



سنجش از دور

GIS ایران



سنجش از دور و GIS ایران
Iranian Remote Sensing & GIS
سال اول، شماره چهارم، زمستان ۱۳۸۸
Vol.1, No.4, Winter 2010
۷۳-۸۶

بررسی درایه‌های داده‌های پلاریمتری راداری برای انتخاب پارامترهای طبقه‌بندی این داده‌ها

نالا بهرامی^۱، محمودرضا صاحبی^{۲*}، مهدی مختارزاده^۳

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد سنجش از دور، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
۲. استادیار گروه فتوگرامتری و سنجش از دور، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
۳. و ۳

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۸۹/۷/۲۸

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۸۹/۴/۲۲

چکیده

با پیدایش نسل جدید ماهواره‌های سنجش از دور پلاریمتری رادار با روزه مجازی (SAR) نظیر (TerraSAR-X، RADARSAT-2، ALOS و جز اینها) کاربردهای سنجش از دور راداری، در زمینه‌های، پایش و ارزیابی بحران‌های زیست‌محیطی، از جمله فرونشست زمین، بررسی فرسایش خاک، وقوع زلزله، آتشفشان و سیل دوچندان شده است. هدف اصلی این مقاله، استخراج اطلاعات بنیادی از تصاویر پلاریمتری و تعیین میزان اهمیت هر کدام از ویژگی‌های موجود در فضای ویژگی است. المان‌های فضای ویژگی از حاصل ضرب باندهای HV و VV، HH - که دربردارنده اطلاعات دامنه و فاز هستند - تشکیل شده است. با به اجرا درآوردن معیار تفکیک‌پذیری بین کلاسی فیشر، اهمیت هر کدام از ویژگی‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد و سپس ویژگی‌ها براساس قدرت تفکیک‌پذیری و همبستگی بین باندهای رتبه‌بندی می‌شوند. در مرحله بعدی با اجرا کردن الگوریتم طبقه‌بندی نظارت شده، بیشترین شباهت دقت طبقه‌بندی ترکیب‌های مختلف ویژگی‌ها بررسی می‌شود و در نهایت بهترین ترکیب ویژگی‌های موجود حاصل می‌گردد. استخراج بهترین ترکیب متشکل از حداقل ویژگی‌های موجود در فضای ویژگی، علاوه بر حفظ مهم‌ترین اطلاعات موجود در تصاویر پلاریمتری، منجر به کاهش حجم پردازش تصاویر پلاریمتری نیز می‌شود که می‌توان الگوریتم پیشنهاد شده در این مقاله را روی تماس داده‌های پلاریمتری مورد ارزیابی قرار داد.

کلیدواژه‌ها: رادار پلاریمتری، فضای ویژگی، معیار تفکیک‌پذیری فیشر، انتخاب ویژگی.

* نویسنده مکاتبه‌کننده: تهران، خیابان ولیعصر، تقاطع میرداماد، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی. تلفن: ۰۹۱۲۱۵۹۲۵۸۱

۱- مقدمه

با پیدایش سنجش از دور راداری، قابلیت ثبت اطلاعات در بازه‌های زمانی مختلف دوچندان گردید، به طوری که می‌توان در شرایط مختلف آب و هوایی و شب و روز اطلاعات مفیدی را از عارضه‌های مختلف از سطح زمین دریافت کرد. سنجش از دور راداری قابلیت جدید را از سنجش از دور ارائه کرد، که می‌توان با تغییر فرکانس امواج ارسالی، زاویه دید، جهت دید و تغییرات پلاریزاسیون^۱ امواج ارسالی و دریافتی، پاسخ عارضه‌های مختلف را دریافت کرد. بنابراین تصاویر متشکل از پراکنش^۲ راداری به پارامترهای مختلف عارضه هدف - از قبیل: شکل هندسی، میزان زبری سطح و میزان رطوبت عارضه - وابسته خواهد بود که از طریق آنالیز پراکنش‌های مختلف، می‌توان عوارض را طبقه‌بندی کرد. یکی از پارامترهایی که می‌تواند در تشخیص عوارض تأثیرگذار باشد، جهت و توجیه میدان الکترومغناطیس است که اصطلاحاً به آن پلاریزاسیون اطلاق می‌شود. میدان الکتریکی از دو مؤلفه افقی و قائم تشکیل شده است که مؤلفه افقی میدان در صفحه عمود بر ارسال امواج و مؤلفه قائم در صفحه ارسال قرار گرفته‌اند. در سیستم‌های رادار با روزنه مجازی^۳ با ارسال امواج در پلاریزاسیون افقی (H) و عمودی (V) و دریافت امواج در پلاریزاسیون‌های H و V ترکیب‌های مختلف این امواج به دست خواهد آمد که ترکیب‌های HH و VV، پلاریزه متشابه^۴ و ترکیب‌های HV و VH پلاریزه غیرمتشابه^۵ نامیده می‌شوند. سیستم‌های قدیمی SAR قابلیت ثبت اطلاعات را در مدهای تک پلاریزاسیون و پلاریزاسیون دوگانه دارند، که در این حالت نمی‌توان کل اطلاعات دامنه و فاز چهار حالت (HH, VH, HV, VV) عوارض مختلف را دریافت کرد. بنابراین خاصیت برداری امواج پراکنده شده نادیده گرفته می‌شود و اطلاعات جامع مرتبط با ویژگی‌های پلاریزاسیون سیگنال از بین خواهد رفت. به منظور رفع این مشکل، سیستم‌های جدید پلاریمتری^۶ طراحی گردیدند که با ارسال امواج همدوس^۷ در پلاریزاسیون

(H, V) و دریافت همزمان دو پلاریزاسیون (H, V)، چهار حالت پلاریمتری (HH, VH, HV, VV) که شامل اطلاعات دامنه و فاز است، در ماتریسی به نام ماتریس پراکنش^۸ ذخیره می‌گردد. در واقع این ماتریس اطلاعات جامعی را در مورد عارضه هدف در اختیار قرار می‌دهد که با آنالیز آن می‌توان پارامترهای مختلفی را از آن استخراج کرد. پس از ثبت ماتریس پراکنش، می‌توان هر ترکیب مختلف ارسال و دریافت پلاریزاسیون‌های مختلف را شبیه‌سازی کرد. در واقع می‌توان هر نوع ترکیب پلاریزاسیون‌های غیرخطی مانند پلاریزاسیون دایره‌ای و بیضی‌شکل را نیز شبیه‌سازی کرد که در واقع ویژگی منحصر به فرد تصاویر پلاریمتری خواهد بود. همین ویژگی یگانه تصاویر پلاریمتری منجر به تکوین و توسعه تصاویر پلاریمتری در زمینه‌های کشاورزی، کارتوگرافی، زمین‌شناسی، هیدرولوژی، مطالعات دریا و مناطق یخی گردیده است.

