

استخراج پیکسل‌های خالص با استفاده از فضای ویژگی مبتنی بر پارامترهای فیزیکی به منظور برآورد پوشش اراضی در سطح زیرپیکسل

مجتبی جنتی^{۱*}، میلاد نیرومند جدیدی^۲، محمدجواد ولدان‌زوج^۳، علی محمدزاده^۴

- ۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی سنجش از دور، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران
- ۲- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی سنجش از دور، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران
- ۳- دانشیار گروه مهندسی سنجش از دور، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران
- ۴- استادیار گروه مهندسی سنجش از دور، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

پذیرش: ۹۱/۲/۲۳

دریافت: ۹۰/۱۲/۱۵

چکیده

تخمین دقیق سطح پوشش اراضی نقش بسیار مهمی در برنامه‌ریزی و مدیریت بهینه محیط جغرافیایی ایفا می‌کند. روش‌های مختلف طبقه‌بندی تصاویر سنجش از دور به منظور استخراج پوشش اراضی توسعه یافته‌اند. به دلیل ضعف روش‌های طبقه‌بندی سخت در پیکسل‌های مخلوط، استفاده از روش‌های طبقه‌بندی نرم به منظور برآورد سهم تعلق کلاس‌های مختلف پوشش اراضی در پیکسل‌های مخلوط مورد توجه قرار گرفته است. مدل اختلاط طیفی خطی یکی از روش‌های رایج در این حوزه است. دقت این مدل به شدت به کیفیت پیکسل‌های خالص معرفی شده به آن وابسته است و از سوی دیگر، استخراج این پیکسل‌ها معمولاً دشوار و چالش‌برانگیز است. در تحقیق حاضر، استفاده از پارامترهای فیزیکی (درخشندگی، رطوبت و سبزی‌نگی) برای استخراج پیکسل‌های خالص پیشنهاد شده است. برای ارزیابی کیفیت پیکسل‌های خالص استخراج شده از این روش، از معیارهای ارزیابی مدل اختلاط طیفی غیرشرطی استفاده شده است. بدین منظور، با پیاده‌سازی این مدل در منطقه مطالعاتی، RMSE کل تصویر ۲/۶۸ و تعداد پیکسل‌های با سهم تعلق منفی یا بزرگ‌تر از یک، ۴/۴۳ درصد برآورد شد. به



این ترتیب، روش پیشنهادی دقت مطلوبی را در نتایج مدل اختلاط طیفی خطی و بدون اعمال هیچ شرطی در این مدل فراهم کرده است.

واژه‌های کلیدی: پوشش اراضی، مدل اختلاط طیفی، پیکسل خالص، پارامتر فیزیکی.

۱- مقدمه

با توجه به اهمیت اطلاعات دقیق درباره پوشش اراضی به منظور مدیریت، بررسی تغییرات و پیش‌بینی پدیده‌های جغرافیایی (Tatem Et al., 2002)، طبقه‌بندی تصاویر نخستین مرحله از فرایند سنجش از دور است که در بحث عدم قطعیت مورد ارزیابی قرار گرفته است (Woodcock, 2002). در این میان، پیکسل‌های مخلوط به‌عنوان یکی از مهم‌ترین منابع عدم قطعیت در استخراج پوشش اراضی شناخته شده است (Zhu, 2005; Foody, 2006). در روش‌های طبقه‌بندی سخت^۱ مانند الگوریتم بیشترین شباهت، هر پیکسل متناظر با تنها یک نوع کلاس کاربری در نظر گرفته می‌شود (Tatem Et al., 2002). با توجه به نادیده گرفتن اختلاط طیفی کلاس‌های کاربری در سطح زیرپیکسل، استفاده از طبقه‌بندی‌کننده‌های سخت مستعداً عدم قطعیت‌های بسیار بالا درباره ماهیت پیکسل‌هاست. به این ترتیب، روش‌های طبقه‌بندی نرم^۲ مانند مدل اختلاط طیفی خطی^۳ (LSMM) (Foody & Cox, 1994)، C-Means فازی (Bezdek Et al., 1984; Foody, 1996)، ماشین بردار پشتیبان^۴ (Liu Et al., 1999)، شبکه‌های عصبی و روش‌های آموزش چندبرچسبی^۵ (Brown Et al., 2009) توسعه یافته است. در این میان، الگوریتم LSMM به‌عنوان یکی از مهم‌ترین پرکاربردترین روش‌ها برای به‌دست آوردن اطلاعات در سطح زیرپیکسل شناخته شده است (غفوری، ۱۳۸۵؛ Brown Et al., 2000; Foody, 2006). عملکرد بهینه الگوریتم LSMM مستلزم معرفی پیکسل‌های خالص با دقت مناسب است. بنابراین، روش‌های مختلفی برای استخراج پیکسل‌های خالص معرفی شده است. در تحقیق حاضر از فضای ویژگی مبتنی بر پارامترهای فیزیکی حاصل از تبدیل Tasseled Cap برای استخراج عناصر خالص استفاده

1. Hard Classification
2. Soft Classification
3. Linear Spectral Mixture Model
4. Support Vector Machine
5. Multilabel Learning Algorithms

شده است. برای ارزیابی دقت روش پیشنهادی، پیکسل‌های استخراج‌شده به‌عنوان ورودی الگوریتم LSMM غیرشرطی در نظر گرفته شده و خطای RMS و تعداد پیکسل‌های با سهم تعلق خارج از بازه [۰-۱] محاسبه شده است.

