



سنجش از دور

GIS ایران

سنجش از دور و GIS ایران  
Iranian Remote Sensing & GIS

۱-۱۶



## ارزیابی و بهبود عملکرد الگوریتم شبیه‌سازی تبرید به منظور تهیه نقشه پوشش اراضی در سطح زیرپیکسل با استفاده از تصاویر چندطیفی

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

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

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۳/۳/۲۸

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۱/۵/۴

### چکیده

یکی از چالش‌های بسیار مهم در تهیه نقشه پوشش اراضی با استفاده از تصاویر سنجش از دور، مشکل مربوط به پیکسل‌های مخلوط است. با توسعه روش‌های تجزیه اختلاط طیفی و طبقه‌بندی‌کننده‌های نرم، امکان برآورد سهم کلاس‌ها در سطح زیرپیکسل فراهم می‌آید و برچسب‌های چندگانه به پیکسل‌ها اختصاص داده می‌شود. با وجود این، تولید نقشه پوششی در سطح زیرپیکسل نیازمند جانمایی مکانی زیرپیکسل‌ها است. در سال‌های اخیر، روش‌های تهیه نقشه در سطح زیرپیکسل توسعه یافته‌اند و با استفاده از نتایج طبقه‌بندی‌کننده‌های نرم و بهره‌گیری از مفاهیم وابستگی مکانی، آرایش مکانی زیرپیکسل‌ها را بهینه‌سازی می‌کنند. در این تحقیق، دقت کلی الگوریتم شبیه‌سازی تبرید برای تهیه نقشه پوششی در سطح زیرپیکسل مورد ارزیابی قرار گرفته و همچنین، مکانیزم جدیدی در این روش، برای تولید پاسخ‌های جدید در هر مرحله از الگوریتم پیشنهاد شده و با نتایج روش موجود مقایسه شده است. از دیگر سو، پارامترهای مؤثر بر عملکرد الگوریتم مانند ضریب بزرگنمایی، نوع تابع خنک‌سازی و تکرارهای ایستا و پویا در عملکرد الگوریتم بررسی شده‌اند. در فرایند ارزیابی دقت کلی الگوریتم، دو روش مستقل از خطای طبقه‌بندی نرم و وابسته به این خطا لحاظ شده است. براساس نتایج، افزایش ضریب بزرگنمایی موجب کاهش دقت الگوریتم شبیه‌سازی تبرید شده و همچنین، تابع خنک‌سازی هندسی به لحاظ دقت و زمان اجرای الگوریتم، به‌منزله تابع بهینه انتخاب شده است. از طرف دیگر، تکرارهای پویا نیز، در مقایسه با حالت ایستا دقت بیشتری داشته است. روش پیشنهادی برای تولید پاسخ‌های جدید در الگوریتم شبیه‌سازی تبرید دستاورد مهم تحقیق به شمار می‌آید که دقت کلی را به نسبت روش موجود، افزایش داده و همچنین، زمان اجرای الگوریتم را تا ۵۰٪ کاهش داده است. بیشترین دقت کلی الگوریتم براساس روش پیشنهادی و مستقل از خطای طبقه‌بندی نرم ۹۴/۹۷٪ برآورد شد.

**کلید واژه‌ها:** پوشش اراضی، زیرپیکسل، طبقه‌بندی نرم، الگوریتم شبیه‌سازی تبرید، تابع خنک‌سازی، ضریب بزرگنمایی

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: گروه مهندسی سنجش از دور، دانشکده مهندسی ژئودزی و ژئوماتیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی تهران، خیابان ولی‌عصر، تقاطع میرداماد، کدپستی ۱۹۹۶۷-۱۵۴۳۳ تلفن: ۸۸۸۸۸۴۴۵

## ۱- مقدمه

تهیه نقشه پوشش اراضی یکی از کاربردهای بسیار متداول و مهم تصاویر سنجنش از دور بوده و بدین منظور، روش‌های گوناگونی برای طبقه‌بندی تصاویر توسعه یافته است (Fody, 1996; Friedl et al., 2002; Brown de Coulston et al., 2003). با وجود این، اغلب روش‌های طبقه‌بندی تصاویر طبقه‌بندی‌کننده‌های سخت‌اند که قادر به مدل‌سازی پیکسل‌های مخلوط و استخراج اطلاعات در سطح زیرپیکسل نیستند. پیکسل‌های مخلوط به دلیل حضور عوارض زیرپیکسلی یا اختلاط طیفی ناشی از قرار گرفتن عوارض در پیکسل‌های مرزی اتفاق می‌افتند (Cracknell, 1998; Fisher, 1997). میزان بازتابندگی ثبت‌شده برای هر پیکسل مخلوط به صورت ترکیبی از رفتار طیفی کلاس‌های پوششی گوناگون حاضر در سطح آن پیکسل است. بدین ترتیب، این پیکسل‌ها مشکل عمده‌ای در تهیه نقشه پوشش اراضی ایجاد می‌کنند و روش‌های طبقه‌بندی سخت، به دلیل تک‌برجسی بودن خروجی آن‌ها، قادر به مدل‌سازی دقیق پیکسل‌های مخلوط نیستند. در این راستا، روش‌های طبقه‌بندی نرم<sup>۲</sup> با ماهیت اختصاص برجسب‌های چندگانه و برآورد سهم هر یک از کلاس‌ها در سطح زیرپیکسل توسعه یافته است. شبکه‌های عصبی مصنوعی (Kanellopoulos et al., 1992; Paola and Schowengerdt, 1995) مدل اختلاط طیفی خطی (LSMM)<sup>۳</sup> (Fody and Cox, 1994; Garcia-Haro et al., 1996) و c-means فازی (Fody and Cox, 1994) از روش‌های متداول طبقه‌بندی نرم به شمار می‌روند. خروجی طبقه‌بندی‌کننده‌های نرم نقشه‌ای نسبتی<sup>۴</sup> به ازای هر یک از کلاس‌های موجود در طبقه‌بندی است و بدین ترتیب، سهم هر یک از کلاس‌ها در داخل پیکسل‌ها تعیین می‌شود. اما به‌رغم حصول اطلاعات ماهیتی در سطح زیرپیکسل، نحوه آرایش مکانی زیرپیکسل‌ها نامعلوم است و در واقع، نقشه‌ای پوششی تولید نمی‌شود (Villa et al., 2011; Atkinson, 2005). تشخیص عوارض در سطح زیرپیکسل معمولاً

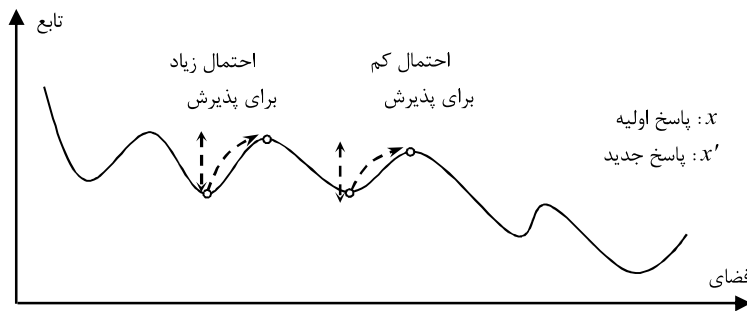
درمورد تصاویر با قدرت تفکیک طیفی بالا مطرح می‌شود. قدرت تفکیک مکانی و قدرت تفکیک طیفی سنجنده‌های فضا برد معمولاً رابطه معکوس دارند (González-Audicana et al., 2004) و با افزایش قدرت تفکیک مکانی، مانند تصاویر IKONOS، قدرت تفکیک طیفی و در واقع، قدرت استخراج اطلاعات ماهیتی و پوششی تصاویر کاهش می‌یابد. از این رو، می‌شود گفت که معمولاً در تصاویر با قدرت تفکیک طیفی بالا، به‌رغم قابلیت تشخیص ماهیتی عوارض در سطح زیرپیکسل، قدرت تفکیک مکانی پایین در جانمایی این عوارض را ضعف این تصاویر بر می‌شمارند. بنابراین در سال‌های اخیر، روش‌های SRM<sup>۵</sup> به منظور تولید نقشه پوششی در سطح زیرپیکسل، براساس نتایج طبقه‌بندی نرم، توسعه یافته است. در واقع، این روش‌ها با تعیین آرایش مکانی کلاس‌های گوناگون در سطح پیکسل که سهم آن‌ها با استفاده از طبقه‌بندی نرم به دست آمده، امکان تهیه نقشه پوششی را با قدرت تفکیک مکانی بالاتر از تصویر اصلی فراهم می‌کنند (Atkinson, 2005; Atkinson, 2009; Villa et al., 2011). از مزیت‌های مهم روش‌های SRM می‌شود به امکان تهیه نقشه با قدرت تفکیک مکانی بالا از تصاویر با قدرت تفکیک مکانی متوسط، مانند Landsat و Spot، یا پایین، مانند MODIS، اشاره کرد که در واقع، هر دو قابلیت قدرت تفکیک طیفی و مکانی بالا را همزمان فراهم می‌کند. همچنین، تصاویر با قدرت تفکیک مکانی متوسط / پایین، در مقایسه با تصاویر با قدرت تفکیک مکانی بالا، مقرون به صرفه‌تر و دسترس‌پذیرترند. بنابراین، استخراج اطلاعات ماهیتی و موقعیتی در سطح زیرپیکسل براساس الگوریتم‌های SRM و با استفاده از تصاویر با قدرت تفکیک مکانی متوسط / پایین می‌تواند نقش بسزایی را در استخراج دقیق پوشش اراضی و تهیه نقشه پوششی در سطح زیرپیکسل ایفا کند.