به منظور آنالیز و طبقه‌بندی تصاویر پلاریمتری، روش‌های نظارت شده و غیرنظارت شده، تکوین و توسعه یافته است. روش طبقه‌بندی نظارت نشده به دو دسته اصلی تقسیم می‌شود که در دسته اول روش‌های پردازش تصویر نظیر ISODATA و fuzzy c-means برای طبقه‌بندی تصویر به کار برده می‌شود (Lee et al., 1999). در این زمینه، الگوریتم‌های مختلفی از ترکیب روش شبکه عصبی و خوشه‌بندی فازی شکل گرفته‌اند (Rignot et al., 1992; Tzeng and Chen, 1998). در دسته دوم براساس ویژگی‌های پلاریمتری داده‌ها یا به عبارت دیگر آنالیز مکانیسم پراکنش طبقه‌بندی صورت

1. Polarization
2. Scattering
3. Synthetic Aperture Radar (SAR)
4. Like-polarized
5. Cross-polarized
6. Polarimetry
7. Coherent
8. Scattering matrix

هدف اصلی این مقاله مشخص ساختن اهمیت هر کدام از ویژگی‌های اطلاعاتی است، به طوری که ویژگی‌های مفید در روند طبقه‌بندی شرکت داده شوند تا بتوان بهترین دقت را از ترکیب ویژگی‌های موجود به دست آورد. در این مقاله در بخش دوم، فرمت ذخیره تصاویر پلاریمتری و نحوه نمایش اطلاعات و ویژگی تصاویر پلاریمتری بررسی می‌گردد که در این بخش ویژگی‌های اطلاعاتی تشکیل می‌شوند. در بخش سوم نحوه رتبه‌بندی باندهای اطلاعاتی براساس معیار تفکیک‌پذیری کلاس‌ها و نحوه انتخاب ترکیب مناسب از ویژگی‌های اطلاعاتی براساس معیار تفکیک‌پذیری کلاس‌ها و همبستگی بین باندهای اطلاعاتی شرح داده می‌شود. در بخش چهارم الگوریتم پیشنهادی در این پژوهش روی داده‌های موجود آزمون می‌گردد و نتایج الگوریتم ارائه می‌شود؛ و در نهایت در بخش پنجم نتیجه‌گیری و پیشنهادهای کارهای آینده ارائه می‌شود.

۲- مواد و روش‌ها

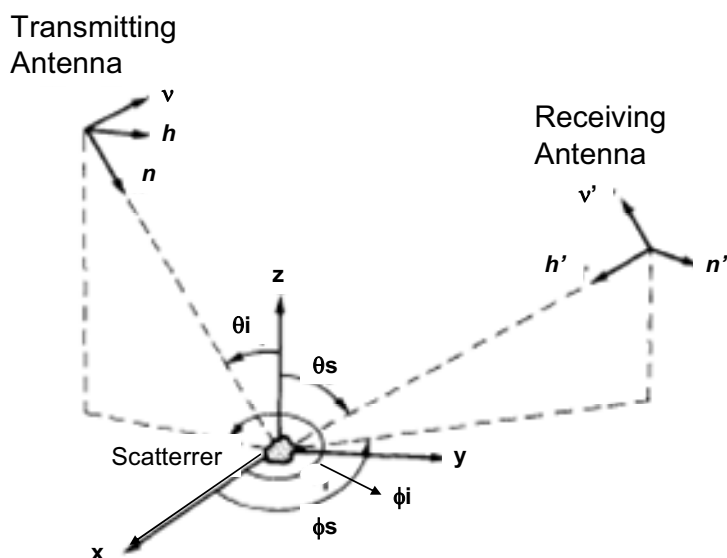
۲-۱- نمایش ماتریسی داده‌های پلاریمتری

امواج الکترومغناطیس از دو مؤلفه میدان الکتریکی و میدان مغناطیسی تشکیل شده‌اند که براساس معادلات ماکسول، این دو میدان بر همدیگر عمود هستند و می‌توان ارتباط این دو میدان را برقرار کرد. بنابراین به منظور آنالیز رفتار امواج الکترومغناطیس یکی از مؤلفه‌های میدان مورد بررسی قرار می‌گیرد که میدان الکتریکی به عنوان میدان مبنا انتخاب شده است. سیستم‌های مختصات انتشار، دریافت امواج در شکل ۱ نمایش داده شده است، به طوری که می‌توان میدان الکتریکی را به دو مؤلفه افقی و قائم h و v تجزیه کرد؛ و n جهت انتشار موج را نمایش می‌دهد (Zebker and Van Zyl, 1991).

می‌گیرد (Lee et al., 1999) که روش‌های آماری مرتبه اول و دوم ماتریس پراکنش برای طبقه‌بندی داده‌ها توسعه یافته‌اند (Van Zyl, 1989; Cloude and Pottier, 1997). با بررسی توزیع داده‌های یک منظره^۱ و چندمنظره^۲ در داده‌های پلاریمتری (Lee et al., 1994b) روش طبقه‌بندی نظارت شده بیشترین شباهت^۳ براساس توزیع ویشارت^۴ ایجاد گردید (Lee et al., 1994a). سپس روش‌های طبقه‌بندی نظارت نشده، از ترکیب روش‌های بررسی مکانیسم پراکنش و طبقه‌بندی نظارت شده براساس توزیع ویشارت نیز شکل گرفته و ایجاد شده‌اند (Pottier and Lee, 2000; Lee et al., 2004; Ferro-Famil et al., 2001). کاستی‌های روش‌های طبقه‌بندی نظارت نشده، می‌تواند به این مورد اشاره کرد که ممکن است مراجع زمینی انتخاب شده با مراکز خوشه‌ها در طبقه‌بندی نظارت نشده مطابقت نداشته باشد و درواقع ارزیابی نتایج طبقه‌بندی نظارت نشده امکان‌پذیر نباشد (Lee et al., 2001). بنابراین به کاربرد الگوریتم‌های طبقه‌بندی نظارت شده در تعیین میزان اهمیت پلاریزاسیون‌های مختلف، تفکیک کلاس‌ها از همدیگر و پیدا کردن ترکیب بهینه از پلاریزاسیون‌های مختلف در فرکانس‌های گوناگون توصیه می‌گردد (Lee et al., 1991; Small, 2001). به منظور طبقه‌بندی نظارت شده تصاویر پلاریمتری تک‌منظره و چندمنظره، روش‌های مختلفی براساس توزیع آماری داده‌ها، بخش‌بندی تصویر، شناخت فیزیکی مکانیسم پراکنش و استفاده از اطلاعات بافت موجود در تصویر شکل گرفته و توسعه یافته‌اند (Lee et al., 1994a; Lee et al., 2001; Nezry et al., 1996; Yamaguchi et al., 2005; Yamaguchi et al., 2006).

در زمینه استخراج اطلاعات پلاریمتری، به منظور مشخص کردن قدرت تفکیک‌پذیری ویژگی‌های پلاریمتری و تأثیر هر ویژگی در طبقه‌بندی نظارت شده، پژوهشی صورت گرفته است (Small, 1991) که در این پژوهش روشی دقیق برای انتخاب زیرمجموعه مناسب از ویژگی‌ها و ارزیابی نتایج، ارائه نشده است.

1. One-look
2. Multilook
3. Maximum Likelihood
4. Wishart distribution



شکل ۱. هندسه پراکنش و سیستم‌های مختصات

منبع: Zebker and Van Zyl, 1991

اعداد مختلط تشکیل می‌دهند، حاوی اطلاعات دامنه و فاز چهار باند اطلاعاتی‌اند. در بسیاری از کاربردهای سنجش از دور راداری، در صورت منطبق بودن آنتن‌های فرستنده و گیرنده، ماتریس پراکنش را ماتریس متقارن در نظر می‌گیرند، به طوری که S_{HV} و S_{VH} برابر خواهند بود (Cloude and Pottier, 1996).

