

طبقه‌بندی پوشش‌های جنگلی با استفاده از داده‌های پلاریمتری فشرده

امیر آقابالائی*^۱، حمید عبادی^۲، یاسر مقصودی^۳

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد سنجش از دور-دانشکده مهندسی نقشه‌برداری-دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی
a.ghabalaei@mail.kntu.ac.ir

^۲ دانشیار گروه سنجش از دور-دانشکده مهندسی نقشه‌برداری-دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی
ebadi@kntu.ac.ir

^۳ استادیار گروه سنجش از دور-دانشکده مهندسی نقشه‌برداری-دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی
ymaghsoudi@kntu.ac.ir

(تاریخ دریافت اسفند ۱۳۹۳، تاریخ تصویب آبان ۱۳۹۴)

چکیده

اخیرا رشد قابل توجهی در سیستم‌های Dual-Polarimetry (DP) به‌وجود آمده است که Compact Polarimetry (CP) نامیده می‌شود. CP یک سیستم تصویربرداری DP است که چندین مزیت مهم را نسبت به دیگر سیستم‌های چندپلاریزاسیون SAR دارد. از جمله آن‌ها می‌توان به قابلیت کاهش پیچیدگی سیستم، هزینه، وزن و نرخ داده‌های سیستم SAR اشاره کرد. یکی از زمینه‌های تحقیقاتی مورد توجه سنجش از دور راداری مطالعه جنگل‌ها است، چراکه نقش مهمی را در کنترل آب و هوا بازی می‌کنند. در این تحقیق پتانسیل داده‌های CP در طبقه‌بندی مناطق جنگلی با استفاده از طبقه‌بندی کننده ویشارت مختلط و به دو صورت بررسی و ارزیابی شده است. یکبار با استفاده از ماتریس‌های کواریانس 2×2 دو مد $\pi/4$ و Circular Transmit-Linear Receive (CTLR)، و بار دیگر با به‌کارگیری ماتریس-های کواریانس 3×3 بازسازی شده از این دو مد CP. سپس نتایج حاصل با نتیجه به‌دست آمده از مد Full Polarimetry (FP) مقایسه و ارزیابی شدند. نتایج نشان دادند که در طبقه‌بندی پوشش‌های جنگلی، مد $\pi/4$ دقت کلی طبقه‌بندی بهتری را نسبت به مد CTLR فراهم می‌کند.

واژگان کلیدی: Compact پلاریمتری، طبقه‌بندی پوشش‌های جنگلی، طبقه‌بندی کننده ویشارت مختلط

۱- مقدمه

رشد سریع جمعیت و وجود منابع محدود در کره زمین، نیاز به پایش و مدیریت منابع را آشکارتر می‌کند. تهیه نقشه از پوشش‌های مختلف زمین مانند مناطق شهری، منابع طبیعی، زمین‌های کشاورزی و جنگل‌ها نقش مهم و اساسی در مدیریت و برنامه‌ریزی صحیح دارد. سنجش از دور به‌واسطه پوشش وسیع تصاویر ماهواره‌ای و هزینه کمتر، روشی مناسب در استخراج اطلاعات از پوشش‌های زمینی است. از میان داده‌های مختلف سنجش از دوری، استفاده از داده‌های رادار با روزه مصنوعی (SAR)^۱، به دلیل عدم وابستگی به خورشید و شرایط جوی، بسیار مورد توجه می‌باشد.

تصاویر پلاریمتریک راداری به‌وسیله اکوهای راداری، ترکیب‌های مختلف پلاریزاسیون‌های ارسال و دریافت از پراکنش، شکل می‌گیرند. سیستم‌های تمام پلاریمتری (FP)^۲ بر مبنای ارسال و دریافت پلاریزاسیون‌های خطی افقی و عمودی عمل می‌کنند. همچنین در این سیستم‌ها اطلاعات فاز بین پلاریزاسیون‌های دریافت شده نیز ثبت می‌گردد [۱]. این سیستم چهار پلاریزاسیون ماتریس پراکنش، شامل چهار اندازه‌گیری پس‌پراکنشگر، را تولید می‌کند (HH, HV, VH و VV) که امکان استخراج اطلاعات بیشتری را از هدف می‌دهد.

حقیقتاً مد FP پتانسیل زیاد خود را در مقایسه با اخذ داده از تک کانال، اثبات کرده است. اما از معایب آن، افزایش در فرکانس تکرار پالس (PRF)^۳ و نرخ داده می‌باشد. همچنین نوارهای تصویربرداری آن دو نیم می‌شود، در نتیجه پوشش کاهش می‌یابد و زمان بازبینی ماهواره‌ای تنزل می‌یابد [۲]. پس سیستم‌های Quad-Polarimetry (QP) یا FP علیرغم افزایش عملکردشان، در پهنای نوار و پیچیدگی سیستم، هزینه‌بر هستند [۳].

در حال حاضر چندین سیستم Dual Polarimetry (DP) مانند ENVISat اروپایی، PalSAR ژاپنی، TerraSAR اروپایی و Radarsat-2 کانادایی وجود دارد که یک پلاریزاسیون فرستاده می‌شود، در مقابل دو پلاریزاسیون دریافت می‌شود. این مدهای DP فقط نیمی از ماتریس پراکنش کامل را جمع‌آوری می‌کنند: (HH و VH) یا (VV)

و (HV). این کار ملزومات پردازش داده و محتوای اطلاعاتی تصاویر پلاریمتریک را کاهش می‌دهد. مجموعه داده اخذ شده، همان پوشش را برای ارسال تک پلاریزاسیون دارند. ولی اطلاعات اضافه‌تری را، به علت دو کانال مستقل در دریافت، فراهم می‌کنند. از نقطه نظر سنجنده، مدهای تصویربرداری DP عرض نوار وسیع‌تر و بنابراین پوشش بیشتر منطقه را در مقایسه با تصاویر QP جمع‌آوری می‌کنند. اگرچه محتوای اطلاعاتی درون پیکسلی برای تصاویر DP نسبت به تصاویر QP کمتر است. که این موضوع سبب تمایل به جمع‌آوری داده‌های QP می‌شود [۴].

تاکنون چندین مطالعه در زمینه طبقه‌بندی با استفاده از داده‌های Compact Polarimetry (CP) انجام شده است. مطالعات اخیر در این زمینه را می‌توان در [۵-۷] بررسی کرد. همچنین مطالعات بسیاری در حوزه طبقه‌بندی مناطق جنگلی با استفاده از داده‌های پلاریمتری SAR صورت گرفته است که از جمله آن‌ها می‌توان به [۸-۱۰] اشاره کرد. داده‌های CP به دلیل دارا بودن چندین مزیت مهم نسبت به داده‌های FP از جمله: بخش فضایی ساده‌تر، مقدار داده ارسالی کمتر، عدم کاهش رزولوشن آزیموتی، خطر تداخل^۴ کمتر و به‌ویژه عرض نوار وسیع‌تر می‌توانند داده مناسبی برای پایش و کنترل پوشش‌های جنگلی باشند. همچنین به دلیل برقرار بودن فرض دوم الگوریتم بازسازی Souyris [۱۱] در مناطقی با پراکنش حجمی غالب، این داده‌ها می‌توانند به‌خوبی داده‌های تمام پلاریمتریک را بازسازی کنند. در این جا ما می‌خواهیم پتانسیل این داده‌ها را در طبقه‌بندی مناطق جنگلی بررسی کنیم و نهایتاً نتایج حاصل را با نتایج به‌دست آمده از داده‌های FP مقایسه و ارزیابی کنیم.

