

ارزیابی کارایی روش‌های محلی و غیر محلی در برآورد ماتریس کوواریانس تداخل سنجی سری تصاویر راداری و تخمین ارتفاع مؤلفه‌های اصلی با روش بیشینه احتمال

رقیه زمانی^{۱*}، مسعود مشهدی حسینعلی^۲

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد ژئودزی - دانشکده مهندسی نقشه‌برداری - دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی
zamani@email.kntu.ac.ir

^۲ دانشیار دانشکده مهندسی نقشه‌برداری - دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی
hossainali@kntu.ac.ir

(تاریخ دریافت تیر ۱۳۹۸، تاریخ تصویب اردیبهشت ۱۳۹۹)

چکیده

امروزه تهیه مدل‌های ارتفاعی رقومی و اطلاعات دقیق از ساختار ارتفاعی، به‌عنوان عنصری اصلی در ارزیابی پارامترهای منطقه مورد مطالعه به شمار می‌آید. توصیف و شناسایی پراکنش گرهای حجمی در مناطق شهری، همچون ساختمان‌ها و سایر عوارض، اهمیت ویژه‌ای در حوزه‌های مدیریتی، کاهش خسارات ناشی از سوانح طبیعی همچون زلزله، فرسایش عوارض و بررسی میزان تغییرات دارد. روش‌های تداخل سنجی که مبنای آن‌ها استفاده از سری تصاویر ماکروویو راداری است دارای دقت به مراتب بالاتری نسبت به تداخل سنجی کلاسیک، در بحث تهیه مدل‌های ارتفاعی رقومی و بررسی تغییرات هستند. قابلیت اصلی این روش‌ها، تخمین دقیق ماتریس کوواریانس بین داده‌های مشاهداتی است که امکان بهبود دقت نتایج تداخل سنجی را فراهم می‌آورد. از این رو در این مقاله به بررسی اثر تخمین بهینه ماتریس کوواریانس داده‌های راداری پرداخته شده است. برای این منظور ماتریس کوواریانس بر اساس انتخاب پیکسل‌های همسایه در روش‌های محلی همچون Boxcar و انتخاب پیکسل‌های غیر همسایه در روش‌های غیر محلی همچون NLSAR تخمین زده شده است و نتایج حاصل از آن‌ها بر روی سری تصاویر راداری تهیه‌شده از استادیوم Angondjé واقع در کشور گابن مورد آنالیز و مقایسه قرار گرفته است. میانگین ارتفاع برآورد شده استادیوم با به‌کارگیری نتایج روش Boxcar و NLSAR، به ترتیب $41/100$ متر و $42/5400$ تعیین شده که مقایسه آن با ارتفاع واقعی استادیوم که از نتایج مأموریت AfriSAR با مقدار $42/500$ متر استخراج شده است، بیانگر دقت بالاتر نتایج روش NLSAR می‌باشد. به منظور بهبود مدل ارتفاعی تولیدشده با دقت یک متر و شناسایی کامل‌تر منطقه مورد مطالعه، حل مسئله برهم افتادگی^۱ عوارض از طریق آنالیز مؤلفه‌های اصلی ماتریس کوواریانس برآورد شده انجام گرفته است. با حل یک مسئله کمینه‌سازی، ارتفاع با بیشینه احتمال برای مکانیزم‌های اصلی باز پراکنش تخمین زده شده و نتایج قابلیت جداسازی برهم افتادگی عوارض را تایید می‌کند که امکان آن در روش‌های کلاسیک تداخل سنجی وجود ندارد.

واژگان کلیدی: تداخل سنجی سری تصاویر راداری، مدل ارتفاعی رقومی، برآورد ماتریس کوواریانس، آنالیز مؤلفه‌های اصلی، boxcar
NLSAR

* نویسنده رابط

^۱ Layover

۱- مقدمه

امروزه تولید مدل‌های ارتفاعی رقومی با دقت بالا، اهمیت ویژه‌ای در حوزه‌های مدیریت شهری، پروژه‌های مهندسی و فعالیت‌های میدانی دارد [۱]، همچنین به‌منظور مقابله و کاهش خسارات ناشی از سوانح طبیعی همچون زلزله، فرسایش عوارض و مدیریت بحران سیل و شناسایی مناطق پرخطر، نیاز به مدل‌های ارتفاعی رقومی با دقت بالا کاملاً محسوس می‌باشد.

تکنیک تداخل سنجی تصاویر^۱ SAR، به‌عنوان یک ابزار کارآمد در تولید نسل‌های مختلف مدل‌های ارتفاعی رقومی مورد استفاده قرار می‌گیرد. تداخل سنجی تصاویر SAR در حالت کلاسیک تنها از دو تصویر که با زوایای متفاوتی اخذ شده‌اند استفاده می‌کند، با استفاده از دو تصویر SAR یک تداخل نما تولید می‌شود و از اختلاف فاز تصاویر که فاز تداخل سنجی خوانده می‌شود [۲]، اطلاعات ارتفاعی استخراج می‌شوند. باید توجه داشت که تداخل سنجی تصاویر راداری علاوه بر استفاده به‌عنوان ابزاری قدرتمند جهت برآورد ارتفاع و تغییر شکل‌ها، دارای مشکلاتی اساسی همچون پیچیدگی عملیات بازیابی ابهام فاز^۲ و اعوجاجات ارتفاعی که به دلیل اثرات اتمسفری اتفاق می‌افتند، می‌باشد. این مشکلات منجر به محدود شدن کارایی‌های تداخل سنجی راداری (InSAR) و کاهش دقت نقشه‌های ارتفاعی رقومی می‌شوند، درحالی‌که در چارچوب تداخل سنجی سری تصاویر راداری^۳ با توجه به این‌که در این قالب بیش از یک تداخل نما از منطقه‌ای یکسان قابل تولید است، این مشکلات قابل حل می‌باشند [۳، ۴]. تداخل سنجی سری تصاویر راداری از جهت انجام خودکار عملیات بازیابی ابهام فاز و بازسازی مدل ارتفاعی رقومی (DEM) منطقه با دقت بالا، منحصربه‌فرد است.

تمرکز این مقاله بر به‌کارگیری دسته داده‌های تصاویر SAR به‌عنوان ورودی چارچوب تداخل سنجی سری تصاویر راداری، با هدف تولید مدل ارتفاعی رقومی با دقت بالا، با ارزیابی کارایی ماتریس‌های کواریانس داده‌های مشاهداتی که با روش‌های محلی و غیر محلی برآورد می‌شوند، می‌باشد. برای این منظور تجزیه و تحلیل و مقایسه بین

روش‌های مختلف پردازش تداخل سنجی سری تصاویر راداری با استفاده از داده‌های یکسان که از استادیوم ورزشی موجود در منطقه Mondah, Gabon تهیه شده‌اند، انجام می‌شود. برای این منظور در گام اول ماتریس کواریانس سری داده‌های راداری برآورد می‌شود. تخمین ماتریس کواریانس با روش‌های محلی و غیر محلی انجام می‌شود. در روش‌های محلی همچون Boxcar، یک پنجره با ابعاد ثابت به مرکز پیکسل انتخابی در نظر گرفته می‌شود. این روش همگون بودن پیکسل‌های واقع در همسایگی انتخاب شده را در نظر نمی‌گیرد، لذا این روش در مناطق غیر همگون منجر به نتایج با دقت پایین می‌شود [۵].

در روش‌های غیر محلی^۴ برآورد ماتریس کواریانس همچون روش NLSAR، پیکسل‌های غیر همسایگی بر اساس میزان شباهت ویژگی‌های آماری به پیکسل انتخاب شده، از طریق معیار فاصله Wishart تعیین می‌شوند [6] و به هر پیکسل بر اساس میزان شباهت با پیکسل انتخابی، وزن خاصی تعلق می‌گیرد [۷].

از ماتریس‌های کواریانس برآورد شده، مقادیر دامنه و فاز تداخل نماها قابل استخراج است، در تداخل سنجی کلاسیک تنها از اطلاعات فاز تداخل نما جهت برآورد ارتفاع استفاده می‌شود ولی در تداخل سنجی سری تصاویر راداری تمرکز بر استفاده از تمامی اطلاعات موجود در ماتریس کواریانس، اعم از مقادیر دامنه و فاز تداخل نماها می‌باشد. برآورد ارتفاع برای مناطق پیچیده، همچون منطقه مورد مطالعه که شامل استادیوم ورزشی Angondjé در حومه شهر لیبرویل در کشور Gabon می‌باشد، به دلیل وقوع پدیده Layover مسئولیتی پر چالش است. پدیده Layover یا هم‌پوشانی عوارض مربوط به پیکسل‌هایی می‌باشد که حاوی باز پراکنش‌ها از عوارضی با ارتفاع‌های متفاوت و فاصله‌های رنج مایل یکسان است که بر یک پیکسل ثبت شده‌اند. جهت رفع این خطا، آنالیز مؤلفه‌های اصلی ماتریس کواریانس، با توجه به رویکرد CAESAR انجام می‌گیرد [۱۳] و با در اختیار داشتن اطلاعات دامنه و فاز ماتریس‌های کواریانس برآورد شده و به‌کارگیری تکنیک قدرتمند بیشینه احتمال^۵، اطلاعات ارتفاعی دقیق مکانیزم‌های اصلی باز پراکنش محاسبه می‌شوند.

