



نخستین شماره از دور

GIS ایران

سنجش از دور و GIS ایران  
Iranian Remote Sensing & GIS

۷۲-۵۹



## بهبود الگوریتم وارونگی سهمرحله‌ای در برآورد ارتفاع جنگل با استفاده از داده‌های تداخل‌سنجی پلاریمتری راداری

طیبه مناقی<sup>۱\*</sup>، یاسر مقصودی<sup>۲</sup>، محمدجواد ولدان‌زوج<sup>۳</sup>

۱. دانشجوی دکتری فتوگرامتری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

۲. استادیار گروه فتوگرامتری و سنجش از دور دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

۳. استاد گروه فتوگرامتری و سنجش از دور دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۹/۱۱

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۵/۷



### چکیده

این مقاله روشی برای بهبود نتایج حاصل از الگوریتم وارونگی سهمرحله‌ای، با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی پلاریمتری راداری و بر مبنای مدل دولایه‌ای پراکنش حجمی نامنظم روی سطوح، عرضه می‌کند. در روش مرسوم سهمرحله‌ای، مقادیر فاز زمین و ضریب میرایی و ارتفاع لایه حجمی، در یک روند سهمرحله‌ای هندسی و بدون نیاز به داده مبنای مدل رقومی ارتفاعی زمین یا اطلاعات اولیه برآورد می‌شوند. در این روش، برآورد مقادیر میرایی و ارتفاع لایه حجمی، در مرحله سوم و با جست‌وجو در فضایی دوبعدی، انجام می‌شود. الگوریتم بهبودیافته مطرح‌شده، معرفی یک شاخص هندسی جدید بر مبنای میزان نفوذ سیگنال حجمی در جنگل، دامنه جست‌وجوی مقدار میرایی در مرحله سوم را محدود می‌کند. شاخص مطرح‌شده، در جایگاه اطلاعات کمکی، سبب می‌شود جست‌وجو در محدوده مناسب‌تری صورت پذیرد. الگوریتم عرضه‌شده روی داده‌های پلاریمتری اینترفرومتری تک‌خط‌مینا و تک‌فرکانس باند L سنجنده ESAR اجرا شد. محدودیت ایجادشده در دامنه مقدار عددی میرایی، در مقایسه با روش سهمرحله‌ای، بهبود میانگین دقت ۲/۵ متر را در ارتفاع برآوردشده نتیجه داد.

**کلیدواژه‌ها:** تداخل‌سنجی پلاریمتری راداری، مدل پراکنش حجمی نامنظم روی سطوح، الگوریتم وارونگی سهمرحله‌ای.

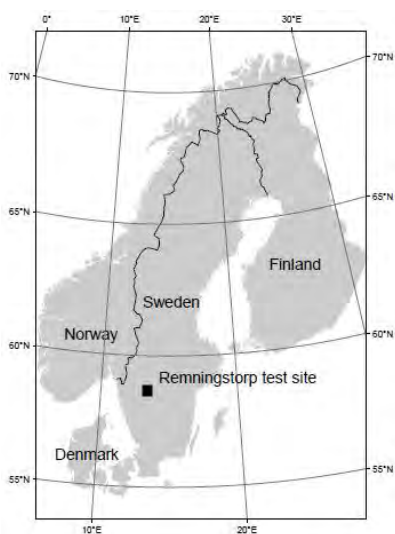
\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: تهران، خیابان ولی‌عصر، تقاطع میرداماد، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی. تلفن: ۰۹۳۵۷۵۹۱۸۷۶.

## ۱- مقدمه

حل پارامترهای مذکور، با استفاده از مقادیر مختلط کوهرنسی در سه پایه پلاریزاسیون انتخابی، نیازمند حل دستگاه معادلات غیرخطی شش معادله و شش مجهول است (Papathanassiou and Cloude, 2001). اگرچه حل هم‌زمان پارامترهای مجهول مزیت مهمی برای این روش محسوب می‌شود، ضعف عمده آن حل پیچیده دستگاه معادلات غیرخطی است. نیاز به دسترسی به مقادیر اولیه پارامترهای مجهول و صرف زمان زیاد برای حل به‌روش تکرار نقطه ضعف دیگر این شیوه محسوب می‌شود. صرف‌نظر از زمان‌بر بودن حل دستگاه معادلات غیرخطی به‌روش تکرار، وابستگی نتایج به انتخاب مقادیر اولیه مجهولات از ایرادهای آن است. تکنیک حل مجهولات به‌روش وارونگی سه مرحله‌ای<sup>۱</sup> نیاز معادلات به مقادیر اولیه مجهولات و نیز زمان‌بر بودن مراحل را برطرف کرد (Cloude and Papathanassiou, 2003). روش سه مرحله‌ای توانایی حل مسئله عدم همبستگی ناشی از باززمانی بین زوج تصویر مورد استفاده را نیز دارد (Papathanassiou and Cloude, 2003). در تحقیق مذکور، با شرط معلوم‌بودن مقدار ضریب میرایی، اثر باززمانی بر مقدار دامنه کوهرنسی حجمی است که می‌توان آن را حل و برآورد کرد. سادگی اجرای این روش هندسی و بی‌نیازبودن از آن به اطلاعات اولیه‌ای مانند مدل رقومی ارتفاعی<sup>۲</sup> منطقه سبب شد، در سال‌های اخیر، مورد توجه پژوهشگران قرار گیرد. پیشنهاد استفاده از پایه‌های پلاریزاسیون بهینه برای بهبود نتایج روش سه مرحله‌ای در سال ۲۰۱۴ مطرح شد (Xie et al., 2014). استفاده از روش سه مرحله‌ای و تعمیم آن به داده‌های راداری با دو پایه پلاریزاسیون مؤید کارایی این روش، در حل

تحلیل و بررسی زیست‌توده<sup>۱</sup> جنگل در مدیریت وقوع سیل و کاهش صدمات ناشی از آن، جلوگیری از فرسایش خاک، کاهش حوادثی همچون سیل، مطالعه آب‌وهوا و بالآخره مطالعه چرخه کربن نقش بسزایی دارد (Houghton, 2005). تداخل‌سنجی پلاریمتری راداری با روزنه مجازی<sup>۲</sup> تکنیکی بهینه در تخمین ارتفاع درختان جنگل، با استفاده از جداسازی مراکز فاز پراکنش‌های بازگشتی است (Cloude and Papathanassiou, 1998) که جایگزین مناسبی برای روش‌های پرهزینه و زمان‌بر زمینی محسوب می‌شود. تکنیک PolInSAR، با به‌کارگیری اطلاعات پلاریمتری، تداخل‌نمایی در پایه‌های پلاریزاسیون گوناگون تولید می‌کند که در بررسی اهدافی با بیش از یک مکانیسم بازپراکنش در امتداد قائم مؤثر است (Papathanassiou et al., 1999). روش تفاضلی مدل رقومی ارتفاعی با استفاده از دو تداخل‌نمای متناظر با بازپراکنش سطحی از لایه زمین و بازپراکنش حجمی از لایه حجمی جنگل فاز متناظر با ارتفاع درختان را استخراج می‌کند (Cloude and Papathanassiou, 1998). به‌رغم سادگی اجرای این روش، به‌دلیل نبود امکان انتخاب دو کانال با پراکنش صرفاً سطحی و حجمی و به‌ترتیب، با مراکز فاز نزدیک به سطح زمین و تاج‌پوشش گیاهی، دقت نتایج قابل قبول نبود (Cloude, 2005). مدل فیزیکی دولایه‌ای پراکنش حجمی نامنظم روی سطوح<sup>۴</sup> با تفسیر جنگل به‌صورت یک لایه حجمی شامل اجزایی با زاویه تصادفی روی سطح نفوذناپذیر زمین، با ارائه تفسیری مناسب از پوشش‌های جنگل در تکنیک PolInSAR استفاده شد (Treuhaf and Siqueira, 2000). مدل RVoG هدف دولایه‌ای جنگل را با استفاده از چهار پارامتر تفسیر می‌کند که عبارت‌اند از فاز زمین، ضخامت لایه حجمی، نسبت بازپراکنش سطحی به حجمی در هر پایه پلاریزاسیون و درنهایت، ضریب میرایی<sup>۵</sup> سیگنال. تمامی پارامترها، به‌جز پارامتر نسبت بازپراکنش سطحی به حجمی، از انتخاب پایه پلاریزاسیون مستقل‌اند. بنابراین،