1. Hard Classifiers
2. Soft Classification
3. Linear Spectral Mixture Model
4. Fractional Maps
5. Super Resolution Mapping

می‌گیرد. در این فرایند، هنگام افزایش حرارت فلزات، سرعت جنبش اتم‌های آن به شدت افزایش می‌یابد و در مرحله بعد، کاهش تدریجی دما و پایین آمدن سطح انرژی موجب شکل‌گیری الگوهای خاص در جایگیری اتم‌های آن و افزایش استحکام فلز می‌شود. اگر دمای اولیه به اندازه کافی بالا نباشد و یا کاهش دما به تدریج صورت نگیرد، حالت پایدار به وجود نمی‌آید و فلز استحکام کمتری خواهد داشت (Kirkpatrick et al., 1983). برای حل مسئله بهینه‌سازی با الگوریتم شبیه‌سازی تبرید، ابتدا پاسخ اولیه‌ای در نظر گرفته می‌شود و سپس، در یک حلقه تکرار، به پاسخ‌های همسایه حرکت می‌کند. حالت ایده‌آل در این الگوریتم این است که حرکت از پاسخ فعلی به پاسخ همسایه، موجب کاهش تابع هزینه، یعنی کاهش سطح انرژی، شود. در این صورت، الگوریتم پاسخ همسایه را به‌منزله پاسخ فعلی می‌پذیرد اما برای حرکات بالارونده<sup>۷</sup> که موجب افزایش تابع هزینه یا افزایش سطح انرژی می‌شوند نیز، یک احتمال پذیرش در نظر گرفته می‌شود. این ویژگی احتمال گرفتار شدن الگوریتم در کمینه‌های محلی را کاهش می‌دهد (شکل ۱). بدین منظور، الگوریتم پاسخ همسایه را با احتمال  $exp(-\Delta C/T)$  به‌منزله پاسخ فعلی می‌پذیرد. در این رابطه  $\Delta C$  تفاوت بین تابع هزینه پاسخ فعلی و پاسخ همسایه است و  $T$  پارامتری به نام دما است. در هر دما، چندین تکرار اجرا می‌شود و سپس پارامتر دما به آرامی کاهش داده می‌شود. در گام‌های اولیه، دما خیلی بالا در نظر گرفته می‌شود تا احتمال بیشتری برای پذیرش پاسخ‌های نامناسب ناشی از حرکات بالارونده وجود داشته باشد. با کاهش تدریجی دما، در گام‌های پایانی احتمال کمتری برای پذیرش حرکات بالارونده وجود خواهد داشت و بنابراین، الگوریتم به سمت پاسخ خوب همگرا می‌شود (Talbi, 2009).

1. Hopfield Neural Network
2. Simulated Annealing
3. Pixel Swapping
4. Spatial Optimization
5. Spatial Dependency
6. Metaheuristic
7. Uphill Move

Atkinson (۱۹۹۷) نخستین فردی بود که تهیه نقشه پوششی در سطح زیرپیکسل را براساس خروجی طبقه‌بندی نرم، یعنی تکنیک‌های SRM، پیشنهاد داد. تاکنون روش‌های گوناگونی از SRM، مانند الگوریتم ژنتیک (Mertens et al., 2003)، شبکه عصبی Hopfield<sup>۱</sup> (HNN) (Tatem et al., 2002, 2003)، شبیه‌سازی تبرید<sup>۲</sup> (Villa et al., 2011) و معاوضه پیکسلی<sup>۳</sup> (Atkinson, 2005; Thornton et al., 2006; Niroumand et al., 2013)، ارائه شده است. الگوریتم‌های شبیه‌سازی تبرید و معاوضه پیکسلی به علت برخورداری از محاسبات نسبتاً ساده، جزء روش‌های مورد توجه سال‌های اخیر در حوزه SRM محسوب می‌شوند (Atkinson, 2005; Thornton et al., 2006; Villa et al., 2011). این الگوریتم‌ها مبتنی بر اصول بهینه‌سازی مکانی<sup>۴</sup> هستند و با بیشینه کردن وابستگی مکانی<sup>۵</sup> بین پیکسل‌ها، آرایش بهینه زیرپیکسل‌ها را تعیین می‌کنند (Kasetkasem et al., 2005; Atkinson, 2005). وابستگی مکانی بر قانون اول جغرافیا استوار است که نخستین بار Tobler (۱۹۷۰) آن را ارائه کرد. طبق این قانون، زیرپیکسل‌های نزدیک به یکدیگر باید شباهت ماهیتی بیشتری به هم داشته باشند. بر این اساس، هر پیکسل به تعداد مشخصی زیرپیکسل تقسیم و هر یک از آن‌ها به یک کلاس اختصاص داده می‌شود. در فرایند اختصاص برجسب به زیرپیکسل‌ها، از سهم کلاس‌های گوناگون حاضر در سطح پیکسل برای برآورد تعداد زیرپیکسل‌های هر کلاس، و از مفهوم وابستگی مکانی جهت تعیین آرایش مکانی زیرپیکسل‌ها استفاده می‌شود. الگوریتم شبیه‌سازی تبرید بر مبنای فرایند تبرید یا بازپخت فلزات بنا نهاده شده (Kirkpatrick et al., 1983; Cerny, 1985) و به صورت روشی فراابتکاری<sup>۶</sup> در حل مسائل بهینه‌سازی به کار رفته است (Dekkers and Aarts, 1991; Locatelli, 2000; Ozdamar and Demiran, 2000). در فرایند تبرید، ابتدا حرارت فلزات را تا دمای بسیار بالایی افزایش می‌دهند و سپس فرایند سردسازی با کاهش تدریجی دما روی آن‌ها صورت



شکل ۱. نمایش شماتیک نحوه گذر از کمینه محلی در الگوریتم شبیه‌سازی تبرید (Talbi, 2009)

اگرچای محسوب می‌شود 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 ۲). پوشش غالب در منطقه مطالعاتی شامل چهار کلاس باغ، مرتع، زمین بایر و آب است و ابعاد تصویر ۹۰۰×۹۰۰ پیکسل انتخاب شده است.

## ۲-۲- الگوریتم شبیه‌سازی تبرید و پارامترهای مؤثر در عملکرد آن

الگوریتم شبیه‌سازی تبرید، با در نظر گرفتن احتمالی برای پذیرش حرکات بالارونده، احتمال گذر از کمینه‌های محلی را افزایش می‌دهد و ویژگی بسیار مهم این الگوریتم محسوب می‌شود. براساس قوانین ترمودینامیک، در دمای  $T$  احتمال افزایش انرژی به میزان  $\Delta C$  از رابطه (۱) به دست می‌آید

$$P(\Delta C, T) = \begin{cases} 1 & \text{if } \exp\left(\frac{-\Delta C}{kT}\right) > r \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

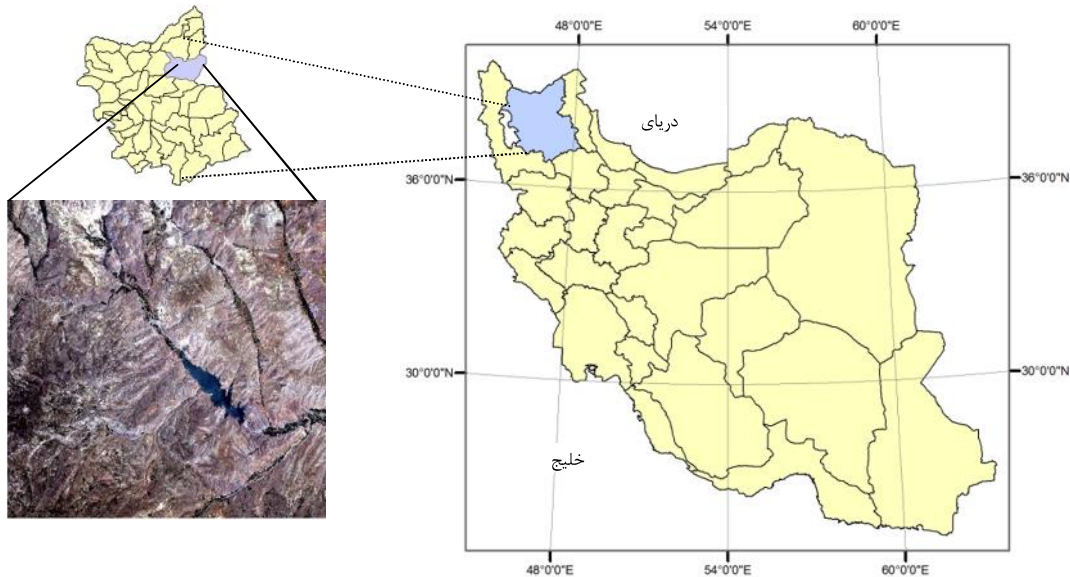
در رابطه (۱)،  $k$  ثابت فیزیکی بولتزمن<sup>۳</sup>، و  $r$  عددی تصادفی با توزیع یکنواخت در بازه (۰ و ۱) است. این رابطه به طور مستقیم در الگوریتم شبیه‌سازی تبرید به کار می‌رود. بدین منظور،  $k$  برابر واحد در نظر گرفته می‌شود و در صورتی که مقدار افزایش تابع هزینه ( $\Delta C$ ) به ازای دمای  $T$  در رابطه (۱) صدق کند، حرکت

