

تعیین مرزهای بهینه برای نواحی طبقه بندی آلفا- انتروپی داده پلاریمتری فشرده دو دایروی با استفاده از مفهوم حداکثر مشابهت

سارا قدس^{۱*}، سید وهاب شجاع الدینی^۲، یاسر مقصودی^۳

^۱دانش‌آموخته دکتری مخابرات سیستم - پژوهشکده برق و فناوری اطلاعات - سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران
s.ghods@irost.ir

^۲دانشیار پژوهشکده برق و فناوری اطلاعات - سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران
shojadini@irost.ir

^۳استادیار دانشکده مهندسی نقشه‌برداری - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
ymaghsoudi@kntu.ac.ir

(تاریخ دریافت مهر ۱۳۹۵، تاریخ تصویب آذر ۱۳۹۶)

چکیده

یکی از مهمترین اهداف پژوهشگران در حوزه پلاریمتری فشرده، پیشنهاد روش‌هایی جهت نزدیک‌تر کردن اطلاعات و نتایج حاصل از داده‌های پلاریمتری حالت فشرده به نتایج حاصل از داده‌های پلاریمتری حالت کامل می‌باشد. یکی از روش‌های پرکاربرد جهت استخراج مکانیسم‌های پراکندگی داده‌های پلاریمتری، روش طبقه‌بندی بر اساس فضای انتروپی-آلفا می‌باشد. فضای طبقه‌بندی انتروپی-آلفای داده‌های فشرده دو دایروی که در ادبیات موضوع ارائه شده است دقیق نبوده و مرزهای مربوطه به صورت تقریبی بدست آمده‌اند. بنابراین در این مقاله رویکرد نوینی برای دقیق‌تر نمودن مرزهای آلفا و انتروپی برای طبقه‌بندی داده‌های فشرده دو دایروی مربوط به سنجنده RADARSAT-2 ارائه شده است. در این رویکرد مرزهایی که نتایج حاصل از طبقه‌بندی توسط آن‌ها بیشترین مشابهت را با نتایج طبقه‌بندی داده‌های کامل ایجاد می‌نماید بعنوان مرزهای بهینه معرفی شده و بدست آمده‌اند و نتایج نشان می‌دهند که دقت طبقه‌بندی با استفاده از مرزهای پیشنهادی برای دادگان مورد آزمایش به طور میانگین ۳ درصد نسبت به مرزهای پیشین افزایش یافته است.

واژگان کلیدی: انتروپی، آلفا، پلاریمتری، پلاریمتری فشرده، رادار با روزه مجازی، طبقه‌بندی

* نویسنده رابط

۱- مقدمه

در حالت پلاریزاسیونی کامل دو موج با پلاریزاسیون عمود بر هم ارسال شده و توسط دو آنتن با پلاریزاسیون عمود برهم دریافت می‌گردند. این در حالی است که در هر زمان تنها یک موج با یک نوع پلاریزاسیون باید ارسال گردد. بنابراین باید موج‌های ارسالی با پلاریزاسیون عمود بر هم یکی پس از دیگری ارسال و دریافت می‌شوند و این امر مستلزم دو برابر کردن فرکانس تکرار پالس نسبت به حالت پلاریزاسیونی دوتایی است که یک موج ارسال می‌گردد و توسط دو آنتن با دو پلاریزاسیون دریافت می‌شود با دو برابر شدن فرکانس تکرار پالس به منظور نداشتن ابهام در بعد عمود بر راستای حرکت رادار، عرض پوشش دهی رادار نصف می‌گردد و بنابر این زوایای تابش نیز محدود می‌شوند. از نقطه نظر سیستمی نیز توان ارسالی رادار پلاریزاسیونی در حالت پلاریزاسیونی کامل دو برابر توان مورد نیاز برای حالت پلاریزاسیونی دوتایی می‌باشد و حافظه اشغالی برای هر صحنه دو برابر است. بنابراین در سال‌های اخیر حالت‌های ویژه‌ای از پلاریزاسیونی دوتایی پیشنهاد شده‌اند که جایگزین پلاریزاسیون کامل گردند و بتوانند حداکثر اطلاعات پلاریزاسیونی را شامل شوند که به آنها حالت‌های پلاریزاسیونی فشرده می‌گویند [۷-۱]. یکی از این حالت‌ها بصورت پلاریزاسیون دایروی در ارسال و دریافت می‌باشد به این صورت که مثلاً پلاریزاسیون دایروی راستگرد ارسال و پاسخ اهداف توسط دو آنتن با پلاریزاسیون دایروی راستگرد و چپگرد دریافت می‌گردد. به این نوع سیستم‌ها، سیستم‌های پلاریزاسیونی دایروی^۱ می‌گویند.

پارامترهای انترپوپی و آلفای حالت پلاریزاسیونی کامل دو پارامتر کلیدی برای تفسیر اطلاعات پلاریزاسیونی هستند. پارامتر آلفا نوع مکانیسم بازپراکنش اهداف را نشان می‌دهد و پارامتر انترپوپی حاکی از میزان بی‌نظمی ایجاد شده در پلاریزاسیون امواج دریافتی می‌باشد. این دو پارامتر نسبی هستند و خطای کالیبراسیون تأثیری بر آن‌ها ندارد. با تلفیق این دو پارامتر و با استفاده از فضای طبقه بندی انترپوپی-آلفا می‌توان مکانیسم‌های پراکندگی مختلف را از یکدیگر تفکیک و طبقه بندی نمود [۸]. این طبقه بندی

نیازی به داده زمینی ندارد و بنابراین از آن می‌توان در کاربردهایی که چنین داده‌ای در اختیار نیست یا دسترسی به آن دشوار و یا ناممکن می‌باشد استفاده نمود. از طرف دیگر این روش می‌تواند به عنوان مرجعی برای روش‌های طبقه بندی آماری قرار گیرد [۹] و هر چه دقت این روش بیشتر گردد، دقت روش‌های طبقه بندی مبتنی بر آن نیز بیشتر می‌شود. بنابراین روش طبقه بندی انترپوپی-آلفا از اهمیت بسزایی برخوردار می‌باشد.

در [۱۰] و [۱۱] نشان داده شده است که تنها در حالت پلاریزاسیونی فشرده دو دایروی بر اساس پارامترهای انترپوپی و آلفا می‌توان ساز و کار پراکندگی اهداف را طبقه بندی نمود. بنابراین با توجه به مزایایی که این روش طبقه بندی دارا می‌باشد ارائه روشی برای تعیین مرزهای بهینه برای طبقه بندی انترپوپی-آلفای داده حالت فشرده دو دایروی مورد توجه قرار گرفته است.

به طور کلی دو مقاله [۱۰] و [۱۱] برای تعیین مرزهای انترپوپی-آلفا برای داده حالت فشرده دودایروی ارائه شده‌اند. در [۱۰] ابتدا برای داده حالت پلاریزاسیونی کامل طبقه بندی انترپوپی-آلفا انجام شده و سپس با استفاده از شبیه سازی داده حالت فشرده از روی داده حالت کامل پارامترهای انترپوپی و آلفای حالت فشرده مربوط به هر کلاس محاسبه شده است. این پارامترها در فضای انترپوپی-آلفای حالت فشرده نگاشته شده‌اند و مرزهای تقریبی بدون محاسبات ریاضی ارائه شدند. در مقاله [۱۱] از چندین داده مربوط به سنجنده‌های مختلف استفاده شد و همین روش تکرار گشت با این تفاوت که مرزها به صورت تقریبی به گونه‌ای انتخاب شدند که بیشترین چگالی تجمع نقاط هر کلاس برای تمامی دادگان، داخل نواحی تعیین شده قرار گیرند. اگرچه نشان داده شد که این روش نسبت به روش قبلی دقت طبقه بندی را بیشتر می‌کند اما این معیار برای بدست آوردن مرزها معیار بهینه‌ای نبوده و وابسته به نوع داده انتخابی می‌باشد. به طور مثال در یک تصویر ممکن است در کلاس جنگل نوع پوشش گیاهی خاصی غالب باشد و در تصویر دیگر نوع دیگری از پوشش گیاهی گستردگی بیشتری داشته باشد. بنابراین نقاطی که بیشترین تجمع را در هر تصویر در کلاس مربوطه دارند با یکدیگر متفاوت می‌باشند. بعلاوه هر سنجنده‌ای دارای مشخصات سیستمی مربوط به خود می‌باشد. به طور مثال نویز پایه