1. biomass
2. Polarimetric Interferometry Synthetic Aperture RADAR
3. interferogram
4. random volume over ground
5. Extinction Coefficient
6. Three Stage Inversion Algorithm
7. Digital Elevation Model



شکل ۱. موقعیت منطقه مطالعاتی رمنینگستورپ در سوئد  
منبع: Hajnsek et al., 2008

## ۲-۲ داده مورد استفاده

در این پژوهش، از داده تک خط‌مینا و تک‌فرکانس سنجنده هوآبرد<sup>۴</sup> E-SAR به حد تفکیک مکانی<sup>۵</sup> دو متر استفاده شده است. زوج داده پلاریمتری مورد استفاده مربوط به داده راداری کمپین ۲۰۰۷ آژانس هوایی اروپا است که در باند L و در تاریخ دوم مه سال ۲۰۰۷ اخذ شده‌اند. تصویر راداری پایه پائولی داده مورد نظر، در کنار تصویر نوری گوگل ارث و راداری محدوده مطالعه، در شکل ۲ نمایش داده شده است. همچنین، اندازه‌گیری‌های لیدار<sup>۶</sup>، به‌منزله داده مبنای ارتفاعی و برای ارزیابی نتایج، استفاده شده است (شکل ۳).

1. Remningstorp
2. Campaign BioSAR 2007
3. European Space Agency
4. airborne
5. spatial resolution
6. LiDAR measurement

مجهولات فاز زمین و ارتفاع درختان، با بهره‌گیری از تنها دو کانال پلاریزاسیون در زوج تصویر راداری است (Wenxue et al., 2016). با این حال، حل هم‌زمان دو مجهول میرایی و ارتفاع درختان در مرحله سوم، بدون بررسی میزان نفوذ سیگنال حجمی مشاهده‌شده در جنگل، منجر به بروز خطا در برآورد ارتفاع درختان می‌شود.

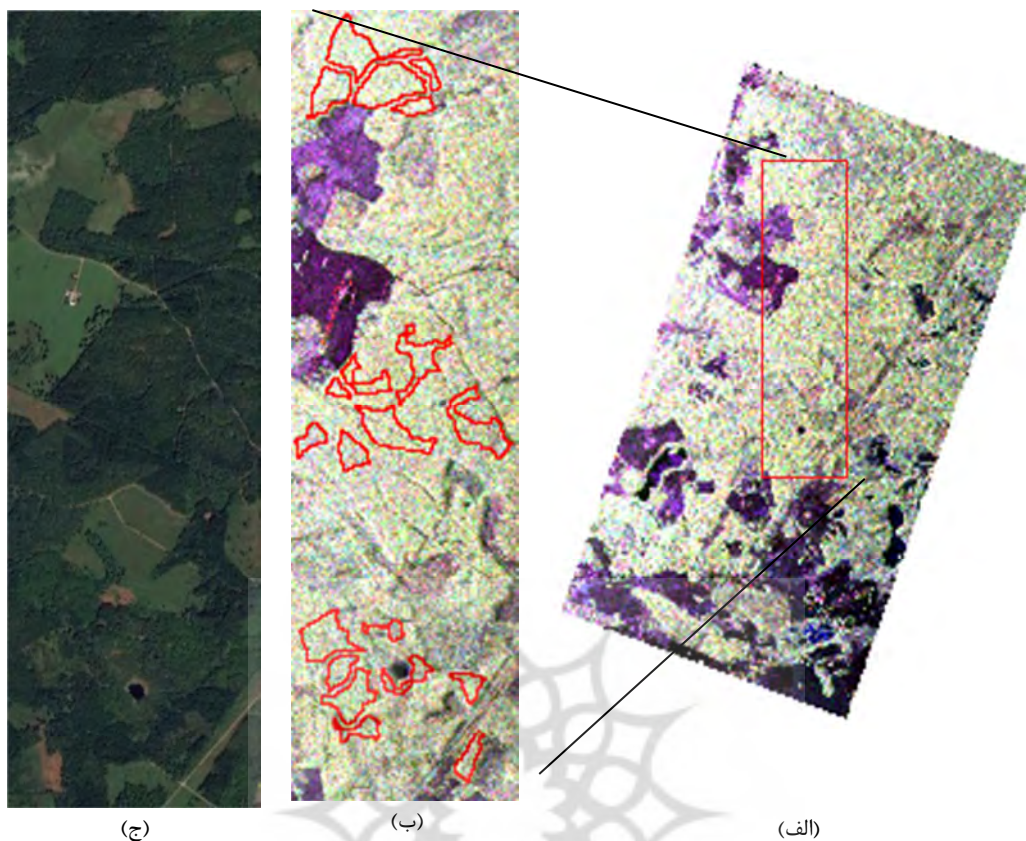
در این مقاله، با معرفی و محاسبه یک شاخص هندسی، انتخاب مقدار عددی میرایی متأثر از میزان نفوذ کانال حجمی خواهد بود. بدین ترتیب، تخمین مقدار عددی ارتفاع درخت نیز با دقت بالاتری صورت خواهد گرفت. در بخش دوم، افزون‌بر معرفی منطقه مورد مطالعه و داده به‌کاررفته، مدل RVoG، روش حل هندسی سه‌مرحله‌ای و تئوری روش پیشنهادی و توانایی آن در حل معایب روش سه‌مرحله‌ای توضیح داده می‌شود. جزئیات اجرای روش مطرح‌شده و مقایسه نتایج آن در برآورد ارتفاع درختان جنگل و مقایسه آن با داده‌های مرجع و نتایج روش سه‌مرحله‌ای در بخش سوم بیان خواهد شد. در بخش چهارم، نتیجه‌گیری از پژوهش حاضر را خواهیم داشت.

## ۲- مواد و روش‌ها

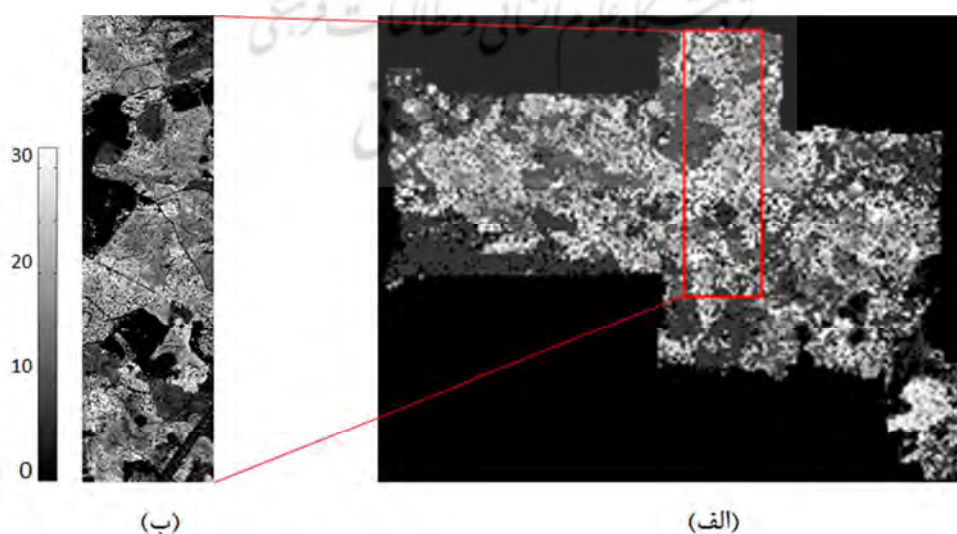
در این بخش، افزون‌بر معرفی منطقه مطالعاتی و داده مورد استفاده، روش پیشنهادی در بهبود الگوریتم وارونگی سه‌مرحله‌ای مطرح می‌شود.

