

# بهبود تخمین ارتفاع جنگل به کمک بهینه‌سازی ماتریس پراکنش به روش تغییر پایه پلاریزاسیون مطالعه موردی: جنگل‌های شمالی سوئد

سیده سمیرا حسینی<sup>۱</sup> حمید عبادی<sup>۲</sup>

یاسر مقصودی<sup>۳</sup>

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۵/۰۷/۰۹

تاریخ دریافت مقاله: ۹۵/۰۵/۱۶

\*\*\*\*\*

## چکیده

در دهه‌های اخیر توجه زیادی به تخمین زیست توده جنگلی شده است. تهیه نقشه‌های جامع و صحیح از زیست توده جنگلی جهت مدل کردن چرخه کربن جهانی و کاهش گازهای گلخانه‌ای از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است. روش‌های قدیمی برای تخمین زیست توده براساس مقادیر بازپراکنش‌ها به کمک آنالیزهای رگرسیون صورت می‌پذیرفت. مشکل اصلی این روش‌ها، سطح اشباع پایین آنها در طول موج‌ها و پلاریزاسیون‌های مختلف بدلیل در نظر نگرفتن پارامترهای ساختاری بود. به کمک تکنیک‌های اینترفرومتری، تحقیقات به سمت استخراج پارامترهای ساختاری سوق پیدا کرد. ارتفاع یکی از پارامترهای ساختاری می‌باشد که جهت تخمین زیست توده جنگلی می‌تواند استفاده شود. بهبود روش‌های بازیابی ارتفاع درختان نقش بسیار مهمی در استخراج صحیح زیست توده جنگلی ایفا می‌کند. در این مقاله یک روش جدید به منظور بهینه‌سازی ماتریس پراکنش به کمک تغییر پایه پلاریزاسیون جهت تخمین ارتفاع معرفی شده است. به کمک تغییر ماتریس پراکنش در پایه پلاریزاسیون‌های مختلف برای هر دو تصویر پایه و پیرو، پارامترهای همبستگی مختلف استخراج شده و با روش‌های مختلف تخمین ارتفاع، ارتفاع درختان تخمین زده شده است. داده‌های مورد بررسی، داده‌های تمام پلاریمتری از سنجنده هوایی SETHI در باند P می‌باشد که در منطقه جنگل‌های شمالی واقع در Remningstorp در جنوب کشور سوئد برداشت شده است. نتایج نشان می‌دهد که روش‌هایی که در آنها تغییر فاز وجود دارد در اثر تغییر پارامترهای هندسی بیضوی، بهبود چشمگیری داشته‌اند بطوری که روش‌های فاز حجم تصادفی بر روی زمین با  $R^2 = 0/76$  و  $RMSE = 3/76$  و تفاضلی مدل رقومی با  $R^2 = -0/69$  بهترین بهبود در نتایج را داشته‌اند و روش وارونگی دامنه همدوسی که با مقدار کوهرنس ارتفاع را استخراج می‌کند، با  $R^2 = 0/17$  بهبود چندانی در نتایج آن ملاحظه نشده است.

واژه‌های کلیدی: اینترفرومتری پلاریمتری، تخمین ارتفاع، ماتریس انتقال، بهینه‌سازی، ماتریس پراکنش

\*\*\*\*\*

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی نقشه برداری- دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی shosseini@mail.kntu.ac.ir

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

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

## ۱- مقدمه

2006; Minh et al., 2016; Praks, Kugler, Papathanassiou, Hajnsek, & Hallikainen, 2007; Schlund, von Poncet, Kuntz, Schmallius, & Hoekman, 2015; Soja & Ulander, 2014). در روش‌های حاضر تخمین ارتفاع از پلاریزاسیون‌های ثابتی استفاده می‌شود. ساده‌ترین روش تخمین ارتفاع، روش تفاضلی مدل رقومی زمین است که همبستگی‌های ورودی آن برای تخمین ارتفاع، همبستگی HV به عنوان همبستگی که فقط سهم جنگلی دارد و همبستگی HH-VV به عنوان همبستگی که سهم زمینی آن غالب است می‌باشد و بر مبنای این دو همبستگی ارتفاع تخمین زده می‌شود (S. R. Cloude & Papathanassiou, 2003; S. R. Cloude & Papathanassiou, 1998) امکان بررسی تمامی حالات پلاریزاسیون ممکن، جهت تخمین ارتفاع می‌تواند موجب بهبود تخمین این پارامتر شود. در این مقاله هدف این است که با تغییر پایه پلاریزاسیون‌های ماتریس‌های پراکنش، امکان استخراج ارتفاع با مقدار همبستگی بیشتر با داده‌های استخراج شده از لایدار فراهم شود. در ادامه ابتدا روش پیشنهادی الگوریتم اجرایی که شامل تغییر پایه پلاریزاسیون و روش‌های تخمین ارتفاع است، توضیح داده شده است. سپس داده‌های مورد استفاده به طور کامل بیان شده‌اند. در قسمت بعد نتایج روش پیشنهادی و مقایسه آن با روش‌های موجود آورده شده و در آخرین بخش نتیجه‌گیری بیان شده است.

## ۲- روش پیشنهادی الگوریتم اجرایی

روش پیشنهادی در این مقاله بهبود تخمین ارتفاع به کمک بهینه‌سازی ماتریس پراکنش به روش تغییر پایه پلاریزاسیون می‌باشد. ماتریس‌های پراکنش بهینه برای دو تصویر پایه و پیرو با تغییر پارامترهای بیضوی (توجیه بیضوی و میزان بیضوی بودن) بدست می‌آیند و سپس جهت تخمین همدوسی‌های بهینه در دو مکانیزم حجمی و سطحی بکار می‌روند.