^۱ Dual circular polarimetry (DCP)

$$S = \begin{bmatrix} S_{xx} & S_{xy} \\ S_{yx} & S_{yy} \end{bmatrix} \quad (۱)$$

که در آن S_{yx} مولفه اندازه گیری شده مربوط به ارسال موج با پلاریزاسیون y و دریافت از آنتن با پلاریزاسیون x می باشد. اگر فرستنده و گیرنده بر روی یک سنجنده نصب باشند و با فرض محیط با خاصیت متقابل خواهیم داشت:

$$S_{xy} = S_{yx} \quad (۲)$$

به منظور بدست آوردن اطلاعات مربوط به همبستگی بین نقاط مختلف همجوار در تصاویر و بدست آوردن مشخصه‌های آماری مرتبه دوم ماتریس پراکندگی را به صورت برداری تبدیل کرده و با میانگین گیری بر روی نقاط مجاور ماتریس کوهرنسی T تشکیل می‌گردد.

$$k = \frac{1}{\sqrt{2}} [S_{xx} + S_{yy} \quad S_{xx} - S_{yy} \quad 2S_{xy}]^T \quad (۳)$$

$$T = \langle k \cdot k^{*T} \rangle \quad (۴)$$

استفاده از ماتریس کوهرنسی به درک فیزیکی بهتری از جسم هدف کمک می‌نماید. ماتریس کوهرنسی به صورت ضرب ماتریس بردارهای ویژه و ماتریس قطری مقادیر ویژه تجزیه می‌شود:

$$T = V \cdot \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3 \end{bmatrix} \cdot V^H \quad (۵)$$

که در آن λ_i ها مقادیر ویژه ماتریس کوهرنسی می‌باشند و ماتریس بردارهای ویژه V به صورت زیر می‌باشد:

$$V = [v_1 \ v_2 \ v_3], \quad v_i = e^{i\varphi} [\cos \alpha_i \quad \sin \alpha_i \cos \beta_i e^{i\delta_i} \quad \sin \alpha_i \sin \beta_i e^{i\gamma_i}]^T \quad (۶)$$

که v_i ها بردارهای ویژه هستند. مقادیر آلفا (α) و انتروپی (H) به صورت زیر تعریف می‌گردند [۹]:

$$\alpha_i = \cos^{-1}(|v_{1i}|). \quad (۷)$$

$$\alpha = \sum_{i=1}^3 p_i \alpha_i \quad (۸)$$

$$H = - \sum_{i=1}^3 p_i \log_2(p_i) \quad (۹)$$

هر سنجنده با سنجنده دیگر متفاوت است و این نویز تعیین کننده مرزهای مربوط به انتروپی می باشد [۸]. بنابراین در این پژوهش روشی ارائه خواهیم داد که با استفاده از آن برای هر سیستم بتوان مرزهای طبقه بندی بهینه را استخراج نمود.

با توجه به اینکه سیستم های پلاریمتری کامل دارای حداکثر اطلاعات پلاریمتری می باشند، تلاش پژوهشگران حوزه پلاریمتری فشرده نزدیک کردن هر چه بیشتر اطلاعات حالت پلاریمتری فشرده به اطلاعات پلاریمتری کامل می باشد. با استفاده از این نکته در این پژوهش با استفاده از بیشینه کردن درصد تطابق و مشابهت نتایج طبقه بندی داده حالت فشرده با نتایج حاصله از طبقه بندی داده حالت کامل، مرزهای بهینه برای داده حالت فشرده دودایروی مربوط به سنجنده رادارست ۲ استخراج می گردد. با مقایسه مرزهای پیشنهادی با مرزهای ارائه شده در [۱۱] نشان داده می شود که مرزهای پیشنهادی دقت طبقه بندی را بالا می برند.

در این مقاله در بخش ۲ مبانی نظری مربوطه شرح داده خواهد شد. در بخش ۳ روش های پیشین برای تعیین مرزهای انتروپی و آلفا برای داده حالت فشرده دو دایروی معرفی می گردند. روش پیشنهادی در بخش ۴ مطرح خواهد شد. در بخش ۵ داده های مورد مطالعه معرفی شده و با استفاده از آن ها روش بدست آوردن پارامترهای ارائه شده در روش پیشنهادی توضیح داده می شود. سپس مرزهای بهینه به روش پیشنهادی برای داده های مربوط به سنجنده RADARSAT-2 استخراج می گردند و دقت طبقه بندی روش پیشنهادی و روش رقیب که روش zhang می باشد مورد مقایسه قرار می گیرند و بالاخره در بخش ۶ نتیجه گیری ارائه خواهد شد.

۲- مبانی نظری

۲-۱- تجزیه آلفا-انتروپی برای داده حالت پلاریمتری کامل

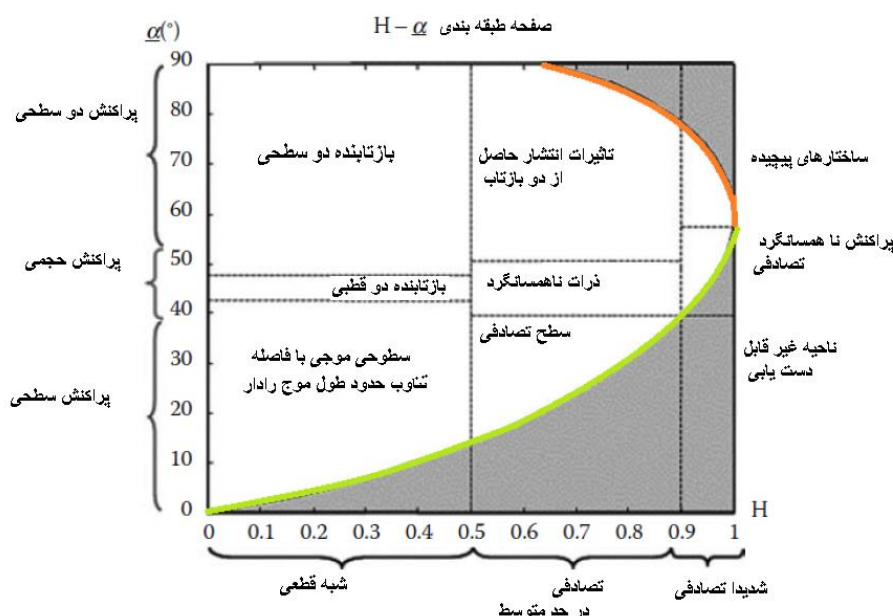
در حالت پلاریمتری کامل، دو پالس الکترومغناطیسی با پلاریزاسیون متعامد یکی پس از دیگری به اهداف زمینی تابیده شده و پاسخ هر کدام از امواج توسط دو آنتن با پلاریزاسیون متعامد دریافت شده و به صورت ماتریس پراکندگی زیر در گیرنده ثبت می‌شوند [۱۲].

که در آن‌ها مقادیر p_i به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$p_i = \lambda_i / \sum_{i=1}^3 \lambda_i. \quad (10)$$

پارامترهای انتروپی و آلفا برای تفسیر اطلاعات پلاریمتری بسیار مهم و اساسی می‌باشند و از آنها در بسیاری از کاربردها مانند شناسایی اهداف ساخته دست بشر و تفکیک آنها از پدیده‌های طبیعی [۱۳]، شناسایی محدوده ساختمان‌ها [۱۴]، تعیین مشخصات‌های دریا و یخ و برآورد مشخصات برف [۱۵]، شناسایی اهدافی مانند کشتیها در اقیانوس‌ها و دریاها [۱۶-۱۷] و حتی شناسایی مشخصات محصولات زراعی در شرایط مختلف [۱۸]

استفاده می‌شود. با توجه به اینکه طبقه بندی داده‌های پلاریمتری توسط این دو پارامتر نسبی بی‌نیاز از کالیبراسیون و داده مرجع می‌باشد و با تغییر جهت اجسام نسبت به خط دید رادار این پارامترها تغییر نمی‌کنند روش طبقه بندی انتروپی-آلفا از اهمیت بسزایی برخوردار می‌باشد. در این روش نواحی $H-\alpha$ به ۹ ناحیه مختلف تقسیم شده است که هر کدام از این نواحی یک نوع مکانیزم پراکندگی را مشخص می‌کنند. بنابراین با بدست آوردن پارامترهای آلفا و انتروپی داده مورد بررسی می‌توان آن را به کلاس‌های نشان داده شده در شکل ۱ طبقه بندی نمود.



