

# افزایش دقت اطلاعات تغییرات کاربری اراضی با استفاده از نتایج طبقه‌بندی نرم تصاویر سنجش از دور (مطالعه موردی: حوضه آبریز اهرچای)

میلاذ نیرومند جدیدی<sup>۱\*</sup>، مجتبی جنتی<sup>۲</sup>، محمودرضا صاحبی<sup>۳</sup>، مهدی مختارزاده<sup>۴</sup>

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

دریافت: ۹۰/۱۲/۱۵ پذیرش: ۹۲/۲/۲۳

## چکیده

آشکارسازی تغییرات پوشش اراضی اهمیت بسزایی در برنامه‌ریزی‌های محیطی توسعه پایدار دارد. در این زمینه، آنالیز تصاویر چندزمانه سنجش از دور روشی کارآمد در استخراج این تغییرات است. بدین منظور، روش مقایسه پس از طبقه‌بندی، روشی رایج در استخراج تغییرات پوشش اراضی شناخته شده است. با وجود این، این روش به دلیل بهره‌گیری از طبقه‌بندی‌کننده‌های سخت، دقت مناسبی در حضور پیکسل‌های مخلوط ندارد و عدم قطعیت بسیار زیادی در ماتریس تغییرات حاصل از آن وجود دارد. در تحقیق حاضر، ابتدا روش‌های مختلف آشکارسازی تغییرات دسته‌بندی شده و روشی مبتنی بر استفاده از نقشه‌های نسبتی حاصل از طبقه‌بندی نرم، برای استخراج اطلاعات دقیق تغییرات پیشنهاد شده است. این روش علاوه بر استخراج مناطق تغییر یافته/ نیافته، ماتریس کامل تغییرات (میزان تبدیل کلاس‌های مختلف به یکدیگر) را نیز با دقت زیرپیکسل امکان‌پذیر ساخته است. با پیاده‌سازی این روش بر تصاویر چندزمانه منطقه مورد مطالعه، نتایج حاصل با نتایج به دست آمده از روش مقایسه پس از طبقه‌بندی مقایسه و ارزیابی شده است. از دستاوردهای مهم تحقیق این است که روش مقایسه پس از طبقه‌بندی میزان تغییرات را به طور متوسط

۹/۲ درصد کمتر از روش پیشنهادی برآورد کرده است. همچنین، تفاوت نتایج دو روش در مورد پوشش اراضی غیرهمگن نسبت به پوشش همگن، به مراتب بیشتر است. به طور کلی، به دلیل در نظر گرفتن سهم کلاس‌ها در سطح پیکسل، روش پیشنهادی با دقت بالایی ماتریس تغییرات پوشش اراضی را تولید کرده است و می‌تواند در مدیریت منابع طبیعی مورد استفاده قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: آشکارسازی تغییرات، پوشش اراضی، طبقه‌بندی نرم، پیکسل مخلوط.

## ۱- مقدمه

عوامل طبیعی و انسانی تغییرات زیادی را در محیط جغرافیایی و پوشش اراضی به وجود می‌آورند. تهیه نقشه و ارزیابی کمی تغییرات نقش بسزایی در مدیریت بهینه منابع طبیعی (Lu Et al., 2009)، حفاظت از محیط زیست و سایر برنامه‌ریزی‌های در ارتباط با محیط جغرافیایی دارد. در دهه‌های اخیر، فناوری سنجنش از دور و پردازش تصاویر ماهواره‌ای به سبب برخورداری از مزایای منحصربه‌فردی مانند هزینه پایین، سرعت اجرایی بالا و تکرارپذیری مناسب مشاهدات، برای آشکارسازی تغییرات پوشش اراضی مورد توجه قرار گرفته است. با تجزیه و تحلیل تصاویر چندزمانه می‌توان میزان تغییرات پوشش اراضی و همچنین روند تغییرات را استخراج کرد (اکبری و همکاران، ۱۳۹۰؛ Foody, 2001; Jensen Et al., 1995).

آشکارسازی تغییرات یکی از مهم‌ترین کاربردهای فناوری سنجنش از دور بوده (Dimiyati Et al., 1996; Foody, 2001; Lu Et al., 2009) و طی سال‌های گذشته روش‌های آشکارسازی تغییرات متعددی به منظور آنالیز تصاویر چندزمانه مطرح شده است. روش مقایسه بعد از طبقه‌بندی<sup>۱</sup> روشی رایج برای استخراج تغییرات در طرح‌های سنجنش از دوری شناخته شده است (Mas, 1999; Foody, 2001). در این روش، از طبقه‌بندی‌کننده‌های سخت<sup>۲</sup> برای به دست آوردن نقشه کاربری در هر یک از دوره‌های زمانی استفاده می‌شود و در نهایت، تغییرات کاربری با مقایسه پیکسل به پیکسل نقشه‌های کاربری چندزمانه به دست می‌آید (ارگانی، ۱۳۸۵؛ Sohl, 1999; Jensen Et al., 1995). با وجود

1. Post Classification Comparison  
2. hard classifiers

برخی مزیت‌های این روش، عدم قطعیت‌های مربوط به پیکسل‌های مخلوط<sup>۱</sup> به دلیل استفاده از طبقه‌بندی‌کننده‌های سخت در فرایند استخراج کاربری‌ها، دقت اطلاعات تغییرات را کاهش می‌دهد. بنابراین در سال‌های اخیر، روش‌های پیشرفته استخراج تغییرات کاربری مطرح شده است. در این میان، استفاده از نتایج طبقه‌بندی نرم به منظور افزایش دقت اطلاعات تغییرات کاربری مورد توجه قرار گرفته است.

در مباحث مربوط به آشکارسازی تغییرات همواره دو مبحث مختلف «اطلاعات تغییرات» و «نقشه تغییرات» مطرح می‌شود (Lu Et al., 2009). هدف تحقیق حاضر نیز افزایش دقت «اطلاعات تغییرات» (یا استخراج اطلاعات آماری تغییرات) است. اطلاعات حاصل از روش‌های آشکارسازی تغییرات را می‌توان در دو دسته کلی در نظر گرفت: ۱- تعیین مناطق تغییر یافته/ نیافته؛ ۲- تعیین نوع تغییرات که به صورت «از-به»<sup>۳</sup> و در قالب ماتریس تغییرات ارائه شده است و در واقع علاوه بر تعیین تغییر کلاس‌ها، میزان تبدیل هریک از کلاس‌ها به کلاس‌های دیگر نیز مشخص می‌شود (Lu Et al., 2004). استخراج این نوع اطلاعات با استفاده از روش‌های مرسوم آشکارسازی تغییرات با مقایسه پیکسل به پیکسل تصاویر طبقه‌بندی شده چندزمانه به آسانی صورت می‌گیرد. اما این امر در روش‌های پیشرفته آشکارسازی تغییرات مبتنی بر روش‌های طبقه‌بندی نرم، به دلیل چندبرچسبی بودن نتایج طبقه‌بندی، چالش برانگیز است. براساس تحقیقاتی که در این زمینه انجام شده، مناطق تغییر یافته/ نیافته معمولاً با اعمال پاره‌ای حدآستانه‌های مبتنی بر تفاسیر فیزیکی (عموماً به روش سعی و خطا) تعیین می‌شود (Ibid). از سوی دیگر، ماتریس کامل تغییرات (چگونگی تبدیل کلاس‌ها به یکدیگر) معمولاً براساس یک پس‌پردازش که طی آن نتایج طبقه‌بندی نرم تصاویر چندزمانه به نقشه‌های طبقه‌بندی سخت تبدیل می‌شوند، به دست می‌آید. هرچند این روش در مقایسه با روش‌های مرسوم دقت اطلاعات تغییرات را افزایش داده (Lu Et al., 2004 & 2009)، در حین فرایند تبدیل نتایج طبقه‌بندی نرم به سخت، بخش زیادی از اطلاعات زیرپیکسلی از بین می‌رود. بنابراین در تحقیق حاضر، روش نوینی برای تعیین نوع تغییرات کلاس‌ها به صورت زیرپیکسلی ارائه شده است که به تبدیل نتایج طبقه‌بندی نرم به سخت