۲- سیستم‌های CP

اخیراً رشد قابل توجهی در سیستم‌های DP به‌وجود آمده است [۱۲]. در [۱۱] یک مد DP که CP نامیده می‌شود، ارائه شده است. CP یک سیستم تصویربرداری DP است که چندین مزیت مهم را نسبت به دیگر سیستم‌های چندپلاریزاسیون SAR دارد. این سیستم قابلیت کاهش پیچیدگی سیستم، هزینه، وزن و نرخ داده‌های سیستم SAR را دارد. درحالی‌که تلاش می‌کند تا بسیاری از

^۱ Synthetic Aperture RADAR

^۲ Full Polarimetry

^۳ Pulse Repetition Frequency

^۴ Cross talk

۲-۱- مدهای CP

در حال حاضر سه پیکربندی پلاریزاسیون برای CP وجود دارد:

• مد $\pi/4$

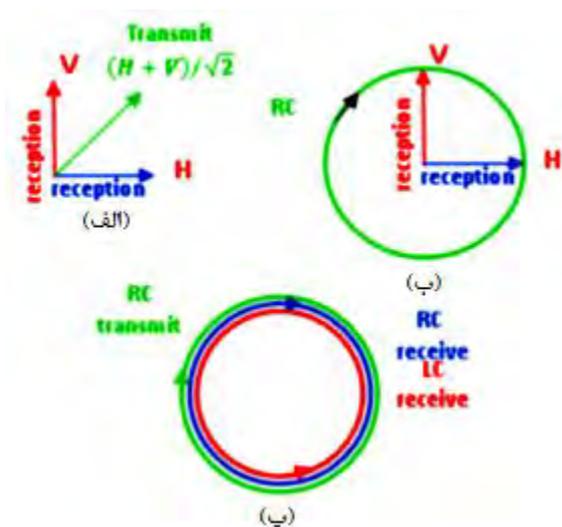
Souyris و همکاران [۱۱] مد $\pi/4$ را معرفی کردند که در آن پلاریزاسیون ارسالی، از برهم‌نهی پلاریزاسیون‌های خطی افقی و عمودی تشکیل می‌شود (H+V). در نتیجه پلاریزاسیون خطی در زاویه ۴۵ درجه نسبت به افق جهت‌گیری می‌کند. رادار، برگشت‌ها را در پلاریزاسیون‌های افقی و عمودی دریافت می‌کند.

• مد CTLR^۷

مد دیگر CP، مد CTLR (ارسال دایره‌ای-دریافت خطی) است. همان‌طور که از نام این مد مشخص است، سیگنال دایره‌ای پلاریزه چپگرد (LCP)^۸ یا راستگرد ارسال می‌شود، و پلاریزاسیون‌های H و V به‌صورت کوهرنس دریافت می‌شوند. سیستم‌های CTLR مزایای مهندسی خاصی دارند که منجر به داده‌های با کیفیت بالاتر می‌شوند [۱۵].

• مد DCP^۹

مد DCP، پلاریزاسیون دایره‌ای راستگرد یا چپگرد را ارسال می‌کند و پلاریزاسیون‌های راستگرد و چپگرد را باهم دریافت می‌کند. شکل (۱) مدهای مختلف CP را نشان می‌دهد.



شکل ۱- سه پیکربندی CP. (الف) مد $\pi/4$, (ب) مد CTLR و (پ) مد

DCP [۱۲]

قابلیت‌های سیستم تمام پلاریمتریک را حفظ کند. فرکانس تکرار پالس و نرخ داده برای عرض نوار داده شده کاهش می‌یابد. مد CP به‌عنوان تعادلی بین عرض نوار و اطلاعات پلاریزاسیون ارائه شده است.

در این پیکربندی پلاریمتریک، فقط یک چرخه ارسال-دریافت به‌جای دو چرخه ارسال-دریافت (در یک سیستم QP) مورد نیاز است. در CP انتخاب سیگنال ارسالی، انتخابی است [۱۳]. انتخاب عاقلانه این پلاریزاسیون‌ها، که برای ارسال و دریافت قرار داده می‌شوند، می‌تواند معماری سیستم را بهینه کند. بنابراین پلاریزاسیون ارسالی، محتوای اطلاعاتی و مد خاصی از DP را مشخص می‌کند [۱۴].

مفهوم CP در سال‌های اخیر پدیدار و چندین مقاله در این موضوع منتشر شده است. CP ضرورتاً برخاسته از یک سیستم تک کاناله در مقابل یک سیستم FP است، که هنگامی که منابع سیستم پلاریمتریک محدود هستند و یا در دسترس نیستند، یک استراتژی موثر می‌باشد [۱۳]. همچنین یک مد اختیاری سازگار برای سیستم‌های تمام پلاریمتریک راداری می‌باشد [۱۵]. مزیت دیگر سیستم‌های CP، فواصل کوتاه بازبینی ماهواره‌ای (۴ روز) است [۱۶].

سیستم‌های SAR با معماری Hybrid-Polarity پیشرفت‌های مهمی را در حوزه سنجش از دور تشکیل می‌دهند [۱۵]. مزیت اصلی این سیستم‌ها آن است که اطلاعات بیشتری را نسبت به مدهای DP استاندارد دارند، درحالی‌که پهنای خیلی بزرگتری را در مقایسه با مدهای QP پوشش می‌دهند. برخی از این ماهواره‌ها در حال حاضر شامل ماهواره‌های RISAT-1 هندی (سیستم فضاپرد CP که در آوریل سال ۲۰۱۲ به منظور مشاهده زمین فرستاده شد)، ALOS-2 ژاپنی و در آینده شامل سنجنده‌های RCM^۳ کانادایی، DESDynI [۱۷] (که در حال حاضر تا زمانی که NASA^۴ به دنبال شریک می‌باشد، به تأخیر افتاده است) و SAOCOM^۵ آرژانتینی (که برای پرتاب بین سال‌های ۲۰۱۵ و ۲۰۱۶ برنامه‌ریزی شده است) می‌شود. این سنسورها قابلیت استفاده از داده‌های CP را در تصاویر عریض نوار دارند. مثلاً RCM پلاریزاسیون دایره‌ای راستگرد (RCP)^۶ را ارسال خواهد کرد و دو پلاریزاسیون خطی متعامد کوهرنس متقابل (RV و RH) را دریافت می‌کند. این کار مد CP را به‌عنوان حالت تصویربرداری اولیه فراهم می‌کند [۵].

^۱ Radar Imaging Satellite

^۲ Advanced Land Observing Satellite

^۳ Radarsat Constellation Mission

^۴ National Aeronautics and Space Administration

^۵ SAR Observation & Communications Satellite

^۶ Right-Circular Polarization

^۷ Circular Transmit-Linear Receive

^۸ Left-Circular Polarization

^۹ Dual Circular Polarimetric

۳-۲- بردار مشاهده و ماتریس‌های کواریانس در مدهای CP

بردار دو بعدی اندازه‌گیری (یا قابل مشاهده) \vec{k}_{CP} ، تصویر ماتریس پس‌پراکنش کامل S در مد ارسال پلاریزاسیون است. ارتباط بین \vec{k}_{CP} و S با رابطه زیر به-دست می‌آید [۲]:

$$\vec{k}_{CP} = S \vec{J}_t \quad (1)$$

که در آن ماتریس S پراکنش و \vec{J}_t بردار جونز ارسالی می‌باشند.

