



خوشه‌بندی تصاویر پلاریمتری-اینترفرومتری راداری با استفاده از آنتروپی شانون و الگوریتم میدان تصادفی مارکوف

محسن اسمعیل نژاد سلطانلو^{۱*}، محمود رضا صاحبی^۲

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

تاریخ پذیرش: ۹۷/۹/۱۹

تاریخ دریافت: ۹۶/۱۱/۱۶

چکیده

داده‌های پلاریمتری-اینترفرومتری راداری، با فراهم کردن اطلاعاتی از نوع شدت، دارابودن اطلاعات پلاریمتری دو تصویر و اطلاعات ارتفاعی حاصل از اینترفرومتری، توانایی زیادی در طبقه‌بندی پوشش‌های زمین دارند که این ویژگی‌های سه‌گانه در آنتروپی شانون حاصل از این داده‌ها، به تفکیک قابل مشاهده هستند. استفاده همزمان این پارامترها، نقش تکمیل‌کننده‌ای در طبقه‌بندی ارائه می‌کنند، به‌طوری‌که حضور اطلاعات اینترفرومتری، باعث افزایش دقت طبقه‌بندی می‌شود. همچنین داده‌های اخذشده از دنیای واقعی، دارای پیوستگی مکانی هستند. بنابراین در این تحقیق، از الگوریتم میدان تصادفی مارکوف به منظور در نظر گرفتن همسایگی‌های پیکسلی و مجموعه پارامترهای آنتروپی شانون داده‌های پلاریمتری-اینترفرومتری راداری برای طبقه‌بندی استفاده می‌شود. الگوریتم میدان تصادفی مارکوف برای شروع، نیاز به یک نقشه طبقه‌بندی شده اولیه دارد. نقشه طبقه‌بندی شده اولیه با استفاده از بی نظمی و ناهمسانگردی پلاریمتری و پلاریمتری-اینترفرومتری و ادغام کلاس‌های حاصل، براساس شباهت ماتریس هم‌دوسی پلاریمتری-اینترفرومتری مراکز کلاس‌ها، تهیه می‌شود. بررسی کارایی الگوریتم پیشنهادی با استفاده از داده پلاریمتری-اینترفرومتری اخذشده توسط سازمان فضایی آلمان (DLR) انجام می‌شود. در تحقیق حاضر، از شاخص درجه خلوص خوشه‌ها برای ارزیابی عملکرد الگوریتم پیشنهادی و چند الگوریتم دیگر استفاده می‌شود. درجه خلوص کل حاصل از الگوریتم پیشنهادی در مقایسه با درجه خلوص حاصل از الگوریتم‌های $H/A/\alpha$ -ویشارت (T_3)، الگوریتم پیشنهادی $H_{Pol}, A_{Pol}, H_{Int}-A_{Int}$ -ویشارت (T_6)، $FCM-H_{Pol}, A_{Pol}, H_{Int}-A_{Int}$ و T_6 و طبقه‌بندی با کمک سه پارامتر آنتروپی شانون و الگوریتم خوشه‌بندی FCM به ترتیب به مقدار 0.2848 ، 0.1138 ، 0.1660 و 0.1960 ٪ افزایش پیدا کرده است.

کلید واژه‌ها: پلاریمتری، اینترفرومتری راداری، بی نظمی و ناهمسانگردی، آنتروپی شانون، میدان تصادفی مارکوف

۱- مقدمه

محققان در تحقیق خود (Ferro-Famil, Pottier et al. 2002) طبقه‌بندی دیگری معرفی کردند که مشابه روش قبلی است. به‌طوریکه در ابتدا با استفاده از روش طبقه‌بندی نظارت‌نشده بی‌نظمی-ناهمسانگردی-آلفا و فاصله ویشارت که بر روی یکی از تصاویر اعمال می‌شود، منطقه مورد نظر بر اساس مکانیسم پراکنشی به سه کلاس مختلف تقسیم می‌شود. در مرحله بعد، با معرفی دو پارامتر نسبی A1 و A2 که از کوهرنس‌های بهینه نسبی به دست می‌آیند، هر یک از کلاس‌های به دست آمده از طبقه‌بندی پلاریمتری، در صفحه A1-A2 به چند زیرکلاس دیگر تقسیم می‌شوند که با این کار مقداردهی اولیه کلاس‌ها انجام می‌شود. برای طبقه‌بندی، از فاصله ویشارت بین ماتریس همدوسی پلاریمتری-اینترفرومتری مراکز کلاس‌ها و پیکسل‌ها استفاده می‌شود.

همچنین از داده‌های POLINSAR برای طبقه‌بندی گونه‌های جنگلی نیز استفاده می‌شود که نتایج خوبی را نسبت به داده‌های POLSAR ارائه می‌دهند، زیرا داده‌های POLSAR در جنگل‌های متراکم دچار اشباع شدگی می‌شوند (Ferro-Famil, Kugler et al. 2006). لی و همکاران (2005) طبقه‌بندی نظارت شده و نظارت‌نشده‌ای را پیشنهاد داده‌اند که از فاصله ویشارت برای طبقه‌بندی، بعد از مقداردهی اولیه استفاده می‌کنند. مقداردهی اولیه با استفاده از پارامتر A2 که از کوهرنس‌های بهینه نسبی به دست می‌آید (Ferro-Famil, Pottier et al. 2002) انجام می‌شود که حساسیت بیشتری نسبت به پارامترهای جنگل، مانند ارتفاع و تراکم درختان دارد. نتایج طبقه‌بندی حاصل از

مفهوم پلاریمتری-اینترفرومتری رادار با روزنه مجازی (POLINSAR)^۱ توسط کلود و پاپاتانسیو در سال ۱۹۹۸ معرفی شد و از آن‌زمان کاربردهای متنوعی از این تکنیک، در زمینه‌های مختلف توسط محققان توسعه داده شده است. طبقه‌بندی تصاویر پوشش زمین، یکی از مهم‌ترین کاربردهای پردازش تصویر است. کوهرنس‌های بهینه به دست آمده از یک فرآیند بهینه سازی، کاربردی‌ترین و مهم‌ترین پارامترهایی هستند که در پردازش‌های مربوط به POLINSAR استفاده می‌شوند. این پارامترها نه تنها شامل مزایای داده پلاریمتری SAR^۳ (POLSAR) می‌شوند، بلکه حاوی اطلاعات همدوس^۴ جفت تصویر پلاریمتری هم هستند. به همین دلیل، در اکثر روش‌های طبقه‌بندی از این ویژگی‌ها، برای طبقه‌بندی استفاده می‌شود. روش طبقه‌بندی ویشارت^۵ یکی از روش‌های معمول برای طبقه‌بندی داده‌های SAR است که می‌تواند برای طبقه‌بندی داده‌های POLINSAR نیز مورد استفاده قرار گیرد. به عنوان مثال، فمیل و همکاران در سال ۲۰۰۱ در تحقیق خود از این روش برای طبقه‌بندی استفاده کردند. در ابتدا با استفاده از روش تجزیه بی‌نظمی-ناهمسانگردی-آلفا - ویشارت (H/A/α-ویشارت) که بر روی یکی از تصاویر اعمال می‌شود، تصویر مورد نظر به ۸ کلاس طبقه‌بندی می‌شود. با معرفی بی‌نظمی و ناهمسانگردی اینترفرومتری، کلاس‌های حاصل هر کدام به دو کلاس دیگر تقسیم می‌شوند و در نهایت یک طبقه‌بندی تکرارشونده با فاصله ویشارت بر روی ماتریس همدوسی ۶×۶ پلاریمتری-اینترفرومتری پیکسل‌ها و مراکز کلاس‌ها اعمال می‌شود. همین

3 Polarimetric SAR
4 Coherent
5 Wishart classification

1 Polarimetric Interferometric Synthetic Aperture Radar
2 Optimized coherences

حاصل از کانال‌های مختلف پلاریمتری تعیین می‌شود. این روش باعث می‌شود تا الگوریتم نیازی به مدل‌های مختلف تجزیه و یا تعیین حدآستانه نداشته باشد. طبقه‌بندی تصویر با استفاده از الگوریتم پیشینه‌سازی امید ریاضی (EM)^۱ انجام می‌شود به طوری که الگوریتم با یک کلاس، شروع به تکرار می‌کند و به صورت تکراری، در هر مرحله کلاس‌ها را اضافه می‌کند. اما این روش بسیار زمان‌بر است چون در اضافه‌کردن هر کلاس، الگوریتم تاجایی تکرار می‌شود که به ازای این کلاس همگرا شود.

شیمونی و همکاران، توانایی داده‌های POLSAR و POLINSAR را برای طبقه‌بندی پوشش زمین ارزیابی کردند (Shimoni, Borghys et al. 2009). در این تحقیق، ویژگی‌های مختلف از هر دو منبع POLSAR و POLINSAR در باندهای L و P استخراج می‌شوند. به منظور کاهش تعداد ویژگی‌ها از روش‌های تلفیق ویژگی استفاده شده است. به طوری که از روش تلفیق رگرسیون خطی در سطح پیکسل و از روش تلفیق شبکه‌های عصبی در سطوح بالاتر استفاده می‌شود. در نهایت از الگوریتم طبقه‌بندی کننده ماشین بردار پشتیبان (SVM)^۲ برای طبقه‌بندی نهایی استفاده می‌شود. حضور داده‌هایی از جنس اینترفرومتری و باندهای مختلف، دقت طبقه‌بندی را نسبت به حالتی که فقط از داده‌های پلاریمتری استفاده می‌شود، افزایش می‌دهد.

همچنین الگوریتم دیگری که توسط وانگ و همکاران برای طبقه‌بندی جنگل پیشنهاد شده، از داده‌های POLINSAR استفاده می‌کند (Wang, Chen et al. 2013). در این تحقیق ابتدا نواحی جنگل از غیر جنگل

داده‌های POLINSAR، دقت بهتری نسبت به طبقه‌بندی با استفاده از داده‌های پلاریمتری دارند. در روش دیگری که برای طبقه‌بندی جنگل توسط فمیل و همکاران (2006) ارائه شده، اثرات پلاریمتری از ماتریس همدوسی پلاریمتری-اینترفرومتری حذف و یک تابع چگالی احتمال برای این نوع داده تعریف می‌شود. فاصله بیشترین شباهت لگاریتمی حاصل از این تابع چگالی احتمال، برای طبقه‌بندی مورد استفاده قرار می‌گیرد که درحقیقت از یک ماتریس قطری استفاده می‌کند که مولفه‌های قطر اصلی آن همان کوهرنس‌های بهینه نسبی است. حذف اثرات پلاریمتری از ماتریس همدوسی پلاریمتری-اینترفرومتری باعث افزایش دقت طبقه‌بندی گونه‌های جنگلی در این تحقیق شده است. روش طبقه‌بندی متفاوتی توسط ماکسیم نومن و همکاران در سال ۲۰۰۵ ارائه شد که از پارامترهای حاصل از اشکال هندسی کوهرنس استفاده می‌کند (Neumann, Reigber et al. 2005). با تولید ابر نقاط کوهرنس و تصویرکردن آن‌ها در صفحه دایره مختلط یک (CUC)^۱ یک شکل هندسی به دست می‌آید که اغلب شبیه یک بیضی است. پارامترهای حاصل از این شکل می‌تواند در طبقه‌بندی پوشش زمین استفاده شود. تولید این پارامترها که شامل مراحل مختلف محاسبه مقادیر ویژه است، بسیار زمان‌بر بوده ولی با این حال از کل فضای کوهرنس استفاده می‌کند.

مارک جوگر و همکاران، روش پیشرفته‌تری برای طبقه‌بندی نظارت‌نشده داده‌های POLINSAR پیشنهاد داده‌اند (Jager, Neumann et al. 2007). مراکز اولیه کلاس‌ها، با استفاده از یک روش خود-مقداردهی اولیه براساس اختلاف فاز اینترفرومتری

3 Support Vector Machine

1 Complex Unitary Circle

2 Expectation Maximization

همسایگی در تصمیم‌گیری برچسب یک پیکسل است. همچنین کارهای دیگری در زمینه طبقه‌بندی داده‌های POLINSAR انجام شده است که به برخی از این تحقیقات اشاره می‌شود. بالستر-برمن (Ballester-) و همکاران، مدل تجزیه فریمن را برای داده‌های POLINSAR توسعه دادند و همچنین صالحی و همکاران (۲۰۱۸)، مدل تجزیه بی‌نظمی-ناهمسانگردی-آلفا را در مورد داده‌های POLINSAR توسعه داده و مورد ارزیابی قرار دادند. در تحقیقی که توسط لو و همکاران (2016) انجام گرفت توانایی داده‌های POLINSAR باند X در طبقه‌بندی پوشش زمین و استخراج ارتفاع با استفاده از یک روش شیء‌مبنا و نظارت‌نشده بی‌نظمی-PSD مورد ارزیابی قرار گرفته است. همچنین در (D'Hondt, Haensch et al. 2018) یک روش طبقه‌بندی نظارت‌شده پوشش زمین با استفاده از ماتریس هم‌دوسی توپوگرافی پیشنهاد شده است. در این تحقیق، تلفیق توصیف‌گرهای استخراج شده با ویژگی‌های مکانی باعث بهبود طبقه‌بندی نسبت به ویژگی‌های ماتریس هم‌دوسی ساده شده است.

