



سنجش از دور

GIS ایران



سنجش از دور و GIS ایران سال هشتم، شماره چهارم، زمستان ۱۳۹۵
Vol.8, No. 4, Winter 2017 Iranian Remote Sensing & GIS

۱-۱۶

ارزیابی استخراج ارتفاع درختان مناطق جنگلی بر مبنای تداخل سنجی پلاریمتری راداری

حسین آقابابایی^{۱*} و محمودرضا صاحبی^۲

۱. دانشجوی دکتری گروه فتوگرامتری و سنجش از دور، دانشکده ژئودزی و ژئوماتیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
۲. دانشیار گروه فتوگرامتری و سنجش از دور، دانشکده ژئودزی و ژئوماتیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۶/۲۱

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۳/۳

چکیده

هدف این مقاله ارزیابی توانمندی استخراج پارامترهای جنگلی همچون ارتفاع درختان با تکنیک‌های تداخل‌سنجی راداری با روزه ترکیبی است. هدف عمده از تصاویر پلاریمتری راداری، در کاربردهای جنگلی، جداسازی مراکز فاز ناشی از توپوگرافی سطح زمین و تاج درختان است. یکی از روش‌های بسیار مرسوم در این زمینه به‌کارگیری ساختار دولایه‌ای مبتنی بر مدل پرکاربرد پراکنش حجمی نامنظم روی سطوح (RVOG) است. این مدل در یک دستگاه معادلات غیرخطی پارامترهای گوناگون -مانند توپوگرافی زمین، ارتفاع درخت، ضریب میرایی موج و نسبت دامنه- پراکنش سطحی به حجمی را تخمین می‌زند. با این حال به‌دلیل وابستگی شدید نتایج مدل به مقادیر اولیه مجهولات و به‌دلیل زمان‌بر بودن و پیچیدگی حل دستگاه غیرخطی برای تمامی سلول‌های تصویر، بیشتر اوقات مسئله براساس فرضیات خاصی در ارتباط با مدل‌های پراکنش حل می‌شود. با وجود این، نتایج این روش‌ها نیز تحت تأثیر فرضیات قرار می‌گیرند و غالباً نمی‌توانند منجر به تعیین مناسب پارامترها شوند. از این‌رو برای حل مسائل پیش رو در این مقاله، با در نظر گرفتن ساختار دولایه‌ای جنگل، روشی مدل‌مبنا در تعیین توپوگرافی سطح زمین و ارتفاع درختان مطرح می‌شود. روش در نظر گرفته‌شده بدون هیچ پیش‌فرضی در ارتباط با پارامترهای مجهول، سعی در تخمین بهینه آنها دارد و یافته‌های پژوهش نشان می‌دهد که این مدل کارایی بهتری از دو روش مرسوم مدل معکوس و SPIRIT دارد؛ به طوری که شاخص RMSE تخمین ارتفاع درختان از مقدار ۱۳/۲۶ و ۱۱/۴۱ متر به ترتیب در روش مدل معکوس و SPIRIT به مقدار ۷/۳۴ متر در روش عرضه‌شده کاهش یافته است.

کلیدواژه‌ها: تداخل‌سنجی پلاریمتری راداری، مدل پراکنش حجمی نامنظم روی سطوح، پارامترهای مناطق جنگلی.

*نویسنده عهده‌دار مکاتبات: تهران، خیابان ولیعصر، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، دانشکده مهندسی ژئودزی و ژئوماتیک، کدپستی ۱۹۹۶۷۱۵۴۳۳. تلفن:

۰۲۱۸۸۷۷۰۲۱۸

Email: aghababae@mail.kntu.ac.ir

۱- مقدمه

شناخت و ارزیابی دقیق مناطق جنگلی در بسیاری از حوزه‌های مدیریتی و جنگلداری مانند کاهش خسارات ناشی از سیل و فرسایش خاک بسیار بااهمیت است. همچنین تعیین پارامترهای جنگل، همچون ارتفاع درختان، نقش بسیار مهمی در آنالیز و تخمین زیست توده دارد.

امروزه صرف نظر از روش‌های زمان‌بر و هزینه‌بر زمینی، تداخل‌سنجی پلاریمتری راداری با روزه‌ ترکیبی (PolInSAR)^۱ یکی از روش‌های کارآمد در تخمین ارتفاع درختان و توپوگرافی سطح زمین بر مبنای جداسازی مراکز فاز پراکنش‌های بازگشتی است (Cloude and Papathanassiou, 1998). در این تکنیک‌ها، با در اختیار داشتن اطلاعات پلاریمتری و اینترفرومتری، به ترتیب امکان جداسازی مراکز فاز و تخمین ارتفاع فراهم می‌آید. برای درک مکانیزم تعیین ارتفاع درختان و توپوگرافی سطح زمین با داده‌های PolInSAR، پیش از همه لازم است ساختار برهم‌کنش امواج راداری با مناطق جنگلی بحث و بررسی شود. تا کنون پژوهش‌های مهمی در ارتباط با مسئله‌ی مدلسازی امواج بازگشتی از مناطق جنگلی صورت پذیرفته است (Thirion et al., 2006; Ulaby et al., 1988; Smith-Jonforsen et al., 2005). بر اساس این پژوهش‌ها، مدل دولایه‌ای^۲ راه‌حلی ساده و بسیار پرکاربرد در مدلسازی ساختار جنگل بوده است. این مدل بر مبنای محل قرارگیری مراکز فاز مکانیسم‌های متعدد بازگشتی از مناطق جنگلی است. در این مدل مفروض، لایه اول همان سطح زمین محسوب می‌شود که محل قرارگیری مراکز فاز پراکنش‌های دوگانه و همچنین پراکنش‌های سطحی بازگشتی از زمین است و لایه دوم نیز مختص لایه‌های بالایی جنگل یا تاج درختان است که اغلب پراکنش‌های حجمی را دربر می‌گیرد (Shiroma and Macedo, 2015; Papathanassiou and Cloude, 2001).

بر اساس این ساختار دولایه‌ای، دو مدل معروف RVOG^۳ و OVOG^۴ در استخراج پارامترهای جنگل مطرح شده است که تفاوت این دو فقط در فرض

وابستگی یا عدم وابستگی ضریب میرایی به پلاریزاسیون امواج است (Treuhaf and Cloude, 2006; Thirion et al., 1999). به‌طور کلی در مدل RVOG، با فرض عدم وابستگی ضریب میرایی به پلاریزاسیون، به دلیل وضعیت توجیه تصادفی عناصر پراکنشگرهای حجمی، امکان مدلسازی کوهرنسی مشاهداتی بر اساس شش پارامتر مجهول جنگل وجود خواهد داشت (رک، بخش ۲-۱). تخمین این پارامترها نیازمند حل دستگاه معادلات غیرخطی شش معادله و شش مجهول است (Papathanassiou and Cloude, 2001). روش مشابه و زمان‌بری در پژوهش زانگ و همکاران^۵ (۲۰۰۶) برای حل این دستگاه معادلات با الگوریتم ژنتیک مطرح شده است. صرف‌نظر از زمان‌بر بودن حل دستگاه غیرخطی، به دلیل وابستگی نتایج به انتخاب مقادیر اولیه مجهولات، تکنیک‌ها و روش‌های دیگری مانند روش سه‌مرحله‌ای (Cloude and Papathanassiou, 2003) عرضه شده است. ایده کلی در مدل سه‌مرحله‌ای برآزش خطی در صفحه کوهرنسی است که بیشترین انطباق را بر نقاط کوهرنسی پلاریزاسیون‌های متفاوت داشته باشد. پیچیدگی فرایند برآزش بهترین خط بر مجموعه پلاریزاسیون‌های موجود در هر پیکسل کمتر از فرایند حل معادله غیرخطی نخواهد بود. از این‌رو معمولاً برآزش خط با دو پلاریزاسیون، که در آنها پراکنش‌های حجمی و سطحی از زمین غالب باشند، برای برآزش خط در نظر گرفته می‌شوند. در برخی پژوهش‌ها مانند سی و همکاران^۶ (۲۰۱۴) از پلاریزاسیون‌های بهینه برای حل مدل سه‌مرحله‌ای استفاده شده است. تعیین خط مفروض در صفحه کوهرنسی منجر به تعیین مبهم مرکز فاز زمین می‌شود. پس از رفع ابهام و تعیین فاز توپوگرافی و با فرض کلی صفر بودن نسبت دامنه

1. polarimetric interferometric synthetic aperture radar
2. two layer
3. Random volume over ground
4. Oriented volume over ground
5. Zhang et al.
6. Xie et al.