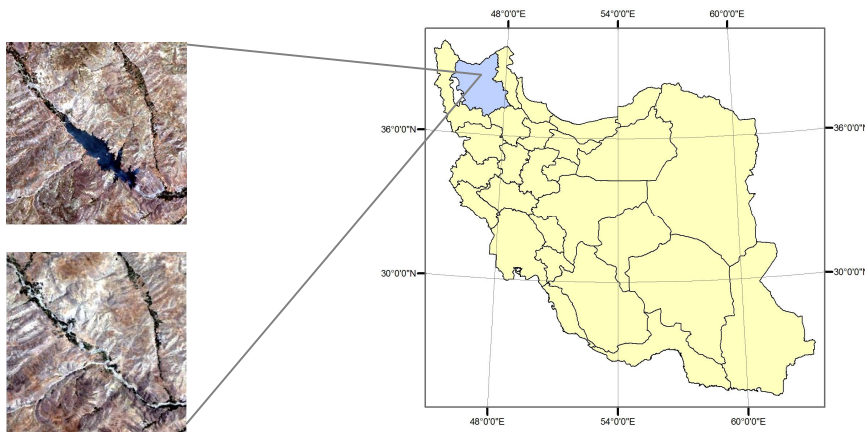
1. mixed pixels  
2. change/ non-change information  
3. "from- to" change detection

نیازی ندارد و اطلاعات زیرپیکسلی را در آشکارسازی تغییرات حفظ می‌کند. در این پژوهش، از نقشه‌های نسبتی<sup>۱</sup> به دست آمده از مدل اختلاط طیفی خطی<sup>۲</sup> (LSMM) مربوط به تصاویر چندزمانه منطقه مورد مطالعه برای افزایش دقت اطلاعات آماری تغییرات کاربری استفاده شده است. در روش پیشنهادی، نقشه‌های نسبتی هر یک از کلاس‌ها در دو زمان مورد نظر از هم کم شده و تغییرات مثبت و منفی هر یک از کلاس‌ها در سطح زیرپیکسل محاسبه و براساس یک فرایند سه مرحله‌ای ماتریس کامل تغییرات به دست آمده است. در نهایت، نتایج حاصل با مقادیر به دست آمده از روش مقایسه پس از طبقه‌بندی مقایسه شده است.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه بخشی از حوضه آبریز اهرچای است. این حوضه از نظر تقسیمات سیاسی-اداری، در شهرستان‌های اهر و ورزقان در استان آذربایجان شرقی واقع 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.



شکل ۱ منطقه مورد مطالعه و تصاویر ETM+ (۲۰۰۱)، TM (۱۹۸۹)

1. fractional maps
2. Linear Spectral Mixture Model

تصاویر مورد استفاده در این تحقیق، برای بررسی تغییرات یک دوره دوازده‌ساله انتخاب شده است (جدول ۱). تغییر آشکار در منطقه مورد بررسی، احداث سد ستارخان در این دوره است.

جدول ۱ مشخصات تصاویر ماهواره‌ای مورد استفاده در تحقیق

ماهواره	سنجنده	قدرت تفکیک مکانی	تاریخ تصویربرداری	شماره ردیف و گذر	تعداد باند
Landsat	TM	۳۱/۵ متر	۱۹۸۹	۱۶۸-۳۳	۷
Landsat	ETM+	۲۸/۵ متر	۲۰۰۱	۱۶۸-۳۳	۷

## ۲-۲- روش‌های آشکارسازی تغییرات

برای آشکارسازی تغییرات پوشش اراضی روش‌های بسیاری توسعه یافته است. این روش‌ها را می‌توان در هفت دسته کلی طبقه‌بندی کرد (Lu Et al., 2009). روش‌های مختلف هر یک از این دسته‌ها در جدول شماره دو آمده است.

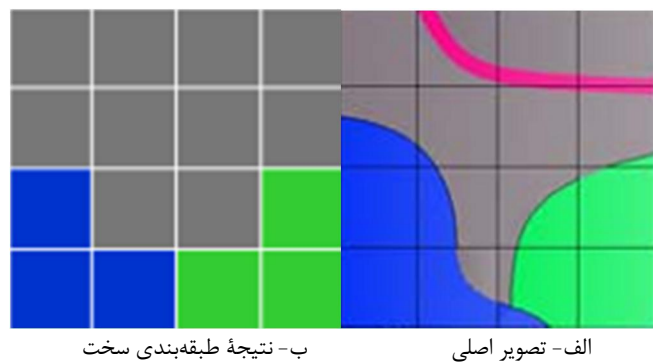
جدول ۲ دسته‌بندی روش‌های آشکارسازی تغییرات پوشش اراضی

تفاضل تصاویر، رگرسیون تصاویر، نسبت‌گیری تصاویر، تفاضل شاخص‌های گیاهی، آنالیز بردار تغییرات <sup>۱</sup> و تفاضل پس‌زمینه	جبری
آنالیز مؤلفه اصلی، Tasseled Cap، Gramm Schmidt و کای-اسکوئر	نگاشتی
مقایسه پس از طبقه‌بندی، تحلیل هم‌زمان طیفی-زمانی، آشکارسازی پیشینه امید ریاضی، آشکارسازی تغییرات نظارت‌نشده، روش‌های ترکیبی و شبکه‌های عصبی	طبقه‌بندی
مدل بازتاب Li-Strahler و پارامترهای بیوفیزیکی	پیشرفته
تلفیق سنجنش از دور و GIS، مبتنی بر GIS	مبتنی بر GIS
تفسیر بصری	تحلیل بصری
معیارهای وابستگی مکانی، سامانه دانش‌پایه و غیره	سایر موارد

### 1. change vector analysis

از میان روش‌های نام‌برده، روش مقایسه پس از طبقه‌بندی جزء روش‌های رایج در استخراج تغییرات کاربری است (Jensen Et al., 1987; Jensen Et al., 1995; Munyati, 2000). از مزایای این روش می‌توان کاهش اثر اختلافات اتمسفری، سنجنده‌ای و محیطی تصاویر چندزمانه و همچنین تولید ماتریس کامل اطلاعات تغییرات را نام برد (Castelli Et al., 1998; Jensen Et al., 1995; Lu Et al., 2009). با وجود این، ماهیت این روش‌ها بر طبقه‌بندی‌کننده‌های سخت استوار است. به این ترتیب، نقشه و اطلاعات تغییرات به دست آمده از این روش‌ها، تحت تأثیر عدم قطعیت مربوط به پیکسل‌های مخلوط قرار می‌گیرد و دقت نتایج به‌طور چشمگیری کاهش می‌یابد (Lu Et al., 2009).

