



سنجش از دور & GIS ایران



سنجش از دور و GIS ایران
Iranian Remote Sensing & GIS

سال پنجم، شماره یکم، بهار ۱۳۹۲
Vol.5, No.1, Spring 2013

۹۷-۱۱۲

ارزیابی و توسعه الگوریتم معاوضه پیکسلی به منظور تهیه نقشه پوشش اراضی در سطح زیرپیکسل با استفاده از تصاویر چندطیفی

میلاذ نیرومند جدیدی^۱، محمودرضا صاحبی^۲، مهدی مختارزاده^{۳*}

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

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۲/۴/۹

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۱/۳/۱۷

چکیده

تصاویر سنجش از دور معمولاً به صورت ترکیبی از پیکسل‌های خالص و مخلوط‌اند. در روش‌های طبقه‌بندی سخت، پیکسل‌های مخلوط به کلاس دارای بیشترین اطمینان تعلق نسبت داده می‌شوند. بدین ترتیب به علت تک‌برچسبی بودن نتایج طبقه‌بندی سخت، اطلاعات در سطح زیرپیکسل نادیده گرفته می‌شود. روش‌های طبقه‌بندی نرم که برای حل این مشکل شکل گرفته‌اند، برآورد سهم کلاس‌های مختلف را برای هر یک از پیکسل‌ها فراهم می‌آورند. البته این نوع طبقه‌بندی‌کننده‌ها هیچ‌گونه اطلاعاتی را در مورد آرایش مکانی کلاس‌های مختلف در داخل پیکسل‌ها ارائه نمی‌کنند. الگوریتم معاوضه پیکسلی با استفاده از نتایج طبقه‌بندی نرم و براساس بیشینه کردن وابستگی مکانی زیرپیکسل‌ها، امکان تهیه نقشه پوششی را در سطح زیرپیکسل فراهم می‌سازد. الگوریتم پایه این روش برای حالت باینری است. در تحقیق حاضر به منظور تولید نقشه پوششی، الگوریتم باینری معاوضه پیکسلی برای حالت چندمتغیری ایجاد گردیده و دقت این الگوریتم در دو حالت مستقل از خطای طبقه‌بندی نرم و وابسته به آن مورد ارزیابی قرار گرفته است. به علاوه، تأثیر پارامترهای مختلف - مانند ضریب بزرگنمایی، سطح همسایگی و تابع وزن - نیز در عملکرد این الگوریتم بررسی شده است. براساس نتایج تحقیق، دقت کلی الگوریتم معاوضه پیکسلی، بسیار وابسته به دقت ورودی الگوریتم (نتایج طبقه‌بندی نرم است. دستاورد دیگر تحقیق، این بود که مشخص گردید با افزایش ضریب بزرگنمایی، دقت الگوریتم کاهش می‌یابد. دیگر اینکه سطح همسایگی دوم و توابع معکوس فاصله و مجذور معکوس فاصله، بیشترین دقت را به همراه دارند. با در نظر گرفتن ضریب بزرگنمایی کمتر از ۵، دقت کلی الگوریتم در فرایند بهینه‌سازی آرایش مکانی زیر پیکسل‌ها بیشتر از ۹۰ درصد برآورد گردید.

کلیدواژه‌ها: پوشش اراضی، زیر پیکسل، الگوریتم معاوضه پیکسلی، سطح همسایگی، ضریب بزرگنمایی، تابع وزن.

* نویسنده مکاتبه‌کننده: تهران، خیابان ولی‌عصر، تقاطع میرداماد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، دانشکده مهندسی ژئودزی و ژئوماتیک، تلفن: ۸۸۸۸۸۴۴۵

۱- مقدمه

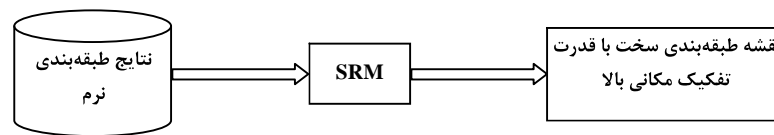
در تحقیقاتی که در زمینه افزایش دقت طبقه‌بندی انجام گرفته، در اغلب موارد به مشکلات مربوط به پیکسل‌های مخلوط توجه شده است (Smith et al., 1990; Fisher, 1997; Bardossy and Samaniego, 2002). پیکسل‌های مخلوط به دلیل بزرگ‌تر بودن اندازه‌شان نسبت به جزئیات زمینی، برای کاربردهای خاص به وجود می‌آیند؛ و زمانی که کلاس‌های کاربری (مانند انواع خاک و پوشش گیاهی) به طور پیوسته تغییر می‌یابند، این امر تشدید می‌شود. به عبارت دیگر در میدان دید لحظه‌ای^۱، هنگامی که سطح زمین مشاهده شده به وسیله سنجنده مشتمل بر چند نوع پوشش اراضی باشد - و نه یک نوع - آن‌گاه پیکسل در بردارنده بیش از یک کلاس است و به عنوان پیکسل مخلوط تعریف می‌گردد (Woodcock and Strahler, 1987; Fisher, 1997; Foody, 2006). پیکسل‌های مخلوط در تمامی سنجنده‌ها با قدرت تفکیک‌های مکانی مختلف وجود دارند (Tatem et al., 2002) و موجب توسعه روش‌های مختلف طبقه‌بندی نرم^۲ مانند مدل اختلاط طیفی خطی^۳ (Foody and Cox, 1994; Bezdek, 1996; Garcia-Haro et al., 1996) c-means فازی (Bezdek et al., 1984)، شبکه‌های عصبی^۴ (FFBP Paola and Schowengerdt, 1995; Atkinson et al., 1997) و الگوریتم نرم‌شده ماشین بردار پشتیبان (Brown et al., 1999) می‌شوند. خروجی طبقه‌بندی کننده‌های نرم به صورت چندبرچسبی است و هر پیکسل می‌تواند عضویت چندگانه به کلاس‌های مختلف داشته باشد. بدین ترتیب، با استفاده از روش‌های طبقه‌بندی نرم، نقشه‌های نسبتی^۵ تولید می‌شوند و سهم هر یک از کلاس‌ها در داخل پیکسل‌ها تعیین می‌گردد. با این حال، نتایج طبقه‌بندی نرم هیچ‌گونه اطلاعاتی را در مورد آرایش مکانی زیرپیکسل‌ها برای تولید نقشه در

سطح زیرپیکسل ارائه نمی‌کند (Villa et al., 2011; Atkinson, 2005).