هر پیکسل می‌تواند با شکل‌گیری ماتریس کوهرنسی 6×6 شناخته شود.

$$T_6 = E\{k_1 k_2^H\} = \begin{bmatrix} T_{11} & \Omega_{12} \\ \Omega_{12}^H & T_{22} \end{bmatrix} \quad (1) \text{ رابطه}$$

در رابطه بالا H عملگر ترانهاده مختلط، E عملگر امید، و به ترتیب بردارهای پائولی تصویر اول و دوم، T_{11} و T_{22} ماتریس‌های کوهرنسی پلاریمتری تصاویر اول و دوم، و Ω_{12} نیز ماتریس کوهرنسی پلاریمتری-اینترفرومتری حاصل از تداخل‌سنجی است. بر مبنای اطلاعات ماتریس کوهرنسی، تصاویر کوهرنسی مختلط در پلاریزاسیون‌های گوناگون را می‌توان با رابطه زیر بیان کرد (Papathanassiou and Cloude, 2001; Cloude, 2008).

$$\gamma(w) = \frac{w^H \Omega_{12} w}{\sqrt{w^H T_{11} w} \sqrt{w^H T_{22} w}} \quad (2) \text{ رابطه}$$

w بردار پلاریزاسیون، و $\gamma(w)$ نیز کوهرنسی مختلط در پلاریزاسیون w است. همان‌طور که اشاره شد، ابتدا تروهافت و سیکریا^۱ (۲۰۰۰) ساختار دولایه‌ای جنگل را برای تحلیل کوهرنسی مطرح کردند و سپس این مبحث به کاربردهای تداخل‌سنجی پلاریمتری (Papathanassiou and Cloude, 2001) گسترش یافته است. بر مبنای ساختار دولایه‌ای جنگل، سطح زمین در جایگاه لایه اول در ارتفاع h_1 قرار دارد و لایه دوم (شامل پوشش گیاهی) به ارتفاع h_2 روی لایه اول است که بیشتر پراکنشگرهای حجمی را دربر دارد (شکل ۱). در مدل پراکنش حجمی نامنظم روی سطوح (RVOG) در شرایط انعکاس متقارن^۳ (Cloude and Pottier, 1996; Lee and Pottier, 2009) و برابری ماتریس‌های کوهرنسی پلاریمتری، امکان مدلسازی مؤلفه‌های ماتریس T_6 براساس پارامترهای زیر وجود خواهد داشت (Treuhaft et al., 1996; Treuhaft and Cloude, 1999; Cloude and Papathanassiou, 2003; Lopez-Martinez et al., 2010).

پراکنش سطحی به حجمی در پلاریزاسیون حجمی غالب مثلاً HV، ارتفاع درخت و دیگر مجهولات تعیین می‌شوند. همچنین به‌تازگی مدل سه‌مرحله‌ای به داده‌هایی با پلاریزاسیون دوگانه^۱ نیز گسترده شده است (Wenxue et al., 2016). با این حال، در نظر گرفتن این فرض در فرکانس‌های کوتاه، همچون باند P، به دلیل نفوذ زیاد این باند و تحت تأثیر قرار گرفتن آن از سطح زمین ممکن است تا حدی مسئله‌ساز باشد.

به‌طور کلی آنچه از جمع‌بندی روش‌های مرسوم تداخل‌سنجی پلاریمتری در مدل پراکنش حجمی نامنظم روی سطوح در مناطق جنگلی برمی‌آید پیچیدگی حل دستگاه معادلات غیرخطی، وابستگی به شرایط اولیه و مفروضات مسئله است حال آنکه امروزه تخمین دقیق ارتفاع درختان با مدل‌های ساده و بدون پیش‌فرض بسیار ضروری است. از این‌رو برای بهبود دقت تخمین مهم‌ترین پارامترهای جنگل (ارتفاع درختان و توپوگرافی سطح زمین)، در این مقاله مدل RVOG به شیوه ساده دیگری حل می‌شود. در این مدل، هیچ پیش‌فرضی از پارامترهای گوناگون در حل معادله در نظر گرفته نمی‌شود. در مدل عرضه‌شده، توپوگرافی سطح بدون ابهام و پیچیدگی خاصی از مدل RVOG تخمین زده می‌شود و سپس این فاز در صفحه کوهرنسی برای تخمین ارتفاع درخت به کار می‌رود. در ادامه مقاله و در بخش ۲، جزئیات مدل RVOG و روش حل مدل معکوس بیان می‌شود. در بخش ۳، روش پیشنهادی همراه با داده‌های در نظر گرفته‌شده توضیح داده می‌شود. در بخش ۴، جزئیات پیاده‌سازی همراه با نتایج حاصل و در نهایت، در بخش ۵ نیز، نتیجه‌گیری از پژوهش حاضر مطرح خواهد شد.

۲- تداخل‌سنجی پلاریمتری راداری بر مبنای

مدل RVOG

در تداخل‌سنجی پلاریمتری پس از اعمال فرایندهای پیش‌پردازشی لازم (Bamler and Hartl, 1998) و با در اختیار داشتن ماتریس‌های پراکنش مربوط به تصاویر،

1. dual polarimetric data set
2. Treuhaft and Siqueria
3. reflection symmetry

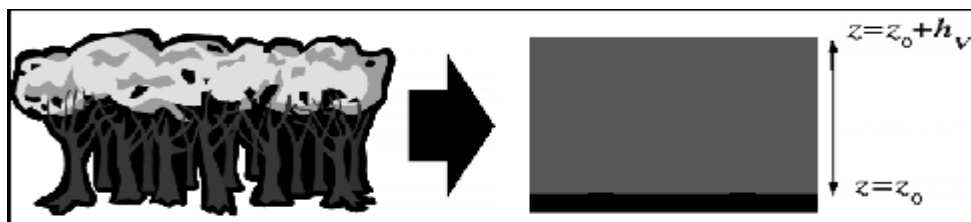
$$\begin{aligned}
 T_g &= m_g \begin{bmatrix} 1 & t_{12} & 0 \\ t_{12}^* & t_{22} & 0 \\ 0 & 0 & t_{33} \end{bmatrix}, & T_v &= m_v \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \eta & 0 \\ 0 & 0 & \eta \end{bmatrix} & \text{رابطه (۳)} \\
 I_1^V &= e^{\frac{-2\sigma h_v}{\cos\theta}} \int_0^{h_v} e^{\frac{2\sigma z}{\cos\theta}} T_v dz, & I_1^g &= \int_0^{h_v} \delta(z) e^{\frac{2\sigma z}{\cos\theta}} T_g dz = T_g \\
 I_2^V &= e^{\frac{-2\sigma h_v}{\cos\theta}} \int_0^{h_v} e^{(i\frac{4\pi\Delta\theta}{\lambda\sin\theta} + \frac{2\sigma}{\cos\theta})z} T_v dz, & I_2^g &= T_g \\
 T_{11} &= I_1^V + e^{\frac{-2\sigma h_v}{\cos\theta}} I_1^g, & \Omega_{12} &= e^{i\phi_v} I_2^V + e^{i\phi_g} e^{\frac{-2\sigma h_v}{\cos\theta}} I_2^g
 \end{aligned}$$

معادله زیر بیان شود. این رابطه بیانگر معادله یک خط در صفحه کوهرنسی است. در این رابطه، μ نسبت پراکنشی سطحی زمین به حجمی وابسته به پلاریزاسیون انتخابی است. γ_v نیز کوهرنسی مختلط برای پراکنشگرهای حجمی را نشان می‌دهد.

رابطه (۴)

$$\begin{aligned}
 \gamma(w) &= e^{i\phi_g} \left[\gamma_v + \frac{\mu(w)}{1 + \mu(w)} (1 - \gamma_v) \right], \\
 \gamma_v &= \frac{\int_0^{h_v} e^{\left(\frac{-2\sigma}{\cos\theta} + i\frac{4\pi\Delta\theta}{\lambda\sin\theta}\right)z} dz}{\int_0^{h_v} e^{\left(\frac{-2\sigma}{\cos\theta}\right)z} dz}
 \end{aligned}$$

در رابطه بالا m_g و m_v به ترتیب شدت یا دامنه پراکنش از زمین و پراکنشگرهای حجمی درخت، T_g و T_v ماتریس‌های کوهرنسی پلاریمتری زمین و درخت، σ ضریب میرایی موج، ϕ_g و ϕ_v نیز فاز توپوگرافی زمین و درخت‌اند. λ طول موج، θ زاویه فرودی موج در تصویر مرجع، $\Delta\theta$ اختلاف زوایای فرودی موج، h_v ارتفاع درخت، و η ضریب شکل پراکنشگر است. جزئیات بیشتر این پارامترها در منابع بالا مشخص شده‌اند. در ادامه، روند تعیین برخی پارامترهای یادشده (فاز توپوگرافی، فاز درخت و ارتفاع آن) از طریق مدل معکوس بررسی می‌شود.