نمایش داده‌های پلاریمتری به وسیله ماتریس پراکنش، برای آنالیز عارضه‌های نقطه‌ای - نظیر کشتی، تیر چراغ برق و مانند اینها - به کار می‌رود (Touzi, 2002 and Charbonneau). لازم به ذکر است که به دلیل وجود نویز لکه^۱ در پراکنش عارضه‌های غیرمنفرد، برای بررسی خصوصیات این عارضه‌ها، تصاویر موجود به صورت چندمنظره پردازش می‌شوند و همچنین به منظور بررسی خصوصیات پراکنش داده‌های پلاریمتری، آنالیزهای آماری مرتبه دوم ماتریس پراکنش، مورد ارزیابی قرار می‌گیرد (Freeman and Durden, 1998; Lee et al., 1994a).

بر اساس سیستم‌های مختصات تعریف شده ارتباط میدان الکتریکی منتشر شده و پراکنده شده به وسیله ماتریس پراکنش برقرار می‌شود که معرف خصوصیات پراکنشی هدف است و اطلاعات مفیدی را مرتبط با عارضه هدف در اختیار قرار می‌دهد. در صورت ثبت ماتریس پراکنش، می‌توان مؤلفه‌های میدان الکتریکی امواج پراکنده شده را محاسبه کرد. ارتباط میدان‌های الکتریکی تابشی و پراکنشی مطابق رابطه (۱) خواهد بود.

$$\begin{pmatrix} E_H \\ E_V \end{pmatrix}^{sc} = \frac{e^{ikr}}{kr} \begin{pmatrix} S_{HH} & S_{HV} \\ S_{VH} & S_{VV} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_H \\ E_V \end{pmatrix}^{ill} \quad (1)$$

با توجه به معادله ذکر شده، E_H و E_V معرف مؤلفه‌های افقی و قائم میدان الکتریکی، ill معرف میدان الکتریکی تابشی، sc معرف میدان الکتریکی پراکنده شده، r نماینده فاصله هدف تا گیرنده آنتن و k عدد موج است (Zebker and Van Zyl, 1991).

ماتریس پراکنش 2×2 ، که المان‌های آن را

1. Speckle

باند و مراکز کلاس‌های مختلف، شکل گرفته و توسعه یافته است (Rignot et al., 1992; Tzeng and Chen, 1998; Pierce et al., 1994; Rignot and Chellappa, 1992).

در این مقاله با تفکیک المان‌های ماتریس کوواریانس به عنوان باند اطلاعاتی، فضای ویژگی^۲ متشکل از ۹ باند اطلاعاتی تشکیل می‌گردد. ارتباط هر کدام از باندهای اطلاعاتی و المان‌های ماتریس کوواریانس مطابق رابطه (۵) است (Small, 1991).

$$\vec{F} = \begin{pmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ F_4 \\ F_5 \\ F_6 \\ F_7 \\ F_8 \\ F_9 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} |S_{HH}|^2 \\ |S_{VV}|^2 \\ |S_{HV}|^2 \\ \Re\{S_{HH}S_{VV}^*\} \\ \Im\{S_{HH}S_{VV}^*\} \\ \Re\{S_{HV}S_{VV}^*\} \\ \Im\{S_{HV}S_{VV}^*\} \\ \Re\{S_{HH}S_{HV}^*\} \\ \Im\{S_{HH}S_{HV}^*\} \end{pmatrix} \quad \text{رابطه (۵)}$$

مطابق معادله (۳) هر کدام از المان‌های ماتریس کوواریانس به جز عناصر قطر اصلی که معرف شدت امواج بازتابی‌اند، بقیه اعدادی مختلط خواهند بود. در این تحقیق به جز سه ویژگی اولیه که معرف شدت امواج برگشتی هستند، دیگر ویژگی‌ها از تفکیک عناصر مختلط ماتریس کوواریانس به قسمت مجازی و حقیقی تشکیل گردیده‌اند، به طوری که هر کدام به طور مجزا تشکیل یک ویژگی را می‌دهند. بنابراین فضای ویژگی مورد بررسی یک فضای نه بعدی است.

۲-۲- انتخاب زیرمجموعه مناسب در فضای ویژگی

هدف اصلی این بخش، پیدا کردن ترکیبی بهینه

با توجه به مقارن بودن ماتریس پراکنش $S_{VH}=S_{HV}$ ، اطلاعات ماتریس پراکنش در قالب بردار مختلط h نمایش داده می‌شود.

$$h = [S_{HH} \quad \sqrt{2} S_{HV} \quad S_{VV}]^T \quad \text{رابطه (۲)}$$

ماتریس کوواریانس C نیز مطابق معادله (۳) محاسبه می‌گردد.

$$C = hh^*T \quad \text{رابطه (۳)}$$

$$= \begin{bmatrix} |S_{HH}|^2 & \sqrt{2}S_{HH}S_{HV}^* & S_{HH}S_{VV}^* \\ \sqrt{2}S_{HV}S_{HH}^* & 2|S_{HV}|^2 & \sqrt{2}S_{HV}S_{VV}^* \\ S_{VV}S_{HH}^* & \sqrt{2}S_{VV}S_{HV}^* & |S_{VV}|^2 \end{bmatrix}$$

در رابطه (۳) «*» معرف مزدوج مختلط عدد مختلط و «T» نمایانگر ترانزاده یک ماتریس است. شایان ذکر است که برای کاهش نویز لکه در تصاویر و فشرده‌سازی حجم داده‌ها، پردازش‌های چندمنظره به کار برده می‌شود، به طوری که هر پیکسل در تصویر، میانگین n پیکسل همسایه خواهد بود (Lee et al., 1999; Lee et al., 1994b). ماتریس کوواریانس میانگین $\langle C \rangle$ ، طبق رابطه (۴) نمایش داده می‌شود.

$$\langle C \rangle = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n h_i h_i^*T \quad \text{رابطه (۴)}$$

به طوری که در معادله ۴، $\langle C \rangle$ بیانگر میانگین پردازشی داده‌هاست. ماتریس کوواریانس ارتباط مستقیمی بین مشاهدات پارامترهای راداری و خصوصیات فیزیکی هدف‌های مختلف ایجاد می‌کند (Zhang et al., 2008). ماتریس کوواریانس از ۹ المان مستقل از همدیگر تشکیل شده است که از ترکیب این المان‌ها، ۹ باند اطلاعاتی مفید استخراج می‌شود. همچنین روش‌های طبقه‌بندی نظارت شده و غیرنظارت شده، با اندازه‌گیری فاصله بین مقادیر پیکسل‌های هر

1. Covariance
2. Feature vector space

روند انتخاب بردارهای ویژگی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. معیارهای مختلفی نظیر Divergence, Fisher و Bhattacharyya برای تفکیک بردارهای ویژگی‌ها به کار برده می‌شوند که در این تحقیق، معیار تفکیک پذیری فیشر^۲ مورد استفاده قرار گرفته است. معیارهای تفکیک‌پذیری Divergence و Bhattacharyya در صورتی که توزیع داده‌ها نرمال نباشند، به راحتی قابل محاسبه نخواهند بود. در واقع محاسبه معیار فیشر مستقل از نوع توزیع داده‌هاست، به طوری که این معیار براساس پراکندگی داده‌های آموزشی در فضای ویژگی پایه‌گذاری شده است. معیار فیشر به منظور تفکیک چند کلاس مطابق فرمول زیر نمایش داده شده است (Theodoridis and Koutroumbas, 2006):