Villa و همکارانش (۲۰۱۱) با تعریف تابع هزینه براساس مجموع محیط‌های دربرگیرنده کلاس‌های پوششی گوناگون در تصویر، از الگوریتم شبیه‌سازی تبرید برای بهینه‌سازی آرایش مکانی زیرپیکسل‌ها استفاده کرده‌اند. با این حال، عملکرد دقیق این الگوریتم و تأثیر پارامترهای گوناگون در آن ارزیابی نشده است. هدف اصلی این تحقیق، ارزیابی دقیق و ارائه راهکاری برای بهبود عملکرد الگوریتم شبیه‌سازی تبرید، جهت تهیه نقشه در سطح زیر پیکسل است. همچنین، بررسی تأثیر پارامترهای این الگوریتم بر دقت نهایی از دیگر اهداف تحقیق حاضر است. بدین منظور، نخست عملکرد الگوریتم شبیه‌سازی تبرید برای تهیه نقشه در سطح زیرپیکسل به طور جامع ارزیابی شده است. سپس با استفاده از روشی جدید در مرحله تولید پاسخ، دقت کلی الگوریتم بهبود یافته و سرعت اجرای آن افزایش چشمگیری پیدا کرده است. همچنین، پارامترهای مؤثر در عملکرد الگوریتم (مانند ضریب بزرگنمایی ( $ZF$ )<sup>۱</sup> و نوع تابع خنک‌سازی<sup>۲</sup>) شناسایی شده و در دو حالت مستقل از خطای ورودی (طبقه‌بندی نرم) و وابسته به آن ارزیابی شده است.

## ۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه و داده‌های مورد استفاده  
در تحقیق حاضر از تصویر ماهواره‌ای ETM+ ماه می سال ۲۰۰۱ مربوط به حوضه آبریز سد ستارخان استفاده شده است. این منطقه یکی از زیرحوضه‌های

1. Zoom Factor  
2. Cooling Function  
3. Boltzmann



شکل ۲. تصویر ETM+ (۲۰۰۱) منطقه مورد مطالعه واقع در حوضه آبریز سد ستارخان

که در تعریف برنامه خنک‌سازی در نظر گرفته می‌شوند. - **دمای اولیه:** به منظور فائق آمدن بر مشکل کمینه‌های محلی، معمولاً دمای اولیه تا حد ممکن بالا در نظر گرفته می‌شود (Kirkpatrick et al., 1983). بدین ترتیب در مراحل اولیه، الگوریتم تقریباً به صورت تصادفی عمل می‌کند و بیشتر پاسخ‌های همسایه را پاسخ فعلی در نظر می‌گیرد. با پیشرفت الگوریتم، احتمال پذیرش حرکات بالارونده کاهش می‌یابد و الگوریتم به سمت پاسخ بهینه همگرا می‌شود.

- **تابع خنک‌سازی:** در الگوریتم شبیه‌سازی تبرید، دما باید به صورت تدریجی کاهش یابد، به گونه‌ای که در رابطه (۲) صدق کند

$$\forall i \quad T_i > 0, \quad \lim_{i \rightarrow \infty} T_i = 0 \quad (2) \text{ رابطه}$$

برای کاهش دما می‌شود توابع گوناگونی را مانند توابع خطی، هندسی و لگاریتمی در نظر گرفت (Geman and Geman, 1984; Talbi, 2009) (شکل ۳).

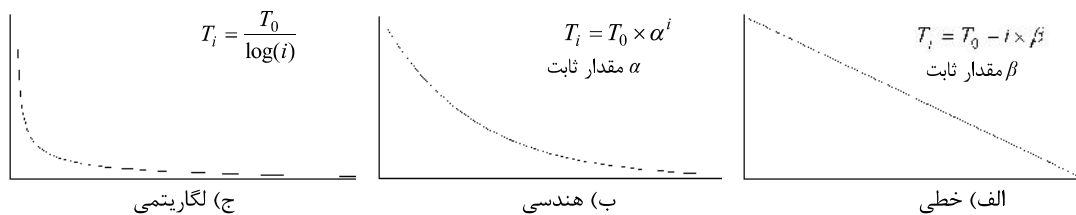
بالارونده مورد پذیرش قرار می‌گیرد و الگوریتم آن را به منزله پاسخ فعلی جایگزین می‌کند. با توجه به رابطه (۱)، با کاهش دما احتمال پذیرش حرکات بالارونده نیز کاهش می‌یابد و هنگامی که دما به صفر می‌رسد، فقط بهترین حرکت‌ها پذیرفته خواهند شد.

افزون بر عواملی مانند انتخاب پاسخ اولیه و تولید جواب‌های در همسایگی پاسخ اولیه، به طور کلی می‌شود برنامه خنک‌سازی<sup>۱</sup> جهت کاهش تدریجی پارامتر دما و نحوه تکرار در هر دما را عوامل اصلی در عملکرد الگوریتم شبیه‌سازی تبرید در نظر گرفت. در ادامه، پارامترهای تأثیرگذار در هر یک از این عوامل شناسایی می‌شود و در روند تهیه نقشه پوششی در سطح زیرپیکسل، مبتنی بر بهینه‌سازی شبیه‌سازی تبرید مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

## ۲-۲-۱- برنامه خنک‌سازی سیستم

برنامه خنک‌سازی برای هر مرحله از الگوریتم، دمای  $T_i$  را تعیین می‌کند و عملکرد الگوریتم شبیه‌سازی تبرید به شدت متأثر از انتخاب این برنامه است. دمای اولیه، تابع خنک‌سازی و شرط توقف الگوریتم پارامترهایی‌اند

### 1. Cooling Schedule



شکل ۳. توابع خنک‌سازی مورد استفاده در الگوریتم شبیه‌سازی تبرید (Talbi, 2009)

هزینه یادشده، روند کلی زیر پیاده شده است: سهم تعلق به دست آمده از طبقه‌بندی نرم برای کلاس شماره  $k$  در پیکسل با مختصات  $(x, y)$  به صورت  $F_k(x, y)$  مفروض است. با استفاده از رابطه (۳) تعداد زیرپیکسل‌های هر یک از کلاس‌ها داخل پیکسل مورد نظر محاسبه شد

$$NSP'_k(x, y) = [F_k(x, y) \times ZF^2] \quad (3)$$

در رابطه (۳)،  $ZF$  ضریب بزرگنمایی است که با اعمال آن هر پیکسل به تعداد  $ZF \times ZF$  زیرپیکسل تقسیم شد.  $NSP'_k(x, y)$  تعداد زیرپیکسل‌های مربوط به کلاس  $k$  در پیکسل  $(x, y)$  است. در ادامه، زیرپیکسل‌های مربوط به هر پیکسل به طور تصادفی جانمایی اولیه شدند. پس از جانمایی اولیه زیرپیکسل‌ها، برای دستیابی به آرایش بهینه، مجموع محیط محدوده‌های دربرگیرنده هر یک از کلاس‌ها تابع هزینه در نظر گرفته و کمینه شد. بدین منظور، محیط پلیگون‌های دربرگیرنده کلاس‌های از یک نوع پوشش (برچسب) محاسبه شد. در نهایت، مجموع محیط‌های محاسبه‌شده برای هر یک از کلاس‌ها تابع هزینه لحاظ شد (رابطه ۴).

$$C = \sum_{k=1}^m P_k \quad (4)$$

در رابطه بالا،  $C$  مقدار تابع هزینه،  $m$  تعداد کلاس‌ها و  $P_k$  محیط مربوط به کلاس  $k$  ام است. باید ذکر شود که جهت دستیابی به آرایش بهینه زیرپیکسل‌ها، همسایگی پیکسل‌ها نیز باید مدنظر قرار

– **شرط توقف:** رسیدن به دمای نهایی،  $T_F$ ، شرط بسیار متداول برای توقف الگوریتم شبیه‌سازی تبرید است. دمای نهایی باید مقدار اندکی داشته باشد (مانند  $T_F=0.01$ ). رسیدن به تعداد معینی تکرار که در آن پاسخ نهایی الگوریتم بدون تغییر باقی بماند نیز، می‌تواند شرط توقف در نظر گرفته شود (Saab and Rao, 1991).