بردار اندازه‌گیری CP و ماتریس کواریانس مربوطه به-صورت زیر به‌دست می‌آیند:

$$\vec{k}_{CP} = [CP_1 \quad CP_2] \quad (2)$$

$$[C_{CP}] = \langle \vec{k}_{CP} \vec{k}_{CP}^{*t} \rangle = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} \\ C_{21} & C_{22} \end{bmatrix} \quad (3)$$

در روابط فوق بالانویس‌های t و $*t$ به‌ترتیب عملگرهای ترانپوز و ترانپوز مزدوج را نشان می‌دهند. عملگر $\langle \rangle$ به‌معنای میانگین‌گیری بر روی پیکسل‌های همسایه است.

ماتریس‌های کواریانس هر میتین 2×2 مربوط به هر یک از مدهای CP به‌صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$[C_{pi/4}] = \langle k_{pi/4} k_{pi/4}^{*t} \rangle \quad (4)$$

$$[C_{DCP}] = \langle k_{DCP} k_{DCP}^{*t} \rangle \quad (5)$$

$$[C_{CTLR}] = \langle k_{CTLR} k_{CTLR}^{*t} \rangle \quad (6)$$

۴-۲- الگوریتم‌های بازسازی

در اینجا ما با یک سیستم نامشخصی از چهار معادله و نه مجهول مواجه هستیم:

$$\begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} \\ C_{21} & C_{22} \end{bmatrix} \xrightarrow{?} \begin{bmatrix} H & M & P \\ M^* & X & N \\ P^* & N^* & V \end{bmatrix} \quad (7)$$

استفاده از پلاریزاسیون دایره‌ای در مواردی که رادار دارای فرکانس پایین است، مناسب می‌باشد. چرا که نسبت به تأثیرات چرخش فارادی (FR)^۱، که به انتشار امواج با فرکانس پایین در یونسفر وابسته است، حساسیت کمتری دارد [۱۸]. مزیت این سه مد CP، دارا بودن مقادیر بیشتری از اطلاعات پلاریزاسیون نسبت به سیستم‌های خطی DP استاندارد (ارسال H یا V و دریافت H و V) است. در حالی که دو برابر پهنای نوار سیستم‌های DP را پوشش می‌دهند.

۲-۲- روش‌های آنالیز داده‌های CP

روش‌های ممکن بسیاری برای آنالیز داده‌های تصویر CP وجود دارد. تکنیک‌های مرتبط بیشتر در دو جنبه ارزیابی و بعداً توسعه داده شدند [۴، ۱۹].

- استفاده از داده‌های CP به‌منظور برآورد اجزای ماتریس کواریانس QP و به‌کار بردن این داده‌های QP بازسازی شده (PQ)^۲ در الگوریتم‌های QP موجود می‌باشد. این روشی است که در [۴، ۱۱] اتخاذ شده است. این مدل‌ها فرض تقارن بازتابی پراکنش، و ارتباط بین کوهرنسی خطی و نسبت Cross-Polarization را برای ساخت تقارن بازتابی کامل ماتریس پلاریزاسیون از داده‌های کواریانس 2×2 به‌کار می‌برند [۱۱]. این الگوریتم‌ها در زمینه تصویربرداری زمینی توسعه داده شده‌اند.
- استخراج پارامترهای پلاریمتریک از بردار استوکس [۲۰-۲۲]. پارامترهایی که مستقیماً از بردار استوکس گرفته می‌شوند، مقادیر اساسی برای تشخیص میدان پس‌پراکنش یافته تا حدودی پلاریزه است. کاربردهای تصویربرداری نجومی بر مبنای استفاده از پارامترهای گرفته شده از بردار استوکس مد CP متمرکز شده‌اند [۱۹] و Raney [۲۳، ۲۴] استفاده از این روش را دفاع کرد. این روش نیازمند یک اکتشافی از محتوای اطلاعاتی این پارامترها در یک تنوع وسیعی از کاربردها است. همچنین کارایی‌های پارامترهای Compact در کاربردهای بسیاری بررسی شده است [۱۹، ۲۲].

^۳ Hermitian

^۱ Faraday Rotation

^۲ Pseudo Quad Polarization

است. این مدل برای مناطقی با پراکنش سطحی یا double-bounce (db) غالب، مناسب نیست.

ساخت ماتریس کواریانس PQ از مدهای CP بر مبنای جفت معادله‌هایی است که به صورت تکراری برای $\langle |S_{HV}|^2 \rangle$ حل می‌شوند. این معادلات در ادامه تشریح می‌شوند.

• حل مد pi/4

برای مد pi/4، حل معادلات با مقادیر اولیه $\langle |S_{HV}|^2 \rangle$ و کوهرنسی خطی Co-Polarization شروع می‌شود:

$$\rho_{(0)} = \frac{C_{12}}{\sqrt{C_{11}C_{22}}} \quad (11)$$

$$\langle |S_{HV}|^2 \rangle_{(0)} = \frac{C_{11} + C_{22}}{2} \left(\frac{1 - |\rho_{(0)}|}{3 - |\rho_{(0)}|} \right) \quad (12)$$

و تکرار با معادلات زیر صورت می‌گیرد:

$$\rho_{(i+1)} = \frac{C_{12} - \langle |S_{HV}|^2 \rangle_{(i)}}{\sqrt{(C_{11} - \langle |S_{HV}|^2 \rangle_{(i)})(C_{22} - \langle |S_{HV}|^2 \rangle_{(i)})}} \quad (13)$$

$$\langle |S_{HV}|^2 \rangle_{(i+1)} = \frac{C_{11} + C_{22}}{2} \left(\frac{1 - |\rho_{(i+1)}|}{3 - |\rho_{(i+1)}|} \right) \quad (14)$$

سیس با به دست آوردن مقدار نهایی برای $\langle |S_{HV}|^2 \rangle = \langle |S_{HV}|^2 \rangle_{(n)}$ (n مرتبه تکرار است)، ماتریس کواریانس PQ به صورت زیر ساخته می‌شود:

$$[C]_{PQ} = \begin{bmatrix} C_{11} - \langle |S_{HV}|^2 \rangle & 0 & C_{12} - \langle |S_{HV}|^2 \rangle \\ 0 & 2\langle |S_{HV}|^2 \rangle & 0 \\ (C_{12} - \langle |S_{HV}|^2 \rangle)^* & 0 & C_{22} - \langle |S_{HV}|^2 \rangle \end{bmatrix} \quad (15)$$

• حل مد DCP

برای این مد، محاسبه مقادیر اولیه همانند مد pi/4 می‌باشد. پس معادلات تکرار و ماتریس PQ برای مد DCP عبارت‌اند از:

$$\rho_{(i+1)} = \frac{C_{12} + \langle |S_{HV}|^2 \rangle_{(i)}}{\sqrt{(C_{11} - \langle |S_{HV}|^2 \rangle_{(i)})(C_{22} - \langle |S_{HV}|^2 \rangle_{(i)})}} \quad (16)$$

که در آن $X = \langle |S_{HV}|^2 \rangle$ ، $H = \langle |S_{HH}|^2 \rangle$ و $V = \langle |S_{VV}|^2 \rangle$ و $N = \langle S_{HV} S_{VV}^* \rangle$ ، $M = \langle S_{HH} S_{HV}^* \rangle$ ، $P = \langle S_{HH} S_{VV}^* \rangle$ می‌باشند. بنابراین به اطلاعات اضافی برای حل آن نیاز داریم. پس باید فرض‌هایی را برای کاهش تعداد مجهولات ایجاد کنیم. دو الگوریتم بازسازی در [۴، ۱۱] منتشر شده است.