شکل ۱- نواحی طبقه بندی انتروپی-آلفا برای داده حالت پلاریمتری کامل

به ترتیب پلاریزاسیون‌های دایروی راستگرد و چپگرد و پلاریزاسیون‌های خطی افقی و عمودی را نشان می‌دهند. به طور مثال S_{RL} نمایشگر ضریب پراکندگی مربوط به ارسال موج با پلاریزاسیون دایروی راستگرد و دریافت دایروی چپگرد می‌باشد. ماتریس کواریانس برای داده دو دایروی فشرده به صورت زیر بدست می‌آید [۱]:

$$C_{DCP} = \langle k_{DCP} \cdot k_{DCP}^{*T} \rangle \quad (12)$$

روش تجزیه آلفا و انتروپی برای داده حالت دو دایروی فشرده مشابه روش تجزیه آلفا انتروپی برای حالت پلاریمتری کامل می‌باشد با این تفاوت که ماتریسها ۲ در ۲ و بردارها ۲ در ۱ می‌باشند [۱۹].

۲-۲- تجزیه آلفا-انتروپی برای داده دو دایروی فشرده

برای داده دو دایروی فشرده که موج الکترومغناطیسی با پلاریزاسیون دایروی راستگرد ارسال و با دو آنتن با پلاریزاسیون‌های دایروی راستگرد و چپگرد دریافت می‌شود، بردار هدف به صورت زیر می‌باشد [۴]:

$$k_{DCP} = [S_{RR} \ S_{RL}]^T = [(S_{HH} + 2jS_{HV} - S_{VV}) \ i(S_{HH} + S_{VV})]/2 \quad (11)$$

که در آن S نشان دهنده ضریب پراکندگی می‌باشد که از تصاویر پلاریمتریک استخراج می‌شود و R و L و H و V

حداقل کردن خطای کلاسه بندی کلی ارائه شده است. در مورد حالت های پلاریمتری فشرده نیز طبق تحقیقاتی که در [۱۰-۱۱] انجام گرفته است مشخص شده است که تنها در حالت پلاریمتری فشرده دو-دایروی می توان بر اساس این دو پارامتر ساز و کار پراکندگی اهداف را طبقه بندی نمود. در مقاله Zhang [۱۱]، ابتدا نقاط تصویر با استفاده از داده پلاریمتری حالت کامل و روش طبقه بندی انتروپی-آلفا شکل ۱ طبقه بندی شده اند. سپس آلفا و انتروپی دوگانه مربوط به هر کلاس بدست آمده و مطابق شکل ۲ در فضای انتروپی-آلفای دوگانه نگاشت شده است. همان گونه که از شکل ۲ استنباط می گردد کلاس های طبقه بندی در دو حالت ۴۵ درجه و هایبرید در یکدیگر مخلوط شده اند و نمی توان آن ها را از یکدیگر تفکیک نمود اما در حالت دودایروی امکان این تفکیک وجود دارد و مخلوط شدن کلاس ها اساسی نمی باشد. بنابر این می توان مرزهای تقریبی برای داده حالت دودایروی ارائه نمود. در [۱۰] Guo این مرزها را بدون محاسبه و بهینه سازی و فقط به لحاظ دیداری به طور تقریبی ارائه کرد. در [۱۱] Zhang مرزهای طبقه بندی را با استفاده از داده های متنوع مربوط به سنجنده های گوناگون و محل قرارگیری مرکز بیشترین تجمع نقاط برای کلاس های مختلف طوری بدست آورد که نقاطی که بیشترین تجمع را در هر کلاس دارند برای تمامی دادگان مورد بررسی داخل مرزهای طبقه بندی آن کلاس قرار گیرند (شکل ۳).

$$C_{DCP} = V \cdot \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 \\ 0 & \lambda_2 \end{bmatrix} \cdot V^H, \quad V = [v_1 \ v_2] \quad (۱۳)$$

$$v_i = e^{i\varphi} [\cos \alpha_i \ e^{i\delta_i} \sin \alpha_i]^T \quad (۱۴)$$

$$\alpha_i = \cos^{-1}(|v_{1i}|) \quad (۱۵)$$

$$p_i = \lambda_i / \sum_{i=1}^2 \lambda_i \quad (۱۶)$$

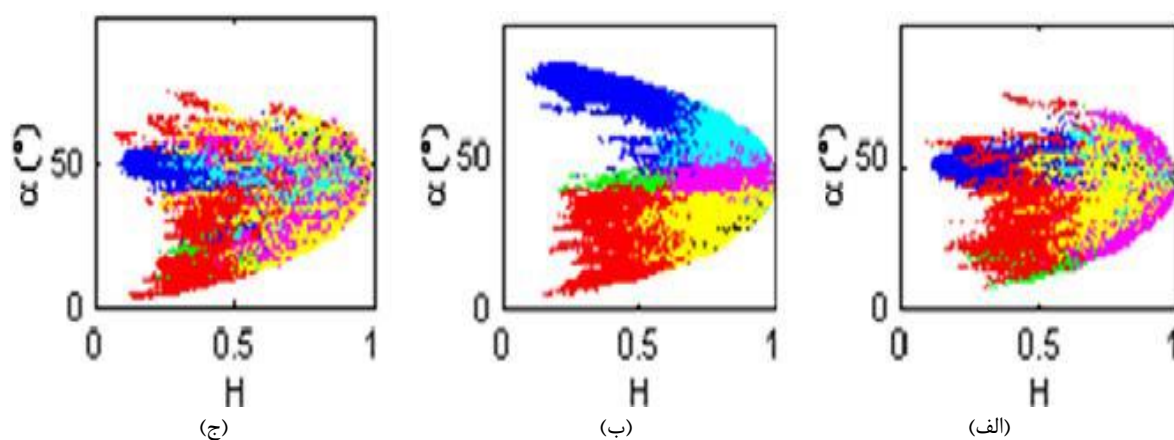
$$\alpha = \sum_{i=1}^2 p_i \alpha_i \quad (۱۷)$$

$$H = - \sum_{i=1}^2 p_i \log_2(p_i) \quad (۱۸)$$

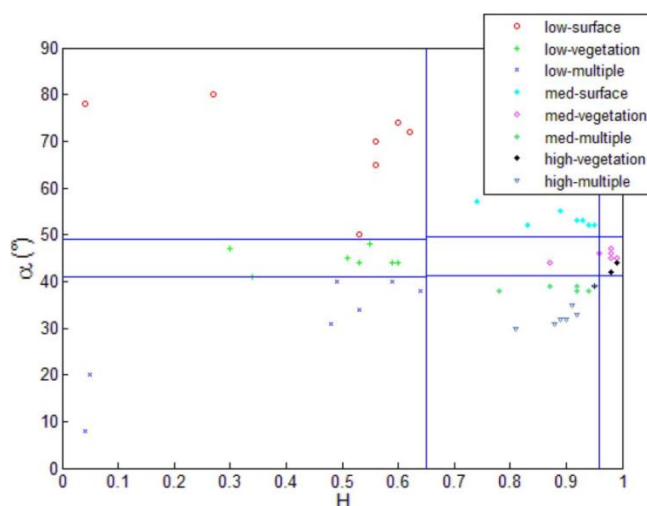
در [۱۰-۱۱] نشان داده شده است که پارامترهای انتروپی و آلفا در حالت پلاریمتری فشرده دو دایروی مانند حالت پلاریمتری کامل تفسیر می گردند و بنابراین با استفاده از روش طبقه بندی انتروپی-آلفا برای این نوع داده نیز می توان تفسیر خوبی از پدیده ها بدست آورد. بنابر این ارائه فضای طبقه بندی بهینه برای این پارامترها از اهمیت بسزایی برخوردار می باشد.

