

ارزیابی توانمندی داده‌های راداری با گشایش مصنوعی با قطبیدگی کامل و فشرده در طبقه‌بندی پوشش زمینی

نیما فلاح نفری^۱، سعید همایونی^۲، عبدالرضا صفری^۳، وحید اکبری^۴

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی، دانشگاه تهران

nm.fallah@ut.ac.ir

۲. استادیار، دپارتمان جغرافیا، محیط‌زیست و ژئوماتیک، دانشگاه اتاوا

saeid.homayouni@uottawa.ca

۳. دانشیار، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی، دانشگاه تهران

asafari@ut.ac.ir

۴. پژوهشگر پسادکتری، دپارتمان فیزیک و تکنولوژی، UiT- The Arctic University of Norway

vahid.akbari@uit.no

چکیده

قطبیدگی فشرده حالتی از تصویربرداری راداری با گشایش مصنوعی است که قابلیت بازسازی داده‌های قطبیده کامل را نیز داراست. کارایی این روش تا به امروز نه‌تنها از نقطه نظر فنی بلکه از نظر اقتصادی (کاهش پیچیدگی‌های سنجنده، هزینه‌ها، و وزن آن) نیز تأیید شده است. این تحقیق با دید کاربردی به بررسی محتوای اطلاعاتی حالت‌های قطبیدگی فشرده و کامل پرداخته است. به این منظور نتایج حاصل از طبقه‌بندی کننده ویشارت برای داده‌های قطبیده کامل و فشرده در باند C مربوط به ناحیه‌ای شامل پوشش‌های مسکونی، جنگلی، و آبی مقایسه شده‌اند. نتایج این پژوهش نشان‌گر این است که هرچند استفاده از داده‌های قطبیده کامل به نتایج با دقت بالایی می‌انجامد، اما با دقت مناسبی می‌توان همان نتایج را با استفاده از داده‌های قطبیده فشرده به دست آورد.

واژه‌های کلیدی: رادار با گشایش مصنوعی، قطبیدگی کامل، قطبیدگی فشرده، طبقه‌بندی کننده ویشارت.

۱- مقدمه

امروزه داده‌های سنجش‌ازدوری قطبیده‌ی راداری با گشایش مصنوعی^۱ با توجه به عدم وابستگی به شرایط جوی و روشنایی، در حوزه‌های گوناگونی از علوم ژئوماتیک و زمین از جمله طبقه‌بندی، پایش تغییرات، و تخمین پارامترهای فیزیکی پدیده‌های مختلف مورد توجه محققان قرار گرفته است. به صورت معمول سیستم‌های راداری حداقل در یکی از سه قطبیدگی یگانه، دوگانه، و کامل^۲ توانایی برداشت داده از عوارض سطح زمین را دارند. در میان حالت‌های مختلف قطبیدگی، داده‌های قطبیده کامل به دلیل محتوای بالای اطلاعاتی از برتری به سزایی برخوردار هستند [۱]. در حالت قطبیدگی کامل، دو موج الکترومغناطیسی با

^۱ Polarimetric data

^۲ Synthetic Aperture Radar (SAR)

^۳ Single, dual, and full polarimetry

قطبش‌های افقی و عمودی، به‌صورت متوالی ارسال شده و امواج پراکنده شده از هر موج، در دو قطبش عمودی و افقی دریافت می‌شود. به بیان دیگر نحوه کارکرد سیستم‌های قطبیده کامل به این صورت است که ابتدا آنتن یک موج با قطبش عمودی (یا افقی) ارسال می‌کند و پس از آن، همان آنتن یک موج دیگر عمود بر موج اولیه ارسال می‌کند. به علت وجود دو موج ارسالی، برای جلوگیری از افت توان تفکیک‌گر راستای آزیموت نسبت به قطبیدگی دوگانه، باید فرکانس ارسال پالس دو برابر شود. دو برابر شدن فرکانس ارسال پالس علاوه بر افزودن پیچیدگی سنجنده، منجر به نصف شدن پهنای پوشش و افزایش زمان برداشت مجدد^۶ نیز می‌شود [۱]، [۲].

از آنجایی که پهنای پوشش و زمان برداشت مجدد بالا در برخی کاربردها ضروریست و در حالت قطبیدگی کامل با محدودیت‌هایی روبه‌رو هستیم، راه حل نوینی در تصویربرداری راداری قطبیده به نام قطبیدگی فشرده^۷ ارائه شده است. برای اولین بار مفهوم قطبیدگی فشرده، در سال ۲۰۰۲ توسط Souyris معرفی گردید [۲]. سیستم‌های قطبیدگی فشرده ساختار ساده‌تر و نیز ارزان‌تری نسبت به سیستم‌های قطبیده کامل دارند و می‌توانند بدون محدودیت‌های ذکر شده عمل کنند [۳].