نخست منطقه مورد مطالعه و داده‌های مورد استفاده در تحقیق و سپس انواع پیکسل‌های مخلوط و مشکلات آن‌ها معرفی می‌شود. در ادامه، مدل اختلاط طیفی خطی، نقش پیکسل‌های خالص و نحوه ارزیابی عملکرد این مدل مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد. نحوه استخراج پارامترهای فیزیکی براساس تبدیل Tasseled Cap و روش پیشنهادی جهت استخراج عناصر خالص مبتنی بر این پارامترها تشریح می‌شود. سرانجام، نتایج پیاده‌سازی، بحث و نتیجه‌گیری بیان می‌شود.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه بخشی از حوضه آبریز سد ستارخان در استان آذربایجان شرقی است. این منطقه در مختصات جغرافیایی «۴۶ درجه و ۵۰ دقیقه» تا «۴۶ درجه و ۵۷ دقیقه» طول شرقی و «۳۸ درجه و ۲۶ دقیقه» تا «۳۸ درجه و ۳۱ دقیقه» عرض شمالی واقع شده است. از تصویر ETM+ سال ۲۰۰۱ برای پیاده‌سازی استفاده شده است.



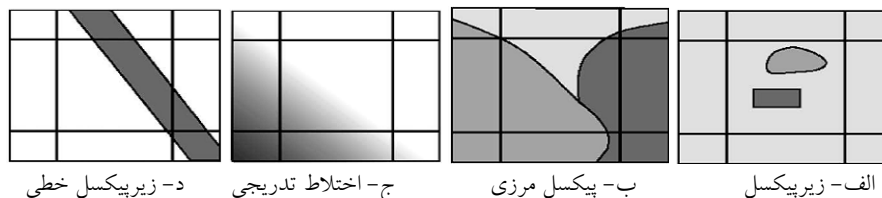
شکل ۱ منطقه مورد مطالعه و تصویر ETM+ سال ۲۰۰۱



۲-۲- پیکسل‌های مخلوط

یک فرض اساسی در سنجش از دور این است که هر پیکسل در تصویر نشان‌دهنده سطحی از زمین است که فقط شامل یک نوع کلاس است؛ اما درباره پیکسل‌های مخلوط که شامل بیش از یک نوع کلاس کاربری‌اند، این فرض صادق نیست (دستوربان، ۱۳۸۱؛ Fisher, 1997; Cracknell, 1998).

پیکسل‌های مخلوط به دلیل مناسب نبودن اندازه پیکسل‌ها جهت اخذ جزئیات زمینی برای کاربردهای خاص بوجود می‌آیند. به عبارت دیگر، زمانی که میدان دید لحظه‌ای^۱ یعنی سطحی از زمین که توسط سنجنده مشاهده می‌شود (یاخته تفکیک^۲)، شامل بیش از یک نوع پوشش اراضی باشد؛ در این صورت پیکسل حاوی بیش از یک کلاس بوده و پیکسل مخلوط شناخته می‌شود (Fisher, 1997; Foody, 2006). مشکل وجود پیکسل‌های مخلوط در تمام سنجنده‌ها با قدرت تفکیک‌های مکانی مختلف وجود دارد (Tatem Et al., 2002). اولین مطالعه در زمینه پیکسل‌های مخلوط را هارویتز^۳ و همکاران (1971) انجام دادند. به‌طور کلی، چهار نوع پیکسل مخلوط مطابق شکل شماره دو دسته‌بندی شده است (Foody, 2006; Fisher, 1997).



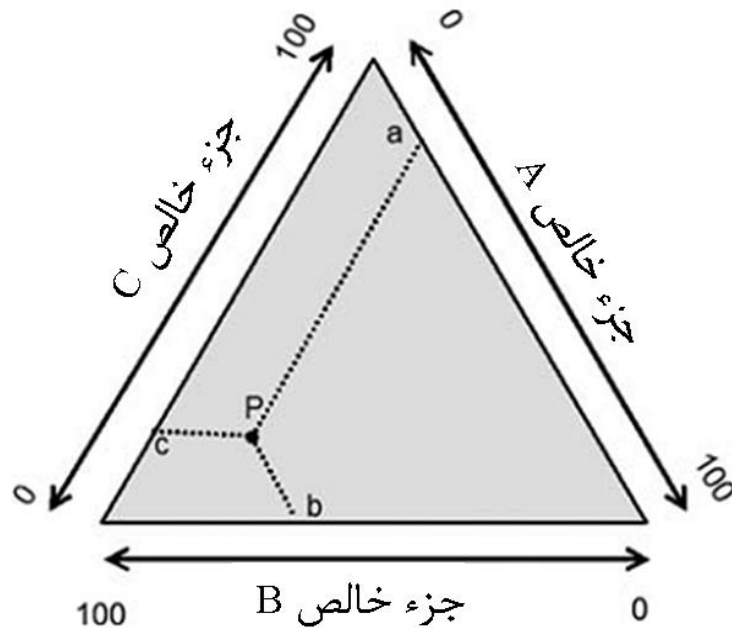
شکل ۲ انواع پیکسل‌های مخلوط

بدون حل مشکل پیکسل‌های مخلوط، تمام پتانسیل سنجش از دور برای استخراج اطلاعات پوشش اراضی قابل بهره‌برداری نخواهد بود (Foody, 2006; Atkinson et al., 1997). به این ترتیب، روش‌های طبقه‌بندی نرم برای تعیین سهم کلاس‌های مختلف در سطح زیرپیکسل توسعه یافته است. LSMM یک روش متداول در این زمینه به‌شمار می‌آید.