#### ۲-۲-۲- نحوه تکرار در هر دما

در الگوریتم شبیه‌سازی تبرید، به ازای هر دما در برنامه خنک‌سازی، الگوریتم به تعداد معینی تکرار می‌شود. در این زمینه می‌شود دو حالت ایستا و پویا را در نظر گرفت. در حالت ایستا، در هر دما تعداد ثابت و معینی تکرار صورت می‌گیرد. در برنامه خنک‌سازی پویا، در دماهای بالا تکرارهای کمتری روی می‌دهد و با کاهش دما، تعداد تکرارهای الگوریتم به صورت هندسی (با ضرب عامل بزرگ‌تر از یک) یا حسابی (با افزودن عامل ثابت) افزایش می‌یابد (Ingber, 1996).

#### ۲-۳- بهبود عملکرد الگوریتم SRM مبتنی بر

##### بهینه‌سازی شبیه‌سازی تبرید

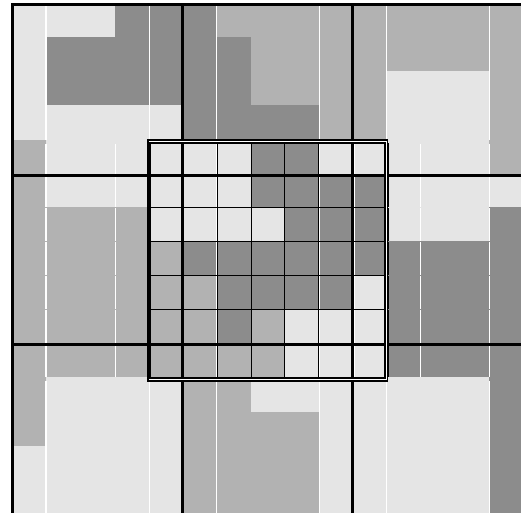
براساس مفهوم وابستگی مکانی، انتظار می‌رود زیرپیکسل‌های با ماهیت مشابه در مجاورت یکدیگر قرار بگیرند. بدین منظور، در تحقیق انجام‌شده به وسیله Villa و همکارانش (۲۰۱۱)، مجموع محیط مناطق دارای زیرپیکسل‌های با مشابهت طیفی (پوشش اراضی یکسان) تابع هزینه در الگوریتم شبیه‌سازی تبرید در نظر گرفته شده و با استفاده از این الگوریتم، کمینه شده است. در تحقیق حاضر نیز، با در نظر گرفتن تابع

روش پیشنهادی، به جای جایگشت کورکورانه تمامی زیرپیکسل‌ها، فقط برچسب دو زیرپیکسل تصادفی با ماهیت‌های متفاوت تعویض و تأثیر آن در مقدار تابع هزینه محاسبه شد. به عبارت دیگر، از تعویض بی‌مورد زیرپیکسل‌ها با ماهیت یکسان که بخش عمده زیرپیکسل‌های یک پیکسل را تشکیل می‌دهند، اجتناب شد.

پس از تکمیل مراحل بالا برای همه پیکسل‌های تصویری، روند یادشده در هر دما به تعداد معینی تکرار شد و با توجه به برنامه‌خنک‌سازی، دما کاهش یافت. برای توقف تکرار، دمای نهایی مقداری نزدیک به صفر در نظر گرفته شد. همچنین، برای تعیین تکرارهای الگوریتم در هر دما به دو روش ایستا و پویا عمل شد و نتایج حاصل مورد مقایسه قرار گرفت. روند کلی الگوریتم شبیه‌سازی تبرید برای تهیه نقشه پوششی در سطح زیرپیکسل در شکل ۵ نشان داده شده است. شایان ذکر است در تمامی محاسبات دمای اولیه ۵۰۰، دمای نهایی ۰/۰۱، مقدار ثابت در تابع خنک‌سازی خطی ( $\beta$ ) برابر با ۵ واحد و ضریب ثابت تابع هندسی ( $\alpha$ ) معادل ۰/۹۵ منظور شد.

با توجه به جدید بودن الگوریتم ارائه‌شده، ارزیابی دقت و عملکرد آن بسیار اهمیت دارد. بدین منظور، برای ارزیابی دقت کلی الگوریتم شبیه‌سازی تبرید دو روش در نظر گرفته شد. در روش نخست، مستقل از خطای طبقه‌بندی نرم و در روش دوم، در حضور این خطا، نحوه عملکرد و دقت‌های حاصل‌شده از الگوریتم ارزیابی شد. بدین ترتیب، الگوریتم پیشنهادی و الگوریتم ارائه‌شده از سوی Villa و همکارانش (۲۰۱۱) نیز مقایسه شده‌اند. همچنین، تأثیر پارامترهای گوناگون اعم از ضریب بزرگنمایی، تابع خنک‌سازی و تکرارهای ایستا و پویا در دقت الگوریتم بررسی شد.

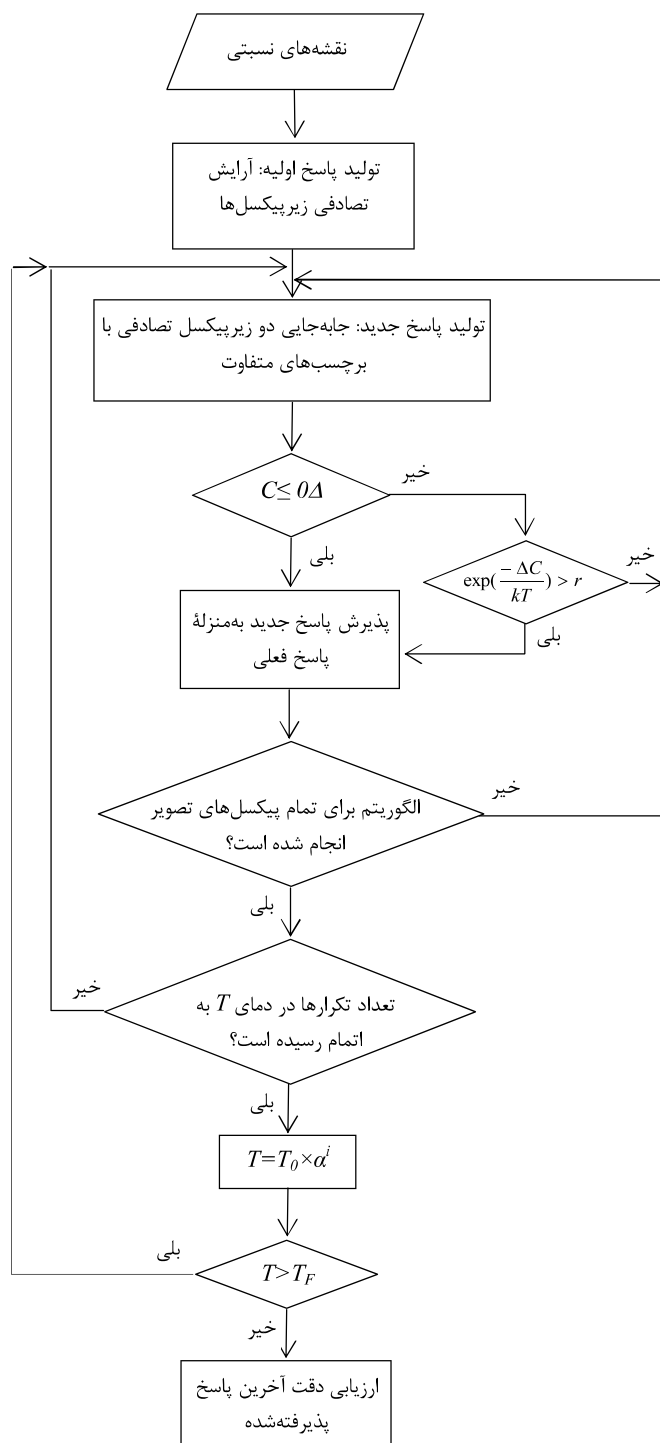
بگیرد. بدین منظور، در هر مرحله از الگوریتم برای محاسبه تغییرات تابع هزینه، افزون بر پیکسلی که تغییرات در آن رخ داده، یک سطح از زیرپیکسل‌های همسایگی آن پیکسل نیز لحاظ شد (شکل ۴).