۴ Non-Local
۵ Maximum Likelihood

۱ SAR Interferometry
۲ Phase Unwrapping
۳ Multi-baseline SAR Interferometry

۲- اصول تداخل سنجی راداری

هر تصویر راداری با روزه ترکیبی^۱ (SAR) از دو بخش دامنه و فاز تشکیل می‌شود، به‌طوری‌که بخش دامنه بیانگر انرژی و شدت سیگنال‌های بازگشتی و بخش فاز بیانگر فاصله هدف تا سنجنده است. در تداخل سنجی کلاسیک تصاویر SAR، دو تصویر با زوایای متفاوت از منطقه اخذ می‌شوند و هر پیکسل s در تصویر i با دو بخش حقیقی و موهومی به‌صورت زیر نوشته می‌شود [۸]:

$$x_i(s) = |x_i(s)| \exp \left[-j \left(\frac{4\pi\rho}{\lambda} + \varphi_0 \right) \right] \quad (۱)$$

در این رابطه؛ $|x_i(s)|$ ، ρ ، λ و φ_0 به ترتیب مقادیر دامنه پیکسل s در تصویر i ، فاصله رنج مایل^۲، طول موج و فاز اولیه می‌باشند. پس از هم مرجع شدن دو تصویر، تداخل نما برای هر دو پیکسل نظیر در زوج تصویر به‌صورت زیر شکل می‌گیرد [۸]:

$$I = x_1(s) x_2^*(s) = |x_1(s) x_2(s)| \exp \left[-j \left(\frac{4\pi\Delta\rho}{\lambda} \right) \right] = A \exp(j\Delta\varphi_{\text{int}}) \quad (۲)$$

به‌طوری‌که؛ I ، $x_1(s)$ ، $x_2^*(s)$ و $\Delta\varphi_{\text{int}}$ به ترتیب برابر با تداخل نمای^۳ ایجادشده، پیکسل s در تصویر اول، مزدوج^۴ مختلط پیکسل s در تصویر دوم، اختلاف در فاصله رنج مایل و فاز تداخل سنجی^۵ می‌باشند. پس از استخراج فاز تداخل نما و حذف عوامل مؤثر بر آن، همچون اثر فاز زمین مسطح^۶، فاز ناشی از جابه‌جایی، نویز و اتمسفر، تنها از اطلاعات فاز تداخل نما جهت برآورد ارتفاع استفاده می‌شود.

۲-۱- مبانی تداخل سنجی سری تصاویر راداری

تداخل سنجی بر مبنای استفاده از سری تصاویر ماکروویو راداری دارای دقت به‌مراتب بالاتری نسبت به روش‌های کلاسیک تداخل سنجی است و با توجه به امکان

ایجاد بیش از یک تداخل نما، قابلیت کاهش پیچیدگی‌های موجود در پروسه تداخل سنجی همچون بازیابی فاز را دارا بوده و امکان بازسازی مدل‌های ارتفاعی رقومی با دقت بالا را فراهم می‌سازد [۳، ۴]. برای این منظور سری داده‌های تداخل سنجی تولید می‌شوند، با فرض تهیه D تصویر از منطقه مورد مطالعه و هم مرجع نمودن آن‌ها، با انتخاب هر دو تصویر از بین D تصویر موجود یک تداخل نما قابل‌تولید است. لذا به تعداد $D(D-1)/2$ تداخل نما تولید می‌شود. به ازای هر پیکسل s ، یک بردار باز پراکنش^۷ D -بعدی با مقادیر مختلط شکل می‌گیرد [۹]:

$$x(s) = \begin{bmatrix} x_1(s) \\ x_2(s) \\ \vdots \\ x_D(s) \end{bmatrix}_{D \times 1} \quad (۳)$$

در تداخل سنجی سری تصاویر راداری به دلیل شکل‌گیری بیش از یک تداخل نما، به‌منظور ایجاد تمامی تداخل نماهای قابل‌تولید با استفاده از هر دو تصویر متفاوت برای هر پیکسل، ماتریس کوواریانس متعلق به هر پیکسل شکل می‌گیرد به‌این‌ترتیب تمامی تداخل نماهای قابل‌تولید برای هر پیکسل با استفاده از D تصویر، در ماتریس کوواریانس مربوط به آن پیکسل قرار می‌گیرند، لذا ماتریس کوواریانس پیکسل s ، ماتریسی $D \times D$ به فرم $\Sigma_s = E[x(s)x(s)^\dagger]$ خواهد بود، به‌طوری‌که E نشان‌دهنده امید ریاضی می‌باشد [۹]. این ماتریس کوواریانس می‌تواند به‌صورت زیر تجزیه شود [۹، ۱۰]:

$$\Sigma_s = R_s^{1/2} \Gamma_s R_s^{1/2} \quad (۴)$$

که در این رابطه R_s یک ماتریس قطری می‌باشد به‌طوری‌که درایه‌های روی قطر اصلی آن برابر با $[R_s]_{a,a} = r_a = E\left\{ \left| [x(s)]_a \right|^2 \right\}$ می‌باشند که نشان‌دهنده شدت انرژی رسیده به پیکسل s در تصویر a است. Γ_s نیز ماتریس کوهرنسی^۸ پیکسل s می‌باشد که از رابطه زیر تعیین می‌شود [۹]:

^۷ Scattering Vector
^۸ Coherence Matrix

^۱ Synthetic Aperture Radar
^۲ Slant Range
^۳ Interferogram
^۴ Conjugate
^۵ Interferometric Phase
^۶ Flat Earth

از داده های جمع آوری شده و نرمال سازی آن در قالب ماتریس کوهرنسی و همچنین با تشکیل ماتریس کوهرنسی از طریق مدل، که با استفاده از رابطه (۴) تعیین می شود و شامل تمامی اطلاعات دامنه و فاز تداخل نماها می باشد، به منظور برآورد ارتفاع با بیشینه احتمال استفاده می شود. برای این منظور، مدل تخمین بیشینه احتمال به ماتریس کوواریانس برازش داده شده و ارتفاع هر پیکسل با روش بیشینه احتمال^۳ (ML) محاسبه می شود. بر این اساس یک تابع هزینه^۴ باهدف تخمین ارتفاع با بیشینه احتمال و کمینه سازی تغییرات ارتفاعی ناشی از نویز موجود در داده ها به صورت زیر شکل می گیرد [۹]:

$$Cost_F = tr \left[\Gamma_s^{-1} (h_s) \hat{\Gamma}_s^{(WML)} \right] \quad (9)$$

به طوری که $\Gamma_s^{-1} (h_s)$ ماتریس کوهرنسی مدل (متعلق به پیکسل s)، به دست آمده از رابطه (۴) و $\hat{\Gamma}_s^{(WML)}$ ماتریس کوهرنسی برآورد شده با استفاده از داده ها می باشد. عبارت tr بیانگر محاسبه تریس^۵ ماتریس است. با کمینه سازی تابع هزینه تعریف شده ارتفاع پیکسل مدنظر با بیشینه احتمال به دست می آید:

$$\hat{h} = \arg \min_h (Cost_F) \quad (10)$$

هدف در این بهینه سازی، یافتن پروفیل ارتفاعی می باشد که ارتفاع پیکسل ها با بیشینه احتمال محاسبه شود و همچنین تغییرات پروفیل ارتفاعی باهدف کمینه سازی خطاهای بین سری داده های تداخل سنجی و عبور از مسئله کلاسیک بازیابی ابهام فاز انجام شود. برای این منظور از میان پروفیل های مختلف ارتفاعی، پروفایلی انتخاب می شود که شرایط بالا را برقرار سازد [۹].