۳- روش های پیشین برای تعیین مرزهای انتروپی و آلفای داده حالت فشرده دو دایروی

در [۲۰] نشان داده شده است که در میان مد های دوال فقط در حالت HH-VV مکانیسم های مختلف پراکندگی توسط پارامترهای آلفا و انتروپی قابل تفکیک هستند و فضای طبقه بندی برای این حالت بر مبنای



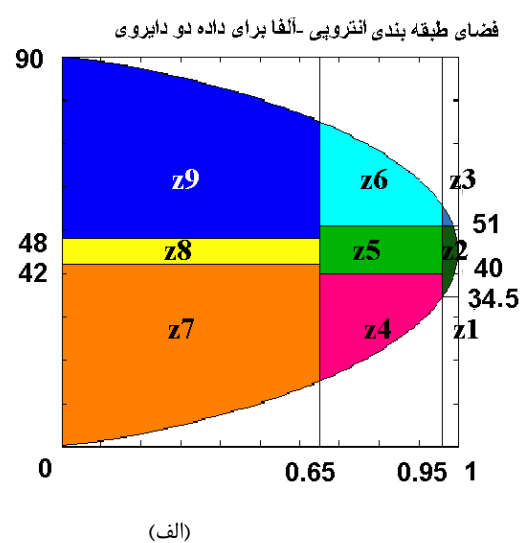
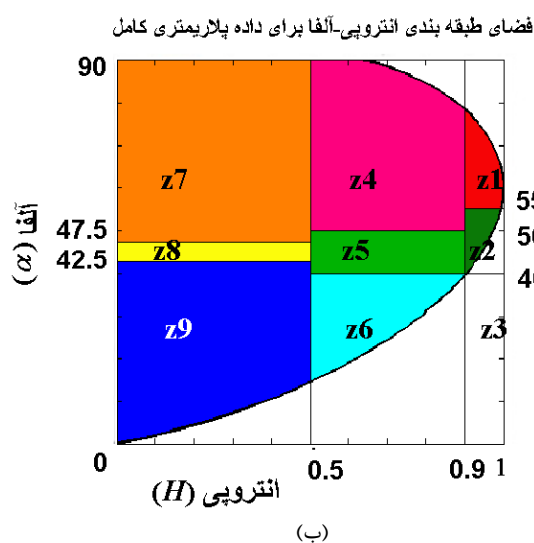
شکل ۲- نگاشت مکانیسم های مختلف پراکندگی که توسط فضای انتروپی-آلفای چهارگانه توسط داده پلاریمتری حالت کامل طبقه بندی شده اند به فضای انتروپی-آلفای دوال داده فشرده (الف) حالت هایبرید (ب) حالت دو دایروی (ج) حالت ۴۵ درجه [۱۱]



شکل ۳- نقاطی که دارای بیشترین تجمع در هر کلاس می باشند برای سنجنده های مختلف [۱۱]

کامل و ناحیه z1 برای حالت پلاریمتری فشرده نواحی هستند که مقادیر انترپوی و آلفا در آنها در هیچ شرایطی قرار نمی گیرد. بنابر این ۸ کلاس برای هر حالت قابل دست یابی می باشد.

Zhang نشان داد که مرزهای بدست آمده او از مرزهای بدست آمده Guo دقیقتر بوده و نتایج طبقه بندی بهتر می باشند. در شکل ۴ نواحی طبقه بندی داده حالت کامل و نواحی طبقه بندی متناظر آن از روش Zhang نشان داده شده است. ناحیه z3 برای حالت پلاریمتری



شکل ۴- نواحی طبقه بندی آلفا-انترپوی برای داده های (الف) حالت فشرده دو دایروی به روش Zhang و (ب) حالت پلاریمتری کامل

سیستمی مربوط به خود می باشد. به طور مثال نویز پایه هر سنجنده با سنجنده دیگر متفاوت است و این نویز تعیین کننده مرزهای مربوط به انترپوی می باشد [۸]. بنابراین لازم است برای بدست آوردن نتایج بهتر، برای هر سنجنده مرزهای دقیقتر بدست آورده شوند. در بخش بعد روشی کلی ارائه خواهد شد که با استفاده از آن می توان مرزهای دقیقتر را برای هر نوع سنجنده ای بدست آورد و با استفاده از داده های مربوط به سنجنده RADARSAT-2 مرزهای طبقه بندی انترپوی-آلفای حالت فشرده دو دایروی برای این نوع سنجنده ارائه خواهند شد.

همانگونه که شرح داده شد در روش Zhang مرزها با در نظر گرفتن مراکز تجمع نقاط در هر کلاس ارائه شدند. این معیار برای بدست آوردن مرزها معیار بهینه ای نبوده و وابسته به نوع داده انتخابی می باشد. به طور مثال در یک تصویر ممکن است در کلاس جنگل نوع پوشش گیاهی خاصی غالب باشد و در تصویر دیگر نوع دیگری از پوشش گیاهی گسترده تر داشته باشد. بنابراین نقاطی که بیشترین تجمع را در هر تصویر در کلاس مربوطه دارند با یکدیگر متفاوت می باشند. بعلاوه هر سنجنده ای دارای مشخصات

۴- روش پیشنهادی

در با توجه به اینکه روش های پیشین برای بدست آوردن فضای طبقه بندی انترویی-آلفای داده حالت فشرده بصورت تقریبی بوده اند، بدست آوردن مرزهای بهینه برای طبقه بندی داده دو دایروی برای سنجنده های مختلف مورد نیاز می باشد. در این پژوهش هدف بدست آوردن مرزهای با دقت بیشتر برای داده های مربوط به سنجنده RADARSAT-2 می باشد. همان گونه که شرح داده شد داده پلاریمتری در حالت پلاریمتری کامل بیشترین اطلاعات پلاریمتری مربوط به اهداف را دارا می باشد و تلاش های پژوهشگران حوزه پلاریمتری فشرده نزدیک کردن هر چه بیشتر اطلاعات استخراج شده از داده حالت فشرده به اطلاعات داده حالت کامل می باشد. بدلیل غنی تر بودن اطلاعات در حالت پلاریمتری کامل نتایج حاصل از طبقه بندی داده در این حالت همواره از نتایج حاصل از طبقه بندی داده حالت فشرده دقیق تر می باشد. بنابراین حالت بهینه برای پژوهش ما حالتی می باشد که نتایج حاصله از طبقه بندی انترویی-آلفای داده حالت فشرده دو دایروی بیشترین مشابهت و نزدیکی را با نتایج بدست آمده از روش طبقه بندی انترویی-آلفای داده حالت کامل داشته باشد زیرا هر چه این نزدیکی و مشابهت بیشتر باشد دقت طبقه بندی بیشتر می گردد. بنابراین نتایج طبقه بندی با استفاده از نتایج طبقه بندی داده حالت کامل محک زده می شود.

در ادبیات مربوط به طبقه بندی داده ها معمولاً بررسی ها نسبت به داده مرجع انجام می گردد و درصد صحت طبقه بندی با استفاده از این داده اندازه گیری و اعلام می گردد. در این مقاله بدلیل اینکه محک درستی طبقه بندیها داده مرجع نیست و نتایج استخراج شده از داده حالت کامل بعنوان مرجع استفاده شده است تعاریف مربوط به صحت کلاس ها و صحت کلی که در مراجعی مانند [۱۲] تعریف شده اند را با مشابهت کلاسها و مشابهت کلی به صورت زیر جایگزین کرده ایم.