در مواردی که ذکر شد عمده کارهای انجام شده در زمینه طبقه‌بندی داده‌های POLINSAR مورد ارزیابی قرار گرفتند. طبقه‌بندی این داده‌ها از جمله مواردی است که کمتر مورد توجه قرار گرفته و لازم است تحقیقات بیشتری در این زمینه انجام شود تا توانایی این داده‌ها بیشتر آشکار شود چون این داده‌ها شامل اطلاعات مفیدی از نوع پلاریمتری، شدت و اینترفرومتری بوده و همچنین شامل اطلاعاتی نظیر کوهرنس‌های بهینه هستند که در هیچ یک از داده‌های

با استفاده از روش تجزیه فریمن-دوردن^۱ تفکیک می‌شود. مراکز اولیه کلاس‌های جنگلی در صفحه پارامترهای نسبی A1-A2 که در (Ferro-Famil, Pottier et al. 2002) معرفی شده، تعیین شده و در ادامه از الگوریتم خوشه‌بندی فازی (FCM)^۲ استفاده می‌شود که فاصله مورد استفاده در این خوشه‌بندی، فاصله ویشارت ماتریس هم‌دوسی پلاریمتری-اینترفرومتری است. هوآن و همکاران نیز از الگوریتم مشابه دیگری برای طبقه‌بندی جنگل استفاده کرده‌اند (Luo, Chen et al. 2010) که مناطق جنگلی را با استفاده از روش تجزیه H/A/α جدا کرده و مشابه روش قبل طبقه‌بندی را انجام داده‌اند. در این روش، طبقه‌بندی FCM و k-means برای طبقه‌بندی استفاده شدند که نتایج طبقه‌بندی FCM تطابق بیشتری با واقعیت زمینی دارد.

یان و همکاران، روش طبقه‌بندی نظارت‌نشده‌ای را پیشنهاد کرده‌اند که از ترکیب الگوریتم میدان تصادفی مارکوف^۳ (MRF) و بیشینه سازی امید ریاضی، برای طبقه‌بندی استفاده می‌کند (Yan, Yang et al. 2011). برای شروع طبقه‌بندی از مولفه‌های آنتروپی شانون POLINSAR استفاده می‌شود، به طوری که به ازای هر مولفه آنتروپی، طبقه‌بندی اولیه به سه کلاس صورت می‌پذیرد و در نهایت ۲۷ کلاس حاصل می‌شود. برای کاهش تعداد کلاس‌ها، براساس فاصله ویشارت بین مراکز آن‌ها باهم ادغام می‌شوند که با این کار مقداردهی اولیه انجام و برای طبقه‌بندی نهایی از ترکیب الگوریتم‌های EM و MRF استفاده می‌شود. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد روش میدان تصادفی مارکوف، روشی موثر برای شرکت دادن اطلاعات

3 Markov Random Field

1 Freeman-Durden

2 Fuzzy C-means clustering

کلاس از ادغام کلاس‌ها براساس آزمون تشابه ماتریس همدوسی مراکز کلاس‌ها استفاده می‌شود. با این کار، نقشه طبقه‌بندی شده اولیه برای الگوریتم میدان تصادفی مارکوف فراهم می‌شود و در ادامه با استفاده از سه پارامتر آنتروپی شانون داده POLINSAR و الگوریتم میدان تصادفی مارکوف، طبقه‌بندی نهایی به صورت تکراری انجام می‌شود. در این تحقیق سه ویژگی شدت، پلاریمتری و اینترفرومتری حاصل از داده‌های POLINSAR که سه پارامتری مستقل هستند، جهت طبقه‌بندی مورد استفاده قرار می‌گیرند و یکی از اهداف تحقیق، بررسی نقش مکمل این پارامترها در طبقه‌بندی‌های پوشش‌های زمین است. از آنجایی که سه پارامتر به طور خالص و غیرهمبسته هستند، در خوشه‌بندی با استفاده از این پارامترها می‌توان میزان تاثیر هر مولفه در دقت خوشه‌بندی نهایی را ارزیابی کرد. از جمله مواردی که در تحقیقات گذشته مورد توجه قرار نگرفته‌اند، مقایسه بی‌نظمی و ناهمسانگردی پلاریمتری و پلاریمتری-اینترفرومتری است که در ادامه، مقایسه بین این پارامترها از نوع پلاریمتری و پلاریمتری-اینترفرومتری آن‌ها صورت می‌گیرد. همچنین در اغلب تحقیقات انجام شده در طبقه‌بندی این نوع داده‌ها به‌ویژه در طبقه‌بندی گونه‌های جنگلی، به مقایسه بصری بین نقشه تولید شده و نقشه حقیقت زمینی اکتفا شده است، به‌طوری‌که در تحقیق حاضر از شاخص خلوص خوشه‌های حاصل شده، برای ارزیابی روش ارائه شده استفاده می‌شود که یک شاخص گویا از میزان توانایی طبقه‌بندی کننده در تمییز بین کلاس‌های مختلف است.

۲- مبانی تئوری تحقیق

۲-۱- داده‌های POLINSAR

داده‌های POLINSAR اغلب در فرم یک ماتریس 6×6

پلاریمتری و اینترفرومتری به‌تنهایی در دسترس نیستند. اما اکثر روش‌های ذکر شده، اطلاعات همسایگی در طبقه‌بندی را در نظر نگرفته‌اند. در نظر گرفتن اطلاعات همسایگی، نتایج بهتری را در طبقه‌بندی حاصل کرده و باعث افزایش دقت طبقه‌بندی و قطعه‌بندی می‌شود که در این زمینه، میدان تصادفی مارکوف یک روش قدرتمند قلمداد می‌شود. در تحقیق (Yan, Yang et al. 2011) به منظور مقداردهی اولیه الگوریتم از آنتروپی‌های شانون، داده‌های POLINSAR و تلفیق کلاس‌های حاصل با استفاده از فاصله ویشارت استفاده شده است به‌طوری‌که ۲۷ کلاس حاصل را به‌طور تکراری و با استفاده از فاصله ویشارت به ۸ کلاس کاهش می‌دهد که یک فرآیند زمان‌بر است و در مرحله بعد از تلفیق الگوریتم‌های میدان تصادفی مارکوف و بیشینه‌سازی امید ریاضی با تابع توزیع ویشارت ماتریس کوهرنسی T6 برای طبقه‌بندی استفاده می‌کند که باعث پیچیده‌تر شدن و زمان‌بر شدن الگوریتم می‌شود. در تحقیق حاضر، سه آنتروپی شانون در طبقه‌بندی نهایی به جای مقداردهی اولیه، در میدان تصادفی مارکوف استفاده کرده است، چون این سه پارامتر، توانایی طبقه‌بندی با دقت این داده‌ها را دارند. استفاده از یک بردار ویژگی سه بعدی در میدان تصادفی مارکوف، باعث سادگی محاسبات و افزایش سرعت پیاده‌سازی می‌شود. همچنین جهت مقداردهی اولیه از بی‌نظمی و ناهمسانگردی‌های POLINSAR و POLINSAR داده مورد نظر استفاده می‌شود که ۱۶ کلاس حاصل شد. ۱۶ کلاس اولیه با یک حد آستانه‌گذاری انجام می‌شود، به‌طوری‌که حد آستانه‌ها مقادیر کمینه (صفر)، بیشینه (یک) و میانگین هستند و از این‌رو، تعیین این مقادیر به‌طور دستی انجام نمی‌شود. در ادامه برای کاهش تعداد کلاس‌ها به ۸

هرمیتی همدوسی پلاریمتری 3×3 مربوط به دو تصویر پلاریمتری هستند. Ω_{12} ماتریس مختلط غیرهرمیتی است که نه تنها شامل اطلاعات پلاریمتری، بلکه شامل اطلاعات اینترفرومتری بین کانال‌های مختلف پلاریمتری نیز هست (Cloude and Papathanassiou 1998, Lee and Pottier 2009).

۲-۲- کوهرنس مختلط POLINSAR

مهمترین پارامتری که در پردازش‌ها و کاربردهای POLINSAR مورد استفاده قرار می‌گیرد، کوهرنس مختلط است که شامل اطلاعات کامل پلاریمتری و اینترفرومتری است. با فرض اینکه دو تصویر مختلط و اسکالر I_1 و I_2 که از تصویر کردن دو بردار تارگت پراکنش k_1 و k_2 بر بردارهای یکه مختلط ω_1 و ω_2 (که بیان کننده حالت پلاریزاسیون هر دو بردار تارگت هستند) به دست می‌آیند، کوهرنس مختلط $\gamma(\omega_1, \omega_2)$ که تابعی از حالت‌های پلاریزاسیون دو بردار تارگت هستند، به صورت زیر تعریف می‌شود:

رابطه (۴)

$$\gamma(\omega_1, \omega_2) = |\gamma| e^{i\varphi} = \frac{\langle I_1 I_2^H \rangle}{\sqrt{\langle I_1 I_1^H \rangle \langle I_2 I_2^H \rangle}} = \frac{\omega_1^H \Omega_{12} \omega_2}{\sqrt{(\omega_1^H T_{11} \omega_1)(\omega_2^H T_{22} \omega_2)}}$$

مقدار قدر مطلق کوهرنس نشان‌دهنده میزان همبستگی بین دو تصویر و آرگومان آن متعلق به فاز اینترفرومتری است و همچنین اگر از پلاریزاسیون‌های مختلف استفاده شود $(\omega_1 \neq \omega_2)$ ، آنگاه آرگومان از اختلاف فاز پلاریمتری نیز تاثیر می‌پذیرد. این مسئله به این مفهوم است که پلاریمتری، زمانی در فاز اینترفرومتری تاثیر می‌گذارد که از پلاریزاسیون مختلف در تشکیل

همدوسی اینترفرومتری، فرمول‌بندی می‌شوند. هر سلول تفکیکی، توسط یک سیستم پلاریمتری کامل از دو موقعیت با تفاوت جزئی در زاویه برخورد^۱ به صورت عبور تکراری یا تک‌عبور در ساختار اینترفرومتری، تصویربرداری می‌شوند. با فرض شرایط دوسویگی^۲ در سیستم تصویربرداری پلاریمتری، بردار تارگت پائولی به صورت زیر تعریف می‌شود:

رابطه (۱)

$$k_i = \frac{1}{\sqrt{2}} [S_{HH} + S_{VV} \quad S_{HH} - S_{VV} \quad 2S_{HV}]^T, \quad i = 1, 2$$

بنابراین بردار تارگت پراکنش مختلط ۶ بعدی POLINSAR با قرار دادن بردار تارگت پلاریمتری دو تصویر در یک بردار به دست می‌آید:

رابطه (۲)

$$k_6 = \frac{1}{\sqrt{2}} [S_{1HH} + S_{1VV}, S_{1HH} - S_{1VV}, 2S_{1HV}, S_{2HH} + S_{2VV}, S_{2HH} - S_{2VV}, 2S_{2HV}]^T = [k_1, k_2]^T$$

ماتریس همدوسی هرمیتی ۶ بعدی T_6 از ضرب خارجی رابطه (۲) با مزدوج مختلط آن به صورت زیر به دست می‌آید:

رابطه (۳)

$$T_6 = \langle k_6 \cdot k_6^H \rangle = \begin{bmatrix} \langle k_1 \cdot k_1^H \rangle & \langle k_1 \cdot k_2^H \rangle \\ \langle k_2 \cdot k_1^H \rangle & \langle k_2 \cdot k_2^H \rangle \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{11} & \Omega_{12} \\ \Omega_{12}^H & T_{22} \end{bmatrix}$$

در این رابطه، H نشان‌دهنده عملگر مزدوج مختلط و $\langle \rangle$ بیان‌کننده میانگین‌گیری زمانی یا مکانی است. در ماتریس حاصل، T_{11} و T_{22} همان ماتریس‌های

2 Reciprocity condition

1 Incidence angle

رابطه (۷)

$$p_A^n(Z) = \frac{n^n q |Z|^{n-q} [-n \text{Tr}(C^{-1}Z)]}{\prod_{i=1}^q \Gamma(n-i+1) |C|^n}$$
 بیان کننده عملگر تریس، q بیان کننده ابعاد ماتریس کواریانس است که برای داده‌های POLINSAR برابر ۶ بوده و Γ نشان دهنده تابع گاما است (Cloude and Papathanassiou 1998, Kersten, Lee et al. 2005, Lee and Pottier 2009).