شکل ۴. محاسبه محیط پیلگون‌های دربرگیرنده کلاس‌های با برچسب یکسان (پیلگون‌ها با تن‌های رنگی مختلف نمایش داده شده‌اند)

بدین ترتیب، پس از جانمایی اولیه زیرپیکسل‌ها، طبق پیشنهاد Villa و همکارانش (۲۰۱۱) برای تولید پاسخ‌های تصادفی جدید، آرایش مکانی همه زیرپیکسل‌های مربوط به هر یک از پیکسل‌ها با یک جایگشت تصادفی تغییر داده شد. اگر این جایگشت تصادفی موجب کاهش تابع هزینه شده باشد، تغییر پذیرفته شده است. در غیر این صورت، اگر میزان افزایش تابع هزینه در رابطه (۱) صدق کند، آرایش مکانی حاصل از جایگشت تصادفی زیرپیکسل‌ها پذیرفته شده و به‌منزله پاسخ فعلی ذخیره شده است. در تحقیق حاضر، علاوه بر پیاده کردن این روش به منظور بهبود عملکرد الگوریتم، مکانیزم دیگری به شرح زیر نیز برای تولید پاسخ‌های تصادفی جدید اعمال شد و نتایج هر دو روش مورد ارزیابی قرار گرفت. در این

ارزیابی و بهبود عملکرد الگوریتم شبیه‌سازی تبرید به منظور تهیه نقشه پوشش اراضی ...



شکل ۵. روند کلی تهیه نقشه پوششی در سطح زیرپیکسل مبتنی بر الگوریتم شبیه‌سازی تبرید

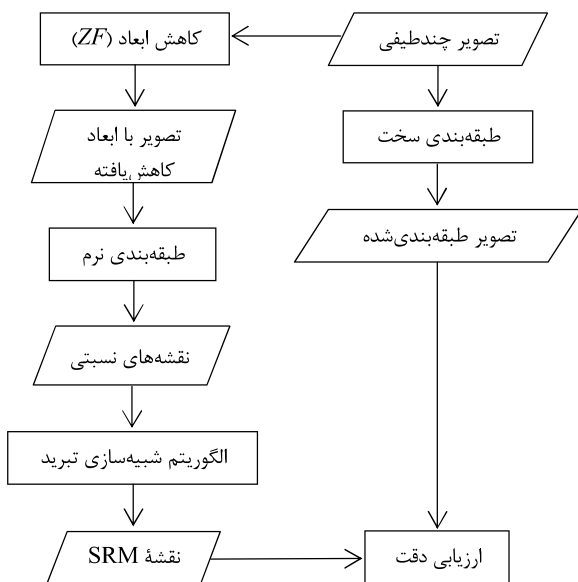


## ۲-۵- روش ارزیابی الگوریتم با حضور خطای

### طبقه‌بندی نرم

برای ارزیابی دقت الگوریتم SRM در حضور خطای مربوط به طبقه‌بندی نرم به داده مرجع در سطح زیرپیکسل نیاز است. با توجه به دشوار بودن دسترسی به این نوع داده مرجع، در این تحقیق نیز مشابه با روال دیگر محققان، الگوریتم SRM روی تصویر با ابعاد کاهش یافته<sup>۱</sup> پیاده شد و سپس، برای برآورد دقت کلی، از نقشه طبقه‌بندی سخت مربوط به تصویر اصلی استفاده شد.

برای برآورد دقت الگوریتم شبیه‌سازی تبرید در حضور خطای مربوط به طبقه‌بندی نرم، با در نظر گرفتن پنجره‌هایی با ابعاد مشخص ( $ZF \times ZF$ )، میانگین درجات خاکستری پیکسل‌های واقع در هر پنجره اندازه‌گیری و تصویر با ابعاد کوچک‌تر تولید شد. سپس با استفاده از مدل اختلاط طیفی خطی، سهم تعلق کلاس‌ها در هر پیکسل برآورد، و وارد الگوریتم شبیه‌سازی تبرید شد. بدین ترتیب، دقت کلی نقشه زیرپیکسل حاصل از الگوریتم شبیه‌سازی تبرید، با مرجع قرار دادن نقشه طبقه‌بندی سخت مربوط به تصویر اصلی و تشکیل ماتریس ابهام، برآورد شد (شکل ۷).

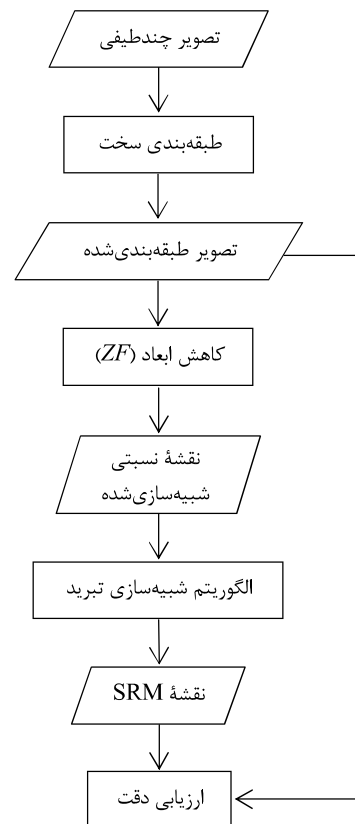


شکل ۷. ارزیابی الگوریتم شبیه‌سازی تبرید با حضور خطای مربوط به طبقه‌بندی نرم

## ۲-۴- روش ارزیابی الگوریتم مستقل از خطای

### طبقه‌بندی نرم

در تحقیق حاضر، برای ارزیابی دقت الگوریتم شبیه‌سازی تبرید مستقل از خطای طبقه‌بندی نرم، از نقشه‌های نسبتی شبیه‌سازی شده استفاده شد. بدین منظور، نخست تصویر چندطیفی مورد نظر با روش طبقه‌بندی سخت (مانند بیشترین احتمال)، برچسب‌گذاری شد و سپس، با در نظر گرفتن پنجره‌های متناسب با ضریب بزرگنمایی ( $ZF \times ZF$ ) و شمارش تعداد پیکسل‌های هر کلاس، نقشه‌های نسبتی با قدرت تفکیکی مکانی پایین‌تر شبیه‌سازی شد. بدین ترتیب، سهم کلاس‌ها در هر پیکسل وارد الگوریتم شبیه‌سازی تبرید شد و با اعمال ضریب بزرگنمایی، نقشه در سطح زیرپیکسل تولید شد. در نهایت، با تشکیل ماتریس ابهام و مرجع قرار دادن نقشه طبقه‌بندی سخت، دقت کلی نقشه SRM مورد محاسبه قرار گرفت (شکل ۶).



شکل ۶. ارزیابی دقیق الگوریتم شبیه‌سازی تبرید مستقل از خطای طبقه‌بندی نرم

1. Degraded Image

## ۲-۶- روش ارزیابی پارامترهای مؤثر در عملکرد

### الگوریتم

علاوه بر دقت کلی الگوریتم شبیه‌سازی تبرید، در این تحقیق پارامترهای مؤثر بر عملکرد الگوریتم نیز ارزیابی شد.

- **ضریب بزرگنمایی:** از عوامل مهم تأثیرگذار در دقت الگوریتم SRM است. برای ارزیابی تأثیر این پارامتر، مقادیر مختلف  $ZF$  در فرآیند الگوریتم شبیه‌سازی تبرید در نظر گرفته شد و در هر مورد، دقت کلی الگوریتم مورد بررسی قرار گرفت.

- **تابع خنک‌سازی:** برای بررسی تأثیر تابع خنک‌سازی در عملکرد الگوریتم شبیه‌سازی تبرید، توابع مختلف خطی، هندسی و لگاریتمی در برنامه خنک‌سازی لحاظ شد و دقت کلی الگوریتم مورد ارزیابی قرار گرفت.

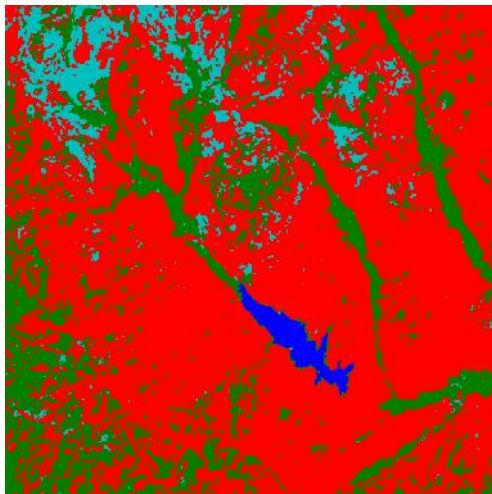
- **تکرارهای ایستا و پویا:** همان‌طور که در بخش ۲-۲-۲ اشاره شد، در هر دما الگوریتم به تعداد معینی تکرار می‌شود. در حالت ایستا، تعداد تکرارها در دماهای مختلف ثابت است ولی در حالت پویا، با کاهش دما، تعداد تکرارهای الگوریتم افزایش می‌یابد. در این تحقیق هر دو حالت در نظر گرفته و نتایج آن‌ها ارزیابی شد.