همدوسی‌های حاصل ورودی تخمین ارتفاع به ۵ روش تفاضلی مدل رقومی، وارونگی دامنه همدوسی، ترکیبی، فاز

زیست توده جنگلی بیانگر یک شاخص مهم از منابع کربن است. تخمین زیست توده جنگلی امکان اندازه‌گیری مستقیم از ذخایر کربن را فراهم می‌آورد (Hyypä et al., 2000; Ketterings, Coe, van Noordwijk, & Palm, 2001; Steininger, 2000) داشتن اطلاعات از توزیع مکانی زیست توده جنگلی یک تصویر جامع از ذخایر کربن در طول یک منطقه را امکان‌پذیر می‌کند، که این مسئله از اهمیت سیاسی و علمی بسیاری برخوردار است (Le Toan & et al., 2011). روش‌های مختلفی برای تخمین زیست توده بکار رفته است. روش‌های سنتی، اندازه‌گیری‌های زمینی می‌باشند که دقیق‌ترین روش‌ها نیز به شمار می‌آیند. اما این روش‌ها معمولاً زمان بر و طاقت فرسا هستند و امکان تهیه نقشه‌هایی با توزیع مکانی پیوسته از زیست توده در مقیاس‌های بزرگ را ندارند. (Brown, 2002; Mutanga, Adam, & Cho, 2012)

سیستم‌های سنجش از دور امکان تخمین زیست توده جنگلی در پوشش‌های زمانی و مکانی بزرگ را فراهم کردند (Avitabile, Herold, Henry, & Schmallius, 2011; Roy & Ravan, 1996) در تخمین زیست توده به کمک تصاویر اپتیک از همبستگی بین اطلاعات طیفی حاصل شده از تصاویر اپتیک و زیست توده برای تخمین زیست توده استفاده می‌شد اما بدلیل پیچیدگی‌های ویژگی‌های ساختاری و در نظر نگرفتن آن در این روش‌ها، نتایج مطلوب حاصل نمی‌شد (Basuki, Skidmore, Hussin, & Van Duren, 2013; Kajisa, Murakami, Mizoue, Top, & Yoshida, 2009; Lu, 2006; Lu et al., 2012) سنجنده‌های راداری با تکنیک‌های اینترفرومتری در پلاریزاسیون‌های مختلف امکان استخراج ارتفاع که یکی از پارامترهای ساختاری می‌باشد را فراهم کردند (Ballester-Berman, Vicente-Guijalba, Lopez-Sanchez, 2015; Chehade, Ferro-Famil, Minh, Le Toan, & Tebaldini, 2015; S. Cloude & Papathanassiou, 2003; Florian, Kostas, Irena, & Dirk, 2006; Hajnsek, Kugler, Lee, & Papathanassiou, 2009; S.-K. Lee, Kugler, Papathanassiou, & Hajnsek, 2008; Mahgoun & Ouazzeddine, 2016; Mette, Kugler, Papathanassiou, & Hajnsek,

## ۲-۲- روش های تخمین ارتفاع

ماتریس پراکنش حاصل از تغییر پایه پلاریزاسیون در هر دو تصویر پایه<sup>۱</sup> و پیرو<sup>۲</sup> جهت تخمین همبستگی استفاده می شود. مقدار همبستگی از رابطه ۵ بدست می آید. (S. R. Cloude & Papathanassiou, 1998)

$$\gamma = \frac{(S_1 S_2^*)}{|S_1| |S_2|} \quad (5)$$

با داشتن همبستگی در پایه پلاریزاسیون های مختلف امکان استخراج ارتفاع به روش های مختلف که در ادامه توضیح داده می شود فراهم می گردد.

## ۲-۲-۱- روش تفاضلی مدل رقومی<sup>۳</sup>

در روشی که توسط Cloud & Papathanassiou در سال ۱۹۹۸ مطرح شد (S. R. Cloude & Papathanassiou, 1998) ارتفاع از طریق تفاضل فاز بین تداخل نماها قابل محاسبه است که با رابطه ۶ نشان داده شده است.

$$h_v = \frac{\arg(\gamma_{w_v}) - \arg(\gamma_{w_s})}{k_z}, \quad k_z = \frac{4\pi\Delta\theta}{\lambda \sin \theta} \quad (6)$$

در این رابطه  $k_z$  عدد موج عمودی،  $\Delta\theta$  زاویه ای است که دو انتهای خط باز با هم می سازند  $\theta$  زاویه فرود و  $\lambda$  طول موج است،  $\phi$  فاز زمینی،  $\gamma_{w_v}$  همبستگی حجمی و  $\gamma_{w_s}$  همبستگی سطحی می باشد. به این روش همچنین روش تفاضل گیری مدل ارتفاعی رقومی نیز می گویند، مزیت این روش جنبه محاسباتی ساده آن است.

## ۲-۲-۲- روش وارونگی دامنه همدوسی<sup>۴</sup>

در این روش پلاریزاسیون HV به عنوان پلاریزاسیونی که هیچ سهمی از زمین را در خود ندارد و فقط سهم پراکنش حجمی را شامل می شود در نظر گرفته می شود، همچنین در این روش میرایی را معلوم و صفر در نظر می گیرند و به تابع SINC می رسند و با رابطه ۷ ارتفاع را تخمین می زنند. (S. R. Cloude, 2006)

حجم تصادفی بر روی زمین و حجم تصادفی بر روی زمین قرار می گیرند و میزان بهبود تخمین ارتفاع با روشی که در آنها بهینه سازی ماتریس پراکنش صورت نگرفته است مورد بررسی قرار می گیرد. بنابراین در قسمت اول این بخش، روش تغییر پایه پلاریزاسیون ماتریس پراکنش بیان شده و سپس روش های تخمین ارتفاعی که در این مقاله استفاده شده توضیح داده شده است.

## ۲-۱- تغییر پایه پلاریزاسیون

با اخذ داده های راداری در ترکیب های پلاریزاسیون ارسال و دریافتی متفاوت می توان ۴ ضریب پراکنش SHH، SHV، SVH و SVV را ایجاد کرد و ماتریس پراکنش S را تشکیل داد. V پلاریزاسیون عمودی و H پلاریزاسیون افقی می باشد. ماتریس پراکنش در رابطه ۱ نشان داده شده است. (J.-S. Lee & Pottier, 2009).

$$S = \begin{bmatrix} S_{HH} & S_{HV} \\ S_{VH} & S_{VV} \end{bmatrix} \quad (1)$$

با داشتن بازپراکنش در پایه پلاریزاسیون افقی و عمودی می توان به کمک ماتریس انتقال که تابعی از پارامترهای هندسی بیضوی (توجیه بیضوی  $\phi$  و میزان بیضوی بودن  $\tau$ ) می باشد مقدار بازپراکنش در پایه های مختلف را به دست آورد. ماتریس انتقال از رابطه ۲ بدست می آید (De Grandi, Lee, Schuler, & Nezry, 2003).

$$[U] = \frac{1}{\sqrt{1+\rho\rho^*}} \begin{bmatrix} 1 & -\rho^* \\ \rho & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

علامت \* بیانگر مزدوج مختلط است  $\rho$  از رابطه ۳ قابل محاسبه است.

$$\rho = \frac{\cos(2\tau)\sin(2\phi) + i\sin(2\tau)}{1 + \cos(2\tau)\cos(2\phi)} \quad (3)$$

در این رابطه  $\phi$  توجیه بیضوی و  $\tau$  میزان بیضوی بودن را بیان می کند.