شکل ۱. ساختار دولایه‌ای جنگل

منبع: Papathanassiou and Cloude, 2005

در معادله بالا پارامترهای مجهول عبارت‌اند از ضریب میرایی σ ، ارتفاع میانگین درختان h_v ، فاز توپوگرافی ϕ_g ، نسبت پراکنشی سطحی به حجمی μ ، و مشاهدات نیز کوهرنسی مختلط در پلاریزاسیون‌های گوناگون است. بر این اساس، با مشاهده سه کوهرنسی

۲-۱- مدل معکوس در حل پارامترهای مجهول

براساس منابع (Papathanassiou et al., 1999; Treuhaft and Siqueira, 2000; Papathanassiou and Cloude, 2001)، رابطه کوهرنسی مختلط (معادله ۲) می‌تواند براساس پارامترهای RVOG در (۳)، به صورت

مختلط خواهیم داشت:

رابطه (۵)

$$\begin{cases} \gamma(w_1) = f_1(\varphi_g, \mu_1, h_v, \sigma) \\ \gamma(w_2) = f_2(\varphi_g, \mu_2, h_v, \sigma) \\ \gamma(w_3) = f_3(\varphi_g, \mu_3, h_v, \sigma) \end{cases} \Rightarrow$$

$$[\varphi_g \quad h_v \quad \sigma \quad \mu_1 \quad \mu_2 \quad \mu_3] =$$

$$f^{-1}[\gamma(w_1) \quad \gamma(w_2) \quad \gamma(w_3)]$$

این رابطه یک دستگاه معادلات غیرخطی شش معادله و شش مجهول را نشان می‌دهد. روند کلاسیک حل این دستگاه کمینه‌سازی نرم بین معادله‌های مشاهده‌ای و مدل به صورت تکرار است. افزون‌بر تحت تأثیر قرار گرفتن فرایند حل دستگاه غیرخطی با مقادیر اولیه مجهولات، تعیین سه پلاریزاسیون انتخابی در رابطه (۵) نیز مسئله‌ساز است. از این رو برای کاهش پیچیدگی روند حل دستگاه در مدل معکوس رابطه (۵)، معمولاً روش‌های دیگری همچون فرایند سه‌مرحله‌ای (Cloude and Papathanassiou, 2003) پیشنهاد شده است. در روش سه‌مرحله‌ای، ابتدا فاز توپوگرافی زمین تخمین زده می‌شود. برای این منظور، نقاط کوهرنسی مختلط یک پیکسل مورد نظر از تمامی پلاریزاسیون‌ها محاسبه می‌شود. طبق رابطه (۴)، نقاط کوهرنسی باید در امتداد یک خط قرار گیرند. بر همین اساس، خطی که بیشترین برآزش را بر مجموعه نقاط کوهرنسی داشته باشد تعیین می‌شود. این خط صفحه کوهرنسی را در دو نقطه قطع می‌کند که، با فرض یک بودن اندازه کوهرنسی در زمین، این نقاط می‌توانند معرف فاز توپوگرافی باشند. در نتیجه، تعیین فاز توپوگرافی با این روش با ابهام در انتخاب یکی از این دو نقطه روبه‌روست. برای انتخاب درست فاز توپوگرافی، روند پیشنهادی بررسی میزان فاصله این دو نقطه از مجموعه‌ای نقاط کوهرنسی خاص است. برای نمونه، نقطه‌ای که بیشترین فاصله را با نقطه کوهرنسی پلاریزاسیون HV داشته باشد یا نقطه‌ای که به نقطه کوهرنسی حاصل از مقدار ویژه اول (λ_1)، یعنی γ_1 در مسئله بهینه‌سازی کوهرنسی (Cloude and Papathanassiou, 1998)،

نزدیک‌تر باشد نقطه انتخابی خواهد بود. از فاز توپوگرافی تعیین شده در مرحله بعد برای محاسبه مقادیر دیگر مجهولات استفاده می‌شود و جزئیات بیشتر در این مورد مطرح شده است (Cloude and Papathanassiou, 2003). با این حال، محاسبه پلاریزاسیون‌های متفاوت و برآزش خط به نقاط کوهرنسی برای تمامی سلول‌های تصویر می‌تواند روش سه‌مرحله‌ای را تکنیکی نه‌چندان سریع جلوه دهد. از این رو امروزه برای ساده‌سازی و تسریع حل مسئله معکوس، فرایندی ساده وجود دارد که جزئیات آن بیان شده است (Cloude, 2005). در این روش سریع در تخمین مجهولات، معمولاً به جای تمامی پلاریزاسیون‌ها، می‌توان از دو پلاریزاسیون خاص استفاده کرد که در آن‌ها پراکنش‌های حجمی (w_v) و سطحی (w_s) غالب باشد. بر این اساس و بر مبنای دو پلاریزاسیون مذکور، دو کوهرنسی مختلط متناظر (γ_{ws}, γ_{wv}) محاسبه می‌شود که خط مزبور با این دو تعیین می‌شود. با حل ابهام طبق رابطه (۳۰) (Cloude, 2005)، می‌توان فاز توپوگرافی را تخمین زد. در ادامه با انتخاب پلاریزاسیون حجمی غالب و از طریق اختلاف فاز کوهرنسی حجمی و فاز توپوگرافی، ارتفاع درخت را می‌شود محاسبه کرد. با این همه، همان‌گونه که کلاود^۲ (۲۰۰۶) مطرح کرده است، به دلیل قرارنگرفتن مرکز فاز پراکنش حجمی در بالای درخت و صفرنبودن نسبت پراکنش سطحی به حجمی در γ_{wv} ، تخمین ارتفاع درخت کمتر از مقدار واقعی آن برآورد می‌شود. از این رو برای بهبود دقت تخمین و بهره‌گیری هم‌زمان از اطلاعات فاز و دامنه، رابطه زیر پیشنهاد شده است (Ibid.).

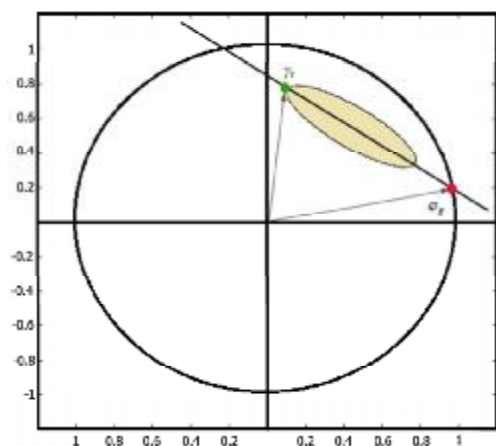
رابطه (۶)

$$h_v = \frac{\lambda \sin \theta}{4\pi\Delta\theta} \left[(\arg(\gamma_{w_v}) - \varphi_g) + 2 \varepsilon \operatorname{sinc}^{-1}(|\gamma_{w_v}|) \right]$$

بخش نخست رابطه بالا از اطلاعات فاز و بخش دوم نیز از اطلاعات دامنه (رابطه دوم معادله ۴)، که با تابع معکوس (sinc^{-1}) مشخص شده، استفاده می‌کند. نکته مهم در این رابطه انتخاب درست پارامتر ε است.

1. three stage
2. Cloude

محل تقاطع خط مزبور و صفحه کوهرنسی واقع شده که موقعیت آن پیش تر طبق رابطه (۷) معلوم شده است. اکنون با در نظر گرفتن ناحیه کوهرنسی^۱ در صفحه کوهرنسی مطابق شکل (۲)، خطی که از نقطه فاز توپوگرافی و انتهای ناحیه کوهرنسی عبور می کند می تواند تعیین کننده کوهرنسی مختلط پراکنشگرهای حجمی γ_v باشد. تعیین مرز ناحیه کوهرنسی ممکن است به تعیین این نقطه کمک کند. برای این منظور، رابطه (۲) را به صورت زیر بازنویسی می کنیم (Neumann et al., 2006).