۲-۲- برآورد ماتریس کوواریانس با روش های محلی Boxcar و غیر محلی NLSAR

در تمامی روش های تداخل سنجی چندبعدی با استفاده از تصاویر راداری تهیه شده با روزنه مصنوعی (SAR)، مرحله برآورد ماتریس کوواریانس برای هر

$$\Gamma_s = \begin{pmatrix} 1 & p_{1,2} & \cdots & p_{1,D} \\ p_{1,2}^* & 1 & \cdots & p_{2,D} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{1,D}^* & p_{2,D}^* & & 1 \end{pmatrix} \quad (5)$$

به طوری که برای هر مؤلفه $p_{a,b}$ داریم:

$$p_{a,b} = \frac{E \left\{ [x(s)]_a [x(s)]_b^\dagger \right\}}{\sqrt{r_a r_b}} \quad (6)$$

$$= \gamma_{a,b} \exp(j \Delta \varphi_{a,b})$$

که $p_{a,b}$ نشان دهنده کوهرنسی بین هر دو تصویر a و b ، $\gamma_{a,b}$ اندازه کوهرنسی و $\Delta \varphi_{a,b}$ بیانگر فاز تداخل سنجی می باشد [۹]. به عبارتی ماتریس کوهرنسی شامل مقادیر نرمالایز شده است، همچنین این ماتریس متقارن می باشد. برای استفاده از فاز تداخل نما، اثر عوامل مزاحم که در رابطه زیر آمده اند حذف می گردند [۱۱]:

$$\Delta \varphi_{a,b} = \varphi_{topo} + \varphi_{def} + \varphi_{flat} + \varphi_{error} \quad (7)$$

که در آن، $\Delta \varphi_{a,b}$ فاز تداخل نما، φ_{topo} فاز توپوگرافی، φ_{def} فاز ناشی از تغییرات ارتفاعی، φ_{flat} اثر فاز زمین مسطح و φ_{error} مؤلفه های فازی مربوط به اتمسفر، خطای مداری و اثر نویز می باشد. این عوامل مزاحم همگی از فاز تداخل نما حذف شده و تنها اثر فاز توپوگرافی باقی می ماند. فاز تداخل سنجی $\Delta \varphi_{a,b}$ در قالب تابعی همچون $f_{a,b}$ ، مرتبط با ارتفاع h است که این تابع با توجه به طول خطوط مبنای^۱ تداخل سنجی قابل محاسبه است [9]:

$$\varphi_{a,b} = f_{a,b}(h) = \alpha_{a,b} h$$

$$= \frac{4\pi B_\perp(a,b)}{\lambda \rho_0 \sin \theta} h \quad (8)$$

که در این رابطه؛ $B_\perp(a,b)$ مؤلفه ی عمود بر راستای رنج خط مبنا^۲، بین دو موقعیت تصویربرداری a و b ، λ طول، ρ_0 فاصله تا صحنه تصویر و θ زاویه دید می باشند [۹]. تنها کمیت متغیر در این رابطه، طول خطوط مبنای تداخل سنجی است. با برآورد ماتریس کوواریانس با استفاده

^۳ Maximum Likelihood

^۴ Cost-Function

^۵ Trace

^۱ Baseline

^۲ Orthogonal baseline

به‌طور دقیق‌تر، NLSAR با استفاده از پنجره‌ای مربعی با ابعاد ثابت به مرکزیت هر پیکسل S ، از مقادیر $x(j)x(j)^\dagger$ پیکسل‌های موجود در پنجره میانگین‌گیری انجام می‌دهد و یک ماتریس کوواریانس R_p برای پیکسل مرکزی S ، تعیین می‌کند. همچنین با در نظر گرفتن یک پنجره جستجو با ابعاد بزرگ‌تر به مرکزیت پیکسل S همان‌طور که در شکل ۱ نمایش داده شده است و محاسبه ماتریس‌های کوواریانس هر یک از پیکسل‌های موجود در پنجره جستجو، میزان شباهت خواص آماری هر یک از پیکسل‌های موجود در این پنجره با پیکسل مرکزی S از طریق تابع شباهت Wishart، مورد بررسی قرار می‌گیرد [۵]:

$$W(\Sigma_t, \Sigma_s) = \frac{|\Sigma_t|^{L'} |\Sigma_s|^{L'}}{\left| \frac{1}{2}(\Sigma_t + \Sigma_s) \right|^{2L'}} \quad (12)$$

این رابطه میزان شباهت بین هر دو ماتریس کوواریانس تجربی Σ_t مربوط به پیکسل t و Σ_s مربوط به پیکسل s را تعیین می‌کند. علاوه بر این L' پیکسل‌هایی را مشخص می‌کند که برای محاسبه ماتریس کوواریانس مورد استفاده قرار گرفته‌اند. اپراتور $||$ نیز بیانگر دترمینان ماتریس است. مقادیر کوچک برای فاکتور W نشان‌دهنده شباهت بالای توزیع این دو ماتریس کوواریانس می‌باشد [۵]. شباهت هر پیکسل t با پیکسل مرکزی S ، به مقدار وزن $w(s, t)$ برای هر پیکسل t تبدیل می‌شود. پیکسل‌های دارای مقادیر وزن بزرگ پیکسل‌های دارای شباهت بالا با پیکسل مرکزی، و پیکسل‌های با مقادیر وزن ناچیز، پیکسل‌های با شباهت کم به پیکسل مرکزی می‌باشند [۱۰]. پس از تعیین پیکسل‌های مشابه، یک میانگین‌گیری وزن‌دار (WSME)^۳ با استفاده از وزن اختصاص داده‌شده به هر پیکسل، انجام می‌شود و ماتریس کوواریانس R_p برای پیکسل S ، با مقداری دقیق‌تر به‌روز و جایگزین می‌شود [۵، ۱۰]:

$$\hat{\Sigma}^{NL}(s) = \frac{\sum_t w(s, t) x(t) x(t)^\dagger}{\sum_t w(s, t)} \quad (13)$$

که $\hat{\Sigma}^{NL}(s)$ ماتریس کوواریانس برآورده شده برای پیکسل S با استفاده از روش NLSAR و $w(s, t)$ وزن

پیکسل، یکی از مراحل پیچیده و بسیار مهم است. در این مقاله ماتریس کوواریانس سری داده‌های تداخل سنجی راداری با روش‌های محلی و غیر محلی برآورد می‌شوند و به آنالیز این ماتریس‌ها و نتایج حاصل از آن‌ها پرداخته خواهد شد.

در روش‌های محلی همچون روش Boxcar، میانگین‌گیری مکانی^۱ در یک پنجره مربعی با ابعاد ثابت به مرکزیت پیکسل انتخابی^۲ از پیکسل‌های همسایگی انجام می‌گیرد [۷]. برای این منظور اگر منطقه همگون^۲ باشد، به این معنی که پیکسل s و پیکسل‌های همسایگی آن دارای خواص آماری و ویژگی‌های ارتفاعی مشابهی باشند، جهت تخمین ماتریس کوواریانس پیکسل s می‌توان میانگین‌گیری محلی از مقادیر $x(s)x(s)^\dagger$ ، در پنجره همسایگی پیکسل مدنظر انجام داد [۷]:

$$\hat{\Sigma}_s^{(box)} = \frac{1}{N} \sum_{j \in w_s} x(j) x(j)^\dagger \quad (11)$$

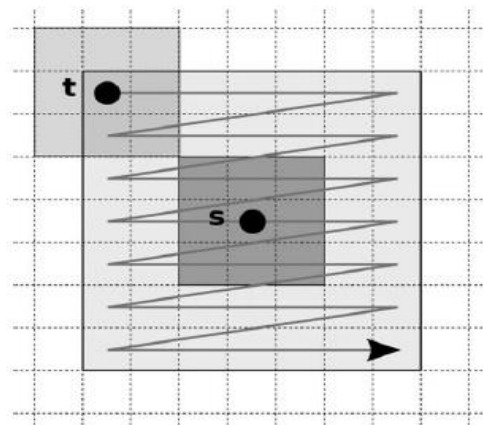
به‌طوری‌که در این رابطه، $\hat{\Sigma}_s^{(box)}$ و N به ترتیب ماتریس کوواریانس برآورد شده برای پیکسل s به روش Boxcar و تعداد نمونه‌های موجود در پنجره‌ی w_s می‌باشند. باید توجه داشت در این روش میانگین‌گیری مکانی از پیکسل‌های همسایگی، بدون در نظر گرفتن وضعیت همگونی منطقه و توزیع آماری پیکسل‌های همسایگی انجام می‌شود لذا این روش در مناطق غیر همگون منجر به تولید نتایج با دقت پایین می‌گردد [۵، ۹].

روش‌های غیر محلی جهت برآورد ماتریس کوواریانس حول محور شناسایی و یافتن پیکسل‌هایی با خواص آماری مشابه با پیکسل مدنظر فعالیت می‌کنند. در فیلترینگ غیر محلی، یکی از مؤثرترین روش‌ها، رویکرد NLSAR می‌باشد که در [۵] معرفی شده است و در چارچوب این مقاله نیز، رویکرد NLSAR مورد توجه می‌باشد. ایده‌ی رویکرد NLSAR به این صورت می‌باشد که محاسبات را تنها محدود به پیکسل‌های همسایگی نمی‌کند بلکه به دنبال تعیین پیکسل‌هایی با خواص مشابه با پیکسل مدنظر، در کل تصویر می‌گردد.

^۱ Spatial Filtering
^۲ Homogenous

^۳ Weighted Sample Mean Estimator

اختصاص داده شده به هر پیکسل t بر اساس میزان شباهت به پیکسل s است.