روش‌های مختلفی برای تهیه نقشه در سطح زیر پیکسل ارائه گردیده است. در یک روش ساده می‌توان نتیجه طبقه‌بندی سخت را به حالت برداری تبدیل کرد؛ و با جنرالیزاسیون یا تعمیم این داده‌برداری، اطلاعات در سطح زیرپیکسل تولید می‌شود (Atkinson, 2004; Schneider, 1999, 1993). روشی را به منظور تهیه نقشه در سطح زیرپیکسل برای عوارض خطی براساس حرکت دادن یک پنجره ۳×۳ طراحی کردند. Flack و همکاران (۱۹۹۴) روشی را براساس تبدیل Hough برای استخراج عوارض خطی در زمین‌های کشاورزی ارائه کردند. با این حال Atkinson (۱۹۹۷) اولین فردی بود که تهیه نقشه پوششی در سطح زیرپیکسل را تنها براساس خروجی طبقه‌بندی نرم پیشنهاد کرد. بدین ترتیب، در سال‌های اخیر روش‌های تهیه نقشه در سطح زیرپیکسل براساس نتایج طبقه‌بندی نرم موسوم به تکنیک‌های SRM^۶ ارائه شده است. این تکنیک‌ها با کاهش عدم قطعیت مکانی در خروجی طبقه‌بندی نرم، نتایج طبقه‌بندی نرم، نتایج طبقه‌بندی نرم را به نقشه طبقه‌بندی سخت با قدرت تفکیک مکانی بهتر از تصویر اصلی تبدیل می‌کنند (Atkinson, 2009) (شکل ۱). در واقع می‌توان این روش‌ها را به عنوان مرحله بعد از طبقه‌بندی نرم در نظر گرفت که آرایش مکانی زیرپیکسل‌های متناسب با سهم کلاس‌ها در داخل هر پیکسل را فراهم می‌سازد (Tolpekin and Stein, 2009).

1. Instantaneous Field of View (IFOV)
2. Soft Classification
3. Linear Spectral Mixture Model
4. Feed-Forward Back-Propagation
5. Fractional Maps
6. Super Resolution Mapping

ارزیابی و توسعه الگوریتم معاوضه پیکسلی به منظور تهیه نقشه پوشش اراضی در سطح زیرپیکسل با استفاده از ...



شکل ۱. ورودی و خروجی روش‌های SRM

نقشه در سطح زیرپیکسل با استفاده از الگوریتم معاوضه پیکسلی تولید گردیده است. در بخش بعد، الگوریتم معاوضه پیکسلی و نحوه توسعه آن تشریح می‌گردد. در ادامه نحوه ارزیابی دقت و پارامترهای مؤثر بر عملکرد الگوریتم مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد. در بخش ۴، منطقه مورد مطالعه و داده‌های به کاررفته معرفی می‌شود و نتایج پیاده‌سازی الگوریتم ارائه می‌گردد. سرانجام در بخش ۵، دستاوردهای تحقیق مورد بحث و نتیجه‌گیری قرار می‌گیرد.

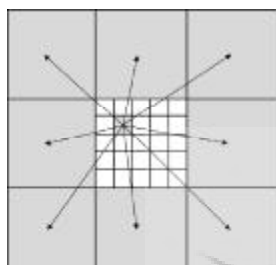
۲- توسعه الگوریتم معاوضه پیکسلی

در سال‌های اخیر، الگوریتم معاوضه پیکسلی مورد توجه قرار گرفته است (Atkinson, 2009). این الگوریتم برای حالت طبقه‌بندی دو کلاسی (Atkinson, 2004) طراحی و برای استخراج عوارض خاص شهری در سطح زیرپیکسل استفاده شده است (Thornton et al., 2006). در این الگوریتم، از بیشینه کردن وابستگی مکانی بین پیکسل‌های همسایه برای به دست آوردن آرایش مکانی زیرپیکسل‌ها استفاده می‌شود. براساس مفهوم وابستگی مکانی، پدیده‌های نزدیک به یکدیگر شباهت ماهیتی بیشتری به هم دارند (Matheron, 1965; Goovaerts, 1997). بنابراین، ایده اصلی برای جانمایی زیرپیکسل‌ها، بیشینه کردن وابستگی مکانی بین زیرپیکسل‌های همسایه با شرط حفظ سهم کلاس‌ها در سطح پیکسل است (Atkinson, 2004).

تا کنون روش‌های مختلفی از SRM مانند الگوریتم ژنتیک (Mertens et al., 2003)، شبکه عصبی Hopfield (HNN) (Tatem et al., 2002, 2003)، شبیه‌سازی تبرید^۱ و معاوضه پیکسلی^۲ (Atkinson, 2006; Thornton et al., 2005) ارائه شده است. الگوریتم‌های شبیه‌سازی تبرید و معاوضه پیکسلی به دلیل دارا بودن از محاسبات نسبتاً ساده، جزء روش‌های مورد توجه در سال‌های اخیر در حوزه SRM هستند (Atkinson, 2005; Thornton et al., 2006). این الگوریتم‌ها مبتنی بر اصول بهینه‌سازی مکانی‌اند^۳ و با بیشینه کردن وابستگی مکانی بین پیکسل‌ها، آرایش بهینه زیرپیکسل‌ها را فراهم می‌آورند (Kasetkasem et al., 2005; Atkinson, 2005). با توجه به جدید بودن این الگوریتم‌ها، ارزیابی دقیق و بررسی تأثیر پارامترهای مختلف در عملکرد آنها اهمیت زیادی دارد. در تحقیق حاضر با توجه به باینری بودن الگوریتم پایه معاوضه پیکسلی، این الگوریتم برای حالت چندکلاسی به منظور تولید نقشه پوششی ایجاد گردید و همچنین به دلیل بررسی نشدن جامع عملکرد و دقت این الگوریتم در تحقیقات گذشته، این موضوع به طور مفصل پوشش داده شده است. به پرهیز از خطای ورودی ناشی از طبقه‌بندی‌کننده‌های نرم در تخمین سهم کلاس‌ها، نقشه‌های نسبتی شبیه‌سازی شده به کار رفتند و دقت کلی الگوریتم جابه‌جایی پیکسلی به طور دقیق محاسبه شد. تأثیر پارامترهای مختلف مانند سطوح همسایگی و توابع وزن مختلف و ضریب بزرگنمایی^۵ نیز در عملکرد این الگوریتم مورد ارزیابی قرار گرفته است. همچنین به منظور بررسی تأثیر نتایج طبقه‌بندی‌کننده‌های نرم (به‌عنوان ورودی الگوریتم‌های SRM)، تصویر منطقه مورد مطالعه با استفاده از مدل اختلاط طیفی خطی، به صورت نرم طبقه‌بندی شده و

- 1 Hopfield Neural Network
- 2 Simulated Annealing
- 3 Pixel Swapping
- 4 Spatial Optimization
5. Zoom Factor

نسبت به پیکسل همسایه z_j و وزن به عنوان تابعی از فاصله بین زیرپیکسل مورد نظر و پیکسل همسایه، $d(x_j, y_j)$ در نظر گرفته می‌شود. به عنوان نمونه می‌توان این تابع را به صورت معکوس فاصله بین زیرپیکسل مورد نظر و پیکسل‌های همسایه در نظر گرفت (رابطه ۳). بدین ترتیب میزان جاذبه در یک زیرپیکسل، با سهم کلاس مورد نظر در پیکسل‌های همسایه رابطه مستقیم دارد و با فاصله دارای رابطه معکوس است.