شکل ۲. ناحیه کوهرنسی و فاز توپوگرافی

رابطه (۸)

$$\tilde{\gamma}(w) = \gamma(w) e^{i\varphi_g} = \frac{w^H (\Omega_{12} e^{i\varphi_g}) w}{w^H T w},$$

$$T = \frac{T_{11} + T_{22}}{2}$$

بخش حقیقی رابطه بالا را می توان بدین صورت ارائه کرد (Flynn et al., 2002).

$$\text{Re}(\tilde{\gamma}(w)) = \frac{w^H A w}{w^H T w} \quad \text{رابطه (۹)}$$

که در آن $A = (e^{i\varphi_g} \Omega_{12} + e^{-i\varphi_g} \Omega_{12}^H) / 2$ است. بیشینه و کمینه (۹) می تواند بخش حقیقی γ_v را مشخص

1. coherence region

پیشنهاد کلادو توجه به مقدار ضریب میرایی بوده است. در حالتی که ضریب میرایی نزدیک به صفر باشد، ترم اول رابطه (۶)، به دلیل پایین بودن مرکز فاز، نزدیک به نصف مقدار واقعی ارتفاع را تخمین خواهد زد و در حالتی که ضریب میرایی به بی نهایت نزدیک می شود، پراکنش حجمی از لایه های بالایی درخت خواهد بود. در این صورت، ارتفاع با همان ترم اول به میزان معتناهی درست تخمین زده خواهد شد. از این رو به منظور کمینه سازی خطای تغییرات، ضریب میرایی مقدار ۰.۴، پیشنهاد شده است (Ibid.). شایان توجه است این روش، که جزئیات آن نیز بیان شده است (Cloude, 2005, 2006) برای مقایسه با روش پیشنهادی این مقاله در بخش ۴ پیاده سازی خواهد شد.

۳- مواد و روش

نتایج حل مدل معکوس تحت تأثیر عوامل چندی، همچون مفروضات مسئله و انتخاب پلاریزاسیون ها، قرار دارد. برای رفع این مسائل در شرایط پراکنش حجمی نامنظم روی سطوح طبق رابطه (۳)، می شود مدلسازی ماتریس های کوهرنسی پلاریمتری و اینترفرومتری را مطرح کرد. بر این اساس، می توان مؤلفه Ω_{12} و T_{21} را به صورت زیر محاسبه کرد.

رابطه (۷)

$$\left. \begin{aligned} \Omega(1,2) &= 0 + e^{i\varphi_g} e^{-\frac{2\sigma h_g}{\cos\theta}} m_g t_{12} \\ T_{11}(2,1) &= 0 + e^{i\varphi_g} e^{-\frac{2\sigma h_g}{\cos\theta}} m_g t_{12}^* \end{aligned} \right\} \Rightarrow$$

$$\varphi_g = \arg(\Omega(1,2)T_{11}(2,1))$$

همان گونه که پیشنهاد شده (Lopez-Martinez et al., 2010)، فاز توپوگرافی بدون هیچ ابهام و پیش فرضی طبق رابطه بالا تعیین می شود. در ادامه، مشابه با روند مدل معکوس از فاز توپوگرافی تعیین شده برای تخمین ارتفاع درخت در فرایند زیر استفاده می کنیم. برای این منظور، معادله خط کوهرنسی مختلط در رابطه (۴) را در نظر می گیریم. در این رابطه، فاز توپوگرافی روی این خط و در

(Dreuillet, 2008) متعلق به آژانس فضایی اروپا استفاده می شود که جزئیات آن ها در ادامه آمده است. همچنین ترکیب رنگی پائولی از تصاویر مرجع واقعی و شبیه سازی شده در شکل ۳ به نمایش گذاشته شده است.

۳-۱- داده های شبیه سازی شده

این داده ها در شرایط پراکنش حجمی نامنظم روی سطوح شبیه سازی شده اند (Williams, 2006) برای شبیه سازی داده ها، پارامترهای دریافت تصاویر با پارامترهای سنجنده SETHI متناظرند که این پارامترها در جدول ۱ ارائه شده اند. در تصاویر شبیه سازی شده، طول Baseline مکانی ۴۰ متر در نظر گرفته شده است. تصویر شبیه سازی شده درختانی با میانگین ارتفاع ۱۸ متر دارد و توپوگرافی آن به طور نسبی از ۲۴ تا ۳۸ متر متغیر است.

۳-۲- داده های واقعی

دو تصویر پلاریمتری از سنجنده SETHI در منطقه جنگلی گویان^۱ فرانسه (52°55'W, 5°18'N)، که پارامترهای دریافت تصاویر آن در جدول ۱ آمده، در نظر گرفته شده است. در این داده ها، بیشتر منطقه مطالعاتی، به ویژه در قسمت میانی تصویر، پوشیده از درختان استوایی و دارای تراکم بالاست. توپوگرافی منطقه دارای تغییرات ارتفاعی تا حدود ۴۵ متر بوده و ارتفاع درختان به ۵۵ متر نیز می رسد.

جدول ۱. پارامترهای دریافت تصاویر سنجنده SETHI

طول موج (متر)	ارتفاع پرواز (متر)	زاویه فرودی (درجه)	قدرت تفکیک مکانی در راستای برد (متر)	قدرت تفکیک مکانی در راستای آزیموت (متر)	طول مکانی (متر)
۰.۷۵۴۲	۳۹۶۲	۳۵/۰۶۱۴	۱	۱/۲۴۵	۳۰/۱۱۶۳

1. extremum
2. Guyane

کند. برای تعیین حد آن مشابه با مسئله بهینه سازی پلاریزاسیون (Cloude and Papathanassiou, 1998)، می توان قضیه لاگرانژ را به کار برد.

$$L = w^H A w + \lambda (w^H T w - C) \quad (10)$$

$$\text{با حل } \frac{\partial L}{\partial w^H} = 0 \text{ به رابطه } Aw + \lambda T w = 0$$

خواهیم رسید که راه حل آن از طریق مقدار ویژه کلی به دست خواهد آمد. با در نظر گرفتن بردارهای ویژه متناسب با مقادیر ویژه بیشینه و کمینه، می توان از رابطه (۸) کوهرنسی متناظر، یعنی \tilde{Y}_{\max} و \tilde{Y}_{\min} را محاسبه کرد که با ضرب آن ها در $e^{-i\phi_e}$ مقدار γ_v حاصل می شود. پُر واضح است که نقطه مطلوب بیشترین فاصله را از نقطه فاز توپوگرافی دارد و مقدار فاز آن بیشتر از فاز توپوگرافی است. اکنون مشابه با روند ترکیبی کلاود (۲۰۰۶) در تخمین ارتفاع درخت، می توان هم زمان از اطلاعات فاز و دامنه به صورت رابطه (۶) استفاده کرد. بر طبق توضیحات، اکنون می شود الگوریتم ساده زیر را، برای مدل پیشنهادی، به صورت زیر مطرح کرد:

۱. محاسبه بدون بایاس ماتریس های کوهرنسی پلاریمتری و اینترفرومتری؛
۲. تخمین فاز توپوگرافی از طریق رابطه (۷)؛
۳. محاسبه کرانگی های^۱ رابطه (۹) طبق قضیه لاگرانژ (رابطه ۱۰) و بر مبنای مسئله مقدار ویژه کلی $Aw + \lambda T w = 0$ ؛
۴. محاسبه بردارهای ویژه (W_{\max} و W_{\min}) متناظر با مقادیر ویژه بیشینه و کمینه؛
۵. تعیین \tilde{Y}_{\max} و \tilde{Y}_{\min} از طریق رابطه (۸)، متناظر با پلاریزاسیون های W_{\max} و W_{\min} ؛
۶. حذف سهم فاز توپوگرافی از \tilde{Y}_{\max} و \tilde{Y}_{\min} و انتخاب γ_v با تأکید بر بیشترین فاصله از فاز توپوگرافی؛
۷. تعیین ارتفاع درختان با رابطه (۶).