قطبیدگی فشرده ساختار ارسال و دریافت موج مشابه با قطبیدگی دوگانه دارد. با این تفاوت که در آن قطبش موج ارسالی نسبت به حالت‌های معمول افقی و عمودی متفاوت است. به این ترتیب که، یک موج یا با قطبش خطی که نسبت به محور افقی ۴۵ درجه زاویه دارد (حالت $\pi/4$)، و یا با قطبش دایره‌ای (حالت $\pi/2$) ارسال می‌شود، سپس موج بازتابیده شده نیز به‌صورت هم‌زمان در دو قطبش افقی و عمودی دریافت می‌شود. یکی از قابلیت‌های مهم داده‌های قطبیده فشرده این است که با استفاده از این داده‌ها می‌توان داده‌های قطبیده کامل را بازسازی نمود. این در حالی است که داده‌های قطبیده‌ی دیگر مانند قطبیده یگانه و دوگانه این قابلیت را ندارد.

تاکنون چندین الگوریتم برای بازسازی داده‌های قطبیده کامل از داده‌های حالت فشرده ارائه شده است که از این میان می‌توان به سه الگوریتم اشاره نمود که توسط Souyris در سال ۲۰۰۲ [۲]، nord در سال ۲۰۰۹ [۴]، و Yin [۵] در سال ۲۰۱۵ ارائه شده‌اند. بررسی‌های اخیر نشان‌گر این واقعیت است که با بازسازی داده‌های قطبیده کامل از داده‌های قطبیده فشرده می‌توان در برخی کاربردها نتایج مشابه با داده‌های قطبیده کامل را حاصل نمود [۶]، [۷].

در سال‌های اخیر پژوهش‌های دیگری با محوریت بررسی کاربردهای بالقوه و ارزیابی عملکرد قطبیدگی فشرده انجام گرفته است. به‌طور مثال در سال ۲۰۱۰، Charbonneau و همکاران به کاربردهایی مانند طبقه‌بندی و پایش محصولات کشاورزی و رطوبت خاک و شناسایی کشتی‌ها و یخ‌های دریایی اشاره نمودند [۶]. Truong-Loi و همکاران در سال ۲۰۱۲ مطالعه‌ای در مورد توانایی این نوع داده‌ها در تخمین زیست‌توده انجام و نتایج جالب و امیدوارکننده‌ای ارائه دادند [۸]. در همین سال Haiyan Li و نیز در سال ۲۰۱۴ Hong Zhang امکان شناسایی عوارض و سازه‌های ساخت بشر (عوارض با ساختار عمودی) را با استفاده از فاز نسبی، با دقت مناسبی محقق دانستند [۹]، [۱۰]. همچنین طی سال‌های ۲۰۱۴ و ۲۰۱۵ تحقیقاتی توسط Yu Li، Paes و Collins روی قابلیت این داده‌ها در نظارت بر دریاها و شناسایی پدیده‌هایی مانند لکه‌های نفتی و کوه‌های یخ انجام شده است [۱۱]، [۱۲]، [۱۳].

‡Polarization
•Resolution
‡Revisiting time
‡- Compact polarimetry

در این مقاله، به مقایسه توانایی داده‌های قطبیده کامل و فشرده در حالت $\pi/4$ در تشخیص و شناسایی پوشش‌های زمینی پرداخته شده است. به این منظور داده‌های قطبیده کامل و فشرده از منطقه‌ای شامل سه کلاس پوشش گیاهی، منطقه شهری، و اقیانوس تهیه گردیده است. از داده‌های قطبیده فشرده با استفاده از الگوریتم Souyris [۲]، داده‌های قطبیده کامل نیز بازسازی شده و سپس با استفاده از طول ویشارت^۸ این سه گروه داده قطبیده کامل، فشرده، و کامل بازسازی شده طبقه‌بندی شده‌اند. در ادامه پس از مروری بر دو مدل قطبیدگی کامل و فشرده و همچنین طبقه‌بندی کننده ویشارت، با ارزیابی کمی نتایج حاصل از این طبقه‌بندی‌ها، به مقایسه قطبیدگی کامل و فشرده پرداخته می‌شود.