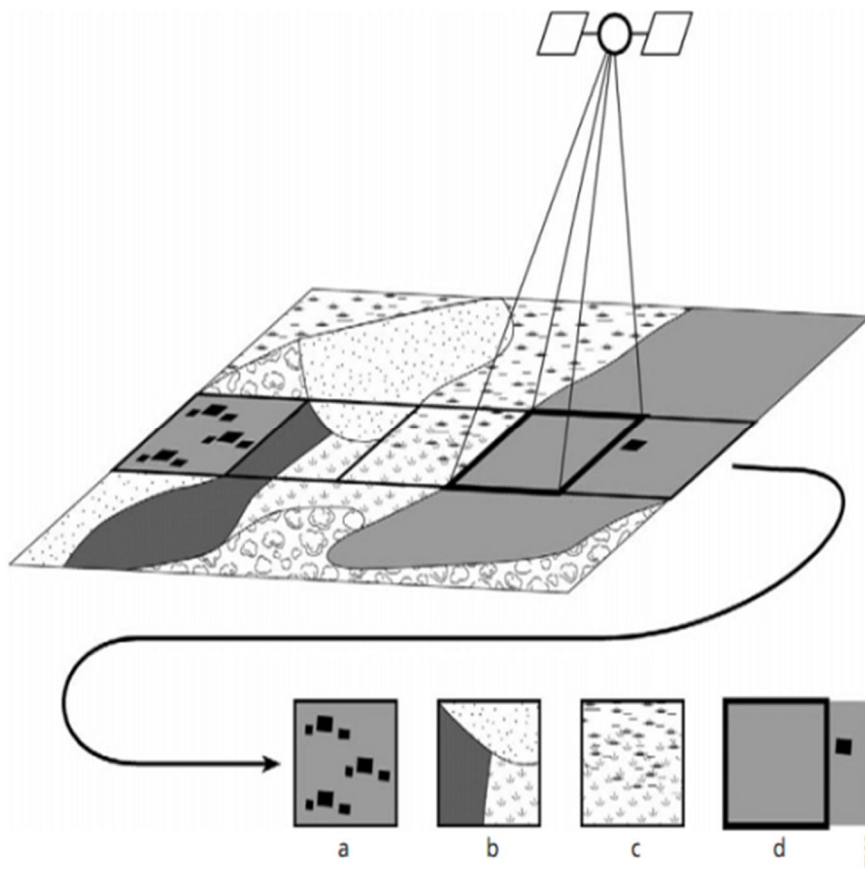
در روش‌های طبقه‌بندی سخت، هر پیکسل متناظر با تنها یک نوع کلاس کاربری در نظر گرفته شده و متناظر با قسمت‌بندی فضای ویژگی به مناطق دوه‌دو منحصربه‌فرد است (Tatem Et al., 2002). به این ترتیب در طبقه‌بندی سخت، پیکسل‌های حاوی بیش از یک نوع کلاس کاربری (پیکسل‌های مخلوط) با نادیده گرفتن کلاس‌های با سهم کمتر در هر پیکسل طبقه‌بندی می‌شوند (شکل ۲).



شکل ۲ نادیده گرفتن اختلاط طیفی در طبقه‌بندی سخت

در تمام سنجنده‌ها مشکل وجود پیکسل‌های مخلوط با قدرت تفکیک‌های مکانی مختلف وجود دارد (Tatem Et al., 2002). پیکسل‌های مخلوط به دلیل نامناسب بودن اندازه پیکسل‌ها جهت اخذ جزئیات زمینی برای کاربردهای خاص اتفاق می‌افتند. همچنین، زمانی که

کلاس‌های کاربری (مانند انواع خاک و پوشش گیاهی) به‌طور پیوسته تغییر می‌یابند، این امر تشدید می‌شود (Fisher, 1997; Foody, 2006). فودی (2006) چهار نوع پیکسل مخلوط را برشمرده است (شکل ۳): ۱- اختلاط ناشی از حضور زیرپیکسل‌های کوچک؛ ۲- اختلاط ناشی از قرار گرفتن پیکسل در محدوده مرز بین کلاس‌های مختلف؛ ۳- اختلاط ناشی از حضور تدریجی کلاس‌های به‌هم‌پیوسته؛ ۴- اختلاط ناشی از تأثیر<sup>۱</sup> PSF زیرپیکسل خارج از پیکسل مورد نظر.



شکل ۳ چهار نوع پیکسل مخلوط رایج در تصاویر

(source: Foody, 2006)

1. point spread function

در حالت کلی، پیکسل‌های مخلوط در قدرت تفکیک مکانی پایین افزایش می‌یابد و ممکن است تعداد پیکسل‌های مخلوط بسیار بیشتر از پیکسل‌های خالص باشد (Crapper, 1984; Campbell, 2002). برای حل مشکل موجود در طبقه‌بندی‌کننده‌های سخت در حضور پیکسل‌های مخلوط، روش‌های پیشرفته برای استخراج تغییرات پوشش اراضی با بهره‌گیری از روش‌های طبقه‌بندی نرم توسعه یافته است. این روش‌ها و نحوه عملکرد آن‌ها در بخش بعد توضیح داده و جایگاه روش پیشنهادی برای رفع مشکلات موجود در آشکارسازی زیرپیکسلی تغییرات تبیین شده است.

### ۲-۳- روش‌های پیشرفته آشکارسازی تغییرات

با توجه به مشکل وجود پیکسل‌های مخلوط در روش آشکارسازی تغییرات مبتنی بر مقایسه بعد از طبقه‌بندی، استفاده از روش‌هایی که اختلاط طیفی در سطح پیکسل را مورد توجه قرار دهند، ضروری به نظر می‌رسد. به گفته فودی (2001)، روش مرسوم مقایسه پس از طبقه‌بندی میزان تغییرات را کمتر از مقدار واقعی نشان می‌دهد. به همین منظور، روش‌های پیشرفته آشکارسازی تغییرات براساس استفاده از نتایج طبقه‌بندی نرم مطرح شده است (Adams Et al., 1995; Roberts Et al., 1998; Lu Et al., 2004; Lu Et al., 2009). در طبقه‌بندی نرم، هر پیکسل می‌تواند عضویت چندگانه در کلاس‌های کاربری داشته باشد. خروجی طبقه‌بندی نرم مجموعه‌ای از تصاویر (به‌ازای هر کلاس یک تصویر) است که برای هر پیکسل درجه‌تعلق مربوط به هر کلاس مشخص می‌شود. بنابراین، تجزیه اختلاط طیفی (LSMM) یک روش طبقه‌بندی نرم رایج برای حل مشکل پیکسل‌های مخلوط است (Cross Et al., 1991; Drake & White, 1991; Lucas Et al., 2002). LSMM بر این فرض استوار است که رفتار طیفی ( $x_k$ ) مربوط به پیکسل  $k$  به صورت مجموع وزن‌دار خطی رفتار طیفی کلاس‌های تشکیل‌دهنده آن است (Mather, 2004; Drake & Settle, 1993) و طبق رابطه زیر تعریف می‌شود:



$$x_k = Ef + e \quad \text{رابطه ۱}$$

در رابطه ۱،  $E$  یک ماتریس  $q \times c$  است که  $q$  تعداد باندها و  $c$  تعداد کلاس‌ها را نشان می‌دهد.  $f$  برداری به طول  $c$  است که پوشش نسبی کلاس‌ها را در پیکسل مورد نظر ارائه می‌کند.  $e$  نیز خطای باقی‌مانده را نشان می‌دهد. ستون‌های ماتریس  $E$  مربوط به طیف اجزای خالص<sup>۱</sup> است که ویژگی‌های طیفی کلاس‌ها را نشان می‌دهد. تعیین این اجزای خالص معمولاً دشوار است (Williamson, 1994; Atkinson Et al., 1997; Wu & Murray, 2003) و از داده‌های تمرینی خالص به دست می‌آید. به این ترتیب، برای هر پیکسل، نسبت کلاس‌ها ( $f$ ) براساس شروط زیر محاسبه می‌شود:

$$\sum f_i = 1 \quad f_i \geq 0, i = 1, \dots, c \quad \text{رابطه ۲}$$

در هر باند طیفی یک مقدار باقی‌مانده ( $e_i$ ) وجود دارد که اختلاف بین مقدار پیکسل مشاهده‌ای و مقدار محاسبه‌شده از LSMM را نشان می‌دهد. برای ارزیابی عملکرد LSMM، خطای RMS مربوط به هر پیکسل مطابق رابطه ۳ محاسبه می‌شود:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{b=1}^m e_b^2}{m}} \quad \text{رابطه ۳}$$

در روش‌های مطرح شده برای آشکارسازی تغییرات به صورت نرم (زیرپیکسلی) با توجه به چندبرچسبی بودن نتایج طبقه‌بندی نرم مربوط به تصاویر چندزمانه، نخست با اعمال حد آستانه برای سهم کلاس‌ها در هر پیکسل و یا با استفاده از یک تصمیم‌گیرنده سخت (مانند الگوریتم بیشترین شباهت)، نقشه سخت هر یک از تصاویر چندزمانه تولید می‌شود

---

1. end-member



و در ادامه مانند روش های رایج مقایسه پس از طبقه بندی، با مقایسه پیکسل به پیکسل تصاویر، نوع تبدیل کلاس ها به یکدیگر مشخص می شود (Lu Et al., 2004 & 2009). این روش دقت آشکارسازی تغییرات را افزایش می دهد (Ibid)؛ ولی واضح است که در حین تبدیل نتایج طبقه بندی نرم به حالت سخت، بخش زیادی از اطلاعات زیرپیکسلی نادیده گرفته می شود. برای حل این مشکل، در بخش بعد روشی پیشنهاد شده که براساس آن نیازی به تبدیل نتایج طبقه بندی نرم به حالت سخت نبوده و نوع تغییر کلاس ها با استفاده از الگوریتم ارائه شده تعیین می شود.

#### ۲-۴- روش پیشنهادی

در این تحقیق، به منظور تولید ماتریس تغییرات کاربری از نقشه های نسبی حاصل از LSMM استفاده شده است. در مرحله نخست، تصاویر چندزمانه مربوط به منطقه مطالعاتی از لحاظ هندسی تصحیح و هم مرجع شدند. همچنین، با نمونه برداری دوباره تصویر ETM+، اختلاف جزئی در قدرت تفکیک مکانی تصاویر چندزمانه رفع شد. در ادامه، برای معرفی نمونه های آموزشی مورد نیاز در فرایند LSMM از پیکسل های خالص اشتقاقی<sup>۱</sup> استفاده شد. با توجه به اینکه پیکسل های خالص اشتقاقی از روی تصویر استخراج می شوند، می توان از تأثیر اتمسفر چشم پوشی کرد (Mather, 2004). بنابراین، از روش های مختلفی مانند تولید ماسک شاخص پوشش گیاهی<sup>۲</sup> و شاخص درجه خلوص پیکسلی بهبودیافته (نیرومند جدیدی و همکاران، ۱۳۹۱) استفاده شد. به این ترتیب، پیکسل های خالص با دقت مناسبی به LSMM معرفی شد. سپس به منظور تولید ماتریس کامل تغییرات، نقشه های نسبی حاصل از الگوریتم LSMM مورد استفاده قرار گرفت. نکته مهم در تولید ماتریس تغییرات، شناسایی نوع تغییرات (از کلاس A به کلاس B) است. در روش های مرسوم مبتنی بر طبقه بندی کننده های سخت، با توجه به اینکه به هر پیکسل تنها یک برجسب اختصاص داده می شود، نوع و مقدار تغییرات را می توان با قطعیت محاسبه کرد. اما در روش های مبتنی بر طبقه بندی کننده های نرم با توجه به

1. derived end-members  
2. Normalized Difference Vegetation Index

چندبرچسبی بودن پیکسل‌ها، در حالتی که سهم تعلق بیش از سه نوع کلاس در سطح پیکسل دچار تغییر شود، با قطعیت نمی‌توان درباره نوع تغییرات اظهار نظر کرد. برای برطرف کردن این مشکل، یک فرایند سه‌مرحله‌ای برای استخراج ماتریس تغییرات پیشنهاد شد:

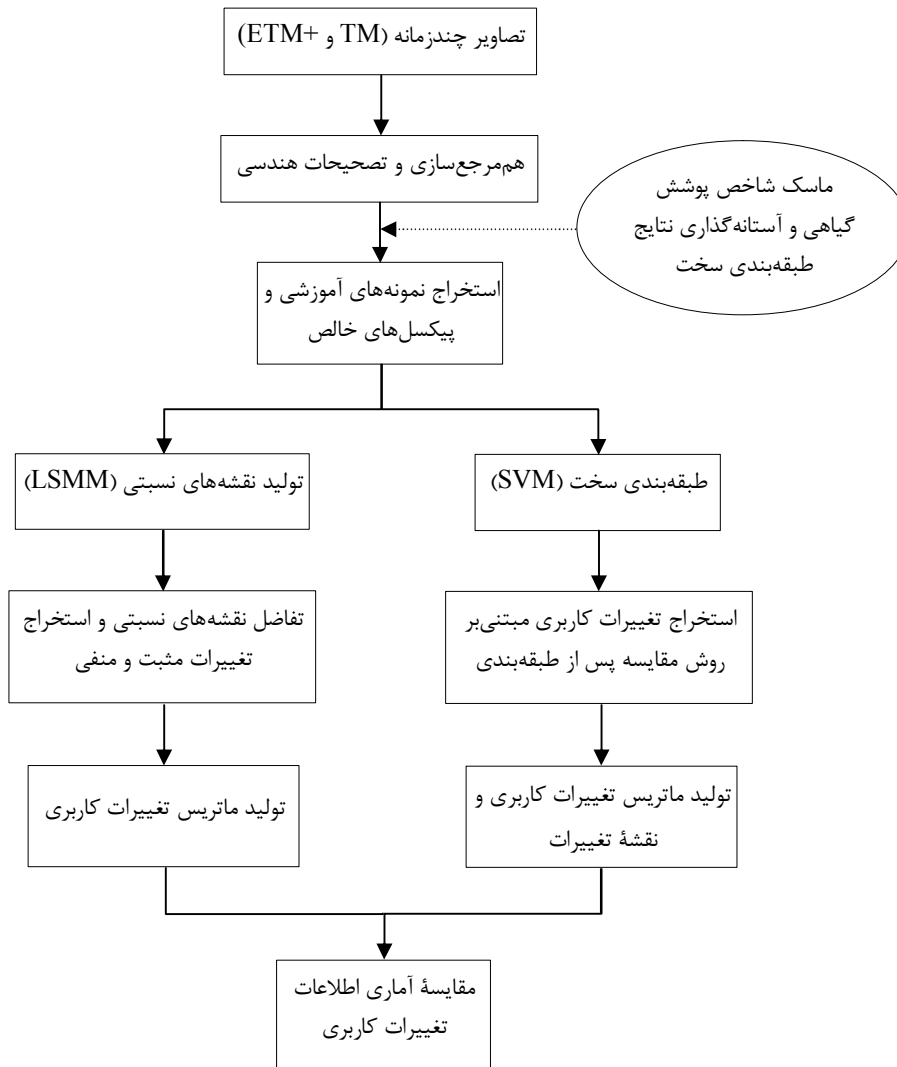
- الف- تفاضل نقشه‌های نسبتی مربوط به کلاس‌های متناظر در تصاویر چندزمانه؛  
ب- محاسبه میزان تغییرات برای پیکسل‌های با وقوع حداکثر سه نوع تغییر و محاسبه احتمال اولیه برای پیکسل‌های با تغییرات مبهم (با تغییر سهم تعلق بیش از سه نوع کلاس)؛  
ج- محاسبه نوع و مقدار تغییرات مربوط به پیکسل‌های مبهم براساس احتمالات اولیه برآوردشده.