ماتریس پراکنش در پایه پلاریزاسیون جدید از رابطه ۴ بدست می آید (De Grandi et al., 2003).

$$S' = U^T S U \quad (4)$$

T علامت ترانواده است.

1- Master

2- Slave

3- DEM Difference Method

4- Coherence Amplitude Inversion Method

پارامترهای ورودی این تخمین، دو پارامتر همبستگی حجمی و همبستگی سطحی می‌باشند. تخمین فاز زمینی به کمک این دو پارامتر در رابطه ۹ نشان داده شده است (S. R. Cloude, 2006).

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

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

$$A = |\gamma_{w_s}|^2 - 1, B = 2 \operatorname{Re}((\tilde{\gamma}_{w_v} - \tilde{\gamma}_{w_s})\tilde{\gamma}_{w_s}^*)$$

$$C = |\tilde{\gamma}_{w_v} - \tilde{\gamma}_{w_s}|^2 \quad (9)$$

در این رابطه همبستگی حجمی و همبستگی سطحی می‌باشد. به کمک فاز زمینی استخراج شده، ارتفاع طبق رابطه ۱۰ بدست می‌آید.

$$h_v = \frac{\arg(\gamma_{w_v}) - \hat{\phi}}{k_z} \quad (10)$$

در این روش، همبستگی HV به عنوان همبستگی حجمی و همبستگی HH-VV به عنوان همبستگی سطحی در نظر گرفته می‌شود.

### ۲-۲-۵- روش وارونگی حجم تصادفی بروی زمین<sup>۳</sup>

این روش از دو قسمت تشکیل شده است، قسمت اول معادله ۱۰ یا تخمین ارتفاع به روش وارونگی فاز حجم تصادفی بروی زمین است و قسمت دوم معادله ۷ یا روش وارونگی دامنه همدوسی می‌باشد. این معادله در رابطه ۱۱ نشان داده شده است.

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

$$, k_z = \frac{4\pi\Delta\theta}{\lambda \sin \theta} \quad (11)$$

در این رابطه  $k_z$  عدد موج عمودی،  $\Delta\theta$  زاویه‌ای است که دو انتهای خط باز با هم می‌سازند،  $\theta$  زاویه فرود،  $\lambda$  طول موج،  $\phi$  فاز زمینی و  $\gamma_{w_v}$  همبستگی حجمی می‌باشد.  $\varepsilon$  پارامتری است که بطور تجربی بدست می‌آید.

$$h_v = \frac{2 \sin c^{-1}(|\tilde{\gamma}_{w_v}|)}{k_z}, k_z = \frac{4\pi\Delta\theta}{\lambda \sin \theta} \quad (7)$$

در این رابطه  $k_z$  عدد موج عمودی،  $\Delta\theta$  زاویه‌ای است که دو انتهای خط باز با هم می‌سازند،  $\theta$  زاویه فرود،  $\lambda$  طول موج و  $\gamma_{w_v}$  همبستگی حجمی می‌باشد.

### ۲-۲-۳- روش وارونگی ترکیبی<sup>۱</sup>

Cloud در سال ۲۰۰۶ الگوریتم جدیدی را پیشنهاد داد که تحت عنوان روش ترکیبی شناخته می‌شود و از دو قسمت تشکیل شده است، قسمت اول معادله ۶ یا همان روش تفاضلی مدل رقومی است و فقط اختلاف فاز بین کانال حجمی و فاز زمینی را شامل می‌شود و قسمت دوم همان معادله ۷ یا روش وارونگی دامنه همدوسی است. این معادله در رابطه ۸ نشان داده شده است (S. R. Cloude, 2006).

$$h_v = \frac{\arg(\gamma_{w_v}) - \arg(\gamma_{w_s})}{k_z} + \varepsilon \frac{2 \sin c^{-1}(|\tilde{\gamma}_{w_v}|)}{k_z} \quad (8)$$

$$, k_z = \frac{4\pi\Delta\theta}{\lambda \sin \theta}$$

در این رابطه  $k_z$  عدد موج عمودی،  $\Delta\theta$  زاویه‌ای است که دو انتهای خط باز با هم می‌سازند،  $\theta$  زاویه فرود،  $\lambda$  طول موج،  $\gamma_{w_v}$  همبستگی حجمی و  $\gamma_{w_s}$  همبستگی سطحی می‌باشد.  $\varepsilon$  پارامتری است که بطور تجربی بدست می‌آید.

### ۲-۲-۴- روش وارونگی فاز حجم تصادفی بروی زمین<sup>۲</sup>

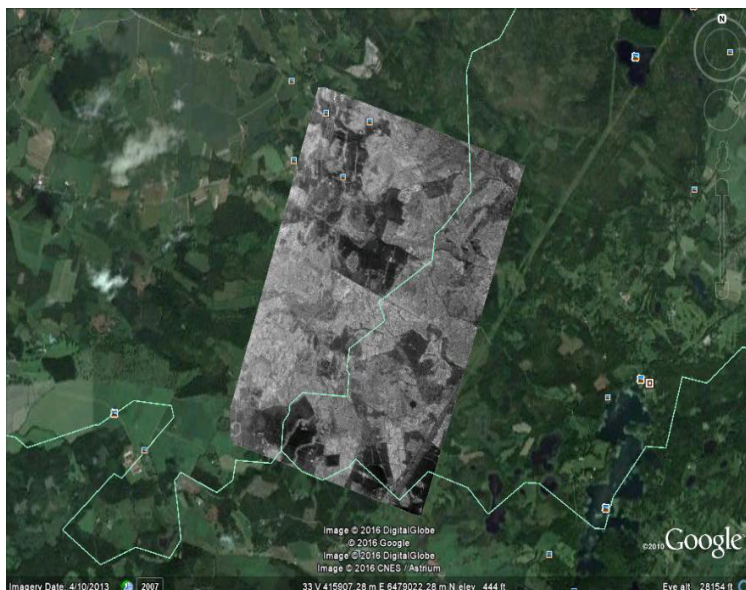
بجای آنکه مطابق روش تفاضلی مدل رقومی، فاز زمینی را از فاز حاصل از همبستگی سطحی بدست آورند، در این روشبه کمک یک مدل بازپراکنش دولایه که مدل حجم تصادفی بروی زمین نامیده می‌شود فاز زمینی را استخراج می‌کنند.