اگر تعداد نقاطی که در حالت پلاریمتری کامل در کلاس z_k طبقه بندی شده اند را با m_k نشان دهیم و تعداد نقاطی از این مجموعه که در حالت داده دو دایروی نیز در همین کلاس طبقه بندی شده اند را با n_k نشان دهیم، نسبت این دو پارامتر به یکدیگر مشابهت طبقه بندی داده دو دایروی به داده حالت کامل در این کلاس را نشان می دهد:

$$\text{Class agreement} = n_k / m_k \quad (19)$$

معیار کلی برای مشابهت دو روش طبقه بندی فوق را می توان از دو راه محاسبه کرد. یکی بدست آوردن نسبت تمامی نقاطی که مانند حالت پلاریمتری کامل طبقه بندی شده اند به کل نقاط که به آن مشابهت کلی می گوئیم:

$$\text{Total agreement} = (\sum_{k=1}^8 n_k) / (\sum_{k=1}^8 m_k) \quad (20)$$

در این روش نمی توان به درستی عملکرد طبقه بندی کننده را ارزیابی نمود. بخصوص در مواردی که تعداد عناصر کلاس ها به طور قابل ملاحظه ای متفاوت باشند، این معیار اطلاعات خوبی از کارایی طبقه بندی کننده ها بدست نمی دهد. به طور مثال اگر تعداد عناصر یک کلاس ۱۰ باشد و تعداد عناصر کلاس دیگر ۱۰۰ باشد و طبقه بندی کننده از کلاس کم جمعیت هیچ کدام را درست تشخیص نداده باشد ولی از کلاس پر جمعیت ۹۰ عضو درست طبقه بندی شده باشند، مشابهت کلی بدست آمده ۹۰/۱۱۰ می باشد که ۸۲ درصد است. این درحالیست که طبقه بندی کننده در حالت کلی عملکرد خوبی نداشته است. بنابر این معیار دیگری برای بررسی مشابهت دو طبقه بندی کننده ارائه می کنیم که آن معیار میانگین مشابهت کلاس ها می باشد و به صورت زیر تعریف می گردد.

$$\text{Mean class agreement} = \frac{1}{8} \sum_{k=1}^8 (n_k / m_k) \quad (21)$$

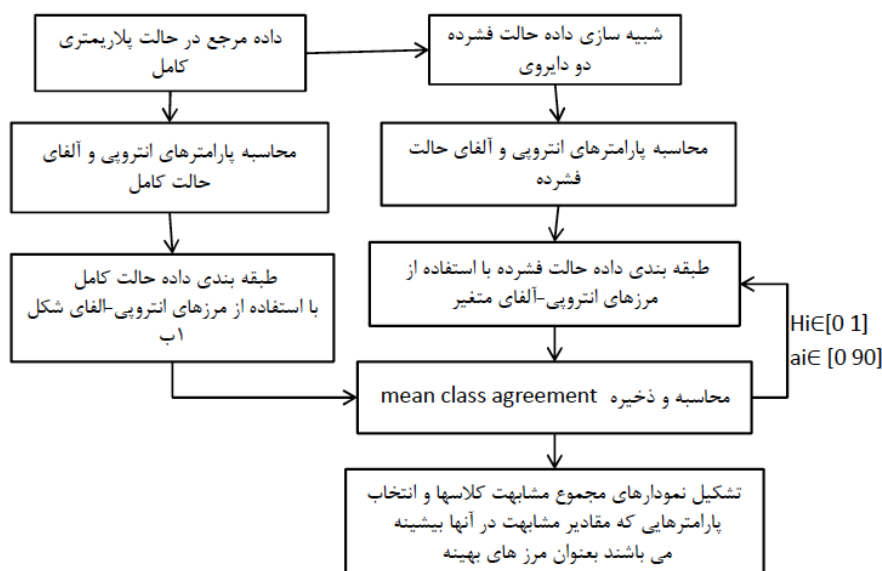
این معیار مشکلات مربوط به مشابهت کلی را ندارد و عملکرد میانگین طبقه بندی کننده را نشان می دهد. در [۲۰] از معیاری مشابه با این معیار برای طبقه بندی مکانیسم های پراکندگی مختلف برای داده های دوال استفاده شده است. در این پژوهش نیز از این معیار برای یافتن مرزهای بهینه داده دو دایروی استفاده می کنیم. مرزهای بهینه به نحوی انتخاب می گردند که میانگین یا به طور معادل مجموع مشابهت کلاس های طبقه بندی شده در دو حالت پلاریمتری کامل و فشرده بیشینه گردد:

$$a_{i \text{ opt}} = \arg(\max_{\alpha_i} (\sum_{k=1}^8 (n_k / m_k)), \quad i=1, 2, \dots, 6 \quad (22)$$

$$H_{i \text{ opt}} = \arg(\max_{H_i} (\sum_{k=1}^8 (n_k / m_k)), \quad i=1, 2, \quad (23)$$

نمودار بلوکی روش پیشنهادی در شکل ۵ ارائه شده است. همانگونه که در نمودار ارائه شده است برای بدست آوردن مرزهای بهینه در حالت پلاریمتری فشرده، ابتدا داده حالت کامل مربوطه توسط مرزهای انترپی آلفای مربوط به داده حالت کامل طبقه بندی می شود. سپس داده حالت فشرده با استفاده از مرزهای تقریبی Zhang طبقه بندی می شود و برای هر خط مرزی این طبقه

بندی با تغییر دادن مقادیر مربوط به آن تکرار شده جداول ابهام تشکیل می شود و مشابهت کلاسها اندازه گیری می گردند و آن مقداری که بیشترین مشابهت را با حالت پلاریمتری کامل ایجاد نمود بعنوان خط مرزی بهینه انتخاب می گردد. در بخش ۵-۳ شکل ۹ مشابهت میانگین کلاسها نسبت به حالت پلاریمتری کامل به ازای تغییر دادن مقادیر مرزها را نشان می دهد.

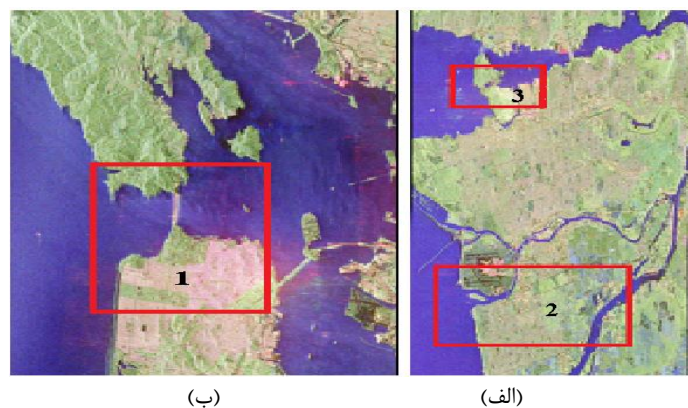


شکل ۵- نمودار بلوکی روش پیشنهادی

۴-۱- توصیف داده های مورد استفاده در پژوهش

تصویر مربوط به شهر سان فرانسیسکو از سنجنده RADARSAT-2 باند C با ابعاد 1151×1776 پیکسل شامل مکانیسم های پراکندگی فیزیکی مختلف مانند مناطق جنگلی و پارک و همچنین مناطق شهری با ساختمان های مختلف و مناطق کوهستانی و اقیانوسی می باشد. بنابراین داده مناسبی جهت پژوهش های مختلف و از جمله بررسی های مربوط به طبقه بندی داده می باشد و از طرفی

بدلیل این که تعداد نقاط تصویر تا حد لازم زیاد می باشند، برای بدست آوردن مدلی عمومی از این داده می توان بهره جست. همانگونه که در بسیاری از مقالات مرجع از این داده برای گرفتن نتیجه گیری کلی استفاده شده است [۱۰ و ۲۴-۲۱]. با این وجود جهت بررسی عمومیت نتایج از ۲ تصویر مربوط به شهر ونکور با ابعاد 1766×1568 و 724×553 از همین سنجنده استفاده شده است. تصویر پاولی مربوط به این داده ها در شکل ۶ نشان داده شده است.



شکل ۶- تصاویر پاولی مربوط به: (الف) داده شهر ونکور ، (ب) داده شهر سانفرانسیسکو

۵- نتایج و بحث

در این قسمت مرزهای بهینه به روش پیشنهادی برای داده های مربوط به سنجنده RADARSAT-2 استخراج می گردند و دقت طبقه بندی روش پیشنهادی و روش رقیب که روش Zhang می باشد مورد مقایسه قرار می گیرند.

