

کاربرد الگوریتم مورفولوژی ریاضی اتساع در آشکارسازی مناطق گذر اکوسیستم

زهرا عبدالله‌زاده^۱، عادل سپهر^{۲*}، علیرضا راشکی^۳

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد مدیریت مناطق بیابانی، دانشگاه فردوسی مشهد

۲. استادیار گروه مدیریت مناطق خشک و بیابانی، دانشکده منابع طبیعی و محیط‌زیست، دانشگاه فردوسی مشهد

۳. استادیار دانشکده منابع طبیعی و محیط‌زیست، دانشگاه فردوسی مشهد

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۲/۲۷

تاریخ وصول مقاله: ۱۳۹۴/۱۱/۴

چکیده

در مطالعات زیست‌محیطی، آشکارسازی تغییرات اکوسیستمی یا تعیین مناطق گذر حد واسط دو وضعیت متفاوت، با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و الگوریتم‌های مختلفی که در فرایند پیش یا پس‌پردازش روی تصاویر اعمال می‌شود امکان‌پذیر است. از آن جمله می‌توان به الگوریتم‌های مورفولوژی ریاضی اشاره کرد. پردازش‌های مورفولوژیک از مهم‌ترین تکنیک‌های آنالیز و بررسی عوارض و پدیده‌های موجود در تصویر محسوب می‌شوند و از کاربردهای آن‌ها می‌توان به آشکارسازی لبه‌ها یا مرزها اشاره کرد. از مهم‌ترین این پردازش‌ها می‌توان به عملگر پایه اتساع اشاره کرد. اساس کار الگوریتم اتساع را می‌توان انبساط یا توسعه اشیا یا عوارض دانست و زمانی که این عملگر روی تصویر اعمال می‌شود، در حقیقت پیکسل‌های تصویر را بسط می‌دهد. اجرای این الگوریتم مورفولوژیک نیازمند تصویر باینری و استفاده از عنصر ساختاری یا کرنل مناسب است. در این پژوهش با اجرای الگوریتم اتساع روی یک نمونه تصویر باینری حاصل از روش طبقه‌بندی طیفی، حد گذر (آستانه) بین دو منطقه بیابانی و نیمه‌بیابانی در استان خراسان رضوی آشکارسازی شده است. بدین منظور با کاربرد الگوریتم طبقه‌بندی طیفی روی تصویر بازتاب‌های سطحی سنجنده مودیس مربوط به ژوئن ۲۰۰۴، یک تصویر باینری تولید شد که دارای دو بخش است. مناطق دارای پوشش گیاهی که متعلق به منطقه غیربیابانی و بخش دیگر شامل مناطق خاکی و سنگی بدون پوشش که معرف مناطق بیابانی‌اند. پس از آن با اجرای مجزای الگوریتم اتساع روی دو فاز مکمل (بخش دارای پوشش و بخش بدون پوشش)، تصویر اولیه براساس مرزهای متسع‌شده در نتیجه فرایند اتساع تحلیل و کاربرد الگوریتم اتساع در آشکارسازی لبه‌ها یا مرزهای اکوسیستم بیابانی ارزیابی شد. نتایج نشان داد که تکنیک الگوریتم‌های طیفی و مورفولوژیک در شناسایی و نقشه‌بندی مناطق گذر، حد واسط مناطق غیربیابانی و بیابانی، می‌تواند بر پایه هترورژینیتی یا ناهمگنی در الگوهای پوششی ملاک عمل قرار گیرد.

کلیدواژه

الگوریتم اتساع، کرنل، مورفولوژی ریاضی، مناطق گذر، مرزهای بیابان.

۱. سرآغاز

اکوسیستم، امکان انتخاب روش‌های مناسب‌تر در مطالعه و بررسی مرزهای تغییر اکوسیستم را رقم خواهد زد، زیرا اغلب به دلیل تنوع بالای الگوهای پوشش زمینی همچون پوشش گیاهی، خاک و سنگ، شناسایی و تفکیک این مناطق بسیار دشوار است (Shoshany, 2012). برای مثال، اگر

اهمیت بررسی میزان و جهت پیشروی مرزهای مناطق بیابانی، تغییرات اکوسیستم و روند تسریعی بیابانی شدن اراضی، اهمیت مطالعه آستانه‌ها و گذرهای عبور اکوسیستم را بارزتر کرده است. شناخت وضعیت مورفولوژیک

در برهم‌کنش با تصویر دیگر با اندازه و شکل مشخص، که عنصر ساختاری^۴ نامیده می‌شود، به تصویری با ویژگی‌های متفاوت از تصویر اولیه، تبدیل می‌کنند (Yu, 2004). عملیات مورفولوژیک ریاضی بر فرم، ساختار و شکل کلی یک عارضه مؤثر است و روی تصاویر باینری عمل می‌کند (تصاویر دو رنگی مثل تصاویر سفید و سیاه یا تصاویری که پیکسل‌های آن فقط دو مقدار دارند). اساس کار الگوریتم اتساع را می‌توان انبساط یا توسعه اشیا یا عوارض دانست و زمانی که این عملگر روی تصویر اعمال می‌شود، در حقیقت پیکسل‌های تصویر را بسط می‌دهد. بنابراین، در نواحی مرزی یا لبه‌های تصویر تغییرات اعمال شده را می‌توان در قالب بزرگ‌تر شدن یا انبساط لبه‌ها یا پر شدن حفره‌های کوچک درون تصویر مشاهده کرد. لذا مهم‌ترین کاربردهای این عملگر را می‌توان آشکارسازی و استخراج مرزها، لبه‌ها، اسکلت، حفره‌ها و گوشه‌ها در تصویر، حذف نویز از تصویر (Peters, 1995)، ناحیه‌بندی تصویر، هموارسازی تصویر، شناسایی اشکال مختلف در تصویر، کد کردن تصویر، نازک‌سازی و ضخیم‌سازی اشیا داخل تصویر برشمرد. کاربرد چنین الگوریتمی در آشکارسازی مناطق گذر از آنجا معنا می‌یابد که بعد از انجام طبقه‌بندی طیفی روی یک تصویر چندطیفی، با توجه به اینکه امضاهای طیفی به صورت خالص تهیه می‌شوند، در نتیجه تصویر طبقه‌بندی به دو طبقه خالص با پوشش گیاهی (مناطق غیربیابان) و بدون پوشش گیاهی (مناطق بیابان) تفکیک می‌شوند. در این صورت عملاً امکان شناسایی مناطقی با پوشش توأم گیاه و خاک بایر و سنگ که در حد واسط این دو کلاس قرار خواهد گرفت را از دست خواهیم داد. با توجه به وجود یک گرادیان طبیعی (اقليمی، اکولوژیک و ژئولوژیک)، در حد فاصل گذر اکوسیستم از وضعیت غیربیابانی به وضعیت بیابان، پوشش این مناطق همان‌طور که از قبل بیان شد ترکیبی ناهمگن از هر دو پوشش گیاه و خاک بایر و سنگ خواهد بود. بنابراین، طبقه‌بندی این مناطق تنها در صورت همپوشانی

مناطق گذر یا محدوده تغییر وضعیت اکوسیستمی را در حد واسط یک منطقه بیابانی و نیمه‌بیابانی از لحاظ مورفولوژیک بررسی کنیم، اغلب می‌توان روند معکوسی از تغییر الگوی پوششی سطح زمین (لکه‌های گیاه و خاک) را شاهد باشیم که معمولاً ناپایداری‌های اکوتومورفیک قابل توجهی را شامل می‌شوند (Holling, 1973; Scheffer, et al., 2001). بنابراین، از آنجا که پتانسیل‌های فرسایش‌پذیری و برگشت‌پذیری در مناطق گذر اکوسیستمی روند معکوسی از تغییر الگوی پوششی سطح زمین (لکه‌های گیاه و خاک) را شامل می‌شوند، می‌توان چنین اظهار داشت که گستردگی و غلبه فاز پوشش (برای مثال، خاک بایر) به کوچک‌تر شدن یا انقباض لکه‌های پوشش گیاهی منجر می‌شود و بالعکس. مجاورت پارامترهای اکولوژیک (پوشش گیاهی) و مورفولوژیک (خاک و سنگ) در مناطق گذر، پتانسیل بالای این مناطق را در تغییرات ناگهانی و وقوع آستانه‌های برگشت‌ناپذیر بازگو می‌کند. بنابراین، شناسایی به‌هنگام این مناطق می‌تواند در کنترل و پیشگیری از پیشرفت مرزهای بیابانی مؤثر باشد. در این زمینه مدل‌ها و الگوریتم‌های رقومی و ریاضی متعددی طی سال‌های اخیر توسعه یافته است (Hezhi & Zhaogang, 2009; Yuanxiang & Dawei, 2009; Bitelli, et al., 2008). در این میان کاربرد الگوریتم‌های مورفولوژی ریاضی^۱ که از جمله روش‌های آنالیز تصاویر به حساب می‌آیند، در مطالعات آستانه‌ها یا مناطق گذر اکوسیستمی تاکنون در مطالعات محدودی صورت گرفته است (Shoshany, 2012). آنالیز تصاویر در شاخه‌های گسترده‌ای از علوم مختلف کاربرد دارد. الگوریتم‌های متفاوتی در فرایندهای پیش‌پردازش و حذف نویز و آشکارسازی لبه‌های تصاویر به کار می‌روند که از آن جمله می‌توان به الگوریتم‌های شکل‌شناسی یا مورفولوژی ریاضی اتساع^۲ اشاره کرد (Michielsen & De Raedt, 2000). توابع اتساع و انقباض^۳ دو عملگر مورفولوژی اصلی‌اند (Umbugh, 1997) که یک تصویر را