1. Instantaneous Field of View (IFOV)
2. resolution cell
3. Horowitz

۲-۳- مدل اختلاط طیفی خطی (LSMM)

تجزیه اختلاط طیفی^۱ فرایندی است که هر پیکسل را به تعدادی کلاس تفکیک می‌کند و یک روش متداول برای حل مشکل پیکسل‌های مخلوط به‌شمار می‌آید (Cross Et l., 1991; Drake & White, 1991; Lucas Et al., 2002). اختلاط طیفی خطی بر این فرض استوار است که طیف دریافتی از عوارض مختلف داخل پیکسل به‌صورت خطی ترکیب می‌شوند (Settle & Drake, 1993; Zhu, 2005). هدف تجزیه اختلاط طیفی خطی، محاسبه آماری سهم کلاس‌های مختلف در یک پیکسل براساس منحنی بازتاب طیفی پیکسل و اجزای تشکیل‌دهنده آن است (شکل ۳، رابطه ۱).



شکل ۳ اجزای خالص (A، B و C) و اختلاط طیفی خطی

$$x_k = Ef + e$$

رابطه ۱

1. spectral unmixing



در رابطه بالا، E ماتریس مربوط به طیف عناصر خالص است؛ f برداری است که سهم هریک از کلاس‌ها را در سطح زیرپیکسل تعیین می‌کند و براساس آن نقشه‌های نسبتی^۱ (به‌ازای هر کلاس یک نقشه) تولید می‌شود؛ e نیز خطای باقی‌مانده را نشان می‌دهد.

۲-۳-۱- انتخاب پیکسل‌های خالص

تعیین اجزای خالص معمولاً دشوار بوده (Williamson, 1994; Atkinson et al., 1997; Wu and Murray, 2003) و مهم‌ترین بخش فرایند LSMM است. برای انتخاب اجزای خالص دو روش مهم در نظر گرفته می‌شود: الف- انتخاب اجزای خالص از کتابخانه طیفی (معلوم^۲)؛ ب- انتخاب اجزای خالص از پیکسل‌های خالص تصویر (اشتقاقی^۳).

اگر منطق Z مورد نظر از تغییرات به‌هم‌پیوسته اجزای خالص تشکیل شده باشد، یافتن پیکسل‌های خالص در این منطقه غیرمنطقی به‌نظر می‌رسد. بنابراین، در برخی تحقیقات از طیف آزمایشگاهی برای توصیف اجزای خالص استفاده شده است. این نوع طیف‌ها اجزای خالص مرجع^۴ یا معلوم نامیده می‌شوند (Adams Et al., 1993). با توجه به اینکه طیف‌های آزمایشگاهی در واحد رادیانس ثبت می‌شوند، داده‌های تصویری باید کالیبره شده، تصحیح اتمسفری بر روی آن‌ها انجام شود (Mather, 2004). به این ترتیب، در بیشتر موارد از پیکسل‌های خالص اشتقاقی استفاده می‌شود. تعیین دقیق این پیکسل‌ها از اهمیت بسزایی در کارایی الگوریتم LSMM برخوردار است. در ادامه، با رویکرد بررسی نقش پیکسل‌های خالص در نتایج الگوریتم LSMM، روش‌های ارزیابی این الگوریتم را مورد واکاوی قرار می‌دهیم.

۲-۳-۲- ارزیابی عملکرد الگوریتم LSMM

برای حل معادله مدل اختلاط طیفی خطی روش‌های مختلفی وجود دارد. در برخی روش‌ها، دو شرط مثبت بودن سهم کلاس‌ها و واحد بودن مجموع آن‌ها لحاظ می‌شود که روش‌های

1. fractional maps
2. known and members
3. derived and members
4. reference and members

شرطی نامیده می‌شوند. در این روش‌ها به‌منظور تأمین این شروط، مقادیر محاسبه‌شده برای سهم کلاس‌ها تغییر می‌یابند که مستعد ایجاد عدم قطعیت هستند. در یک روش که غیرشرطی^۱ نامیده می‌شود، معادله یادشده بدون در نظر گرفتن هیچ شرطی حل می‌شود. به این ترتیب، ممکن است مقادیر f_i در خارج از بازه [۰-۱] قرار گیرند. مزیت روش غیرشرطی این است که می‌توان عملکرد مدل اختلاط خطی را در توصیف داده‌های مورد نظر تخمین زد. شاخص‌های زیر برای ارزیابی میزان انطباق مدل استفاده می‌شوند:

• مقدار باقی‌مانده (e_i) در معادله اختلاط: در هر باند طیفی یک مقدار باقی‌مانده وجود دارد که اختلاف بین مقدار پیکسل مشاهداتی و مقدار محاسبه‌شده از LSMM را نشان می‌دهد. خطای RMS کل مربوط به هر پیکسل مطابق رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{b=1}^m e_b^2}{m}} \quad \text{رابطه ۲}$$

خطای RMS برای تمام پیکسل‌های تصویر محاسبه شده است و در مقیاس ۰-۲۵۵ در نظر گرفته می‌شود تا تصویر خطای RMS تولید شود. هرچه این خطا بزرگ‌تر باشد، انطباق مدل کمتر است. با توجه به فرض تصادفی بودن باقی‌مانده‌ها، هرگونه الگوی مکانی در تصویر RMS بیانگر این است که عناصر خالص احتمالی دیگری در مدل لحاظ نشده یا عناصر خالص انتخاب‌شده مناسب نیستند. همچنین، ممکن است رابطه خطی $Ef = x$ برای توصیف ارتباط بین طیف پیکسل و طیف عناصر خالص مناسب نبوده است (Mather, 2004; Richards & Jia, 2006).