۵-۱- تشریح بدست آوردن مرزهای بهینه به روش پیشنهادی

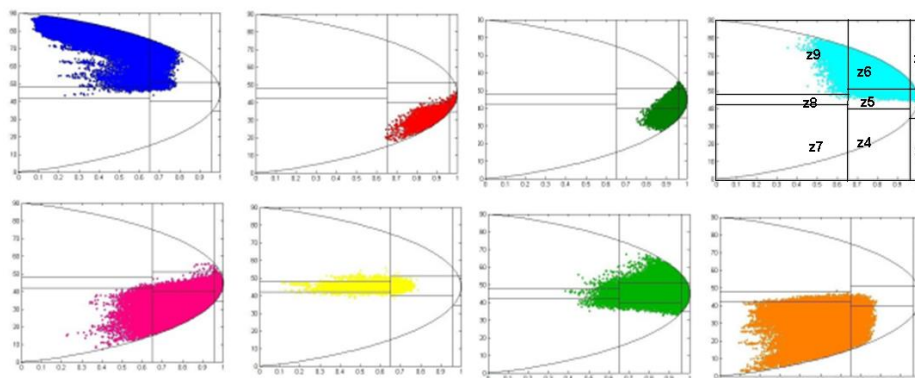
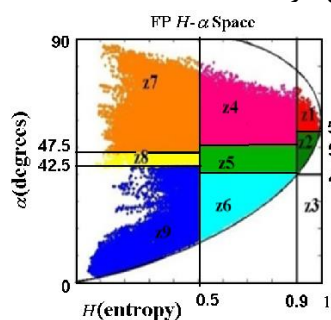
برای تشریح بیشتر روش پیشنهادی، بدست آوردن مقدار میانگین مشابهت کلاس ها را برای مقادیر مرزهای روش Zhang بررسی می کنیم. این روش برای تمامی مقادیر مربوط به مرزهای انتروپی و آلفا تکرار می شود و مقادیر بهینه با معیار بیشینه میانگین مشابهت کلاس ها تعیین می گردند. در شکل ۷ داده سانفرانسیسکو در حالت پلاریمتری کامل طبقه بندی شده سپس برای همین داده، داده حالت فشرده دو دایروی شبیه سازی شده است. برای نقاط مربوط به هر کلاس فشرده سازی شده، مقادیر انتروپی و آلفای حالت فشرده محاسبه و در فضای انتروپی آلفای حالت فشرده به تصویر کشیده شده اند. همانگونه که در شکل پیداست مکانیسم های پراکندگی مختلفی که توسط داده حالت کامل مشخص شده اند در نواحی داده دو دایروی فشرده دارای مرز دقیقی نبوده و هم پوشانی دارند.

جدول ۱ ماتریس ابهام (Confusion matrix) مربوط به این داده و مرزهای طبقه بندی Zhang را نشان می دهد. در این ماتریس سطر i ام و ستون j ام نمایانگر تعداد نقاطیست که در حالت پلاریمتری کامل در کلاس zi و در حالت پلاریمتری دو دایروی در کلاس zj طبقه بندی شده اند. ملاحظه می گردد که نقاطی که در حالت پلاریمتری کامل عضو کلاس خاصی هستند در حالت دو دایروی در کلاس های دیگر نیز پخش شده اند. بعنوان مثال در شکل ۷ نقاطی که در حالت پلاریمتری کامل در کلاس z6 طبقه بندی شده اند در حالت فشرده علاوه بر کلاس z6 در کلاس های z2، z3، z5، z8 و z9 هم نفوذ کرده اند. برای محاسبه میانگین مشابهت کلاس ها برای هر مقدار از مرزهای طبقه بندی، ماتریس ابهام را تشکیل می دهیم. برای هر کلاس مربوط به حالت پلاریمتری کامل که در سطرهای جدول نشان داده شده اند مشابهت به صورت زیر محاسبه می گردد:

$$\text{Class agreement} = \frac{z_{i,i}}{\sum_{j=1}^9 z_{i,j}} \quad (24)$$

$$\text{Mean class agreement} = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^9 \frac{z_{i,i}}{\sum_{j=1}^9 z_{i,j}} \quad (25)$$

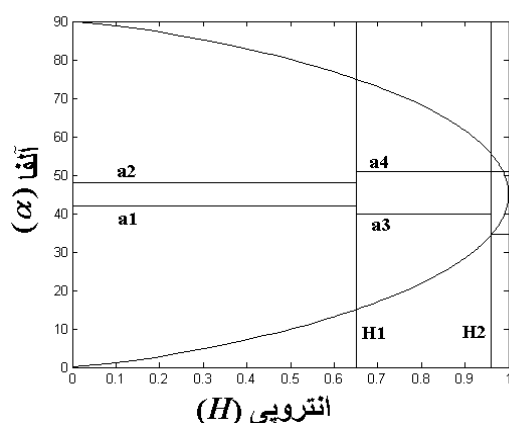
با توجه به مقادیر بدست آمده، مشابهت میانگین کلاس ها برای مرزهای Zhang برابر با ۶۵/۷۶٪ می باشد.



شکل ۷- نگاشت انتروپی و آلفای حالت فشرده مناطق طبقه بندی شده داده حالت کامل به فضای انتروپی-آلفای حالت فشرده برای داده سانفرانسیسکو

جدول ۱- ماتریس ابهام برای داده سانفرانسیسکو

فشرده کامل	z1	z2	z3	z4	z5	z6	z7	z8	z9	درصد مشابهت کلاس ها
z1	۰	۱۵۶	۰	۳۴۶۶	۲۷	۰	۴	۰	۰	۰
z2	۰	۳۶۴۲۸	۱۸۷	۱۲۸۵۹	۱۱۹۷۰	۵۲	۰	۰	۰	۵۹/۲۳
z3	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	-
z4	۰	۹۶۴۶	۱۰	۱۶۵۱۰۶	۲۲۸۸۲	۲۷	۸۸۳۶	۶۷	۰	۷۹/۹۲
z5	۰	۱۰۶۷۹۵	۴۳۹۹	۱۳۰۳۵	۲۴۹۸۰۰	۲۸۶۶۳	۸۸۱	۱۵۷۲	۳۷۱	۶۱/۶۰
z6	۰	۱۱۹۲۴	۶۴۲۱	۰	۲۴۵۷۱	۱۸۷۹۳۱	۰	۱۴	۶۱۶۲	۶۱/۶۰
z7	۰	۰	۰	۸۲۳۲	۱۷۸۱	۰	۴۶۷۱۳	۱۸۶۱	۱	۷۹/۲۸
z8	۰	۰	۰	۲	۱۷۲۵	۲	۲۱۵	۴۸۳۰	۳۷۶	۶۷/۵۵
z9	۰	۰	۰	۰	۶۰۸	۱۲۱۷۶	۰	۲۵۳	۱۰۵۱۱۳۹	۹۸/۷۷



شکل ۸- اسامی مرزهای مربوط به طبقه بندی داده حالت پلاریمتری فشرده دو دایروی

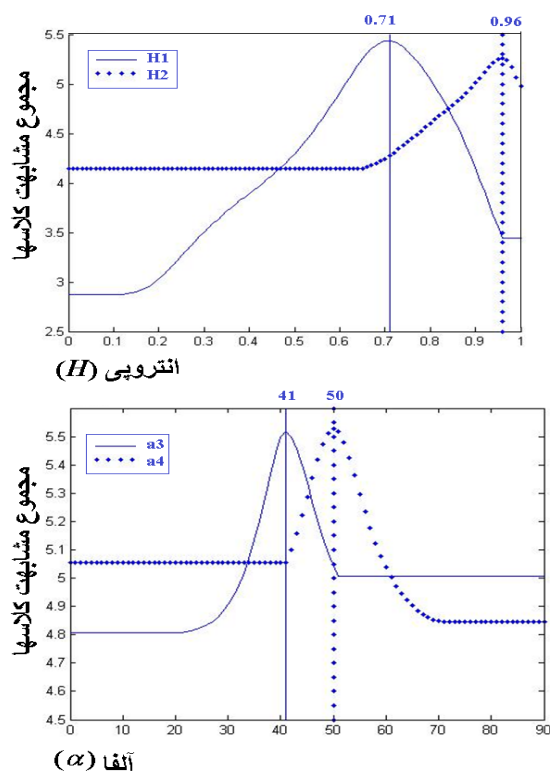
جدول ۲- مقادیر بهینه بدست آمده برای مرزهای طبقه بندی داده