اینترفروگرام استفاده شود. در نتیجه، این سوال مطرح می‌شود که کدام پلاریزاسیون‌ها بهترین و بیشترین کوه‌رنس را ارائه می‌دهند. این مسئله در قالب یک مسئله بهینه‌سازی توسط پاپاتاناسیو و کلود (1998) و همچنین توسط لی و پاتییر (2009) حل شده که خروجی عملیات بهینه‌سازی از هر دو روش پیشنهادی، کوه‌رنس‌های بهینه سه گانه ($\gamma_{opt_1}, \gamma_{opt_2}, \gamma_{opt_3}$) هستند.

۴-۲- آزمون تشابه دو ماتریس همدوسی با

توزیع ویشارت

اگر دو ماتریس $Y \in W_C(q, m, \Sigma_Y)$ و $X \in W_C(q, n, \Sigma_X)$ را در نظر بگیریم که از توزیع ویشارت پیروی می‌کنند، آنگاه جمع دو ماتریس $S = X + Y$ نیز از توزیع ویشارت $S \in W_C(q, n+m, \Sigma_S)$ پیروی می‌کند. فرضیه صفر H_0 این است که X و Y برابر هستند ($\Sigma_X = \Sigma_Y$). فرضیه جایگزین H_1 بیان می‌کند که X و Y برابر نیستند ($\Sigma_X \neq \Sigma_Y$). طبق (Conradson, Nielsen et al. 2003, Chen, Wang et al. 2012) شاخص شباهت دو ماتریس به صورت زیر بیان می‌شود:

رابطه (۷)

$$\ln Q = n(2q \ln 2 + \ln |X| + \ln |Y| - 2 \ln |X + Y|)$$

۵-۲- آنتروپی شانون داده‌های POLINSAR

آنتروپی شانون بردار \vec{K} با مقادیر مختلط تصادفی و با توزیع احتمال $P_{T_6}(\vec{K})$ به صورت زیر تعریف می‌شود (Yan, Yang et al. 2011):

رابطه (۸)

$$S[P_T(\vec{K})] = - \int P_T(\vec{K}) \log[P_T(\vec{K})] d\vec{K}$$

به طوریکه $\int \vec{K}$ بیان کننده انتگرال مختلط ۶ بعدی است

۳-۲- توزیع گوسی و ویشارت مختلط

بردار ارائه شده در رابطه (۱)، بردار پراکنش تارگت با فرض شرایط دوسویگی است. زمانی که سیستم راداری، ناحیه‌ای را که حاوی پراکنش‌گرهای اولیه بسیار زیادی است نوردهی می‌کند، این بردار از یک توزیع گوسی مختلط با میانگین صفر و ماتریس کواریانس C ، $k \in N(0, C)$ پیروی می‌کند. توزیع گوسی مختلط به صورت زیر بیان می‌شود:

$$p(k) = \frac{1}{\pi^3 |C|} \exp(-k^H C^{-1} k) \quad \text{رابطه (۵)}$$

ماتریس کواریانس C به صورت $C = E[kk^H]$ تعریف می‌شود و $||$ بیان کننده عملگر دترمینان است.

یکی از متداول‌ترین پردازش داده‌های SAR استفاده از پردازش چند منظری^۱ است که چندین ماتریس کواریانس تک منظری مستقل را باهم میانگین‌گیری می‌کند. ماتریس کواریانس n منظری به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$Z = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n k_i k_i^H \quad \text{رابطه (۶)}$$

با فرض $A = nZ$ آنگاه ماتریس A از توزیع ویشارت مختلط پیروی می‌کند. تابع توزیع ماتریس Z به این صورت تعریف می‌شود:

$$H_{Pol} = - \sum_{i=1}^3 P_i \log_3(P_i) \quad . \quad P_i = \frac{\lambda_j}{\sum_{i=1}^3 \lambda_i}$$

λ_i مقادیر ویژه ماتریس هم‌دوسی پلاریمتری است به طوری که $(\lambda_1 > \lambda_2 > \lambda_3)$. ناهمسانگردی A اهمیت نسبی مقادیر ویژه دوم و سوم را بیان می‌کند و مکمل بی

نظمی است که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$A_{Pol} = \frac{\lambda_2 - \lambda_3}{\lambda_2 + \lambda_3} \quad \text{رابطه (۱۳)}$$

پارامترهای بی‌نظمی و ناهمسانگردی برای داده‌های POLINSAR با استفاده از کوهرنس‌های بهینه $(\gamma_{opt,1} > \gamma_{opt,2} > \gamma_{opt,3})$ به صورت زیر تعریف می‌شوند (Ferro-Famil, Pottier et al. 2001):

$$H_{Int} = - \sum_{i=1}^3 \gamma_{opt,i} \log_3(\gamma_{opt,i}) \quad \text{رابطه (۱۴)}$$

$$A_{Int} = \frac{\gamma_{opt,2} - \gamma_{opt,3}}{\gamma_{opt,2} + \gamma_{opt,3}} \quad \text{رابطه (۱۵)}$$

۲-۷- میدان تصادفی مارکوف

میدان تصادفی مارکوف (MRF) در سال ۱۹۷۴ معرفی و در سال ۱۹۸۴ توسط گمن و همکاران (Geman and Geman 1987) برای کاربردهای پردازش تصویری توسعه داده شد. این مدل‌ها با استفاده از یک گراف تعریف می‌شوند. بنابراین گراف $G = (Q, E)$ که Q نشان‌دهنده گره‌ها و E نشان‌دهنده اتصال بین گره‌ها است، می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. با فرض اینکه $X = \{x_1, x_2, \dots, x_m\}$ مجموعه‌ای از متغیرهای تصادفی باشد که بتوانند مقدار ω_i را از مجموعه Ω انتخاب کنند، به مجموعه X میدان تصادفی گفته می‌شود. برای تعریف میدان تصادفی مارکوف سه تعریف زیر در نظر گرفته می‌شود (Demonceaux and Vasseur 2006, Suliga, Deklerck et al. 2008):

الف) همسایگان: دو پیکسل s_i و s_j همسایه هستند اگر

و $P_{T_6}(\vec{K})$ از توزیع گوسی مختلط پیروی می‌کند. در رابطه (۸) آنتروپی شانون را می‌توان به صورت زیر بازنویسی کرد (Morio, Refregier et al. 2009):

$$S[T] = \log(\pi^6 e^6 |T|)$$

در صورتیکه از تابع توزیع گوسی دایره‌ای استفاده شود، آنتروپی شانون در رابطه (۹)، در یک منطقه هموزن از داده POLINSAR را، می‌توان به سه مولفه شدت، پلاریمتری و اینترفرومتری تفکیک کرد:

$$S[T] = S_I[T] + S_P[T] + S_\mu[T] \quad \text{رابطه (۱۰)}$$

سه ترم آنتروپی شانون به صورت زیر به دست می‌آیند:

$$S_I[T] = 3 \log\left(\frac{e\pi I_1}{3}\right) + 3 \log\left(\frac{e\pi I_2}{3}\right)$$

$$S_P[T] = \log[1 - \rho_1^2] + \log[1 - \rho_2^2] \quad \text{رابطه (۱۱)}$$

$$S_\mu[T] = \log\{(1 - \rho_1^2) + (1 - \rho_2^2) + (1 - \rho_3^2)\}$$

ترم اول نشان دهنده میزان تاثیر شدت در آنتروپی شانون است و فقط تابعی از شدت های I_1 و I_2 بوده که توسط دو آنتن دریافت شده است. ترم دوم، میزان تاثیر پلاریزاسیون در آنتروپی شانون را بیان می‌کند که فقط تابعی از درجه پلاریزاسیون های ρ_1 و ρ_2 ماتریس‌های هم‌دوسی پلاریمتری دو تصویر است. ترم آخر، نشان دهنده میزان اشتراک تاثیر اینترفرومتری در آنتروپی شانون است که فقط تابعی از سه کوهرنس بهینه $\gamma_{opt,1}, \gamma_{opt,2}, \gamma_{opt,3}$ است.

۲-۶- بی‌نظمی و ناهمسانگردی

بی‌نظمی ماتریس هم‌دوسی پلاریمتری که میزان بی‌نظمی و اتفاقی بودن پراکنش یک عارضه را بیان می‌کند به صورت زیر بیان می‌شود (Cloude and Pottier 1997):

$$\text{رابطه (۱۲)}$$

رابطه (۱۷)

$$P(x) = \frac{1}{Z} \exp\left(-\sum_{c \in C} V_c(x)\right) \cdot Z$$

$$= \sum_x \exp\left(\sum_{c \in C} V_c(x)\right)$$

در این رابطه Z پارامتر نرمال کننده و T پارامتر ثابت بوده که دما نامیده می شود و اغلب برابر یک در نظر گرفته می شود، C مجموعه دسته ها^۴ است که بر روی ساختار همسایگی تعریف می شود. V_c تابع پتانسیل یا تابع انرژی متغیر X بر روی مجموعه C است. یک دسته در حقیقت شامل پیکسل مورد نظر و دیگر پیکسل هایی است که در ارتباط با این پیکسل هستند. سایر پیکسل ها نیز می توانند با همدیگر ارتباط مستقیم داشته باشند. یک دسته شامل n پیکسل، دسته از درجه i نام نامیده می شود. مجموعه دسته ها به صورت زیر تعریف می شود:

$$C = C_1 \cup C_2 \cup C_3 \cup \dots \quad \text{رابطه (۱۸)}$$

به ازای هر دسته مقداری به آن ها تعلق می گیرد که تابع پتانسیل دسته نامیده می شود و برای کل دسته ها تابع پتانسیل به صورت $\sum_{c \in C} V_c(x)$ در توزیع گیبس بیان می شود:

رابطه (۱۹)

$$\sum_{c \in C} V_c(x) = \sum_{i \in C_1} V_1(x_i)$$

$$+ \sum_{j \in C_2} V_2(x_j) + \sum_{k \in C_3} V_3(x_k) + \dots$$

یکی از پرکاربردترین توابع پتانسیل دسته ها در پردازش تصویر، تابع منطقی چند لایه (MLL)^۵ است. در این تحقیق از دسته های درجه اول و دوم استفاده می شود که تابع MLL برای درجات اول و دوم به صورت زیر تعریف می شود (Li 2009):

یک لبه $e \in E$ بین آنها وجود داشته باشد. مجموعه همسایه های پیکسل s را با δ_s نمایش می دهیم.

(ب) سیستم همسایگی: مجموعه $\delta = \{\delta_s | s \in Q\}$ یک سیستم همسایگی برای گره Q است اگر دو شرط $s \notin \delta_s$ و $r \in \delta_s \Leftrightarrow s \in \delta_r$ برقرار باشد. شرط اول بیان می کند که یک پیکسل، یک همسایگی برای خود محسوب نمی شود و شرط دوم بیان می کند سیستم همسایگی یک سیستم دوطرفه است.

(ج) میدان گسسته X یک میدان تصادفی مارکوف است اگر:

$$\forall \omega, P(X = \omega) > 0 \quad \text{رابطه (۱۶)}$$

$$\forall (\omega, s). P(X_s = \omega_s | X_r = \omega_r, r \neq s)$$

$$= P(X_s = \omega_s | X_r = \omega_r, r \in \delta_s)$$

در این رابطه ترم اول بیان کننده مثبت بودن احتمالات است یعنی احتمال انتخاب هر مقدار، توسط متغیر وجود دارد و ترم دوم بیان کننده اصل مارکوویتی است یعنی اگر متغیر X_s که مقدار آن ω_s است بتواند مقدار متغیر X_r را که برابر ω_r است بگیرد آنگاه باید X_r و X_s در سیستم همسایگی هم باشند. اصل مارکوویتی بیان کننده ویژگی های محلی متغیر X است (Li 2009).