• تعداد پیکسل‌هایی که مقادیر f_i در خارج از بازه منطقی [۰-۱] قرار می‌گیرند: اگر تعداد پیکسل‌های با مقادیر f_i منفی^۲ و بزرگ‌تر از یک^۳ بیشتر از ۵ درصد باشد، مدل انطباق خوبی ندارد (Mather, 2004). برای حل غیرشرطی الگوریتم LSMM، معکوس ماتریس E باید

1. Unconstrained
2. under-shoots
3. over-shoots



محاسبه شود. اگر ستون‌های ماتریس E (بازتاب اجزای خالص) دارای وابستگی زیادی باشند، خطای زیادی وارد محاسبات می‌شود و ماتریس E متمایل به منفرد^۱ نامیده می‌شود (Sohn & McCoy, 1997). اگر یک ستون از ماتریس E از مقادیر سایر ستون‌ها قابل محاسبه باشد، در این حالت E منفرد بوده و معکوس آن و در نتیجه معادلات کمترین مربعات قابل محاسبه نخواهند بود. همچنین، در حالت متمایل به منفرد بودن ماتریس E ، به‌ویژه در تصاویر چندطیفی (درمقابل تصاویر فراطیفی) با توجه به کم بودن تعداد مشاهدات، خطای زیادی در جواب معادلات (f) به‌وجود می‌آید (Mather, 2004).

بنابراین، در صورت استفاده از مدل اختلاط غیرشرطی لازم است تعداد پیکسل‌های خارج از محدوده و همچنین خطای RMS کل به‌منظور فراهم آوردن امکان ارزیابی میزان انطباق مدل ارائه شود. همان‌طور که اشاره شد، معرفی پیکسل‌های خالص نقش اساسی را در میزان انطباق مدل ایفا می‌کند. به این ترتیب، در این تحقیق برای ارزیابی پیکسل‌های خالص استخراج‌شده از این دو معیار استفاده خواهد شد. در ادامه، تبدیل Tasseled Cap و روش پیشنهادی مبتنی‌بر این تبدیل برای استخراج پیکسل‌های خالص آمده است.

۲-۴- تبدیل Tasseled Cap

تبدیل Tasseled Cap یک فضای ویژگی جدید مبتنی‌بر پارامترهای فیزیکی را ارائه می‌کند. این تبدیل نخست برای سنجنده Landsat MSS (Kauth & Thomas, 1976) و سپس برای داده‌های با ابعاد بیشتر مانند Landsat TM و ETM+ توسعه داده شد (Crist & Cicone, 1984). در این مدل، باند حرارتی فروسرخ Landsat در نظر گرفته نشده و براساس آن، شش ویژگی جدید تولید می‌شود که درخشندگی^۲، سبزیگی^۳ و رطوبت^۴ مهم‌ترین آن‌ها هستند. پارامتر درخشندگی از طریق محاسبه میانگین وزن‌دار شش باند TM به‌دست می‌آید. پارامتر سبزیگی به‌عنوان کنتراست بین باندهای مرئی و فروسرخ نزدیک با تأثیرپذیری اندک از باندهای ۵ و ۷ تعریف شده است. پارامتر رطوبت به‌عنوان

1. near-singular
2. brightness
3. greenness
4. wetness

کنتراست بین باندهای فرورسرخ میانه (۵ و ۷) و باندهای قرمز/ فرورسرخ نزدیک (۳ و ۴) تعیین شده است. صفحه تعریف شده توسط پارامترهای سبزی‌نگی و درخشندگی، صفحه پوشش گیاهی و صفحه متشکل از پارامترهای درخشندگی و رطوبت صفحه خاک نامیده می‌شود (Crist & Cicone, 1984).

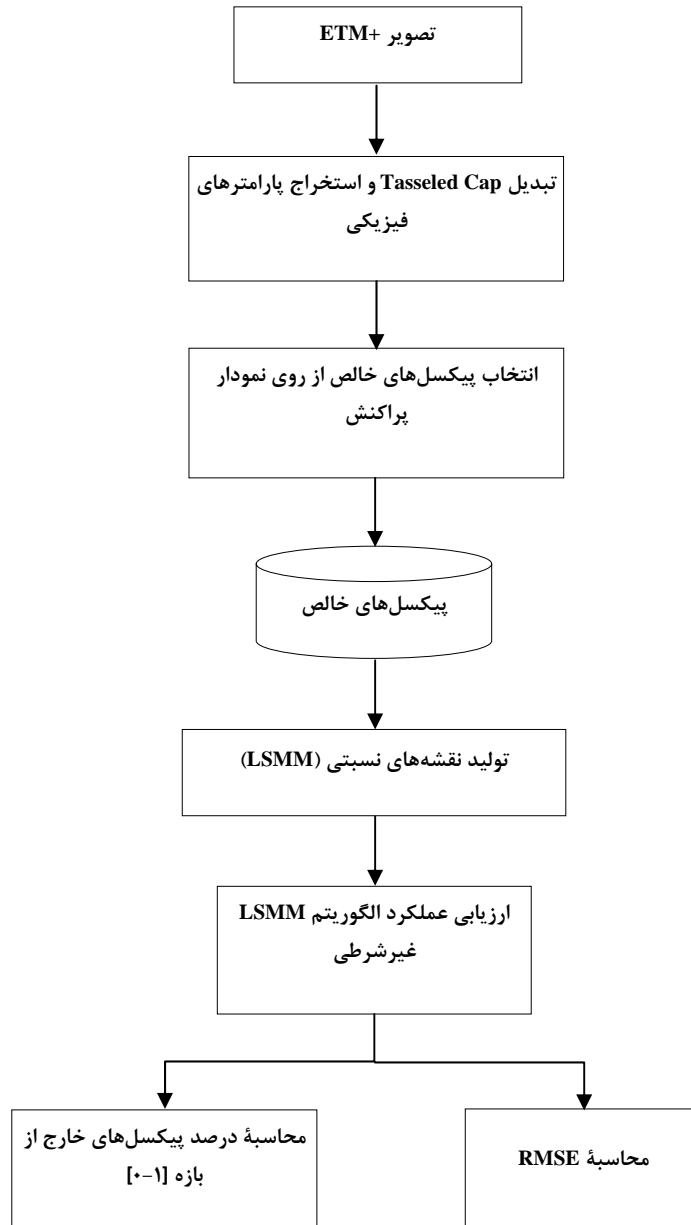
جدول ۱ ضرایب تبدیل Tasseled Cap برای سنجنده Landsat TM