۲-۴-۱- مدل Souyris

در سال ۲۰۰۵ Souyris و همکاران [۱۱] دو فرض را در نظر گرفتند که به رفتار پلاریمتریک اجزای ماتریس کواریانس Compact مربوط می‌شود:

• **تقارن بازتابی:** هنگامی که تقارن بازتابی فرض می‌شود، یک غیرهستگی کاملی بین ضرائب پس‌پراکنش Co-Polarization و Cross-Polarization انتظار می‌رود.

به عبارت دیگر:

$$\langle S_{HH} S_{HV}^* \rangle \approx \langle S_{HV} S_{VV}^* \rangle \approx 0 \quad (8)$$

• **برون‌یابی حالت پلاریزاسیون^۱:** این فرض بر مبنای رفتار پراکنش امواج پس‌پراکنش یافته کاملاً پلاریزه و کاملاً غیرپلاریزه به دست می‌آید. آنها همچنین در ادامه مدلی را ارائه کردند که نسبت شدت Cross-Polarization به متوسط شدت Co-Polarization را به بزرگی کوهرنسی Co-Polarization مرتبط می‌کند:

$$\frac{X}{H+V} \approx \frac{1-|\rho|}{4} \quad (9)$$

که در آن:

$$\rho = \frac{\langle S_{HH} S_{VV}^* \rangle}{\sqrt{\langle |S_{HH}|^2 \rangle \langle |S_{VV}|^2 \rangle}} \quad (10)$$

ترکیب معادلات (۴)، (۵) و (۶) و دو فرض فوق، ما را با یک سیستم غیرخطی به خوبی مشخص شده از چهار معادله و چهار مجهول مواجه می‌کند. که می‌تواند به صورت عددی و با استفاده از روش تکراری حل شود [۱۸]. مدل Souyris برای مناطقی با پراکنش حجمی غالب، بهترین

^۱ Polarization State Extrapolation

کلی مقادیر بسیار بزرگی دارد. بنابراین آنها یک ویرایش معکوس از معادله (۹) گرفتند و به معادله زیر رسیدند:

$$\frac{X}{H+V} = \frac{1-|\rho|}{N} \quad (22)$$

که در آن:

$$N = \frac{|S_{HH} - S_{VV}|^2}{|S_{HV}|^2} \quad (23)$$

همچنین آنها الگوریتم اصلی بازسازی Souyris را برای به کار بردن تابع تناسب خودشان نسبت به ثابت $N=4$ اصلاح کردند. مثلاً برای مد CTLR ابتدا مقادیر اولیه از معادلات (۱۱) و (۱۲) محاسبه می‌شوند. سپس معادله (۱۹) برای به‌هنگام کردن برآورد ρ به کار برده می‌شود و نهایتاً یک برآورد اصلاح شده از $\langle |S_{HV}|^2 \rangle$ به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\langle |S_{HV}|^2 \rangle_{(i+1)} = (C_{11} + C_{22}) \left(\frac{1 - |\rho_{(i+1)}|}{N + 2(1 - |\rho_{(i+1)}|)} \right) \quad (24)$$

۳- طبقه‌بندی کننده ویشارت مختلط^۱

در این تحقیق ما از طبقه‌بندی کننده ویشارت مختلط [۲۵] استفاده می‌کنیم. پردازش داده‌های پلاریمتریک چند منظره^۲ نیاز به میانگین‌گیری از ماتریس‌های کواریانس چند پیکسل مستقل دارد.

$$Z = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n u(k) u(k)^* \quad (25)$$

در رابطه فوق n تعداد look ها و $u(k)$ بردار پراکنش k امین پیکسل می‌باشد. اگر در نظر بگیریم:

$$A = nZ = \sum_{k=1}^n u(k) u(k)^* \quad (26)$$

در این صورت در رابطه فوق ماتریس A دارای توزیع ویشارت است. تابع توزیع ویشارت به صورت زیر است:

$$\langle |S_{HV}|^2 \rangle_{(i+1)} = \frac{C_{11} + C_{22}}{2} \left(\frac{1 - |\rho_{(i+1)}|}{3 - |\rho_{(i+1)}|} \right) \quad (17)$$

$$[C]_{PQ} = \begin{bmatrix} C_{11} - \langle |S_{HV}|^2 \rangle & 0 & C_{12} + \langle |S_{HV}|^2 \rangle \\ 0 & 2\langle |S_{HV}|^2 \rangle & 0 \\ (C_{12} + \langle |S_{HV}|^2 \rangle)^* & 0 & C_{22} - \langle |S_{HV}|^2 \rangle \end{bmatrix} \quad (18)$$

• حل مد CTLR

برای این مد نیز محاسبه مقادیر اولیه همانند مدهای DCP و $\pi/4$ می‌باشد. پس معادلات تکرار و ماتریس PQ برای مد CTLR عبارت‌اند از:

$$\rho_{(i+1)} = \frac{jC_{12} + \langle |S_{HV}|^2 \rangle_{(i)}}{\sqrt{(C_{11} - \langle |S_{HV}|^2 \rangle_{(i)})(C_{22} - \langle |S_{HV}|^2 \rangle_{(i)})}} \quad (19)$$

$$\langle |S_{HV}|^2 \rangle_{(i+1)} = \frac{C_{11} + C_{22}}{2} \left(\frac{1 - |\rho_{(i+1)}|}{3 - |\rho_{(i+1)}|} \right) \quad (20)$$

$$(21)$$

$$[C]_{PQ} = \begin{bmatrix} C_{11} - \langle |S_{HV}|^2 \rangle & 0 & jC_{12} + \langle |S_{HV}|^2 \rangle \\ 0 & 2\langle |S_{HV}|^2 \rangle & 0 \\ (jC_{12} + \langle |S_{HV}|^2 \rangle)^* & 0 & C_{22} - \langle |S_{HV}|^2 \rangle \end{bmatrix}$$

برای تمام این سه مد CP، ممکن است این اتفاق بیافتد که $\rho_{(n)}$ برای برخی پیکسل‌های خاص بزرگتر از یک شود، یا حتی مخرج آن ریشه عددی منفی شود. در این دو حالت ما $\rho_{(n)} = 1$ و $\langle |S_{HV}|^2 \rangle_{(n)} = 0$ قرار داده و سپس تکرار را متوقف می‌کنیم.

۲-۴-۲- مدل Nord

در سال ۲۰۰۹ Nord و همکاران [۴] نشان دادند که فرض دوم مدل Souyris همیشه اتفاق نمی‌افتد. آنها سمت راست معادله (۹) را در مقابل سمت چپ آن رسم کردند و پی‌بردند که مقدار ۴ در مخرج معادله، یک حد پایین است و داده‌های آنها نشان داد که این ثابت تناسب، در حالت

^۱ Complex Wishart

^۲ Multi Look

به جای C به عنوان ماتریس کواریانس کلاس w_m داریم:

$$d(A, w_m) = n \ln |C_m| + \text{Tr}(C_m^{-1}A) - \ln[P(w_m)] - (n-q) \ln |A| + \ln[K(n, q)] \quad (28)$$

از آنجا که دو ترم آخر سمت راست معادله فوق مستقل از w_m هستند، می توان آنها را در نظر نگرفت.