۲-۷-۱- توزیع گیبس^۱

به مجموعه متغیرهای X بر روی S با توجه به δ یک میدان تصادفی گیبس (GRF)^۲ گفته می شود اگر و تنها اگر از توزیع گیبس پیروی کنند. همچنین نظریه همسرلی-کلایفورد^۳ بیان می کند که مجموعه متغیرهای تصادفی X بر روی S نسبت به δ یک MRF است، اگر و تنها اگر X یک GRF بر روی S نسبت به δ باشد. توزیع گیبس به صورت زیر بیان می شود (Li 2009):

4 Cliques set

5 Multi-Level Logistic function

1 Gibbs distribution

2 Gibbs Random Field

3 Hammersley-Clifford theorem

رابطه (۲۰)

$$V_1(x_i) = \alpha_i$$

$$V_2(x_i, x_j) = \begin{cases} -\beta_i & \text{if } x_i = x_j, \{i, j\} \in C_2^c \\ \beta_i & \text{if } x_i \neq x_j, \{i, j\} \in C_2^c \end{cases}$$

با فرض اینکه بردار پارامترهای آنتروپی شانون از توزیع گوسی چند متغیره پیروی می‌کنند، در رابطه فوق، احتمال پیشین با توزیع گوسی چند متغیره بیان می‌شود (Duda, Hart et al. 1973). بنابراین احتمال پیشین $P(Y|X)$ در رابطه (۲۳) با توزیع گوسی چند متغیره و $P(X)$ با رابطه (۱۷) جایگذاری می‌شوند. در ادامه با لگاریتم طبیعی گرفتن از طرفین رابطه و حذف مقادیر ثابت (Yang and Jiang 2003) تابع انرژی به صورت زیر بیان می‌شود:

رابطه (۲۴)

$$E(x) = \sum_s \left(\frac{1}{2} \ln |C_{x_i}| + \frac{1}{2} (\vec{y}_i - \vec{\mu}_{x_i})^T C_{x_i}^{-1} (\vec{y}_i - \vec{\mu}_{x_i}) \right) + \frac{1}{T} \sum_{c \in C} V_c(x_k)$$

پیکسل مورد نظر به کلاسی تعلق می‌گیرد که به ازای آن کلاس تابع انرژی بیان شده، کمترین مقدار را داشته باشد و این موضوع هم ارز این است که احتمال پیکسل مورد نظر به ازای آن کلاس بیشترین مقدار را کسب کند:

رابطه (۲۵)

$$x = \arg \max P(x, y) = \arg \min E(x), \quad x \in X$$

۳- الگوریتم روش پیشنهادی

مراحل کلی الگوریتم پیشنهاد شده در فلوچارت شکل ۱، نمایش داده می‌شود. همانطور که مشاهده می‌شود الگوریتم با داشتن دو تصویر پلاریمتری در ساختار اینترفرومتری شروع می‌شود. در مرحله اول الگوریتم، پیش پردازش‌های لازم مانند حذف اثر زمین مسطح، هم مرجع سازی و فیلتر اسپکل انجام می‌شود. بعد از پیش پردازش‌های لازم، الگوریتم دارای دو مرحله اصلی است که در ادامه شرح داده می‌شود.

۲-۷-۲- تابع انرژی

در بخش قبل، میدان تصادفی متغیرها با X تعریف شد. در اینجا فضای ویژگی‌های توصیف‌کننده گره‌ها که همان پیکسل‌ها هستند، با $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_n\}$ نمایش داده می‌شود (Suliga, Deklerck et al. 2008). برچسب‌گذاری یا طبقه‌بندی بهینه در میدان تصادفی مارکوف شاخص MAP^۱ را برآورده می‌کند که آن هم نیازمند بیشینه‌سازی احتمال پسین $P(X|Y)$ برچسب‌گذاری است. مدل تخمین بیز^۲ امکان برچسب‌گذاری با استفاده هم‌زمان از نقشه طبقه‌بندی موجود و مشاهدات را فراهم می‌کند. این کار به کمک دو میدان (X, Y) با توزیع احتمال $P(X|Y)$ انجام می‌شود (Demonceaux and Vasseur 2006). با فرض اینکه X تقریبی از \hat{X} باشد به‌طوری‌که \hat{X} حاوی کلاس‌های واقعی پیکسل‌ها باشد به صورت زیر بیان می‌شود:

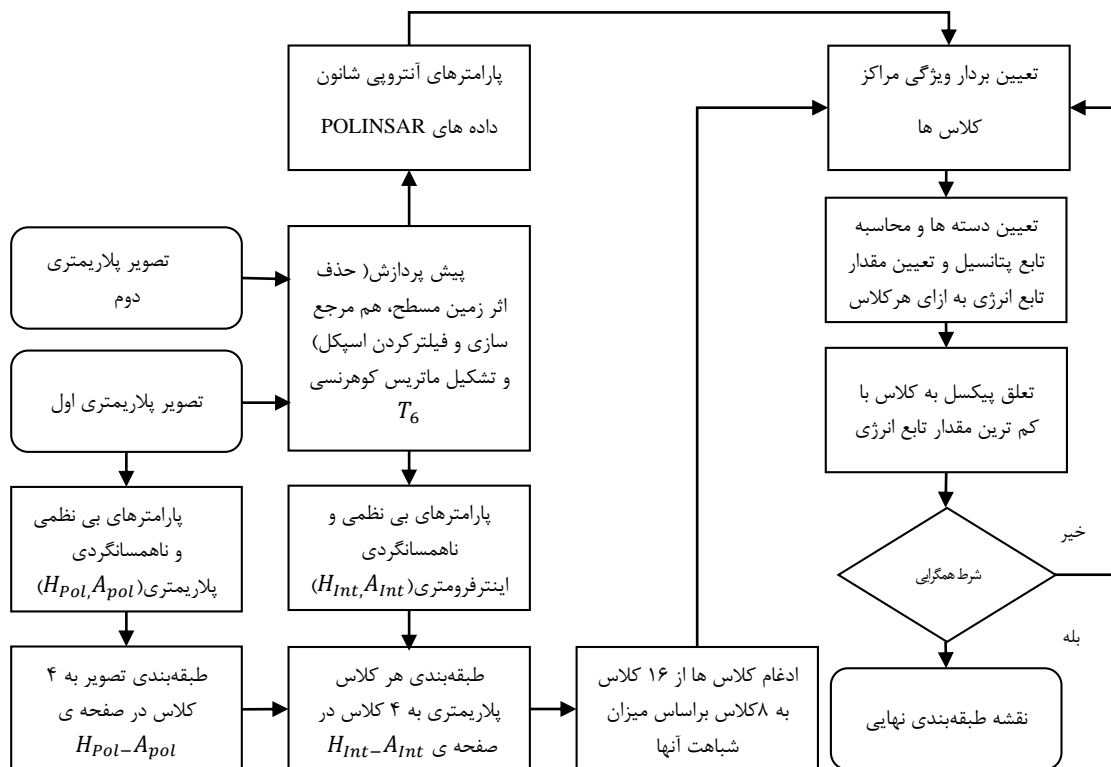
$$\hat{X} = \arg \max P(X|Y) \quad \text{رابطه (۲۱)}$$

با کمک رابطه بیز، احتمال پیشین $P(Y|X)$ به احتمال پسین تبدیل می‌شود:

$$P(X|Y) = \frac{P(Y|X)P(X)}{P(Y)} \quad \text{رابطه (۲۲)}$$

در این رابطه $P(Y)$ چگالی Y است که در صورت معلوم بودن Y می‌توان ثابت فرض کرد. بنابراین رابطه (۲۲) به صورت زیر ساده می‌شود:

$$P(X|Y) = P(Y|X)P(X) \quad \text{رابطه (۲۳)}$$



شکل ۱. الگوریتم روش پیشنهادی طبقه‌بندی با استفاده از میدان تصادفی مارکوف و آنتروپی شانون داده‌های POLINSAR با مقدار دهی اولیه به کمک بی نظمی و ناهمسانگردی پلاریمتری و اینترفرومتری

۳-۱- طبقه‌بندی اولیه

پلاریمتری-اینترفرومتری وارد الگوریتم می‌شوند. هر کلاس حاصل از مرحله قبل در صفحه بی نظمی-ناهمسانگردی اینترفرومتری ($H_{Int}-A_{Int}$) به ۴ کلاس دیگر طبقه‌بندی می‌شوند. مانند مرحله قبل، این مرحله از طبقه‌بندی اولیه نیز با استفاده از روش ساده و سریع حدآستانه گذاری انجام می‌شود. در حقیقت در این مرحله، هر کلاس پلاریمتری به ۴ زیرکلاس دیگر طبقه‌بندی می‌شود که تراکم و تغییرات ارتفاعی زیرکلاس‌ها باهم متفاوت هستند.

حد آستانه‌گذاری برای پارامترهای بی‌نظمی و ناهمسانگردی پلاریمتری و اینترفرومتری به صورت دستی تعیین نمی‌شود. زیرا برای طبقه‌بندی به ۴ کلاس، نیاز به ۳ حدآستانه در هر پارامتر است. از میانگین هر

الگوریتم طبقه‌بندی میدان تصادفی مارکوف برای شروع، نیاز به یک میدان اولیه یا نقشه طبقه‌بندی شده اولیه دارد. بنابراین قبل از ورود به حلقه تکراری الگوریتم میدان تصادفی مارکوف، طبقه‌بندی اولیه تصویر با استفاده از بی‌نظمی و ناهمسانگردی حاصل از داده‌های پلاریمتری و پلاریمتری-اینترفرومتری انجام می‌شود. منطقه مورد نظر در صفحه بی‌نظمی-ناهمسانگردی پلاریمتری ($H_{Pol}-A_{Pol}$) و با استفاده از حدآستانه گذاری، به ۴ کلاس طبقه‌بندی می‌شود. این روش از دید پلاریمتری به طبقه‌بندی منطقه می‌پردازد. برای تفکیک‌پذیری بیشتر کلاس‌ها و عوارض موجود، بی‌نظمی و ناهمسانگردی حاصل از داده‌های

پارامتر (دوپارامتری بی‌نظمی و دو پارامتر ناهمسانگردی) به عنوان حدآستانه میانی استفاده می‌شود. پارامترهای بی‌نظمی و ناهمسانگردی مقادیری بین صفر و یک دارند که این مقادیر نیز به عنوان حدود بالا و پایین استفاده می‌شود.

بعد از این مرحله ۱۶ کلاس اولیه حاصل می‌شود ولی هدف الگوریتم، طبقه‌بندی منطقه به ۸ کلاس است. به منظور کاهش تعداد آن‌ها به ۸ کلاس، کلاس‌ها دو به دو با یکدیگر ادغام می‌شوند. معیار ادغام دو کلاس با یکدیگر، میزان شباهت ماتریس‌های هم‌دوسی T_6 مراکز دو کلاس است. میزان شباهت (lnQ) که در رابطه (۷) معرفی شد، برای دو ماتریس یکسان برابر صفر است و با افزایش اختلاف آن‌ها این مقدار به سمت منفی میل می‌کند. میزان شباهت بین تمام کلاس‌ها با یکدیگر اندازه‌گیری می‌شود و سپس این مقادیر از بیشترین مقدار (نزدیک‌ترین مقدار به صفر) به سمت کمترین مقدار مرتب می‌شوند. در لیست مرتب‌شده، دو کلاس اول بیشترین شباهت را به هم دارند، در نتیجه با یکدیگر ادغام می‌شوند و این دو کلاس از کل لیست حذف می‌شوند زیرا هر کلاس فقط یکبار و با یک کلاس ادغام می‌شود. این پروسه به کل لیست تکرار می‌شود و در نهایت ۸ کلاس از مرحله اول به دست می‌آید.

دوم برای هر پیکسل تعیین می‌شوند. در این تحقیق، مقدار پارامتر α برابر ۱ و مقدار پارامتر β برابر با ۱،۵ در نظر گرفته می‌شود. با تعریف این دو پارامتر مقدار تابع پتانسیل دسته‌ها از رابطه (۱۹) محاسبه می‌شود. با داشتن بردار ویژگی مرکز کلاس‌ها از مرحله قبل، بردار ویژگی هر پیکسل و تابع پتانسیل دسته‌ها، مقدار تابع انرژی برای هر پیکسل به ازای هر کلاس از رابطه (۲۴) محاسبه می‌شود و طبق رابطه (۲۵) پیکسل به کلاسی تعلق می‌گیرد که مقدار تابع انرژی به ازای آن کلاس، کمترین مقدار را داشته باشد. بعد از انجام این پروسه بر روی تمامی پیکسل‌های تصویر، نقشه طبقه‌بندی شده به دست می‌آید. اگر شرط همگرایی برقرار باشد این نقشه به عنوان نقشه طبقه‌بندی شده نهایی تلقی می‌شود، در غیر این صورت، مراکز کلاس‌ها دوباره با پیکسل‌های متعلق به آن کلاس به روز شده و چرخه طبقه‌بندی تا رسیدن به شرط همگرایی تکرار می‌شود. اگر تعداد پیکسل‌هایی که در هر تکرار MRF برچسب آن‌ها تغییر می‌کند کمتر از ۰،۰۰۱ درصد کل پیکسل‌های تصویر (۱۶ پیکسل) باشند آنگاه الگوریتم همگرا می‌شود.