باند TM	۱	۲	۳	۴	۵	۷
درخشندگی	۰/۳۰۳۷	۰/۲۷۹۳	۰/۴۳۴۳	۰/۵۵۸۵	۰/۵۰۸۲	۰/۱۸۶۳
سبزی	-۰/۲۸۴۸	-۰/۲۴۳۵	-۰/۵۴۳۶	۰/۷۲۴۳	۰/۰۸۴۰	-۰/۱۸۰۰
رطوبت	۰/۱۵۰۹	۰/۱۷۹۳	۰/۳۲۹۹	۰/۳۴۰۶	-۰/۷۱۱۲	-۰/۴۵۷۲

۲-۵- روش پیشنهادی

در تحقیق حاضر، استفاده از تبدیل Tasseled Cap برای به دست آوردن پیکسل‌های خالص پیشنهاد می‌شود. انگیزه اصلی استفاده از این تبدیل، مستقل آماری بودن پارامترهای فیزیکی حاصل از آن است (Mather, 2004). با توجه به آنچه گفته شد (ر.ک: بخش ۲-۳-۲)، مستقل بودن عناصر خالص در کاهش خطای الگوریتم LSMM نقش کلیدی ایفا می‌کند. براساس این، روند کلی برای استخراج پیکسل‌های خالص مطابق شکل شماره چهار پیشنهاد شده است. به این ترتیب، نخست با استفاده از تبدیل Tasseled Cap پارامترهای فیزیکی (درخشندگی، سبزی‌نگی و رطوبت) استخراج می‌شوند و پیکسل‌های خالص براساس نمودار پراکنش^۱ صفحات خاک و پوشش گیاهی تعیین می‌شوند. در ادامه، به منظور برآورد دقت پیکسل‌های خالص انتخاب شده، عملکرد الگوریتم LSMM غیرشرطی با استفاده از این پیکسل‌ها ارزیابی شده است. بدین منظور، خطای RMS و تعداد پیکسل‌های غیرمنطقی با مقادیر بیشتر از یک و یا کمتر از صفر محاسبه شده است.

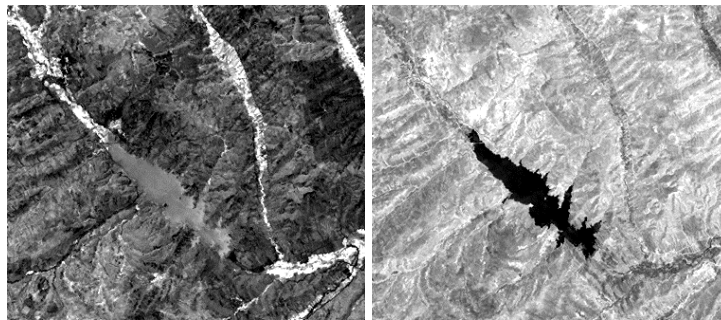
1. Scatter Plot



شکل ۴ روش پیشنهادی برای استخراج پیکسل‌های خالص جهت ورود به الگوریتم LSMM

۳- پیاده‌سازی و نتایج

با اعمال تبدیل Tasseled Cap بر روی تصویر ETM+ منطقه مورد مطالعه، سه شاخص درخشندگی، سبزی‌نگی و رطوبت استخراج شد (شکل ۵). در ادامه، با ترسیم نمودار پراکنش این شاخص‌ها، صفحات موسوم به خاک و پوشش گیاهی جهت انتخاب پیکسل‌های خالص تولید شد (شکل ۶). به این ترتیب، پیکسل‌های خالص به‌عنوان نقاط گوشه‌ای نمودار پراکنش انتخاب شده‌اند. این نقاط به‌گونه‌ای انتخاب شده‌اند که از تراکم نسبی بالایی برخوردار باشند (درنظر نگرفتن نقاط منفرد که حالت برون‌هسته^۱ دارند). این امر به آسانی و به‌صورت بصری می‌تواند با دقت بالایی صورت پذیرد. درنهایت، میانگین مجموعه پیکسل‌های انتخاب‌شده برای هر عنصر خالص به‌عنوان طیف مربوط به آن عنصر درنظر گرفته شده است.