## ۳- نتایج

### ۳-۱- نتایج الگوریتم در حالت مستقل از خطای

#### طبقه‌بندی نرم

برای ارزیابی دقیق عملکرد الگوریتم شبیه‌سازی تبرید، مستقل از خطای طبقه‌بندی نرم، نقشه طبقه‌بندی سخت منطقه با استفاده از الگوریتم بیشترین میزان احتمال تهیه شد (شکل ۸الف). سپس با در نظر گرفتن مقادیر مختلف برای ضریب بزرگنمایی، نقشه‌های نسبتی شبیه‌سازی شدند و براساس آن، زیرپیکسل‌ها به طور تصادفی جانمایی اولیه شدند (شکل ۸ب).



(الف)

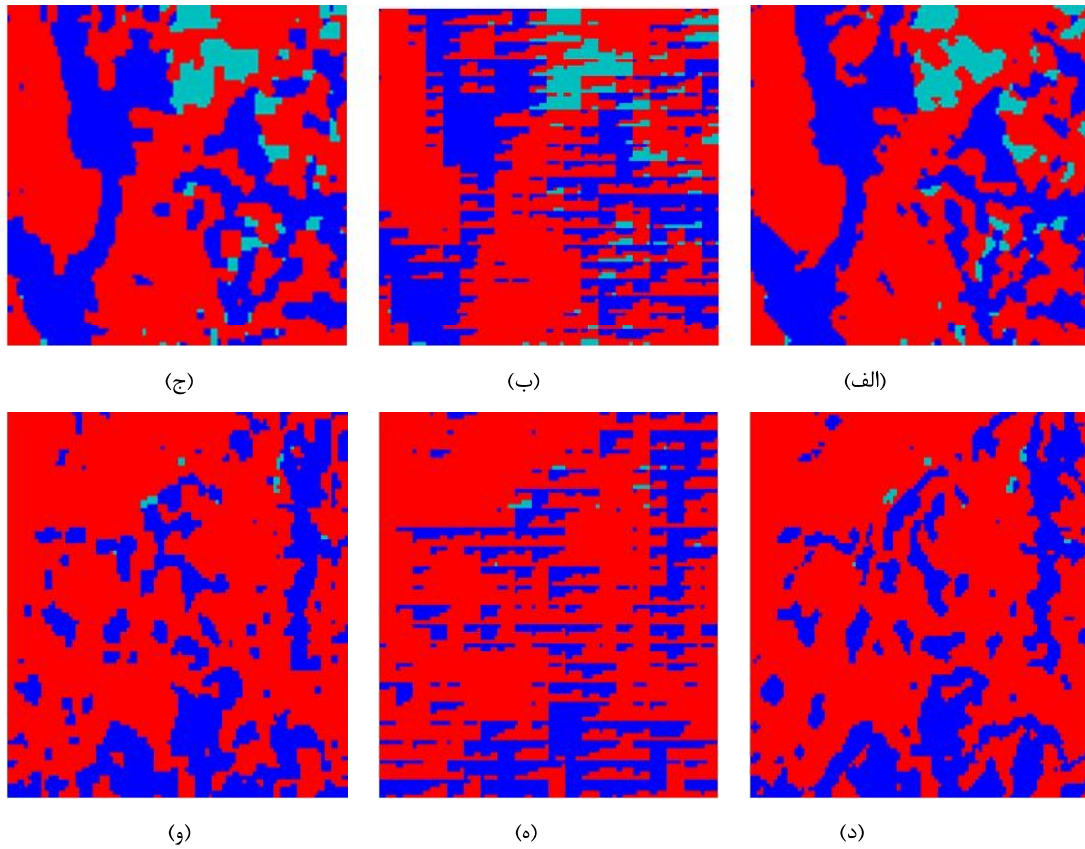


(ب)



شکل ۸. (الف) نقشه طبقه‌بندی سخت و (ب) جانمایی اولیه زیرپیکسل‌ها ( $ZF=5$ )

الگوریتم شبیه‌سازی تبرید با توابع خنک‌سازی و مقادیر مختلف ضریب بزرگنمایی، با در نظر گرفتن تکرارهای ثابت (پنج تکرار) در دماهای مختلف اجرا و نقشه پوششی در سطح زیرپیکسل منطقه تولید شد (شکل ۹). با تشکیل ماتریس ابهام، دقت کلی الگوریتم مورد محاسبه قرار گرفت (جدول ۱).



شکل ۹. (الف، د) نقشه طبقه‌بندی سخت، (ب، ه) جانمایی اولیه زیرپیکسل‌ها و (ج، و) نقشه حاصل از الگوریتم شبیه‌سازی تبرید ( $ZF=5$  و تابع خنک‌سازی هندسی) بدون حضور خطای طبقه‌بندی نرم

جدول ۱. دقت کلی الگوریتم شبیه‌سازی تبرید (%) با توابع خنک‌سازی و مقدارهای مختلف ضریب بزرگنمایی،

بدون حضور خطای طبقه‌بندی نرم

ضریب بزرگنمایی ( $ZF$ )											تابع خنک‌سازی
۲۰	۱۸	۱۵	۱۲	۱۰	۹	۶	۵	۴	۳	۲	
۵۸/۸۹	۶۱/۹۴	۶۸/۸۵	۷۰/۸۷	۷۵/۱۳	۷۶/۹۴	۸۲/۰۷	۸۴/۶۷	۸۷/۰۵	۹۰/۸۹	۹۱/۰۴	خطی
۵۹/۵۳	۶۲/۴۵	۶۹/۵۲	۷۱/۵۹	۷۵/۸۶	۷۷/۸۶	۸۲/۹۳	۸۵/۳۴	۸۷/۸۴	۹۱/۳۷	۹۱/۹۴	هندسی
۶۰/۷۲	۶۳/۶۱	۷۰/۴۹	۷۲/۷۳	۷۶/۶۸	۷۸/۸۴	۸۳/۷۹	۸۶/۰۹	۸۸/۴۶	۹۲/۰۵	۹۲/۷۸	لگاریتمی

جدول ۲. دقت کلی الگوریتم شبیه‌سازی تبرید براساس تکرارهای ایستا و پویا

تابع خنک‌سازی		نحوه تکرار در	
هر دما	خطی	هندسی	لگاریتمی
ایستا	۹۰/۸۹	۹۱/۳۷	۹۲/۰۵
پویا	۹۳/۴۶	۹۴/۲۳	۹۴/۹۴

با توجه به جدول بالا، مشخص شد که در الگوریتم شبیه‌سازی تبرید، تکرارهای پویا از تکرارهای ایستا دقت بیشتری (حدود ۲/۵٪) دارند. شایان ذکر است که تکرارهای پویا نیز زمان اجرای الگوریتم را افزایش می‌دهند اما می‌شود با تعدیل گام‌های افزایش تکرارها، زمان محاسبات را نیز در حد قابل قبولی پایین نگاه داشت.

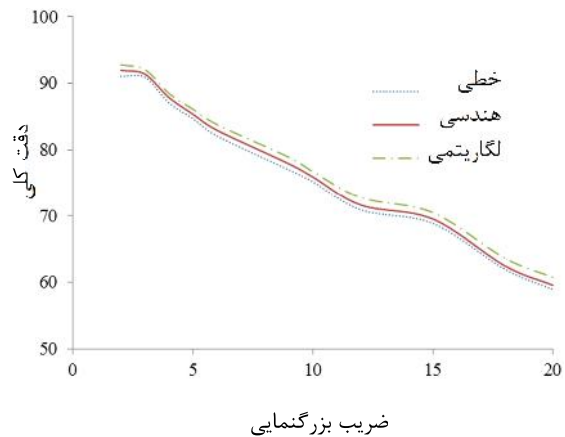
Villa و همکارانش (۲۰۱۱) پاسخ‌های تصادفی در هر مرحله از الگوریتم را براساس جایگشت تصادفی همه زیرپیکسل‌های هر یک از پیکسل‌ها تولید کردند. طبق روند پیشنهادی در این تحقیق، در هر پیکسل فقط دو پیکسل تصادفی با برچسب‌های مختلف جابه‌جا می‌شوند. هر دو این روش‌ها پیاده‌سازی شدند و نتایج آن در جدول ۳ آمده است.

جدول ۳. مقایسه دقت کلی الگوریتم شبیه‌سازی تبرید ارائه شده از سوی Villa و همکاران، و روش پیشنهادی

روش تولید پاسخ‌های جدید		تابع خنک‌سازی	
جدید	خطی	هندسی	لگاریتمی
Villa و همکاران	۹۳/۴۶	۹۴/۲۳	۹۴/۹۴
پیشنهادی	۹۳/۸۹	۹۴/۵۶	۹۴/۹۷

با توجه به اینکه داخل یک پیکسل مخلوط، معمولاً کلاس پوششی غالبی وجود دارد و ممکن است فقط تعداد اندکی زیرپیکسل با برچسب متفاوت از پوشش غالب موجود باشد، پس جایگشت تصادفی تمامی زیرپیکسل‌های موجود در یک پیکسل زمانبر است و

نحوه تأثیر پارامتر ضریب بزرگنمایی و نوع تابع خنک‌سازی در دقت کلی الگوریتم شبیه‌سازی تبرید در شکل ۱۰ نشان داده شده است.