شکل ۲. محاسبه جاذبه برای جایگاه‌های زیرپیکسلی

رابطه (۳)

$$W(x_j, y_j) = 1/d(x_j, y_j), \quad d(x_j, y_j) = \text{dist}[(u, v), (x_j, y_j)]$$

پس از جانمایی اولیه و محاسبه جاذبه زیرپیکسل‌ها، برچسب زیرپیکسل‌ها در داخل هر پیکسل به گونه‌ای تعویض می‌گردند که مجموع جاذبه‌های زیرپیکسل‌ها بیشینه گردد. این فرایند بهینه‌سازی آرایش مکانی زیرپیکسل‌ها را Atkinson (۲۰۰۵ و ۲۰۰۹) برای حالت دو کلاس (باینری) طراحی کرده است. در تحقیق حاضر، با بهره‌گیری از مفهوم ارائه شده و تکرار آن برای کلاس‌های مختلف، این الگوریتم برای حالت چندکلاسی به منظور تولید نقشه پوششی ایجاد گردیده است. در این الگوریتم به ازای هر یک از کلاس‌ها، روندی که در ادامه مذکور می‌گردد، بر روی تمام پیکسل‌های تصویر دنبال می‌شود.

1. Attractiveness

بدین منظور برای حفظ سهم کلاس‌ها در هر پیکسل، برچسب زیر پیکسل‌ها تنها در داخل همان پیکسل جابه‌جا می‌شوند. جابه‌جایی‌ها برای افزایش وابستگی مکانی بین زیرپیکسل‌ها انجام می‌گیرد. در تحقیق حاضر، این روش برای حالت چندکلاسی با اعمال الگوریتم باینری برای هر کلاس و تکرار این فرایند ایجاد گردیده است. در ادامه جزئیات عملکرد این الگوریتم تشریح می‌گردد.

سهم تعلق به دست‌آمده از طبقه‌بندی نرم برای کلاس شماره k در پیکسل با مختصات (x, y) به صورت $F_k(x, y)$ مفروض است. با تعیین ضریب بزرگنمایی (ZF) ، هر پیکسل به تعداد $ZF \times ZF$ زیر پیکسل تقسیم می‌گردد. بدین ترتیب تعداد زیرپیکسل‌های هر کلاس در پیکسل (x, y) ، $NSPK(x, y)$ با توجه به سهم تعلق به دست آمده از طبقه‌بندی نرم برای آن کلاس محاسبه می‌گردد (رابطه ۱). سپس زیرپیکسل‌های مربوط به هر پیکسل به طور تصادفی جانمایی اولیه می‌شوند.

رابطه (۱)

$$NSPK(x, y) = [F_k(x, y) \times ZF^2]$$

بعد از جانمایی اولیه زیرپیکسل‌ها، به منظور دستیابی به آرایش بهینه، وابستگی مکانی پیکسل‌ها به عنوان تابع هدف بیشینه‌سازی می‌گردد. بر این اساس، زیرپیکسل‌ها باید از نظر مکانی به پیکسل‌های مجاور با مشابهت ماهیتی بالا نزدیک باشند. بدین منظور برای هر زیرپیکسل، میزان جاذبه^۱ به عنوان تابعی از فاصله و سهم پیکسل‌های همسایه محاسبه می‌شود (رابطه ۲، شکل ۲).

رابطه (۲)

$$A_k(u, v) = \sum_{j=1}^n W(x_j, y_j) \times F_k(x_j, y_j)$$

در رابطه مذکور $A_k(u, v)$ میزان جاذبه زیرپیکسل با مختصات (u, v) نسبت به کلاس k است. $F_k(x_j, y_j)$ سهم کلاس k در پیکسل همسایه z_j است، و n تعداد پیکسل‌های همسایه است، و $W(x_j, y_j)$ نیز تابع وزن

ارزیابی و توسعه الگوریتم معاوضه پیکسلی به منظور تهیه نقشه پوشش اراضی در سطح زیرپیکسل با استفاده از ...

به دو روش کلی اقدام شده است. در روش نخست بدون تأثیر خطای طبقه‌بندی نرم، و در روش دوم در حضور این خطا، نحوه عملکرد و دقت‌های دست‌یافتنی از الگوریتم ارزیابی شده است. همچنین تأثیر پارامترهای مختلف اعم از ضریب بزرگنمایی، سطح همسایگی و نوع تابع فاصله نیز در دقت الگوریتم بررسی گردیده است.

۳-۱- ارزیابی الگوریتم بدون تأثیر خطای

طبقه‌بندی نرم

دقت نهایی الگوریتم‌های SRM تحت تأثیر دقت نتایج طبقه‌بندی نرم است. به منظور ارزیابی دقیق روش‌های SRM، ضروری است که دقت این الگوریتم‌ها صرفاً در فرایند جانمایی زیرپیکسل‌ها و مستقل از خطای داده ورودی محاسبه گردد. در تحقیق حاضر، به منظور ارزیابی دقت نقشه پوششی تولیدشده در سطح زیرپیکسل، نقشه‌های نسبتی شبیه‌سازی شده به کار رفته است. بدین منظور نخست تصویر چندطیفی مورد نظر با یک روش طبقه‌بندی سخت (مانند بیشترین شباهت)، برچسب‌گذاری شده و با در نظر گرفتن پنجره‌های متناسب با ضریب بزرگنمایی ($ZF \times ZF$) و شمارش تعداد پیکسل‌های مربوط به هر کلاس، نقشه‌های نسبتی تولید گردیده است. بدین ترتیب سهم کلاس‌ها در هر پیکسل وارد الگوریتم معاوضه پیکسلی می‌شود و با اعمال ضریب بزرگنمایی، نقشه در سطح زیرپیکسل تولید می‌گردد. در نهایت با تشکیل ماتریس ابهام و مرجع قرار دادن نقشه طبقه‌بندی سخت، دقت کلی نقشه SRM محاسبه گردیده است. شکل ۳ روند کار در این مرحله را نشان می‌دهد.

بدین ترتیب، ارزیابی الگوریتم معاوضه پیکسلی مستقل از خطای ورودی مربوط به عدم قطعیت‌های موجود در نتایج طبقه‌بندی نرم صورت گرفته است. با توجه به اینکه نقشه‌های نسبتی از روی تصویر واقعی شبیه‌سازی شده‌اند. تمام ویژگی‌ها از لحاظ تنوع و توزیع کلاس‌ها در سطح تصویر به طور واقعی در نظر گرفته شده‌اند.

فرض کنیم کلاس مورد نظر کلاس k ام و پیکسل مورد بررسی در موقعیت (x, y) واقع شده باشد. ابتدا جایگاه زیرپیکسلی با برچسب کلاس k ام که کمترین جاذبه نسبت به این کلاس را داشته باشد، تعیین می‌گردد. موقعیت این جایگاه زیرپیکسلی (u_1, v_1) است (رابطه ۴).

رابطه (۴)

$$(u_1, v_1) = \text{Arg min}_{u, v} \{A_k(u, v) \mid (u, v) \in k\}$$

در ادامه جایگاه‌های زیرپیکسلی دارای برچسبی غیر از کلاس مورد بررسی $(k' \neq k)$ برای یافتن بیشینه مقدار جاذبه نسبت به کلاس k ام جست‌وجو می‌گردد. موقعیت این جایگاه زیرپیکسلی (u_2, v_2) در نظر گرفته می‌شود (رابطه ۵).

رابطه (۵)

$$(u_2, v_2) = \text{Arg} \max \{A_k(u, v) \mid (u, v) \in k', k' \neq k\}$$

برای دو جایگاه زیرپیکسلی تعیین‌شده، جاذبه نسبت به کلاس k ام مقایسه می‌شود و اگر جاذبه جایگاه با مختصات (u_1, v_1) کمتر از جاذبه جایگاه با مختصات (u_2, v_2) باشد، برچسب کلاس‌ها برای این دو زیرپیکسل تعویض می‌گردند (رابطه ۶). در غیر این صورت هیچ تغییری صورت نمی‌پذیرد.