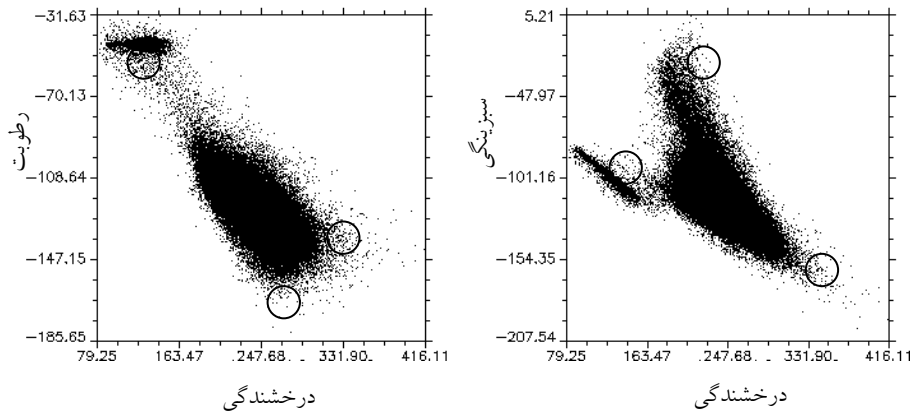


الف- شاخص درخشندگی خاک ب- شاخص سبزی‌نگی



ج- شاخص رطوبت

شکل ۵ پارامترهای فیزیکی حاصل از تبدیل Tasseled Cap

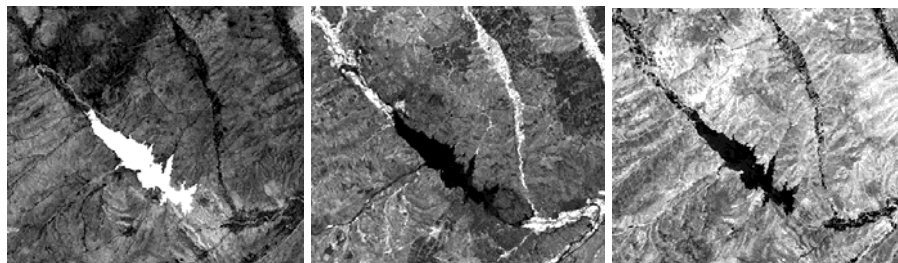


ب- صفحه خاک

الف- صفحه پوشش گیاهی

شکل ۶ انتخاب پیکسل‌های خالص براساس نمودار پراکنش حاصل از پارامترهای فیزیکی

پیکسل‌های خالص انتخاب شده ورودی الگوریتم LSMM در نظر گرفته شده‌اند و نقشه‌های نسبتی تولید شده است (شکل ۷).



ج- آب

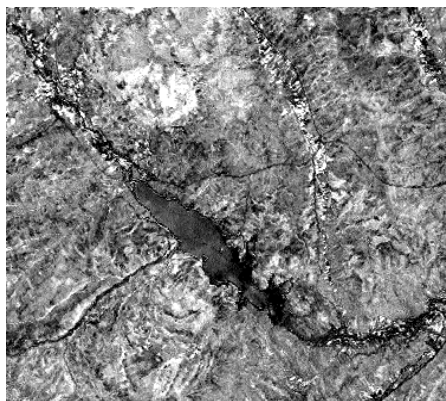
ب- باغ

الف- بایر

شکل ۷ نقشه‌های نسبتی حاصل از الگوریتم LSMM غیرشرطی

برای ارزیابی دقت پیکسل‌های خالص، عملکرد الگوریتم LSMM غیرشرطی با محاسبه RMSE (شکل ۸) و تعداد پیکسل‌های خارج از بازه [۰-۱] بررسی شد. بدین ترتیب، مقدار RMSE کل ۲/۶۸ و مجموع پیکسل‌های با مقادیر منفی و بیشتر از یک ۴/۴۳ درصد (کمتر از

۵ درصد) از کل پیکسل‌های تصویر را شامل می‌شود (جدول ۲). بنابراین، دقت پیکسل‌های خالص انتخاب‌شده در حد مطلوب بوده و شرایط لازم را بدون اعمال هیچ شرطی در الگوریتم LSMM فراهم کرده است.

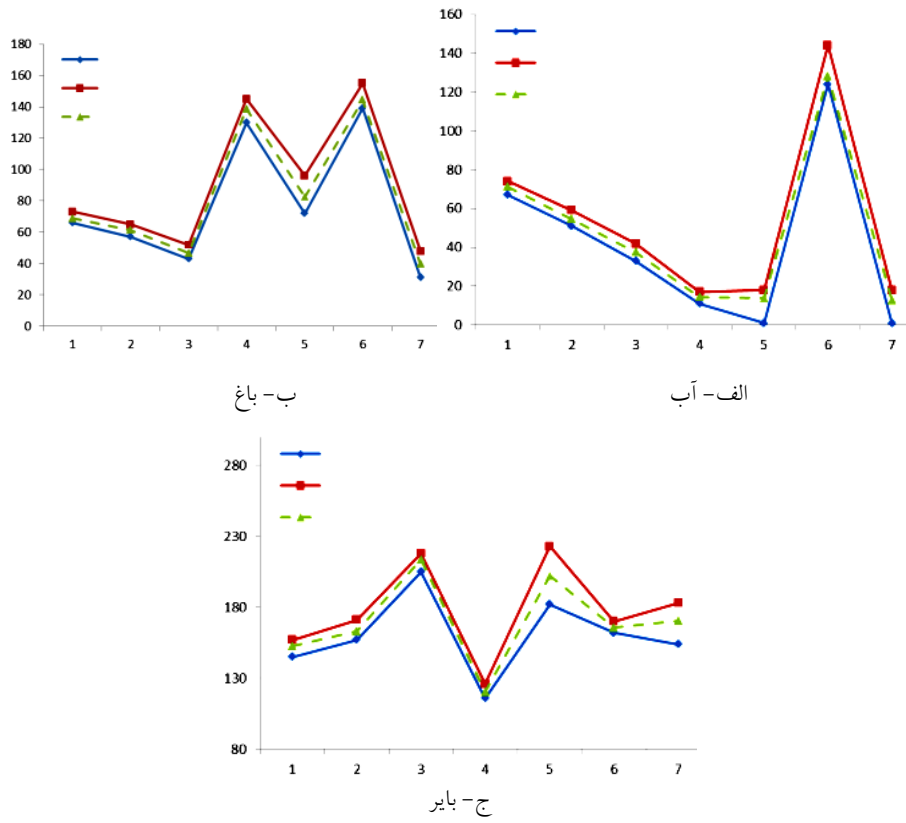


شکل ۸ نقشه RMSE مربوط به نقشه‌های نسبی

جدول ۲ اطلاعات پیکسل‌های خارج از بازه [۰-۱]

پیکسل‌های با مقادیر منفی		پیکسل‌های با مقادیر بزرگ‌تر از یک		
تعداد	درصد	تعداد	درصد	
۲۹۵	۰/۲۴	۲۷	۰/۰۲	بایر
۳۸۰۴	۳/۰۳	۲۸	۰/۰۲	باغ
۸۰۹	۰/۰۶۴	۶۰۳	۰/۴۸	آب
۴۹۰۸	۳/۹۱	۶۵۸	۰/۵۲	مجموع

همچنین، پیکسل‌های انتخاب‌شده برای هر کلاس همگونی بالایی دارد و میزان تغییرات آن‌ها بسیار اندک است. نحوه پراکندگی عناصر خالص انتخاب‌شده در شکل شماره نه و انحراف معیار آن‌ها در باندهای مختلف تصویر در جدول شماره سه نمایش داده شده است.