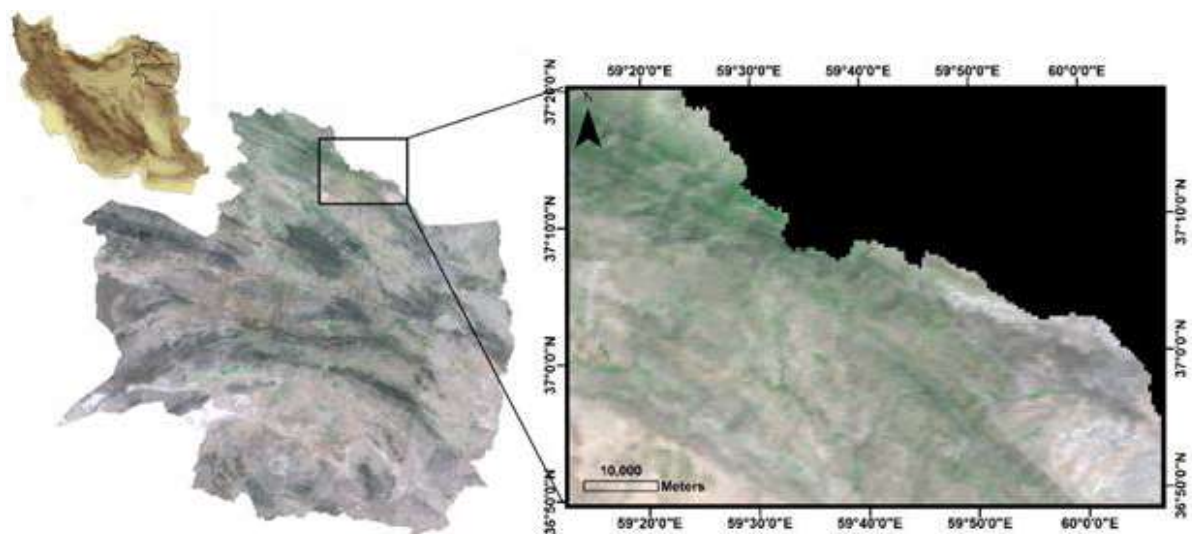
بیابانی و نیمه‌بیابانی در استان خراسان رضوی آشکارسازی شده است.

۲. مواد و روش‌ها

۱.۲. منطقه مطالعاتی

به منظور اجرای روش مذکور، منطقه‌ای در شمال‌شرقی ایران در استان خراسان رضوی انتخاب شد که به لحاظ اقلیمی و ارتفاعی دارای یک گرادیان نسبی در جهت شمال‌غربی به جنوب‌شرقی است (شکل ۱). به طوری که بارش آن از ۳۵۰ میلی‌متر در سمت غربی تا کمتر از ۲۵۰ میلی‌متر در جهت جنوب‌شرقی تغییر می‌کند. همچنین، در این محدوده اختلاف ارتفاعی در حدود ۸۰۰ متر از جهت غرب به شرق وجود دارد. وجود چنین گرادیانی بدون شک در عوامل اکولوژیک اکوسیستم نظیر پوشش گیاهی به‌منزله عامل پایدارکننده محیط مؤثر است. با توجه به روند تسریع تخریب اکوسیستم‌های استان طی دهه‌های اخیر در نتیجه فعالیت‌های انسانی، مرز اکوسیستم‌های بیابانی به سرعت در حال گسترش به سمت مناطق غیربیابانی است. به عبارت دیگر، وسعت محیط‌های بیابانی رو به گسترش است، لذا لزوم شناسایی دقیق مناطق گذر برای کنترل گسترش مرزهای بیابان امری ضروری است.

دو کلاس پوشش گیاهی و خاک میسر خواهد شد. با این مفهوم، می‌توان چنین انتظار داشت که الگوریتم مورفولوژی ریاضی اتساع، ابزاری را برای اجرای چیرگی یا تسلط مکانی یک فاز پوششی در یک تصویر باینری فراهم می‌کند، زیرا اتساع یک پوشش سطحی، انقباض فاز مکمل را دربر خواهد داشت. بنابراین، در اینجا روند معکوس پتانسیل‌های فرسایش‌پذیری و برگشت‌پذیری با اجرای همزمان الگوریتم اتساع در هر دو الگوهای پوششی فاز پوشش گیاهی و فاز خاک بایر و سنگ به دست خواهد آمد. در پژوهشی مشابه، شوشانی (۲۰۱۲) با خالص‌سازی طیفی در تصاویر سنجنده TM، به منظور نقشه‌بندی پتانسیل‌های برگشت‌پذیری و فرسایشی در یک گرادیان اقلیمی ارتفاعی در منطقه فلسطین اشغالی، با کاربرد الگوریتم اتساع آستانه‌های بیابان را جدا کرد. در ایران کاربرد این الگوریتم بیشتر در آشکارسازی لبه تصاویر پزشکی بوده و در زمینه علوم محیطی به خصوص مطالعات بیابان‌زایی کاربردی صورت گرفته است. در این پژوهش هدف اصلی ارائه روشی مناسب برای آشکارسازی مرزها یا لبه‌های اکوسیستم‌های نیمه‌خشک و خشک است. لذا با اجرای الگوریتم اتساع روی یک نمونه تصویر باینری حاصل از روش طبقه‌بندی طیفی، حد گذر بین دو منطقه



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

۲.۲. داده‌های استفاده‌شده

مربوط به روزهای ۱۵۳، ۱۶۱، ۱۶۹ و ۱۷۷ سال ۲۰۰۴ در دو موزاییک h22 و h23، اعمال تصحیحات هندسی در تصاویر دریافتی انجام شد و سیستم مختصات جغرافیایی تصاویر از حالت سینوسی^۷ به UTM تغییر یافت. پس از آن هر تصویر موزاییک‌شده براساس مرز خراسان رضوی برش داده شد. در مرحله بعد لازم بود با میانگین‌گیری از چهار تصویر موجود، به تصویر واحدی از منطقه دست یافت که میانگینی از وضعیت پوششی منطقه طی ماه را نشان دهد. در تهیه تصویر ماهانه ماه ژوئن، از روش وزن‌دادن به تعداد روزهای هر ماه براساس داده‌های ۸ روزه بازتاب‌های سطحی زمین استفاده می‌شود (Rhee, et al., 2010). برای محاسبه تصویر ماهانه ماه ژوئن که شامل ۳۰ روز است، به ترتیب رابطه ۱ عمل می‌شود.

رابطه (۱)

$$\begin{aligned} &+ \left(\frac{1}{3}\right) \times (\text{تصویر روز } 153) = \text{تصویر ماهانه ماه ژوئن} \\ &+ \left(\frac{1}{3}\right) \times (\text{تصویر روز } 169) + \left(\frac{1}{3}\right) \times (\text{تصویر روز } 161) \\ &+ \left(\frac{1}{3}\right) \times (\text{تصویر روز } 177) \end{aligned}$$

در این محاسبات باید سال‌های کیبسه را مدنظر قرار داد، زیرا در سال‌های کیبسه، ماه فوریه ۲۹ روزی است که در این پژوهش سال ۲۰۰۴ جزو سال‌های کیبسه محسوب می‌شود.

۲.۳. خالص‌سازی طیفی و تولید تصویر باینری

ابتدا با استفاده از تصویر چندطیفی با قدرت تفکیک متوسط حاصل از سنجنده MODIS، خالص‌سازی طیفی و تولید تصویر باینری به کمک الگوریتم‌های طیفی طبقه‌بندی نظارت‌شده انجام شد. لذا به منظور اجرای دیدگاه ذکرشده در قسمت قبل، باید ابتدا عوارض سطح زمین به‌منزله تابعی از پوشش نسبی خاک بایر همراه سنگ و پوشش گیاهان سبز (که فعالیت فتوسنتزی دارند)، در سطح پیکسل، به‌منزله معرف یکی از سطوح پوششی گیاه، خاک یا سنگ، در یک آنالیز ترکیب طیفی تعیین شوند.