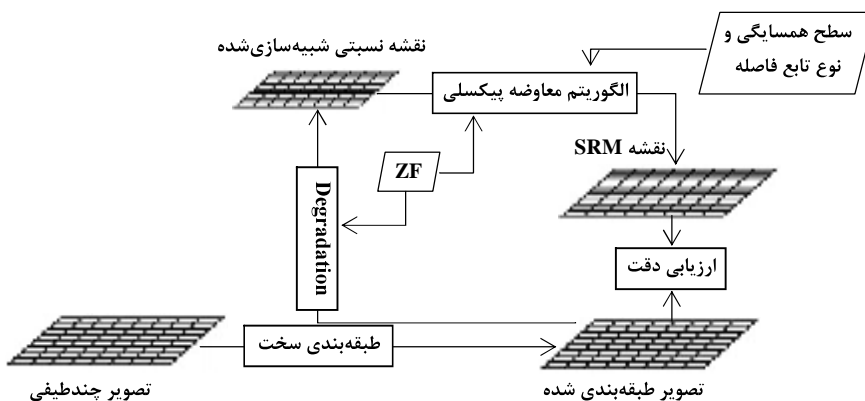
رابطه (۶)

$$\text{if } A_k(u_1, v_1) < A_k(u_2, v_2) \text{ then} \\ (u_1, v_1) \in k' \text{ and } (u_2, v_2) \in k$$

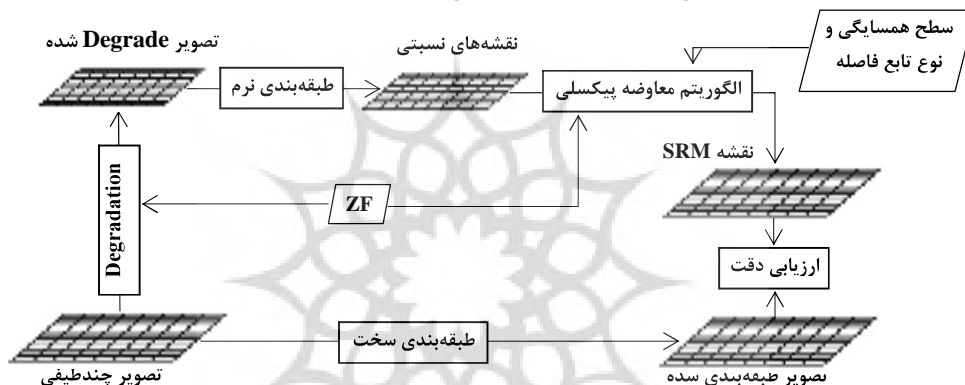
پس از تکمیل مراحل مذکور برای کلیه پیکسل‌های تصویری، روند ذکرشده در مورد سایر کلاس‌ها نیز تکرار می‌شود. برای توقف تکرار، تعداد مشخصی تکرار در نظر گرفته می‌شود و یا تا زمانی که الگوریتم بهینه‌سازی هیچ تغییری را در جایگاه‌های زیرپیکسلی ایجاد نکند ادامه یابد.

۳- روش تحقیق

به منظور بررسی الگوریتم معاوضه پیکسلی چندکلاسی،



شکل ۳. ارزیابی دقیق الگوریتم معاوضه پیکسلی بدون خطای مربوط به طبقه‌بندی نرم



شکل ۴. ارزیابی الگوریتم معاوضه پیکسلی با حضور خطای مربوط به طبقه‌بندی نرم

۲-۳- ارزیابی الگوریتم با حضور خطای طبقه‌بندی نرم

با توجه به اینکه برای ارزیابی دقت الگوریتم معاوضه پیکسلی در حضور خطای مربوط به طبقه‌بندی نرم به داده‌های مرجع در سطح زیرپیکسل نیاز است و این امر معمولاً میسر نیست، از تصویر (Down-Sample) Degradate شده در فرآیند SRM استفاده می‌شود و نقشه طبقه‌بندی سخت مربوط به تصویر اصلی به عنوان مرجع برای ارزیابی دقت به کار می‌رود (Atkinson, 2005). بدین ترتیب برای برآورد دقت الگوریتم معاوضه پیکسلی در حضور خطای مربوط به طبقه‌بندی نرم، با در نظر گرفتن پنجره‌های با ابعاد مشخص

$(ZF \times ZF)$ ، مقادیر طیفی پیکسل‌های واقع در هر پنجره میانگین‌گیری شده و تصویر با ابعاد کوچک‌تر تولید گردیده است. سپس با استفاده از مدل اختلاط طیفی خطی، سهم تعلق کلاس‌ها در هر پیکسل برآورد می‌شود و وارد الگوریتم معاوضه پیکسلی می‌گردد. ارزیابی دقت نقشه در سطح زیرپیکسل با مرجع قرار دادن نقشه طبقه‌بندی سخت مربوط به تصویر اصلی صورت گرفته است (شکل ۴).

۳-۳- ارزیابی پارامترهای مؤثر در عملکرد الگوریتم

در این تحقیق علاوه بر دقت کلی الگوریتم معاوضه

ارزیابی و توسعه الگوریتم معاوضه پیکسلی به منظور تهیه نقشه پوشش اراضی در سطح زیرپیکسل با استفاده از ...

- تابع وزن: برای محاسبه میزان جاذبه هر زیرپیکسل، تابع وزن براساس فاصله بین زیرپیکسل‌ها از پیکسل‌های همسایه تعیین می‌گردد. در این تحقیق، توابع وزن مختلفی مانند معکوس فاصله اقلیدسی (رابطه ۳)، معکوس مجذور فاصله (رابطه ۷) و تابع نمایی (رابطه ۸) به کار رفته‌اند و تأثیر آنها بر دقت کلی الگوریتم معاوضه پیکسلی ارزیابی شده است. در رابطه (۸)، a پارامتر غیرخطی مدل نمایی است.

رابطه (۷)

$$W(x_j, y_j) = 1/d(x_j, y_j)^2$$

رابطه (۸)

$$W(x_j, y_j) = \exp\left(\frac{-d(x_j, y_j)}{a}\right)$$

۴- پیاده‌سازی و نتایج

۴-۱- منطقه مورد مطالعه و داده‌های به‌کاررفته

در تحقیق حاضر از تصویر ماهواره‌ای ETM+ سال ۲۰۰۶ مربوط به حوضه آبریز سد ستارخان استفاده شده است. این منطقه از زیرحوضه‌های اهرچای است و در مختصات جغرافیایی «۴۶ درجه و ۴۰ دقیقه» تا «۴۶ درجه و ۵۸ دقیقه» طول شرقی و «۳۸ درجه و ۲۳ دقیقه» تا «۳۸ درجه و ۳۷ دقیقه» عرض شمالی واقع شده است (شکل ۶).

پیکسلی، پارامترهای مؤثر بر عملکرد این الگوریتم نیز مورد بحث و بررسی قرار گرفته است.