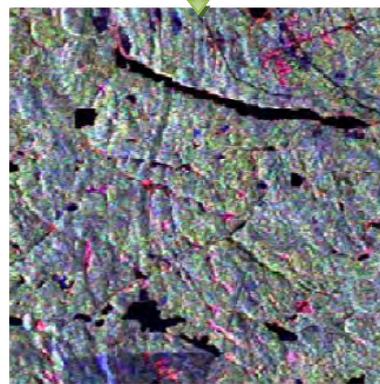
$$p_A(A) = \frac{|A|^{n-q} \exp[-\text{Tr}(C^{-1}A)]}{K(n, q) |C|^n} \quad (27)$$

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

که در آن q بعد بردار u است که در حالت منواستاتیک^۱ خواهیم داشت: $q=3$. همچنین $\Gamma(\cdot)$ تابع گاما است. مشابه با فرآیند طبقه بندی بیشینه شباهت (ML)^۲، که بر روی داده های تک منظره^۳ پیاده سازی می شود، با جایگزینی C_m



(ب)



(الف)

شکل ۲- تصویر منطقه مورد مطالعه. الف) به صورت نمایش رنگی (PauliRGB)، ب) از سایت Google Earth همراه پلی گون های زمینی

در این مقاله یک زیر مجموعه 1000×1000 از تصاویر پلاریمتریک SAR ماهواره RADARSAT-2، انتخاب شده است. تصویر مورد نظر در باند C معادل طول موج $5/5$ سانتی متر در حالت Fine Quad 9 و با زوایای فرود 28 و $29/8$ درجه اخذ شده است. منطقه مورد مطالعه در این تحقیق یک جنگل تحقیقاتی به نام Petawawa در نزدیکی رودخانه Chalk واقع در یکی از ایالت های شرقی کانادا به نام Ontario می باشد که در 200 کیلومتری غرب Ottawa و 180 کیلومتری شرق North Bay قرار گرفته است. شکل (۲) تصویر منطقه مورد مطالعه را نشان می دهد. این منطقه شامل نواحی جنگلی، پوشش گیاهی،

در این صورت با فرض برابر بودن احتمال اولیه کلاس ها خواهیم داشت:

$$d(Z, w_m) = \ln |C_m| + \text{Tr}(C_m^{-1}Z) \quad (29)$$

بنابراین پیکسل Z به کلاس w_m تعلق خواهد گرفت، چنانچه شرط زیر به ازای تمام $j \neq m$ برقرار گردد:

$$d(Z, w_m) < d(Z, w_j) \quad (30)$$

۴- داده ها و منطقه مورد مطالعه

^۱ Monostatic
^۲ Maximum Likelihood
^۳ Single Look

جدول ۱- تعداد داده‌های آموزشی و تست جهت طبقه‌بندی

کلاس	داده آموزشی	داده تست
بلوط قرمز (Or)	۹۸۰	۷۷۲
کاج سفید (Pw)	۳۰۵	۳۷۵
صنوبر سیاه (Sb)	۹۰۰	۷۸۲
منطقه شهری (Ur)	۵۷۰	۴۹۴
آب (Wa)	۱۰۴۷	۸۱۰
پوشش گیاهی (GV)	۹۷۸	۶۳۱

آب و منطقه شهری می‌شود. جنگل‌ها به‌طور عمده درختان نرم چوب و سخت چوب را شامل می‌شود که در این بین سه گونه درختی بلوط قرمز (نرم چوب)، کاج سفید (سخت چوب) و صنوبر سیاه (سخت چوب) مورد توجه می‌باشند. همچنین داده‌های آموزشی و تست انتخاب شده برای این تحقیق در جدول (۱) نمایش داده شده است.

جدول ۲- دقت‌های طبقه‌بندی و یشارت مختلط به‌دست آمده از مدهای pi/4 و CTRL، مدهای بازسازی شده آنها با استفاده از مدل Souyris و نیز مد FP (برحسب درصد)

مد	بلوط قرمز	کاج سفید	صنوبر سیاه	منطقه شهری	آب	پوشش گیاهی	دقت کلی
pi/4	۲۹/۷	۳۴/۱	۵۳	۷۲/۶	۱۰۰	۹۲	۶۵/۲
CTRL	۲۸/۳	۴۴/۵	۴۹/۸	۴۶/۱	۱۰۰	۸۶	۶۰/۹
PQ_pi/4	۴۲/۳	۳۷/۳	۶۰/۶	۷۸/۹	۱۰۰	۹۲/۲	۷۰/۴
PQ_CTRL	۳۵/۶	۴۲/۴	۳۹/۱	۵۳/۶	۱۰۰	۷۶/۳	۵۹/۵
FP	۳۸/۶	۴۷/۷	۶۴/۳	۸۵/۸	۱۰۰	۹۳/۵	۷۲/۵

۵- نتایج

ابتدا با استفاده از داده‌های خام FP در حالت تک منظره، داده‌های خام CP به‌دست می‌آیند. ما طبقه‌بندی را به دو صورت و با استفاده از نرم افزار MATLAB انجام می‌دهیم. در حالت اول، یک پیش پردازش شامل حذف نویز اسپکل و تصحیح هندسی بر روی داده‌های خام CP انجام شده و سپس با استفاده از طبقه‌بندی کننده و یشارت مختلط به طبقه‌بندی تصاویر حاصل از مدهای CP می‌پردازیم.

در حالت دوم داده‌های خام CP با استفاده از الگوریتم بازسازی Souyris [۱۱] برای ساخت ماتریس‌های کواریانس PQ به‌کار برده می‌شوند. پس از اعمال پیش پردازش بر روی این مدهای بازسازی شده (PQ)، با استفاده از طبقه‌بندی کننده و یشارت مختلط به طبقه‌بندی تصاویر می‌پردازیم. نهایتاً هر یک از تصاویر طبقه‌بندی شده در فوق را با تصویر طبقه‌بندی شده با استفاده از داده‌های FP مقایسه و ارزیابی می‌کنیم. در این جا ما دو مد pi/4 و CTRL (راستگرد) را در نظر می‌گیریم. دقت‌های طبقه‌بندی به‌صورت جدول (۲) و تصاویر حاصل از طبقه‌بندی به‌صورت شکل (۳) به‌دست آمدند. به‌طور کلی دقت‌های طبقه‌بندی در مد FP بیشتر از مدهای CP است. چرا که شامل اطلاعات بیشتری از پراکنش‌های co-polarized و cross-polarized در صحنه پس‌پراکنش می‌شود.