۲- روش شناسی پژوهش

در این بخش روابط و مبانی ریاضی به کار رفته در این پژوهش معرفی شده است. نخست روابط و مدل‌های دو حالت قطبیدگی کامل و فشرده شرح داده می‌شود. سپس نحوه بازسازی داده‌های قطبیده کامل از داده‌های فشرده بیان می‌گردد و در انتها الگوریتم طبقه‌بندی کننده ویشارت برای داده‌های قطبیده راداری معرفی می‌گردد.

۲-۱- قطبیدگی کامل و فشرده

برای بررسی فرآیند پراکنش امواج راداری از عارضه مورد بررسی، از ماتریس پراکنش \mathbf{S} استفاده می‌شود. این ماتریس بیان‌گر دامنه و فاز سیگنال بازگشتی در چهار ترکیب از قطبش‌های خطی افقی و عمودی در قطبیدگی کامل است؛ به عبارت دیگر، این ماتریس معرف رابطه بین بردارهای جونز^۹ امواج ارسالی (\mathbf{E}^i) و دریافتی (\mathbf{E}^S) در سیستم مختصات موج ارسالی است:

$$\mathbf{E}^S = \frac{e^{-jkr}}{r} \mathbf{S} \mathbf{E}^i \quad (1)$$

در این رابطه k عدد موج و r فاصله‌ی بین آنتن و هدف است. ماتریس پراکنش \mathbf{S} با پایه‌های افقی (h) و عمودی (v) به صورت زیر تعریف می‌شود [۲]:

$$\mathbf{S} = \begin{pmatrix} S_{hh} & S_{hv} \\ S_{vh} & S_{vv} \end{pmatrix} \quad (2)$$

تئوری معکوس پذیری^{۱۰} ایجاب می‌کند که دو پارامتر S_{hv} و S_{vh} با هم برابر باشند؛ در این حالت بردار پراکنش \vec{k}_{r0} به این صورت تعریف می‌شود:

$$\vec{k}_{\text{r0}} = [S_{hh} \quad \sqrt{2}S_{hv} \quad S_{vv}]^T \quad (3)$$

بر اساس بردار پراکنش \vec{k}_{r0} ماتریس کوواریانس^{۱۱} سیستم قطبیدگی کامل به صورت زیر به دست می‌آید:

۸- Wishart distance
 ۹- Scattering matrix
 ۱۰ Jones vectors
 ۱۱ Reciprocity theorem
 ۱۲ Covariance matrix

$$\mathbf{C} = \vec{k}_{r0} \vec{k}_{r0}^* = \begin{bmatrix} |S_{hh}|^2 & \sqrt{2} S_{hh} S_{hv}^* & S_{hh} S_{vv}^* \\ \sqrt{2} S_{hv} S_{hh}^* & 2 |S_{hv}|^2 & \sqrt{2} S_{hv} S_{vv}^* \\ S_{vv} S_{hh}^* & \sqrt{2} S_{vv} S_{hv}^* & |S_{vv}|^2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

به صورت مشابه با قطبیدگی کامل، می‌توان بردار پراکنش را برای قطبیدگی فشرده در حالت $\pi/4$ را به این صورت تعریف کرد [۲]:

$$\vec{k}_{\pi/4} = [S_{hh} + S_{hv} \quad S_{vv} + S_{hv}]^T / \sqrt{2} \quad (5)$$

ماتریس کوواریانس نیز به صورت مشابه محاسبه می‌شوند:

$$\mathbf{C}_{\frac{\pi}{4}} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} |S_{hh}|^2 & S_{hh} S_{vv}^* \\ S_{vv} S_{hh}^* & |S_{vv}|^2 \end{bmatrix} + \frac{1}{2} \begin{bmatrix} |S_{hv}|^2 & |S_{hv}|^2 \\ |S_{hv}|^2 & |S_{hv}|^2 \end{bmatrix} + \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 2 \Re(S_{hh} S_{hv}^*) & S_{hh} S_{hv}^* + S_{vv} S_{hv} \\ S_{hh} S_{hv}^* + S_{vv} S_{hv} & 2 \Re(S_{vv} S_{hv}^*) \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\mathbf{C}_{\frac{\pi}{4}} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} \\ C_{12}^* & C_{22} \end{bmatrix} \quad (7)$$

نماد * به معنای مزدوج مختلط است. ماتریس فوق و همچنین ماتریس کوواریانس قطبیده کامل، ماتریس‌های هرمیتی هستند به این معنا که ترانهاده و مزدوج مختلط آن با خودش برابر است.