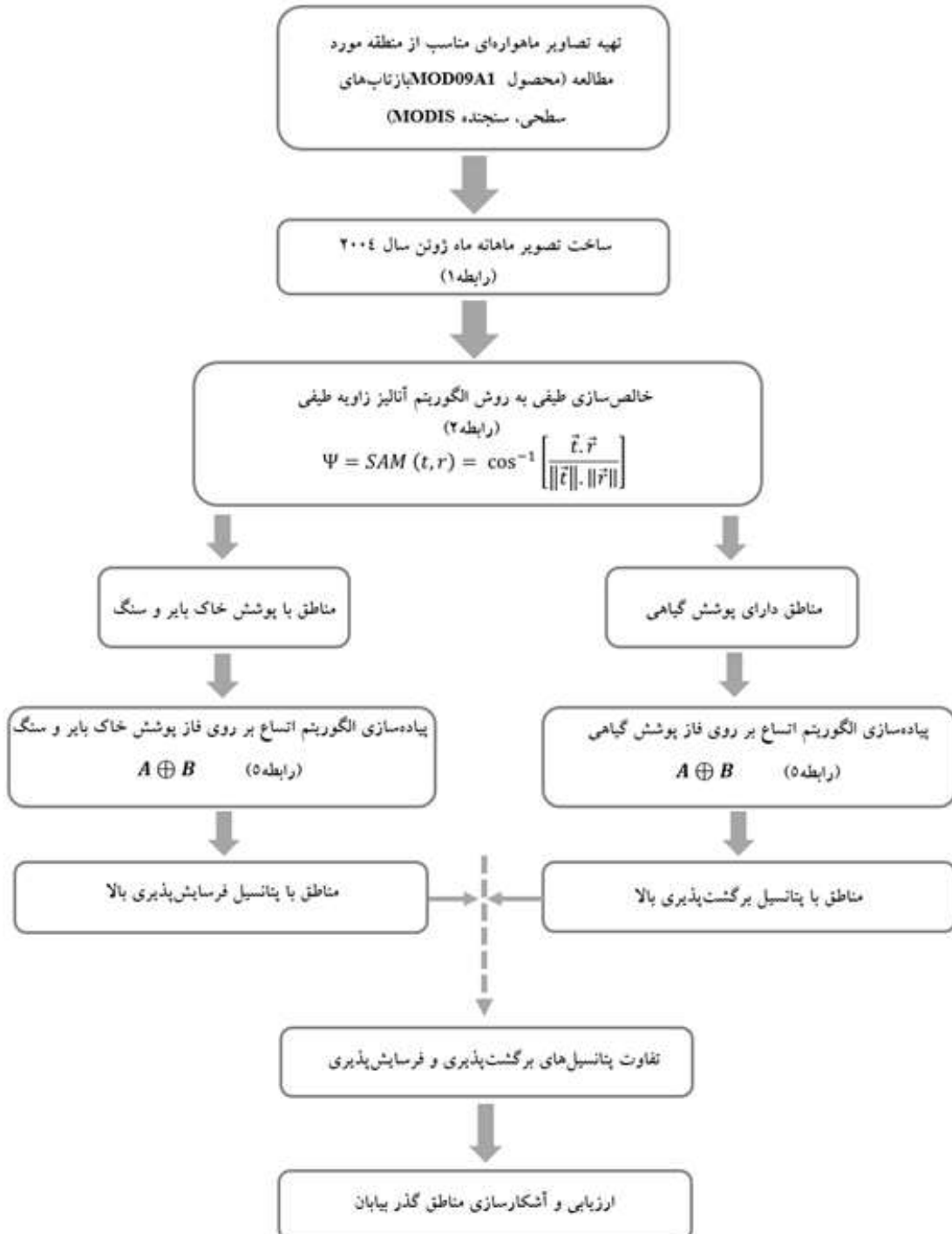
داده استفاده‌شده در این پژوهش تصویر انعکاسات سطحی سنجنده MODIS مربوط به ژوئن ۲۰۰۴ است. داده‌های سنجنده MODIS ماهواره Terra از سیستم مشاهده زمینی^۵ و سایت <http://lpdaac.usgs.gov> دریافت شدند. مجموعه داده دریافت‌شده تحت عنوان محصولات MOD 09A Surface Reflectance 8-day L3 global با فرمت HDF^۶ و تفکیک زمانی ۸ روز و تفکیک مکانی ۵۰۰ متر هستند که ۱۳ لایه اطلاعاتی (باند و شاخص‌های دورسنجی) دارند. ۷ لایه اول آن منطبق با ۷ باند زمینی سنجنده MODIS-Level 1B است و به ترتیب در محدوده‌های طیفی ۶۴۸، ۸۵۸، ۴۷۰، ۵۵۵، ۱۲۴۰، ۱۶۴۰ و ۲۱۳۰ نانومتر قرار دارند و محدوده‌های طیفی NIR، Blue، Green، TIR، SWIR و Red را شامل می‌شوند. این محصولات در واقع تخمینی از بازتاب‌های طیفی سطح زمین در هر باند هستند که در غیاب پخش یا جذب اتمسفری در سطح زمین اندازه‌گیری می‌شوند (Kumar & Ramachandra, 2008).

۳. روش پژوهش

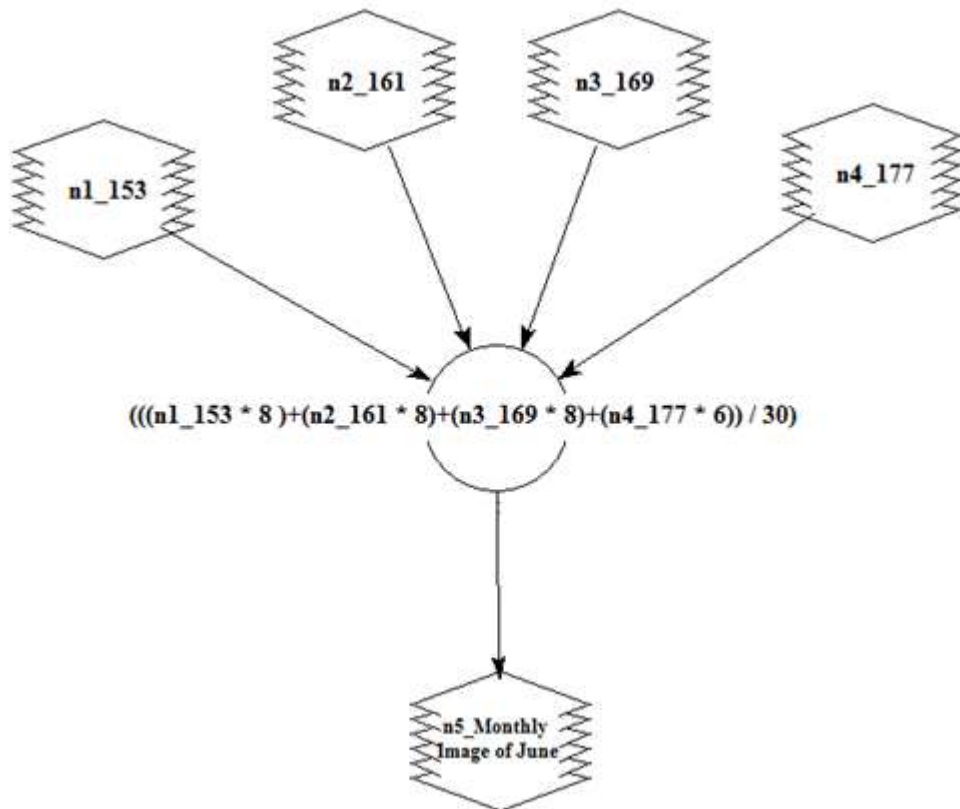
با توجه به هدف اصلی این پژوهش که بررسی توانایی الگوریتم اتساع در تمیز گذرهای اکوسیستم بیابان است، لذا لازم است ابتدا با استفاده از روش خالص‌سازی طیفی تصویر باینری تولید شود و عوارض سطح زمین را براساس پوشش گیاهی و خاک بایر همراه سنگ که به ترتیب معرف مناطق با توان برگشت‌پذیری بالا و مناطق فرسایش‌پذیرند جداسازی کرد. پس از آن با اجرای الگوریتم اتساع، مناطق گذر آشکارسازی خواهند شد (شکل ۲).

۱.۳. آماده‌سازی تصویر

برای جلوگیری از تأثیر وقایع اقلیمی مقطعی، به جای انتخاب یک تصویر از یک روز ماه با استفاده از میانگین وزنی و ضرایب مربوط به روزهای ماه، تصویر ماهانه ماه ژوئن تولید شد (شکل ۳). ابتدا پس از موزاییک تصاویر



شکل ۲. چارت روش‌های به‌کاررفته در پژوهش



شکل ۳. براساس تفکیک زمانی تصاویر، تصویر مربوط به هر روز ضریبی را شامل می‌شود که به صورت کسری از تعداد کل روزهای ماه است (برای مثال، برای ماه ژوئن ۳۰ روز). در اینجا تصویر مربوط به روزهای ۱۵۳، ۱۶۱، ۱۶۹ و ۱۱۷۷ سال مربوط به ماه ژوئن است که سه تصویر اول با ضرایب کامل ۸ روز و تصویر روز ۱۱۷۷ شامل ضریب $\frac{۶}{۳۱}$ است $(۸+۸+۸+۶=۳۰)$. تصویر روز ۱۱۷۷ با ضریب $\frac{۲}{۳۱}$ در ساخت تصویر ماه جولای نیز دخالت خواهد داشت.