1- Combined Inversion Method

2- Random Volume Over Ground Phase Inversion Method

3- Random Volume Over Ground Inversion Method

فصلنامه علمی - پژوهشی اطلاعات جغرافیایی (پژ) / ۳۷ / ... بهیمنه سازی



(ب)



(الف)

نگاره ۱- (الف) موقعیت جغرافیای منطقه (ب) تصویر ژئورفرنس شده بر روی گوگل ارث

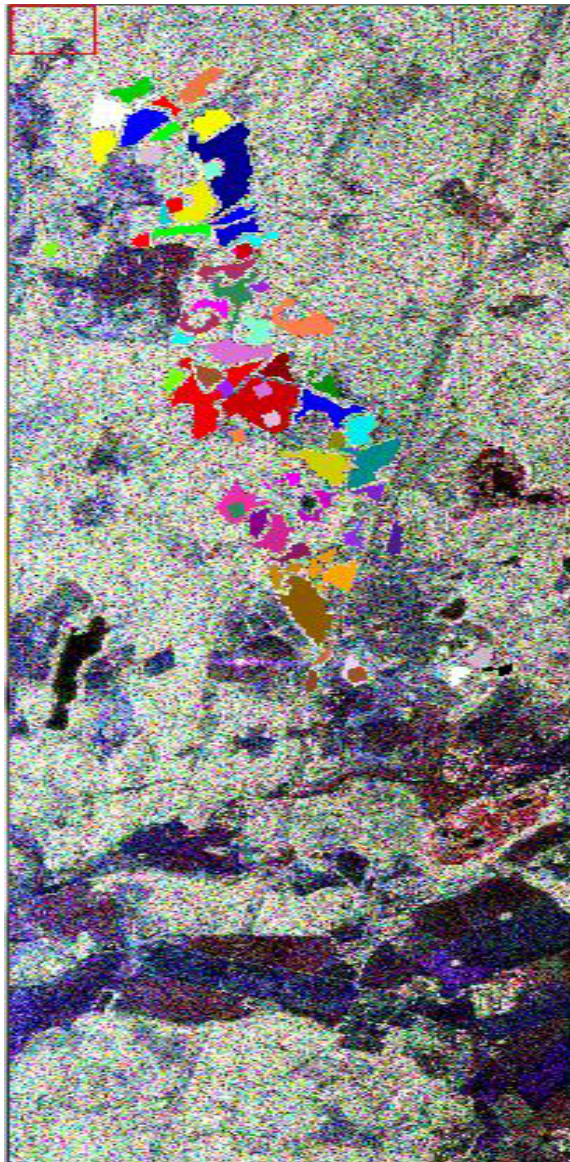


نگاره ۲- تصاویری از ایستگاه‌های جنگلی مختلف در Remningstorp

این منطقه شامل بیش از ۱۲۰۰ هکتار منطقه جنگلی حفاظت شده است. انواع گونه‌های غالب این منطقه شامل صنوبر نروژی، کاج اسکاتلندی و توس می‌باشد. نگاره ۲ تصاویری از ایستگاه‌های جنگلی مختلف در Remningstorp را نشان می‌دهد. این منطقه، منطقه‌ای نسبتاً مسطح است و تغییرات

۳- منطقه مورد مطالعه و داده‌های مورد استفاده منطقه Remningstorp در قسمت جنوبی سوئد با طول و عرض جغرافیایی (۵۸°۲۸' شمالی، ۱۳°۳۸' شرقی) واقع شده است. موقعیت جغرافیایی این منطقه و تصویر ژئورفرنس شده بر روی گوگل ارث در نگاره ۱ نشان داده شده است.

زده شده است. پیش پردازش‌های لازم که بر روی تصاویر تمام پلاریمتری از سنجنده هوایی SETHI در باند P صورت گرفته است، شامل ریجستردن و تصحیح اثر زمین مسطح می‌باشد که توسط نرم‌افزار PolSARPro انجام شده است. تصویر پلاریمتری در پایه پاولی که ایستگاه‌های جنگلی بر روی آن تصویر شده‌اند در نگاره ۳ نشان داده شده است.



نگاره ۳: تصویر پلاریمتری در پایه پاولی، محل ایستگاه‌های جنگلی بر روی تصویر نشان داده شده است (فرمز HH-VV=، سبز HV=، آبی HH+VV=)

ارتفاعی آن بین ۱۲۰ تا ۱۴۵ متر بالای سطح متوسط دریاها می‌باشد. ارتفاع درختان منطقه بین ۵ تا ۳۵ متر و مقدار زیست توده بین ۵۰ تا ۳۰۰ تن بر هکتار است.

تصاویر مورد استفاده، تصاویر هوایی اخذ شده توسط سنجنده SETHI می‌باشد که در باندهای L و P به صورت تمام پلاریزه برداشت شده‌اند. محدوده سیگنال در باند P بین ۲۲۰-۴۶۰ مگاهرتز و در باند L بین ۱۴۰۰-۱۲۵۰ مگاهرتز می‌باشد، همچنین ارتفاع پرواز ۴ کیلومتر از سطح زمین است. قدرت تفکیک برای باند L در راستای آزیموت ۰/۹۲ متر و در راستای رنج نیز ۰/۹۲ متر و برای باند P در راستای آزیموت ۰/۷۹ متر و در راستای رنج ۰/۷۸ متر می‌باشد. اطلاعات پارامترهای سنجنده SETHI در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱: مشخصات سنجنده

پارامترهای سنجنده	باند P	باند L
ارتفاع پرواز (بر حسب متر)	۳۹۶۲	۳۹۶۲
نرخ نمونه برداری (مگاهرتز)	۵۰۰	۵۰۰
پهنای باند (مگاهرتز)	۲۶۰-۴۶۰	۱۲۵۰-۱۴۰۰
رزولوشن در راستای رنج (بر حسب متر)	۰/۷۸	۰/۹۲
رزولوشن در راستای آزیموت (بر حسب متر)	۰/۷۹	۰/۹۲
تعداد پیکسل‌ها در رنج	۷۲۵۱	۲۶۰۰
زاویه فرود (بر حسب درجه)	۲۴-۶۲	۲۴-۴۷

#### ۴- نتایج اجرایی الگوریتم پیشنهادی

همانطور که در قسمت روش پیشنهادی اشاره شد در این مقاله به منظور تخمین ارتفاع، ابتدا ماتریس‌های پراکنش حاصل از تغییر پارامترهای توجیه بیضوی و میزان بیضوی بودن در پایه پلاریزاسیون‌های جدید را استخراج کرده و سپس با ۵ روش بازیابی ارتفاع با تکنیک اینترفرومتری پلاریمتری که شامل وارونگی دامنه همدوسی، تفاضلی مدل رقومی، فاز حجم تصادفی بر روی زمین، ترکیبی و حجم تصادفی بر روی زمین است، ارتفاع درختان تخمین