از ماتریس کوواریانس حالت فشرده می‌توان پارامترهای گوناگونی مانند درجه قطبیدگی، اختلاف فاز نسبی، و زاویه گشودگی بیضی قطبیده را استخراج نمود [۱۴]، [۱۵]؛ با استفاده از این پارامترها، مکانیزم پراکنش حجمی، دو برخوردی، و سطحی قابل بررسی هستند. همچنین از این ماتریس می‌توان به صورت مستقیم در الگوریتم‌های مختلفی مانند طبقه‌بندی کننده ویشارت استفاده نمود. این در حالی است که بسیاری از الگوریتم‌های راداری پرکاربرد مانند تجزیه‌های Yamaguchi, HAAlpha, Freeman، و ... صرفاً خاص داده‌های قطبیده کامل هستند [۱۶].

البته همان‌گونه که در بخش قبل نیز ذکر شد، یکی از ویژگی‌های متمایز کننده داده‌های فشرده این است که با استفاده از این داده‌ها می‌توان داده‌های قطبیده کامل را بازسازی نمود. انجام این بازسازی بر پایه در نظر گرفتن فرض تقارن محوری است. این فرض در بیشتر پدیده‌های طبیعی صادق است اما در برخی موارد مانند وقتی که جهت قرارگیری ساختمان‌ها در راستای حرکت آزیموتی سنجنده نباشد، دیگر صادق نیست. البته در این موارد نیز می‌توان با کاهش رزولوشن این مسئله را برطرف نمود. تحت فرض تقارن محوری ضرایب $S_{vv} S_{hv}^*$ و $S_{hh} S_{hv}^*$ در ماتریس کوواریانس قطبیده کامل برابر صفر خواهند بود که در این شرایط نه المان مستقل این ماتریس به پنج المان کاهش می‌یابد. این پنج المان مستقل عبارتند از سه عدد حقیقی $|S_{hh}|^2$ ، $|S_{hv}|^2$ ، و $|S_{vv}|^2$ ، و $S_{hh} \cdot S_{vv}^*$ که یک عدد مختلط است. برای بازسازی ماتریس کوواریانس قطبیده کامل، با در نظر گرفتن یک قید فیزیکی این پنج المان مجهول با چهار المان معلوم ماتریس کوواریانس قطبیده فشرده محاسبه می‌شود [۲]. این قید به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\frac{\langle |S_{hv}|^2 \rangle}{\langle |S_{hh}|^2 + |S_{vv}|^2 \rangle} = \frac{1 - |\rho|}{4} \quad (8)$$

در این رابطه $\langle \rangle$ نشانگر میانگین‌گیری مکانی است. پارامتر $|\rho|$ نیز صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\rho = \frac{\langle S_{hh} \cdot S_{vv}^* \rangle}{\sqrt{\langle |S_{hh}|^2 \rangle \cdot \langle |S_{vv}|^2 \rangle}} \quad (9)$$

در یک روند تکراری از روابط (۸) و (۹)، $|S_{hv}|^2$ محاسبه می‌شود. به این ترتیب ماتریس کوواریانس قطبیده کامل از ماتریس کوواریانس قطبیده فشرده بازسازی می‌شود:

$$\mathbf{C}_{reconstructed} = \begin{bmatrix} C_{11} - |S_{hh}|^2 & \cdot & C_{12} - |S_{hh}|^2 \\ \cdot & 2 |S_{hv}|^2 & \cdot \\ (C_{12} - |S_{hh}|^2)^* & \cdot & C_{22} - |S_{vv}|^2 \end{bmatrix} \quad (10)$$

۲-۲- طبقه‌بندی کننده ویشارت

بردار پراکنش داده‌های قطبیده از تابع توزیع نرمال چندمتغیره مختلط تبعیت می‌کند؛ به همین علت ماتریس کوواریانس این داده‌ها که حاصل ضرب بردار پراکنش در مزدوج ترانهاده خودش است، از تابع توزیع ویشارت پیروی می‌کند [۱۷]. تبعیت ماتریس کوواریانس داده‌های قطبیده از تابع توزیع ویشارت زمینه‌ساز استفاده بهینه و مناسب از این داده‌ها برای کاربردهای طبقه‌بندی است.