هرچه زاویه بین طیف پیکسل تصویر با طیف مرجع کوچک‌تر باشد بیانگر تشابه بیشتر با طیف مرجع است. طیف‌هایی با زاویه‌ای بیشتر از حداکثر زاویه آستانه در نظر گرفته شده، جزو طبقه‌بندی قرار نمی‌گیرند (Lillisand, et al., 2000).

۳.۳. الگوریتم مورفولوژی ریاضی اتساع

توابع مورفولوژیک در فرایندهای پیش و پس‌پردازش تصاویر و برای نمایش یا توصیف شکل کلی یک عارضه یا منطقه یا برای آشکارسازی مرزها استفاده می‌شوند. از نظر فیزیکی، الگوریتم‌های مورفولوژی ریاضی مانند اتساع در تحلیل و استخراج ویژگی‌های فرمیک تصویر به کار می‌روند و امکان تحلیل نهایی و ادراک کلی روی شکل

چنین پارامتربندی با اجرای طبقه‌بندی نظارت‌شده طیفی نظیر الگوریتم آنالیز زاویه طیفی^۸ حاصل می‌شود که به موجب آن، اختلاف زاویه بین طیف مرجع با طیف بازتابی حاصل از این سه نوع پوشش سطحی طبق رابطه ۲ محاسبه شده است (Boardman, 1993; Pinty, et al., 2002; Shoshany, 2012). این الگوریتم که نخستین بار جوزف بوردمن (۱۹۹۳) ارائه کرد، تشابه طیفی بین طیف مرجع (r) و طیف بازتابی در هر پیکسل تصویر (t) را تعیین می‌کند (Kruse, et al., 1993). نتایج این مقایسه به منزله اختلاف زاویه‌ای (برحسب رادیانس) بین دو طیف طبق رابطه ۲ گزارش می‌شود:

$$\Psi = SAM(t, r) = \cos^{-1} \left[\frac{\vec{t} \cdot \vec{r}}{\|\vec{t}\| \cdot \|\vec{r}\|} \right]$$

رابطه (۲)

$(\hat{B})_z$ انتقال یافته مجموعه \hat{B} با نقطه $z = (z_1, z_2)$ است. تعریفی که در اینجا از عملیات مورفولوژی می شود کمی با تعریف ریاضی و اصلی مورفولوژی که نخستین بار سرا مطرح کرده متفاوت و به عبارتی اجرای عملیات ساده تر شده است.

در مورفولوژی باینری یا دودویی، به نقاط یک مجموعه پیش زمینه^{۱۰} و به آنهایی که در متمم این مجموعه اند پس زمینه^{۱۱} می گویند (Gonzalez & Woods, 2002). تصاویر دودویی تصاویری اند که در آن ها هر پیکسل تنها مقدار ۰ یا ۱ را به خود می گیرد و فرض بر این است که عملگر اتساع روی پیکسل هایی با مقادیر ۱ عمل می کنند. در یک عملگر مورفولوژی مقدار هر پیکسل در تصویر خروجی با مقایسه آن پیکسل در تصویر ورودی با همسایه های آن تعیین می شود. عملگر اتساع در مرزهای یک شیء در تصویر پیکسل هایی اضافه و عملگر انقباض پیکسل هایی را از تصویر حذف می کند. تعداد پیکسل هایی که به تصویر اضافه یا از آن حذف می شوند به سایز و شکل عنصر ساختاری که تعریف می کنیم بستگی دارند. عنصر ساختاری می تواند برای مثال، یک مربع 3×3 یا 5×5 از ۱ باشد.

از لحاظ ریاضی استفاده از این تکنیک ها معادل تبدیل کردن تصویر به یک مجموعه ریاضی است که در حقیقت این مجموعه بیانگر یک هدف (عارضه، شی) در تصویر است. بدین معنا که اگر عارضه ای در تصویر وجود داشته باشد که تمام پیکسل های آن سیاه باشد، می تواند بازگوکننده یک مجموعه مستقل در فضای مورفولوژی باشد. برای تصاویر باینری معادل ریاضی که برای مجموعه ها در نظر گرفته می شود، یک مجموعه دوبعدی است، بدین معنا که اعضای آن مجموعه به یک مجموعه Z^2 تعلق دارند. بنابراین، اگر عارضه سیاه در تصویر ما موجود باشد، اعضای آن مجموعه، مختصات مؤلفه های سیاه درون عارضه اند، لذا این گونه از عارضه، یک تعریف ریاضی ارائه می شود.

در اینجا، با فرض هر یک از فازهای پوششی (فاز پوشش

تصویر را ممکن می کنند. در واقع شکل، نمای کلی از ساختار تصویر است که بازگوکننده فرم کلی آن عارضه خواهد بود. از این فرم نمی توان ویژگی های ساختاری ارزشمندی را استخراج کرد، اما ارزش های دیگر آن موجب شده است که از شکل کلی در موارد بسیاری به منزله راه حلی در جهت تحلیل عوارض موجود در تصاویر سود جست. این عملیات مورفولوژیک اطلاعات تصویر را ساده و به این صورت مشخصات شکل های تصویر را حفظ و اطلاعات اضافی آن را حذف می کنند.

مورفولوژی ریاضی را به خصوص در علوم محیطی و مطالعه اکوسیستم ها، می توان تکنیک نسبتاً جدیدی دانست که بر اساس تئوری مجموعه ها و عملیات جبری مینکووسکی^۹ استوار است. از نخستین تعاریف ریاضی اصلی مورفولوژی این تکنیک، می توان به تعریف ریاضی سرا اشاره کرد (Serra, 1983). طبق این تعریف، جمع مینکووسکی روی دو مجموعه X و Y به صورت رابطه ۳ تعریف می شود:

رابطه (۳)

$$X \oplus Y = \{x + y \mid x \in X \wedge y \in Y\} = \bigcup_{y \in Y} X_x = \bigcup_{x \in X} Y_y$$

در مورفولوژی ریاضی جمع فوق را اتساع می نامند. نقش هر دو مجموعه X و Y در این عملگر یکسان است، اما در مورفولوژی به اولین مجموعه تصویر، ورودی و به دومی که کوچک تر است عنصر ساختاری می گویند. در اینجا مجموعه اول ما شامل دو تصویر باینری جدا شده حاصل از طبقه بندی است که هر کدام به طور مجزا تحت عمل اتساع قرار می گیرند.

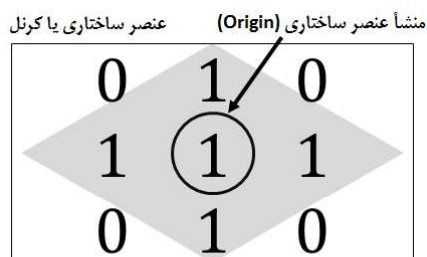
در تعریفی دیگر از هارالیک (Haralick, et al., 1987)، عملگر اتساع به شکل رابطه ۴ نیز تعریف شده است (Wilson, 1985):

رابطه (۴)

$$A \oplus B = \left\{ z \mid (\hat{B})_z \cap A \neq \emptyset \right\}$$

که در آن مجموعه \hat{B} انعکاس یافته مجموعه B است و

می‌برد و تصویر خروجی با اندازه‌ای یکسان ایجاد می‌کند و ارزش هر پیکسل در تصویر خروجی، براساس مقایسه پیکسل‌های متشابه و متناظر با پیکسل‌های همسایه در تصویر ورودی است. بنابراین، با انتخاب اندازه و شکل نوع عنصر ساختاری استفاده‌شده، می‌توان نوع شکل پیکسل‌های همسایه را در تصویر خروجی تعیین کرد. تعداد پیکسل‌های اضافه‌شده به هر تصویر یا هدف موردنظر در یک تصویر، به اندازه و شکل عنصر ساختاری به‌کاررفته برای پردازش تصویر بستگی دارد. به طور کلی عنصر ساختاری را می‌توان ماتریس متشکل از اعداد ۰ و ۱ در نظر گرفت که می‌تواند هر شکل و اندازه‌ای داشته باشد. پیکسل‌هایی با ارزش عددی ۱، پیکسل همسایه تعریف می‌شوند. عناصر ساختاری می‌توانند به صورت دوبعدی یا مسطح باشند که معمولاً بسیار کوچک‌تر از تصویر در حال پردازش‌اند. پیکسل مرکزی هر عنصر ساختاری را «منشأ» یا «مبدأ» می‌نامند که به‌منزله پیکسل پردازش‌گر در نظر گرفته می‌شود (شکل ۴). پیکسل‌ها در عنصر ساختاری که ارزشی برابر ۱ دارند به‌منزله پیکسل همسایه عنصر ساختاری تعریف می‌شوند. عناصر ساختاری می‌توانند به شکل‌های مختلفی نظیر خطی، دیسکی، لوزی و مربعی و به صورت سه‌بعدی و غیرمسطح باشند که در این صورت مقادیر ۰ و ۱ برای تعریف اندازه و حدود عنصر ساختاری در دو بعد یا سطح x و y به کار می‌روند و مقدار ارتفاع برای تعریف بعد سوم اضافه می‌شود.