شکل ۱- عملکرد روش NLSAR؛ پنجره ای با ابعاد 3×3 و پنجره جستجو با ابعاد 7×7 برای پیکسل s در نظر گرفته شده است. پس از تعیین ماتریس کوواریانس هر پیکسل موجود در پنجره جستجو، همچون پیکسل t ، میزان شباهت هر یک از پیکسل های موجود در این پنجره با پیکسل s ، از طریق تابع شباهت Wishart بررسی می شود و در نهایت از آن پیکسل ها جهت برآورد نهایی ماتریس کوواریانس پیکسل s ، استفاده می گردد [۱۲].

۲-۳- آنالیز مؤلفه های اصلی (PCA)^۱

برآورد ماتریس کوواریانس برای مناطق پیچیده همچون مناطق شهری و جنگلی با پیچیدگی هایی همراه است [۶]. در حقیقت مناطق شهری و جنگلی به دلیل وقوع پدیده روی هم افتادگی^۲ عوارض، مناطق پیچیده ای به شمار می آیند. پدیده روی هم افتادگی، مربوط به پیکسل هایی می باشد که حاوی باز پراکنش ها از تارگت هایی با ارتفاع های متفاوت اما فاصله های رنج مایل یکسان هستند و ترکیبی از این باز پراکنش ها از نقاط با فاصله رنج های یکسان، بر روی یک پیکسل ثبت می شوند [۱۳]. در تداخل سنجی کلاسیک امکان رفع این خطا وجود ندارد و ارتفاع برآورد شده برای هر پیکسل، میانگینی از ارتفاع عوارض تصویر شده در آن پیکسل می باشد لذا ارتفاع تعیین شده برای پیکسل هایی که این پدیده در آن ها اتفاق افتاده ممکن است به حد کافی دارای اعتبار نباشد. از آنجایی که در مناطق شهری و جنگلی، پدیده Layover به دفعات اتفاق می افتد، لذا در چارچوب تداخل سنجی با

سری تصاویر راداری به دنبال حذف خطای Layover و جداسازی مکانیزم باز پراکنش ها با ارتفاعات مختلف می باشیم. برای این منظور نیاز است ماتریس کوواریانس برآورد شده برای هر پیکسل، به مؤلفه های اصلی تجزیه شود. بردارها و راستاهای ویژه ماتریس کوواریانس که دارای بیشترین میزان اهمیت می باشند، بیانگر توزیع بخش قابل توجهی از داده ها در آن راستاها هستند [۱۴]. ایده ی تجزیه ماتریس کوواریانس به منظور بهبود پردازش تداخل سنجی سری تصاویر راداری، در قالب رویکرد CAESAR^۳ در [۱۳] مطرح شد که چارچوب این روش در این مقاله نیز دنبال شده است. در [۱۳] ماتریس کوواریانس برآورده شده به روش Boxcar، به مؤلفه های اصلی تجزیه شده است. در این مقاله کارایی NLSAR در برآورد ماتریس کوواریانس و تجزیه آن به مؤلفه های اصلی و برآورد ارتفاع مربوط به مکانیزم باز پراکنش های مختلف مورد بررسی قرار گرفته است.

به منظور آنالیز مؤلفه های اصلی، بردارهای ویژه متناظر با بزرگترین مقادیر ویژه ماتریس کوواریانس برآورد شده با استفاده از سری داده های راداری شناسایی می شوند. بردارهای ویژه u_i ، مؤلفه های اصلی خوانده می شوند که به وسیله مقادیر ویژه λ_i ها، وزن دار شده اند. لذا برای ماتریس کوواریانس تخمین شده داریم [۱۳]:

$$\hat{\Sigma} = \sum_{i=1}^D \lambda_i u_i u_i^{\dagger} \quad (14)$$

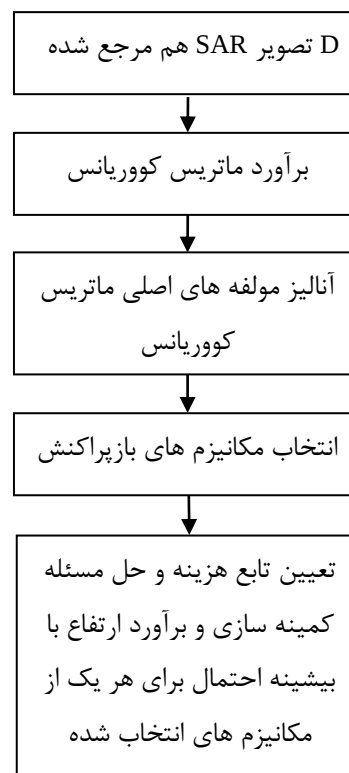
به طوری که $\hat{\Sigma}$ ماتریس کوواریانس برآورد شده با ابعاد $D \times D$ و D تعداد تصاویر SAR می باشد. تمامی مقادیر ویژه ماتریس کوواریانس $\hat{\Sigma}$ ، مقادیر حقیقی بوده و به ترتیب صعودی به صورت $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_D$ می باشند و به بردارهای ویژه متناظر با مقادیر ویژه، متعامد و به صورت $\{u_1, u_2, \dots, u_D\}$ هستند [۱۳]. جهت انتخاب k مؤلفه اصلی، کافی است k بردار ویژه متناظر با مقادیر ویژه مرتب شده به صورت صعودی، انتخاب شوند و با تشکیل ماتریس کوواریانس هر یک از این مؤلفه ها از طریق رابطه (۱۳) و با استفاده از اطلاعات موجود در ماتریس های کوواریانس مؤلفه ها، به استخراج اطلاعات ارتفاعی هر یک از مؤلفه ها پرداخت [۱۳].

^۳ Component extrAction and sElection SAR

^۱ Principal Component Analysis

^۲ Layover

مورد مطالعه این مقاله، در طول جغرافیایی "۰۳۱'۲۷" شمالی و عرض جغرافیایی "۹۰۲۳'۵۲"، شامل استادیوم ورزشی Angondjé در حومه شهر لیبرویل^۴ در کشور گابن قرار دارد. این استادیوم با ابعاد ۳۶۰۰۰ مترمربع، در سال ۲۰۱۱ توسط یک شرکت چینی ساخته شد. ارتفاع واقعی استادیوم برابر با ۴۲/۵۰۰ متر می باشد که در مأموریت هوابرد AfriSAR در سال ۲۰۱۶ تعیین شد. پروژه AfriSAR با همکاری ناسا و آژانس فضایی اروپا و گابن با به کارگیری ابزارهای UAVSAR و LVIS جهت بررسی مناطق مهم و نواحی جنگلی گابن انجام گرفت و ارتفاع استخراج شده برای استادیوم Angondjé از این مأموریت جهت ارزیابی مورد استفاده قرار می گیرد [15]. تصویر نوری گوگل ارث و بخش دامنه تصویر راداری محدوده مورد مطالعه، در شکل ۳ نمایش داده شده است. از آنجا که ۹ تصویر راداری مورد استفاده در یک روز اخذ شده است، این تصاویر کمترین ناهم دوسی زمانی و مکانی را دارا می باشند و لذا برای ایجاد مدل ارتفاعی رقومی دقیق (یک متری) مناسب می باشند. در بخش اول این پژوهش ارزیابی کارایی روش های Boxcar و NLSAR در برآورد ماتریس کوواریانس داده های مشاهداتی و تأثیرات آن ها بر مدل های ارتفاعی برآورد شده، بررسی شده است. برای این منظور ابتدا با در اختیار داشتن ۹ تصویر SAR، ماتریس کوواریانس ۹×۹ به روش Boxcar با در نظر گرفتن پنجره ای مربعی با مرکزیت پیکسل مدنظر، بر مبنای رابطه (۱۰) برآورد شده است. لذا به منظور بررسی حالت های مختلف، پنجره هایی با ابعاد ۷×۷، ۱۱×۱۱، ۱۵×۱۵ و ۱۹×۱۹ پیکسل در نظر گرفته شد. فاز تداخل نماهای ماتریس کوواریانس برآورد شده به روش Boxcar بین یک جفت تصویر در شکل ۴ نمایش داده شده است. در حالت (الف) پنجره ای به ابعاد ۷×۷ به مرکزیت هر یک از پیکسل ها در نظر گرفته شده و بدون توجه به خواص آماری پیکسل های موجود در آن پنجره، تعداد ۴۹=۷×۷ پیکسل همسایگی انتخاب شده و میانگین مقادیر $X(s)X(s)^{\dagger}$ نظیر پیکسل های موجود در این پنجره، به عنوان ماتریس کوواریانس پیکسل مرکزی در نظر گرفته شده است. حالت های (ب) و (ج) و (د) نیز به طور مشابه، با ابعاد پنجره های متفاوت اجرا شده اند. افزایش سایز پنجره منجر به کاهش قدرت تفکیک مکانی و از دست