به طور معمول برای کاهش نویز اسپیکل^۳ و فشرده‌سازی داده‌های قطبیده، این داده‌ها اصطلاحاً چندمنظر^۴ می‌شود. در گام نخست و به منظور چندمنظر سازی داده‌های قطبیده، در یک همسایگی مشخص از ماتریس‌های کوواریانس (هر پیکسل) میانگین‌گیری می‌شود [۱۸]:

$$Z = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n C_k \quad (11)$$

در این رابطه، n نشان دهنده تعداد منظرها و C_k ماتریس کوواریانس است. با فرض این که nZ از تابع توزیع ویشارت پیروی می‌کند، ماتریس A به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$A = nZ = \sum_{k=1}^n C_k \quad (12)$$

به این ترتیب برای محاسبه‌ی احتمال تعلق هر پیکسل به کلاس خاص از تابع چگالی احتمال ویشارت به صورت زیر استفاده می‌شود:

$$p_A(\mathbf{A}) = \frac{|A|^{n-q} \exp[-\text{Tr}(C_m^{-1}A)]}{K(n,q)|C_m|^n} \quad (13)$$

که در این رابطه، $\text{Tr}(C_m^{-1}A)$ بیانگر جمع عناصر قطر اصلی ماتریس حاصل از $C_m^{-1}A$ است. $K(n,q)$ نیز از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$K(n,q) = \pi^{\frac{1}{2}q(q-1)} \Gamma(n), \dots, \Gamma(n-q+1) \quad (14)$$

در رابطه بالا Γ تابع گاما و q بعد ماتریس کوواریانس است که در حالت قطبیدگی کامل $q=3$ و در حالت فشرده $q=2$ است. همچنین ماتریس C_m معرف ماتریس کوواریانس کلاس ω_m است. این ماتریس با استفاده از داده‌های آموزشی برای هر کلاس با میانگین‌گیری از ماتریس‌های کوواریانس همان کلاس محاسبه می‌شود. به این ترتیب احتمال تعلق هر پیکسل به همه کلاس‌ها محاسبه شده و مطابق رابطه زیر پیکسل مورد نظر به کلاسی تعلق می‌یابد که بیشترین احتمال عضویت را داشته باشد:

$$P(\omega_m|C) \geq P(\omega_j|C), \text{ for all } j \neq m \quad (15)$$

برای افزایش سرعت محاسبات با گرفتن لگاریتم از رابطه فوق و تغییر علامت و حذف جمله‌های ثابت، رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$d_w(Z, \omega_m) = \ln|C_m| + \text{Tr}(C_m^{-1}A) \quad (16)$$

پارامتر d_w طول ویشارت نام دارد و بیانگر فاصله هر پیکسل از نماینده هر کلاس است. لذا کلاسی که کمترین فاصله را با پیکسل مورد نظر داشته، کلاس پوشش دهنده آن پیکسل در نظر گرفته می‌شود. یکی از مزایای مهم استفاده از این الگوریتم عدم وابستگی به بعد ماتریس ورودی است. به عبارت دیگر از این الگوریتم هم برای داده‌های کامل با ماتریس کوواریانس با ابعاد 3×3 و هم برای داده‌های فشرده با ماتریس کوواریانس با

۳ Speckle noise

۴ Multi-look

ابعاد 2×2 می‌توان استفاده کرد. بدیهی است که به علت سرعت بالا در پردازش‌ها استفاده از طول ویشارت مرسوم‌تر از استفاده مستقیم از توابع احتمالاتی است.

۳- داده‌های راداری مورد استفاده

در این تحقیق از داده‌های قطبیده کامل که توسط سنجنده RADARSAT-2 از شهر سان‌فرانسیسکو در باند C (طول موجی معادل ۵,۵ سانتی‌متر) اخذ گردیده، برشی به ابعاد 530×530 پیکسل انتخاب شده است. این برش دارای سه کلاس پوشش گیاهی، منطقه مسکونی، و اقیانوس است که به ترتیب می‌تواند نماینده مکانیزم‌های پراکنش^۵ لوجمی، دوبرخوردی، و سطحی در نظر گرفته شوند. از این داده‌های خام با استفاده از روابط بخش ۱-۲ و با در نظر گرفتن فرض معکوس‌پذیری ($S_{hv} = S_{vh}$)، ماتریس کوواریانس قطبیده کامل با ابعاد 3×3 تولید شده است. سپس به منظور کاهش نویز اسپکل دو گام پیش‌پردازشی شامل اعمال فرآیند چندمنظر سازی با پنجره‌ای به اندازه 2×2 و استفاده از فیلتر boxcar با پنجره‌ای به ابعاد 3×3 ، انجام گرفته است. استفاده از این فیلتر به منظور کاهش نویز داده‌های راداری مرسوم است. شکل ۱ تصویر رنگی حاصل از داده‌های قطبیده پس از پیش‌پردازش و همچنین تصویر Google Earth از همان منطقه را نشان می‌دهد.