شکل ۴. یک کرنل یا عنصر ساختاری 3×3 لوزی شکل. پیکسل مرکزی در کرنل نقش پردازشگر اصلی را بازی و با قرار گرفتن روی هر پیکسل از تصویر، طبق الگوی خود پیکسل‌های همسایه را دچار تغییر می‌کند.

شایان یادآوری است که در یک تصویر باینری از نوع ۸

گیاهی و فاز پوشش خاک و سنگ) به‌منزله تصویر باینری دوبعدی $A(x_i, x_j)$ و $B(s, t)$ به‌منزله عنصر ساختاری مسطح متشکل از یک ماتریس 3×3 ، عملگر اتساع به شکل رابطه ۵ روی تصاویر اعمال شد:

$$(A \oplus B)(x, y) = \max \{A(x-s, y-t) + B(s, t)\} \quad \text{رابطه (۵)}$$

طبق رابطه ۵ و نتایج اجرای این الگوریتم (Shoshany, 2012)، می‌توان چنین استنباط کرد که اتساع عملکردی است که عوارض داخلی یک تصویر باینری را رشد می‌دهد و ضخیم می‌کند و موجب توسعه لبه‌ها و مرزهای هر تصویر می‌شود (Ortiz & Torres, 2004).

چنانکه $Ed(A)$ لبه تصویری باشد که با استفاده از تفریق تصویر متسع‌شده از تصویر اصلی به دست می‌آید، در این صورت $Ed(A)$ از رابطه ۶ به دست می‌آید:

$$Ed(A) = (A \oplus B) - A \quad \text{رابطه (۶)}$$

لذا با اجرای رابطه ۶، لبه‌های متسع‌شده روی هر دو تصویر پوشش گیاهی و خاک به دست آمد. ترکیب این دو تصویر خروجی با یکدیگر بیانگر مناطق گذر (مناطق با ترکیب ناهمگن پوشش گیاهی و خاک در مجاورت هم) حد فاصل بین دو منطقه غیربیابانی و بیابانی خواهد بود.

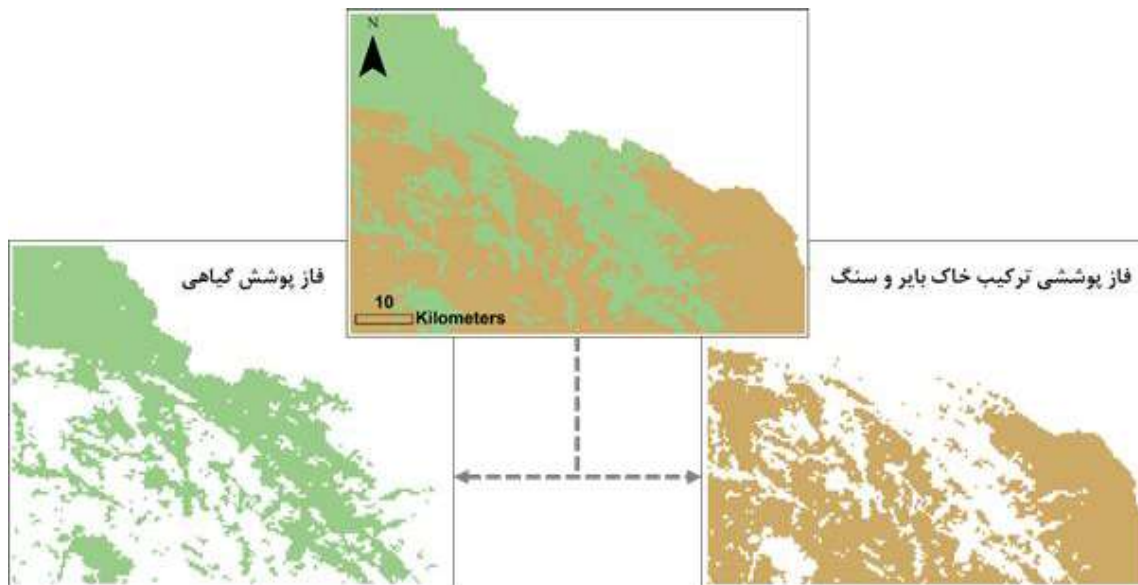
۴.۳. انتخاب عنصر ساختاری یا کرنل مناسب در اجرای تکنیک اتساع

در تمام پردازش‌های مورفولوژیک از کرنل^{۱۲} یا عنصر ساختاری استفاده می‌شود. این عنصر در پردازش‌های مورفولوژیک نقش مهمی دارد، به گونه‌ای که انتخاب مناسب آن اغلب مهم‌ترین بخش در پردازش است. معمولاً عنصر ساختاری به صورت پنجره روی تصویر اصلی حرکت می‌کند و پردازش‌های مورفولوژی را تحت کنترل قرار می‌دهد. انتخاب کرنل یا عنصر ساختاری مناسب از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، زیرا هر تابع مورفولوژیک یک عنصر یا عامل ساختاری را برای تصویر ورودی به کار

۴. نتایج و بحث

در ابتدا بعد از تهیه تصویر ماهانه ماه ژوئن که به روش میانگین وزنی (رابطه ۱) و براساس ضرایب هر روز محاسبه شد، تصویر واحدی تولید شد که به لحاظ شرایط اکولوژیک در منطقه، میانگینی از تغییرات کل ماه ژوئن را شامل می‌شود. این در حالی بود که به دلیل تغییرات چشمگیر در میزان پوشش گیاهی منطقه در اوایل تا اواخر ماه ژوئن، چنانکه ملاک انتخاب تصویر به یک روز خاص از ماه محدود می‌شد، بدون شک نتایج وضعیت نرمالی از شرایط پوشش منطقه را به طور میانگین ماهانه نشان نمی‌داد. پس از آن اجرای الگوریتم طیفی SAM به منظور خالص سازی طیفی تصویر ماه ژوئن در دو طبقه مناطق دارای پوشش گیاهی و مناطق پوشیده از خاک بایر و سنگ انجام شد. خروجی این فرایند یک تصویر باینری با دو کلاس مذکور است که در شکل ۵ نشان داده شده است.

بیتی، پیکسل‌های سیاه مقداری برابر با ۰ خواهند داشت و در یک پیکسل سفید مقدار ۱ را شامل می‌شوند. در اینجا، اگر منشأ یا مرکز عنصر ساختاری با پیکسل سفید تصویر منطبق باشد، تغییری ایجاد نخواهد شد و عنصر ساختاری عمل رویش را روی پیکسل بعدی ادامه خواهد داد. اما در صورتی که منشأ عنصر ساختاری در انطباق با پیکسل سیاه تصویر قرار داشته باشد، تمام پیکسل‌های اطراف آن را مطابق با الگوی کرنل یا عنصر ساختاری تغییر خواهد داد. به عبارت دیگر، عنصر ساختاری می‌تواند هر شکل و اندازه‌ای داشته باشد (Umbaugh, 1997). بنابراین، انتخاب کرنل مناسب می‌تواند تأثیر بسزایی در نتیجه نهایی داشته باشد. در اینجا اجرای الگوریتم اتساع با سه عنصر ساختاری متفاوت که هر سه یک ماتریس مربعی 3×3 هستند، انجام و براساس نتایج نهایی بهترین شکل و ساختار برای عنصر ساختاری استفاده شده در اجرای الگوریتم اتساع انتخاب شد.



شکل ۵. تفکیک فازهای مکمل پوشش سطح زمین. به روش خالص سازی طیفی SAM تصویر منطقه به دو بخش مناطق غیربیابانی و در حال تخریب و بیابانی تقسیم بندی شد که تصویر دارای ماهیت دودویی یا باینری است. تصویر سمت راست، مناطق پوشیده از خاک بایر و سنگ (مناطق با توان فرسایش پذیری بالا) و تصویر سمت چپ، مناطق دارای پوشش گیاهی (مناطق با پتانسیل برگشت پذیری بالا) را نشان می‌دهد.