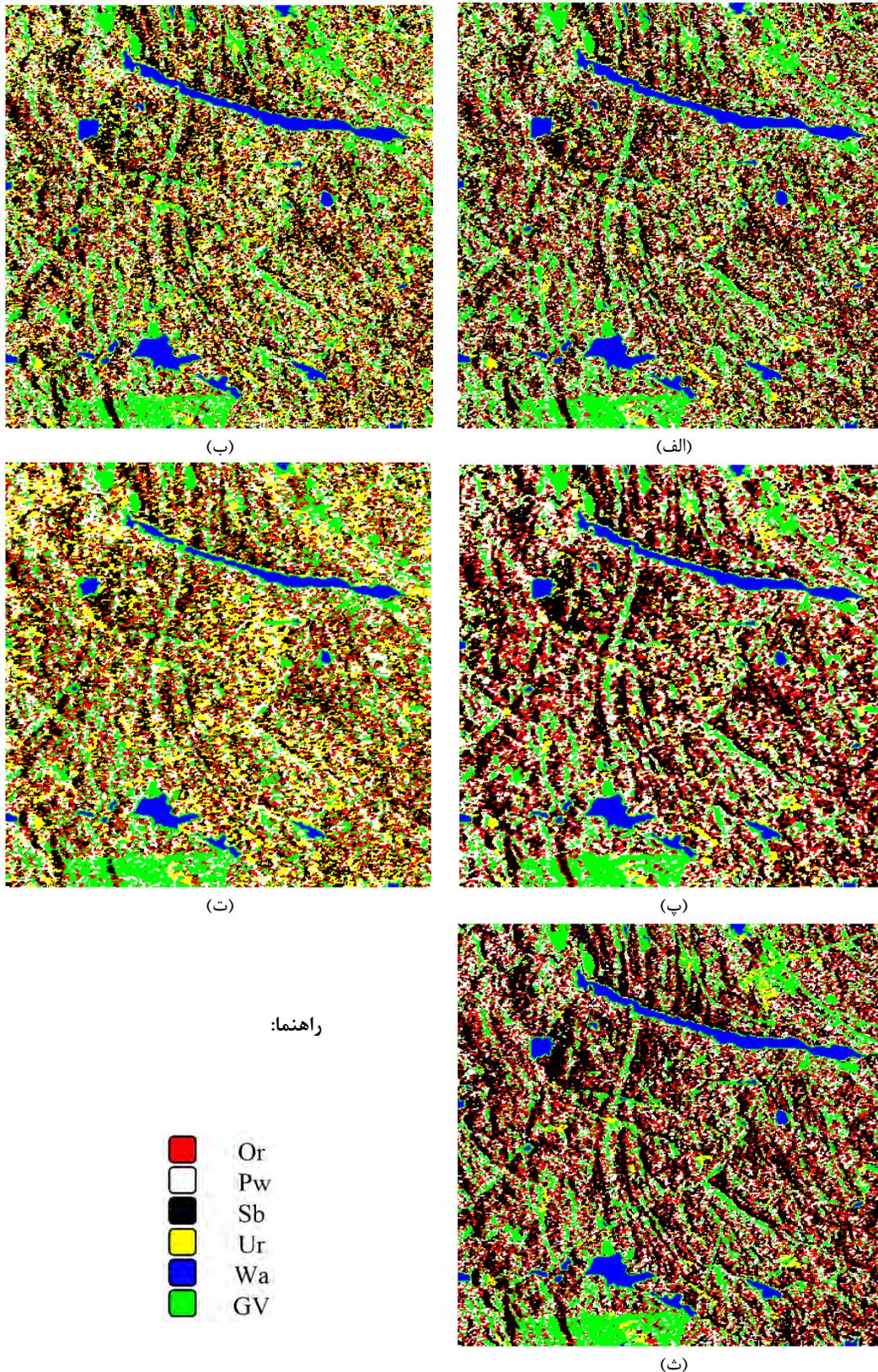
همچنین از میان مدهای CP مورد بررسی در این تحقیق، دقت کلی طبقه‌بندی در مدهای pi/4 بهتر از دقت کلی طبقه‌بندی در مدهای CTRL است. دلیل این امر را می‌توان نزدیک‌تر بودن مکانیزم‌های پراکنش در دو مد pi/4 و FP نسبت به هم دانست. که در ادامه دو نمونه از این مکانیزم‌ها مورد بحث قرار گرفته است. در ضمن زاویه‌دار بودن نحوه ارسال پلاریزاسیون در مد pi/4 نیز می‌تواند پس‌پراکنش بهتری از اهداف را در مناطق شیب‌دار فراهم کند.

با توجه به نتایج حاصل می‌توان گفت دقت کلی طبقه‌بندی در مد CTRL (۶۰/۹٪) تقریباً با دقت کلی طبقه‌بندی در مد PQ_CTRL (۵۹/۵٪) یکی است. یعنی با اعمال دو شرط مدل بازسازی Souyris [۱۱]، تقارن بازتابی و استخراج حالت پلاریزاسیون، نتیجه کلی طبقه‌بندی برای مد CTRL تغییرات زیادی ندارد. بنابراین در حالت کلی مد PQ_CTRL دقت کلی طبقه‌بندی با استفاده از طبقه‌بندی کننده و یشارت مختلط را افزایش نمی‌دهد. در عوض مدهای PQ امکان مقایسه مستقیم مکانیزم‌های پراکنش را با مد FP فراهم می‌کنند.

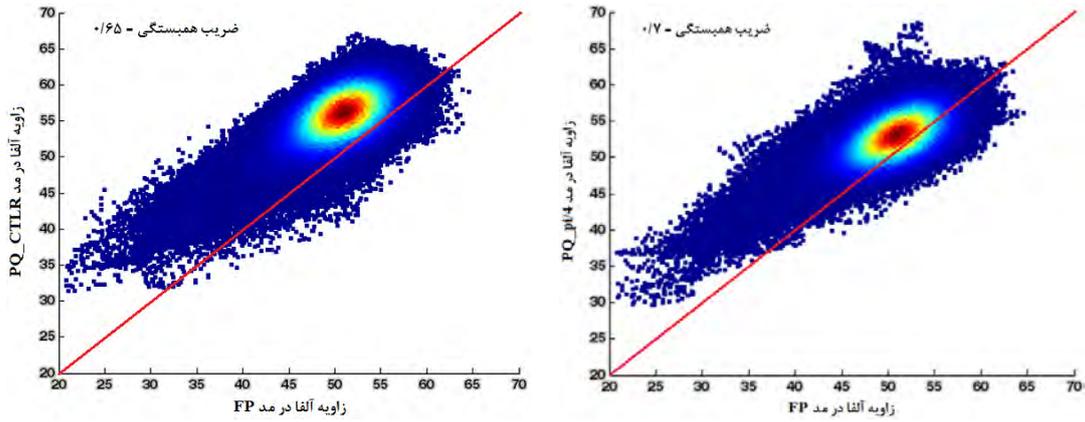
در ادامه ما مکانیزم‌های پراکنش زاویه آلفای مدل Cloude و Pottier [۲۶] و مدل Freeman-Durden سه جزئی [۲۷] را با استفاده از ماتریس کواریانس مدهای FP و PQ محاسبه و نسبت به هم به‌ترتیب در شکل‌های (۴) و (۵) ترسیم کردیم. در هر یک از شکل‌های (۴) و (۵) رنگ‌های قهوه‌ای و آبی پررنگ به‌ترتیب تجمع

بیشتری بر قطر اصلی دارند. این به آن معناست که زاویه آلفا در مد $PQ_pi/4$ بهتر از مد PQ_CTLR برآورد می‌شود.