شکل ۲- مراحل برآورد ارتفاع از طریق پردازش تداخل سنجی سری تصاویر راداری

۳- داده های مورد استفاده و روش کار

در این مطالعه، سری تصاویر راداری هوابرد UAVSAR متعلق به آزمایشگاه JPL^۱، از منطقه مونداه در کشور گابن^۲ در قاره آفریقا، مورد استفاده قرار گرفته است. تصاویر از نوع راداری پهلونگر با دریچه مصنوعی و جهت پهلونگر به سمت چپ می باشد. از منطقه مطالعاتی مربوطه تعداد ۹ تصویر در دسترس است که در تاریخ ششم مارچ ۲۰۱۶، از ۱۱:۲۶:۰۸ تا ۱۱:۳۱:۳۸ در سیستم زمان هماهنگ جهانی (UTC) با سرعت متوسط 220 m/s اخذ شده اند و از طریق وبسایت (<http://uavsar.jpl.nasa.gov>) در اختیار این پژوهش قرار گرفته است. این تصاویر راداری مختلط تک نگر^۳ (SLC) در باند L با طول موج ۲۳/۸۴ سانتی متر و با پلاریزاسیون HH تهیه شده است. همچنین این تصاویر دارای قدرت تفکیک مکانی یک متر می باشند (۱/۶۷ متر در راستای رنج و ۰/۶ متر در راستای آزیموت). تصاویر پردازش شده در این مقاله، دارای ۹۷۰ پیکسل در راستای آزیموت و ۳۹۰ پیکسل در راستای رنج هستند. محدوده

^۱ Jet Propulsion Laboratory

^۲ Mondah, Gabon

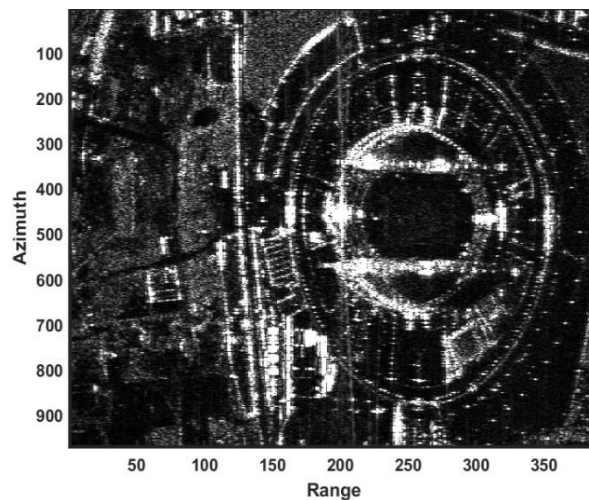
^۳ Single Look Complex

رفتن جزئیات می شود. به منظور بررسی خواص آماری پیکسل های تصویر و یافتن پیکسل هایی با خواص مشابه جهت برآورد دقیق تر ماتریس کواریانس، فیلترینگ غیر

محلی NLSAR نیز بر روی داده های موجود از منطقه مطالعاتی پیاده سازی گردید.

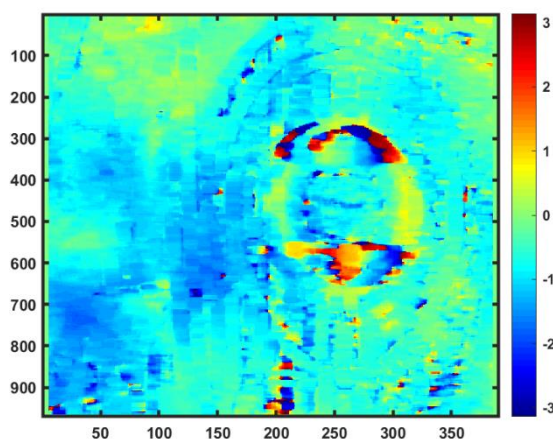


(ب)

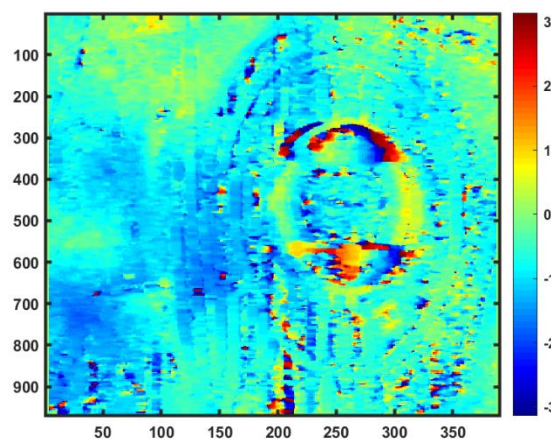


(الف)

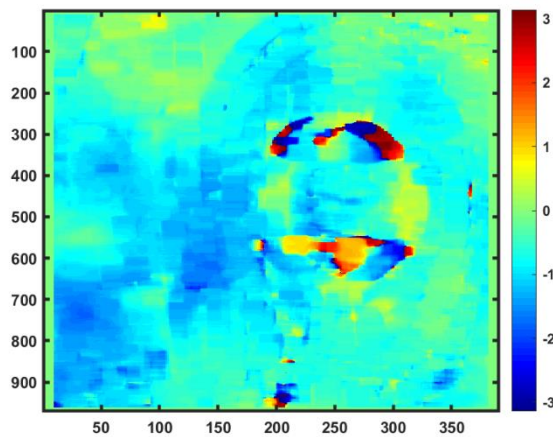
شکل ۳- منطقه مطالعاتی شامل محدوده استادیوم Angondjé؛ تصویر دامنه منطقه مورد مطالعه (الف)؛ تصویر نوری تهیه شده از سرویس گوگل ارث



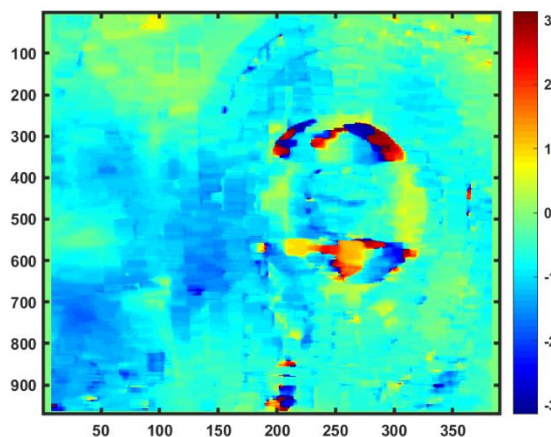
(ب)



(الف)



(د)



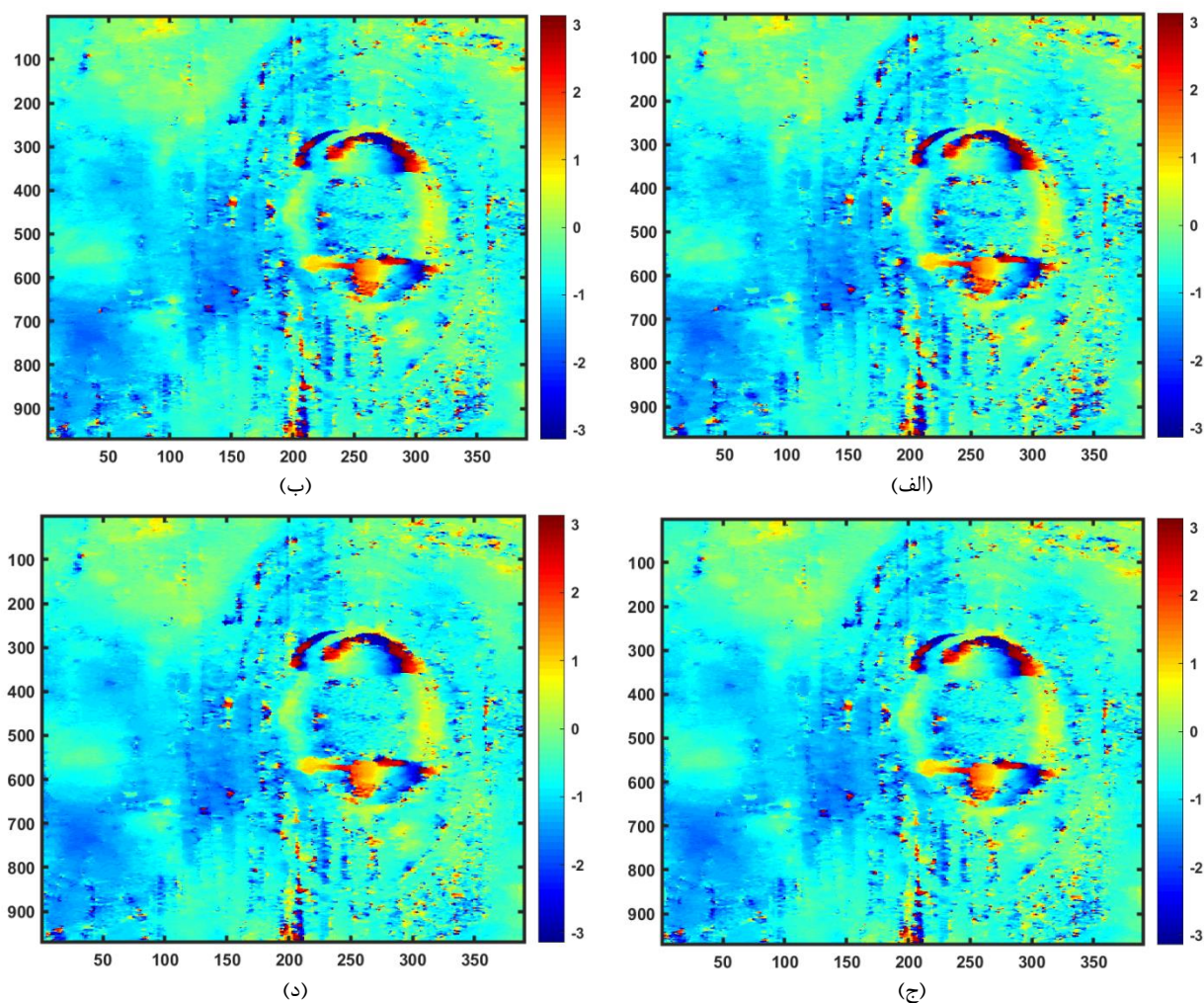
(ج)