## ۲-۱- منطقه مطالعاتی

در این پژوهش، منطقه مطالعاتی جنگلی رمنینگستورپ<sup>۱</sup> در جنوب سوئد، به مختصات جغرافیایی 58°28' شمالی و 13°38' شرقی در نظر گرفته شده که در کمپین راداری سال ۲۰۰۷<sup>۲</sup> آژانس فضایی اروپا<sup>۳</sup> به‌کار رفته است. منطقه مورد نظر، با وسعت ۱۲۰۰ هکتار، در منطقه‌ای به‌نسبت مسطح قرار دارد که ارتفاع آن از سطح آب‌های آزاد بین ۱۲۰ تا ۱۴۵ متر است. شکل ۱ موقعیت این منطقه را در سوئد نشان می‌دهد.



شکل ۲. نمایش داده راداری و محدوده مطالعه. الف) داده راداری در پایه پائولی منطقه مطالعه با کادر قرمز نمایش داده شده است؛ ب) تصویر راداری پایه پائولی محدوده مطالعه به مختصات جغرافیایی گوشه شمال غرب  $58^{\circ} 29' 01/78''$  شمالی و  $13^{\circ} 37' 11/45''$  شرقی و گوشه جنوب شرق  $58^{\circ} 27' 14/78''$  شمالی و  $13^{\circ} 38' 16/71''$  شرقی، ۲۰ محدوده بسته مورد استفاده به صورت منحنی‌های بسته قرمز رنگ نشان داده شده است؛ ج) تصویر نوری گوگل ارث محدوده مطالعه.



شکل ۳. تصویر لیدار کمپین ۲۰۰۷ آژانس هوایی اروپا (الف)؛ تصویر لیدار منطقه مورد مطالعه (ب)

### ۲-۳- مدل فیزیکی دولایه‌ای RVoG

تمامی مشاهدات، در تداخل‌سنجی پلاریمتری، ماتریس کوهرنسی  $6 \times 6$  است که در هر پیکسل، به صورت زیر نوشته می‌شود (Cloude and Papathanassiou, 1998).

$$T_6 = \langle kk^t \rangle = \begin{bmatrix} T_{11} & \Omega_{12} \\ \Omega_{21} & T_{22} \end{bmatrix}, \quad k = \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \end{bmatrix}$$

رابطه (۱)

$T_6$  ماتریس کوهرنسی شش‌بعدی،  $T_{11}$  و  $T_{22}$  ماتریس‌های کوهرنسی پلاریمتری تصاویر دو سر خط مبنای مکانی<sup>۱</sup>،  $\Omega_{12}$  ماتریس کوهرنسی پلاریمتری اینترفرومتری، و بردارهای  $k_1$  و  $k_2$  بردارهای بازپراکنش پائولی تصاویر دو سر خط مبنای هستند که به صورت زیر تعریف می‌شوند (Lee et al., 1994).

$$k_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} S_{HH_i} + S_{VV_i} & S_{HH_i} - S_{VV_i} & 2S_{HV_i} \end{bmatrix}^t, \quad i = 1, 2$$

رابطه (۲)

$i$  اندیس معرف هریک از تصاویر است و  $S_{HH}$ ،  $S_{HV}$  و  $S_{VV}$ ، به ترتیب، معرف کانال‌های  $HH$ ،  $HV$  و  $VV$  هستند.

مدل فیزیکی پراکنش حجمی روی سطوح یا کوهرنسی در پایه‌های پلاریزاسیون گوناگون را،

با توجه به ویژگی‌های فیزیکی لایه حجمی و فز زمینی، توصیف می‌کند. طبق تعریف، در این مدل، لایه پوشش گیاهی با ضخامت  $h_v$  متشکل از اجزایی با جهت کاملاً تصادفی روی زمین نفوذناپذیر به ارتفاع  $Z = Z_g$  قرار گرفته است.

در شکل ۴،  $\rho^{dg}$ ،  $\rho^{gv}$  و  $\rho^{dv}$ ، به ترتیب، بازپراکنش مستقیم از زمین، بازپراکنش دوجبهی زمین و تنه درخت و بازپراکنش حجمی از پوشش گیاهی را نشان می‌دهد. در هر پیکسل، پارامتر نسبت دامنه بازپراکنش سطحی به حجمی در هر پایه پلاریزاسیون مطابق رابطه (۳) تعریف می‌شود (Papathanassiou and Cloude, 2001)

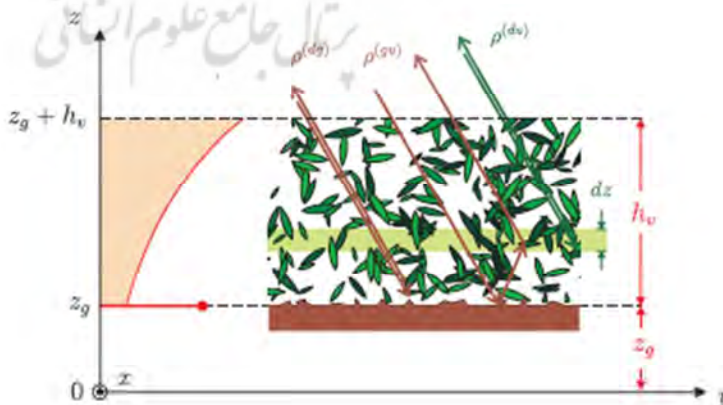
$$\mu(w) = \frac{\mu_G(w)}{\mu_v(w)} \exp\left(-\frac{2\sigma h_v}{\cos\theta_0}\right)$$

رابطه (۳)

که در آن،  $\mu_G(w)$  و  $\mu_v(w)$ ، به ترتیب، دامنه بازپراکنش سطحی و دامنه بازپراکنش حجمی در پایه مورد نظر،  $\sigma$  ضریب میرایی<sup>۲</sup>،  $h_v$  ضخامت لایه حجمی یا ارتفاع درخت و  $\theta_0$  زاویه فرود است. در مدل RVoG، ثابت می‌شود که کوهرنسی در هر پایه پلاریزاسیون را به صورت زیر می‌توان محاسبه کرد (Treuhaft and Siqueira, 2000)

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

رابطه (۴)



شکل ۴. بازپراکنش زمین و جنگل در مدل RVoG

منبع: Lavalle, 2009

1. spatial baseline
2. Extinction Coefficient



$$f(z) = e^{\frac{2\sigma z}{\cos\theta_0}} \quad \text{رابطه (۶)}$$

که در آن،  $f(z)$  تابع ساختار و  $z$  ارتفاع است. رابطه (۶) و شکل ۵ تابع ساختار نمایی را برای لایهٔ حجمی به ارتفاع  $h_v$  نشان می‌دهند.