برای ارزیابی مدل مطرح شده، از داده های شبیه سازی شده و داده های سنجنده SETHI (Bonin and)

داده شده است. همان طور که مشخص است، نتیجه حاصل از مدل معکوس تحت تأثیر بسیار مفروضات مسئله بوده، به طوری که در مناطق جنگلی، توپوگرافی زمین تخمین مطلوبی زده نشده و ارتفاع تعیین شده تا حد زیادی تحت تأثیر ارتفاع درختان بوده است. باید گفته شود در روش مدل معکوس، پلاریزاسیون های HV و HH-VV به ترتیب پلاریزاسیون هایی با پراکنش های غالب حجمی و سطحی در نظر گرفته شده اند (Cloude, 2006). روش SPIRIT، در تخمین توپوگرافی مناطقی که تراکم درختان بالایی ندارد، می تواند نتایج چشمگیری به دست دهد که حاصل آن در داده های شبیه سازی شده با تراکم نه چندان بالا مشهود است. برای ارزیابی کمی نتیجه مدل عرضه شده در مقایسه با روش مدل معکوس و SPIRIT، از شاخص های کمی RMSE²، میانگین و انحراف معیار خطای مطلق³ استفاده شده است. میانگین خطای مطلق در روش مدل معکوس و SPIRIT به ترتیب ۷/۱۵ و ۵/۵۳ متر با انحراف معیار ۲/۲۹ و ۵/۵۶ متر بوده است. در صورتی که در مدل عرضه شده دقت تخمین مدل رقومی زمین به میانگین خطای ۴/۹۰ متر و انحراف معیار ۲/۲۷ متر بهبود پیدا کرده است.

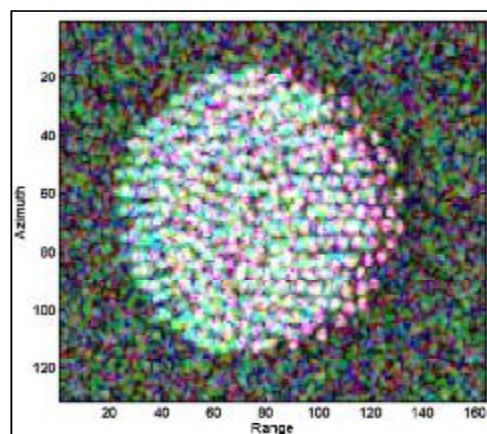
جدول ۲. ارزیابی کمی خطای تخمین توپوگرافی منطقه با روش های پیاده سازی شده در داده های شبیه سازی شده

روش	میانگین خطا	انحراف معیار	RMSE
روش عرضه شده	۴/۹۰۳۵	۲/۲۴۸۵	۵/۴۰۲۸
روش مدل معکوس	۷/۱۵۲۲	۵/۵۶۲۰	۹/۰۶۰۳
روش SPIRIT	۴/۹۱۹۴	۲/۲۹۳۰	۵/۵۳۷۰

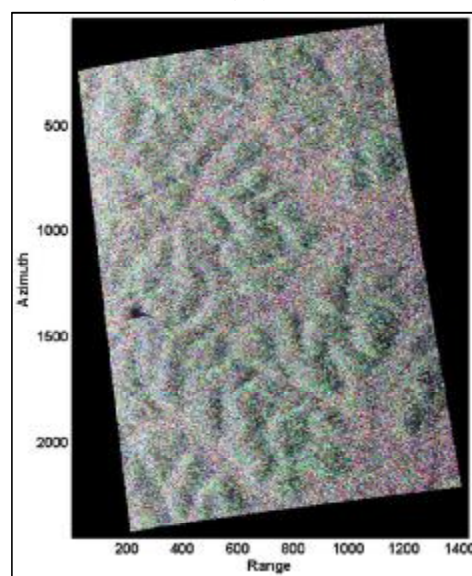
1. Estimation of Signal Parameters via Rotational Invariance Techniques

2. Root mean square error

۳. منظور از خطای مطلق اختلاف ارتفاع مدل رقومی موجود و توپوگرافی تخمین زده شده با هر روش است. با توجه به واحد مدل رقومی، واحدهای شاخص های کمی معرفی شده متر هستند.



(الف)

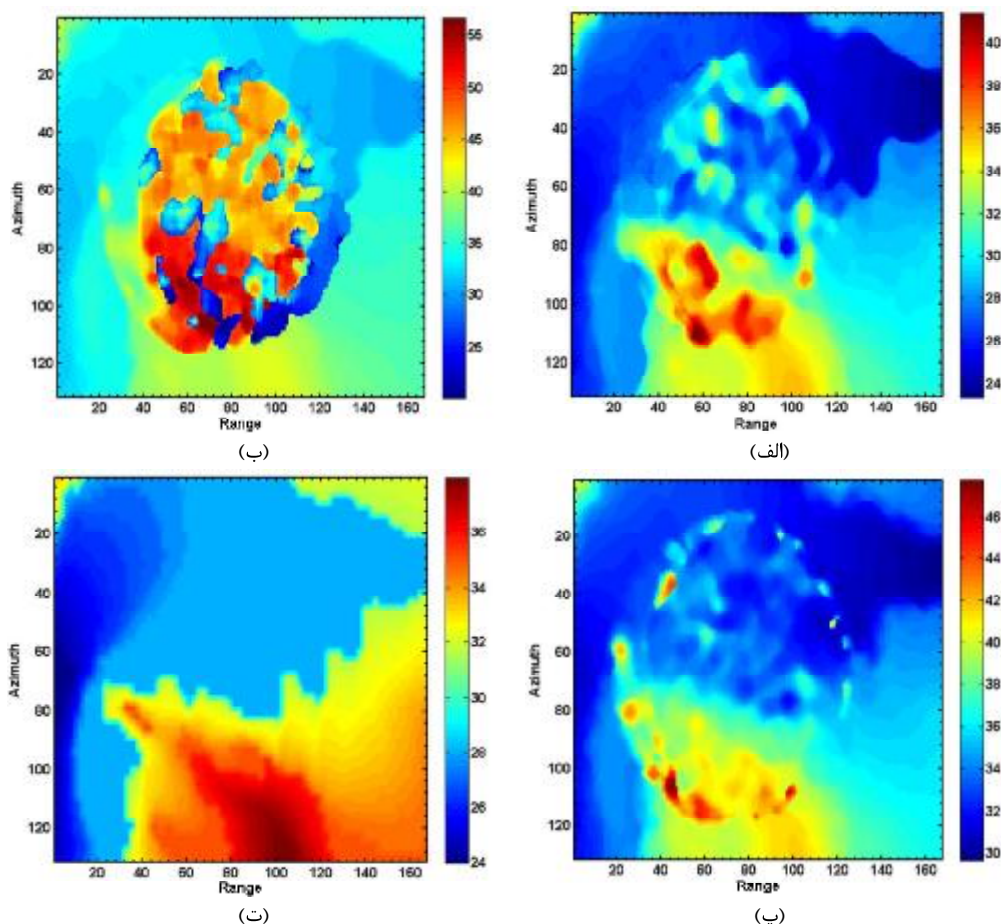


(ب)

شکل ۳. ترکیب رنگی پائولی تصاویر شبیه سازی شده (الف) و واقعی (ب)

۴- بحث و نتایج

برای ارزیابی کارایی روش عرضه شده، نتایج آن با نتایج حاصل از روش مدل معکوس (Cloude, 2005) و روش ESPIRT¹ (Yamada et al., 2006) به صورت تکنیک های مرسوم بررسی می شود. برای پیاده سازی هر سه روش در محیط MATLAB برنامه نویسی شده اند. نتایج تخمین توپوگرافی در داده های شبیه سازی شده با سه روش یاد شده در شکل ۴ نشان



شکل ۴. تخمین توپوگرافی سطح در داده‌های شبیه‌سازی‌شده: روش عرضه‌شده (الف)؛ روش مدل معکوس (ب)؛ روش SPIRIT (پ)؛ و مدل رقومی موجود (ت)

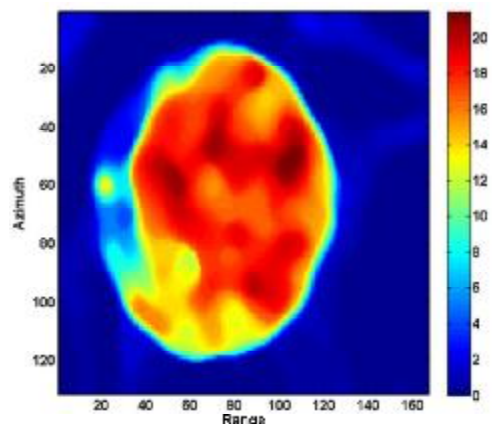
جدول ۳. ارزیابی کمی خطای تخمین ارتفاع درختان با روش‌های پیاده‌سازی‌شده در داده‌های شبیه‌سازی‌شده