$j \neq i, j=1,2,\dots,M \ \& \ i$

$$FDR_{ij} = \frac{(\mu_i - \mu_j)^2}{\sigma_i^2 + \sigma_j^2} \quad \text{رابطه (۶)}$$

مطابق معادله (۶)، M معرف تعداد کلاس‌ها، μ_i و μ_j میانگین کلاس‌های w_i و w_j ، σ_i^2 و σ_j^2 واریانس کلاس‌های w_i و w_j و همچنین FDR_{ij} معرف معیار تفکیک‌پذیری فیشر بین کلاس‌های w_i و w_j است. برای مشخص کردن نقش هر ویژگی میانگین معیار فیشر بین تمامی کلاس‌ها به عنوان معیار تفکیک‌پذیری میانگین آن ویژگی به صورت زیر تعریف می‌شود (Theodoridis and Koutroumbas, 2006):

$$FDR_{\setminus} = \sum_i^M \sum_{j \neq i}^M \frac{(\mu_i - \mu_j)^2}{\sigma_i^2 + \sigma_j^2} \quad \text{رابطه (۷)}$$

مطابق معادله (۷) EDR_{\setminus} معرف معیار تفکیک‌پذیری میانگین هر ویژگی است. ویژگی‌هایی که

متشکل از ویژگی‌های موجود در فضای ویژگی است، به طوری که بیشترین دقت طبقه‌بندی از انتخاب بهترین مذکور حاصل گردد که با اجرا کردن الگوریتم انتخاب ویژگی^۱، ابعاد فضای ویژگی کاهش می‌یابد. دلایل مختلفی منجر به کاهش ابعاد ویژگی می‌شود. در واقع این امکان وجود دارد که نتیجه طبقه‌بندی دو ویژگی، هنگامی که با همدیگر ترکیب می‌شوند - در مقایسه با حالتی که به طور مجزا مورد بررسی قرار می‌گیرند - کاهش یابد. دلیل اصلی این امر، همبستگی بالای دو ویژگی خواهد بود. از دیگر دلایل اصلی کاهش ابعاد ویژگی، بهبود خطای طبقه‌بندی خواهد بود، به طوری که با کاهش ویژگی‌های موجود، دقت تخمین خطای طبقه‌بندی بهبود خواهد یافت. همچنین درخور ذکر است که با کاهش ابعاد فضای ویژگی، حجم محاسبات نیز کاهش خواهد یافت (Theodoridis and Koutroumbas, 2006). انتخاب ویژگی‌های مناسب، روندی بسیار مهم خواهد بود، به طوری که انتخاب ویژگی‌هایی با توان تفکیک‌پذیری پایین، نتایج طبقه‌بندی ضعیفی را به همراه خواهد داشت. به عبارت دیگر، ویژگی‌هایی باید انتخاب شوند که بزرگ‌ترین فاصله بین کلاسی و کوچک‌ترین واریانس داخل کلاسی را در فضای ویژگی داشته باشند. بنابراین برای انتخاب ویژگی‌های مناسب، ابتدا ویژگی‌ها به طور مجزا بررسی می‌شوند و سپس ترکیب‌های مختلف آنها مورد بررسی قرار می‌گیرد تا ترکیب مناسبی از فضای ویژگی با بالاترین دقت طبقه‌بندی به دست آید. در این بخش ابتدا معیار تفکیک‌پذیری بردارهای ویژگی توضیح داده می‌شود و سپس در بخش بعدی انتخاب بهترین زیرمجموعه مناسب در فضای ویژگی نیز شرح داده خواهد شد.

۲-۳- معیار تفکیک‌پذیری کلاس‌ها

اولین مرحله در جهت انتخاب بهترین بردارهای ویژگی، تعیین نقش هر کدام از بردارهای فضای ویژگی خواهد بود. بنابراین به کار بردن معیار تفکیک‌پذیری صحیح،

1. Feature selection
2. Fisher

معرف میزان اهمیت معیار فیشر و همبستگی بین ویژگی‌ها، i_1 اندیس اولین ویژگی رتبه‌بندی شده، i_2 اندیس دومین ویژگی رتبه‌بندی شده و $\arg \max_j$ بیانگر تابعی است که اندیس ویژگی را - که عبارت داخل {} را بیشینه می‌کند - نشان می‌دهد. در این تحقیق، برای رتبه‌بندی ویژگی‌ها، نسبت α_1 به α_2 برابر با ضریب α در نظر گرفته می‌شود به طوری که نتایج رتبه‌بندی ویژگی‌ها به ازای مقادیر مختلف α برابر با $0.5, 1, 1.5, 2$ مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

برای مشخص کردن سومین الی نهمین ویژگی رتبه‌بندی شده، علاوه بر معیار فیشر، میانگین همبستگی کل ویژگی‌های قبلی انتخاب شده نیز در نظر گرفته می‌شود که معادله آن مطابق رابطه (۱۰) خواهد بود.

$$k=3, \dots, 9 \text{ \& for } j \neq i_r, r=1, 2, \dots, k-1$$

رابطه (۱۰)

$$i_k = \arg \max_j \left\{ \alpha_1 \times \text{FDR}_{\alpha_j} - \frac{\alpha_2}{k-1} \sum_{r=1}^{k-1} |\rho_{i_r j}| \right\}$$

پس از رتبه‌بندی ویژگی‌ها به ازای مقادیر مختلف α ، نتایج رتبه‌بندی ویژگی‌ها مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. روند کار به این ترتیب خواهد بود که ابتدا ویژگی‌ای که دارای رتبه اول است مطابق الگوریتم نظارت شده بیشترین شباهت طبقه‌بندی می‌شود و معیارهای ارزیابی دقت کلی^۱ و ضریب کاپا^۲ برای ویژگی اول محاسبه می‌گردد و پس از انجام این مرحله، دومین ویژگی رتبه‌بندی شده به ویژگی اول اضافه می‌شود و ترکیب دوم شکل می‌گیرد و میزان تأثیر این ویژگی در تغییر معیارهای ارزیابی طبقه‌بندی ترکیب اول محاسبه می‌شود. این روند تا زمانی ادامه می‌یابد که تمام ویژگی‌ها به ترتیب رتبه‌بندی به ترکیب ماقبل خود اضافه شود و نتایج طبقه‌بندی آنها مورد ارزیابی قرار

معیار تفکیک‌پذیری بالایی دارند، پراکندگی بین کلاسی (σ_1^2) اندک، و فاصله بین کلاسی ($\mu_i - \mu_j$) بالایی خواهند داشت.