با در نظر گرفتن تابع ساختار نمایی، کوهرنسی صرفاً حجمی، به صورت تابعی از ضریب میرایی موج و ضخامت لایهٔ حجمی، به صورت زیر بیان می‌شود (Papathanassiou and Cloude, 2001)

$$\gamma_v = \frac{2\sigma}{\frac{2\sigma h_v}{\cos\theta_0}} \int_0^{h_v} e^{ik_z z} e^{\frac{2\sigma z}{\cos\theta_0}} dz \quad \text{رابطه (۷)}$$

$$\cos\theta_0 (e^{\frac{2\sigma h_v}{\cos\theta_0}} - 1)$$

که در آن،  $\gamma_v$  کوهرنسی صرفاً حجمی و  $k_z$  عدد موج قائم است که بدین صورت تعریف می‌شود.

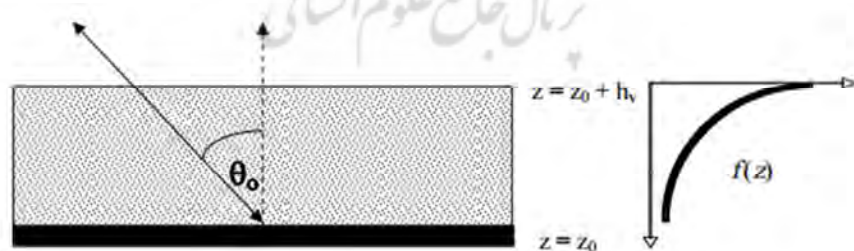
$$k_z = \frac{4\pi B_{\perp}}{\lambda R \sin\theta_0} \approx \frac{4\pi B_{\perp}}{\lambda H \tan\theta_0} \quad \text{رابطه (۸)}$$

$B_{\perp}$  باز مکانی قائم،  $\lambda$  طول موج ارسالی،  $R$  فاصله در جهت رنج و  $H$  ارتفاع سنجنده است. رابطه (۵) و رابطه (۷) دو رابطهٔ اصلی در مدل RVoG هستند که ارتباط بین مقادیر مشاهدات یا کوهرنسی در پایه‌های پلاریزاسیون متفاوت را با فاز زمین، ضریب میرایی و ارتفاع درخت نشان می‌دهد.

که در آن  $\gamma(w)$  کوهرنسی در پایهٔ پلاریزاسیون متناظر با بردار یکهٔ  $w$ ،  $\phi_0$  فاز زمین متناظر با ارتفاع زمینی  $Z_0$  و  $\gamma_v$  کوهرنسی صرفاً حجمی در پیکسل مورد نظر است. بدین ترتیب، کوهرنسی در هر پایهٔ پلاریزاسیون به صورت تابعی از فاز زمین، نسبت دامنهٔ سطحی به حجمی و دو پارامتر فیزیکی جنگل، یعنی فاز زمین و ارتفاع درخت، بیان می‌شود. با جدا کردن تنها پارامتر متأثر از پایهٔ پلاریزاسیون، یعنی  $\mu(w)$ ، رابطه (۴) را می‌توان به صورت زیر بازنویسی کرد.

$$\gamma(w) = e^{i\phi_0} \left( \gamma_v + \frac{\mu(w)}{1 + \mu(w)} (1 - \gamma_v) \right) = e^{i\phi_0} (\gamma_v + L(w)(1 - \gamma_v)), 0 \leq L(w) \leq 1 \quad \text{رابطه (۵)}$$

بدین ترتیب، مطابق مدل RVoG، مقادیر کوهرنسی در پایه‌های پلاریزاسیون گوناگون در یک دایرهٔ مختلط واحد<sup>۱</sup>، که محور  $x$  آن محور مقادیر حقیقی و محور  $y$  آن مقادیر موهومی کوهرنسی است، روی خط راست واقع‌اند. در مدل‌های گوناگون فیزیکی جنگل، برای تفسیر میزان نفوذ موج الکترومغناطیس در جنگل، از تابع ساختار<sup>۲</sup> استفاده می‌شود. تعیین دقیق تابع ساختار در تکنیک توموگرافی<sup>۳</sup> مطرح می‌شود (Reigber and Moreira, 2000). در مدل RVoG، تابع ساختار به صورت یک تابع نمایی و به شکل زیر نوشته می‌شود (Treuhaft and Siqueira, 2000; Treuhaft et al., 1996)



شکل ۵. تابع ساختار نمایی در مدل RVoG  
منبع: Cloude, 2005

1. complex unit circle
2. Structure Function
3. Tomographic Technique

## ۲-۴- الگوریتم وارونگی سه مرحله‌ای

الگوریتم وارونگی سه مرحله‌ای، بدون نیاز به مقادیر اولیه پارامترها و اطلاعات کمکی همچون DEM، پارامترهای فیزیکی جنگل شامل فاز زمین، ضریب میرایی و ارتفاع پوشش گیاهی را به روش هندسی برآورد می‌کند (Cloude and Papathanassiou, 2003).

مرحله اول، برازش خط بر مقادیر مختلط کوهرنسی است. با توجه به رابطه (۵) مکان هندسی مقادیر کوهرنسی، در پایه پلاریزاسیون‌های متفاوت در دایره مختلط واحد، یک خط مستقیم است. بر این اساس، با استفاده از مقادیر کوهرنسی در پایه‌های پائولی، خطی برازش داده می‌شود که خط کوهرنسی نام دارد. خط مذکور دایره مختلط واحد را در دو نقطه قطع می‌کند. شکل ۶ مکان هندسی کوهرنسی در پایه پلاریزاسیون‌های گوناگون را، به همراه خط برازش داده شده، به روش کمترین مربعات<sup>۱</sup> نشان می‌دهد.

می‌گیرد. برای تعیین مقدار فاز زمین، باید به مقدار پارامتر نسبت دامنه بازپراکنش سطحی به حجمی در کانال‌های گوناگون توجه شود. بیشینه مقدار پارامتر  $\mu(w)$  در کانال صرفاً سطحی، یعنی کانالی با کوهرنسی  $e^{i\varphi_0}$ ، رخ می‌دهد و بی‌نهایت است. مقدار این پارامتر، در دیگر کانال‌ها، به نسبت فاصله‌ای که روی خط کوهرنسی زمین دارند کاهش می‌یابد و کمترین مقدار آن در کوهرنسی صرفاً حجمی رخ می‌دهد و صفر است. شکل ۷ ترتیب قرار گرفتن کوهرنسی در کانال‌های پایه پائولی را، در کنار کوهرنسی صرفاً سطحی، نشان می‌دهد.



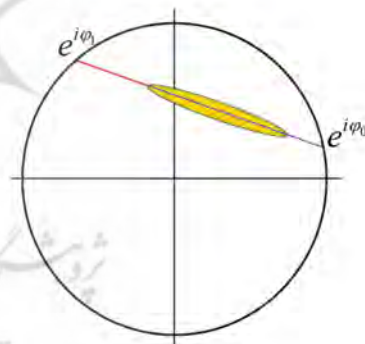
شکل ۷. موقعیت نسبی کوهرنسی در پایه‌های پائولی و صرفاً

حجمی روی خط کوهرنسی

منبع: Cloude and Papathanassiou, 2003

با توجه به شکل ۷، از میان دو محل تقاطع خط و دایره کوهرنسی، نقطه‌ای برای تعیین فاز زمینی به کار می‌رود که از  $\gamma_{HV}$  دورتر باشد. مقدار کوهرنسی صرفاً حجمی محاسباتی است که در مرحله سوم به دست می‌آید و مقدار  $\mu$  در آن کمینه و برابر با صفر است.