(ب)

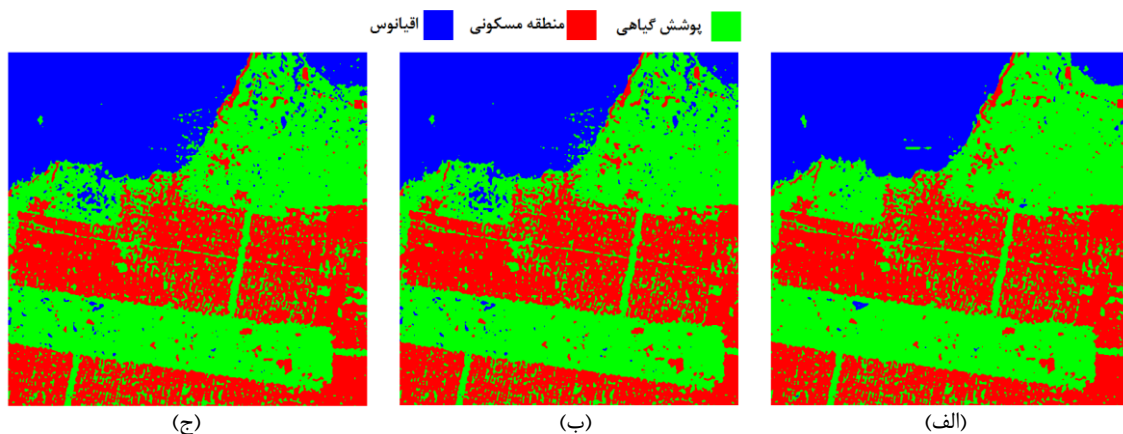
(الف)

شکل ۱. الف) تصویر حاصل از داده‌های قطبیده کامل با ترکیب رنگی قرمز: $|S_{hh} - S_{vv}|$ ، سبز: $|S_{hv}|$ ، آبی: $|S_{hh} + S_{vv}|$. ب) تصویر Google Earth از منطقه San Francisco

قابل ذکر است که به علت در دسترس نبودن داده‌های قطبیده فشرده، در این تحقیق از داده‌های قطبیده کامل و با استفاده از روابط مطرح‌شده در بخش ۱-۲، داده‌های حالت فشرده شبیه‌سازی شده‌اند. این داده‌های شبیه‌سازی‌شده در واقع همان ماتریس‌های قطبیده فشرده با ابعاد 2×2 هستند. در پردازشی دیگر، با استفاده از ماتریس‌های قطبیده فشرده، ماتریس‌های قطبیده کامل با ابعاد 3×3 بازسازی شده‌اند. به این ترتیب سه گروه داده شامل ماتریس‌های قطبیده کامل، قطبیده فشرده، و قطبیده کامل بازسازی‌شده به عنوان ورودی برای طبقه‌بندی کننده ویشارت آماده شده‌اند. ارزیابی نتایج حاصل از طبقه‌بندی این سه گروه داده در بخش بعدی ارائه شده است.

۴- نتایج

الگوریتم ویشارت برای طبقه‌بندی سه گروه داده قطبیده کامل، فشرده، و کامل بازسازی شده به کار گرفته شده است. به منظور ارزیابی دقت نتایج حاصل از سه طبقه‌بندی، داده‌های واقعیت زمینی به صورت چشمی انتخاب شده‌اند. برای بررسی کمی نتایج پارامترهایی نظیر دقت کلی،^۶ ضریب کاپا،^۸ دقت کاربر،^۹ و دقت تولیدکننده^{۱۰} برای هر طبقه‌بندی محاسبه گردیده است. دقت کلی و ضریب کاپا بیانگر عملکرد کلی هر طبقه‌بندی و دقت‌های کاربر و تولیدکننده نشانگر عملکرد طبقه‌بندی هر کلاس است. دقت کلی و ضریب کاپا طبقه‌بندی به ترتیب برای داده‌های قطبیده کامل ۹۲/۷۹٪ و ۸۸/۰۱٪، برای داده‌های فشرده ۸۹/۰۹٪ و ۸۲/۰۵٪، و برای داده‌های کامل بازسازی شده ۸۹/۵۳٪ و ۸۲/۷۶٪ است. نتایج عمدتاً یکسان حاصل از طبقه‌بندی‌های دو داده فشرده و قطبیده کامل بازسازی شده نشان‌گر این است که با بازسازی داده‌های قطبیده کامل از داده‌های فشرده به محتوای اطلاعاتی این داده‌های اضافه نمی‌شود. همچنین با توجه به اختلاف ۵/۹۶ و ۵/۲۵ درصدی ضریب کاپای این دو طبقه‌بندی با ضریب کاپای مربوط به طبقه‌بندی حاصل از داده‌های قطبیده کامل واقعی، می‌توان نتیجه گرفت داده‌های قطبیده فشرده به صورت مناسبی همانند داده‌های قطبیده کامل عمل می‌کنند. در شکل ۲ نقشه طبقه‌بندی با استفاده از داده‌ی قطبیده کامل، فشرده و بازسازی شده از حالت فشرده نشان داده شده است.