روش	RMSE	میانگین خطا	انحراف معیار خطا
روش عرضه‌شده	۳/۹۱۸۰	۲/۰۵۱۱	۳/۳۳۸۳
روش مدل معکوس	۴/۷۸۵۸	۲/۳۹۳۰	۴/۱۴۴۷
روش SPIRIT	۶/۰۰۹۷	۴/۹۰۰۳	۳/۴۷۹۰

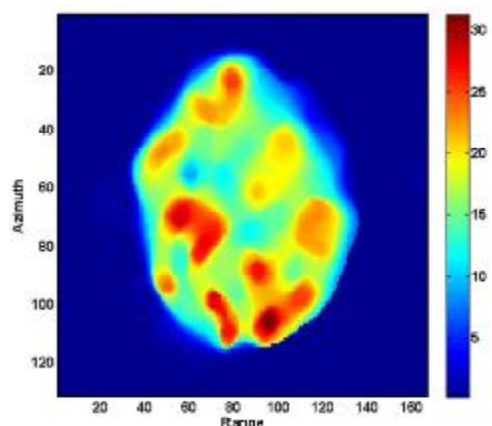
در ادامه، ارتفاع درختان بر طبق فرایند هر روش و از طریق رابطه (۶) محاسبه شده است. شکل ۵ مقایسه کیفی و جدول ۳ نیز مقایسه کمی از نتایج حاصل را ارائه می‌کند. با توجه به اینکه مرکز تصویر محل قرارگرفتن درختان بوده، مشخص است روش عرضه‌شده به خوبی توانسته است ارتفاع میانگین ۱۸ متر درختان را تخمین بزند؛ به طوری که ارتفاع تخمین‌زده‌شده در این روش از ۰ تا ۲۰ متغیر بوده و طبق جدول ۳ نیز، انحراف معیار ۳/۳۳ متر نشان‌دهنده کارایی چشمگیر آن است. در صورتی که در روش‌های مدل معکوس و SPIRIT ارتفاع تخمین‌زده‌شده دارای میانگین خطا و انحراف معیار بسیار بیشتری‌اند.

مکانی (Azimuth=50, Range=87) در نظر گرفته شده است. برای این پیکسل، نخست ناحیه کوهرنسی را محاسبه و مطابق شکل ۶ ترسیم می‌کنیم. برای تخمین ارتفاع (توپوگرافی و ارتفاع درخت) طبق رابطه (۴)، معادله خطی را در نظر می‌گیریم که از نقطه فاز توپوگرافی تخمین زده شده و یک نقطه بر مرز ناحیه کوهرنسی عبور کند. از این رو مناسب‌ترین نقطه برای ارزیابی ارتفاع درختان نقطه‌ای خواهد بود که بیشترین فاصله را از نقطه توپوگرافی داشته باشد و البته ناحیه کوهرنسی را نیز دربر می‌گیرد. این نقطه با فرایند عرضه شده به سادگی تعیین و در شکل ۶ نشان داده شده است. نکته گفتنی این است که کوهرنسی مختلط پراکنش حجمی در نظر گرفته شده با این روش در هر سلول تصویر می‌تواند با پلاریزاسیون متفاوتی مرتبط باشد؛ در صورتی که در روش مدل معکوس، برای این منظور عملاً یک پلاریزاسیون (معمولاً HV) در نظر گرفته می‌شود. بدین ترتیب در مدل عرضه شده، کوهرنسی مرتبط با پلاریزاسیونی انتخاب می‌شود که بهترین گزینه برای تخمین ارتفاع خواهد بود.

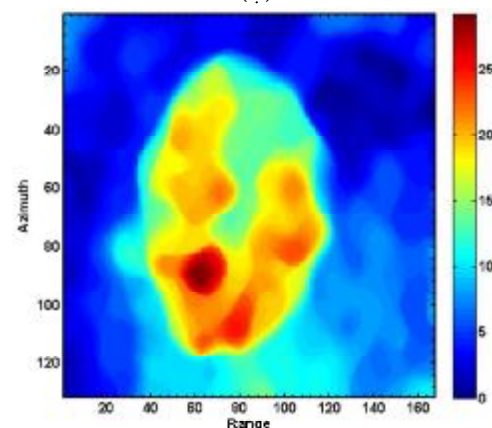
در ادامه برای ارزیابی بیشتر از عملکرد روش عرضه شده در مقایسه با روش‌های مرسوم، از داده‌های واقعی نیز استفاده شده است. برای صحت‌سنجی نتایج، از مدل رقومی موجود (با قدرت تفکیک ۱ متری) و ارتفاع درختان که از داده‌های لیدار به دست آمده استفاده می‌شود. نتایج تخمین توپوگرافی سطح زمین با روش‌های مورد اشاره در شکل ۷ به نمایش گذاشته شده است. مقایسه کیفی و کمی نتایج (جدول ۴) نشان می‌دهد که توپوگرافی در روش عرضه شده با دقت مطلوب‌تری تخمین زده شده است؛ به طوری که شاخص RMSE از مقدار ۹/۱۶ و ۹/۰۶ در روش‌های مدل معکوس و SPIRIT به مقدار ۷/۴۶ متر بهبود پیدا کرده است. وابستگی به پلاریزاسیون در مدل معکوس و اجرا کردن جداسازی بهینه مکانیسم در مدل SPIRIT مسائلی اند که دقت تخمین توپوگرافی در این روش‌ها را تا حد بسیاری تحت تأثیر قرار داده‌اند. در صورتی که روش در نظر گرفته شده، بدون پیش‌فرض خاصی، توپوگرافی را با دقت معتناهی تخمین زده است.



(الف)



(ب)

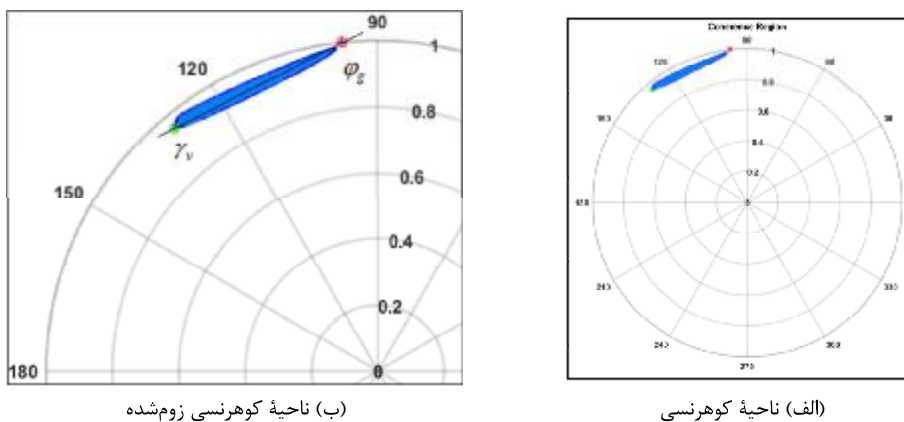


(پ)

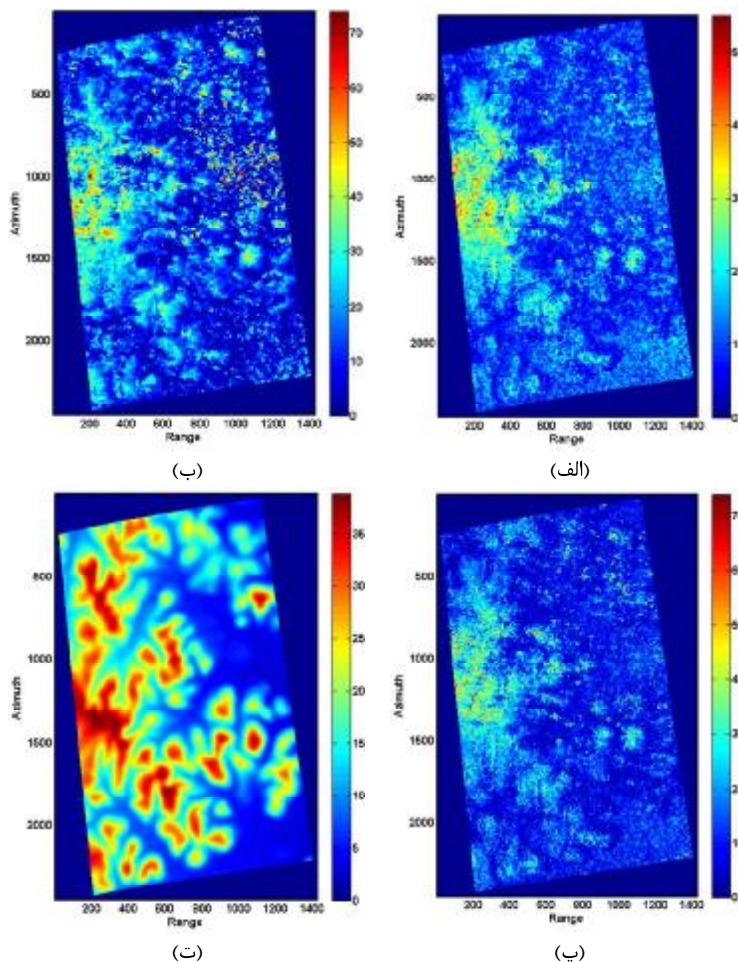
شکل ۵. تخمین ارتفاع درختان در داده‌های شبیه‌سازی شده:

روش عرضه شده (الف)؛ روش مدل معکوس (ب)؛ روش SPIRIT (پ)

همچنین برای آشنایی بیشتر با شیوه‌ی عملکرد مدل پیشنهادی، پیکسلی خاص روی تصویر با ویژگی



شکل ۶. ناحیه کوهرنسی پیکسل مورد آنالیز و معادله خط کوهرنسی عبوری از نقاط فاز توپوگرافی و کوهرنسی کوهرنسی مختلط برای پراکنشگرهای حجمی



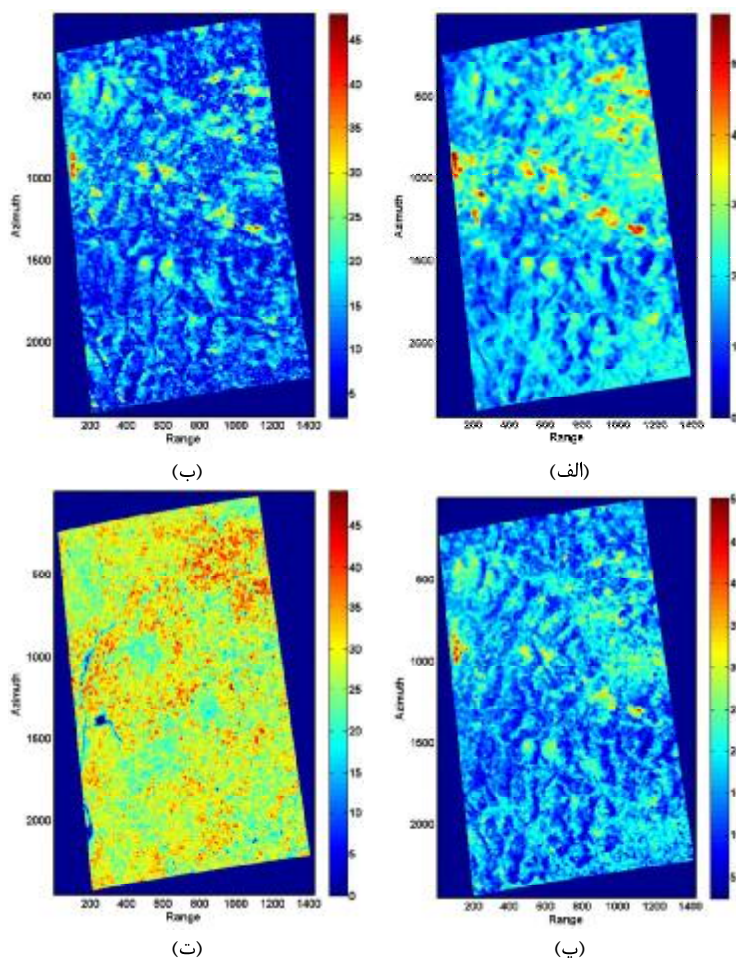
شکل ۷. تخمین توپوگرافی در داده‌های واقعی با: روش‌عرضه‌شده (الف)؛ روش مدل معکوس (ب)؛ روش SPIRIT (پ)؛ و مدل رقومی موجود (ت)

این توانایی باعث شده، در هر موقعیت تصویر، پلاریزاسیونی که بیشترین فاصله را از فاز توپوگرافی داشته باشد به منزله پلاریزاسیون منتخب برای تخمین ارتفاع درخت در نظر گرفته شود. این روند مسئله وابستگی مدل معکوس به انتخاب یک پلاریزاسیون واحد برای کل تصویر را تا حد بسیاری برطرف کرده است. آن گونه که از مقایسه کمی نتایج با داده‌های لیدار به منزله مرجع در جدول ۵ و شکل ۹ برمی‌آید، معدل خطای تخمین در روش عرضه شده به نسبت مدل معکوس کاهش چشمگیری یافته است. در روش SPIRIT نیز افزون بر وابستگی آن به شرایط منطقه مورد مطالعاتی، همانند تراکم درختان، این روش تا حد زیادی به کارایی آن در تفکیک مکانیسم‌ها نیز وابسته است.

جدول ۴. ارزیابی کمی خطای تخمین توپوگرافی منطقه با روش‌های پیاده‌سازی شده در داده‌های واقعی

روش	RMSE	میانگین خطا	انحراف معیار خطا
روش عرضه شده	۷/۴۶۴۴	۵/۲۶۲۰	۵/۲۹۴۳
روش مدل معکوس	۹/۱۶۰۳	۵/۶۸۱۳	۷/۱۸۵۷
روش SPIRIT	۹/۰۶۵۹	۶/۱۲۹۹	۶/۹۵۶۷

نتایج تخمین ارتفاع درختان با داده‌های واقعی نیز در شکل ۸ نشان داده شده است. نقطه قوت روش عرضه شده محاسبه ارتفاع درختان بر مبنای فاز پلاریزاسیون‌های متفاوت در سلول‌های گوناگون تصویر محسوب می‌شود.



شکل ۸. تخمین ارتفاع درختان در داده‌های واقعی با: روش عرضه شده (الف)؛ روش مدل معکوس (ب)؛ روش SPIRIT (پ)؛ و داده‌ی لیدار (ت)

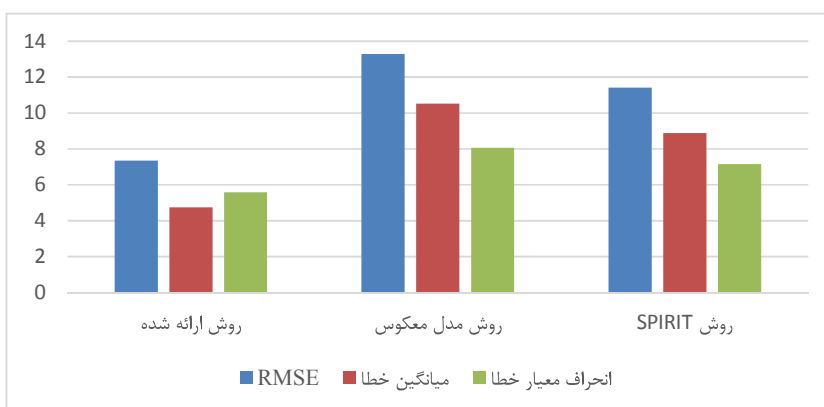
۵- نتیجه‌گیری

در تکنیک‌های تداخل‌سنجی پلاریمتری به‌منزله روشی مناسب در آنالیز و بررسی ساختار مناطق جنگلی، امکان تخمین ارتفاع میانگین درختان و تعیین توپوگرافی سطح زمین وجود دارد. یکی از روش‌های بسیار مرسوم برای این منظور بهره‌گیری از مدل پراکنش حجمی نامنظم روی سطوح و حل آن از طریق مدل معکوس است. در این مدل پراکنش بازگشتی از درختان و سطح طبیعی توپوگرافی زمین جدا می‌شود. به‌عبارت بهتر، نکته‌آسافی در حل این مدل‌ها تفکیک مراکز فاز پراکنش‌های بازگشتی است. طبق ساختار دولایه‌ای جنگل و مدل پراکنش حجمی نامنظم روی سطوح، پراکنش‌های بازگشتی دارای مراکز فاز منطبق بر زمین و یا منطبق بر لایه‌های بالایی جنگل همچون تاج درختان‌اند، که هدف نهایی مدل تعیین این دو مرکز فاز و تخمین ارتفاع براساس آن‌هاست. فرایند بسیار مرسوم برای جداسازی مراکز فاز بهره‌گیری از مدل معکوس بوده است. با این حال، نتایج این مدل وابسته به انتخاب پلاریزاسیون‌ها و فرضیات مسئله است که جداسازی توپوگرافی زمین و تخمین ارتفاع درختان را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در این مقاله، بر مبنای ساختار دولایه‌ای جنگل و مدل‌سازی پراکنش بازگشتی براساس پارامترهای مدل پراکنش حجمی نامنظم روی

همان‌طور که از نتایج برمی‌آید، روش عرضه‌شده نتیجه به نسبت بهتری درمقایسه با این دو روش مرسوم داشته است. مقایسه نتیجه این روش با داده‌های لیدار نشان می‌دهد که در برخی از نواحی تصویر (مانند نواحی پایین تصویر)، ارتفاع درختان کمتر از مقدار واقعی آن‌ها تخمین زده شده است. دلیل آن ممکن است این باشد که به‌کارگیری ترم کوه‌رنسی نتوانسته به‌خوبی مسئله تخمین پایین ارتفاع را برای تمامی مناطق با گونه‌ها و تراکم متفاوت جبران کند. افزون‌بر این اگرچه در روش عرضه‌شده فاز انتخابی برای تخمین ارتفاع درخت در بیشترین فاصله از فاز توپوگرافی قرار دارد، به‌دلیل نفوذ چشمگیر امواج راداری به‌نسبت لیدار، مرکز فاز همواره در بالای درخت قرار نمی‌گیرد.