جدول ۲- مقادیر ضریب همبستگی و خطای جذر میانگین مربعات روش‌های مختلف بازایی ارتفاع درختان قبل از تغییر پایه پلاریزاسیون

روش بکاررفته در تخمین ارتفاع	تفاضلی مدل رقومی	وارونگی دامنه همدوسی	ترکیبی	فاز حجم تصادفی بر روی زمین	حجم تصادفی بر روی زمین
R <sup>2</sup>	۰/۴۹	۰/۱۰	۰/۳۷	۰/۰۸	۰/۱۴
RMSE(بر حسب متر)	۸/۸۸	۳۰/۳۶	۶/۳۸	۵/۶۹	۱۰/۵۰

شده در هر ایستگاه جنگلی محاسبه شده و بعنوان ارتفاع آن ایستگاه جنگلی در نظر گرفته شده است. ضریب همبستگی R<sup>2</sup> و خطای جذر میانگین مربعات (RMSE) به عنوان شاخص آماری برای ارزیابی صحت روش- های بازایی ارتفاع تخمین زده شده بر حسب داده‌های لایدار مورد استفاده قرار گرفتند.

نتایج اجرایی روش‌های بازایی ارتفاع درختان توسط ۵ روش بازایی اشاره شده قبل از تغییر پایه پلاریزاسیون در جدول ۲ ارائه شده است که مقدار  $\epsilon$  بکار رفته، ۰/۳ است. همچنین نمودار همبستگی بین ارتفاع استخراج شده به کمک روش‌های بازایی ارتفاع قبل از تغییر پایه پلاریزاسیون بر حسب ارتفاع حاصل از لایدار در نگاره ۴ نمایش داده شده است.

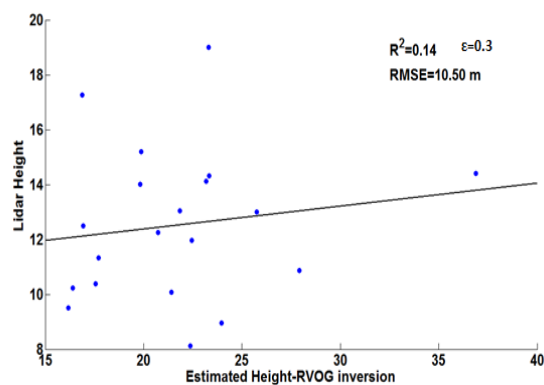
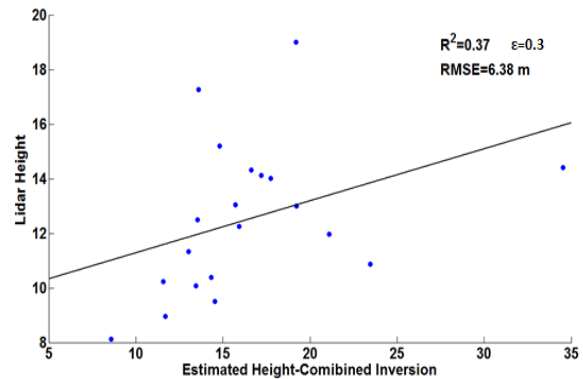
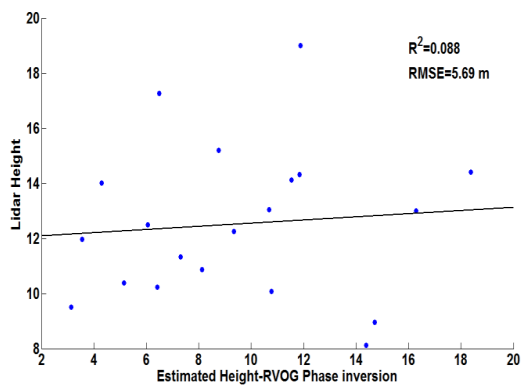
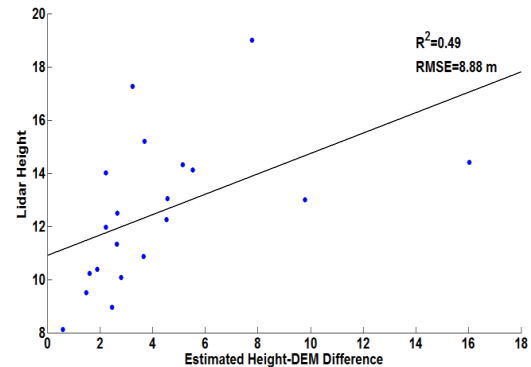
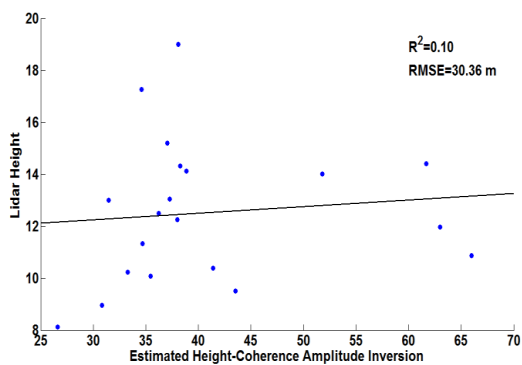
همانطور که ملاحظه می‌شود ضریب همبستگی بین ارتفاع‌های تخمین زده شده به روش‌های وارونگی دامنه همدوسی، فاز حجم تصادفی بر روی زمین و حجم تصادفی بر روی زمین بسیار پایین (کمتر از ۰/۲) می‌باشد و دو روش تفاضلی مدل رقومی و ترکیبی، ضریب همبستگی بهتری نسبت به ۳ روش قبلی دارند ولی با این حال مقادیر همبستگی آنها پایین است.