با توجه به این واقعیت که تغییرات مبهم اغلب در مرز سه یا چند کلاس مختلف و یا پهنه‌هایی با تغییرات پیوسته و فرکانس بالای پوشش‌های زمینی (یعنی جایی که سهم تعلق بیش از سه کلاس کاربری به‌طور هم‌زمان غیر صفر بوده و امکان تغییر می‌یابد) رخ می‌دهد و از سوی دیگر تعداد این پیکسل‌ها در قیاس با کل پیکسل‌های تصویر درصد کوچکی است؛ در نتیجه می‌توان روند کلی تغییرات «از- به» کلاس‌ها را به‌ازای پیکسل‌های با وقوع حداکثر سه نوع تغییر (که بخش اعظم تصویر را تشکیل می‌دهند) یافت و در مرحله پیش‌بینی نحوه تغییرات «از- به» کلاس‌ها برای پیکسل‌های مبهم (که بخش اندکی از تصویر را تشکیل می‌دهند) نیز انتظار داشت که این روند استمرار داشته باشد.

همچنین، تصاویر چندزمانه با استفاده از طبقه‌بندی‌کننده ماشین بردار پشتیبان<sup>۱</sup> (SVM) و براساس نمونه‌های آموزشی مورد استفاده در LSMM طبقه‌بندی شد و براساس روش مقایسه پس از طبقه‌بندی، ماتریس و نقشه تغییرات تولید شد. در نهایت، ماتریس تغییرات حاصل از پیاده‌سازی دو روش به‌صورت آماری مقایسه شد (شکل ۴).

---

1. Support Vector Machine (SVM)



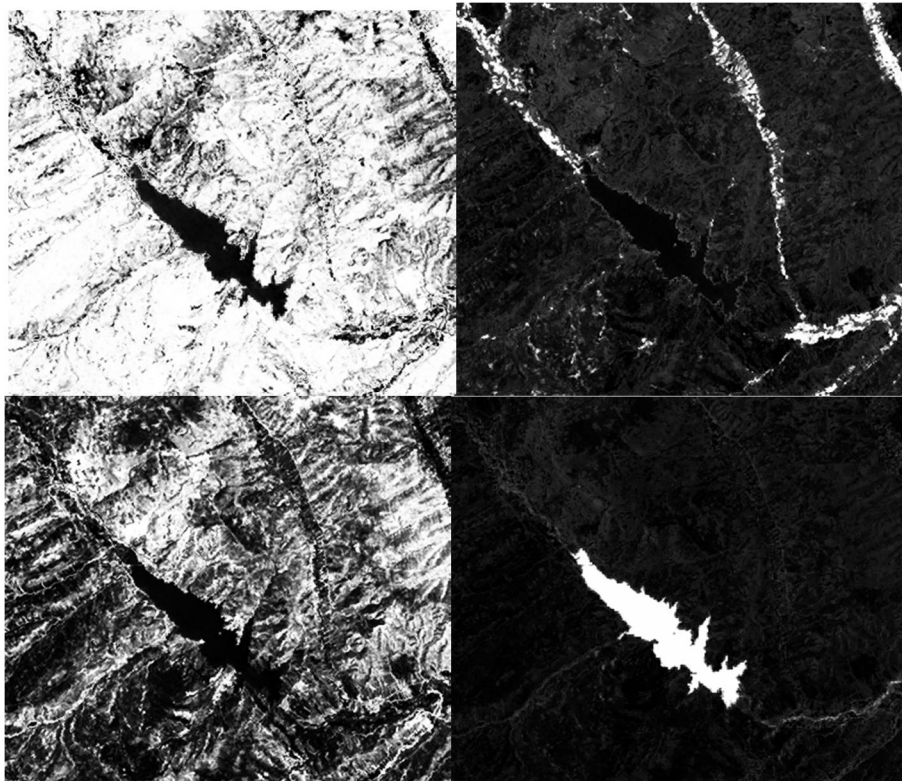
شکل ۴ روند کلی ارزیابی روش پیشنهادی استخراج تغییرات کاربری در سطح زیرپیکسل

### ۳- پیاده‌سازی و نتایج

با بهره‌گیری از ماسک‌گذاری شاخص پوشش گیاهی و همچنین استفاده از شاخص درجه خلوص پیکسلی پیشرفته، پیکسل‌های خالص با دقت بالایی تعیین شد؛ به گونه‌ای که با معرفی

این پیکسل‌ها به LSMM و حل مدل به صورت غیرشرطی، تعداد پیکسل‌های با سهم تعلق خارج از بازه [۰-۱] (پیکسل‌های نرسیده<sup>۱</sup> و رداشته<sup>۲</sup>) کمتر از ۵ درصد (۲/۹ درصد) برآورد شد که دقت بالای عناصر خالص و در نتیجه عملکرد بسیار خوب مدل را نشان می‌دهد (نیرومند جدیدی و همکاران، ۱۳۹۱؛ Mather, 2004).

مدل LSMM بر روی تصاویر TM (۱۹۹۸) و ETM+ (۲۰۰۱) پیاده‌سازی شد. سپس ماتریس تغییرات منطقه مطالعاتی (جدول ۳) با استفاده از نقشه‌های نسبتی به دست آمده از LSMM (شکل ۵) و براساس روش پیشنهادی برآورد شد.