- ضریب بزرگنمایی: این پارامتر هم از عوامل مهم تأثیرگذار بر دقت الگوریتم معاوضه پیکسلی است. برای ارزیابی تأثیر این پارامتر، مقادیر مختلف ZF در فرایند الگوریتم معاوضه پیکسلی در نظر گرفته شده و دقت کلی الگوریتم بررسی گردیده است.
- سطح همسایگی: همان‌طور که اشاره شد، برای بهینه کردن آرایش مکانی زیر پیکسل‌ها باید میزان جاذبه هر زیرپیکسل نسبت به کلاس‌های مختلف براساس پیکسل‌های همسایه محاسبه گردد. بدین منظور می‌توان سطوح همسایگی مختلف را در نظر گرفت. به عنوان نمونه در سطح همسایگی اول ۴ پیکسل و در سطح همسایگی دوم ۸ پیکسل مجاور در نظر گرفته می‌شوند. در این تحقیق، تأثیر همسایگی تا سطح پنجم (شکل ۵) بر دقت کلی نقشه SRM مورد ارزیابی قرار گرفته است.

۵	۴	۳	۴	۵
۴	۲	۱	۲	۴
۳	۱		۱	۳
۴	۲	۱	۲	۴
۵	۴	۳	۴	۵

شکل ۵. سطوح همسایگی اول تا پنجم به منظور محاسبه جاذبه مکانی



شکل ۶. تصویر ETM+ (۲۰۰۶) منطقه مورد مطالعه واقع در حوضه آبریز سد ستارخان

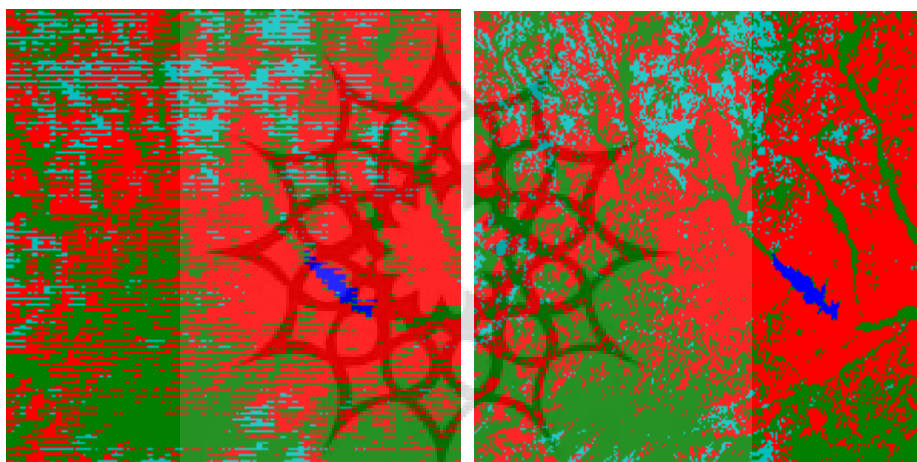
۲-۴- پیاده‌سازی الگوریتم بدون تأثیر خطای

طبقه‌بندی نرم

پوشش غالب در منطقه مطالعاتی را می‌توان در این چهار کلاس در نظر گرفت: باغ، مرتع، زمین بایر و آب. نخست به منظور ارزیابی دقت الگوریتم معاوضه پیکسلی مستقل از خطای طبقه‌بندی نرم، نقشه طبقه‌بندی سخت منطقه با استفاده از الگوریتم بیشترین شباهت و تصویر ETM+ (۲۰۰۶) با ابعاد ۹۰۰ × ۹۰۰ پیکسل تهیه گردید (شکل ۷-الف). سپس با در نظر گرفتن مقادیر مختلف برای ضریب بزرگنمایی،

سه‌م کلاس‌های مختلف شبیه‌سازی گردید و براساس آن زیرپیکسل‌ها به طور تصادفی جانمایی اولیه شده‌اند (شکل ۷-ب).

الگوریتم معاوضه پیکسلی با سطوح همسایگی و مقادیر ضریب بزرگنمایی مختلف با استفاده از تابع معکوس فاصله پیاده‌سازی شده و نقشه پوششی در سطح زیرپیکسل منطقه تولید گردیده است (شکل ۸). با تشکیل ماتریس ابهام، دقت کلی الگوریتم محاسبه شده است (جدول ۱).



شکل ۷. الف): نقشه طبقه‌بندی سخت؛ و ب): جانمایی اولیه زیرپیکسل‌ها ($Z=5$)



ج)

ب)

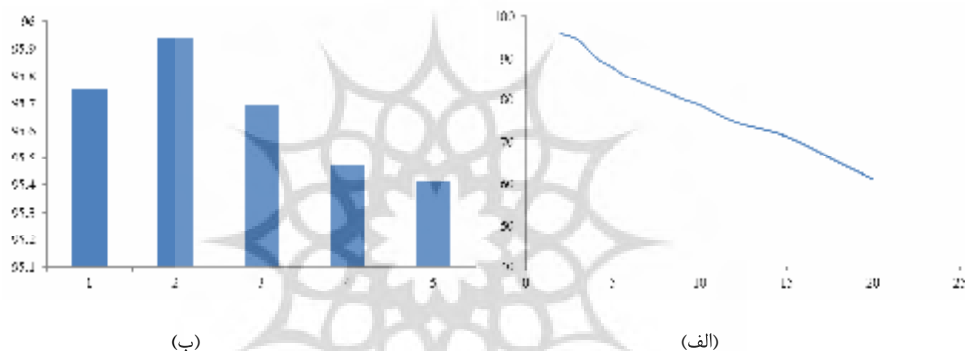
الف)

شکل ۸. الف): نقشه طبقه‌بندی سخت؛ ب): جانمایی اولیه زیرپیکسل‌ها؛ و ج): نقشه حاصل از الگوریتم معاوضه پیکسلی ($Z=5$) بدون حضور خطای طبقه‌بندی نرم

ارزیابی و توسعه الگوریتم معاوضه پیکسلی به منظور تهیه نقشه پوشش اراضی در سطح زیرپیکسل با استفاده از ...

جدول ۱. دقت کلی الگوریتم معاوضه پیکسلی (درصد) با سطوح همسایگی و مقادیر ضریب بزرگنمایی مختلف بدون حضور خطای طبقه‌بندی نرم

ضریب بزرگنمایی (Z)	سطوح همسایگی				
	۲۰	۱۸	۱۵	۱۲	۱۰
اول	۶۰/۹۲	۶۵/۰۱	۷۱/۱۲	۷۴/۶۹	۷۸/۷۶
دوم	۶۱/۰۲	۶۵/۰۵	۷۱/۲۴	۷۴/۷۳	۷۸/۷۹
سوم	۶۰/۷۵	۶۴/۷۴	۷۰/۹۹	۷۴/۴۴	۷۸/۵۶
چهارم	۶۰/۳۴	۶۴/۳۵	۷۰/۶۳	۷۴/۱۲	۷۸/۲۸
پنجم	۶۰/۱۲	۶۴/۲۶	۷۰/۴۸	۷۴/۰۲	۷۸/۲۲



شکل ۹. ارزیابی تأثیر (الف): ضریب بزرگنمایی؛ و (ب): سطح همسایگی در دقت کلی الگوریتم معاوضه پیکسلی

مختلف برای پارامتر غیرخطی مدل نمایی، مقدار $a=5$ به عنوان مقدار بهینه در ساختار این مدل استفاده شده است. با این حال، با بررسی جدول ۲ مشخص می‌گردد که توابع معکوس فاصله و مجذور معکوس فاصله دقت بیشتری از تابع نمایی دارند؛ و دلیل آن را می‌توان چنین تفسیر کرد که توابع معکوس فاصله و مجذور معکوس فاصله سازگاری بیشتری در مدل‌سازی میزان تأثیر همسایگی دارند، و در تابع نمایی به دلیل در نظر گرفته شدن وزن بیشتر (به صورت نمایی) و به گونه‌ای غیرواقعی‌تر در محاسبه فاصله همسایگی‌ها، با دقت کمتری همراه است.