جدول ۵. ارزیابی کمی خطای تخمین ارتفاع درختان با روش‌های پیاده‌سازی‌شده در داده‌های واقعی

روش	RMSE	میانگین خطا	انحراف معیار خطا
روش عرضه‌شده	۷/۳۴۳۷	۴/۷۵۷۵	۵/۵۹۴۳
روش مدل معکوس	۱۳/۲۶۹۳	۱۰/۵۳۵۳	۸/۰۶۷۳
روش SPIRIT	۱۱/۴۱۱۶	۸/۸۸۸۳	۷/۱۵۷۱



شکل ۹. مقایسه کمی خطای تخمین ارتفاع درختان با روش‌های پیاده‌سازی‌شده و داده‌های واقعی

- Course, Tutorial of the ESA Polarimetric SAR Processing (PolSARPro) Toolbox.
- Cloude, S.R. & Papathanassiou, K.P., 1998, **Polarimetric SAR Interferometry**, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 36, PP. 1551-1565.
- Cloude, S.R. & Papathanassiou, K.P., 2003, **Three-Stage Inversion Process for Polarimetric SAR Interferometry**, Proceeding of IEEE International Conference in RADAR, Sonar and Navigation, PP. 125-134.
- Cloude, S.R. & Pottier, E., 1996, **A Review of Target Decomposition Theorems in Radar Polarimetry**, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 34, PP. 498-518.
- Flynn, T., Tabb, M. & Carande, R., 2002, **Coherence Region Shape Extraction for Vegetation Parameter Estimation in Polarimetric SAR Interferometry**, Proceeding of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), PP. 2596-2598.
- Lee, J.S. & Pottier, E., 2009, **Polarimetric Radar Imaging: From Basics to Applications**, CRC press.
- Lopez-Martinez, C., Alonso, A., Fabregas, X. & Papathannassiou, K.P., 2010, **Ground Topography Estimation over Forests Considering Polarimetric SAR Interferometry**, Proceeding of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), PP. 3612-3615.
- Neumann, M., Reigber, A. & Ferro-Famil, L., 2006, **Polinsar Coherence Set Theory and Application**, EUSAR.
- Papathanassiou, K., Cloude, S.R. & Reigber, A., 1999, **Estimation of Vegetation Parameters Using Polarimetric SAR Interferometry**, part i and ii, Proc. CEOS SAR Workshop, CNES, 26-29
- سطوح، راه‌حلی کلی در تهیه توپوگرافی و ارتفاع درختان بیان شد. روش در نظر گرفته‌شده بدون نیاز به پیش‌فرض خاصی و با انتخاب پلاریزاسیون مناسب در سلول‌های گوناگون پارامترهای مورد نظر را تخمین می‌زند. به طور خلاصه، مشارکت این پژوهش در بسط روابط حاصل از تحقیقات فلین^۱ (۲۰۰۲) به‌منظور تخمین ناحیه کوه‌رنسی، همراه با استفاده از فاز توپوگرافی تخمین‌زده‌شده به تخمین ارتفاع درختان بوده است. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که مدل عرضه‌شده قابلیت بهتری در استخراج توپوگرافی و ارتفاع درختان داشته است. در این زمینه، میانگین خطای تخمین ارتفاع میانگین درختان از مقدار ۱۰/۵۳ و ۸/۸۸ متر، به ترتیب در روش‌های مدل معکوس و SPIRIT، به مقدار ۴/۷۵ کاهش یافت. همچنین در مقایسه با دو روش مرسوم بالا، شاهد بهبود این خطا در تخمین مدل رقومی منطقه با روش در نظر گرفته‌شده بوده‌ایم. با این حال برای بهبود نتایج، پیشنهاد می‌شود که در تخمین ارتفاع بهتر است، به جای استفاده از یک پلاریزاسیون خاص، از اطلاعات تمامی پلاریزاسیون‌ها استفاده شود. همچنین بهره‌گیری از مجموعه تصاویر پلاریمتری نیز می‌تواند دقت نتایج را بهبود بخشد.
- ۶- منابع
- Bamler, R. & Hartl, P., 1998, **Synthetic Aperture Radar Interferometry**, Inverse Problems, 14, R1.
- Bonin, G. & Dreuillet, P., 2008, **The Airborne SAR-System: SETHI - Airborne Microwave Remote Sensing Imaging System**, In Proceeding of IEEE European Synthetic Aperture Radar (EUSAR), PP. 1-4.
- Cloude, S.R., 2005, **POL-InSAR Training Course**, Radio Science.
- Cloude, S.R., 2006, **Polarization Coherence Tomography**, Radio Science, 41
- Cloude, S.R., 2008, **POL-InSAR Training**

1. Flynn

- Papathanassiou, K.P. & Cloude, S.R., 2001, **Single-Baseline Polarimetric SAR Interferometry**, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 39, PP. 2352-2363.
- Papathanassiou, K.P. & Cloude, S.R., 2005, **Single vs Multi- Polarization Interferometry**, Report and Tutorial for PolSARpro, 3, <http://envisat.esa.int/polsarpro/>
- Shiroma, G.H.X. & Macedo, K.A.C.D., 2015, **Estimating a Preliminary Terrain Model from the X-Band InSAR and the RVOG Model**, Proceeding of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), PP. 4089-4092.
- Smith-Jonforsen, G., Ulander, L.M.H. & Xianyun, L., 2005, **Low VHF-Band Backscatter from Coniferous Forests on Sloping Terrain**, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 43, PP. 2246-2260.
- Thirion, L., Colin, E. & Dahon, C., 2006, **Capabilities of a Forest Coherent Scattering Model Applied to Radiometry, Interferometry, and Polarimetry at P- and L-Band**, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 44, 849-862.
- Treuhaft, R.N. & Cloude, S.R., 1999, **The Structure of Oriented Vegetation from Polarimetric Interferometry**, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 37, PP. 2620-2624.
- Treuhaft, R.N., Madsen, S.N., Moghaddam, M. & Zyl, J.J., 1996, **Vegetation Characteristics and Underlying Topography from Interferometric Radar**, Radio Science, 31, PP. 1485-1449.
- Treuhaft, R.N. & Siqueira, P.R., 2000, **Vertical Structure of Vegetated Land Surfaces from Interferometric and Polarimetric Radar**, Radio Science, 35, 141-177.
- Ulaby, F.T., McDonald, K., Sarabandi, K. & Dobson, M.C., 1988, **Michigan Microwave Canopy Scattering Models (MIMICS)**, Proceeding of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), PP. 1009-1009.
- 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.
- Williams, M.L., 2006, **A Coherent, Polarimetric SAR Simulation of Forests for PolSARPro**, Technical Report.
- 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**, Proceeding of IEEE International Workshop on Earth Observation and Remote Sensing Applications (EORSA), PP. 145-150.
- Yamada, H., Yamazaki, M. & Yamaguchi, Y., 2006, **On Scattering Model Decomposition of PolSAR Image and its Application to the ESPRIT-Based Pol-inSAR**, EUSAR.
- Zhang, L., Zou, B., Zhang, J. & Zhang, Y., 2006, **Inversion of Forest Parameters Based on Genetic Algorithm using L-Band Polinsar Data**, Proceeding of IEEE International Conference on Image Processing, PP. 2325-2328.