شکل ۴- فاز تداخل نما برآورد شده بین یک جفت داده از منطقه مطالعاتی به روش Boxcar با استفاده از پنجره های با ابعاد: ۷×۷ (الف)؛ ۱۱×۱۱

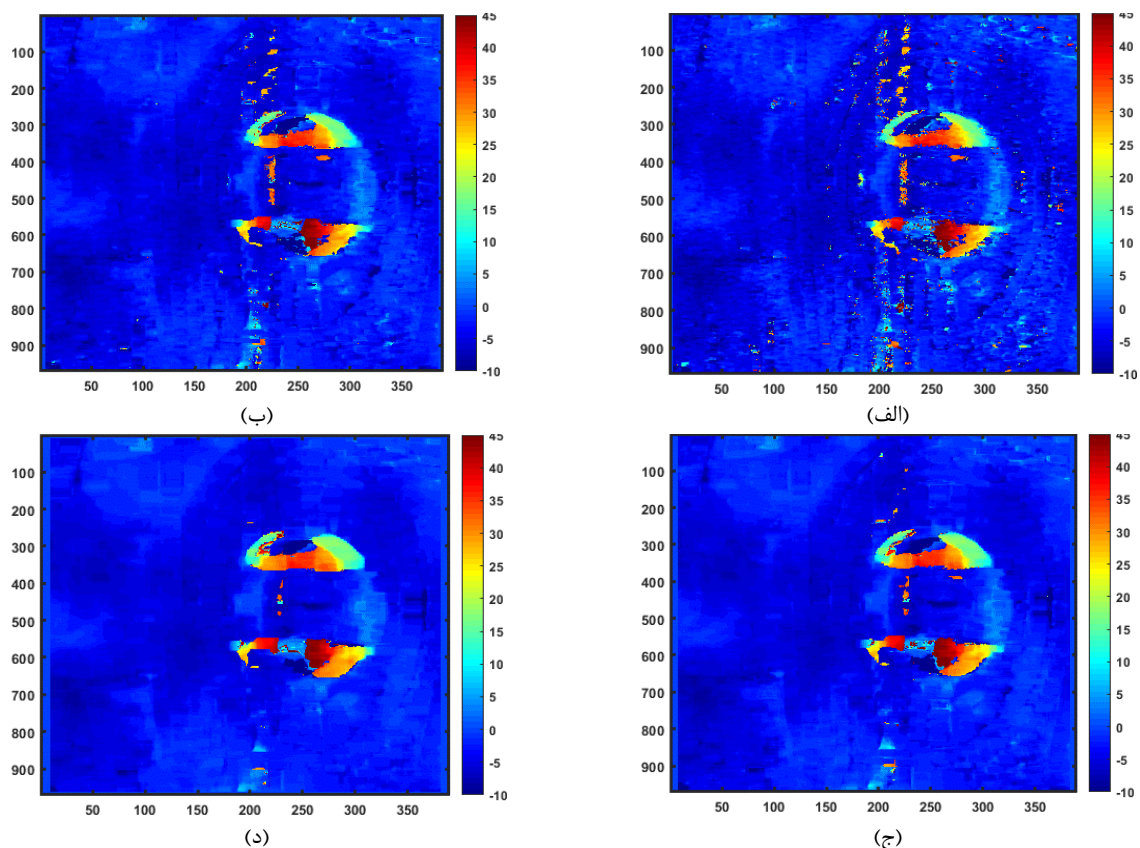
(ب)؛ ۱۵×۱۵ (ج)؛ ۱۹×۱۹ (د)

کوواریانس و کمینه سازی تغییرات ارتفاعی ناشی از نویز موجود در داده ها، تخمین زده شد به طوریکه نقشه های ارتفاعی حاصل، با به کارگیری هر یک از ماتریس های کوواریانس برآورد شده، در شکل ۶ و ۷ نمایش داده شده است. همان طور که در شکل ۴ مشخص است در برآورد ماتریس کوواریانس با روش Boxcar، انتخاب ابعاد پنجره بسیار حائز اهمیت می باشد چراکه در صورت انتخاب پنجره با ابعاد کوچک (قسمت الف)، تداخل نماها تحت تأثیر فرکانس های بالا و نویز قرار دارند و در صورت انتخاب پنجره ای با ابعاد بزرگ (قسمت د)، تقریباً تمامی جزئیات از بین رفته اند، لذا در هنگام استفاده از این روش، انتخاب پنجره بهینه جهت میانگین گیری مکانی در تخمین تداخل نماها امری بسیار حساس است.

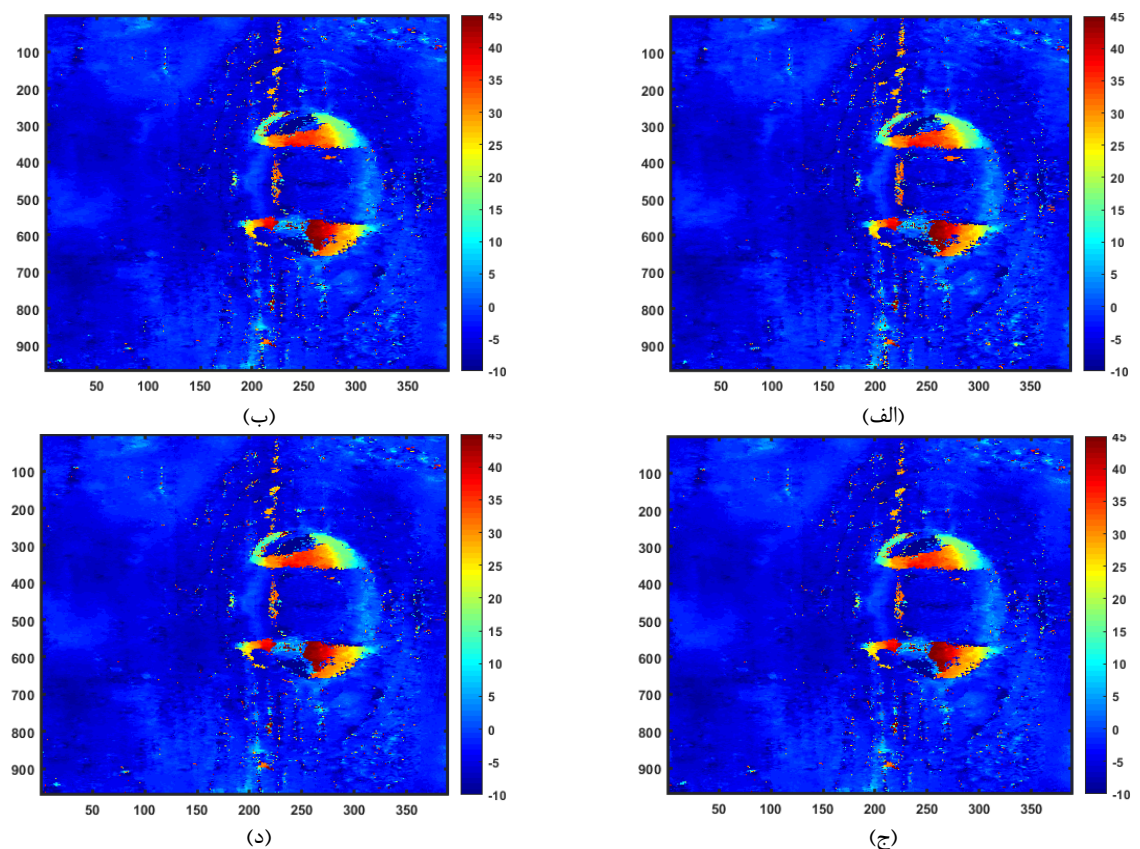
نه تنها در همسایگی پیکسل مدنظر، بلکه در کل تصویر جستجو شده و از طریق تابع شباهت Wishart، میزان شباهت هر پیکسل تعیین و بر اساس آن تمامی پیکسل ها وزن دار شده و در برآورد ماتریس کوواریانس داده های مشاهداتی دخالت داده شده اند. در شکل ۵، فاز تداخل نماهای ماتریس کوواریانس برآورد شده به روش NLSAR نمایش داده شده است. در این شکل به ترتیب حالت های مختلف بیانگر اعمال پنجره هایی با ابعاد (۷ و ۱۳)، (۱۱ و ۲۱)، (۱۵ و ۳۱) و (۱۹ و ۳۵) برای هریک از دو پنجره مورد استفاده در این روش می باشند. با به کارگیری ماتریس های کوواریانس برآورد شده به دو روش Boxcar و NLSAR برای هر پیکسل تصویر، ارتفاع هر پیکسل با بیشینه احتمال با روش ML(Maximum Likelihood) از طریق برازش مدل تخمین بیشینه احتمال به ماتریس های