شکل ۵ نقشه‌های نسبتی حاصل از LSMM، تصویر ETM+ سال ۲۰۰۱

1. under- shoot
2. over- shoot

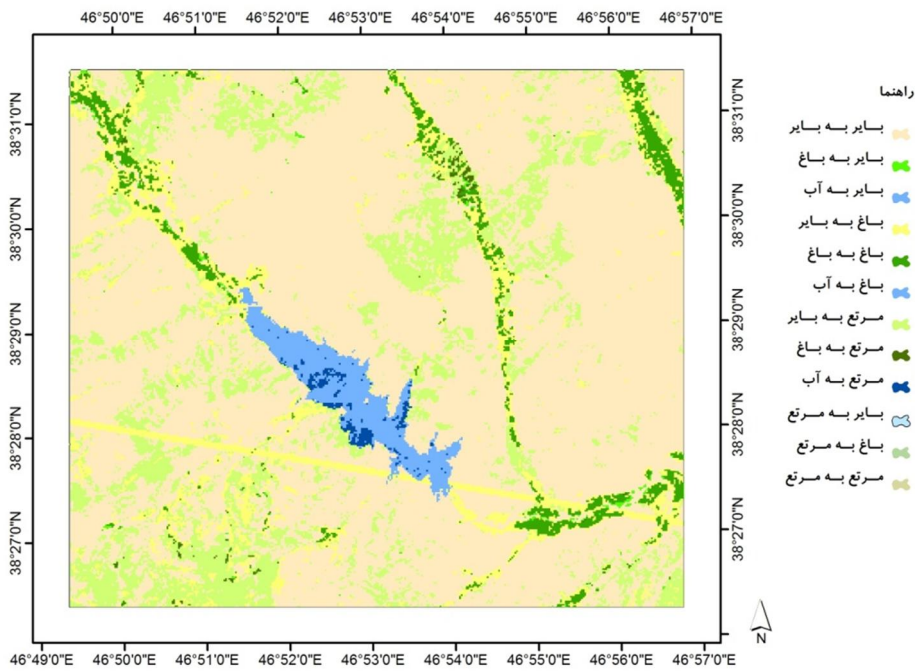
جدول ۳ تغییرات پوشش اراضی روش پیشنهادی (برحسب پیکسل)

تصویر TM (۱۹۸۹)				تصویر ETM+ (۲۰۰۱)
مرتع	باغ	بایر		
۳۳۷۵۷/۳۳	۷۱۲/۶۱	۸۰۶۰۴/۰۴	بایر	
۱۶۱۳/۲۱	۳۱۳۵/۱۳	۱/۶۹	باغ	
۲۳۴/۶۱	۹۸/۰۲	۱۶/۰۳	مرتع	
۲۶۰۵/۷۱	۷۵۸/۸۸	۱۹۵۸/۴۴	آب	
۳۸۲۱۰/۸۶	۴۷۰۴/۶۴	۸۲۵۸۰/۲۰	کل کلاس	
۳۷۹۷۶/۲۵	۱۵۶۹/۵۱	۱۹۷۶/۱۶	تغییرات کلاس	

در ادامه، تصاویر مورد نظر با استفاده از الگوریتم SVM طبقه‌بندی شد. با توجه به اینکه تصاویر مورد استفاده برای آشکارسازی تغییرات در اغلب موارد تصاویر آرشیوی هستند و دسترسی به داده‌های زمینی معمولاً امکان‌پذیر نیست، دانش فنی درباره منطقه، بهره‌گیری از تفسیر بصری و تحلیل‌های پردازش تصویری نقش کلیدی در استخراج نقاط کنترل (نمونه‌های آموزشی) و نقاط چک (جهت ارزیابی) دارند (Lu Et al., 2009). در این تحقیق، ضمن به‌کارگیری همه این عوامل برای استخراج داده‌های کنترل و چک، از طبقه‌بندی‌کننده SVM استفاده شد تا به تعداد نمونه‌های آموزشی وابستگی اندکی وجود داشته باشد (Pal & Mather, 2004; Waske & Benediktsson, 2007). براساس نتایج، دقت کلی طبقه‌بندی با در نظر گرفتن نقاط کنترل و چک مستقل برای تصاویر TM و ETM+ به ترتیب ۹۱/۳۴ درصد و ۹۴/۵۶ درصد برآورد شد. با توجه به قانون انتشار خطا، انتظار می‌رود نقشه تغییرات نیز دقت بالایی داشته باشد. از سوی دیگر، با لحاظ کردن تعداد مناسبی نقطه چک تغییرات، دقت کلی تغییرات بیش از ۹۰ درصد برآورد شد. در ادامه، ماتریس تغییرات (جدول ۴) و نقشه تغییرات (شکل ۶) براساس روش مقایسه پس از طبقه‌بندی تولید شد.

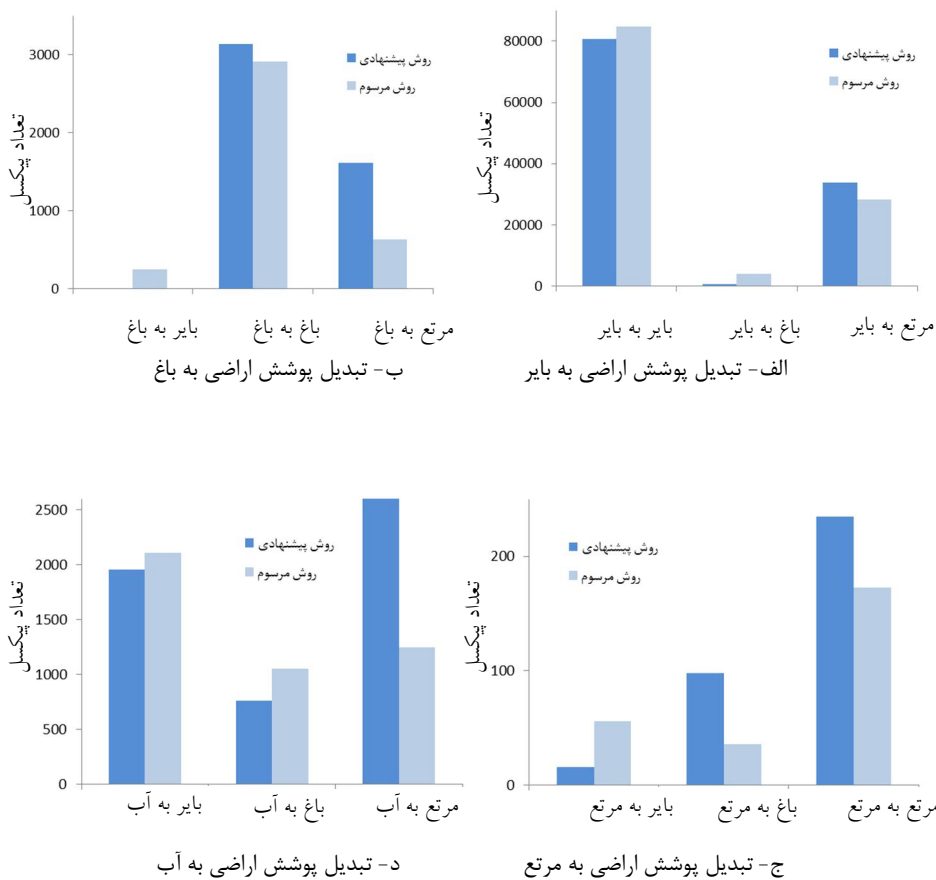
جدول ۴ تغییرات پوشش اراضی روش مقایسه پس از طبقه‌بندی (برحسب پیکسل)

تصویر TM (۱۹۸۹)				تصویر ETM+ (۲۰۰۱)
مرتع	باغ	بایر		
۲۸۳۰۴	۴۰۰۳	۸۴۷۱۳	بایر	
۶۳۲	۲۹۱۳	۲۵۳	باغ	
۱۷۳	۳۶	۵۶	مرتع	
۱۲۵۱	۱۰۵۱	۲۱۱۱	آب	
۳۰۳۶۰	۸۰۰۳	۸۷۱۳۳	کل کلاس	
۳۰۱۸۷	۵۰۹۰	۲۴۲۰	تغییرات کلاس	



شکل ۶ نقشهٔ تغییرات کاربری منطقهٔ مطالعاتی، ۱۹۸۹-۲۰۰۱

در نهایت، نتایج برآمده از دو روش به صورت آماری ارزیابی شد (شکل ۷). براساس نتایج، درباره تغییرات کلاس‌های همگن، عملکرد دو روش تقریباً مشابه است؛ اما درباره کلاس‌های غیرهمگن تفاوت بسیاری در میزان تغییرات به دست آمده از دو روش وجود دارد. با توجه به عملکرد ضعیف طبقه‌بندی‌کننده‌های سخت در حضور کلاس‌های غیرهمگن (پیکسل‌های با تغییرات متناوب) این امر منطقی به نظر می‌رسد.