شکل ۹ بیشینه، کمینه و میانگین پیکسل‌های خالص انتخاب‌شده در باندهای مختلف

جدول ۳ انحراف معیار پیکسل‌های خالص انتخاب‌شده در باندهای مختلف

آب	باغ	بایر	
۱/۵۵	۱/۶۹	۲/۶۴	باند ۱
۱/۶۸	۱/۹۶	۳/۶۸	باند ۲
۱/۸۰	۲/۶۱	۳/۹۳	باند ۳
۱/۲۷	۴/۴۴	۳/۰۳	باند ۴
۳/۴۸	۶/۱۴	۹/۲۶	باند ۵
۴/۰۸	۴/۰۹	۳/۱۲	باند ۶
۲/۹۴	۴/۴۲	۸/۹۵	باند ۷

با توجه به جدول شماره سه، انحراف معیار باندها برای کلاسی نظیر آب که از یکنواختی بیشتری برخوردار است، مقادیر بسیار اندکی دارند. با توجه به اینکه دو کلاس دیگر طبقه‌بندی خود می‌توانند به زیرکلاس‌های دیگری تفکیک شوند (برای نمونه می‌توان درجات مختلفی را برای پوشش گیاهی مربوط به کلاس باغ در نظر گرفت)، تا حدودی بیشتر بودن انحراف معیار باندها برای این کلاس‌ها توجیه‌پذیر است. با وجود این، طبقه‌بندی کلاس‌های پوششی غالب مورد نظر این تحقیق بوده است که می‌توان گفت مقادیر انحراف معیار قابل قبول‌اند.

۴- بحث و نتیجه‌گیری

تعیین سهم هریک از کلاس‌های پوشش اراضی در سطح زیرپیکسل، در کاهش عدم قطعیت طبقه‌بندی‌کننده‌های سخت و در نتیجه برآورد دقیق سطح پوشش اراضی اهمیت بسزایی دارد. در این میان، مدل اختلاط طیفی خطی از روش‌های مرسوم طبقه‌بندی نرم تصاویر است. عملکرد این مدل به شدت تحت تأثیر دقت ورودی مدل، پیکسل‌های خالص، است. در تحقیق حاضر، روشی براساس پارامترهای فیزیکی حاصل از تصویر جهت استخراج عناصر خالص معرفی شده است. از تبدیل Tasseled Cap، سه پارامتر درخشندگی، رطوبت و سبزی‌نگی استخراج شد و براساس نمودار پراکنش صفحات خاک و پوشش گیاهی، پیکسل‌های خالص استخراج شد. ویژگی مهم و مورد توجه پارامترهای فیزیکی در این تحقیق، مستقل آماری بودن این پارامترها و در نتیجه کاهش خطای مربوط به متمایل به منفرد بودن ماتریس عناصر خالص در مدل اختلاط طیفی خطی است. برای بررسی دقت پیکسل‌های خالص انتخاب‌شده براساس روش پیشنهادی، عملکرد الگوریتم LSMM غیرشرطی ارزیابی شد. در الگوریتم LSMM غیرشرطی، هیچ شرطی برای مثبت بودن سهم کلاس‌ها و واحد بودن مجموع آن‌ها لحاظ نمی‌شود. به همین دلیل، برای ارزیابی دقت پیکسل‌های خالص بسیار مؤثر است. پس از پیاده‌سازی الگوریتم LSMM غیرشرطی، دو معیار RMSE و تعداد پیکسل‌های با سهم تعلق خارج از بازه [۰-۱] برآورد شد. براساس نتایج، RMSE کل ۲/۶۸ و تعداد کل پیکسل‌های با سهم تعلق منفی یا بزرگ‌تر از یک، ۴/۴۳ درصد (کمتر از ۵ درصد) برآورد شد. بنابراین، بدون اعمال هیچ شرطی در مدل LSMM و فقط با استفاده از پیکسل‌های خالص استخراج‌شده از



روش پیشنهادی، دقت لازم در نتایج به دست آمد. تبدیل Tasseled Cap برای تصاویر Landsat توسعه یافته و توسعه الگوریتم‌های استخراج پارامترهای فیزیکی برای سایر سنجنده‌ها می‌تواند افق تحقیقات آتی در این زمینه باشد. با وجود این، در بسیاری از مطالعات محیطی از تصاویر Landsat استفاده می‌شود که در آن‌ها روش پیشنهادی می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. همچنین، تلفیق پارامترهای فیزیکی با سایر شاخص‌ها مانند شاخص پوشش گیاهی^۱ و یا با سایر روش‌های استخراج عناصر خالص نیازمند تحقیقات بیشتر است.