۴-۲- انتخاب زیرمجموعه فضای ویژگی

در این بخش نحوه انتخاب ۱ تعداد ویژگی از ۹ ویژگی اولیه مورد بررسی قرار می‌گیرد. به‌منظور انتخاب ویژگی‌ها، علاوه بر معیار فیشر، همبستگی بین ویژگی‌ها نیز در نظر گرفته می‌شود که مطابق فرمول زیر محاسبه می‌شود (Theodoridis and Koutroumbas, 2006):

$$\text{for } n=1, 2, \dots, N \text{ \& } k=1, 2, \dots, m$$

$$\rho_{ij} = \frac{\sum_{n=1}^N F_{ni} F_{nj}}{\sqrt{\sum_{n=1}^N F_{ni}^2 \sum_{n=1}^N F_{nj}^2}} \quad \text{رابطه (۸)}$$

مطابق فرمول بالا، N معرف تعداد پیکسل‌های هر ویژگی، m تعداد کل ویژگی‌های موجود که برابر با ۹ ویژگی و ρ_{ij} همبستگی بین ویژگی‌های F_i و F_j است.

روند رتبه‌بندی ویژگی‌ها به این ترتیب خواهد بود که ابتدا ویژگی با بالاترین معیار تفکیک‌پذیری، به‌عنوان ویژگی برگزیده F_{i_1} انتخاب می‌شود. سپس برای مشخص کردن دومین ویژگی رتبه‌بندی شده F_{i_2} ، علاوه بر قدرت تفکیک‌پذیری، همبستگی آنها نیز با ویژگی F_{i_1} در نظر گرفته می‌شود. بر این اساس، مطابق معادله (۹)، ویژگی که عبارت مذکور را بیشینه کند، به‌عنوان دومین ویژگی رتبه‌بندی شده انتخاب می‌شود (Theodoridis and Koutroumbas, 2006).

$$\text{for all } j \neq i_1$$

رابطه (۹)

$$i_r = \arg \max_j \left\{ \alpha_1 \times \text{FDR}_{\alpha_j} - \alpha_2 \times |\rho_{i_1 j}| \right\}$$

مطابق رابطه ذکر شده FDR_{α_j} معرف معیار فیشر میانگین ویژگی‌ها، $|\rho_{i_1 j}|$ قدرمطلق همبستگی بین ویژگی F_{i_1} و F_j و α_1 و α_2 پارامترهای اختیاری است و

1. Overall accuracy
2. Kappa coefficient

و سطح خیابان)، پراکنش پوشش گیاهی^۲ (پوشش گیاهی درختان)، و پراکنش ساختارهای دووجهی^۳ (پراکنش سطح ساختمان با سطح جاده و یا خاک) تشکیل شده است که نقاط کنترل با مینا قراردادن تصویر Google Earth از روی تصاویر پلاریمتری استخراج گردیده‌اند.

۳- نتایج

در این بخش نتایج عملی الگوریتم پیشنهادی روی داده‌های موجود آزمایش می‌شود و سپس نتایج عملی مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد.

۳-۱- آنالیز نتایج

با اجرا کردن الگوریتم پیشنهادی در این مقاله، ابتدا میزان اهمیت هر ویژگی در تفکیک هر دو کلاس از همدیگر بر اساس معیار فیشر مطابق معادله (۶) محاسبه می‌شود و سپس معیار فیشر میانگین - که معرف میزان اهمیت هر ویژگی است - نیز مطابق معادله (۷) محاسبه می‌شود. نتایج این مرحله در جدول ۱ نمایش داده شده است.



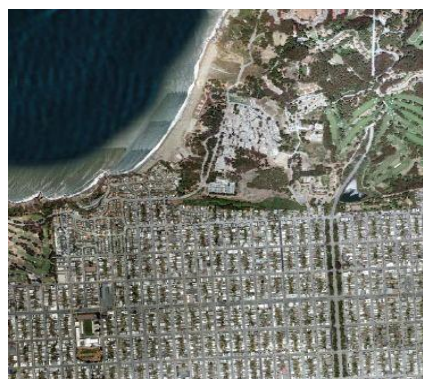
ب

قرار گیرد. پس از انجام طبقه‌بندی ترکیب‌های مختلف ویژگی‌ها به ازای α های مختلف، ترکیبی که بیشترین دقت طبقه‌بندی را کسب می‌کند به‌عنوان بهترین ترکیب در فضای ویژگی شناخته می‌شود.

۲-۵- اطلاعات مربوط به داده‌ها

برای بررسی نتایج الگوریتم، داده‌های پلاریمتری شهر San Francisco سنجنده AIRSAR سازمان فضایی امریکا (NASA JPL) در باند L با فرکانس مرکزی (1.225 GHz) مورد استفاده قرار گرفته است که ابعاد تصویر ۲۵۹×۲۵۱ پیکسل است. به‌منظور کاهش نویز لکه، تصویر به صورت ۴ منظره پردازش شده است. این تصویر به‌عنوان تصویر مرجع در اکثر مقالات پردازش تصاویر پلاریمتری مورد استفاده قرار گرفته است (Tzeng and Chen, 1998; Lee et al., 1999; Van) برای مقایسه (Zyl, 1989; Cloude and Pottier, 1997). پوشش‌های زمین، تصویر Google Earth در شکل ۲-الف و سپس تصویر اصلی POLSAR شامل باندهای |HH+VV|، |HV| و |HH-VV| در شکل ۲-ب نمایش داده شده است.

تصویر San Francisco از سه پراکنش عمده شامل، پراکنش سطحی^۱ (سطح اقیانوس، سطح خاک و چمن



الف

شکل ۲. نمایش تصویر San Francisco: الف) تصویر Google Earth؛ و ب) نمایش رنگی تصویر پلاریمتری که در آن |HH+VV| با رنگ آبی، |HV| با رنگ سبز و |HH-VV| با رنگ قرمز نمایش داده شده است

1. Surface scattering
2. Volume scattering
3. Double bounce scattering

بررسی درایه‌های داده‌های پلاریمتری راداری برای انتخاب پارامترهای طبقه‌بندی این داده‌ها

براساس مطالب ذکر شده، برای مشخص کردن رتبه‌بندی هر ویژگی به ازای مقادیر مختلف α که از نسبت دو ضریب α_1 و α_2 مطابق معادلات ۹ و ۱۰ شده است نیز در نظر گرفته می‌شود. کسب گردیده است، علاوه بر قدرت تفکیک‌پذیری هر ویژگی، همبستگی بین ویژگی‌ها که در جدول ۲ ذکر شده است نیز در نظر گرفته می‌شود.

جدول ۱. نتایج معیار تفکیک‌پذیری فیشر ویژگی‌ها

کلاس‌ها	معیار تفکیک‌پذیری ویژگی‌ها								
	F ₁	F ₂	F ₃	F ₄	F ₅	F ₆	F ₇	F ₈	F ₉
پراکنش ساختارهای قائم و پراکنش پوشش گیاهی	۰/۶۵۸۵	۰/۶۵۶۶	۰/۴۷۲۸	۰/۳۲۰۹	۰/۱۵۱۷	۰/۲۵۴۵	۰/۱۲۳۸	۰/۳۹۵۹	۰/۰۰۳۹
پراکنش ساختارهای قائم و پوشش سطحی	۰/۶۷۰۷	۰/۶۷۳۱	۰/۶۳۱	۰/۳۲۴	۰/۱۵۳۱	۰/۲۵۸۶	۰/۱۲۴۴	۰/۳۹۴۴	۰/۰۰۳
پراکنش پوشش گیاهی و پوشش سطحی	۰/۳۹۲۹	۰/۲۴۳۶	۱/۵۷۳۱	۰/۰۴۸۵	۰/۰۰۶۴	۰/۰۱۸۵	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۲۹	۰/۰۱۸۲
میانگین	۰/۵۷۴	۰/۵۲۴۴	۰/۸۹۲۳	۰/۲۳۱۱	۰/۱۰۳۷	۰/۱۷۶۳	۰/۰۸۲۸	۰/۲۶۴۴	۰/۰۰۸۴