براساس نتایج به‌دست‌آمده، با افزایش ضریب بزرگنمایی دقت کلی الگوریتم معاوضه پیکسلی کاهش می‌یابد (شکل ۹-الف). همچنین با در نظر گرفتن سطوح همسایگی مختلف، دقت الگوریتم در سطح همسایگی دوم به بیشترین مقدار می‌رسد (شکل ۹-ب). افزون بر اینها، توابع وزن مختلف اعم از معکوس فاصله، مجذور معکوس فاصله و تابع نمایی در نظر گرفته شده و دقت کلی الگوریتم معاوضه پیکسلی در سطوح همسایگی اول تا پنجم و با فرض $ZF=3$ محاسبه گردیده است (جدول ۲). به عنوان نمونه، ماتریس ابهام نقشه حاصل از الگوریتم براساس تابع نمایی و به ازای ضریب بزرگنمایی ۳ در سطح همسایگی سوم در جدول ۳ آمده است. لازم به ذکر است که با ارزیابی مقادیر

جدول ۲. دقت کلی الگوریتم معاوضه پیکسلی براساس توابع وزن مختلف (ZF=۳)

سطح همسایگی	تابع وزن	
	d^1	d^2
اول	۹۴/۲۷	۹۴/۰۶
دوم	۹۴/۴۵	۹۴/۳۷
سوم	۹۴/۱۷	۹۴/۲۴
چهارم	۹۳/۸۱	۹۴/۱۰
پنجم	۹۳/۷۱	۹۴/۰۹

جدول ۳. ماتریس ابهام برای ارزیابی دقت کلی الگوریتم معاوضه پیکسلی (سطح همسایگی سوم، ZF=۳ و تابع نمایی)

مجموع	آب	زمین بایر	مرتع	باغ	
۲۹۹۸۰۷	۱۰۲	۲۸۰۰	۱۶۳۲۶	۲۸۰۵۷۹	باغ
۴۳۴۲۱۸	۵	۶۰۴۶	۴۱۱۷۴۱	۱۶۴۲۶	مرتع
۷۱۷۳۲	۱	۶۲۸۸۵	۶۱۳۵	۲۷۱۱	زمین بایر
۴۲۴۳	۴۱۳۵	۱	۱۶	۹۱	آب
۸۱۰۰۰۰	۴۲۴۳	۷۱۷۳۲	۴۳۴۲۱۸	۲۹۹۸۰۷	مجموع

دقت کلی = ۹۳/۷۵ درصد

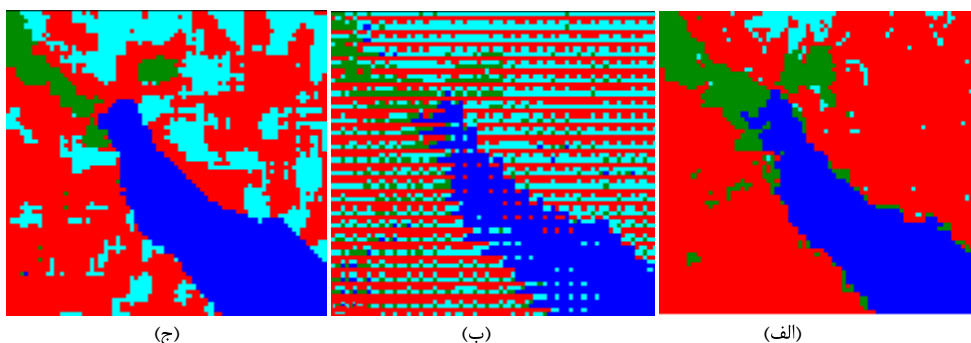
تصویر اصلی (شکل ۱۰-الف)، دقت الگوریتم در سطوح همسایگی مختلف برآورد گردیده است (جدول ۴). لازم به ذکر است که در این بررسی تابع معکوس فاصله به کار رفته، و پس از تولید نقشه در سطح زیرپیکسل از فیلتر اکثریت^۱ به منظور کاهش نویز ناشی از نتایج طبقه‌بندی نرم استفاده شده است. با توجه به جدول ۴، همان‌طور که انتظار می‌رفت، با وارد شدن خطای اولیه مربوط به طبقه‌بندی نرم، دقت الگوریتم معاوضه پیکسلی کاهش یافته است.

۳-۴- پیاده‌سازی الگوریتم با حضور خطای طبقه‌بندی نرم

همان‌گونه که در بخش ۳-۲ اشاره شد، به منظور بررسی تأثیر خطای مربوط به روش‌های طبقه‌بندی نرم در نتایج الگوریتم معاوضه پیکسلی، ابتدا تصویر منطقه مطالعاتی با در نظر گرفتن مقادیر مختلف ضریب بزرگنمایی، Degraded شده و با استفاده از مدل اختلاط طیفی خطی، سهم کلاس‌ها در سطح پیکسل برآورد گردیده است. در ادامه با جانمایی اولیه زیرپیکسل‌ها (شکل ۱۰-ب) و بهینه‌سازی آن به وسیله الگوریتم معاوضه پیکسلی (شکل ۱۰-ج)، نقشه در سطح زیرپیکسل منطقه مورد مطالعه تولید شده است. با مرجع قرار دادن نقشه طبقه‌بندی سخت مربوط به

1. Majority Filter

ارزیابی و توسعه الگوریتم معاوضه پیکسلی به منظور تهیه نقشه پوشش اراضی در سطح زیرپیکسل با استفاده از ...



شکل ۱۰. (الف): نقشه طبقه‌بندی سخت؛ (ب): جانمایی اولیه زیرپیکسل‌ها؛ و (ج): نقشه حاصل از الگوریتم معاوضه پیکسلی ($Z=5$) با حضور خطای طبقه‌بندی نرم

جدول ۴. دقت کلی الگوریتم معاوضه پیکسلی (درصد) با سطوح همسایگی و مقادیر ضریب بزرگنمایی مختلف با حضور خطای طبقه‌بندی نرم