۴- منطقه مطالعاتی

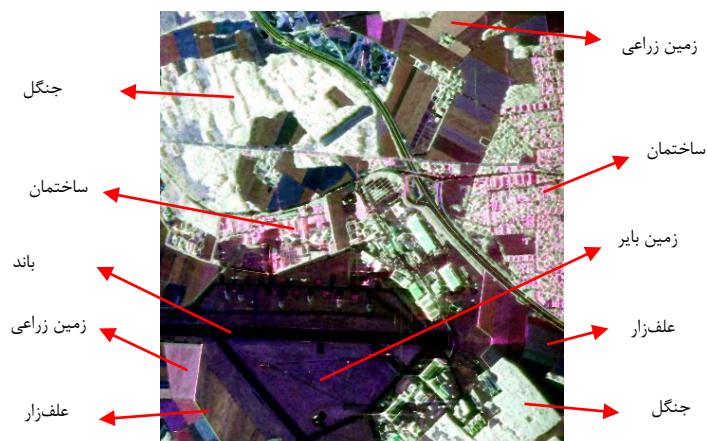
برای بررسی و ارزیابی الگوریتم پیشنهادی از داده POLINSAR اخذ شده از منطقه اوبرپفاننهوفن واقع در کشور آلمان استفاده می‌شود. این داده، توسط سازمان فضایی این کشور (DLR) E-SAR در باند L اخذ شده است. ابعاد تصویر 1200×1300 پیکسل و قدرت تفکیک مکانی آن $2,2 \times 3$ متر و زاویه دید سنجنده از ۲۵ تا ۶۰ درجه متغیر است. میانگین خط مبنای مکانی نیز تقریباً ۲۶ متر و ارتفاع پرواز سکو ۳ کیلومتر است. ناحیه موردنظر شامل عوارض طبیعی و دست‌ساز بشر

۳-۲- طبقه‌بندی نهایی

خروجی این مرحله، نقشه طبقه‌بندی شده نهایی است. این مرحله، برای طبقه‌بندی از الگوریتم MRF استفاده می‌کند و مقداردهی اولیه الگوریتم از نقشه طبقه‌بندی اولیه مرحله قبل تامین می‌شود. از آنتروپی شانون که شامل ۳ سه پارامتر مستقل است، به عنوان بردار ویژگی مشاهده شده هر پیکسل استفاده می‌شود. قبل از محاسبه مقدار تابع انرژی، دسته‌های درجه اول و درجه

در نظر گرفته می‌شود. در شکل ۲، عوارض موجود در منطقه مورد نظر بر روی تصویر رنگی پائولی با استفاده از تصویر گوگل ارث، با توان تفکیک بالا و نقشه‌های موجود مشخص شده است.

بوده و کلاس‌های منطقه شامل ۶ کلاس جنگل، علفزار، زمین بایر، باند فرودگاه، ساختمان و زمین‌های کشاورزی است. مناطق جنگلی و علفزار هر کدام شامل دو گونه است، به همین دلیل منطقه مورد نظر ۸ کلاس



شکل ۲. تصویر بردار تارگت پائولی و عوارض موجود در منطقه

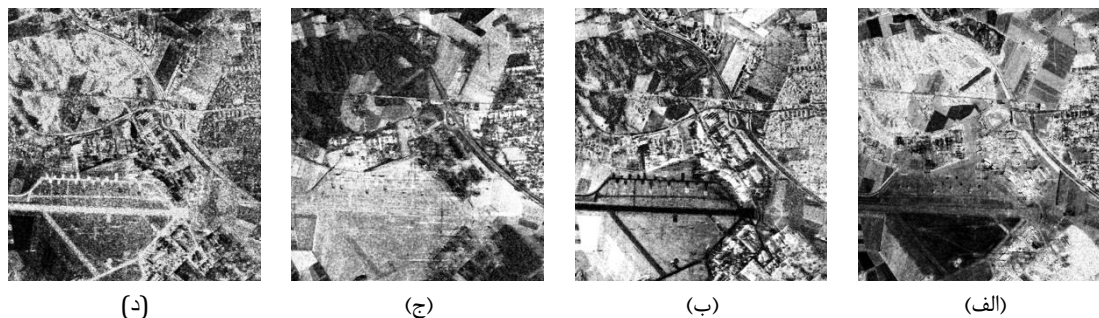
علفزار واکنش تقریباً مشابهی نشان می‌دهند، حال آنکه مناطق جنگلی و ساختمان‌ها در این پارامترها قابل مشاهده هستند. بر همین اساس است که در ابتدا، منطقه مورد نظر بر اساس بی‌نظمی و ناهمسانگردی پلاریمتری به ۴ کلاس طبقه‌بندی می‌شود. شکل ۳-ب و د، نشان‌دهنده بی‌نظمی و ناهمسانگردی اینترفرومتری هستند که باند فرودگاه از زمین اطراف آن متمایز شده و تغییرات در مناطق جنگلی قابل مشاهده است که نشان‌دهنده گونه مختلف جنگلی است. بر همین اساس، هر کدام از کلاس‌های پلاریمتری حاصل، به ۴ زیرکلاس بر اساس پارامترهای اینترفرومتری طبقه‌بندی شده‌اند. همچنین شاهد رفتار متفاوت بی‌نظمی و ناهمسانگردی پلاریمتری و اینترفرومتری به‌ویژه در مناطق جنگلی هستیم که این مورد به دلیل پراکنش‌های مختلف اتفاق افتاده از سطح زمین تا تاج درخت است.

۵- بحث و بررسی نتایج به دست آمده

روش طبقه‌بندی پیشنهاد شده از دو مرحله اصلی تشکیل می‌شود که در هر دو مرحله آنترپوی‌های مختلفی مورد استفاده قرار می‌گیرند. بنابراین در ابتدا ویژگی‌های مورد استفاده بررسی شده و در ادامه نتایج الگوریتم پیشنهادی، بررسی شده و با چند روش که در ادامه مطرح می‌شوند مقایسه خواهد شد.

۵-۱- توصیف ویژگی‌های بیان‌کننده بی‌نظمی

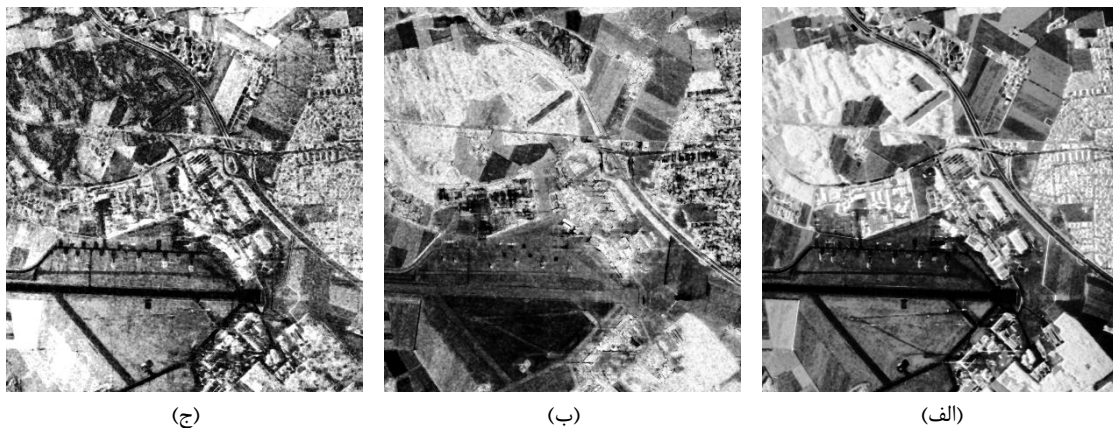
در شکل ۳، تصاویر مربوط به بی‌نظمی و ناهمسان‌گردی‌های پلاریمتری و اینترفرومتری منطقه مورد نظر نمایش داده می‌شود. هر چهار پارامتر مقداری بین صفر و یک دارند به نحوی که مقادیر نزدیک به یک، روشن‌تر و مقادیر نزدیک به صفر تیره‌تر نمایش داده شده‌اند. بی‌نظمی و ناهمسانگردی پلاریمتری برای عوارض مسطح موجود در مرکز تصویر مانند باند فرودگاه، زمین بایر و



شکل ۳. (الف) بی‌نظمی پلاریمتری، (ب) بی‌نظمی اینترفرومتری، (ج) ناهمسانگردی پلاریمتری، (د) ناهمسانگردی اینترفرومتری

مشاهده می‌شود، مولفه پلاریمتری آنتروپی شانون نیز نمی‌تواند تفاوت بین گونه‌های جنگلی را بیان کند چون این پارامتر نیز فقط تابعی از میزان پلاریزاسیون دو تصویر است که از تراکم تاج درخت، تاثیر بسیار کمی می‌پذیرد و تغییرات ارتفاعی درخت را به هیچ وجه در نظر نمی‌گیرد. با این حال، در تصویر مربوط به این پارامتر، جاده آسفالتی که از بین مناطق جنگلی بالای باند فرودگاه می‌گذرد به خوبی مشخص است که به صورت یک خط در امتداد راست به چپ تصویر دیده می‌شود. این جاده در دو پارامتر دیگر نیز قابل رویت است ولی در تصویر مولفه پلاریمتری دارای وضوح بسیار زیادی است. پارامتر اینترفرومتری می‌تواند به عنوان داده تکمیلی و کمکی برای دو پارامتر قبلی باشد. چون علاوه بر اینکه این پارامتر متاثر از شدت و پلاریزاسیون است، می‌تواند تغییرات ارتفاعی و تراکم تاج درخت را تشخیص دهد. همانطور که در شکل ۴ - ج نیز مشاهده می‌شود تفاوت‌های مناطق جنگلی و عوارض مختلف قابل مشاهده است که در مولفه‌های شدت و پلاریمتری مشاهده نمی‌شوند. همچنین در تصویر مولفه پلاریمتری، باند فرودگاه تقریباً از زمین‌های بایر اطراف آن به سختی قابل تشخیص است درحالی‌که این عارضه در مولفه اینترفرومتری به خوبی رویت می‌شود.

سه پارامتر مربوط به شدت، پلاریمتری و اینترفرومتری آنتروپی شانون داده POLINSAR از منطقه مورد مطالعه به طور بصری به ترتیب در شکل ۴-الف، ب و ج نشان داده شده‌اند. همانطور که به صورت چشمی نیز دیده می‌شود، این سه تصویر اطلاعات متفاوتی از عوارض موجود در منطقه را نشان می‌دهند. به عنوان مثال، رفتار این سه پارامتر در مناطق جنگلی، شهری و در باند فرودگاه به گونه‌ای است که اطلاعات مکملی برای همدیگر به حساب می‌آیند. در تصاویر مربوط به مولفه شدت و پلاریمتری، مناطق پوشیده از علف تقریباً در دو کلاس مختلف نشان داده شده‌اند، حال آنکه تصویر مربوط به پارامتر اینترفرومتری، این مناطق را با مقادیر تقریباً یکسان نمایش می‌دهد که نشان دهنده تراکم و ساختار ارتفاعی نزدیک به هم این مناطق است. در مناطق جنگلی، یکنواختی کامل در تصویر شدت مشاهده می‌شود به طوری‌که مناطق جنگلی بالای باند فرودگاه و پایین باند فرودگاه به طور یکنواخت و با مقادیر نزدیک به هم نمایش داده شده که به دلیل در نظر گرفتن میزان انرژی دریافتی است. حال آنکه این دو منطقه جنگلی از نظر تراکم و ارتفاع با هم متفاوت هستند. پارامتر مربوط به پلاریمتری نیز دو منطقه جنگلی مذکور را یکنواخت نشان می‌دهد. همانطور که



شکل ۴. مولفه‌های آنروپی شانون، (الف) مولفه شدت، (ب) مولفه پلاریمتری، (ج) مولفه اینترفرومتری

۵-۲- بررسی نتایج الگوریتم پیشنهادی

برای بررسی دقت طبقه‌بندی از شاخص خلوص (PI) استفاده می‌شود (Rendón, Abundez et al. 2011). این شاخص برای مواقعی مناسب است که با داشتن K کلاس واقعیت زمینی، تصویر موردنظر به C خوشه طبقه‌بندی شود. در این تحقیق، مقدار K برابر ۶ و مقدار C برابر ۸ در نظر گرفته شده است. شاخص خلوص هر الگوریتم برای هر خوشه و شاخص خلوص کل در جدول ۱، نمایش داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود به ازای هر روش، جدول دارای ۸ ستون و ۶ سطر است. مجموع اعداد موجود در هر سطر، نشان‌دهنده تعداد کل پیکسل‌های واقعیت زمینی مربوط به آن عارضه زمینی است. اعداد موجود در یک ستون از این جدول نشان می‌دهد که چه مقدار از هر کلاس در این خوشه حضور دارد. شاخص خلوص، بزرگ‌ترین عدد موجود در هر ستون را بر مجموع اعداد هر ستون تقسیم می‌کند و عدد حاصل شده درجه خلوص آن کلاس یا ستون را نشان می‌دهد (Rendón, Abundez et al. 2011). بنابراین ایده‌آل‌ترین حالت که همان داشتن درصد خلوص ۱۰۰

است زمانی به دست می‌آید که یک کلاس فقط شامل پیکسل‌های یک عارضه زمینی باشد. در الگوریتم پیشنهادی ابتدا منطقه مورد مطالعه به ۴ کلاس در صفحه $(H_{Pol}-A_{Pol})$ طبقه‌بندی شد و سپس هر کلاس از دید اینترفرومتری در صفحه $(H_{Int}-A_{Int})$ به ۴ کلاس دیگر طبقه‌بندی می‌شود. ۱۶ کلاس حاصل، هم نتیجه طبقه‌بندی از منظر پلاریمتری است و هم از دید اینترفرومتری. بنابراین برای ادغام کلاس‌ها لازم است که شباهت و نزدیکی آن‌ها، هم از دید پلاریمتری و هم از دید اینترفرومتری ارزیابی شود که این کار با کمک آزمون شباهت ماتریس همدوسی T_6 مرکز هر کلاس انجام می‌شود. نتایج مربوط به طبقه‌بندی اولیه در شکل ۵-الف نشان داده شده است. از این روش، برای مقداردهی اولیه در الگوریتم پیشنهادی استفاده می‌شود که سرعت اجرای آن بسیار بالا است زیرا فقط از طریق حدآستانه، این طبقه‌بندی انجام می‌شود. روش حدآستانه گذاری بر روی بی‌نظمی و ناهمسانگردی و ادغام کلاس‌ها در مقایسه با روش طبقه‌بندی $H/A/\alpha$ و ویشارت (T_3) (Cloude and Pottier 1997) که در شکل ۵-ب نمایش داده می‌شود نتایج بهتری ارائه کرده‌است.