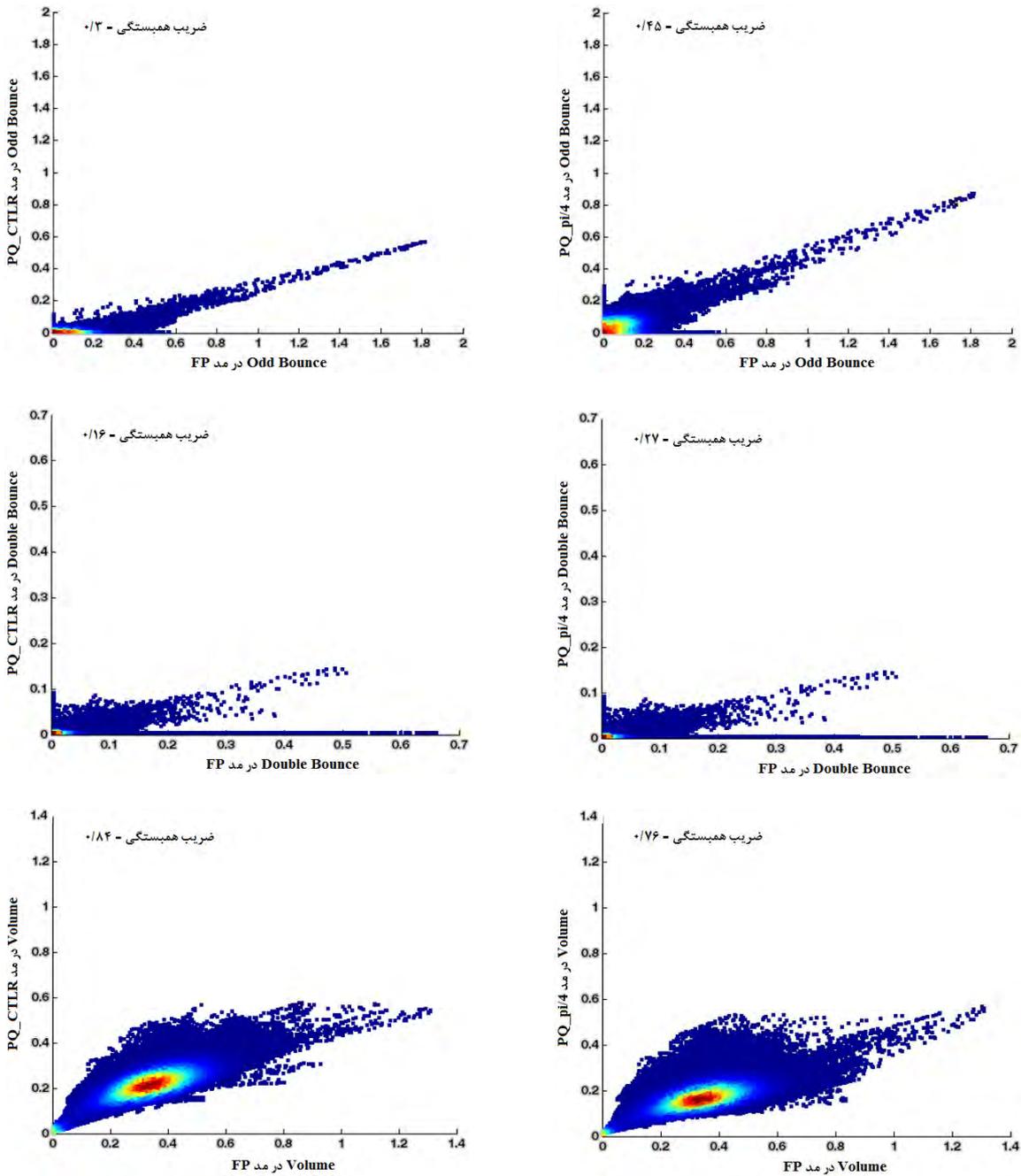
بیشتر و تجمع کمتر نقاط را نشان می‌دهند. همان‌طور که در شکل (۴) مشاهده می‌شود، در مد $PQ_pi/4$ تجمع بیشتر نقاط، تطابق



شکل ۳- تصاویر طبقه‌بندی شده با استفاده از طبقه‌بندی کننده ویشارت مختلط برای مدهای $pi/4$ و $CTLR$ ، مدهای بازسازی شده آنها با استفاده از مدل Souyris و نیز مد FP . (الف) مد $pi/4$ ، (ب) مد $CTLR$ ، (پ) داده $PQ_pi/4$ ، (ت) داده PQ_CTLR و (ث) مد FP

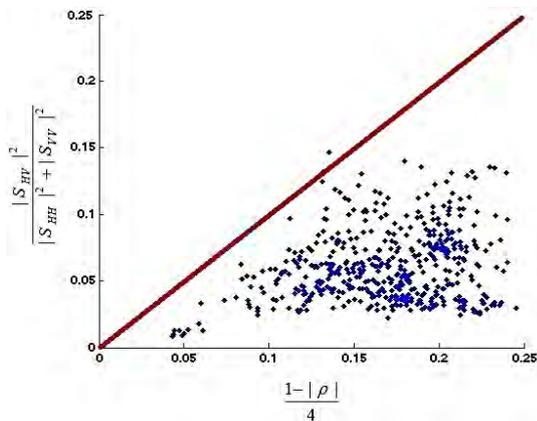


شکل ۴- مکانیزم پراکنش زاویه آلفا در دو مد PQ_pi/4 و PQ_CTLR نسبت به مد FP



شکل ۵- مکانیزم‌های پراکنش مدل Freeman-Durden سه جزئی در مدهای PQ_pi/4 و PQ_CTLR نسبت به مد FP

در مناطقی با پراکنش Double Bounce به خوبی عمل کند. اگر دو فرض مدل Souyris [۱۱] برقرار باشند، مدل‌های پراکنش پلاریمتریک اطلاعات PQ را تولید می‌کنند. متأسفانه این فرض‌ها فقط برای پراکنش‌هایی که دارای تقارن آزیموتی هستند، برقرار می‌باشند.



شکل ۶- ترسیم دو طرف معادله (۹) برای داده‌های آموزشی کلاس منطقه شهری در مد FP

۶- نتیجه‌گیری و پیشنهادات

توجه به نتایج به دست آمده می‌توان اظهار داشت که در طبقه‌بندی مناطق جنگلی در باند C، مد $\pi/4$ مد موثرتر و کارآمدی نسبت به مد CTRLR است. در استفاده از داده‌های CP مشخصات پراکنش حاصل از صحنه تصویربرداری شده، انتخاب بهینه پلاریزاسیون ارسالی را تعیین می‌کند. هدف اصلی برای تلاش‌هایی که در راستای ارائه CP صورت گرفته است به دست آوردن اطلاعات نزدیک به اطلاعات رادارهای تمام پلاریمتریک، بدون صرف هزینه‌هایی مانند نصف شدن پوشش‌دهی و یا دو برابر شدن توان ارسالی، می‌باشد. اطلاعات CP هرگز نمی‌تواند جانشین اطلاعات تمام پلاریزه گردد، بلکه با کم کردن هزینه‌ها می‌تواند یک مد اختیاری برای اهداف خاص در کنار مد تمام پلاریمتری قرار گیرد.

اگرچه داده‌های CP همیشه دارای اطلاعات پلاریمتری کمتری نسبت به داده‌های FP هستند، ولی به دلیل دارا بودن چندین مزیت مهم نسبت به دیگر سیستم‌های چندپلاریزاسیون SAR، هنگامی که منابع سیستم‌های پلاریمتریک محدود هستند و یا در دسترس نیستند، می‌توانند یک استراتژی موثر باشند. همچنین به کارگیری این داده‌ها در طول موج‌های بلند، که پلاریزاسیون ارسالی متأثر از چرخش