۵- منابع

- غفوری، علی، استخراج اطلاعات از یک پیکسل به روش *Unmixing*، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ۱۳۸۵.
- دستوریان، کریم، آشکارسازی هدف و طبقه‌بندی تصاویر فراطیفی با دقت زیرپیکسل، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده فنی دانشگاه تهران، تهران، ۱۳۸۱.
- Adams, J.B., M.O. Smith & A.R. Gillespie, "Imaging Spectroscopy: Interpretation Based on Spectral Mixture Analysis" in C.M. Pieters & P.A.J. Englert (Eds.), *Remote Geochemical Analysis: Elemental and Mineralogical Composition*, Cambridge: Cambridge University Press, Pp. 145- 166, 1993.
- Atkinson, P.M., M.E.J. Cutler & H. Lewis, "Mapping Sub-Pixel Proportional Land Cover with AVHRR Imagery", *International Journal of Remote Sensing*, No. 18, Pp. 917- 35, 1997.
- Bezdek, J.C., R. Ehrlich & W. Full, "FCM: The Fuzzy C-Means Clustering Algorithm", *Computers and Geosciences*, No. 10, Pp. 191-203, 1984.
- Brown, M., S.R. Gunn & H.G. Lewis, "Support Vector Machines for Optimal Classification and Spectral Unmixing", *Ecological Modeling*, No. 120, Pp. 167- 179, 1999.

1. Normalized Difference Vegetation Index

- Brown, M., H.G. Lewis & S.R. Gunn, "Linear Spectral Mixture Models and Support Vector Machines for Remote Sensing", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, No. 38, Pp. 2346- 2360, 2000.
- Cracknell, A.P., "Synergy in Remote Sensing- what's in a Pixel?", *International Journal of Remote Sensing*, No. 19, Pp. 2025- 47, 1998.
- Crist, E.P. & R.C. Cicone, "A Physically-Based Transformation of Thematic Mapper Data- the TM Tasseled Cap", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, No. 22, Pp. 256- 263, 1984.
- Cross, A.M., J.J. Settle, N.A. Drake & R.T.M. Paivinen, "Subpixel Measurement of Tropical Forest Cover Using AVHRR Data", *International Journal of Remote Sensing*, No. 12, Pp. 1119- 1129, 1991.
- Drake, N. & K. White, "Linear Mixture Modelling of Landsath Ematic Mapper Data for Mapping the Distribution and Abundance of Gypsum in the Tunisian Southern Atlas, Proceedings of Spatial Data 2000", *Remote Sensing Society*, Nottingham, Pp. 168- 177, 1991.
- Fisher, P., "The Pixel: A Snare and a Delusion", *International Journal of Remote Sensing*, No. 18(13), Pp. 2593-2599, 1997.
- Foody, G.M., "Sub-Pixel Methods in Remote Sensing", in S.M.D. Jong & F.D.V.D. Meer (Eds.), *Remote Sensing Image Analysis*, Springer, 2006.
- Foody, G.M. & D.P. Cox, "Sub-Pixel Land Cover Composition Estimation Using a Linear Mixture Model and Fuzzy Membership Functions", *International Journal of Remote Sensing*, No. 15, Pp. 619-631, 1994.
- Foody, G.M., "Approaches for the Production and Evaluation of Fuzzy Land Cover Classifications from Remotely-Sensed Data", *International Journal of Remote Sensing*, No. 17, Pp. 1317- 1340, 1996.
- Horowitz, H.M., R.F. Nalepka, P.D. Hyde & J.P. Morgenstern, "Estimating the Proportions of Objects within a Single Resolution Element

- of a Multispectral Scanner" in *Proceedings of the 7th International Symposium on Remote Sensing of the Environment*, Michigan: Ann Arbor, Pp. 1307- 20, 1971.
- Kauth, R. J. and Thomas, G. S., "The Tasselled Cap -- A Graphic Description of the Spectral-Temporal Development of Agricultural Crops as Seen by LANDSAT" (1976). LARS Symposia. Paper 159. http://docs.lib.purdue.edu/lars_symp/159
 - Liu, X., X. Li. & X. Zhang, "Determining Class Proportions Within a Pixel Using a New Mixed-Label Analysis Method", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2009.
 - Lucas, N.S., S. Shanmugam & M. Barnsley, "Sub-Pixel Habitat Mapping of a Coastal Dune Ecosystem", *Applied Geography*, No. 22, Pp. 253- 270, 2002.
 - Mather, P.M., *Computer Processing of Remotely-Sensed Images: An Introduction*, 3th Ed., London: John Wiley & Sons Ltd, 2004.
 - Richards, J.A. & X. Jia, *Remote Sensing Digital Image Analysis*, 4th Ed., Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006.
 - Settle, J.J. & N.A. Drake, "Linear Mixing and the Estimation of Ground Cover Proportions", *International Journal of Remote Sensing*, No. 14, Pp. 1159- 1177, 1993.
 - Sohn, Y. & R.M. McCoy, "Mapping Desert Shrub Rangeland Using Spectral Unmixing and Modeling Spectral Mixtures with TM Data", *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, No. 63, Pp. 707- 716, 1997.
 - Tatem, A.J., H.G. Lewis, P.M. Atkinson & M.S. Nixon, "Super-Resolution Land Cover Mapping from Remotely Sensed Imagery Using a Hopfield Neural Network" in G.M. Foody & P.M. Atkinson (Eds.), *Uncertainty in Remote Sensing and GIS*, England: John Wiley & Sons Ltd, 2002.

- Williamson, H.D., "Estimating Sub-Pixel Components of a Semi-Arid Woodland", *International Journal of Remote Sensing*, No. 15, Pp. 3303-3307, 1994.
- Woodcock, C.E., "Uncertainty in Remote Sensing" in G.M. Foody & P.M. Atkinson (Eds.), *Uncertainty in Remote Sensing and GIS*, England: John Wiley & Sons Ltd, 2002.
- Wu, C. & A.T. Murray, "Estimating Impervious Surface Distribution by Spectral Mixture Analysis", *Remote Sensing of Environment*, 2003.
- Zhu, H., "Linear Spectral Unmixing Assisted by Probability Guided and Minimum Residual Exhaustive Search for Subpixel Classification", *International Journal of Remote Sensing*, No. 26 (24), Pp. 5585- 5602, 2005.