جدول ۲. نتایج همبستگی بین ویژگی‌ها

ویژگی‌ها	F ₁	F ₂	F ₃	F ₄	F ₅	F ₆	F ₇	F ₈	F ₉
F ₁	۱	۰/۶۲۶	۰/۷۸۶	-۰/۷۷۶	-۰/۰۳۷	-۰/۶۹۵	۰/۱۵۱	۰/۸۶۷	۰/۱۲۸
F ₂	۰/۶۲۶	۱	۰/۶۰۵	-۰/۵۵۹	۰/۰۱۸	-۰/۶۷۰	۰/۴۱۹	۰/۵۷۲	۰/۱۵۱
F ₃	۰/۷۸۶	۰/۶۰۵	۱	-۰/۶۸۶	۰/۰۳۵	-۰/۸۰۰	۰/۲۵۹	۰/۸۹۹	۰/۰۷۵
F ₄	-۰/۷۷۶	-۰/۵۵۹	-۰/۶۸۶	۱	۰/۰۶۱	۰/۸۴۲	-۰/۱۴۸	-۰/۷۲۶	-۰/۳۱۱
F ₅	-۰/۰۳۷	-۰/۰۱۸	۰/۰۳۵	۰/۰۶۱	۱	۰/۰۵۳	۰/۵۱۹	-۰/۰۶۶	-۰/۳۰۴
F ₆	-۰/۶۹۵	-۰/۶۷۰	-۰/۸۰۰	۰/۸۴۲	۰/۰۵۳	۱	-۰/۲۳۵	-۰/۸۱۹	-۰/۱۷۹
F ₇	۰/۱۵۱	۰/۴۱۹	۰/۲۵۹	-۰/۱۴۸	۰/۵۱۹	-۰/۲۳۵	۱	۰/۱۷۸	۰/۲۸۹
F ₈	۰/۸۶۷	۰/۵۷۲	۰/۸۹۹	-۰/۷۲۶	-۰/۰۶۶	-۰/۸۱۹	۰/۱۷۸	۱	۰/۱۰۱
F ₉	۰/۱۲۸	۰/۱۵۱	۰/۰۷۵	-۰/۳۱۱	-۰/۳۰۴	-۰/۱۷۹	۰/۲۸۹	۰/۱۰۱	۱

به ترتیب رتبه‌بندی به ترکیب قبلی اضافه شوند ادامه می‌یابد. پس از انجام این مرحله میزان تأثیر ویژگی‌ها در تغییر دقت طبقه‌بندی مشخص می‌شود و همچنین بهترین مقدار α برای رتبه‌بندی صحیح ویژگی‌ها تعیین می‌شود. پس از اجرا کردن الگوریتم پیشنهادی، نتایج طبقه‌بندی ویژگی‌ها در جدول ۴ ذکر شده است. به این دلیل که نتایج رتبه‌بندی سه ویژگی رتبه‌بندی شده اولیه، به ازای α های بزرگ‌تر و مساوی ۱/۵ یکسان خواهد بود و بیشترین دقت طبقه‌بندی از ترکیب این سه ویژگی حاصل می‌گردد، بنابراین نتایج رتبه‌بندی ویژگی‌ها به ازای α های بزرگ‌تر از ۲ نمایش داده نشده است. مطابق نتایج جدول ۲، مشاهده می‌شود که اگرچه متوسط همبستگی ویژگی‌های F_1 و F_2 و F_3 و F_4 و F_5 مطابق معادله ۵ ($|S_{HH}|$)، $|S_{VV}|$ ، $|S_{HV}|$ با همدیگر مثبت و بیشتر از عدد ۰/۵ است؛ اما این سه ویژگی دارای قدرت تفکیک‌پذیری بالایی هستند و به همین علت بهترین دقت طبقه‌بندی از ترکیب سه‌گانه این سه ویژگی حاصل می‌شود.

در این تحقیق مقدار متغیر α برابر با ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ در نظر گرفته شده است. با تغییر مقدار متغیر α نقش همبستگی بین باندی و معیار فیشر تغییر خواهد کرد، به طوری که به ازای α های بزرگ‌تر از یک، نقش معیار فیشر برای تعیین رتبه‌بندی ویژگی‌ها تأثیرگذارتر خواهد بود و ویژگی‌هایی که معیار تفکیک‌پذیری بالاتری دارند، اهمیت بیشتری خواهند داشت. بنابراین رتبه‌بندی نهایی ویژگی‌ها مطابق معادلات ۹ و ۱۰ مشخص می‌شود و نتایج نهایی این رتبه‌بندی در جدول ۳ ذکر شده است.

به منظور ارزیابی نتایج رتبه‌بندی ویژگی‌ها و انتخاب بهترین ترکیب مناسب موجود در فضای ویژگی، ترکیب‌های مختلف ویژگی‌ها براساس الگوریتم نظارت شده بیشترین شباهت طبقه‌بندی می‌شوند. روند کار به این ترتیب خواهد بود که ابتدا اولین ویژگی رتبه‌بندی شده طبقه‌بندی می‌گردد و معیارهای ارزیابی دقت شامل دقت کلی و ضریب کاپا برای این ویژگی محاسبه می‌شود و سپس دومین ویژگی رتبه‌بندی شده به ویژگی اول افزوده می‌گردد و این ترکیب جدید نیز طبقه‌بندی می‌شود. این روند تا زمانی که کل ۷ ویژگی باقی‌مانده

جدول ۳. نتایج رتبه‌بندی ویژگی‌ها

ویژگی‌ها	$\alpha=0.5$	$\alpha=1$	$\alpha=1.5$	$\alpha=2$
F_1	رتبه پنجم	رتبه چهارم	رتبه سوم	رتبه سوم
F_2	رتبه سوم	رتبه سوم	رتبه دوم	رتبه دوم
F_3	رتبه اول	رتبه اول	رتبه اول	رتبه اول
F_4	رتبه هفتم	رتبه هشتم	رتبه هفتم	رتبه پنجم
F_5	رتبه دوم	رتبه دوم	رتبه چهارم	رتبه چهارم
F_6	رتبه نهم	رتبه نهم	رتبه نهم	رتبه نهم
F_7	رتبه ششم	رتبه هفتم	رتبه هشتم	رتبه هفتم
F_8	رتبه هشتم	رتبه ششم	رتبه ششم	رتبه ششم
F_9	رتبه چهارم	رتبه پنجم	رتبه پنجم	رتبه هشتم

بررسی درایه‌های داده‌های پلاریمتری راداری برای انتخاب پارامترهای طبقه‌بندی این داده‌ها