همچنین ضریب همبستگی بین مکانیزم پراکنش زاویه آلفا در مد $PQ_{\pi/4}$ نسبت مد FP ($0/7$)، بیشتر از ضریب همبستگی بین مکانیزم زاویه آلفا در مد PQ_{CTRLR} نسبت به مد FP ($0/65$) می‌باشد. این نیز دلیل دیگری بر نزدیک‌تر بودن مکانیزم‌های پراکنش در مد $\pi/4$ نسبت به مد FP است. مقادیر ضریب همبستگی در شکل (۶) نشان می‌دهند که مدل بازسازی Souyris [۱۱] برای مناطقی با پراکنش حجمی غالب بسیار مناسب است. همچنین این مدل در مناطقی با پراکنش Double Bounce به خوبی عمل نمی‌کند. به طور کلی دقت‌های طبقه‌بندی حاصل از مدهای CTRLR به مراتب کمتر از دقت‌های کسب شده در مدهای دیگر است. این موضوع را می‌توان به وسیله شرط تقارن آزیموتی توضیح داد. در سنجش از دور راداری، از بین اهداف طبیعی، پراکنش‌های حاصل از پوشش‌های گیاهی و آب به صورت تقارن آزیموتی در نظر گرفته می‌شوند. ولی دیگر اهداف طبیعی لزوماً رفتار پلاریمتریک به صورت تقارن آزیموتی از خود نشان نمی‌دهند. از جمله این دلایل می‌توان به جهت قرارگیری اهداف در راستای خط دید رادار، محل و الگوی قرارگیری آن‌ها بر روی زمین و ... اشاره کرد. از آن‌جاکه ارسال پلاریزاسیون دایره‌ای شرط تقارن آزیموتی را برای پدیده‌های طبیعی تحمیل می‌کند، نتایج ضعیفی را در تمایز بین اهداف طبیعی و در نتیجه طبقه‌بندی حاصل می‌کند. و زمانی که شرط تقارن آزیموتی برقرار نباشد، منجر به طبقه‌بندی اشتباه می‌شود.

همان‌گونه که از تصاویر طبقه‌بندی شده به دست می‌آید، کلاس منطقه شهری در مدهای CP اکثراً با کلاس‌های گونه‌های جنگلی ادغام می‌شود. دلیل این امر آن است که ما در مناطق جنگلی نیز می‌توانیم از برخی از گونه‌های جنگلی، مکانیزم پراکنش Double Bounce داشته باشیم. همچنین برای مدهای PQ نیز ما علت را در فرض دوم مدل بازسازی Souyris [۱۱] جستجو کردیم. بنابراین دو طرف معادله (۹) برای داده‌های آموزشی کلاس منطقه شهری در مد FP به صورت شکل (۶) ترسیم کردیم. خط قطری قرمز رنگ نشان می‌دهد که اگر معادله (۹) یک تساوی صریح بود، داده‌ها می‌توانستند بر روی آن قرار بگیرند. بنابراین فرض دوم مدل بازسازی Souyris [۱۱] در مناطق شهری برقرار نیست. پس الگوریتم بازسازی، تصاویر طبقه‌بندی شده در نتیجه دقت طبقه‌بندی به دست آمده برای این‌گونه مناطق صحیح نخواهد بود. به عبارت دیگر الگوریتم بازسازی Souyris [۱۱] نمی‌تواند

باند‌های L و P و نیز با استفاده از دیگر مدهای CP بررسی و ارزیابی شود.

فارادی است، بسیار مناسب می‌باشد. در این تحقیق از باند C معادل طول موج ۵ سانتی‌متر و از دو مد $\pi/4$ و CTLR (راستگرد) CP استفاده شد. لذا پیشنهاد می‌شود این تحقیق در

مراجع

- [1] W.-M. Boerner, H. Mott, and E. Luneburg, "Polarimetry in remote sensing: Basic and applied concepts," in *Geoscience and Remote Sensing, 1997. IGARSS'97. Remote Sensing-A Scientific Vision for Sustainable Development.*, 1997 IEEE International, 1997, pp. 1401-1403.
- [2] 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.
- [3] G. Atteia and M. J. Collins, "On the use of compact polarimetry SAR for ship detection," *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 80, pp. 1-9, 2013.
- [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] M. Dabboor and T. Geldsetzer, "Towards sea ice classification using simulated RADARSAT Constellation Mission compact polarimetric SAR imagery," *Remote Sensing of Environment*, vol. 140, pp. 189-195, 2014.
- [6] 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.
- [7] D. Haldar, A. Das, S. Mohan, O. Pal, R. S. Hooda, and M. Chakraborty, "Assessment of L-band SAR data at different polarization combinations for crop and other landuse classification," *Progress In Electromagnetics Research B*, vol. 36, pp. 303-321, 2012.
- [8] C. Dickinson, P. Siqueira, D. Clewley, and R. Lucas, "Classification of forest composition using polarimetric decomposition in multiple landscapes," *Remote Sensing of Environment*, vol. 131, pp. 206-214, 2013.
- [9] S. E. H. Sakshaug, "Evaluation of Polarimetric SAR Decomposition methods for tropical forest analysis," 2013.
- [10] H.-M. Luo, E. Chen, X. Li, J. Cheng, and M. Li, "Unsupervised classification of forest from polarimetric interferometric SAR data using fuzzy clustering," in *Wavelet Analysis and Pattern Recognition (ICWAPR), 2010 International Conference on*, 2010, pp. 201-206.
- [11] J.-C. Souyris, P. Imbo, R. Fjortoft, S. Mingot, and J.-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.
- [12] S. Boularbah, M. Ouarzeddine, and A. Belhadj-Aissa, "Investigation of the capability of the Compact Polarimetry mode to Reconstruct Full Polarimetry mode using RADARSAT2 data," *Advanced Electromagnetics*, vol. 1, pp. 19-28, 2012.
- [13] R. Sabry and P. W. Vachon, "Advanced polarimetric synthetic aperture radar (SAR) and electro-optical (EO) data fusion through unified coherent formulation of the scattered EM field," *Progress In Electromagnetics Research*, vol. 84, pp. 189-203, 2008.
- [14] T. Ainsworth, J. Kelly, and J.-S. Lee, "Classification comparisons between dual-pol, compact polarimetric and quad-pol SAR imagery," *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 64, pp. 464-471, 2009.
- [15] R. K. Raney, "Comments on hybrid-polarity SAR architecture," in *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2007. IGARSS 2007. IEEE International, 2007*, pp. 2229-2231.
- [16] H. Chen, D. Goodenough, and S. Cloude, "Mapping forest fire scars with simulated RCM compact-pol data," in *Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2014 IEEE International, 2014*, pp. 1572-1575.

- [17] R. K. Raney, "DESDynI adopts hybrid polarity SAR architecture," in Radar Conference, 2009 IEEE, 2009, pp. 1-4.
- [18] J.-C. Souyris and S. Mingot, "Polarimetry based on one transmitting and two receiving polarizations: the $\pi/4$ mode," in Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2002. IGARSS'02. 2002 IEEE International, 2002, pp. 629-631.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] R. K. Raney, P. D. Spudis, B. Bussey, J. Crusan, J. R. Jensen, W. Marinelli, et al., "The lunar mini-rf radars: Hybrid polarimetric architecture and initial results," Proceedings of the IEEE, vol. 99, pp. 808-823, 2011.
- [22] R. Sabry and P. W. Vachon, "A unified framework for general compact and quad polarimetric SAR data and imagery analysis," Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on, vol. 52, pp. 582-602, 2014.
- [23] R. K. Raney, "Dual-polarized SAR and stokes parameters," Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE, vol. 3, pp. 317-319, 2006.
- [24] R. K. Raney, "Hybrid-polarity SAR architecture," Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on, vol. 45, pp. 3397-3404, 2007.
- [25] 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.
- [26] S. R. Cloude and E. Pottier, "A review of target decomposition theorems in radar polarimetry," Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on, vol. 34, pp. 498-518, 1996.
- [27] A. Freeman and S. L. Durden, "A three-component scattering model for polarimetric SAR data," Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on, vol. 36, pp. 963-973, 1998.