شکل ۷ مقایسه آماری روش پیشنهادی و روش مرسوم آشکارسازی تغییرات پوشش اراضی (برحسب پیکسل)



#### ۴- بحث و نتیجه‌گیری

پیکسل‌های مخلوط عدم قطعیت زیادی را در کاربردهای مختلفی که بر روش‌های طبقه‌بندی سخت استوارند، ایجاد می‌کنند. نتایج روش‌های مرسوم آشکارسازی تغییرات نیز به سبب استفاده از این نوع طبقه‌بندی‌کننده‌ها با عدم قطعیت همراه است. در سال‌های اخیر، روش‌های پیشرفته آشکارسازی تغییرات به صورت زیرپیکسلی (نرم) مورد توجه قرار گرفته است. با این حال، در این روش‌ها برای تعیین چگونگی تبدیل کلاس‌ها به یکدیگر (اطلاعات «از-به»)، نتایج طبقه‌بندی نرم مربوط به تصاویر چندزمانه در یک فرایند پس‌پردازش به حالت تک‌برچسبی (سخت) تبدیل شده است و مانند روش‌های رایج مقایسه پس از طبقه‌بندی، تغییرات استخراج می‌شود.

در تحقیق حاضر، برای به حداقل رساندن عدم قطعیت مربوط به پیکسل‌های مخلوط، روشی نوین برای استخراج تغییرات کلاس‌ها به طور کاملاً نرم پیشنهاد شده است. وجه تمایز این روش با سایر روش‌های پیشرفته زیرپیکسلی در این است که در روش پیشنهادی، میزان تغییرات کلاس‌ها به طور مستقیم از روی نتایج طبقه‌بندی نرم استخراج می‌شود و نیازی به تبدیل نقشه‌های نسبتی به حالت سخت نیست. به این ترتیب، اطلاعات زیرپیکسلی به طور کامل در فرایند استخراج تغییرات حفظ می‌شوند. نتایج حاصل از روش پیشنهادی با روش مرسوم مقایسه پس از طبقه‌بندی ارزیابی شد؛ به گونه‌ای که انتظار می‌رفت روش مقایسه پس از طبقه‌بندی میزان تغییرات را نسبت به روش پیشنهادی، کمتر (۹/۲ درصد) برآورد کند.

براساس نتایج تحقیق، روش پیشنهادی در کلاس‌های همگن (مانند آب) تقریباً شبیه به روش مرسوم آشکارسازی تغییرات عمل می‌کند؛ اما در کلاس‌های با تغییرات پیوسته در سطح پیکسل (مانند مرتع)، تفاوت آشکاری وجود دارد. با توجه به تک‌برچسبی بودن نتایج طبقه‌بندی سخت، این موضوع دور از انتظار نیست. با توجه به اینکه در مطالعات محیطی برای برآورد تغییرات کاربری، از تصاویر با قدرت تفکیک مکانی متوسط یا پایین استفاده می‌شود، سهم جزئی در سطح زیرپیکسل نیز می‌تواند مساحت بسیاری را به خود اختصاص دهد. این نکته اهمیت استفاده از روش‌های آشکارسازی تغییرات مبتنی بر طبقه‌بندی‌کننده‌های نرم را دوبار می‌کند. تصاویر مورد استفاده در این تحقیق، Landsat هستند. بدیهی است در



مقیاس‌های جهانی که از تصاویر با قدرت تفکیک پایین‌تر (مانند MODIS) استفاده می‌شود، میزان تفاوت بین دو روش به دلیل زیاد بودن مشکل پیکسل‌های مخلوط، بسیار زیاد خواهد بود.

## ۵- پیشنهادها

دقت روش پیشنهادی تحت تأثیر عملکرد مدل اختلاط طیفی است. از سوی دیگر، کارایی این مدل به کیفیت پیکسل‌های خالص وابسته است. بنابراین، پیکسل‌های خالص در دقت نهایی استخراج اطلاعات تغییرات نقش کلیدی دارند. با اینکه در این تحقیق با بهره‌گیری از دانش فنی موجود درباره منطقه و همچنین استفاده از تکنیک‌های پیشرفته استخراج عناصر خالص، پیکسل‌های خالص با دقت بسیار بالایی به مدل معرفی شد، بررسی تأثیر روش‌های مختلف استخراج عناصر خالص و همچنین استفاده از سایر طبقه‌بندی‌کننده‌های نرم (مانند شبکه‌های عصبی) می‌تواند افق تحقیقات آتی در این حوزه باشد. همچنین، با آگاهی از این موضوع که مقادیر پیکسل‌های تصویر تحت تأثیر تابع انتشار نقطه‌ای (PSF) دچار تغییر می‌شود، انتظار می‌رود با کاهش اثر PSF، نتایج فرایند LSMM به واقعیت نزدیک‌تر شود.

با توجه به نامعلوم بودن موقعیت زیرپیکسل‌ها برای کلاس‌های مختلف در روش‌های طبقه‌بندی نرم، نقشه تغییرات در روش پیشنهادی قابل تولید نیست و فقط ماتریس تغییرات با دقت بالایی به دست می‌آید. در مواردی که نقشه تغییرات مورد توجه باشد، استفاده از روش‌های تهیه نقشه در سطح زیرپیکسل (SRM<sup>1</sup>) پیشنهاد می‌شود. اما بایست توجه کرد که در این روش‌ها جانمایی مکانی زیرپیکسل‌ها با عدم قطعیت‌هایی همراه است (Atkinson, 2009; Niroumand Et al., 2012) که می‌تواند موجب کاهش دقت «اطلاعات تغییرات» شود. بنابراین، با اینکه روش‌های SRM اطلاعات مکانی زیرپیکسلی در مورد تغییرات را فراهم می‌آورند، به کاهش دقت «اطلاعات تغییرات» منجر می‌شوند. در این تحقیق نیز برای استخراج اطلاعات دقیق تغییرات از تولید نقشه تغییرات زیرپیکسلی صرف‌نظر شد و روش ارائه شده در زمینه استخراج اطلاعات تغییرات به صورت زیرپیکسلی است. روش پیشنهادی با فراهم آوردن

1. Super Resolution Mapping

اطلاعات آماری دقیق در مورد تغییرات کاربری، می‌تواند به‌نحو شایانی در مدیریت و برنامه‌ریزی بهینه محیطی مؤثر واقع شود.