در مرحله سوم، ارتفاع لایه حجمی و ضریب میرایی با استفاده از رابطه (۷) برآورد می‌شود. برای این منظور،  $\gamma_{HV}$  به منزله  $\gamma_v$  مشاهداتی به کار می‌رود. مقادیر کوهرنسی حجمی محاسباتی را با استفاده از رابطه (۷) و برای زوج مقادیر انتخابی ارتفاع و ضریب میرایی می‌توان محاسبه کرد. به ازای هر مقدار میرایی، منحنی کوهرنسی مشابه شکل ۸ به دست می‌آید.

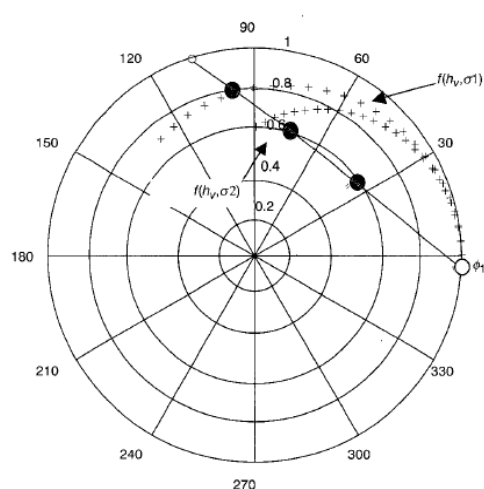


شکل ۶. مکان هندسی مقادیر کوهرنسی در پایه پلاریزاسیون‌های گوناگون. خط مستقیم رسم شده خط کوهرنسی است. خط قرمز خط ابهام<sup>۲</sup> و خط آبی خط مشاهده<sup>۳</sup> نام دارد.

با فرض مسطح بودن زمین و در صورت صرف نظر از عدم همبستگی زمانی، مقدار دامنه کوهرنسی در زمین بیشینه و برابر با یک در نظر گرفته می‌شود. از این رو، هر دو نقطه تقاطع خط و دایره کاندیدای فاز زمین محسوب می‌شود. رفع ابهام و تعیین فاز زمینی از بین دو کاندیدای به دست آمده در مرحله دوم صورت

1. Least Square Method
2. Ambiguous Line
3. Visible Line

به دست آوردن مقدار ارتفاع درختان در هر پیکسل است. بهبود انجام شده در این مقاله متوجه مرحله سوم این روش است. بنابراین، دو مرحله اول روش بهبود یافته نیز، مانند روش سه مرحله‌ای، برای به دست آوردن مقدار فاز زمینی انجام می‌شود. در مرحله سوم الگوریتم یاد شده، دو پارامتر ارتفاع درخت و ضریب میرایی، هم‌زمان و در جست‌وجویی دوبعدی، به دست می‌آیند. در مرحله برآورد، هیچ‌گونه اطلاعاتی از میزان نفوذ موج در پوشش گیاهی وارد مسئله نشده است. حال آنکه میزان نفوذ امواج در پوشش گیاهی، افزون‌بر ویژگی‌های موج، از پارامترهای فیزیکی جنگل نیز تأثیر می‌پذیرند. به دلیل جذب انرژی در لایه حجمی، سیگنال ارسالی در جنگل تضعیف می‌شود (Cloude, 2010). میزان میرایی موج با توجه به پارامترهای فیزیکی جنگل، همچون تراکم درختان و ضریب دی‌الکتریک پراکنشگرها<sup>۲</sup> و نیز طول موج ارسالی، متفاوت است. در امواج با فرکانس‌های بلند، مانند امواج بانده X، میرایی بیشینه است و در نتیجه، سیگنال در لایه حجمی نفوذ نمی‌کند و از سطح بالای تاج<sup>۳</sup> بازپراکنش دارد (Garestier et al., 2006). در چنین حالتی، ضریب میرایی نیز در بیشینه مقدار خود قرار می‌گیرد و سیگنال، بدون نفوذ در پوشش گیاهی، از سطح تاج بازپراکنش می‌کند. امواج بانده L و P که طول موج بیشتری دارند، به دلیل نفوذ بیشتر در لایه حجمی، امکان مطالعه جنگل را فراهم می‌کنند. در چنین حالتی، با توجه به ویژگی‌های موج و جنگل، هرچه موج ارسالی دیرتر میرا شود، نفوذ بیشتری اتفاق می‌افتد. بنابراین، بین میزان نفوذ و ضریب میرایی موج رابطه‌ای معکوس وجود دارد. از سویی، هرچه نفوذ موج در لایه حجمی بیشتر شود، مقدار عدم همبستگی حجمی<sup>۴</sup> افزایش می‌یابد و در نتیجه، از مقدار دامنه کوهرنسی کاسته می‌شود. به عبارت دیگر، با افزایش نفوذ، کوهرنسی حجمی کاهش می‌یابد. شکل ۹ رابطه



شکل ۸. مکان هندسی مقادیر کوهرنسی حجمی به ازای مقدار ثابت میرایی و مقادیر متفاوت ارتفاع در دایره مختلط واحد منبع: Cloude and Papathanassiou, 2003

بدین ترتیب، به ازای هر مقدار از ضریب میرایی و با تغییر مقدار ارتفاع، یک منحنی مطابق شکل ۸ به دست می‌آید. نکته قابل تأمل این است که مطابق شکل‌های ۷ و ۸، کوهرنسی حجمی محاسباتی، که در آن  $\mu = 0$  است، باید نقطه‌ای روی خط ابهام باشد زیرا، در غیر این صورت، مقدار میرایی در  $\gamma_{HV}$  منفی خواهد شد. بنابراین، تمامی منحنی‌هایی که، مانند منحنی  $f(h_v, \sigma_2)$ ، خط کوهرنسی را در ناحیه مشاهده و یا در حد فاصل بین فاز زمین و  $\gamma_{HV}$  قطع می‌کنند از روند محاسبات خارج می‌شوند. هر یک از منحنی‌های  $f(h_v, \sigma = \sigma_i)$  خط ابهام را در یک نقطه قطع می‌کند. مقادیر متناظر با تمامی نقاط تقاطع قابل قبول در یک جدول جست‌وجو<sup>۱</sup> ذخیره می‌شوند. نزدیک‌ترین نقطه تقاطع به کوهرنسی حجمی مشاهداتی، بهترین برآورد از کوهرنسی صرفاً حجمی است و مقادیر میرایی و ارتفاع متناظر با آن به صورت مقادیر ضریب میرایی و ارتفاع حجمی پیکسل مورد نظر ثبت می‌شود.

## ۲-۵- بهبود الگوریتم سه مرحله‌ای به روش

### پیشنهادی

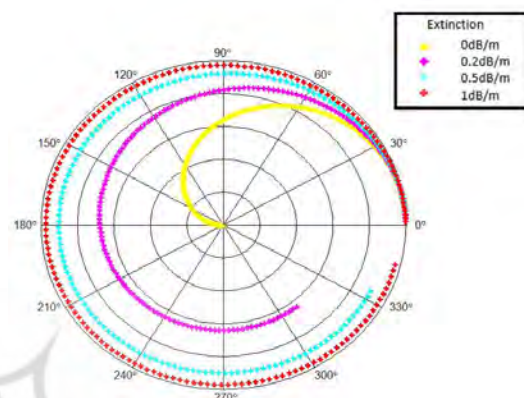
الگوریتم وارونگی سه مرحله‌ای روشی هندسی برای