عارضه‌های ساختمان و جنگل با مقادیر نزدیک به هم، در این کلاس تداخل پیدا کرده‌اند. مهمترین علتی که می‌توان ذکر کرد این است که جنگل و ساختمان در این پیکسل‌ها دارای ارتفاع نزدیک به هم بوده‌اند و همین عامل خود را در ماتریس همدوسی T_6 نشان می‌دهد. در این روش عوارض زمین بایر و باند فرودگاه از زمین زراعی و علفزار تفکیک شده‌اند ولی با این حال، PI مربوط به کلاس ۳، برابر ۵۱،۵۷ درصد است که این مقدار پایین، ناشی از عدم تفکیک باند فرودگاه و زمین بایر از همدیگر است.

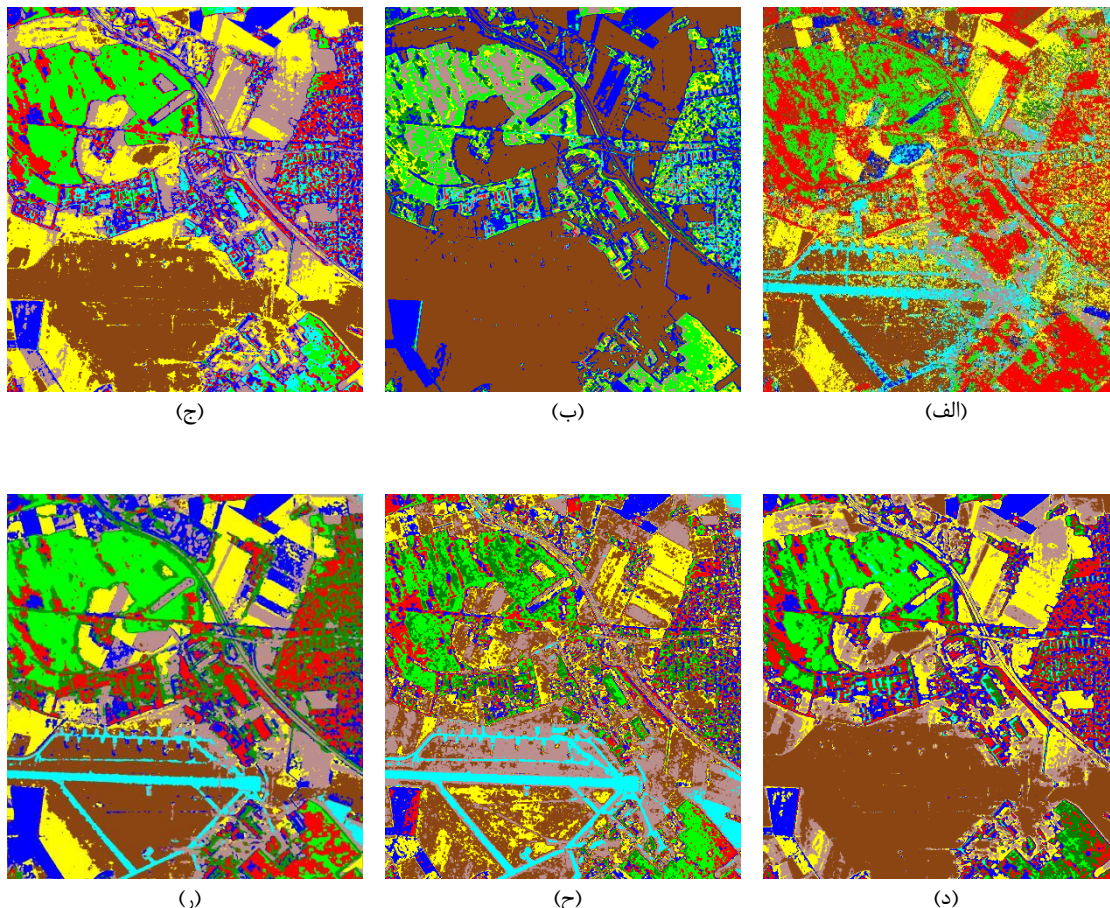
در شکل ۱-۵، نقشه طبقه‌بندی حاصل از الگوریتم FCM (Luo, Chen et al. 2010) نشان داده شده است که از فاصله ویشارت استفاده کرده و مقداردهی اولیه آن با استفاده از روش ارائه‌شده در بخش ۳-۱ است. همانطور که در قسمت چهارم جدول ۱، مشاهده می‌کنیم شاخص PI کل برای این روش، ۶۹،۷۰ بوده که نسبت به روش قبلی بیش از ۴ درصد کاهش یافته است. تفاوت اصلی این روش و روش قبلی در این است که این روش از الگوریتم k-means فازی یا همان FCM استفاده کرده، در حالیکه روش قبلی از روش k-means بهره می‌برد. در این روش، کلاس ۱ و کلاس ۳ به ترتیب بیشترین و کمترین شاخص PI را دارند که بیشترین مقدار، متعلق به طبقه‌بندی جنگل است که برابر ۹۴،۹۰ است. روش FCM نسبت به روش k-means دقت طبقه‌بندی کل را بیشتر از ۴ درصد کاهش داده که به خاطر دخالت تمام پیکسل‌ها با درجات تعلق متفاوت در محاسبه مراکز خوشه‌ها است. به عنوان مثال، عوارض زمین بایر، علفزار، زمین زراعی و باند فرودگاه در این حالت می‌توانند تاثیر بیشتری در محاسبه مراکز خوشه‌های همدیگر داشته باشند و در نتیجه درصد خلوص کلاس‌ها پایین می‌آید.

در حالیکه برخلاف آن روش به صورت تکرار شونده نبوده و سرعت اجرای بالایی دارد. دقت روش طبقه‌بندی $H/A/\alpha$ -ویشارت در قسمت اول جدول ۱، آورده شده که نتایج قابل قبولی نیست. درصد خلوص کلی این الگوریتم برابر ۵۶،۸۲ است که کمترین مقدار را برای طبقه‌بندی منطقه مورد نظر در بین ۵ الگوریتم ارائه داده‌است. در این روش، کمترین مقدار PI مربوط به کلاس ۶ برابر ۳۹،۵ است که چهارعارضه زمین بایر، علفزار، زمین زراعی و باند فرودگاه به طور قابل توجهی در این کلاس دخالت کرده‌اند. مقدار کم PI نشان می‌دهد که ماتریس همدوسی داده‌های پلاریمتری، توانایی کمی در تفکیک این کلاس‌ها دارد که ناشی از رفتار پلاریمتری نزدیک به هم آنها است. بیشترین مقدار PI برابر ۹۷،۵۵ بوده و مربوط به حضور عارضه ساختمان در کلاس ۱ است و از این نظر، داده پلاریمتری در قالب ماتریس همدوسی موفق عمل کرده است.

در شکل ۵-ج نقشه طبقه‌بندی شده حاصل از الگوریتم پیشنهادی $H_{Pol}, A_{Pol}, H_{Int} - A_{Int}$ -ویشارت (T_6) مشاهده می‌شود که به نسبت روش $H/A/\alpha$ -ویشارت (T_3) نقشه طبقه‌بندی شده بهتر و منظم‌تری را نمایش می‌دهد به طوری‌که، در این تصویر عوارض و جزئیات بیشتری قابل مشاهده است که در شکل (۵)-ب قابل مشاهده نیستند. شاخص PI، برای این الگوریتم در قسمت دوم جدول ۱ آورده شده‌است. همانطور که مشاهده می‌شود، مقدار PI کلی این الگوریتم به ۷۳،۹۲ درصد افزایش پیدا کرده‌است. تفاوت اصلی در این دو الگوریتم، حضور اطلاعات اینترفرومتری است که در ماتریس همدوسی T_6 وجود دارند و همین اطلاعات اینترفرومتری، باعث افزایش دقت طبقه‌بندی می‌شود. کمترین مقدار PI برای این روش مربوط به کلاس ۵ است که تقریباً برابر ۵۱ درصد محاسبه شده، به طوری‌که

نیز هستند. با این حال، این روش نسبت به دو روش دیگر که از کل اطلاعات پلاریمتری و اینترفرومتری در قالب ماتریس هم‌دوسی استفاده می‌کند، دقت کمتری ارائه می‌دهد. باند فرودگاه با شاخص خلوص ۹۹٫۶۳ به کلاس ۱، نسبت داده شده که نسبت به سه روش قبلی بیشترین مقدار را برای این کلاس ارائه می‌دهد. با این حال مشاهده می‌شود که کلاس‌های ۳ تا ۸ درصد، خلوص پایینی دارند که عمدتاً ناشی از تداخل جنگل با ساختمان، زمین بایر با علفزار و زمین زراعی است.

برای مقایسه بیشتر، از الگوریتم طبقه‌بندی کننده FCM برای طبقه‌بندی پارامترهای آنروپی شانون استفاده شده که نقشه طبقه‌بندی حاصل از این روش در شکل ۵-ح نمایش داده شده است. این روش، هم از مزیت تکرار شونده‌گی برخوردار بوده و هم از اطلاعات اینترفرومتری بهره می‌برد. نتایج این روش نیز نسبت به روش $H/A/\alpha$ -ویشارت (T_3) بهبود یافته، زیرا اطلاعات مورد استفاده سه پارامتر، مستقل از هم هستند به‌طوری‌که علاوه بر میزان شدت دریافتی و میزان پلاریزاسیون دو تصویر، شامل اطلاعات اینترفرومتری



شکل ۵. (الف) طبقه‌بندی به کمک پارامترهای $H_{Pol}, A_{Pol}, H_{Int}-A_{Int}$ و ادغام کلاس‌ها با استفاده از آزمون شباهت. (ب) طبقه‌بندی حاصل از الگوریتم $H/A/\alpha$ -ویشارت (k-means)، (ج) طبقه‌بندی به روش $H_{Pol}, A_{Pol}, H_{Int}-A_{Int}$ -ویشارت (T_6) (k-means). (د) طبقه‌بندی به روش $H/A/\alpha$ -ویشارت (T_6) FCM. (ه) نقشه‌ی طبقه‌بندی حاصل از الگوریتم پیشنهاد $MRF-H_{Pol}, A_{Pol}, H_{Int}-A_{Int}$

به ساختمان است. ولی همانطور که در دو روش طبقه‌بندی با استفاده از ماتریس هم‌دوسی T_6 مشاهد شد، حضور اطلاعات اینترفرومتری باعث افزایش شاخص خلوص خوشه‌ها می‌شود. در این روش، ویژگی‌های مورد استفاده در بردار ویژگی هر پیکسل پارامترهای شدت، پلاریمتری و اینترفرومتری هستند. در واقع اینها سه پارامتری هستند که به طور کامل از هم مستقل بوده و همین امر باعث می‌شود که باند فرودگاه از زمین‌های اطراف آن به خوبی جدا شود که در شکل ۵-ح دیده می‌شود. با این حال مشاهده می‌شود که دخالت ندادن اطلاعات همسایگی باعث شده که زمین‌های بایر اطراف باند فرودگاه، به اشتباه به عنوان علفزار طبقه‌بندی شوند. استفاده این سه پارامتر به عنوان مولفه‌های بردار ویژگی در الگوریتم میدان تصادفی مارکوف، باعث افزایش دقت طبقه‌بندی شده که به وضوح در قسمت پنجم جدول (۱) مشاهده می‌شود. باند فرودگاه از زمین‌های اطراف آن به خوبی جدا شده و زمین بایر با شاخص خلوص ۹۴,۰۸ به کلاس ۸ نسبت داده شده که بالاترین مقدار را در بین پنج روش دارد. مهمترین تاثیری که الگوریتم پیشنهادی در طبقه‌بندی نشان می‌دهد، حضور نواحی پیوسته و نرم است به طوری که از حضور کلاس‌های پراکنده تک پیکسل در داخل دیگر کلاس‌ها جلوگیری کرده است. درحالی که این مشکل در طبقه داده‌های سنجش از دوری و به‌ویژه در تصاویر راداری بسیار دیده می‌شود. نمودار شکل (۶)، شاخص خلوص کل برای پنج روش پیشنهادی را به صورت میله‌ای و بر حسب درصد به طور بصری، جهت مقایسه بهتر الگوریتم‌ها نشان می‌دهد. همچنین الگوریتم‌های ارائه شده و الگوریتم پیشنهادی با توجه به اینکه به صورت تکرار شونده هستند، تعداد تکرارهای مربوط به آنها با شرط مشابه و مقدار یکسان در جدول ۲، آورده شده‌اند.