شکل ۵- فاز تداخل نما برآورد شده بین یک جفت داده از منطقه مطالعاتی به روش NLSAR با استفاده از پنجره هایی با ابعاد؛ (الف) (۷ و ۱۳)، (ب) (۲۱ و ۳۱)، (ج) (۱۹ و ۳۵) و (د) (۲۱ و ۳۱)



شکل ۶- نقشه های ارتفاعی به دست آمده با به کارگیری هر یک از ماتریس های کواریانس برآورد شده به روش Boxcar در هر یک از حالت های استفاده از پنجره های با ابعاد: (الف) 7×7 ؛ (ب) 11×11 ؛ (ج) 15×15 ؛ (د) 19×19



شکل ۷- نقشه های ارتفاعی به دست آمده با به کارگیری هر یک از ماتریس های کواریانس برآورد شده به روش NLSAR در هر یک از حالت های استفاده از پنجره هایی با ابعاد: (الف) (۷ و ۱۳)، (ب) (۱۱ و ۲۱)، (ج) (۱۵ و ۳۱)؛ (د) (۱۹ و ۳۵)

در برآورد ماتریس کوواریانس با روش NLSAR، با توجه به آنالیز فاز تداخل نما در پنجره‌های مختلف و با توجه به شباهت چهار پنجره به هم، در شکل ۵، می‌توان حساسیت بسیار ناچیز این روش به ابعاد پنجره مورد استفاده، به دلیل انتخاب پیکسل‌ها با بیش‌ترین میزان شباهت به‌طور غیر محلی، را نتیجه گرفت درحالی‌که یافتن پنجره بهینه در تخمین تداخل نما در روش Boxcar همراه امری حساس محسوب می‌شود. همچنین در روش NLSAR، ضمن تخمین تداخل نما با استفاده از پیکسل‌های دارای خواص آماری مشابه، جزئیات تصویر حتی با افزایش ساین پنجره‌ها، حفظ‌شده و اطلاعات تصویر از دست نمی‌روند. جهت ارزیابی و مقایسه ارتفاع‌های برآورد شده با به‌کارگیری دو روش Boxcar و NLSAR، به دلیل محدودیت دسترسی به داده، در هر یک از نقشه‌های ارتفاعی دو باکس از پیکسل‌ها، یکی بر روی زمین در قسمت وسط چمن استادیوم و دیگری در نقطه بالای

سقف استادیوم در نظر گرفته شد. در هر یک از باکس‌ها میانگین ارتفاع پیکسل‌های مربوطه محاسبه گردید و از اختلاف این دو مقدار میانگین، ارتفاع استادیوم در هر یک از حالت‌ها محاسبه شد. لازم به ذکر است که هر مقدار در نقشه‌های ارتفاعی حاصل، بیانگر ارتفاع نسبی پیکسل‌ها می‌باشد. نتایج این بررسی در جدول شماره ۱ ارائه شده است. همان‌طور که پیداست ارتفاع میانگین به‌دست‌آمده از دو روش به‌اندازه $1/44$ متر اختلاف دارند و شاخص پراکندگی با تعریف نسبت انحراف معیار مقادیر به میانگین، بیانگر پراکندگی کمتر در نتایج به‌دست‌آمده از روش NLSAR است و با توجه به اینکه ارتفاع تعیین‌شده برای استادیوم از این روش، به ارتفاع واقعی استادیوم که در پروژه AfriSAR با مقدار $42/500$ متر تعیین گردیده [۱۵]، نزدیکی بیش‌تری دارد، لذا نتیجه‌ی تعیین‌شده با استفاده از روش NLSAR معتبرتر می‌باشد.

جدول ۱- مقایسه ارتفاع‌های تعیین‌شده با به‌کارگیری هر یک از دو روش Boxcar و NLSAR در هر یک از حالت‌ها

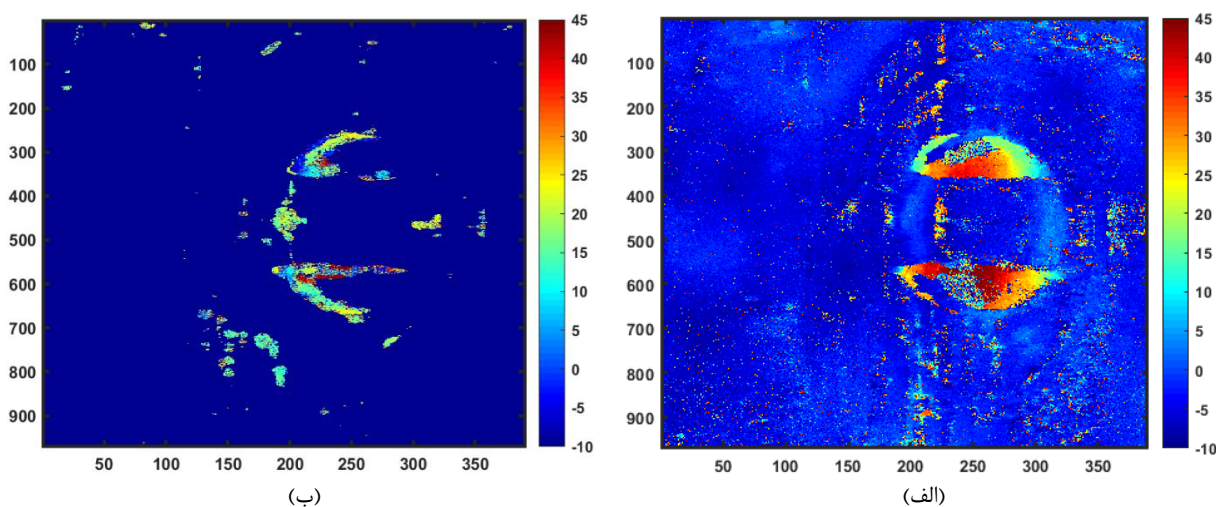
	روش Boxcar				روش NLSAR			
	۷×۷	۱۱×۱۱	۱۵×۱۵	۱۹×۱۹	(۷ و ۱۳)	(۱۱ و ۲۱)	(۱۵ و ۳۱)	(۱۹ و ۳۵)
ابعاد پنجره‌های استفاده شده								
ارتفاع استادیوم (متر)	۴۱/۲۴۰۰	۳۸/۸۰۰۰	۴۲/۲۴۰۰	۴۲/۱۲۰۰	۴۲/۴۸۰۰	۴۲/۸۰۰۰	۴۲/۴۴۰۰	۴۲/۴۴۰۰
میانگین ارتفاع‌های برآورد شده (متر)	۴۱/۱۰۰۰				۴۲/۵۴۰۰			
نسبت انحراف معیار به میانگین	۰/۰۳۸۹				۰/۰۰۴۱			

با دقت کردن در نقشه‌های ارتفاعی برآورد شده می‌توان دریافت بازسازی مدل‌های ارتفاعی در قسمت‌هایی از دو طرف سقف استادیوم انجام‌نشده و مدل‌های ارتفاعی تولیدی دارای نقص می‌باشند. دلیل این مشکل قرارگیری پراکنش گرهایی از زمین و سقف استادیوم در فاصله یکسان تا سنجنده است. به‌طور دقیق‌تر، در هر یک از این دو نقطه، می‌توان یک بیضوی تعریف نمود که این دو در نمای قائم همپوشانی دارند. سیستم تصویربرداری رادار منجر به حرکت بیضوی بالایی به سمت رادار شده و نقطه تقاطع دو بیضوی ناحیه‌ای C شکل را می‌سازد [۱۳] که منجر به برابری فاصله دو پراکنش گر تا سنجنده می‌شود، لذا این دو پراکنش گر از زمین و سقف استادیوم بر روی یک پیکسل تصویر شده و به‌عبارتی دیگر، پدیده روی هم