شکل ۱۰. ارزیابی تأثیر ضریب بزرگنمایی و نوع تابع خنک‌سازی در دقت کلی الگوریتم شبیه‌سازی تبرید

براساس نتایج بالا، دقت کلی الگوریتم با افزایش ضریب بزرگنمایی، به دلیل افزایش عدم قطعیت مکانی زیرپیکسل‌ها کاهش می‌یابد. اما باید توجه داشت که با افزایش ضریب بزرگنمایی، قدرت تفکیک مکانی نقشه پوششی هم افزایش پیدا می‌کند؛ هرچند که قابلیت اطمینان جانمایی زیرپیکسل‌ها کمتر می‌شود. بنابراین، باید یک Trade-off بین قدرت تفکیک مکانی نقشه مورد نظر و دقت کلی آن در نظر گرفته شود.

همچنین، توابع خنک‌سازی لگاریتمی و هندسی و خطی، به ترتیب، بیشترین دقت را در نتایج الگوریتم شبیه‌سازی تبرید دارند. فرایند خنک‌سازی با استفاده از تابع لگاریتمی بسیار تدریجی است و به همین دلیل، از دیگر توابع دقت بیشتری دارد. از سویی، تابع هندسی با پیچیدگی محاسباتی پایین‌تر موفق به کسب دقت‌های مشابهی شده است.

همچنین، دو روش تکرارهای ایستا و پویا با فرض  $ZF=3$  و براساس توابع خنک‌سازی مختلف اجرا شد (جدول ۲).

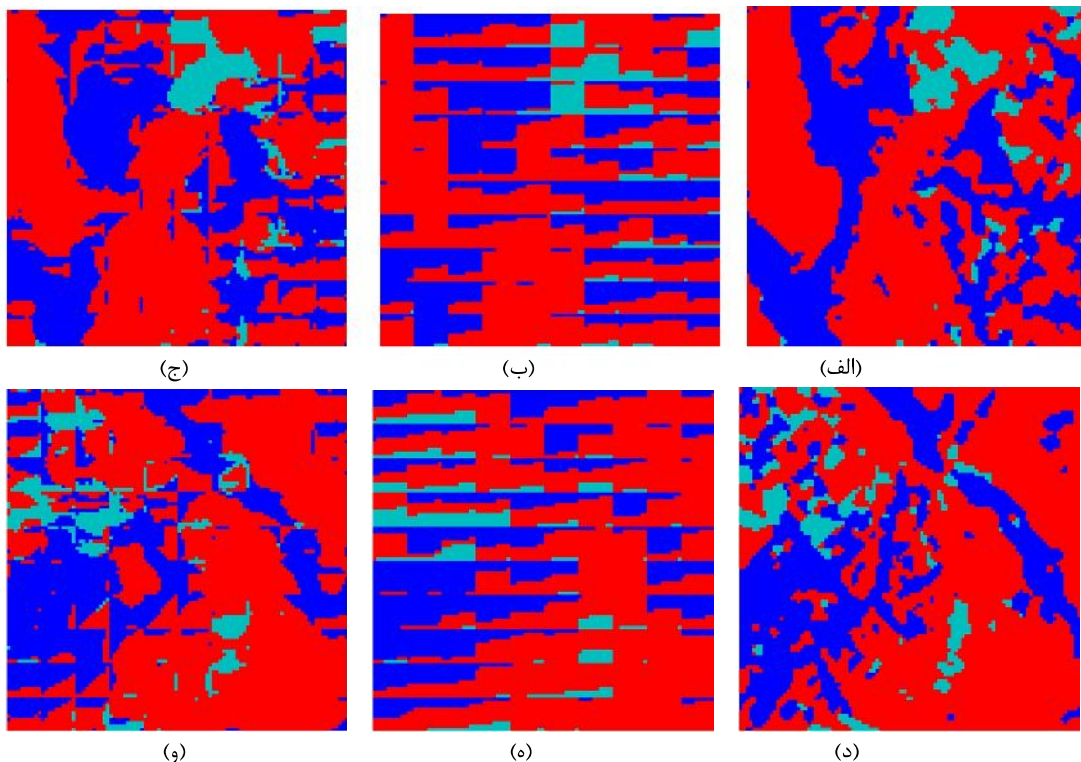
### ۳-۲- نتایج الگوریتم در حالت وابسته به خطای

#### طبقه‌بندی نرم

همان‌طور که در بخش‌های پیشین اشاره شد، اطلاعات ورودی الگوریتم‌های SRM از نتایج طبقه‌بندی نرم تأمین می‌شود. بدین ترتیب، بدیهی است که دقت نهایی الگوریتم‌های SRM به دقت نقشه‌های نسبتی حاصل از طبقه‌بندی کننده نرم وابسته خواهد بود.

جهت ارزیابی الگوریتم در حالت وابسته به خطای طبقه‌بندی نرم، روال تشریح شده در بخش ۵.۲ اجرا شد. شکل ۱۱ نتایج اجرا در مراحل گوناگون را نشان می‌دهد که در آن از ضریب بزرگنمایی ۵ استفاده شده است. همچنین، جدول ۴ دقت کلی حاصل از اجرای الگوریتم به ازای توابع گوناگون خنک‌سازی و ضرایب مختلف بزرگنمایی را نشان می‌دهد.

امکان دارد حتی در بسیاری موارد، در آرایش زیرپیکسل‌ها تفاوتی پیش نیابد. از این رو، در روش پیشنهادی فقط برچسب دو زیرپیکسل تصادفی با ماهیت‌های متفاوت تعویض، و تأثیر آن بر مقدار تابع هزینه محاسبه می‌شود. نتایج جدول ۳ نشان می‌دهد که این امر، ضمن بهبود دقت، به حذف بسیاری از محاسبات بی‌مورد در روش‌های پیشین منجر می‌شود. مقایسه زمان اجرای این دو الگوریتم نشان داده که با یکسان در نظر گرفتن تمامی پارامترها، روش پیشنهادی به طور میانگین، دو برابر سریع‌تر از الگوریتم ارائه شده از سوی Villa و همکارانش (۲۰۱۱) همگرا می‌شود. این امر ناشی از کاهش چشمگیر معاوضه‌های بی‌تأثیر بین زیرپیکسل‌های با ماهیت یکسان است که در روش پیشنهادی از آن پرهیز شده است.



شکل ۱۱. (الف، د) نقشه طبقه‌بندی سخت، (ب، ه) جانمایی اولیه زیرپیکسل‌ها و (ج، و) نقشه حاصل از الگوریتم شبیه‌سازی تبرید ( $ZF=5$ ) با حضور خطای طبقه‌بندی نرم



## ارزیابی و بهبود عملکرد الگوریتم شبیه‌سازی تبرید به منظور تهیه نقشه پوشش اراضی ...

جدول ۴. دقت کلی الگوریتم شبیه‌سازی تبرید (%/.) با توابع خنک‌سازی و مقدارهای مختلف ضریب بزرگنمایی، با حضور خطای طبقه‌بندی نرم

تابع	ضریب بزرگنمایی (ZF)										
	۲۰	۱۸	۱۵	۱۲	۱۰	۹	۶	۵	۴	۳	۲
خنک‌سازی											
خطی	۵۲/۰۷	۵۶/۳۸	۶۰/۱۶	۶۴/۹۴	۶۹/۲۵	۷۰/۶۲	۷۵/۴۳	۷۷/۶۴	۸۰/۳۱	۸۲/۱۴	۸۳/۸۷
هندسی	۵۲/۷۶	۵۷/۰۵	۶۰/۸۴	۶۵/۳۲	۶۹/۴۶	۷۰/۹۸	۷۵/۷۳	۷۸/۱۳	۸۰/۶۲	۸۲/۸۹	۸۴/۰۱
لگاریتمی	۵۲/۹۵	۵۷/۴۸	۶۱/۰۶	۶۵/۸۲	۶۹/۸۴	۷۱/۵۲	۷۶/۳۲	۷۸/۶۷	۸۱/۰۹	۸۳/۲۸	۸۴/۵۶

برای تولید نقشه پوشش اراضی در سطح زیرپیکسل است، به گونه‌ای که دقت جانمایی در حالت مستقل از خطای طبقه‌بندی نرم، ۹۴/۹۷٪ و در حضور خطای طبقه‌بندی نرم نیز ۸۴/۵۶٪ برآورد شد. بدیهی است عدم قطعیت ناشی از خطای طبقه‌بندی کننده نرم یکی از منابع اصلی خطا در تهیه نقشه زیرپیکسل شمرده می‌شود.