حالت فشرده دو دایروی مربوط به سنجنده RADARSAT-2

H1	H2	a1	a2	a3	a4	a5	a6
۰/۷۱	۰/۹۶	۴۲	۵۳	۴۱	۵۰	۳۶/۵	۵۵

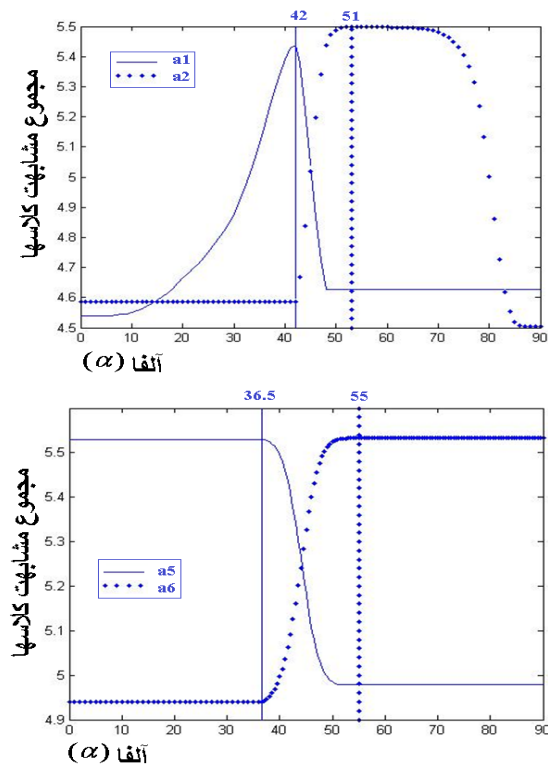
۵-۲- مرزهای بهینه بدست آمده از روش پیشنهادی

در شکل ۸ اسامی مرزهای مربوط به طبقه بندی انتروپی-آلفا برای داده دو دایروی نشان داده شده است. برای تعیین مرزهای بهینه ابتدا داده حالت پلاریمتری کامل توسط مرزهای اصلی نشان داده شده در شکل ۱ طبقه بندی می شود و نتایج حاصل از آن بعنوان مرجع درستی در نظر گرفته می شود. مرزهای آلفا و انتروپی مورد نظر برای طبقه بندی داده دو دایروی به صورت متغیر در نظر گرفته می شوند و طبقه بندی داده دو دایروی برای مقادیر مختلف این متغیر ها انجام می گردد. برای هر مقدار از مرزهای متغیر ماتریس های ابهام تشکیل و سپس مجموع مشابهت کلاس ها محاسبه می گردد. همانگونه که در بخش قبل شرح داده شد، آن مقداری که مربوط به بیشترین مشابهت باشد بعنوان مرز بهینه شناسایی خواهد شد. در شکل ۹ نمودارهای مربوط به مجموع مشابهت کلاس ها برای مقادیر متغیر مرزها برای داده سانفرانسیسکو نشان داده شده است. با توجه به شکل ۹ مقداری از مرزها که میانگین مشابهت کلاس ها در آنها بیشینه شده است بعنوان مقادیر بهینه برای مرزهای طبقه بندی داده حالت فشرده دودایروی انتخاب و در جدول ۲ ارائه شده اند.



شکل ۹- نمودار مجموع مشابهت کلاس ها به ازای تغییرات مرزها برای داده سانفرانسیسکو مربوط به سنجنده RADARSAT-2

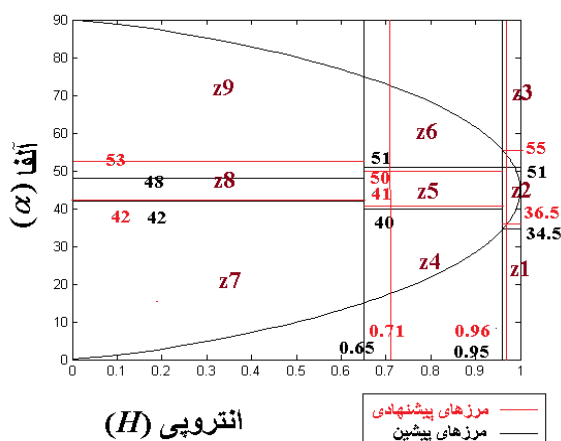
گسترده تر و سه ناحیه z4 و z5 و z6 کوچکتر شده اند. z1 و z2 مساحت بیشتری را اشغال کرده اند و مطابق حالتی که در مورد طبقه بندی داده حالت پلاریمتری کامل وجود دارد در ناحیه ای قرار دارد که مقادیر آلفا و انتروپی در آن اتفاق نمی افتد. بنابراین احتمال مشابهت کلاس های گسترش یافته بیشتر و احتمال مشابهت کلاس های کوچک شده کمتر می گردد. اما هدف اصلی بالا رفتن میانگین مشابهت با حالت پلاریمتری کامل می باشد که همان گونه که در جدول ۳ مشاهده می گردد، در روش طبقه بندی با استفاده از مرزهای پیشنهادی، مشابهت میانگین با نتایج طبقه بندی داده حالت پلاریمتری کامل برای هر سه داده مورد مطالعه بیشتر شده است و در نتیجه مرزهای پیشنهادی برای تمامی داده های مورد مطالعه مناسب می باشند و همانطور که شرح داده شد افزایش مشابهت با نتایج حاصل از داده حالت پلاریمتری کامل به معنای افزایش دقت طبقه بندی می باشد. بنابراین با استفاده از مرزهای پیشنهادی ارائه شده دقت طبقه بندی انتروپی-آلفا برای داده دودایروی مربوط به سنجنده RADARSAT-2 بیشتر می گردد. این برتری همان طور که در بخش ۳ توضیح داده شد با توجه به اینکه در روش Zhang از روش های



۵-۳ مقایسه و بحث نتایج طبقه بندی با استفاده از مرزهای بدست آمده از روش پیشنهادی و روش Zhang

به منظور بررسی کارایی و مقایسه عملکرد مرزهای جدید نسبت به مرزهای پیشین، عملیات طبقه بندی به هر دو روش برای هر سه داده مورد مطالعه در حالت فشرده دو دایروی انجام شده است. همانطور که در بخش قبل توضیح داده شد نتایج طبقه بندی داده ها در حالت پلاریمتری کامل بعنوان مرجعی جهت محک زدن برتری روش ها در نظر گرفته می شود. هر چه مشابهت بین نتایج روش ها با نتایج طبقه بندی داده حالت کامل بیشتر باشد، روش ها از دقت بالاتری برخوردار می باشند. جدول ۳ مشابهت کلاس های طبقه بندی شده توسط روش پیشنهادی و روش پیشین با روش اصلی برای داده حالت کامل را نشان می دهد. همچنین میانگین مشابهت ها بعنوان معیاری جهت مقایسه روش ها ارائه شده است.

در شکل ۱۰ مرزهای پیشنهادی و مرزهای پیشین را در یک صفحه انتروپی-آلفا نمایش داده شده است. همان گونه که در شکل مشاهده می شود در روش پیشنهادی سه ناحیه z7 و z8 و z9 نسبت به نواحی روش Zhang



شکل ۱۰- مرزهای پیشنهادی و مرزهای Zhang در یک صفحه
انترپوی-آلفا حالت فشرده برای داده RADARSAT-2

بهینه سازی استفاده نشده است قابل پیش بینی بود. در روش Zhang از مکان مرکز بیشترین تجمع نقاط در صفحه انترپوی-آلفا برای اختصاص مرزها استفاده شده بود که در دادگان مختلف متفاوت می باشد. اما در روش پیشنهادی از انتخاب مرزهایی که بیشترین مشابهت را با حالت پلاریمتری کامل ایجاد می کنند استفاده شده است. با توجه به اینکه دادگان انتخابی شامل انواع مختلف مکانیسم های پراکندگی بوده و تعداد نقاط آن ها به اندازه کافی زیاد می باشد، این روش روشی عمومی تر بوده و مرزهای بدست آمده همانطور که در جدول ۳ نیز بررسی گردید مشابهت کلی با نتایج حالت پلاریمتری کامل و در نتیجه دقت طبقه بندی را بالا می برند.