مقادیر ارتفاعی تخمین زده شده به روش تفاضلی مدل رقومی خیلی کمتر از مقادیر ارتفاعی حاصل از داده‌های لایدار شده است که علت آن محل مرکز فاز حجمی می- باشد که پایین تر از نوک درختان قرار گرفته است. همچنین خطای جذر میانگین مربعات حاصل از روش وارونگی دامنه همدوسی بالا می‌باشد که یکی از دلایل آن عدم همبستگی زمانی می‌تواند باشد که منجر به کاهش پارامتر همبستگی حجمی می‌شود و با توجه به آنکه در رابطه روش وارونگی

جدول ۳- مقادیر ضریب همبستگی و خطای جذر میانگین مربعات روش‌های ترکیبی و حجم تصادفی بر روی زمین جهت بازایی ارتفاع درختان قبل از تغییر پایه پلاریزاسیون به ازای مقادیر مختلف  $\epsilon$

مقادیر مختلف $\epsilon$	روش ترکیبی	روش حجم تصادفی بر روی زمین
$\epsilon = 0.1$	R <sup>2</sup> = -0.46 RMSE(m) = - 5.51	R <sup>2</sup> = 0.11 RMSE(m) = 4.75
$\epsilon = 0.2$	R <sup>2</sup> = 0.42 RMSE(m) = 4.20	R <sup>2</sup> = 0.14 RMSE(m) = 6.97
$\epsilon = 0.3$	R <sup>2</sup> = 0.37 RMSE(m) = 6.38	R <sup>2</sup> = 0.14 RMSE(m) = 10.50
$\epsilon = 0.4$	R <sup>2</sup> = 0.34 RMSE(m) = 9.97	R <sup>2</sup> = 0.15 RMSE(m) = 14.41
$\epsilon = 0.5$	R <sup>2</sup> = 0.31 RMSE(m) = 13.93	R <sup>2</sup> = 0.15 RMSE(m) = 18.46
$\epsilon = 0.6$	R <sup>2</sup> = 0.28 RMSE(m) = 18.01	R <sup>2</sup> = 0.14 RMSE(m) = 22.58
$\epsilon = 0.7$	R <sup>2</sup> = 0.26 RMSE(m) = 22.14	R <sup>2</sup> = 0.14 RMSE(m) = 26.73
$\epsilon = 0.8$	R <sup>2</sup> = 0.25 RMSE(m) = 26.31	R <sup>2</sup> = 0.14 RMSE(m) = 30.91
$\epsilon = 0.9$	R <sup>2</sup> = 0.23 RMSE(m) = 30.49	R <sup>2</sup> = 0.13 RMSE(m) = 35.09

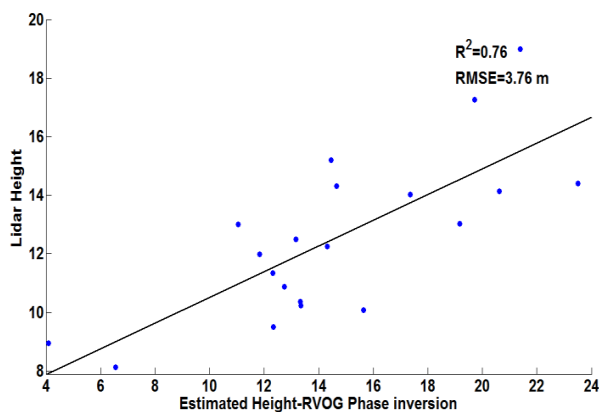
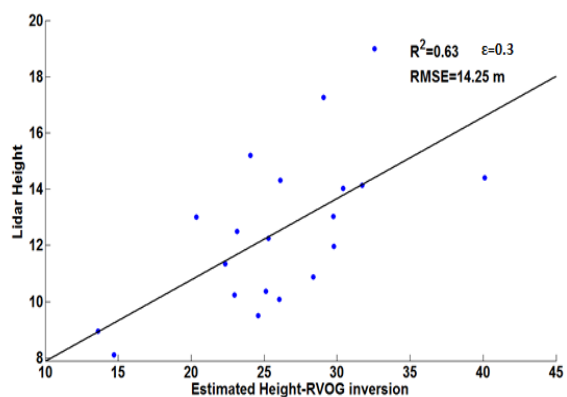
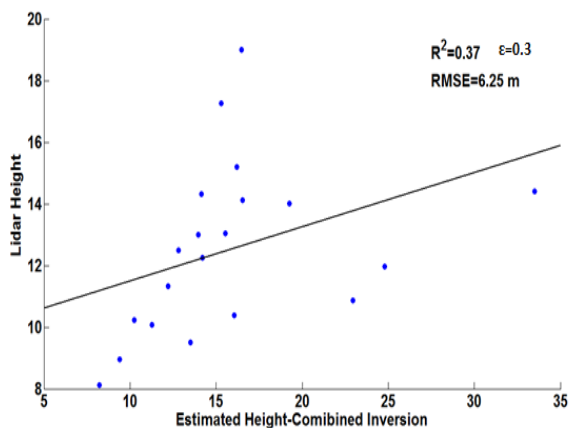
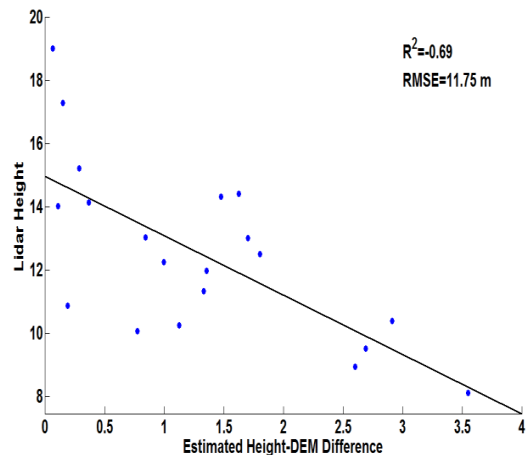
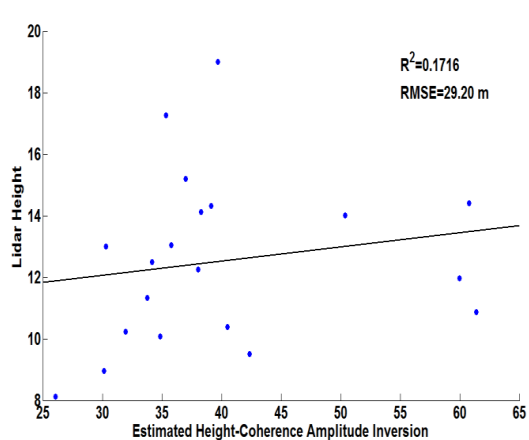
صحت تخمین ارتفاع درختان در سطح ایستگاه‌های جنگلی مورد بررسی قرار گرفته است. جهت تخمین ارتفاع درختان به کمک مدل‌های بازایی ارتفاع در سطح ایستگاه‌های جنگلی، متوسط ارتفاع درختان برای تمام پیکسل‌های واقع



نگاره ۴: نمودار همبستگی بین ارتفاع استخراج شده به کمک روش‌های بازیابی ارتفاع بر حسب ارتفاع حاصل از لایدار قبل از تغییر پایه پلاریزاسیون