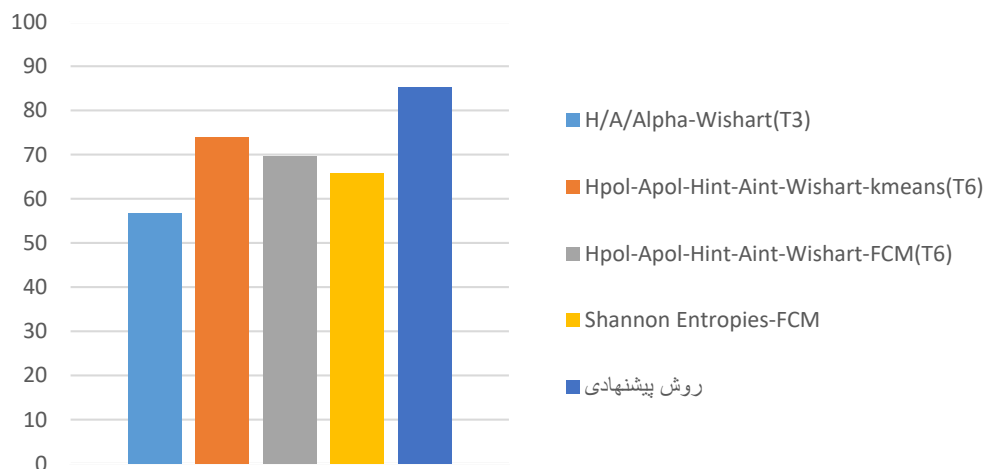
نقشه طبقه‌بندی حاصل از الگوریتم پیشنهادی یعنی طبقه‌بندی با آنتروپی شانون و الگوریتم MRF در شکل ۵-ر نمایش داده شده که نتیجه قابل قبولی است و اغلب کلاس‌ها به خوبی از هم تفکیک شده‌اند. زمین‌های بایر موجود در مرکز تصویر کاملاً مشخص بوده و به خوبی از کلاس‌های علفزار و باند فرودگاه جدا شده‌اند. باند فرودگاه به وضوح قابل مشاهده بوده و زمین‌های زراعی که با رنگ آبی در نقشه طبقه‌بندی نشان داده می‌شود، با دقت خوبی از زمین‌های علفزار جدا شده‌اند. شاخص خلوص طبقه‌بندی، برای این روش، در قسمت پنجم جدول ۱، نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، مقدار PI کل برای الگوریتم پیشنهادی برابر ۸۵,۳۰ درصد است که نسبت به چهار روش $H/A/\alpha$ -ویشارت (T_3)، $H_{Pol}, A_{Pol}, H_{Int}-A_{Int}$ -ویشارت (T_6)، $H_{Pol}, A_{Pol}, H_{Int}-A_{Int}$ -FCM ویشارت (T_6) و پارامترهای آنتروپی شانون-FCM به ترتیب به مقدار ۲۸,۴۸، ۱۱,۳۸، ۱۶,۶۰ و ۱۹,۶۰ درصد افزایش یافته است. در این روش، باند فرودگاه با بیشترین درجه خلوص یعنی ۹۹,۸۵ به کلاس ۱ داده شده است. در کلاس ۶، دو عارضه جنگل و ساختمان به مقدار زیادی با یکدیگر تداخل دارند. مهمترین علت تداخل حضور کوه‌رئس‌های بهینه در مولفه اینترفرومتری آنتروپی شانون می‌باشد که تابعی از ارتفاع عارضه می‌باشد. به این صورت که بخش‌هایی از جنگل و ساختمان رفتار ارتفاعی مشابه به هم دارند. این درحالی است که اگر اطلاعات اینترفرومتری در طبقه‌بندی حضور نداشته باشند، آنگاه دقت طبقه‌بندی جنگل از ساختمان افزایش می‌یابد که این امر در روش طبقه‌بندی $H/A/\alpha$ -ویشارت (T_3) مشاهده می‌شود به طوری که در این روش، شاخص خلوص کلاس ۱، برابر ۹۷,۵۵ متعلق

همانطور که مشاهده می‌شود روش پیشنهادی با توجه و تعداد تکرار به مراتب کمتری نسبت به دیگر روش‌ها، به اینکه از الگوریتم MRF بهره می‌برد، با سرعت بیشتر همگرا شده است.

جدول ۱. دقت طبقه‌بندی روش‌های طبقه‌بندی

روش	نوع	کلاس	کلاس	کلاس	کلاس	کلاس	کلاس	کلاس	کلاس
طبقه‌بندی	عارضه	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸
(۱) طبقه‌بندی $H/A/\alpha$ ویشارت (T_3) (k-means)	جنگل	۱۰	۲۲۴۲	۶۹	۳۱	۵۵۱	۱	۱۰۶۷	۲۴۰۱
	ساختمان	۵۵۸	۹۷۹	۳۲۵	۸۱۹	۴۱۴	۳	۳۷۸	۷۳۴
	زمین بایر	۲	۰	۵	۰	۱	۶۵۳۱	۰	۰
	علفزار	۰	۷	۹۷۸	۰	۴	۸۰۲۸	۴	۳
	زمین زراعی	۰	۰	۴۱۱۷	۲۶	۲۷۷	۵۸۳	۳	۱
	باند فرودگاه	۲	۰	۷	۳	۰	۵۱۷۹	۰	۰
شاخص خلوص (PI)	۵۶,۸۲	۹۷,۵۵	۷۶,۶۸	۷۴,۸۴	۹۳,۱۷	۴۴,۱۹	۳۹,۵۰	۷۳,۴۸	۸۲,۱۷
(۲) $-H_{Pot}, A_{pot}, H_{Int}-A_{Int}$ ویشارت (T_6) (k-means)	جنگل	۶۲۲۷	۸۰	۰	۱	۱۲۴۶	۰	۷۸۷	۳۱
	ساختمان	۱۹۱	۴۳۷	۰	۲	۱۱۱۶	۱۰	۱۹۸۶	۴۶۸
	زمین بایر	۰	۲	۶۰۴۵	۴۸۴	۰	۷	۰	۱
	علفزار	۱۳	۵۲	۵۰۲	۵۰۴۷	۶	۳۴۰۴	۰	۰
	زمین زراعی	۰	۳۹۱۷	۲۳	۱۸۹	۶۲	۸۰۴	۱۲	۰
	باند فرودگاه	۰	۳	۵۱۵۱	۲۶	۰	۶	۱	۱
شاخص خلوص (PI)	۷۳,۹۲	۹۶,۸۳	۸۷,۲۲	۵۱,۵۷	۸۷,۷۹	۵۱,۲۸	۸۰,۴۵	۷۱,۲۸	۹۳,۴۱
(۳) $-H_{Pot}, A_{pot}, H_{Int}-A_{Int}$ ویشارت-FCM (T_6)	جنگل	۴۹۱۶	۹۹	۰	۱	۱۱۳۰	۰	۲۰۹۶	۱۳۰
	ساختمان	۲۵۵	۴۷۹	۰	۲	۱۴۸۶	۶	۱۱۶۳	۸۱۹
	زمین بایر	۰	۱	۶۴۸۲	۴۷	۰	۸	۰	۱
	علفزار	۹	۱۰۳	۱۹۶۶	۳۳۲۹	۶	۳۶۰۷	۴	۰
	زمین زراعی	۰	۳۹۸۹	۲۸	۱۶۳	۶۰	۷۶۱	۵	۱
	باند فرودگاه	۰	۳	۵۱۷۱	۶	۱	۶	۰	۱
شاخص خلوص (PI)	۶۹,۷۰	۹۴,۹۰	۸۵,۳۴	۴۷,۵۰	۹۳,۸۳	۵۵,۳۹	۸۲,۲۰	۶۴,۱۴	۸۶,۰۳
(۴) الگوریتم FCM با استفاده از بردار ویژگی پارامترهای آنتروپی شانون	جنگل	۰	۴۳۷۰	۰	۲۵۹	۲۳۴۸	۱۳۸۸	۶	۱
	ساختمان	۰	۱۱۸۳	۷	۴۹۳	۱۴۷۱	۹۳۷	۱۱۵	۴
	زمین بایر	۱۴	۱	۳۶۷۱	۱۱	۱	۰	۱۲۸۳	۱۵۵۸
	علفزار	۳	۴	۴۰۵۱	۳۲۵	۷	۱۳	۲۷۷۵	۱۸۴۶
	زمین زراعی	۱	۸	۵۳	۳۵۴۴	۱۰	۷۹۵	۵۸۷	۹
	باند فرودگاه	۴۸۶۷	۰	۴۳	۳	۱	۰	۱۲	۲۶۲
شاخص خلوص (PI)	۶۵,۷۰	۹۹,۶۳	۷۸,۵۱	۵۱,۷۷	۷۶,۴۶	۶۱,۱۸	۴۴,۳۰	۵۸,۰۸	۵۰,۱۶
(۵) بردار ویژگی پارامترهای آنتروپی شانون MRF و الگوریتم	جنگل	۰	۶۱۳۶	۱	۲۳	۲۶۹	۱۹۴۳	۰	۰
	ساختمان	۰	۲۶	۰	۳۸۷	۷۹۳	۳۰۰۲	۲	۰
	زمین بایر	۷	۰	۱۲۵	۷۱	۰	۰	۴۷	۶۲۸۹
	علفزار	۰	۱۰	۴۹۴۲	۱۸۶۷	۱۰۸	۳	۲۰۰۱	۹۳
	زمین زراعی	۰	۰	۵۳	۴۷۹۳	۱۰	۶۲	۶۷	۲۲
	باند فرودگاه	۴۷۴۷	۰	۲	۲۰	۰	۰	۱۳۸	۲۸۱
شاخص خلوص (PI)	۸۵,۳۰	۹۹,۸۵	۹۹,۴۲	۹۶,۴۷	۶۶,۹۳	۶۷,۲۰	۵۹,۹۲	۸۸,۷۴	۹۴,۰۸

خوشه‌بندی تصاویر پلاریمتری-اینترفرومتری راداری با استفاده از آنتروپی...



شکل ۶. نمودار میله‌ای شاخص خلوص کل برای روش‌های خوشه‌بندی برحسب درصد

جدول ۲. مقایسه تعداد تکرار روش‌های مختلف خوشه‌بندی تا رسیدن به شرط همگرایی مشابه با مقدار یکسان

روش پیشنهادی	Shannon Entropies-FCM	Hpol-Apol-Hint-Aint-Wishart-FCM(T6)	Hpol-Apol-Hint-Aint-Wishart-kmeans(T6)	H/A/Alpha-Wishart-kmeans(T3)	نوع روش خوشه‌بندی
۱۲	۲۳۶	۷۱	۵۸	۹۴	تعداد تکرار همگرایی

شاخص خلوص برای کلاس مورد نظر به ترتیب برابر ۹۷,۷ و ۹۴,۰۸ است. در مورد طبقه‌بندی ساختمان هر دو روش به طور نسبتاً نامناسب عمل کرده‌اند به طوری که عارضه ساختمان بین کلاس‌های مختلف پراکنده شده است ولی با این حال با مقایسه مقادیر دقت و شاخص خلوص و همچنین نقشه‌های طبقه‌بندی مربوطه، مشخص می‌شود که روش پیشنهادی بهتر عمل کرده است. همچنین با توجه به نقشه طبقه‌بندی در هر دو روش و تصویر گوگل با رزولوشن بالا مشخص می‌شود که روش پیشنهادی در طبقه‌بندی مناطق جنگلی و مناطق مسکونی شهری بسیار موفق عمل کرده است و مناطق جنگلی و ساختمان تا حد امکان تداخل ندارند. همچنین در روش (Yan, Yang et al. 2011) با توجه به نقشه طبقه‌بندی مشاهده می‌شود که اغلب مناطق مسکونی و شهری برچسب کلاس جنگل را گرفته‌اند که از نظر بصری قابل قبول نیست، درحالی‌که، در روش

همچنین روش پیشنهادی را می‌توان به طور تقریبی با روش ارائه شده در مرجع (Yan, Yang et al. 2011) نیز مقایسه کرد که شباهت‌هایی را با یکدیگر دارند. هر دو روش، بر روی منطقه مطالعاتی اوبریفافنهوفن اعمال و در هر دو روش، منطقه مطالعاتی به ۸ کلاس طبقه‌بندی شده است. در مرجع مذکور، از دقت طبقه‌بندی و در روش پیشنهادی از شاخص خلوص، جهت ارزیابی استفاده شده است. شاخص خلوص خوشه‌بندی برای باند فرودگاه، جنگل، علف‌زار نوع ۱ و نوع ۲ به ترتیب برابر ۹۹,۸۵، ۹۹,۴۲، ۹۶,۴۷ و ۸۸,۷۴ است که مقادیر مشابه دقت در روش (Yan, Yang et al. 2011) به ترتیب برابر ۹۵,۳، ۸۷,۰ و ۹۴,۱ است که می‌توان گفت در این موارد، روش پیشنهادی بهتر از روش [۱۱] عمل کرده است. همچنین در مورد طبقه‌بندی زمین بایر می‌توان گفت که روش اشاره شده اندکی بهتر از روش حاضر عمل کرده به طوری که مقادیر دقت طبقه‌بندی و

پیشنهادی از نظر بصری، مناطق شهری و جنگلی تفکیک خوبی از هم دارند. همچنین در تفکیک مناطق علفزار و زراعی، روش پیشنهادی با توجه به تصاویر گوگل بهتر عمل کرده است و با واقعیت تطابق دارد. در کل می‌توان گفت روش پیشنهادی بهتر است و تنها مزیت و تمرکز روش مورد مقایسه بر روی تفکیک مرز خطی بین باند فرودگاه و زمین بایر است که در این مورد نیز بهتر عمل کرده است.