1. Look UP Table
2. scatterer dielectric constant
3. top of canopy
4. Volume Decorrelation



که در آن،  $D.I$  شاخص هندسی نسبت فاصله است و  $AL$  و  $V.L$  نیز، به ترتیب، مقادیر طول خطوط ابهام و مشاهده‌اند. دلیل استفاده از شاخص نسبت فاصله به جای شاخص فاصله، که می‌توانست با هر یک از طول‌های ابهام یا مشاهده به‌تنهایی تعریف شود، نرمال کردن فاصله مورد نظر و در نتیجه، تعریف یک شاخص عمومی<sup>۴</sup> است. شاخص نسبت فاصله، عددی بین صفر تا بی‌نهایت است. اگر مقدار ضریب میرایی صفر باشد، موج ارسال شده در توده گیاهی نفوذ می‌کند و به زمین می‌رسد. در چنین حالتی، طول خط ابهام بیشینه و طول خط مشاهده در مخرج کسر صفر است. به عبارت دیگر، بیشترین مقدار شاخص فاصله در میرایی صفر رخ می‌دهد و مقدار آن برابر با بی‌نهایت خواهد بود. به لحاظ تئوری، مقدار عددی این شاخص، در پیکسلی با بیشینه میرایی، صفر خواهد بود. با افزایش میرایی، امکان نفوذ موج در توده گیاهی کاهش می‌یابد؛ تا جایی که موج ارسالی از سطح تاج بازپراکنش می‌کند و در واقع، بازپراکنش سطحی با اندازه دامنه یک اتفاق می‌افتد. در این حالت، اندازه طول ابهام برابر با صفر و اندازه طول مشاهده بیشینه است و بنابراین، مقدار عددی شاخص تعریف‌شده در رابطه (۹) صفر خواهد بود. مقدار  $D.I = 0$  در امواج باند  $L$  و  $P$  اتفاق نمی‌افتد زیرا این امواج، به دلیل فرکانس پایین، در تاج پوشش گیاهی نفوذ می‌کنند و اندازه کوه‌رنسی حجمی در آنها کم‌تر از یک خواهد بود. به این ترتیب، ملاحظه می‌شود که مقدار عددی این شاخص در تعیین حدود ضریب میرایی مؤثر است. در روش بهبودیافته سه‌مرحله‌ای، با توجه به مقدار تعریف‌شده برای شاخص نسبت فاصله، دامنه تغییرات میرایی در به‌دست آوردن منحنی‌های کوه‌رنسی به سه کلاس تقسیم می‌شود. مقادیر حد آستانه میرایی و شاخص نسبت فاصله، در سه کلاس مطرح‌شده، به صورت تجربی به‌دست آمده است. جدول ۱ محدوده تغییرات شاخص و ضریب میرایی را نشان می‌دهد.

مستقیم میان ضریب میرایی و مقدار مختلط کوه‌رنسی حجمی را در دایره مختلط واحد نشان می‌دهد. مقادیر کوه‌رنسی حجمی برای داده شبیه‌سازی با عدد موج قائم<sup>۱</sup>  $0.1567$ ، زاویه فرود<sup>۲</sup>  $45^\circ$  درجه و ارتفاع زمین صفر محاسبه شده است.



شکل ۹. نمایش مکان هندسی کوه‌رنسی حجمی در دایره مختلط واحد به‌ازای مقادیر متفاوت میرایی و ارتفاع لایه حجمی

همچنان‌که در شکل ۹ نشان داده شده است، با افزایش مقدار میرایی، اندازه کوه‌رنسی حجمی افزایش می‌یابد و منحنی کوه‌رنسی به محیط دایره مثلثاتی نزدیک می‌شود (منحنی قرمز رنگ). برعکس، منحنی زرد رنگ مربوط به ضریب میرایی کمتر است که، به دلیل نفوذ بیشتر سیگنال و افزایش عدم همبستگی حجمی، منجر به دامنه کوه‌رنسی حجمی کمتر شده است. از سوی دیگر، پارامترهای مؤثر در طول خط مشاهده، که در شکل ۶ به رنگ آبی نمایش داده شده است، عبارت‌اند از خط مبنای مکانی، فرکانس موج و تراکم پوشش گیاهی (Papathanassiou and Cloude, 2001). به این ترتیب، موقعیت کوه‌رنسی حجمی مشاهداتی یا کوه‌رنسی در پایه پلاریزاسیون  $HV$ ، روی خط برازش داده‌شده، در تعیین عمق نفوذ سیگنال و به‌تبع آن، تعیین ضریب میرایی مؤثر است. برای بررسی بیشتر این ارتباط شاخص نسبت فاصله<sup>۳</sup> به‌صورت رابطه (۹) تعریف شد

$$D.I = \frac{AL}{V.L} \quad \text{رابطه (۹)}$$

- |                         |                    |
|-------------------------|--------------------|
| 1. Vertical Wave Number | 2. Incidence Angle |
| 3. Distance Ratio Index | 4. General Index   |

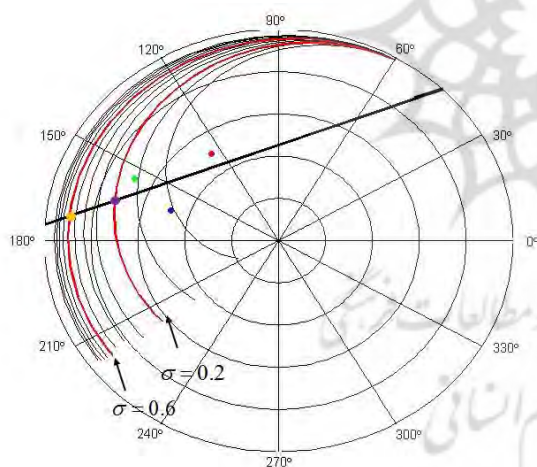
جدول ۱. کلاس‌های ضریب میرایی براساس مقدار شاخص نسبت فاصله

حد بالایی ضریب میرایی dB/m	حد پایینی ضریب میرایی dB/m	شاخص نسبت فاصله
۱	۰/۶	کمتر از ۰/۴
۰/۶	۰/۳	شاخص نسبت فاصله بین ۰/۴ و ۰/۶۵
۰/۳	۰	شاخص نسبت فاصله بیش از ۰/۶۵

جدول ۲. LUT مربوط به پیکسلی با ارتفاع ۱۳/۸ متر

ارتفاع حجمی (m)	ضریب میرایی (dB/m)	فاصله بین کوهرنسی محاسباتی و مشاهداتی
۱۹	۰/۱	۰/۰۱۴۵
۱۷/۸	۰/۲	۰/۰۸۲۷
۲۱	۰	۰/۱۳۴۱
۱۶/۱	۰/۳	۰/۱۳۵۹
۱۵/۹	۰/۴	۰/۱۸۰۸
۱۵/۷	۰/۵	۰/۲۰۳۸
۱۵/۲	۰/۶	۰/۲۳۵۱
۱۵	۰/۷	۰/۲۴۵۸
۱۴/۸	۰/۸	۰/۲۶۰۱
۱۴/۷	۰/۹	۰/۲۷۴۸
۱۴/۳	۱	۰/۲۸۳۴

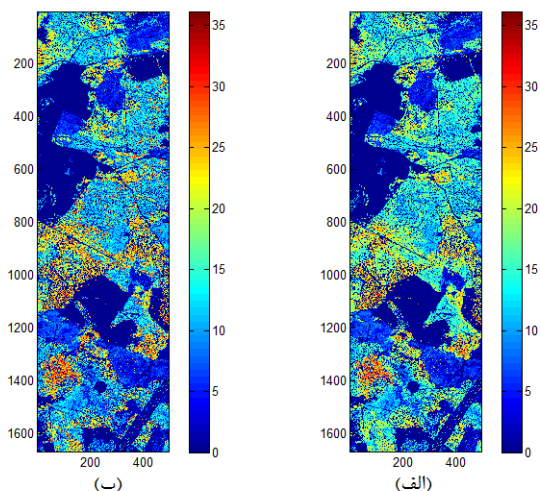
در روش سه مرحله‌ای، مقادیر میرایی در هر پیکسل در محدوده ۰ تا ۱ dB/m تغییر می‌یابد. مقدار کوهرنسی حجمی برآورد شده فقط براساس نزدیک‌ترین فاصله تا  $\gamma_{HV}$  به دست می‌آید؛ در حالی که در موارد متعددی، مقدار دقیق‌تری را برای ارتفاع درخت می‌توان برآورد کرد و در LUT نیز وجود دارد که، صرفاً به دلیل فاصله بیشتر از HV، حذف می‌شود. روش بهبود یافته جست‌وجو در مرحله سوم را فقط به جست‌وجوی هندسی براساس کمینه فاصله محدود نمی‌کند بلکه، با استفاده از شاخص تعریف شده، دانشی را به مسئله تزریق می‌کند که جست‌وجو را، در فضای محدودتر و هوشمندانه‌تر، پی بگیرد. در بخش ۳، نتایج حاصل از اجرای الگوریتم وارونگی سه مرحله‌ای و روش پیشنهادی مطرح می‌شود.