شکل ۲. نقشه طبقه‌بندی حاصل از (الف) داده‌های قطبیده کامل، (ب) داده‌های قطبیده فشرده، (ج) داده‌های قطبیده کامل بازسازی شده.

برای هر کلاس دقت کاربر و دقت تولیدکننده مربوط به همان طبقه‌بندی تهیه گردید و در جدول ۱ ارائه شده است. دقت‌های کاربر و تولیدکننده برای طبقه‌بندی حاصل از داده‌های قطبیده فشرده و کامل بازسازی شده به صورت میانگین برای تمام کلاس‌ها، کم‌تر از نیم درصد باهم اختلاف دارند. همان‌طور که در شکل ۲ و نیز در جدول ۱ مشهود است، نقطه ضعف اصلی داده‌های حالت فشرده در تمیز دادن دو کلاس پوشش جنگلی و اقیانوس است که به ترتیب دارای دو مکانیزم پراکنشی حجمی و سطحی هستند.

جدول ۱. دقت‌های کاربر و تولیدکننده برای طبقه‌بندی‌های حاصل از سه گروه داده

۹ Overall accuracy
 ۱۰ Kappa coefficient
 ۱۱ Prodecer's accuracy
 ۱۲ User's accuracy

داده‌های کامل بازسازی شده		داده‌های فشرده		داده‌های کامل		
دقت کاربر	دقت تولیدکننده	دقت کاربر	دقت تولیدکننده	دقت کاربر	دقت تولیدکننده	کلاس
۸۷/۲۳	۹۷/۲۷	۸۵/۸۱	۹۷/۶۵	۸۷/۶۱	۹۷/۵۵	منطقه مسکونی
۸۹/۹۲	۸۳/۷۲	۹۰/۵۸	۸۲/۴۲	۹۷/۱۴	۸۵/۷۵	پوشش گیاهی
۹۷/۴۶	۸۲/۴۰	۹۷/۴۶	۸۲/۷۶	۱۰۰/۰۰	۱۰۰/۰۰	اقیانوس
۹۱/۵۳	۸۷/۸۰	۹۱/۲۹	۸۷/۶۱	۹۴/۹۲	۹۴/۴۴	مجموع

۵- نتیجه‌گیری

هدف اصلی این پژوهش، مقایسه توانایی داده‌های قطبیده کامل و فشرده در طبقه‌بندی پوشش زمینی بود. به این منظور، داده‌های قطبیده کامل از منطقه‌ای در شهر سان‌فرانسیسکو با سه پوشش گیاهی، مسکونی، و اقیانوس انتخاب گردید و با استفاده از این داده‌ها، داده‌های قطبیده فشرده شبیه‌سازی شدند. سپس به منظور بررسی قابلیت داده‌های فشرده در بازسازی داده‌های کامل، با استفاده از داده‌های قطبیده فشرده، داده‌های قطبیده کاملی بازسازی گردید. از طبقه‌بندی کننده ویشارت به علت دارا بودن قابلیت پیاده‌سازی بر روی هر دو داده‌ی فشرده و کامل، برای طبقه‌بندی این داده‌ها استفاده شده است. با توجه به بررسی‌های انجام‌شده روی نتایج حاصل از این سه طبقه‌بندی، دو نکته کلی قابل نتیجه‌گیری است:

- داده‌های قطبیده فشرده در حالت $\pi/4$ به صورت مناسبی می‌تواند برای طبقه‌بندی پوشش‌های زمینی مورد نظر، همانند داده‌های قطبیده کامل عمل کند.

نتایج عمدتاً یکسان حاصل از طبقه‌بندی‌های دو داده قطبیده فشرده و قطبیده کامل بازسازی‌شده نشان‌گر این است که با بازسازی داده‌های قطبیده کامل از داده‌های فشرده به محتوای اطلاعاتی این داده‌های اضافه نمی‌شود. هر چند که جهت استفاده از برخی الگوریتم‌های خاص داده‌های قطبیده کامل، به بازسازی داده‌های قطبیده کامل از داده‌های فشرده نیاز است.