جدول ۴. نتایج طبقه‌بندی ویژگی‌های رتبه‌بندی شده

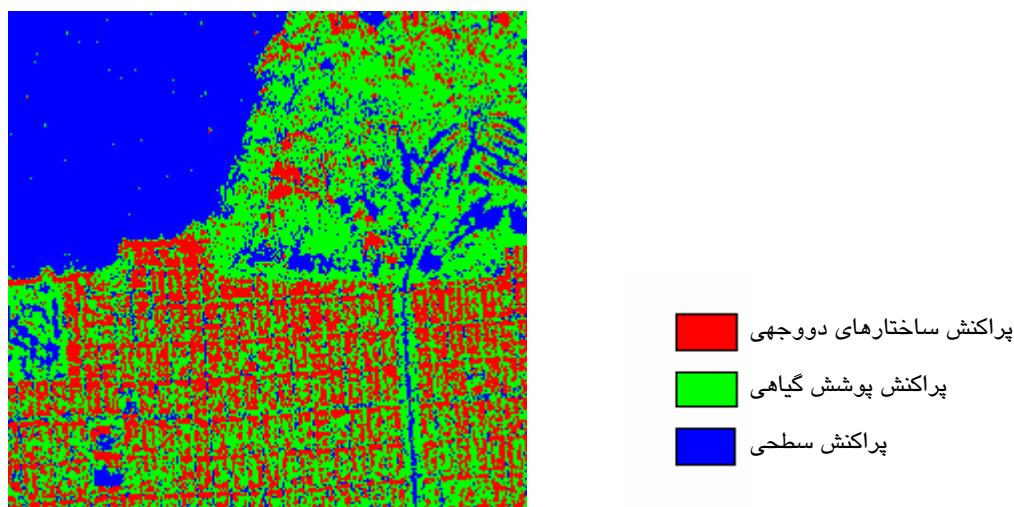
ترکیبات ویژگی‌های رتبه‌بندی شده	$\alpha=0.5$		$\alpha=1$		$\alpha=1.5$		$\alpha=2$	
	دقت کلی	ضریب کاپا	دقت کلی	ضریب کاپا	دقت کلی	ضریب کاپا	دقت کلی	ضریب کاپا
ترکیب اول	۷۳/۸۰	۶۰/۴۳	۷۳/۸۰	۶۰/۴۳	۷۳/۸۰	۶۰/۴۳	۷۳/۸۰	۶۰/۴۳
ترکیب دوم	۸۱/۰۳	۷۱/۳۶	۸۱/۰۳	۷۱/۳۶	۸۴/۸۵	۷۷/۱۳	۸۴/۸۵	۷۷/۱۳
ترکیب سوم	۸۵/۴۰	۷۷/۹۵	۸۵/۴۰	۷۷/۹۵	۹۰/۷۲	۸۵/۹۹	۹۰/۷۲	۸۵/۹۹
ترکیب چهارم	۸۳/۶۲	۷۵/۲۷	۸۹/۴۹	۸۴/۱۳	۸۹/۴۹	۸۴/۱۳	۸۹/۴۹	۸۴/۱۳
ترکیب پنجم	۸۸/۱۳	۸۲/۰۷	۸۸/۱۳	۸۲/۰۷	۸۸/۱۳	۸۲/۰۷	۹۰/۰۴	۸۴/۹۵
ترکیب ششم	۸۷/۰۳	۸۰/۴۲	۸۸/۹۴	۸۳/۳۱	۸۸/۹۴	۸۳/۳۱	۸۹/۹۰	۸۴/۷۴
ترکیب هفتم	۸۷/۷۲	۸۱/۴۴	۸۷/۸۵	۸۱/۶۶	۸۹/۳۵	۸۳/۹۲	۸۹/۶۳	۸۴/۳۳
ترکیب هشتم	۸۸/۶۷	۸۲/۹۰	۸۸/۶۷	۸۲/۹۰	۸۸/۶۷	۸۲/۹۰	۸۸/۶۷	۸۲/۹۰
ترکیب نهم	۸۸/۴۰	۸۲/۴۷	۸۸/۴۰	۸۲/۴۷	۸۸/۴۰	۸۲/۴۷	۸۸/۴۰	۸۲/۴۷
بهترین نتیجه	۸۸/۶۷	۸۲/۹۰	۸۹/۴۹	۸۴/۱۳	۹۰/۷۲	۸۵/۹۹	۹۰/۷۲	۸۵/۹۹

جدول ۵. نتایج ماتریس خطا برای بهترین ترکیب فضای ویژگی

کلاس‌ها	پراکنش ساختارهای دووجهی	پراکنش پوشش گیاهی	پراکنش سطحی	دقت تولیدکننده
پراکنش ساختارهای دووجهی	۲۲۳	۴۲	۰	۸۴/۱۵ درصد
پراکنش پوشش گیاهی	۱۹	۲۴۲	۴	۹۱/۳۲ درصد
پراکنش سطحی	۰	۳	۲۰۰	۹۸/۵۲ درصد
دقت کاربر	دقت ۹۲/۱۵ درصد	دقت ۸۴/۳۲ درصد	دقت ۹۸/۰۴ درصد	
ضریب کاپا: ۸۵/۹۹ درصد		دقت کلی: ۹۰/۷۲ درصد		

طبقه‌بندی شده و داده‌های مرجع است، به طوری که ستون‌های این ماتریس معرف داده‌های مرجع و سطرهای این ماتریس بیانگر نتایج طبقه‌بندی است. عناصر قرار گرفته روی قطر اصلی، نشان‌دهنده تعداد پیکسل‌هایی هستند که درست طبقه‌بندی شده‌اند و پیکسل‌های خارج قطر اصلی نظیر پیکسل‌های قرار گرفته در سطر سوم و ستون اول و دوم، تعداد پیکسل‌هایی را معرفی می‌کنند که به اشتباه به کلاس‌های اول و دوم تعلق گرفته‌اند. تصویر طبقه‌بندی شده حاصل از بهترین ترکیب و نحوه نمایش رنگی کلاس‌های طبقه‌بندی شده نیز در شکل ۳ نمایش داده شده است.

همچنین در خور ذکر است ویژگی‌هایی که به ازای α های بزرگ‌تر و مساوی ۱/۵ به این سه ترکیب اولیه اضافه می‌شوند نه تنها دقت طبقه‌بندی را بهبود نمی‌بخشند بلکه منجر به کاهش دقت طبقه‌بندی نیز می‌شوند. علت اصلی کاهش دقت، پایین بودن قدرت تفکیک‌پذیری دیگر ویژگی‌ها در مقایسه با سه ویژگی اصلی است که با اضافه شدن این ویژگی‌ها به سه ترکیب اصلی، اطلاعات بافت بهترین ترکیب موجود تغییر خواهد کرد. بنابراین بهترین ترکیب زیرمجموعه فضای ویژگی ۹ بعدی از ترکیب سه‌گانه ویژگی‌های $|S_{HH}|^2$ ، $|S_{VV}|^2$ و $|S_{HV}|^2$ حاصل گردیده است. مطابق جدول ۵ ماتریس خطا حاصل مقایسه نتایج پیکسل‌های