شکل ۱۰. نمایش تقاطع منحنی‌ها و خط کوهرنسی برای تشکیل LUT. دایره‌های قرمز و آبی و سبز، به ترتیب، مقادیر کوهرنسی در آرایه‌های بردار پائولی است و خط مستقیم، خط برازش داده شده در مرحله اول است. منحنی‌های کوهرنسی به‌ازای مقادیر ثابت میرایی به رنگ مشکی نمایش داده شده‌اند. منحنی‌های منتخب با روش سه مرحله‌ای و روش پیشنهادی به رنگ قرمزند و کوهرنسی حجمی متناظر با آنها، به ترتیب، با دایره‌های بنفش و زرد نمایش داده شده است.

### ۳- نتایج

در این بخش، نتایج حاصل از اجرای دو الگوریتم سه مرحله‌ای و سه مرحله‌ای بهبود یافته بیان می‌شود. هر دو الگوریتم روی زوج داده PoInSAR باند L اجرا شدند. شکل ۱۰ به دایره کوهرنسی متناظر با LUT نشان داده شده در جدول ۲ اشاره دارد که مربوط به پیکسلی با ارتفاع ۱۳/۸ متر است.



شکل ۱۱. نقشه ارتفاعی منطقه مورد نظر. (الف) ارتفاعات حاصل از اندازه‌گیری لیدار؛ (ب) ارتفاعات برآوردشده به روش سه‌مرحله‌ای بهبودیافته

در این مقاله، به منظور ارزیابی نتایج، از دو شاخص آماری  $RMSE^1$  و ضریب تعیین<sup>۲</sup> استفاده شده است. چنان‌که در شکل ۱۲ دیده می‌شود، استفاده از روش بهبودیافته به‌طور میانگین منجر به بهبود خطای  $2/5$  متر در بیست محدوده بسته مورد نظر می‌شود. همچنین، ضریب تعیین بین میانگین ارتفاعات مرجع حاصل از اندازه‌گیری لیدار در هر محدوده بسته و میانگین ارتفاعات برآوردشده در آنها به روش سه‌مرحله‌ای بهبودیافته برابر با  $0/65$  است که، در مقایسه با عدد  $0/56$  در روش سه‌مرحله‌ای، بهبود چشمگیری دارد.

#### ۴- نتیجه‌گیری

برآورد ارتفاع پوشش گیاهی با استفاده از داده PolInSAR، به دلیل گذر از محدودیت‌های دیگر روش‌ها مهم است. در میان روش‌های موجود، روش وارونگی سه‌مرحله‌ای، افزون بر اینکه حجم محاسبات کمتری به نسبت روش‌های قبل دارد، روشی هندسی

ملاحظه می‌شود که تقاطع منحنی کوهرنسی حاصل از مقادیر ضریب میرایی صفر و  $0/1$  با خط کوهرنسی سبب ایجاد ضریب بازپراکنش سطحی به حجمی منفی در کوهرنسی مشاهده شده HV می‌شوند و نمی‌توان آنها را پذیرفت. بنابراین، مقدار ارتفاع برآوردشده به روش سه‌مرحله‌ای مربوط به منحنی کوهرنسی سوم متناظر با میرایی  $0/2$  است که، طبق LUT، مقدار آن  $17/8$  متر به دست می‌آید و در مقایسه با ارتفاع مرجع،  $4$  متر خطا دارد. در پیکسل منتخب، مقدار شاخص فاصله با توجه به موقعیت کوهرنسی کانال HV روی خط کوهرنسی و با استفاده از رابطه (۹)،  $0/31$  به دست می‌آید. بنابراین، با توجه به جدول ۱، دامنه میرایی در روش سه‌مرحله‌ای بهبودیافته بین  $0/6$  تا  $1$  dB/m در نظر گرفته می‌شود و LUT حاصل از روش بهبودیافته شامل پنج سطر آخر جدول ۲ خواهد بود. ضریب میرایی و ارتفاع برآوردشده با روش پیشنهادی در پیکسل مذکور، به ترتیب،  $0/6$  dB/m و  $15/2$  متر است. به این ترتیب، دقت روش پیشنهادی در این پیکسل، در مقایسه با روش سه‌مرحله‌ای،  $2/6$  متر بهبود داشته است. می‌بینید که در این نقطه، با نزدیک شدن کوهرنسی حجمی برآوردشده به محیط دایره، مقدار ارتفاع برآوردشده کاهش یافته است. در واقع، با نزدیک شدن کوهرنسی حجمی به محیط دایره، دامنه کوهرنسی افزایش می‌یابد و این افزایش دامنه متناظر با کاهش عدم همبستگی حجمی است. از آنجاکه در جنگل، با کاهش ارتفاع درختان، عدم همبستگی حجمی کاهش می‌یابد؛ کاهش ارتفاع محاسبه شده بر اثر افزایش دامنه کوهرنسی در روش پیشنهادی کاملاً توجیه‌پذیر است.

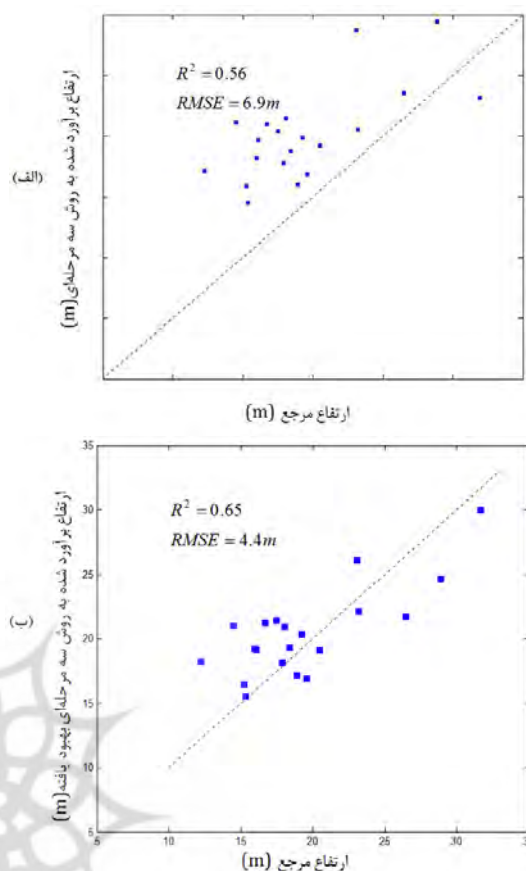
شکل ۱۱ نتایج حاصل از روش پیشنهادی و داده‌های لیدار را در محدوده مطالعه (شکل ۲-ب) نشان می‌دهد.