برای بررسی دقیق عملکرد الگوریتم شبیه‌سازی تبرید، پارامترهای گوناگون مانند ضریب بزرگنمایی، نوع تابع خنک‌سازی و چگونگی تکرار الگوریتم ارزیابی شد. طبق نتایج به دست آمده، مشخص شد که دقت جانمایی با ضریب بزرگنمایی رابطه معکوس دارد. اما به این دلیل که افزایش ضریب بزرگنمایی باعث افزایش قدرت تفکیک مکانی نقشه پوششی نیز می‌شود، لازم است براساس انتظارات و اهداف کاربران، تعادلی میان افزایش قدرت تفکیک مکانی و کاهش قابلیت اطمینان جانمایی زیرپیکسل‌ها انتخاب شود. به‌طور کلی، ضریب بزرگنمایی بیشتر از ۵ دقت کافی را در نتایج الگوریتم SRM به همراه ندارد.

با مقایسه توابع مختلف خنک‌سازی، توابع هندسی از نظرگاه دقت و کارایی محاسباتی به‌منزله تابع بهینه مشخص شد. همچنین، به‌رغم بار محاسباتی بالاتر، تکرارهای پویا به دلیل قابلیت دستیابی به دقت بیشتر (حدود ۲/۵٪)، بر تکرارهای ایستا ترجیح داده شد.

دستاوردهای دیگر این تحقیق مکانیزم پیشنهادی برای تولید پاسخ‌های جدید است، که افزون بر افزایش دقت کلی، سرعت اجرای الگوریتم را به نسبت روش‌های مشابه، تا دو برابر افزایش داده است.

در پژوهش حاضر از LSMM جهت برآورد سهم

در این بخش نیز، همچون بررسی پیشین، افزایش ضریب بزرگنمایی کاهش دقت‌های کلی را به همراه دارد و از میان توابع خنک‌سازی، توابع هندسی و لگاریتمی با دقت‌های مشابه یکدیگر، در مقایسه با تابع خطی برتری نشان می‌دهند.

نکته مهم مقایسه نتایج بخش ۵.۲ و ۶.۲ آن است که خطای طبقه‌بندی نرم باعث کاهش کلی دقت‌های جانمایی تا حدود ۱۰٪ شده است که نقش مهم خطای طبقه‌بندی نرم را در نداشتن اطمینان به نقشه‌های جانمایی در سطح زیرپیکسل نشان می‌دهد.

### ۴- نتیجه‌گیری

روش‌های طبقه‌بندی نرم به‌رغم استخراج سهم کلاس‌های گوناگون در سطح زیرپیکسل، قادر به جانمایی مکانی زیرپیکسل‌ها و در نتیجه، تولید نقشه پوششی نیستند. در این راستا، الگوریتم‌های SRM با بهره‌گیری از نتایج طبقه‌بندی کننده‌های نرم، آرایش مکانی زیرپیکسل‌ها را بهینه‌سازی می‌کنند. در این تحقیق، الگوریتم بهینه‌سازی شبیه‌سازی تبرید به کار رفت و دقت نقشه پوششی حاصل از این روش ارزیابی شد. بدین منظور، دو روش ارزیابی بررسی شد:

۱. مستقل از خطای طبقه‌بندی نرم، برای بررسی دقیق عملکرد الگوریتم، صرفاً در جانمایی زیرپیکسل‌ها؛
۲. وابسته به خطای طبقه‌بندی نرم.

در حالت نخست، از نقشه‌های نسبتی شبیه‌سازی شده، و در حالت دوم، از تصویر با ابعاد کاهش‌یافته و تولید نقشه‌های نسبتی براساس LSMM استفاده شد. نتایج به دست آمده مؤید توانایی الگوریتم شبیه‌سازی تبرید

- Optimization Theory and Applications, 45:41–51.
- Cracknell, A.P., 1998. **Synergy in Remote Sensing - What's in a Pixel?**, International Journal of Remote Sensing, 19 (11), 2025–2047.
- Dekkers A. & Aarts, E., 1991. **Global Optimization and Simulated Annealing**, Mathematical Programming, 50:367–393.
- Fisher, P., 1997, **The Pixel: A Snare and a Delusion**, International Journal of Remote Sensing, 18, pp. 679–685.
- Foody, G.M., 1996, **Approaches for the Production and Evaluation of Fuzzy Land Cover Classifications from Remotely Sensed Data**, International Journal of Remote Sensing, 17, 1317-1340.
- Foody, G.M. & 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: pp. 619-631.
- Friedl, M.A., McIver, D.K., Hodges, J.C.F., Zhang, X.Y., Muchoney, D. & Strahler, A.H., 2002, **Global Land Cover Mapping from MODIS: Algorithms and Early Results**, Remote Sensing of Environment, 83,287–302.
- García-Haro, F.J., Gilabert, M.A. & Meliá, J., 1996, **Linear Spectral Mixture Modeling To Estimate Vegetation Amount from Optical Spectral Data**, International Journal of Remote Sensing, 17: pp. 3373-3400.
- Geman, S. & Geman, D., 1984, **Stochastic Relaxation, Gibbs Distributions, and the Bayesian Restoration of Images**. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 6:721–741.
- González-Audicana, M., Saleta, J.L., García Catalán, R. & García, R., 2004, **Fusion of Multispectral and Panchromatic Images Using Improved IHS and PCA Mergers Based on Wavelet Decomposition**, IEEE Transactions On Geoscience And Remote Sensing, 42 (6), 1291- 1299.
- کلاس‌ها در سطح زیرپیکسل استفاده شد. تعیین دقیق تعداد و همچنین، طیف اجزای خالص نقش اساسی در عملکرد این مدل دارد و ممکن است موجب بروز عدم قطعیت چشمگیری در نتایج مدل شود. همچنین، فرض خطی بودن اختلاط طیفی نیز احتمال دارد دقت مدل را کاهش دهد. پیشنهاد می‌شود در زمین، کاهش عدم قطعیت‌های مربوط به نتایج LSMM تحقیقات بیشتری انجام شود. همچنین، از روش‌های دیگر طبقه‌بندی نرم نیز در فرایند تهیه نقشه زیرپیکسل براساس الگوریتم‌های SRM استفاده شود. به‌طور کلی، روش‌های SRM و به‌ویژه الگوریتم شبیه‌سازی تبرید، توانایی بسیار در تهیه نقشه پوششی در سطح زیرپیکسل دارند و بررسی و گسترش الگوریتم‌های دیگر در این زمینه به تحقیقات بیشتر نیاز دارد.

#### ۵- منابع

- Atkinson, P.M., 1997, **Mapping Sub-Pixel Boundaries from Remotely Sensed Images** و In: Z. Kemp (Ed.), Innovations in GIS 4, 166–180.
- 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.
- Brown de Colstoun, E.C., Story, M.H., Thompson, C., Commisso, K., Smith, T.G. & Irons, J.R., 2003, **National Park Vegetation Mapping Using Multitemporal Landsat 7 Data and a Decision Tree Classifier**, Remote Sensing of Environment, 85:316–327.
- Cerny, V., 1985, **A Thermodynamical Approach to the Traveling Salesman Problem: an Efficient Simulation Algorithm**, Journal of

- Paola, J.D. & 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: pp. 3033-3058.
- Saab, Y. & Rao, V., 1991, **Combinational Optimization by Stochastic Evolution**, IEEE Transactions on Computer-Aided Design, 10:525-535.
- Talbi, E.-G., 2009, **Metaheuristics : From Design to Implementation**, New Jersey: John Wiley & Sons.
- Tatem A.J, Lewis, H.G., Atkinson, P.M. & 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
- Thornton, M.W., Atkinson, P.M. & Holland, D.A., 2006, **Super-Resolution Mapping of Rural Land Cover Features from Fine Spatial Resolution Satellite Sensor Imagery**, International Journal of Remote Sensing, 27: 473-491
- Tobler, W., 1970, **A Computer Movie Simulating Urban Growth in the Detroit Region**, Economic Geography, 46(2): 234-240.
- Villa, A., Chanussot, J., Benediktsson, J.A. & 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.
- Ingber, L., 1996, **Adaptive Simulated Annealing**, Control and Cybernetics, 25(1):33-54.
- Kanellopoulos, I., Varfis, A., Wilkinson, G.G. & Megier, J., 1992. **Land Cover Discrimination in SPOT HRV Imagery Using an Artificial Neural Network: A 20 Class Experiment**, International Journal of Remote Sensing, 13 (5), 917-924.
- 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, 96(3-4), 302-314.
- Kirkpatrick, S., Gelatt, C.D. & Vecchi, M.P., 1983, **Optimization by Simulated Annealing**, Science, 220(4598):671-680.
- Locatelli, M., 2000, **Simulated Annealing Algorithms for Continuous Global Optimization: Convergence Conditions**, Journal of Optimization Theory and Applications, 29(1):87-102.
- Mertens, K.C., Verbeke, L.P.C. & Ducheyne, E.I. De Wulf, RR., 2003, **Using Genetic Algorithms in Sub-Pixel Mapping**, International Journal of Remote Sensing, 24: 4241-4247
- Ozdamar, L. & Demirhan, M., 2000, **Experiments with New Stochastic Global Optimization Search Techniques**, Computers and Operations Research, 27(9):841-865.