## ۶- منابع

- ارگانی، میثم، نظارت بر توسعه مناطق شهری با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای به‌روش آنالیز ترکیب طیفی و مقایسه پس از طبقه‌بندی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، تهران: دانشکده فنی دانشگاه تهران، ۱۳۸۵.
- اکبری، الهه، میلاد نیرومند جدیدی، محمدرضا صاحبی و هانا قادری‌زاده، «ارزیابی دقت طبقه‌بندی‌کننده‌های بیشترین شباهت و ماشین‌بردار پشتیبان (مطالعه موردی: استخراج تغییرات کاربری اراضی حوضه آبخیز طالقان)» در مجموعه مقالات همایش ملی ژئوماتیک، سازمان نقشه‌برداری کشور، تهران، ۱۳۹۰.
- نیرومند جدیدی، میلاد، مجتبی جنتی، محمدرضا صاحبی و مهدی مختارزاده، «ارزیابی و بهینه‌سازی نتایج شاخص درجه خلوص پیکسلی به‌منظور استفاده در مدل اختلاط طیفی خطی» در همایش ملی ژئوماتیک، سازمان نقشه‌برداری کشور، تهران (مقاله برتر)، ۱۳۹۱.
- Adams, J.B., D. Sabol, V. Kapos, R.A. Filho, D.A. Roberts, M.O. Smith & A.R. Gillespie, "Classification of Multispectral Images Based on Fractions of Endmembers: Application to Land-Cover Change in the Brazilian Amazon", *Remote Sensing of Environment*, 52, Pp. 137-154, 1995.
- \_\_\_\_\_ "Classification of Multispectral Images Based on Fractions of Endmembers: Application to Land-Cover Change in the Brazilian Amazon", *Remote Sensing of Environment*, 52, 137-154, 1995.
- Atkinson, P.M., "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), Pp. 5293-5308, 2009.

- Atkinson, P.M., M.E.J. Cutler, & H. Lewis, "Mapping Sub-Pixel Proportional Land Cover with AVHRR Imagery", *International Journal of Remote Sensing*, 18 (4), Pp. 917-935, 1997.
- Campbell, J.B., *Introduction to Remote Sensing*, Third Edition, London: Taylor and Francis, 2002.
- Castelli, V., C.D. Elvidge, C.S. Li & J.J. Turek, "Classification-Based Change Detection: Theory and Applications to the NALC Data Sets" in R.S. Lunetta & C.D. Elvidge (Eds.), *Remote Sensing Change Detection: Environmental Monitoring Methods and Applications*, Chelsea, MI: Ann Arbor Press, Pp. 53-73, 1998.
- Crapper, P.F., "An Estimate of the Number of Boundary Cells in a Mapped Landscape Coded to Grid Cells", *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 50, Pp. 1497-1503, 1994.
- 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*, 12, Pp. 1119-1129, 1991.
- Dimiyati, M., K. Mizuno, S. Kobayashi & T. Kitamura, "An Analysis of Land Use/ Cover Change Using the Combination of MSS Landsat and Land Use Map: A Case Study in Yogyakarta, Indonesia", *International Journal of Remote Sensing*, 17, Pp. 931-944, 1996.
- Drake, N. & K. White, "Linear Mixture Modeling of Landsat Thematic 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*, 18(3), Pp. 679-685, 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.
- \_\_\_\_\_ "Monitoring the Magnitude of Land-Cover Change Around the Southern Limits of the Sahara", *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 67, Pp. 841-847, 2001.
- Jensen, J.R., E.W. Ramsay, H.E. Mackey, E.J. Christensen & R.P. Sharitz, "Inland Wetland Change Detection Using Aircraft MSS Data", *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 53, Pp. 521-529, 1987.
- Jensen, J.R., K. Rutchey, M.S. Koch & S. Narumalani, "Inland Wetland Change Detection in the Everglades Water Conservation Area: Using a Time Series of Normalized Remotely Sensed Data", *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 61, Pp. 199-209, 1995.
- Lu, D., M. Batistella & E. Moran, "Multitemporal Spectral Mixture Analysis for Amazonian Land-Cover Change Detection", *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 30, No. 1, Pp. 87-100, 2004.
- Lu, D., P. Mausel, E. Brondizio & E. Moran, "Change Detection Techniques", *International Journal of Remote Sensing*, 25: 12, Pp. 2365-2401, 2009.
- Lucas, N.S., S. Shanmugam & M. Barnsley, "Sub-Pixel Habitat Mapping of a Coastal Dune Ecosystem", *Applied Geography*, 22, Pp. 253-270, 2002.

- Mas, J.F., "Monitoring Land-Cover Changes: A Comparison of Change Detection Techniques", *International Journal of Remote Sensing*, 20, Pp. 139-152, 1999.
- Mather, P.M., *Computer Processing of Remotely-Sensed Images: An Introduction*, Third Edition, London: John Wiley & Sons Ltd, 2004.
- Munyati, C., "Wetland Change Detection on the Kafue Flats, Zambia, by Classification of a Multitemporal Remote Sensing Image Dataset", *International Journal of Remote Sensing*, 21, Pp. 1787-1806, 2000.
- Niroumand, J.M., A.R. Safdarinezhad, M.R. Sahebi, & M. Mokhtarzade, "A Novel Approach to Super Resolution Mapping of Multispectral Imagery Based on Pixel Swapping Technique", *Peer-Reviewed ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, I-7, Pp. 159-164, 2012.
- Pal, M. & P.M. Mather, "Assessment of the Effectiveness of Support Vector Machines for Hyperspectral Data", *Future Generation Computer Systems*, 20, Pp. 1215-1225, 2004.
- Roberts, D.A., G.T. Batista, J.L.G. Pereira, E.K. Waller & B.W. Nelson, "Change Identification Using Multitemporal Spectral Mixture Analysis: Applications in Eastern Amazonia" in R.S. Lunetta & C.D. Elvidge (Eds.), *Remote Sensing Change Detection: Environmental Monitoring Methods and Applications*, Chelsea, MI: Ann Arbor Press, Pp. 137-161, 1998.
- Rogan, J., J. Franklin & D.A. Roberts, "A Comparison of Methods for Monitoring Multitemporal Vegetation Change Using Thematic Mapper Imagery", *Remote Sensing of Environment*, 80, Pp. 143-156, 2002.

- Settle, J.J. & N.A. Drake, "Linear Mixing and the Estimation of Ground Cover Proportions", *International Journal of Remote Sensing*, 14, Pp. 1159-1177, 1993.
- Sohl, T., "Change Analysis in the United Arab Emirates: An Investigation of Techniques", *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 65, Pp. 475-484, 1999.
- 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.
- Ustin, S.L., D.A. Roberts & Q.J. Hart, "Seasonal Vegetation Patterns in a California Coastal Savanna Derived from Advanced Visible/ Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS) Data" in R.S. Lunetta & C.D. Elvidge (Eds.), *Remote Sensing Change Detection: Environmental Monitoring Methods and Applications*, Chelsea, MI: Ann Arbor Press, Pp. 163-180, 1998.
- Waske, B. & J.A. Benediktsson, "Fusion of Support Vector Machines for Classification of Multisensor Data", *IEEE T. Geosci. Remote Se.*, 45(12), Pp. 3858-3866, 2007.
- Williamson, H.D., "Estimating Sub-Pixel Components of a Semi-Arid Woodland", *International Journal of Remote Sensing*, 15, Pp. 3303-3307, 1994.
- Wu, C. & A.T. Murray, "Estimating Impervious Surface Distribution by Spectral Mixture Analysis", *Remote Sensing of Environment*, 84, Pp. 493-505, 2003.