جدول ۳- مقایسه مشابهت کلاس ها و مشابهت میانگین نتایج طبقه بندی ها با نتایج حاصل از داده پلاریمتری حالت کامل

شماره داده	مشابهت کلاس ها	z1	z2	z4	z5	z6	z7	z8	z9	مشابهت میانگین
۱	مرزهای Zhang	۰	۵۹/۲۳	۷۹/۹۲	۶۱/۶۰	۷۹/۲۸	۷۹/۲۸	۶۷/۵۵	۹۸/۷۷	۶۵/۷۶
	مرزهای پیشنهادی	۰/۳۲	۵۹/۲۸	۷۷/۴۱	۵۳/۱۲	۷۸/۸۵	۹۳/۳۱	۹۱/۴۱	۹۹/۵۴	۶۹/۱۶
۲	مرزهای Zhang	۰	۶۵/۸۳	۷۴/۵۱	۵۴/۰۵	۸۶/۹۸	۸۳/۵۸	۶۳/۰۵	۹۸/۰۲	۶۵/۷۵
	مرزهای پیشنهادی	۰/۳۶	۶۶/۱۵	۷۱/۸۷	۴۵/۹۲	۷۹/۴۱	۹۲/۳۳	۸۸/۴۷	۹۹/۵۱	۶۸/۰۰
۳	مرزهای Zhang	۰	۵۸/۶۹	۴۹/۷۵	۴۱/۲۵	۷۶/۰۶	۷۳/۹۶	۴۷/۷۱	۹۹/۲۲	۵۵/۸۳
	مرزهای پیشنهادی	۰/۳۰	۵۸/۸۹	۴۸/۹۷	۳۳/۲۸	۷۴/۷۴	۸۱/۸۳	۷۸/۹۲	۹۹/۳۷	۵۹/۵۴

پلاریمتری کامل و فشرده معرفی و برای بدست آمدن مرزهای طبقه بندی بهینه در فضای انترپوی-آلفا برای داده های مربوط به سنجنده RADARSAT-2 مورد استفاده قرار گرفت. نتایج بدست آمده نشان داد که مشابهت طبقه بندی داده حالت فشرده دو دایروی توسط مرزهای بدست آمده از روش پیشنهادی با نتایج طبقه بندی داده حالت کامل بیشتر از نتایج مربوط به مرزهای پیشین می باشد. بنابر این مرزهای پیشنهادی می توانند دقت طبقه بندی داده دودایروی فشرده با استفاده از فضای انترپوی-آلفا را بهبود دهند. جهت ادامه کار می توان از رویکرد پیشنهادی جهت پیدا کردن مرزهای بهینه برای سنجنده های گوناگون بهره جست.

۶- خلاصه و نتیجه گیری

با توجه به اینکه تصویربرداری راداری پلاریمتری در حالت فشرده مزایای قابل توجهی نسبت به حالت پلاریمتری کامل دارد، در بسیاری از کاربردها بخصوص کاربردهای نظارتی که عرض پوشش دهی بیشتر در آنها مورد نیاز می باشد این حالت تصویربرداری بعنوان جایگزینی مناسب برای حالت پلاریمتری کامل می تواند در نظر گرفته شود. در این حالت تصویر برداری به دلیل ارسال یک موج برای هر هدف اطلاعات بدست آمده نسبت به حالت پلاریمتری کامل که برای هر هدف دو موج ارسال می شود، کمتر می باشد. بنابراین سعی بر این است که تا حد امکان بتوان اطلاعات حالت فشرده را به اطلاعات حالت کامل نزدیک نمود. مرزهای طبقه بندی انترپوی آلفایی که در مقالات پیشین برای داده حالت فشرده دو دایروی ارائه شده بودند، تقریبی و بدون محاسبات بهینه سازی بوده اند. بنابراین در این مقاله معیار میانگین مشابهت کلاس های طبقه بندی شده در دو حالت

- [1] Souyris, J. C., Imbo, P., Fjortoft, R., Mingot, S. and Lee, J. S. (2005). "Compact polarimetry based on symmetry properties of geophysical media: The $\pi/4$ mode," IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 43, no. 3, pp. 634–646.
- [2] Nord, M. E. Ainsworth, T. L. Lee, J. S. and Stacy, N. J. S. (2009). "Comparison of compact polarimetric synthetic aperture radar modes," IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 47, no. 1, pp. 174–188.
- [3] Raney, R.K. (2007). "Hybrid-polarity SAR architecture", IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 45, no. 11, pp. 3397–3404.
- [4] Stacy, N. and Preiss, M. (2006). "Compact Polarimetric Analysis of X-Band SAR Data", Proc. EUSAR 2006, 16-18 May, Munich.
- [5] Charbonneau, F.J. Brisco, B. Raney, R.K. McNairn, H. Liu, C. Vachon, P.W. Shang, J. DeAbreu, R. Champagne, C. Merzouki, A. and Geldsetzer, T. (2010). "Compact polarimetry overview and applications assessment," Canadian Journal of Remote Sensing, Vol. 36, Suppl. 2, pp. S298–S315.
- [6] Raney, R.K. (2007). "Hybrid-polarity SAR architecture", IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 45, no. 11, pp. 3397–3404.
- [7] Raney, R. K. Cahill, J.T.S. Patterson, G. W. and Bussey, D. B. J. (2012). "The m-chi decomposition of hybrid dual-polarimetric radar data," proc. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS 2012), Munich, pp. 5093–5096.
- [8] Cloude, S. R. and Pottier, E. (1997). "An entropy based classification scheme for land applications of polarimetric SAR," IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 35, no. 1, pp. 68–78.
- [9] Lee, J.S., Grunes, M. R., Ainsworth, T. L., Du, L.J., Schuler, D. L. and Cloude, S. R. (1999). "Unsupervised classification using polarimetric decomposition and the complex Wishart classifier," IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 37, no. 5, pp. 2249–2258.
- [10] Guo, R. Liu, Y. B. Wu, Y. H. Zhang, S. X. Xing, M. D. and He, W. (2012). "Applying H/ α decomposition to compact polarimetric SAR," IET Radar Sonar and Navigation, vol. 6, no. 2, pp. 61–70.
- [11] Zhang, L. Xie, C. Wang, F. Wu, B. Zhang, (2014). "Investigation of the Capability of H- α Decomposition of Compact Polarimetric SAR," IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, vol. 11, no. 4, pp. 868 - 872.
- [12] Lee, J.S., Pottier, E. (2009). Polarimetric radar imaging: from basics to applications," CRC Press, Taylor and Francis.
- [13] Berizzi, F., Martorella, M., Capria, A., Paladini, R., Calugi, D. (2008). "H/ α polarimetric features for man-made target classification," Proc. 2008 IEEE Radar Conference, 26-30 May, 1-6, Rome, Italy.
- [14] Deng, L., Wang, C. (2014). "Improved Building Extraction With Integrated Decomposition of Time-Frequency and Entropy-Alpha Using Polarimetric SAR Data," IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, vol. 7, no. 10, pp. 4058 – 4068.
- [15] Hudier, E., Tolczuk-Leclerc, S. (2013). "Snow and sea ice roughness characterization from Quad-Pol H-A- α classes relative distribution," In: 2013 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2451 – 2454, 21-26 July, Melbourne, VIC, IEEE.
- [16] Touzi, R. (2000). "Calibrated polarimetric SAR data for ship detection," In: Proc. IEEE Geosci. Remote Sens. Symp., vol. 1, pp. 144–146.
- [17] Lakshmi, S.S., Patra, S.K., Saibaba, J., Varadan, G. (2012). "Polarimetric SAR data analysis for identification and characterization of ships," In 14th international conference and exhibition on geospatial information technology and applications, 7-9 Feb., Hyderabad, India.
- [18] Lopez-Sanchez, J.M., Cloude, S.R., Ballester-Berman, J.D. (2011). "Rice Phenology Monitoring by Means of SAR Polarimetry at X-Band," IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 50, no. 7, pp. 2695 - 2709.
- [19] Cloude, S. (2007). "The dual polarization entropy/alpha decomposition: A PALSAR case study," Proc. PolinSAR, Frascati, Italy.
- [20] Ji, K., Wu, Y. (2015). "Scattering Mechanism Extraction by a Modified Cloude-Pottier Decomposition for Dual Polarization SAR," Remote Sensing, vol. 7, pp. 7447-7470.
- [21] Bhattacharya, A. (2015). Modifying the Yamaguchi four-component decomposition scattering powers using a stochastic distance," IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, vol. 8, no. 7, pp. 3497-3506.

- [22] Praks, J., Koeniguer, E.C., Hallikainen, M.T. (2009). "Alternatives to target entropy and alpha angle in SAR polarimetry," IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 47, no. 7, pp. 2262- 2274.
- [23] Shirvany, R., Chabert, M., Tournet, J.Y. (2012). "Ship and oil-spill detection using the degree of polarization in linear and hybrid/compact dual-pol SAR," IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, vol. 5, no. 3, pp. 885-892.
- [24] Touzi, R., Goze, S., Toan, T.L., Lopes, A., Mougin, E. (1992). "Polarimetric discriminators for SAR images," IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 30, no. 5, pp. 973-980.