سطح همسایگی	ضریب بزرگنمایی (Z)										
	۲۰	۱۸	۱۵	۱۲	۱۰	۹	۶	۵	۴	۳	۲
اول	۵۲/۶۹	۵۷/۲۱	۶۰/۸۵	۶۵/۷۵	۶۹/۶۷	۷۱/۴۱	۷۶/۳۴	۷۸/۸۹	۸۱/۱۲	۸۳/۳۴	۸۴/۶۷
دوم	۵۲/۸۲	۵۷/۴۷	۶۱/۰۸	۶۵/۸۶	۶۹/۸۵	۷۱/۷۴	۷۶/۵۲	۷۸/۹۲	۸۱/۳۴	۸۳/۵۱	۸۴/۸۹
سوم	۵۲/۴۹	۵۷/۰۶	۶۰/۸۱	۶۵/۱۲	۶۹/۴۷	۷۱/۱۳	۷۶/۰۷	۷۸/۷۱	۸۱/۰۶	۸۳/۱۲	۸۴/۵۳
چهارم	۵۲/۱۷	۵۶/۷۴	۶۰/۶۲	۶۴/۷۱	۶۹/۱۷	۷۱/۰۲	۷۵/۸۸	۷۸/۵۴	۸۰/۹۲	۸۳/۰۴	۸۴/۴۱
پنجم	۵۱/۷۹	۵۶/۳۶	۶۰/۲۸	۶۴/۳۶	۶۸/۶۵	۷۰/۷۸	۷۵/۶۷	۷۸/۱۷	۸۰/۸۱	۸۲/۹۳	۸۴/۳۷

۵- بحث و نتیجه‌گیری

تحقیق حاضر، با تکرار الگوریتم باینری معاوضه پیکسلی برای هر کلاس، این الگوریتم برای حالت چندمتغیری ایجاد و در تهیه نقشه پوششی پیاده‌سازی گردید. به منظور ارزیابی دقت کلی الگوریتم دو حالت مستقل از خطای طبقه‌بندی نرم و وابسته به آن در نظر گرفته شد. بدین منظور تولید نقشه‌های نسبتی شبیه‌سازی شده با استفاده از تصویر طبقه‌بندی سخت برای ارزیابی دقت الگوریتم معاوضه پیکسلی صرفاً در بهینه‌سازی جانمایی زیرپیکسل‌ها پیشنهاد گردید. همچنین برای در نظر گرفتن خطای مربوط به طبقه‌بندی نرم، با میانگین‌گیری طیفی از پیکسل‌های واقع در پنجره‌های تعریف شده با ابعاد $ZF \times ZF$ ، ابعاد تصویر اصلی کاهش یافت و در فرایندی معکوس و با استفاده از الگوریتم معاوضه پیکسلی، نقشه در سطح زیرپیکسل (هم‌بعد با

روش‌های SRM امکان تهیه نقشه در سطح زیرپیکسل را براساس نتایج طبقه‌بندی نرم فراهم می‌سازند. بدین منظور الگوریتم معاوضه پیکسلی از روش‌های بهینه‌سازی مکانی است که در آن زیرپیکسل‌ها به طور تصادفی جانمایی اولیه می‌شوند؛ و سپس آرایش مکانی زیرپیکسل‌ها به گونه‌ای تغییر می‌یابد که وابستگی مکانی بین پیکسل‌های همسایه بیشینه شود. بدین منظور جاذبه بین زیرپیکسل‌ها و پیکسل‌های همسایه براساس سهم کلاس‌ها در پیکسل‌های همسایه و یک تابع وزن محاسبه می‌گردد. تابع وزن براساس فاصله پیکسل‌ها محاسبه می‌گردد و برچسب دو جایگاه با بیشترین نیاز به معاوضه تعویض می‌شود و در فرایندی تکراری آرایش بهینه زیرپیکسل‌ها به‌دست می‌آید. در

سطح همسایگی پنجم، دقت الگوریتم معاوضه پیکسلی با استفاده از تابع مجذور معکوس فاصله نسبت به تابع نمایی $1/22$ درصد (۹۸۸۲ پیکسل معادل ۸۸۹ هکتار) بیشتر است.

در ارزیابی الگوریتم معاوضه پیکسلی بدون در نظر گرفتن خطای طبقه‌بندی نرم، دقت کلی برآورد شده به طور دقیق دقت الگوریتم را در بهینه‌سازی جانمایی زیرپیکسل‌ها و بدون هیچ‌گونه خطایی فراهم می‌سازد. اما با در نظر گرفتن تکنیک دوم برای ارزیابی الگوریتم علاوه بر خطای طبقه‌بندی نرم، خطای مربوط به نقشه طبقه‌بندی سخت که به عنوان مرجع مورد استفاده قرار گرفته نیز ارزیابی دقت را با عدم قطعیت مواجه می‌سازد. با این حال، استفاده از این روش برای ارزیابی نسبی عملکرد الگوریتم‌های SRM در شرایط تصویر واقعی معمولاً به دلیل در دسترس نبودن داده مرجع در سطح زیرپیکسل، پذیرفتنی است.

هدف عمده در این تحقیق توسعه و ارزیابی دقیق عملکرد الگوریتم معاوضه پیکسلی در فرایند بهینه‌سازی و همچنین بررسی پارامترهای مؤثر بر آن بوده است. با این حال به منظور بررسی تأثیرپذیری الگوریتم از نتایج طبقه‌بندی کننده‌های نرم، از مدل اختلاط طیفی خطی نیز برای تأمین ورودی الگوریتم استفاده شد. بدین منظور پیشنهاد می‌گردد دیگر روش‌های طبقه‌بندی نرم (مانند شبکه‌های عصبی) نیز بررسی گردد. همچنین در صورت وجود داده مرجع در سطح زیر پیکسل می‌توان برآورد دقیق‌تری از عملکرد الگوریتم در حضور خطای طبقه‌بندی نرم به عمل آورد. به طور کلی استفاده از روش‌های SRM، نقش مهمی در بارزسازی نتایج طبقه‌بندی نرم دارد و می‌توان اطلاعات دقیقی را در زمینه پراکندگی و مساحت کلاس‌های موجود در طبقه‌بندی از آن به دست آورد. در مجموع نیز گفتنی است توسعه الگوریتم‌های مختلف و ارزیابی آنها مستلزم تحقیقات بیشتر است.

تصویر اصلی) تولید گردید. این امر امکان ارزیابی الگوریتم را با مرجع قرار دادن نقشه طبقه‌بندی سخت مربوط به تصویر اصلی فراهم می‌سازد. با در نظر گرفتن این دو تکنیک ارزیابی، دقت کلی الگوریتم و همچنین تأثیر پارامترهایی مانند ضریب بزرگنمایی، سطح همسایگی و تابع وزن ارزیابی شد. براساس نتایج تحقیق، با افزایش ضریب بزرگنمایی عدم قطعیت در مورد آرایش مکانی زیرپیکسل‌ها رو به افزایش می‌نهد و دقت کلی الگوریتم کاهش می‌یابد. بدین ترتیب بیشترین دقت الگوریتم با فرض $Z=2$ و بدون در نظر گرفتن خطای طبقه‌بندی نرم در سطح همسایگی دوم معادل $95/94$ درصد برآورد گردید. با وارد کردن خطای طبقه‌بندی نرم این مقدار به $84/89$ کاهش یافته است. بدیهی است که ورودی الگوریتم معاوضه پیکسلی نقش اساسی در خروجی آن دارد و عدم قطعیت‌های مربوط به برآورد سهم کلاس‌ها با استفاده از روش‌های طبقه‌بندی نرم باید مورد توجه قرار گیرد و تا حد امکان کاهش یابد. در این تحقیق، از مدل اختلاط طیفی خطی به عنوان طبقه‌بندی نرم استفاده شد. تعیین دقیق تعداد و همچنین طیف اجزای خالص نقش اساسی در عملکرد این مدل دارد و می‌تواند موجب بروز عدم قطعیت عمده‌ای در نتایج مدل گردد، و فرض خطی بودن اختلاط طیفی نیز می‌تواند دقت مدل را کاهش دهد.

