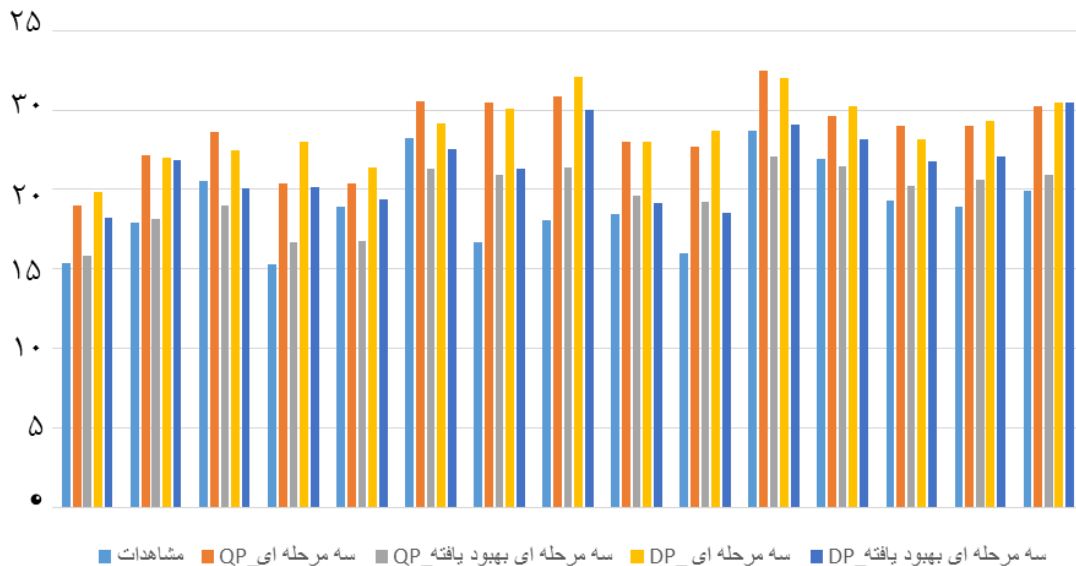
همچنین اندازه‌گیری‌های لیدار^۱ به عنوان داده مبنای ارتفاعی و برای ارزیابی نتایج مورد استفاده قرار گرفته‌است. داده لیدار منطقه با حد تفکیک مکانی ۰/۵ متر برای کل منطقه مطالعاتی برداشت شده‌است. داده لیدار مورد استفاده با استفاده از جاسازی سنجنده در هلیکوپتر و از ارتفاع ۵۰۰ متری زمین، به صورت ابر نقطه با 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

^۲ Coregistered

^۳ PolSARPro

^۱ LiDAR Measurement

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 سه مرحله‌ای و سه مرحله‌ای 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 سه مرحله‌ای مرسوم و روش سه مرحله‌ای بهبود یافته با استفاده از بهینه‌سازی همدوسی

با عدم همبستگی زمانی^۲ 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

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 اسپیکل خواهد شد. به این ترتیب مقادیر ورودی الگوریتم سه مرحله‌ای و الگوریتم بهینه‌سازی همدوسی حجمی فراهم شد. جهت زمین مرجع نمودن تصاویر، جداولی در کمپین *BioSAR2007* ارائه شده است 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

ملاحظه می‌شود که روش سه مرحله‌ای مرسوم، مقادیر ارتفاع را بیش از مقدار واقعی^۱ آن‌ها برآورد می‌کند. علت عمده این مسئله انتخاب غیر دقیق مقدار همدوسی حجمی است [۶]. به گونه‌ای که در تصاویری

^۲ Temporal Decorrelation

^۱ Over Estimation

همدوسی حجمی بهینه وجود ندارد، اما با این حال 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 شده است. 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.

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 سه مرحله‌ای 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

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

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

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 شده است [۶ و ۱۱ و ۱۲ و ۱۹]. در این پژوهش با هدف بهره‌مندی از مزایای داده DP ، استفاده

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. به عبارت دیگر خطای بالای روش سه مرحله‌ای 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 متأثر 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

^۱ Determination of coefficient

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 کارایی 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.

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 بهینه‌سازی 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،

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": *IEEE Proceedings-Radar, Sonar and Navigation*, 150(3), 125-134, 2003.
- [6] M. Lavalley, 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,

- 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.



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

Tayebeh Managhebi¹, Yaser Maghsoudi², 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*