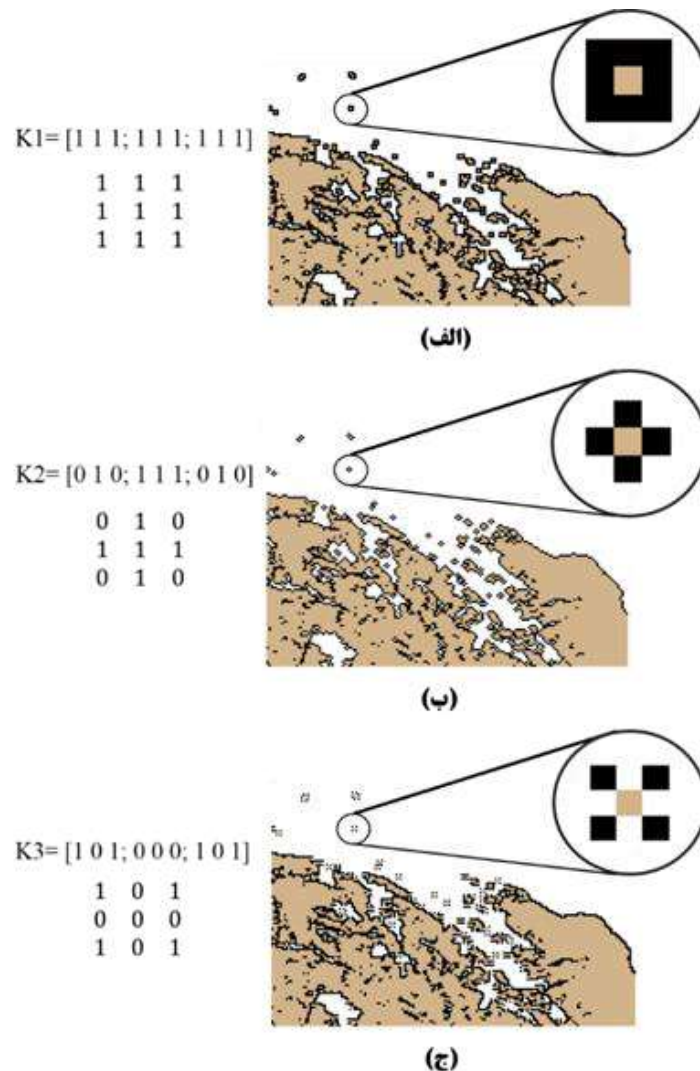
اکولوژیک مؤثر در ارتجاع پذیری و برگشت پذیری اکوسیستم، پوشش گیاهی اکوسیستم قلمداد می‌شود. لذا حضور پوشش گیاهی در منطقه را می‌توان نشانی از توان

با اجرای تکنیک SAM، ابتدا کل منطقه از نظر دو پتانسیل برگشت پذیری و فرسایش پذیری، نقشه بندی شد. به عبارت دیگر، همان طور که ابتدا ذکر شد، عامل

اتساع به کمک سه کرنل یا عنصر ساختاری مربعی با ابعاد مساوی 3×3 ، اما با سه ویژگی کاملاً متفاوت اجرا شد (شکل ۶). بر این اساس، عنصر ساختاری نوع ۱ (k_1) با توجه به هدف مطالعه در این پژوهش که آشکارسازی لبه‌ها یا مرزهای اکوسیستمی بود نتایج بهتری را از لحاظ تفسیر چشمی نشان داد (شکل ۶-الف). زیرا طبق این ساختار، اتساع هر پیکسل در لبه‌های تصویر به طور کامل صورت می‌گیرد. اجرای الگوریتم اتساع روی دو فاز پوشش گیاهی و خاک با استفاده از الگوی کرنل ۱ انجام شده است.

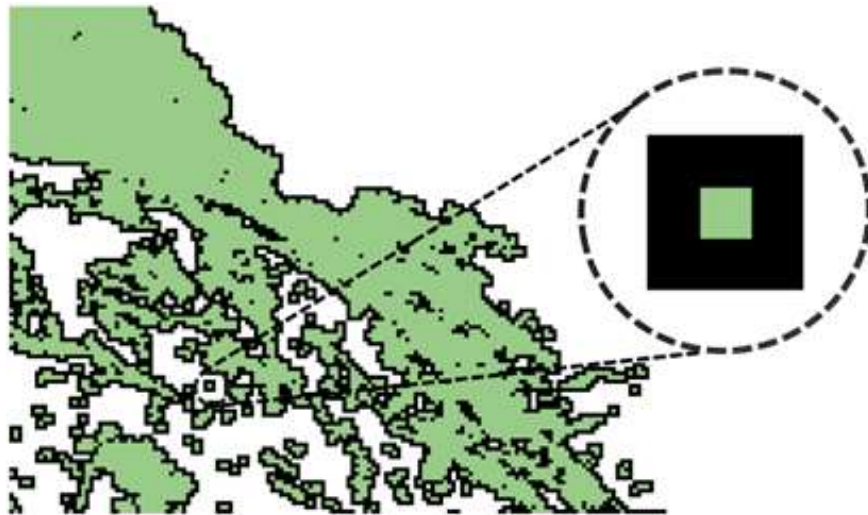
تاب‌آوری محیط در قبال آشوب‌های بیرونی دانست. بنابراین، می‌توان مناطقی که پوشش گیاهی آن‌ها (که در مناطق خشک به صورت بوته‌ای و علفزارهای پراکنده‌اند) به سطوح خاکی بایر و سطوح سنگی آن غلبه دارد به منزله مناطقی که دارای توان یا پتانسیل برگشت‌پذیری بالا هستند در نظر گرفت.

در مرحله اعمال الگوریتم اتساع در تصاویر باینری تولیدشده، همان‌طور که ذکر شد انتخاب نوع عنصر ساختاری در نتیجه نهایی تأثیر بسزایی دارد. در اینجا عملگر



شکل ۶. برای تعیین نوع عنصر ساختاری مناسب، به صورت نمونه الگوریتم اتساع با کرنل‌های متفاوت روی فاز پوشش خاک و سنگ انجام شد. هر سه کرنل یا عنصر ساختاری با ابعاد مساوی (3×3) ، اما با سه ویژگی کاملاً متفاوت‌اند. عنصر ساختاری شکل (الف) از نوع مربعی مسطح و شامل ماتریس 3×3 از ۱ است. طبق این الگو فضای اطراف یک پیکسل کاملاً متسع می‌شود. در شکل (ب) عنصر ساختاری لوزی شکل و شامل آرایه‌هایی از ۰ و ۱ است. اجرای الگوریتم اتساع با عناصر ساختاری (ب) و (ج) پوشش کاملی را در اطراف پیکسل‌های مرزی ایجاد نمی‌کند. در نهایت می‌بایست کرنل یا عنصر ساختاری انتخاب شود که از اندازه پارامتر پیکسلی (پیکسل سایز) بزرگ‌تر باشد.

بخش‌های دارای پوشش گیاهی نیز انجام و با انتخاب عنصر ساختاری نوع ۱ در فضای ۳×۳، تابع اتساع اجرا شد که نتایج در شکل ۷ ارائه شده است.



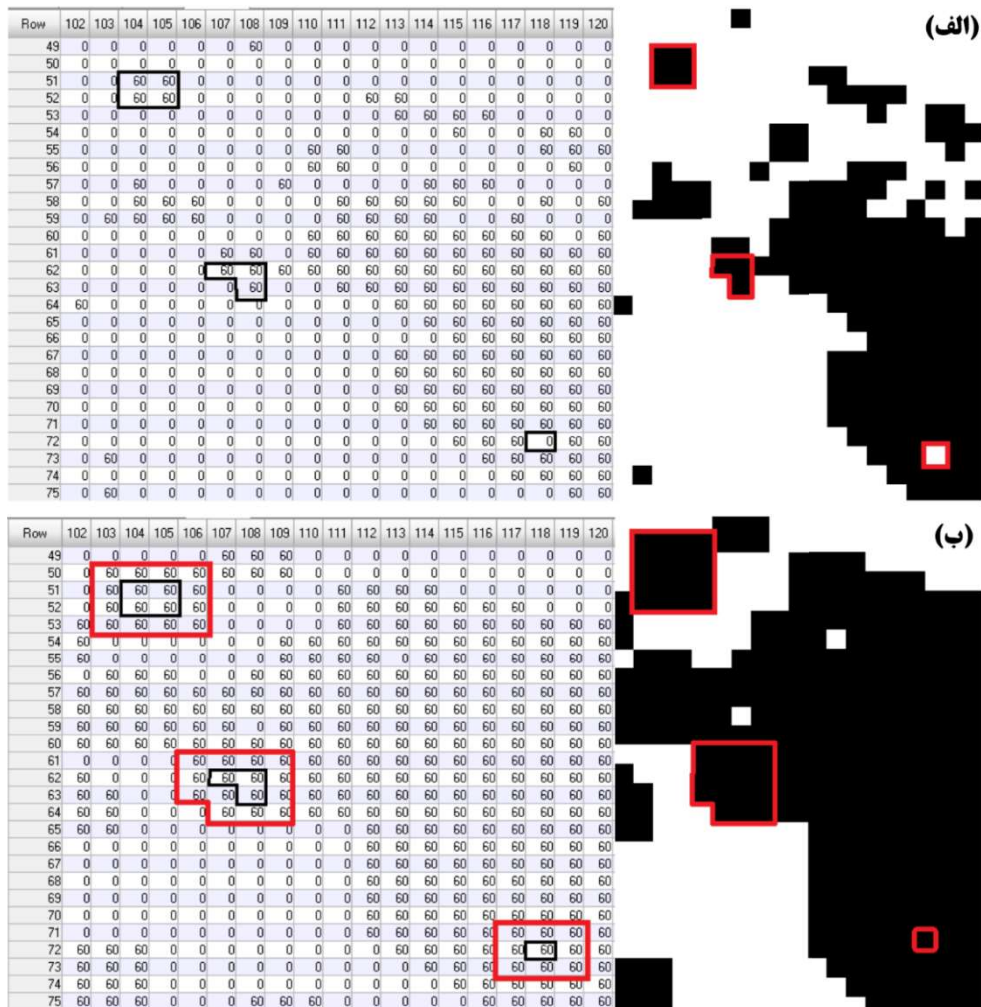
شکل ۷. اجرای الگوریتم اتساع با عنصر ساختاری نوع ۱ در فاز پوشش گیاهی

بسته به شکل مرز هر تصویر، با یکدیگر همپوشانی پیدا کردند و فاز ناخالص جدیدی را از هر دو الگوی پوشش گیاه، خاک و سنگ ایجاد کردند که بیانگر مناطق گذر مابین دو طبقه خالص پوششی است.