دامنه همدوسی این پارامتر ورودی تابع SINC است و تابع SINC به ازای مقادیر کمتر، خروجی بیشتری را می‌دهد. منجر به نتایج ارتفاعی بیشتر از مقدار واقعی‌شان شده است. مقدار  $\epsilon$  از ۰/۱ تا ۰/۹ برای تخمین ارتفاع در دو حالت ترکیبی و مدل تصادفی حجمی بر روی زمین تغییر داده شده و مقادیر ارتفاع حاصل در جدول ۳ نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود در تخمین ارتفاع به روش ترکیبی هر چه مقدار  $\epsilon$  بیشتر می‌شود همبستگی ارتفاع





نگاره ۵: نمودار همبستگی بین ارتفاع استخراج شده به کمک روش‌های بازیابی ارتفاع بر حسب ارتفاع حاصل از لایدار بعد از تغییر پایه پلاریزاسیون

با زیست توده کاهش می‌یابد زیرا در این روش که از دو قسمت تشکیل شده است قسمت اول آن که روش تفاضلی مدل رقومی است با زیست توده همبستگی بالایی دارد ولی قسمت دوم آن که روش توده کم است و از آنجا که  $\epsilon$  ضریب قسمت دوم این رابطه می‌باشد با افزایش آن، سهم وارونگی

جدول ۴: مقادیر بهینه پارامترهای بیضوی در روش‌های مختلف تخمین ارتفاع

حجم تصادفی بر روی زمین	فاز حجم تصادفی بر روی زمین	ترکیبی	وارونگی دامنه همدوسی	تفاضلی مدل رقومی	روش بکاررفته در تخمین ارتفاع
۸۵	۱۴۶	۱۲۴	۱۱۸	۵۵	$\rho$ (بر حسب درجه)
-۲۳	۲۶	-۱۴	-۲۰	-۲۶	$\tau$ (بر حسب درجه)

جدول ۵: مقادیر ضریب همبستگی و خطای جذر میانگین مربعات روش‌های مختلف بازیابی ارتفاع درختان بعد از تغییر پایه

پلاریزاسیون

حجم تصادفی بر روی زمین	فاز حجم تصادفی بر روی زمین	ترکیبی	وارونگی دامنه همدوسی	تفاضلی مدل رقومی	روش بکاررفته در تخمین ارتفاع
۰/۶۳	۰/۷۶	۰/۳۷	۰/۱۷	-۰/۶۹	R2
۱۴/۲۵	۳/۷۶	۶/۲۵	۲۹/۲۰	۱۱/۷۵	RMSE (بر حسب متر)

همانطور که از نتایج مشاهده می‌شود، بهترین نتیجه را روش فاز مدل حجم تصادفی بر روی زمین داشته که میزان  $R2=0/76$  و  $RMSE = 3/76$  بوده است. بعد از آن روش تفاضلی مدل رقومی بیشترین مقدار همبستگی را با  $R2=-0/69$  داشته است. نتایج نشان می‌دهد روش‌هایی که در آنها تغییر فاز وجود دارد در اثر تغییر پارامترهای توجیه بیضوی و میزان بیضویت در ماتریس انتقال و استخراج ارتفاع به کمک ماتریس‌های پراکنش جدید، بهبود چشمگیری داشته‌اند.

به عبارتی روش‌های تفاضلی مدل رقومی و فاز حجم تصادفی بر روی زمین به میزان قابل توجهی بهبود داشته‌اند ولی روش وارونگی دامنه همدوسی که از اندازه همدوسی بدست می‌آید بهبود چندانی نداشته است.

۵- نتیجه‌گیری

تخمین ارتفاع با روش‌های مختلف موجود بر اساس پارامترهای همبستگی حاصل شده از پلاریزاسیون‌های ثابتی صورت می‌گیرد. در این مقاله با تغییر پارامترهای هندسی بیضوی، ماتریس پراکنش در پایه پلاریزاسیون‌های مختلف استخراج شد و با محاسبه پارامتر همبستگی برای تصاویر پایه و پیرو از ماتریس‌های پراکنش حاصل، ارتفاع درختان به روش مختلف تخمین زده شد.

دامنه همدوسی بیشتر می‌شود و به همین دلیل افزایش  $\varepsilon$ ، همبستگی تخمین ارتفاع به روش ترکیبی بر حسب ارتفاع استخراج شده از لایدار را کاهش می‌دهد در روش مدل تصادفی حجمی بر روی زمین بیشترین مقدار همبستگی تخمین ارتفاع به کمک این روش بر حسب ارتفاع لایدار به ازای  $\varepsilon = 0/4$  و  $\varepsilon = 0/5$  بدست می‌آید.

با تغییر دو پارامتر توجیه بیضوی و میزان بیضویت در ماتریس انتقال و اعمال آن بر روی ماتریس پراکنش، ماتریس‌های پراکنش جدید حاصل شدند. ماتریس‌های حاصل برای تخمین ارتفاع به ۵ روش اشاره شده بکار رفتند. مقادیر بهینه پارامترهای بیضوی در روش‌های مختلف تخمین ارتفاع در جدول ۴ ارائه شده است.

جدول ۵ تخمین ارتفاع به کمک این روش‌ها بعد از تغییر پایه پلاریزاسیون را نشان می‌دهد. همچنین نمودار همبستگی بین ارتفاع استخراج شده به ۵ روش وارونگی دامنه همدوسی، تفاضلی مدل رقومی، ترکیبی، حجم تصادفی بر روی زمین، فاز حجم تصادفی بر روی زمین بر حسب ارتفاع حاصل از لایدار بعد از تغییر پایه پلاریزاسیون در نگاره ۵ نشان داده شده است. مقدار  $\varepsilon$  بکاررفته برای تخمین روش‌های ترکیبی و حجم تصادفی بر روی زمین ۰/۳ می‌باشد.

Paper presented at the POLinSAR 2015 Workshop.

6- Cloude, S., & Papathanassiou, K. (2003). Three-stage inversion process for polarimetric SAR interferometry. IEE Proceedings-Radar, Sonar and Navigation, 150(3), 125-134.

7- Cloude, S. R. (2006). Polarization coherence tomography. Radio Science, 41(4).

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

9- De Grandi, G., Lee, J.-S., Schuler, D., & Nezry, E. (2003). Texture and speckle statistics in polarimetric SAR synthesized images. Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on, 41(9), 2070-2088.

10- Florian, K., Kostas, P., Irena, H., & Dirk, H. (2006). Forest height estimation in tropical rain forest using Pol-InSAR techniques. Paper presented at the 2006 IEEE International Symposium on Geoscience and Remote Sensing.