شکل ۳. تصویر طبقه‌بندی شده بهترین ترکیب موجود در فضای ویژگی

۴. بحث و نتیجه‌گیری

در این مقاله به منظور مشخص ساختن میزان اهمیت هر کدام از ۹ ویژگی تصاویر پلاریمتری، از معیار تفکیک‌پذیری فیشر استفاده شد، به طوری که ویژگی‌های مختلف براساس تفاوت میانگین بین کلاسی و مجموع واریانس داخل کلاسی رتبه‌بندی شدند. آنالیز نتایج موجود این نکته را بیان می‌کند که ویژگی‌های $|S_{HH}|^2$ ، $|S_{VV}|^2$ و $|S_{HV}|^2$ در مقایسه با دیگر ویژگی‌های موجود در فضای ویژگی، عوارض موجود در سطح تصویر را دقیق‌تر تشخیص می‌دهند و دقت کلی طبقه‌بندی ۹۰/۷۲ درصد و ضریب کاپای ۸۵/۹۹ درصد از این ترکیب سه‌گانه فضای ویژگی حاصل شد. به عبارت دیگر، اگرچه میانگین همبستگی این سه ویژگی ۰/۶۷ است، اما بالا بودن قدرت تفکیک‌پذیری این سه ویژگی، نقش مؤثری در تشخیص پراکنش‌های تصویر دارد. همچنین لازم به ذکر است که اضافه کردن دیگر ویژگی‌ها به این سه ترکیب اولیه، نتایج طبقه‌بندی را بهبود نمی‌بخشد. بنابراین می‌توان ویژگی‌های موجود در فضای ویژگی را به سه ویژگی کاهش داد، به طوری که در ضمن کاهش حجم ذخیره داده‌ها، اطلاعات مفید و مهم پراکنش‌های فضای تصویر را حفظ کرد. در نهایت می‌توان با اجرا کردن این

الگوریتم روی دیگر تصاویر پلاریمتری در فرکانس‌های متعدد و قدرت تفکیک‌های مکانی متعدد، نقش هر کدام از ویژگی‌ها در تفکیک کلاس‌ها مشخص می‌شود و می‌توان بهترین ترکیب را از ویژگی‌های موجود با بالاترین دقت طبقه‌بندی استخراج کرد.

۵- تقدیر و تشکر

در اینجا لازم می‌بینیم از زحمات استادان محترم گروه فتوگرامتری و سنجش از دور دانشکده نقشه‌برداری دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، که در راهنمایی‌های علمی این مقاله نگارندگان را یاری کرده‌اند نهایت تشکر و تقدیر را به عمل آوریم و از شرکت JPL سازمان فضایی امریکا (NASA)، که داده‌های پلاریمتری را در اختیار قرار داده‌اند، نیز سپاس‌گزاریم.

۶- منابع

Borghys, D., Yvinec, Y., Perneel, C., Pizurica, A. and Philips, W., 2006, **Supervised Feature-Based Classification of Multi-channel SAR Images**, Pattern Recognition Letters, Vol. 27, pp. 252-258.

- Cloude, S.R. and Pottier, E., 1996, **A Review of Target Decomposition Theorems in Radar Polarimetry**, IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 34, No. 2, pp. 498-518.
- Cloude, S.R. and Pottier, E., 1997, **An Entropy Based Classification Scheme for Land Applications of Polarimetric SAR**, IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 35, No. 1, pp. 1551-1565.
- Ferro-Famil, L., Pottier, E. and Lee, J.S., 2001, **Unsupervised Classification of Multifrequency and Fully Polarimetric SAR Images Based on The H/A/Alpha-Wishart Classifier**, IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 39, No. 11, pp. 2332-2342.
- Freeman, A. and Durden, S.L., 1998, **A Three-Component Scattering Model for Polarimetric SAR Data**, IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 3, No. 3, pp. 963-973.
- Lee, J.S., Grunes, M.R. and Kwok, R., 1994a, **Classification of Multi-look Polarimetric SAR Imagery Based on Complex Wishart Distribution**, International Journal of Remote Sensing, Vol. 15, No. 11, pp. 2299-2311.
- Lee, J.S., Hoppel, K.W., Mango, S.A. and Miller, A.R., 1994b, **Intensity and Phase Statistics of Multilook Polarimetric and Interferometric SAR Imagery**, IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 32, No. 5, pp. 1017-1028.
- Lee, J.S., Grunes, M.R., Anisworth, T.L., Du, L.J., Schuler, D.L. and Cloude, S.R., 1999, **Unsupervised Classification Using Polarimetric Decomposition and the Complex Wishart Classifier**, IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 37, No. 5, pp. 2249-2258.
- Lee, J.S., Grunes, M.R. and Pottier, E., 2001, **Quantitative Comparison of Classification Capability: Fully Polarimetric Versus Dual and Single-Polarization SAR**, IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 39, No. 11, pp. 2343-2351.
- Lee, J.S., Grunes, M.R., Pottier, E. and Ferro-Famil, L., 2004, **Unsupervised Terrain Classification Preserving Polarimetric Scattering Characteristics**, IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 42, No. 4, pp. 722-731.
- Nezry, E., Lopes, A., Ducrot-Gambart, D., Nezry, C. and Lee, J.S., 1996, **Supervised Classification of K-Distributed SAR Images of Natural Targets and Probability of Error Estimation**, IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 34, No. 5, pp. 1233-1242.
- Pierce, L.E., Ulaby, F.T., Sarabandi, K. and Dobson, M.C., 1994, **Knowledge-Based Classification of Polarimetric SAR Images**, IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 32, No. 5, pp. 1081-1086.
- Pottier, E. and Lee, J.S., 2000, **Unsupervised Classification scheme of POLSAR images based on the complex Wishart**

- distribution and the H/A/alpha—Polarimetric decomposition theorem**, in Proc. 3rd EUSAR 2000 Conf
- Rignot, E. and Chellappa, R., 1992, **Segmentation of Polarimetric Synthetic Aperture Radar Data**, IEEE Transaction on Image Processing, Vol. 1, No. 3, pp. 281-300.
- Rignot, E., Chellappa, R. and Dubois, P., 1992, **Unsupervised Segmentation of Polarimetric SAR Data Using the Covariance Matrix**, IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 30, No. 4, pp. 697-705.
- Small, D.L. 1991, **Information Content of Polarimetric Synthetic Aperture Radar Data**, M.Sc. Thesis, Univ. British Columbia, Canada.
- Theodoridis, S. and Koutroumbas, K., 2006, **Pattern Recognition**, 3rd edition. San Deigo, CA: Elsevier, p. 213-233.
- Touzi, R. and Charbonneau, F., 2002, **Characterization of Target Symmetric Scattering Using Polarimetric SARs**, IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 40, No. 11, pp. 2507-2516.
- Tzeng, Y.C. and Chen, K.S., 1998, **A Fuzzy Neural Network to SAR Image Classification**, IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 36, No. 1, pp. 301-307.
- Van Zyl, J.J., 1989, **Unsupervised Classification of Scattering Behavior Using Radar Polarimetry Data**, IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 27, No. 1, pp. 36-45.
- Yamaguchi, Y., Moriyama, T., Ishido, M. and Yamada, H., 2005, **Four-Component Scattering Model for Polarimetric SAR Image Decomposition**, IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 43, No. 8, pp.1699-1706.
- Yamaguchi, Y., Yajima, Y. and Yamada, H., 2006, **A Four-Component Decomposition of POLASAR Images Based on the coherency Matrix**, IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing Letters, Vol. 3, No. 3, pp. 292-296.
- Zebker, H.A. and Van Zyl, J.J., 1991, **Imaging Radar Polarimetry : A Review**, Proceeding of the IEEE, Vol. 79, No.11, pp. 1583-1603.
- Zhang, L., Zou, B., Cai, H. and Zhang, Y., 2008, **Multiple-Component Scattering Model for Polarimetric SAR Image Decomposition**, IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing Letters, Vol. 5, No. 4, pp. 603-607.