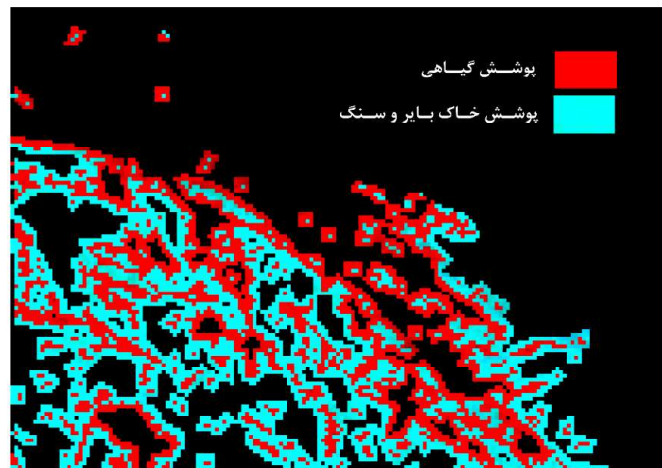
طبق رابطه ۶، آشکارسازی مناطق گذر با تفریق تصویر متسع شده پوشش گیاهی و خاک به همراه سنگ، از تصویر اصلی هر فاز، لبه‌های اضافه شده به تصویر بارز شد که نتایج آن در شکل ۹ نشان داده شده است. بر این اساس، مناطق گذر بارز شده ترکیب ناهمگنی از لکه‌های پوشش گیاهی و خاک بایر را شامل می‌شوند که در حد واسط دو منطقه غیربیابانی و بیابانی واقع شده‌اند. این در حالی است که قبل از اجرای این الگوریتم، الگوهای پوششی به صورت خالص و در دو فاز کاملاً مجزا قرار دارند و هیچ‌گونه ترکیبی در الگوهای پوشش که نشانه اصلی مناطق گذرند وجود نداشت

با توجه به نتایج اجرای الگوریتم اتساع روی فازهای پوششی، مشاهده شد انتخاب کرنل نوع ۱ به دلیل پوشش بهتر اطراف هر پیکسل عملکرد بهتری در اتساع لبه‌های هر فاز پوشش دارد. لذا مراحل بالا عیناً برای فاز مقابل یعنی

در فرایند اتساع، ارزش هر پیکسل خروجی برابر با ماکسیمم یا حداکثر ارزش در تمامی پیکسل‌های همسایه مجاور پیکسل مرکزی در تصویر ورودی است که با توجه به اینکه در این بررسی، فرایند اتساع روی تصویر باینری اجرا شد (مقادیر ارزش پیکسل‌ها در تصویر باینری در اینجا ۰ و ۶۰ می‌باشند که ۶۰ به منزله پیکسل‌هایی با مقادیر ۱ است)، با توجه به شکل عنصر ساختاری به کاررفته که یک ساختار دوبعدی مربعی دارد، بنابراین هر پیکسل که مقدار صفر داشته باشد تحت تأثیر الگوی عنصر ساختاری و مقادیر پیکسل‌های همسایه، بیشترین مقدار یا ارزش (در اینجا ۶۰) را اتخاذ کرده است و پیکسل‌های دارای ارزش ۶۰، خود بدون تغییر باقی مانده‌اند (شکل ۸). اجرای این الگوریتم در هر دو فاز پوششی گیاه و خاک، به اضافه شدن پیکسل‌هایی در مرز هر دو فاز پوششی منجر شد. لذا لبه‌های هر دو تصویر پوشش گیاهی و خاک تا حدودی

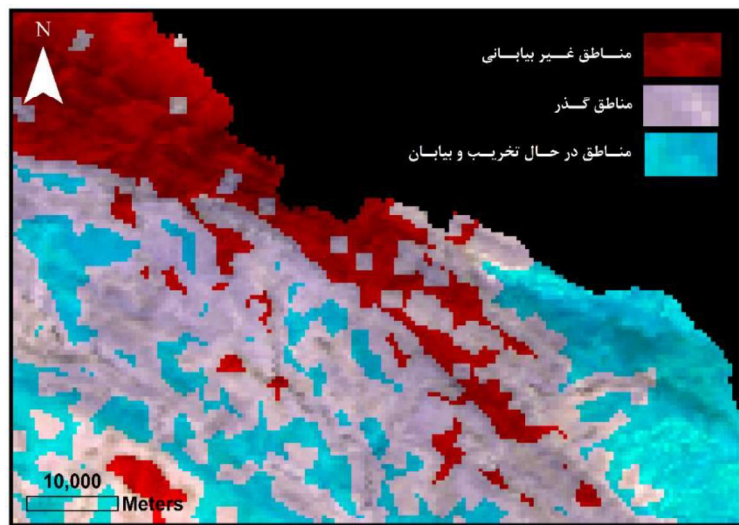


شکل ۸. (الف) قبل از اعمال الگوریتم اتساع روی تصویر باینری حاصل از طبقه‌بندی طیفی (تصویر مربوط به بخشی از کلاس پوشش خاک است). در تصویر (ب) تغییر پیکسل‌های مشخص شده بعد از اعمال تابع اتساع نشان داده شده است. بعد از اعمال الگوریتم اتساع، محدوده‌های سیاه رنگ مشخص شده در تصویر بعد از عمل اتساع طبق شکل و سایز عنصر ساختاری به کار گرفته شده، پیکسل‌های همسایه را طبق مقدارشان دچار تغییر می‌کنند. اگر مقدار پیکسل ۱ باشد (در اینجا طبق کد طبقه‌بندی طیفی تصویر، پیکسل‌ها به جای ۱ مقدار ۶۰ دارند)، پیکسل بدون تغییر باقی می‌ماند و اگر مقدار پیکسل ۰ باشد عملگر اتساع مطابق شکل عنصر ساختاری، پیکسل‌های همسایه را دچار تغییر می‌کند و به آن‌ها بیشترین ارزش را می‌دهد. همین عملکرد به پرشدن حفره‌های درون تصویر و افزایش و انبساط لبه‌های تصویر منجر شده است.



شکل ۹. با تفریق تصویر متسع شده از تصویر اصلی، لبه یا مرزهای هر دو فاز پوششی (Ed) آشکار شدند.

می‌توان شاهد شکل‌گیری الگوهای لکه‌ای مرکب از لکه‌های پوشش گیاهی و خاک بایر و سنگ بود (شکل ۱۰). این تغییرات متناسب با جهت‌گردیدان اقلیمی و ارتفاعی منطقه‌اند و استعداد مناطق در تغییر وضعیت به یک شرایط تخریب‌شده بیابانی را تأیید می‌کنند.



شکل ۱۰. نقشه نهایی موقعیت مناطق گذر و جهت پیشروی مناطق در حال بیابانی‌شدن. قسمت‌های جنوبی و شرقی منطقه با کاهش پوشش گیاهی به سمت بیابانی‌شدن پیش می‌روند. مناطق بنفش بیانگر مناطق ناپایدار گذر در حد فاصل منطقه غیربیابانی (قرمز) و مناطق بیابانی (آبی) هستند که با استفاده از مرزهای به‌دست‌آمده اجرای الگوریتم اتساع و روی هم‌اندازی لایه‌های تصویر اولیه، آشکارسازی این مناطق امکان‌پذیر شد.

پژوهش به کار گرفته شده است، اما با توجه به میزان مقاومت و ارتجاع‌پذیری اکوسیستم‌های استان خراسان رضوی در برابر اختلالات طبیعی و انسانی، نتایج همپوشانی قابل قبولی با یکدیگر نشان می‌دهند.