11- Hajnsek, I., Kugler, F., Lee, S.-K., & Papathanassiou, K. P. (2009). Tropical-forest-parameter estimation by means of Pol-InSAR: The INDREX-II campaign. IEEE transactions on Geoscience and Remote Sensing, 47(2), 481-493.

12- Hyyppä, J., Hyyppä, H., Inkinen, M., Engdahl, M., Linko, S., & Zhu, Y.-H. (2000). Accuracy comparison of various remote sensing data sources in the retrieval of forest stand attributes. Forest Ecology and Management, 128(1), 109-120.

13- Kajisa, T., Murakami, T., Mizoue, N., Top, N., & Yoshida, S. (2009). Object-based forest biomass estimation using Landsat ETM+ in Kampong Thom Province, Cambodia. Journal of Forest Research, 14(4), 203-211.

14- Ketterings, Q. M., Coe, R., van Noordwijk, M., & Palm, C. A. (2001). Reducing uncertainty in the use of allometric biomass equations for predicting above-ground tree biomass in mixed secondary forests. Forest Ecology and management, 146(1), 199-209.

15- Le Toan, T., Quegan, S., Davidson, M., Balzter, H., Paillou, P., Papathanassiou, K., . . . Shugart, H. (2011). The BIOMASS mission: Mapping global forest biomass

نتایج تخمین ارتفاع که بر روی داده‌های تمام پلاریمتری از سنجنده SETHI در منطقه Remningstorp در سطح ایستگاه‌های جنگلی صورت گرفت بیانگر آن هستند. که با تغییر پارامترهای هندسی بیضوی و استخراج ماتریس پراکنش در پایه پلاریزاسیون جدید، روش‌های تخمین ارتفاع که با ماتریس پراکنش جدید حاصل می‌شوند بهبود قابل ملاحظه‌ای داشته‌اند.

بهترین نتایج به کمک دو روش فاز حجم تصادفی بر روی زمین و تفاضلی مدل رقومی بدست آمده است بطوری که روش فاز حجم تصادفی بر روی زمین با ضریب همبستگی  $R^2=0.76$  و تفاضلی مدل رقومی با  $R^2=-0.69$  بیشترین مقدار ضریب همبستگی را در بین نتایج داشته‌اند. روش وارونگی دامنه همدوسی که تنها پارامتر ورودی آن برای تخمین ارتفاع اندازه همدوسی می‌باشد، کمترین بهبود را در بین نتایج داشته است.

## منابع و مأخذ

- 1- Avitabile, V., Herold, M., Henry, M., & Schmullius, C. (2011). Mapping biomass with remote sensing: a comparison of methods for the case study of Uganda. Carbon Balance and Management, 6(1), 1.
- 2- Ballester-Berman, J. D., Vicente-Guijalba, F., & Lopez-Sanchez, J. M. (2015). A simple RVoG test for PolInSAR data. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 8(3), 1028-1040.
- 3- Basuki, T. M., Skidmore, A. K., Hussin, Y. A., & Van Duren, I. (2013). Estimating tropical forest biomass more accurately by integrating ALOS PALSAR and Landsat-7 ETM+ data. International Journal of Remote Sensing, 34(13), 4871-4888.
- 4- Brown, S. (2002). Measuring carbon in forests: current status and future challenges. Environmental pollution, 116(3), 363-372.
- 5- Chegade, B. E. H., Ferro-Famil, L., Minh, D. H. T., Le Toan, T., & Tebaldini, S. (2015). Tropical Forest Biomass Retrieval using P-Band PolTomSAR Data.

- Geoscience and remote sensing letters, 4(3), 466-470.
- 25- Roy, P., & Ravan, S. A. (1996). Biomass estimation using satellite remote sensing data—an investigation on possible approaches for natural forest. *Journal of Biosciences*, 21(4), 535-561.
- 26- Schlund, M., von Poncet, F., Kuntz, S., Schmillius, C., & Hoekman, D. H. (2015). TanDEM-X data for aboveground biomass retrieval in a tropical peat swamp forest. *Remote sensing of environment*, 158, 255-266.
- 27- Soja, M. J., & Ulander, L. M. (2014). Polarimetric-interferometric boreal forest scattering model for BIOMASS end-to-end simulator. Paper presented at the 2014 IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium.
- 28- Steininger, M. (2000). Satellite estimation of tropical secondary forest above-ground biomass: data from Brazil and Bolivia. *International Journal of Remote Sensing*, 21(6-7), 1139-1157.
- to better understand the terrestrial carbon cycle. *Remote sensing of environment*, 115(11), 2850-2860.
- 16- Lee, J.-S., & Pottier, E. (2009). *Polarimetric radar imaging: from basics to applications*: CRC press.
- 17- Lee, S.-K., Kugler, F., Papathanassiou, K. P., & Hajnsek, I. (2008). Quantifying temporal decorrelation over boreal forest at L-and P-band. Paper presented at the Synthetic Aperture Radar (EUSAR), 2008 7th European Conference on.
- 18- Lu, D. (2006). The potential and challenge of remote sensing based biomass estimation. *International Journal of Remote Sensing*, 27(7), 1297-1328.
- 19- Lu, D., Chen, Q., Wang, G., Moran, E., Batistella, M., Zhang, M., . . . Saah, D. (2012). Aboveground forest biomass estimation with Landsat and LiDAR data and uncertainty analysis of the estimates. *International Journal of Forestry Research*, 2012.
- 20- Mahgoun, H., & Ouarzeddine, M. (2016). Volume Height Estimation based on Fusion of Discrete Fourier Transform (DFT) and Least Square (LS) in a Tomographic SAR Application. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 1-12.
- 21- Mette, T., Kugler, F., Papathanassiou, K., & Hajnsek, I. (2006). Forest and the random volume over ground-nature and effect of 3 possible error types. Paper presented at the European Conference on Synthetic Aperture Radar (EUSAR).
- 22- Minh, D. H. T., Le Toan, T., Rocca, F., Tebaldini, S., Villard, L., Réjou-Méchain, M., . . . Scipal, K. (2016). SAR tomography for the retrieval of forest biomass and height: Cross-validation at two tropical forest sites in French Guiana. *Remote sensing of environment*, 175, 138-147.
- 23- Mutanga, O., Adam, E., & Cho, M. A. (2012). High density biomass estimation for wetland vegetation using WorldView-2 imagery and random forest regression algorithm. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 18, 399-406.
- 24- Praks, J., Kugler, F., Papathanassiou, K. P., Hajnsek, I., & Hallikainen, M. (2007). Height estimation of boreal forest: Interferometric model-based inversion at L-and X-band versus HUTSCAT profiling scatterometer. *IEEE*