به دلیل قرار گرفتن سطوح همسایگی بالاتر از مرتبه دوم در لایه غیرمجاور به پیکسل مرکزی، شباهت کمتری بین پیکسل مرکزی و پیکسل‌های همسایه متصور است. بدین ترتیب با بررسی تأثیر سطوح همسایگی اول تا پنجم مشخص گردید که الگوریتم در سطح همسایگی دوم دارای بیشترین دقت است و وابستگی کمتری به سطوح همسایگی دوم به بعد دارد. همچنین با بررسی تأثیر تابع وزن مشخص گردید که با استفاده از توابع معکوس فاصله و مجذور معکوس فاصله نسبت به تابع نمایی دقت کلی بیشتری در الگوریتم معاوضه پیکسلی به دست می‌آید. به عنوان نمونه در

ارزیابی و توسعه الگوریتم معاوضه پیکسلی به منظور تهیه نقشه پوشش اراضی در سطح زیرپیکسل با استفاده از ...

۵- منابع

- Atkinson, P.M., 1997, **Mapping Sub-pixel Boundaries from Remotely Sensed Images**, In: Z. Kemp (Ed.), *Innovations in GIS 4*, 166-180.
- Atkinson, P.M., 2004, **Super-resolution Land Cover Classification Using the Two-point Histogram**, In: *GeENV IV: Geostatistics for Environmental Applications*, 15-28.
- Atkinson, P. M., 2009, **Issues of Uncertainty in Super-resolution Mapping and Their Implications for the Design of an Inter-comparison Study**, *International Journal of Remote Sensing*, 30, (20), 5293-5308.
- Atkinson, P.M., 2005, **Super-resolution Target Mapping from Soft Classified Remotely Sensed Imagery**, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 71, (7), 839-846.
- Atkinson, P.M., Cutler, M.E.J. and Lewis, H., 1997, **Mapping Sub-pixel Proportional Land Cover with AVHRR Imagery**, *International Journal of Remote Sensing*, 18, 917-935.
- Bardossy, A. and Samaniego, L., 2002, **Fuzzy Rule-based Classification of Remotely Sensed Imagery**, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40, 362-375.
- Bezdek, J.C., Ehrlich, R. and Full, W., 1984, **FCM: The Fuzzy C-means Clustering Algorithm**, *Computers and Geosciences* 10: 191-203.
- Brown, M., Gunn, S.R. and Lewis, H.G., 1999, **Support Vector Machines for Optimal Classification and Spectral Unmixing**, *Ecological Modeling*, 120: 167-179.
- Fisher, P., 1997, **The Pixel: A Snare and a Delusion**. *International Journal of Remote Sensing*, 18, 679-685.
- Flack, J., Gahegan, M. and West, G., 1994, **The Use of Sub-pixel Measures to Improve the Classification of Remotely Sensed Imagery of Agricultural Land**, *Proceedings of the 7th Australasian Remote Sensing Conference*, Melbourne, 531-541.
- Foody, G., 2006, **Sub-Pixel Methods in Remote Sensing**. In: Jong, S. M. d. and Meer, F. D. v. d. (Eds.), *Remote Sensing Image Analysis*. Springer.
- Foody, G.M. and Cox, D.P., 1994, **Sub-pixel Land Cover Composition Estimation Using a Linear Mixture Model and Fuzzy Membership Functions**, *International Journal of Remote Sensing* 15: 619-631.
- Garcia-Haro, F.J., Gilabert, M.A. and Meliá, J., 1996, **Linear Spectral Mixture Modelling to Estimate Vegetation Amount from Optical Spectral Data**, *International Journal of Remote Sensing* 17: 3373-3400.
- Goovaerts, P. 1997, **Geostatistics for Natural Resources Evaluation**, Oxford University Press: New York.
- Kasetkasem, T., Arora, M. K., & Varshney, P. K., 2005, **Super-Resolution Land Cover Mapping Using a Markov Random Field**

- Based Approach, Remote Sensing of Environment.** Remote Sensing of Environment, 96(3-4), 302-314.
- Matheron, G., 1965, **Les Variables Régionalisées et Leur Estimation**, Masson: Paris.
- Mertens, KC., Verbeke, LPC., Ducheyne, EI. and De Wulf., RR., 2003, **Using Genetic Algorithms in Sub-pixel Mapping**, International Journal of Remote Sensing, 24: 4241-4247
- Paola, J.D. and Schowengerdt, R.D., 1995, **Review Article: A Review and Analysis of Back Propagation Neural Networks for Classification of Remotely Sensed Multispectral Imagery**, International Journal of Remote Sensing 16: 3033-3058.
- Schneider, W., 1993, **Land Use Mapping with Subpixel Accuracy from Landsat TM Image Data**, Proceedings of the 25th International Symposium on Remote Sensing and Global Environmental Change, 155-161.
- Schneider, W., 1999, **Land Cover Mapping from Optical Satellite Images Employing Subpixel Segmentation and Radiometric Calibration**, in I. Kanellopoulos, G. Wilkinson and T. Moons, Machine Vision and Advanced Image Processing in Remote Sensing. Springer: London.
- Smith, M.O., Ustin, S.L., Adams, J.B. and Gillespie, A.R., 1990, **Vegetation in Deserts: I. A Regional Measure of Abundance from Multispectral Images**, Remote Sensing of Environment, 31, 1-26.
- Steinwendner, J., Schneider, W. and Suppan, F., 1998, **Vector Segmentation Using Spatial Subpixel Analysis for Object Extraction**, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, vol.32, 265-271.
- Tatem A. J, Lewis, H. G. Atkinson, P. M., and Nixon, M. S., 2003, **Super Resolution Land Cover Mapping from Remotely Sensed Imagery Using a Hopfield Neural Network**, in Uncertainty in Remote Sensing and GIS. Hoboken, NJ: Wiley, 77-98
- Tatem, A. J., Lewis, H. G., Atkinson, P. M., and Nixon, M. S., 2002, **Super-resolution Land Cover Mapping from Remotely Sensed Imagery using a Hopfield Neural Network**, In: Foody, G.M., and Atkinson, P.M., eds. Uncertainty in Remote Sensing and GIS. England: John Wiley & Sons Ltd.
- Thornton, MW., Atkinson PM., and Holland, DA., 2006, **Super-resolution Mapping of Rural Land Cover Features from Fine Spatial Resolution Satellite Sensor Imagery**, International Journal of Remote Sensing, 27: 473-491
- Tolpekin, V.A., and Stein, A., 2009, **Quantification of the Effects of Land - Cover - Class Spectral Separability on the Accuracy of Markov - Random - Field - Based Superresolution Mapping**, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 47(9).
- Villa, A., Chanussot, J., Benediktsson, J.A., and

ارزیابی و توسعه الگوریتم معاوضه پیکسلی به منظور تهیه نقشه پوشش اراضی در سطح زیرپیکسل با استفاده از ...

Jutten, Ch., 2011, **Spectral Unmixing for the Classification of Hyperspectral Images at a Finer Spatial Resolution**, IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, Vol. 5, No. 3, 521-533.

Woodcock. C.E., and Strahler. A.H., 1987, **The Factor of Scale in Remote Sensing. Remote Sensing of Environment**, 21, 311-332.