۶- نتیجه گیری

در این تحقیق، به طبقه‌بندی داده‌های POLINSAR پرداخته شده است. این داده‌ها علاوه بر اطلاعات شدت و پلاریمتری، شامل اطلاعات اینترفرومتری نیز هستند که این اطلاعات به صورت جداگانه و مستقل در آنتروپی شانون این داده‌ها قابل مشاهده هستند. همچنین بی‌نظمی و ناهمسانگردی پلاریمتری و اینترفرومتری مقایسه شدند و از بی‌نظمی و ناهمسانگردی پلاریمتری برای طبقه‌بندی تصویر به ۴ کلاس استفاده شد و در ادامه با استفاده از بی‌نظمی و ناهمسانگردی اینترفرومتری هر ۴ کلاس حاصل، هر کدام به ۴ کلاس دیگر تفکیک شدند. در ادامه مشاهده شد که بی‌نظمی و ناهمسانگردی‌های پلاریمتری و اینترفرومتری، نقش مکملی برای یکدیگر در طبقه‌بندی ارائه می‌کنند. برای کاهش کلاس‌ها از ۱۶ کلاس به ۸ کلاس از روش ادغام کلاس‌ها براساس میزان تشابه آنها استفاده شد که محاسبه این میزان تشابه هم از دید پلاریمتری و هم از دید اینترفرومتری با استفاده از آزمون تشابه ماتریس همدوسی انجام می‌شود. نتایج طبقه‌بندی اولیه، در نوع خود به عنوان یک مقداردهی اولیه قابل قبول است و سرعت انجام بسیار بالایی در مقایسه با دیگر روش‌ها دارد. بعد از طبقه‌بندی اولیه تصویر، طبقه‌بندی نهایی

انجام می‌شود. در این مرحله سه پارامتر آنتروپی شانون به عنوان بردار ویژگی هر پیکسل، در طبقه‌بندی به روش میدان تصادفی مارکوف مورد استفاده قرار می‌گیرند. طبقه‌بندی به این روش، هم ارتباط همسایگی پیکسل را در نظر می‌گیرد و هم از سه ویژگی شدت، پلاریمتری و اینترفرومتری به صورت مستقل بهره می‌برد. برای مقایسه روش‌ها و ارزیابی کلاس‌های حاصل شده، از شاخص خلوص (PI) خوشه‌ها استفاده شد که معیار مناسبی برای ارزیابی طبقه‌بندی‌های نظارت‌نشده است به طوری که تعداد کلاس‌های طبقه‌بندی حاصل با تعداد کلاس‌های واقعیت زمینی متفاوت باشند. همانطور که مشاهده شد شاخص خلوص کل برای الگوریتم پیشنهادی برابر ۸۵,۳۰ درصد است که این روش، شاخص خلوص طبقه‌بندی را نسبت به روش‌های طبقه‌بندی $H/A/\alpha$ -ویشارت (T_3) ، $H_{Pol}, A_{Pol}, H_{Int}-A_{Int}$ -ویشارت (T_6) ، $H_{Pol}, A_{Pol}, H_{Int}-A_{Int}$ FCM- (ویشارت) (T_6) و روش طبقه‌بندی با استفاده از پارامترهای آنتروپی شانون-FCM به ترتیب به مقدار ۲۸,۴۸، ۱۱,۳۸، ۱۶,۶۰ و ۱۹,۶۰ درصد افزایش داده و حضور پیکسل‌هایی که مانند نویز در سطح نقشه طبقه‌بندی پراکنده بودند را نیز کاملاً برطرف کرده و نقشه طبقه‌بندی پیوسته و نرمی را ارائه داده است.

۷- منابع

Ballester-Berman, J.D. & Lopez-Sanchez, J.M., 2010, **Applying the Freeman-Durden decomposition concept to polarimetric SAR interferometry**, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 48(1): 466-479.

- Ferro-Famil, L., Kugler, F., Potier, E. & Lee, J.-S., 2006, **Forest mapping and classification at L-band using Pol-inSAR optimal coherence set statistics**, European Conference on Synthetic Aperture Radar (EUSAR), VDE Verlag GmbH.
- Ferro-Famil, L., Pottier, E. & Lee, J., 2001, **Unsupervised classification and analysis of natural scenes from polarimetric interferometric SAR data**, Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2001, IGARSS'01. IEEE 2001 International, IEEE.
- Ferro-Famil, L., Pottier, E. & Lee, J., 2002, **Classification and interpretation of polarimetric interferometric SAR data**, Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2002. IGARSS'02. 2002 IEEE International, IEEE.
- Geman, S. & Geman, D., 1987, Stochastic relaxation, Gibbs distributions, and the Bayesian restoration of images. Readings in Computer Vision, Elsevier: 564-584.
- Jager, M., Neumann, M., Guillaso, S. & Reigber, A., 2007, **A self-initializing PolInSAR classifier using interferometric phase differences**, IEEE Transactions on Geoscience and remote sensing **45**(11): 3503-3518.
- Kersten, P.R., Lee, J.-S. & Ainsworth, T.L., 2005, **Unsupervised classification of polarimetric synthetic aperture radar images using fuzzy clustering and EM clustering**, IEEE
- Chen, S.-W., Wang, X.-S. & Sato, M., 2012, **PolInSAR complex coherence estimation based on covariance matrix similarity test**, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing **50**(11): 4699-4710.
- Cloude, S.R. & Papathanassiou, K.P., 1998, **Polarimetric SAR interferometry**, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing **36**(5): 1551-1565.
- Cloude, S.R. & Pottier, E., 1997, **An entropy based classification scheme for land applications of polarimetric SAR**, IEEE transactions on geoscience and remote sensing **35**(1): 68-78.
- Conradsen, K., Nielsen, A.A., Schou, J. & Skriver, H., 2003, **A test statistic in the complex Wishart distribution and its application to change detection in polarimetric SAR data**, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing **41**(1): 4-19.
- D'Hondt, O., Haensch, R. & Hellwich, O., 2018, **Supervised classification from TomoSAR data**, EUSAR 2018; 12th European Conference on Synthetic Aperture Radar, VDE.
- Demonceaux, C. & Vasseur, P., 2006, **Markov random fields for catadioptric image processing**, Pattern Recognition Letters **27**(16): 1957-1967.
- Duda, R. O., Hart, P. E. & Stork, D. G., 1973, **Pattern classification**, Wiley New York.

- Neumann, M., Reigber, A. & Ferro-Famil, L., 2005, **Data classification based on PolInSAR coherence shapes**, Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2005, IGARSS'05. Proceedings, 2005 IEEE International, IEEE.
- Rendón, E., Abundez, I., Arizmendi, A. & Quiroz, E.M., 2011, **Internal versus external cluster validation indexes**, International Journal of computers and communications 5(1): 27-34.
- Salehi, M., Maghsoudi, Y. & Mohammadzadeh, A., 2018, **Assessment of the potential of H/A/Alpha decomposition for polarimetric interferometric SAR data**, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 56(4): 2440-2451.
- Shimoni, M., Borghys, D., Heremans, R., Perneel, C. & Acheroy, M., 2009, **Fusion of PolSAR and PolInSAR data for land cover classification**, International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation 11(3): 169-180.
- Suliga, M., Deklerck, R. & Nyssen, E., 2008, **Markov random field-based clustering applied to the segmentation of masses in digital mammograms**, Computerized Medical Imaging and Graphics 32(6): 5.512-02
- Wang, X., Chen, E., Li, Z., Yao, W., Li, W. & Li, X., 2013, **A Method of Forest Type Classification Using PolInSAR Data**, Dragon 2 Final Results and Dragon 3 Kickoff Symposium. Transactions on Geoscience and Remote Sensing 43(3): 519-527.
- Lee, J.-S. & Pottier, E., 2009, **Polarimetric radar imaging: from basics to applications**, CRC press.
- Lee, J., Grunes, M., Ainsworth, T., Hajnsek, I., Mette, T. & Papathanassiou, K., 2005, **Forest classification based on L-band polarimetric and interferometric SAR data**, ESA Special Publication.
- Li, S. Z., 2009, **Markov random field modeling in image analysis**, Springer Science & Business Media.
- Lu, L., J. Zhang, G. Huang and X. Su, 2016, **Land cover classification and height extraction experiments using Chinese airborne X-band PolInSAR system in China**, International Journal of Image and Data Fusion 7(3): 282-294.
- Luo, H.-M., E.-X. Chen, X.-W. Li, J. Cheng & M. Li, 2010, **Unsupervised classification of forest from polarimetric interferometric SAR data using fuzzy clustering**, Wavelet Analysis and Pattern Recognition (ICWAPR), 2010 International Conference on, IEEE.
- Morio, J., Refregier, P., Goudail, F., Dubois-Fernandez, P.C. & Dupuis, X., 2009, **A characterization of Shannon entropy and Bhattacharyya measure of contrast in polarimetric and interferometric SAR image**, Proceedings of the IEEE 97(6): 1097-1108.

Yan, W., Yang, W., Sun, H. & Liao, M., 2011, **Unsupervised classification of PolInSAR data based on Shannon entropy characterization with iterative optimization**, IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing **4**(4): 949-959.

Yang, F. & Jiang, T., 2003, **Pixon-based image segmentation with Markov random fields**, IEEE Transactions on Image Processing **12**(12): 1552-1559.



سنجش از دور , GIS ایران



سنجش از دور و GIS ایران سال دهم، شماره چهارم، زمستان ۱۳۹۷
Vol.10, No.4, Winter 2019 Iranian Remote Sensing & GIS

121-144

Segmentation of Polarimetric Interferometric Radar Images using Shannon Entropies and Markov Random Field Algorithm

Esmail Nezhad soltanloo M.^{1*}, Sahebi M.²

1. Ms.c student of remote sensing in Department of Geomatics, College of Engineering, K.N. Toosi University.
2. Associate professor in Department of Geomatics, College of Engineering, K.N. Toosi University.

Abstract

Polarimetric Interferometric SAR (POLINSAR) data by providing wealth of information containing intensity, polarimetric and interferometric measurements, have shown many capability of mentioned data in the land cover classification. These three components of POLINSAR data could be found independently in the Shannon entropy of POLINSAR data. These components play a complementary role in the classification where the presence of interferometric information improves the classification results. As well as the data acquired from the real world has spatial connectivity so considering the neighboring and spatial connectivity in the classification process is essential and useful. So in this paper Markov Random Field segmentation algorithm has been used for classification of Shannon Entropies of POLINSAR data. In order to provide a Markovian field for the MRF classification, an initialization method has been proposed where classifies the image into 16 classes according to the polarimetric and interferometric entropy and anisotropy and merges the clusters obtained to 8 clusters using equality test of coherency matrices. The purity indices (PI) of the clusters obtained over the POLINSAR data acquired by DLR (German Aerospace center) E-SAR have been used to evaluate the effectiveness of the Entropy based MRF classification. The proposed method has been compared with the $H/A/\alpha$ -Wishart (T_3), $H_{Pol} - A_{Pol} \cdot H_{Int} - A_{Int}$ -Wishart (T_6), $H_{Pol} - A_{Pol} \cdot H_{Int} - A_{Int}$ -FCM (T_6) and FCM clustering using Shannon Entropy parameters where this comparisons show approximately 28%, 11%, 17% and 20% increasing in the Purity Indices respectively.

Keywords: Polarimetric Interferometric SAR data, Entropy and Anisotropy, Shannon Entropy, Markov Random Field.

*Correspondence Address: Remote Sensing Group, Geomatics Faculty, K.N. Toosi University of Technology, Valiasr St., Tehran, Iran
Email Address: mesmailnezhad@email.kntu.ac.ir