در این تحقیق از داده‌های قطبیده باند C داده‌های استفاده شده است؛ در تحقیقات آتی علاوه بر بررسی داده‌های قطبیده فشرده در باندهای دیگر، می‌توان پوشش‌های زمینی دیگر را نیز مورد بررسی قرار داد.

مراجع

1. P. C. Dubois-Fernandez, J.-C. Souyris, S. Angelliaume, and F. Garestier, "The compact polarimetry alternative for spaceborne SAR at low frequency," *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, vol. 46, pp. 3208-3222, 2008.
2. J.-C. Souyris, P. Imbo, R. Fjørtoft, S. Mingot, and A.-S. Lee, "Compact polarimetry based on symmetry properties of geophysical media: The $\pi/4$ mode," *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, vol. 43, pp. 634-646, 2005.
3. R. Touzi, "Compact-hybrid versus linear-dual and fully polarimetric SAR," in *Proc. of POLinSAR*, 2009.
4. M. E. Nord, T. L. Ainsworth, J.-S. Lee, and N. J. Stacy, "Comparison of compact polarimetric synthetic aperture radar modes," *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, vol. 47, pp. 174-188, 2009.
5. J. Yin, W. Moon, and J. Yang, "Model-Based Pseudo-Quad-Pol Reconstruction from Compact Polarimetry and Its Application to Oil-Spill Observation," *Journal of Sensors*, vol. 2015, 2015.

6. F. Charbonneau, B. Brisco, R. Raney, H. McNairn, C. Liu, P. Vachon, et al., "*Compact polarimetry overview and applications assessment*," Canadian Journal of Remote Sensing, vol. 36, pp. S298-S315, 2010.
7. B. Souissi, M. Ouarzeddine, and A. Belhadj-Aissa, "*Optimal SVM Classification for Compact Polarimetric Data Using Stokes Parameters*," Journal of Mathematical Modelling and Algorithms in Operations Research, vol. 13, pp. 433-446, 2014.
8. M.-L. Truong-Loi, P. Dubois-Fernandez, and E. Pottier, "*Assessment of forest biomass retrieval from compact-pol SAR data*," Canadian Journal of Remote Sensing, vol. 38, pp. 452-460, 2012.
9. H. Li, W. Perrie, Y. He, S. Lehner, and S. Brusch, "*Target detection on the ocean with the relative phase of compact polarimetry SAR*," Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on, vol. 51, pp. 3299-3305, 2013.
10. L. Xie, H. Zhang, C. Wang, B. Zhang, and F. Wu, "*High-voltage transmission towers detection using hybrid polarimetric SAR data*," in Earth Observation and Remote Sensing Applications (EORSA), 2014 3rd International Workshop on, 2014, pp. 353-356.
11. Y. Li, H. Lin, Y. Zhang, and J. Chen, "*Analysis of polarimetric features from CTRLR compact polarimetric SAR data for discriminating oil slick damping status*," in Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2014 IEEE International, 2014, pp. 3490-3493.
12. R. L. Paes, A. Buono, F. Nunziata, and M. Migliaccio, "*On the sensitivity analysis of the Compact-Polarimetry SAR architectures for maritime targets detection*," in SPIE Remote Sensing, 2014, pp. 92401A-92401A-11.
13. M. J. Collins, M. Denbina, B. Minchew, C. E. Jones, and B. Holt, "*On the Use of Simulated Airborne Compact Polarimetric SAR for Characterizing Oil–Water Mixing of the Deepwater Horizon Oil Spill*," Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, IEEE Journal of, vol. 8, pp. 1062-1077, 2015.
14. S. Ghods, V. Shojaeddini, and Y. Maghsoodi, "*Novel Approach for Better Interpretation of RADARSAT2 C-Band Data in Compact Polarimetry Mode*," 2, vol. 3, pp. 0-0, 2015.
15. R. K. Raney, J. T. Cahill, G. Patterson, and D. B. J. Bussey, "*The m-chi decomposition of hybrid dual-polarimetric radar data with application to lunar craters*," Journal of Geophysical Research: Planets (1991–2012), vol. 117, 2012.
16. R. Shah Hosseini, I. Entezari, S. Homayouni, M. Motagh, and B. Mansouri, "*Classification of polarimetric SAR images using Support Vector Machines*," Canadian Journal of Remote Sensing, vol. 37, pp. 220-233, 2011.
17. J.-S. Lee, M. R. Grunes, and R. Kwok, "*Classification of multi-look polarimetric SAR imagery based on complex Wishart distribution*," International Journal of Remote Sensing, vol. 15, pp. 2299-2311, 1994.