افتادگی عوارض یا Layover رخ داده است. جهت حل مسئله Layover، کارایی رویکرد CAESAR با جداسازی مؤلفه‌های اصلی باز پراکنش بر نقشه ارتفاعی برآورد شده با استفاده از ماتریس کوواریانس تخمین زده‌شده با روش NLSAR، موردبررسی قرار گرفت. برای این منظور آنالیز مؤلفه‌های اصلی ماتریس کوواریانس برآورد شده به روش NLSAR انجام گرفت. بزرگ‌ترین مقادیر ویژه ماتریس کوواریانس، مرتبط با مکانیزم‌های اصلی پراکندگی می‌باشند به‌طوری‌که نقشه‌های ارتفاعی مرتبط با نخستین و دومین مقادیر و بردارهای ویژه ماتریس کوواریانس، امکان شناسایی کامل‌تر منطقه مورد مطالعه را فراهم می‌کنند. باید توجه داشت اگر برای پیکسلی، $\lambda_1 \gg \lambda_2$ باشد، این مسئله بیانگر این موضوع می‌باشد که در پیکسل مربوطه

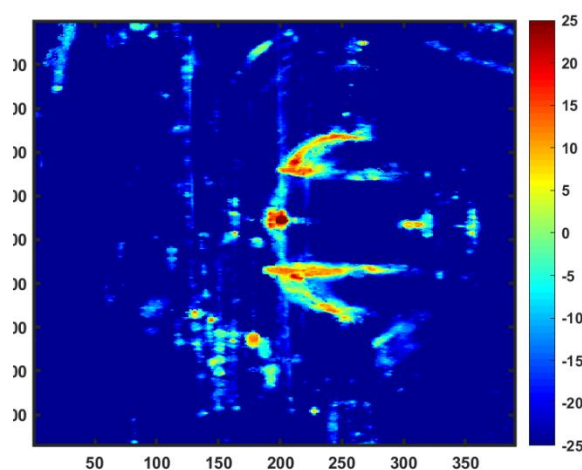
تنها یک مکانیزم پراکندگی غالب وجود دارد ولی در پیکسل‌هایی که Layover رخ داده است معمولاً اولین و دومین مقدار ویژه مقادیر نزدیک به یکدیگر دارند، این مسئله به وضوح بیانگر حضور دو مؤلفه پراکندگی اصلی در آن پیکسل می‌باشد. برای این منظور، آنالیز مؤلفه‌های اصلی در منطقه مطالعاتی انجام شد و نقشه‌های ارتفاعی متناظر با نخستین و دومین مؤلفه‌های اصلی تعیین گردید که در شکل ۸ نمایش داده شده است. انتظار می‌رود پیکسل‌هایی که بازسازی ارتفاعی آن‌ها بر اثر پدیده

Layover، به درستی انجام نشده، دارای دومین مقدار ویژه قابل توجهی باشند. برای این منظور نقشه دومین مقدار ویژه بررسی شده که در شکل ۹ نمایش داده شده است. با بررسی نقشه ارتفاعی دومین مؤلفه اصلی (PC2) و نقشه مقدار ویژه دوم، همان‌طور که انتظار می‌رفت می‌توان دریافت بازسازی ارتفاعی پیکسل‌هایی که ارتفاع آن‌ها در نقشه ارتفاعی حاصل از نخستین مؤلفه اصلی (PC1) تعیین نشده، در نقشه ارتفاعی دومین مؤلفه اصلی انجام گرفته است که منجر به حل مسئله Layover گردید.



شکل ۸- نقشه ارتفاعی متناظر با نخستین مؤلفه اصلی ماتریس کواریانس برآورد شده با روش NLSAR (الف)؛ نقشه ارتفاعی متناظر با دومین مؤلفه اصلی ماتریس کواریانس برآورد شده با روش NLSAR (ب)

را، از طریق آنالیز تداخل سنجی سری تصاویر راداری، تحت روش‌های محلی و غیر محلی مورد بررسی قرار گرفت. به طور خاص اثر ماتریس کواریانس با دو روش محلی و غیر محلی Boxcar و NLSAR در تخمین مدل ارتفاعی رقومی منطقه با استفاده از تصاویر UAVSAR قدرت تفکیک مکانی ۱ متر مورد مقایسه و تحلیل قرار گرفت. نتایج نشان داد که تخمین تداخل نما به روش محلی Boxcar به شدت به ابعاد پنجره مورد استفاده حساس بود به طوری که تغییر ابعاد پنجره منجر به نویزی شدن و یا از دست رفتن جزئیات تصویر می‌شد، در حالی که روش غیر محلی NLSAR جهت تخمین تداخل نما، ضمن به کارگیری پیکسل‌های با خواص آماری مشابه، توانایی حفظ جزئیات و اطلاعات تصویر را دارا بود. میانگین ارتفاع استادیوم با به کارگیری روش Boxcar، ۴۱/۱۰۰ متر و با به کارگیری روش NLSAR، ۴۲/۵۴۰۰ متر برآورد شد که با توجه به ارتفاع واقعی استادیوم با مقدار ۴۲/۵۰۰ متر که



شکل ۹- نقشه دومین مقادیر ویژه ماتریس کواریانس برآورد شده با روش NLSAR (در واحد دسی‌بل)

۴- نتیجه گیری

در این مقاله، سری تصاویر راداری تهیه شده از استادیوم Angondjé در حومه شهر لیبرویل و کشور گابن

Layover یا هم‌پوشانی عوارض حل گردید، از این رو ارتفاع آن دسته از پیکسل‌ها را در نقشه ارتفاعی دومین مؤلفه اصلی، متناظر با مقدار ویژه دوم، برآورد شد و بهبود مدل ارتفاعی رقومی با حل مسئله Layover ممکن گردید.

از اطلاعات به‌دست‌آمده از مأموریت AfriSAR تعیین‌شده است، نتایج حاصل از به‌کارگیری روش NLSAR، دارای دقت به‌مراتب بالاتری از نتایج حاصل از Boxcar داشت. در گام دوم از طریق آنالیز مؤلفه‌های اصلی، مسئله

مراجع

- [1] S. H. Aghajany, B. Voosoghi, and Z. Mousavi, Impact of Digital Elevation Models in Accuracy of InSAR Displacement Velocity Fields. *Journal of Geomatics Science and Technology*, 2015. 4(4): p. 123-138.
- [2] Bamler, R. and P. Hartl, Synthetic aperture radar interferometry. *Inverse problems*, 1998.
- [3] Ferretti, A., et al. Multi-baseline interferometric techniques and applications. in *ERS SAR Interferometry*. 1997.
- [4] Fornaro, G., et al., Maximum likelihood multi-baseline SAR interferometry. *IEE Proceedings-Radar, Sonar and Navigation*, 2006. 153(3): p. 279-288.
- [5] Deledalle, C.-A., et al., NL-SAR: A unified nonlocal framework for resolution-preserving (Pol)(In) SAR denoising. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2015. 53(4): p. 2021-2038.
- [6] Schmitt, M., J.L. Schönberger, and U. Stilla, Adaptive covariance matrix estimation for multi-baseline InSAR data stacks. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014. 52(11): p. 6807-6817.
- [7] Weissgerber, F., et al., *A Temporal Estimation of Entropy and Its Comparison With Spatial Estimations on PolSAR Images*. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2016. 9(8): p. 3809-3820.
- [8] Richards, M.A., A beginner's guide to interferometric SAR concepts and signal processing [aess tutorial iv]. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 2007. 22(9): p. 5-29.
- [9] Ferraioli, G., et al., Parisar: Patch-based estimation and regularized inversion for multibaseline SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2018. 56(3): p. 1626-163
- [10] Deledalle, C.-A., et al., Exploiting patch similarity for SAR image processing: the nonlocal paradigm. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2014. 31(4): p. 69-78.
- [11] Strozzi, T., et al., Glacier motion estimation using SAR offset-tracking procedures. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2002. 40(11): p. 2384-2391.
- [12] Deledalle, C.-A., L. Denis, and F. Tupin, NL-InSAR: Nonlocal interferogram estimation. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010. 49(4): p. 1441-1452.
- [13] Fornaro, G., et al., CAESAR: An approach based on covariance matrix decomposition to improve multibaseline-multitemporal interferometric SAR processing. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2015. 53(4): p. 2050-2065.
- [14] Jackson, J.E., A user's guide to principal components. Vol. 587. 2005: John Wiley & Sons.
- [15] Fatoyinbo, T., et al., AfriSAR: Mondah Forest Tree Species, Biophysical, and Biomass Data, Gabon, 2016. ORNL DAAC, 2018.