شکل ۱۲ نتایج حاصل از اعمال الگوریتم وارونگی سه‌مرحله‌ای و روش پیشنهادی روی بیست محدوده مشخص در زوج تصویر انتخابی را نشان می‌دهد.

1. Root Mean Square Error
2. Coefficient of Determination

PoInSAR، میزان نفوذ سیگنال در توده است. به عبارت دیگر، پارامترهای فیزیکی جنگل همچون نوع پوشش گیاهی، ارتفاع و تراکم درختان و نیز ویژگی‌های سیگنال ارسالی مانند فرکانس موج و زاویه فرود، در میزان نفوذ امواج در توده گیاهی مؤثرند. بنابراین، لازم است تأثیر پارامترهای مورد اشاره، در چیدمان مقادیر کوه‌رنسی در دایره مختلط واحد، بحث و بررسی شود. در این مقاله، با بررسی میزان نفوذ سیگنال HV در پوشش گیاهی و با در نظر گرفتن اثر نفوذ در عدم همبستگی حجمی، شاخصی تعریف شد که، به دلیل همبستگی زیاد با پارامتر میرایی، در تعیین محدوده قابل قبول این پارامتر مؤثر است. به این ترتیب و با تعیین شاخص هندسی نسبت فاصله در هر پیکسل، محدوده میرایی از بین سه کلاس میرایی انتخاب می‌شود. به دیگر سخن، در الگوریتم پیشنهادی با تکیه بر شاخص نسبت فاصله، محدودیتی در انتخاب مقدار میرایی، برای ورود به مرحله سوم روش حل، اعمال می‌شود که دقت نهایی برآورد ارتفاع را بهبود می‌بخشد. با توجه به اینکه مقادیر حد آستانه سه کلاس میرایی به شکل تجربی تعیین شده‌اند، پیشنهاد می‌شود در مقاله جداگانه‌ای امکان تعیین حدود آستانه در روندی آماری بررسی شود. همچنین، بررسی عوامل مؤثر دیگر در میرایی موج می‌تواند شاخص‌های دیگری را برای تعیین دقیق‌تر این پارامتر در اختیار قرار دهد. نیز، با توجه به اینکه تغییرات زاویه فرود در یک تصویر راداری هواپرد از رنج نزدیک<sup>۱</sup> تا رنج دور<sup>۲</sup> زیاد است، توصیه می‌شود اثر عامل مذکور در میرایی موج بررسی و مدل‌سازی شود. در مقاله حاضر، از زوج تصویر پلاریمتری با باز زمانی کوتاه استفاده شده که نتیجه آن چشم‌پوشی از عدم همبستگی زمانی<sup>۳</sup> بین تصاویر است. از این رو، توصیه می‌شود کارایی روش مطرح شده در تصاویری که باز زمانی بیشتری دارند مطالعه شود.

1. near range
2. far range
3. temporal decorrelation



شکل ۱۲. مقایسه ارتفاع مرجع و ارتفاع برآورد شده با استفاده از تکنیک PolInSAR به روش: (الف) سه مرحله‌ای و (ب) سه مرحله‌ای بهبود یافته

است که اجرای آن بدون نیاز به اطلاعات کمکی ممکن است. با این حال، به دلیل برآورد مقدار ضریب میرایی در جست‌وجویی صرفاً ریاضی و بدون بررسی پارامترهای فیزیکی مؤثر در آن، مانند میزان نفوذ سیگنال حجمی در توده گیاهی، نتایج حاصل از این روش با خطاهای پیش‌بینی‌ناشدنی در برآورد ارتفاع درخت همراه است. ضریب میرایی پارامتری تأثیرگذار در تعیین ارتفاع درختان است؛ به گونه‌ای که به ازای مقادیر متفاوت میرایی، ارتفاع برآورد شده کاملاً متفاوت خواهد بود. از این رو، تمرکز روش مطرح شده بر به دست آوردن اطلاعات کمکی به منظور تعیین بهتر و دقیق‌تر حدود این پارامتر است. یکی از عوامل مهم برای تعیین ارتفاع درخت، در هر پیکسل از تصویر

۵- منابع

- Cloude, S., 2010, **Polarisation: Applications in Remote Sensing**, Oxford University Press.
- Cloude, S. & Papathanassiou, K., 2003, **Three-Stage Inversion Process for Polarimetric SAR Interferometry**, IEE Proceedings-Radar, Sonar and Navigation, 150, PP. 125-134.
- Cloude, S.R., 2005, **Pol-InSAR Training Course**, Radio Science.
- Cloude, S.R. & Papathanassiou, K.P., 1998, **Polarimetric SAR Interferometry**, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 36, PP. 1551-1565.
- Garestier, F., Dubois-Fernandez, P., Dupuis, X., Paillou, P. & Hajnsek, I., 2006, **PolInSAR Analysis of X-Band Data over Vegetated and Urban Areas**, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 44, PP. 356-364.
- Hajnsek, I., Scheiber, R., Lee, S., Ulander, L., Gustavsson, A., Tebaldini, S. & Monte Guarnieri, A., 2008, **BIOSAR 2007: Technical Assistance for the Development of Airborne SAR and Geophysical Measurements during the BioSAR 2007 Experiment**, In: ESA-ESTEC.
- Houghton, R., 2005, **Aboveground Forest Biomass and the Global Carbon Balance**, Global Change Biology, 11, PP. 945-958.
- Lavalle, M., 2009, **Full and Compact Polarimetric Radar Interferometry for Vegetation Remote Sensing**, In: Université Rennes 1.
- Lee, J.-S., Hoppel, K.W., Mango, S.A. & Miller, A.R., 1994, **Intensity and Phase Statistics of Multilook Polarimetric and Interferometric SAR Imagery**, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 32, PP. 1017-1028.
- Papathanassiou, K., Cloude, S. & Reigber, A., 1999, **Estimation of Vegetation Parameters Using Polarimetric SAR Interferometry Part i and ii**, In Proceedings of the CEOS SAR Workshop.
- Papathanassiou, K. & Cloude, S.R., 2003, **The Effect of Temporal Decorrelation on the Inversion of Forest Parameters from Pol-InSAR Data**, In International Geoscience and Remote Sensing Symposium, PP. III: 1429-1431.
- Papathanassiou, K.P. & Cloude, S.R., 2001, **Single-Baseline Polarimetric SAR Interferometry**, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 39, PP. 2352-2363.
- Reigber, A. & Moreira, A., 2000, **First Demonstration of Airborne SAR Tomography Using Multibaseline L-Band Data**, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 38, PP. 2142-2152.
- Treuhaft, R.N., Moghaddam, M. & van Zyl, J.J., 1996, **Vegetation Characteristics and Underlying Topography from Interferometric Radar**, Radio Science, 31, PP. 1449-1485.
- Treuhaft, R.N. & Siqueira, P.R., 2000, **Vertical Structure of Vegetated Land Surfaces from Interferometric and Polarimetric Radar**, Radio Science, 35, PP. 141-177.
- Wenxue, F., Huadong, G., Xinwu, L., Bangsen, T. & Zhongchang, S., 2016, **Extended Three-Stage Polarimetric SAR Interferometry Algorithm by Dual-Polarization Data**, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 54, PP. 2792-2802.
- Xie, Q., Zhu, J., Wang, C. & Fu, H., 2014, **Boreal Forest Height Inversion Using E-SAR PolInSAR Data Based Coherence Optimization Methods and Three-Stage Algorithm**, In Earth Observation and Remote Sensing Applications (EORSA), 2014 3rd International Workshop on (PP. 145-150), IEEE.