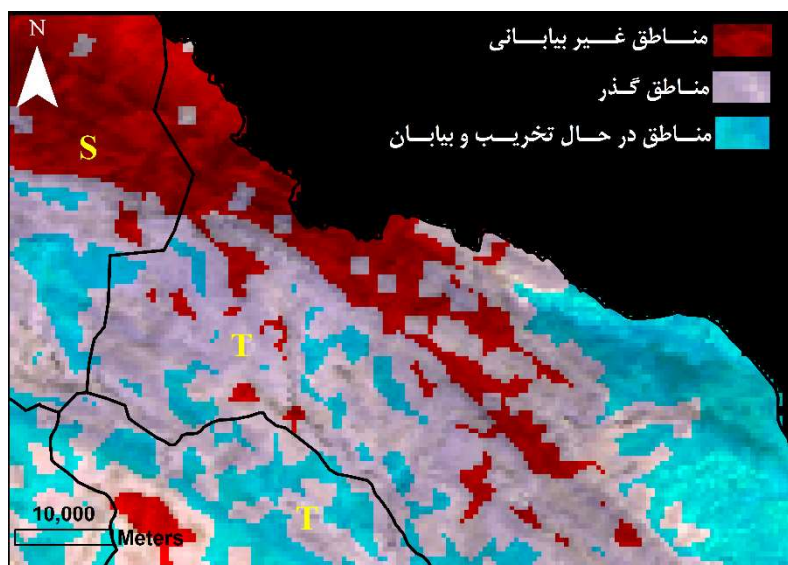
آنچه در این پژوهش معلوم است، کاربرد الگوریتم‌های طیفی و مورفولوژیک در شناسایی و نقشه‌بندی مناطق گذر حد واسط مناطق غیربیابانی و بیابانی، کاربرد جدیدی از این تکنیک در ایران است که می‌تواند بر پایه هتروژنیته یا ناهمگنی در الگوهای پوششی ملاک عمل قرار گیرد. در پژوهشی مشابه پژوهش حاضر، شوشانی (۲۰۱۲) منطقه فلسطین اشغالی را به روشی مشابه روش این تحقیق نقشه‌بندی و بر پایه پتانسیل‌های برگشت‌پذیری و فرسایشی نهفته در الگوهای پوششی گیاه، خاک و سنگ، آستانه‌های بیابان در مناطق گذر را ارزیابی کرده است. وی با استفاده

با توجه به نقشه تعیین‌کننده مرزهای بیابانی از غیربیابانی که بر پایه اتساع تصاویر حاصل شد، می‌توان جهت گسترش مرزهای مناطق تخریب‌شده و در حال بیابانی‌شدن را به سمت شمال منطقه مشاهده کرد. مناطق دارای تراکم پوشش گیاهی در قسمت شمالی منطقه واقع شده است و با حرکت به سمت شرق و جنوب منطقه

بر پایه ارزیابی نتایج به‌دست‌آمده از پژوهش ترئون و همکاران (۲۰۱۵) که ۲۸ شهر استان خراسان رضوی را بر پایه معیارهای طبیعی و انسانی، به لحاظ وضعیت تعادلی در سه کلاس اکوسیستم‌های پایدار، مناطق گذر و اکوسیستم‌های فروپاشی‌شده طبقه‌بندی کردند، نتایج مشابهی با طبقه‌بندی منطقه مطالعاتی در این پژوهش از نظر مناطق فرسایش‌پذیر، قابل احیا و مناطق گذر به دست آمد. قسمت شمال‌غربی منطقه مطالعاتی که مناطق غیربیابانی را نشان می‌دهد (شکل ۱۱) در پژوهش ترئون و همکاران (۲۰۱۵) نیز به‌منزله مناطق پایدار (Sustainable) و مناطق غربی و جنوبی که در این پژوهش به‌منزله مناطق گذر شناسایی شدند، در پژوهش ذکرشده در کلاس مناطق گذر (Transition Zones) قرار گرفته‌اند. هرچند شاخص‌های متفاوتی در ارزیابی اکوسیستم‌ها در هر دو

تصاویر لندست و تفکیک مکانی بالاتر، به دلیل قدرت طیفی بیشتر سنجنده مودیس، طبقه‌بندی طیفی به روش آنالیز طیفی SAM، با نتایج مناسبی حاصل شد. به طور کلی، با اجرای مدل ارائه‌شده در منطقه کوچک‌تر با گرادیان اقلیمی ارتفاعی شدید می‌توان جداسازی مناطق گذر اکوسیستمی را با دقت و صحت بیشتری تفکیک کرد.

از تصاویر ماهواره لندست با تفکیک مکانی ۳۰ متر و در مساحتی به طول ۳۰ کیلومتر این مدل را اجرا کرده است. در نهایت مرزهای بیابانی ترسیم‌شده برآزش کاملی با تغییرات اکورتومورفیکی و اقلیمی ارتفاعی نشان دادند. وجود گرادیان اقلیمی شدید در طول یک مساحت محدود به کسب نتایج دقیق‌تری منجر شد. در پژوهش حاضر با وجود استفاده از تصاویر سنجنده مودیس به جای



شکل ۱۱. نتایج این پژوهش، به‌درستی با نتایج پژوهش تروئن و همکاران (۲۰۱۵) که اکوسیستم‌های استان خراسان رضوی را به سه کلاس پایدار Sustainable، مناطق گذر Transition Zones و مناطق تخریب‌شده یا Collapse تقسیم‌بندی کرده‌اند مطابقت دارد. همان‌طور که در نقشه دیده می‌شود مناطق شمال و شمال‌غربی در هر دو پژوهش به‌منزله مناطق غیربیابانی و به لحاظ تعادلی در وضعیت پایدار و قسمت‌های غربی و جنوبی منطقه مطالعاتی مناطق گذر را نشان می‌دهند.

۵. نتیجه‌گیری

تغییرات الگوهای مکانی و زمانی پوشش گیاهی و خاک بر پایه مدل‌های هیدرولوژیکی و ژئومورفولوژیکی و ارتباط آن با بیابان‌زایی صورت گرفته است (Thornes, 1985; Ludwig, et al., 2005; Sivapalan, 2005; Puigdefábregas, 2005). در این پژوهش فرض شد که الگوهای مرکب از سطوح پوششی خاک، سنگ و گیاه در مجاورت یکدیگر، شامل اطلاعاتی در خصوص مرزها یا آستانه‌های شکل‌گرفته در لبه‌های اکوسیستم‌های خشک‌اند که مناطق گذر نامیده می‌شوند. این اطلاعات روند تغییرات دوجانبه و معکوس پتانسیل‌های برگشت‌پذیری و فرسایشی در این اکوسیستم‌ها را شامل می‌شوند. کاربرد این دیدگاه

روش به‌کاررفته در این پژوهش، به منظور شناسایی لبه‌ها یا مرزهای اکوسیستم‌های بیابانی استان خراسان رضوی طی یک گرادیان نسبی اقلیمی، ارتفاعی، از شمال‌غربی تا جنوب‌شرقی منطقه مورد مطالعه ارائه شد. این روش بر پایه ارزیابی وضعیت پوشش گیاهی و الگوهای مکانی شکل‌گرفته در طول یک گذر اکوسیستمی بنا شده است و روند تغییر الگوهای پوششی خاک و گیاه و نحوه پراکنش و توزیع آن‌ها در طول یک گرادیان اقلیمی - ارتفاعی بر پایه آنالیزهای طیفی و ریاضی، اساس این بررسی را شکل داد. حال آنکه تاکنون مطالعات زیادی در خصوص ارزیابی

مرزهای بیابانی که امروزه از بزرگ‌ترین معضلات زیست‌محیطی در سراسر دنیا به حساب می‌آید، روش مناسبی برای نقشه‌بندی مناطق نیمه‌خشک و خشک، از حیث توان و پتانسیل‌های برگشت‌پذیری و فرسایشی قلمداد می‌شود. اعمال مدیریت‌های پیشگیرانه و کنترلی مناسب در مناطق گذر شناسایی شده می‌تواند از تغییر وضعیت مناطق گذر به وضعیت بیابانی و وقوع آستانه‌های برگشت‌ناپذیر در این مناطق جلوگیری کند.

تشکر و قدردانی

این مقاله بخشی از پژوهش‌های پایان‌نامه کارشناسی ارشد (طرح پژوهشی ۳۱۶۲۷-۳) است که با حمایت‌های معنوی-مادی معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه فردوسی مشهد انجام شده است.

یادداشت‌ها

1. Mathematical morphology algorithm
2. Dilation
3. Erosion
4. Structuring Element
5. Earth Observing Systems (EOS)
6. Hierarchical Data Format
7. Sinusoidal
8. Spectral Angle Mapper
9. Minkowski
10. Foreground
11. Background
12. Kernel

در آشکارسازی آستانه‌ها به‌منزله لبه‌ها یا مرزهای اکوسیستم‌های بیابانی، در خصوص تغییرات دوجانبه پتانسیل‌های فرسایشی و احیا، کاربرد جدیدی از این فرضیه در این پژوهش است. این مفاهیم با به کارگیری روش‌های عنوان شده در این پژوهش شکل کاربردی به خود گرفته است و امکان آشکارسازی مرزها یا مکان محتمل وقوع آستانه‌های برگشت‌ناپذیر بیابان را در بخش کوچکی از اکوسیستم‌های نیمه‌خشک تا خشک استان خراسان رضوی ممکن می‌کند.

به طور کلی، می‌توان چنین ارزیابی کرد که استفاده توأمان از روش‌ها و مدل‌های رقومی و مورفولوژی ریاضی، در تحلیل وضعیت اکوسیستم‌ها می‌تواند در آشکارسازی و اطلاع سریع از وضعیت کنونی اکوسیستم‌ها مفید باشد. لذا با شناخت کافی از مورفولوژی منطقه و به کارگیری روش‌های مناسب، امکان مدیریت سریع به خصوص در مناطق خشک فراهم می‌شود. همچنین، طبق نتایج این پژوهش، با توجه به اینکه ویژگی بارز الگوریتم مورفولوژی اتساع، در برجسته‌کردن مرزها یا لبه‌های یک تصویر است، اجرای این الگوریتم امکان تفسیر بصری الگوهای مکانی شکل‌گرفته در حد واسطه مناطق نیمه‌خشک تا خشک را فراهم کرد. همچنین، کاربرد این الگوریتم در یک مقیاس زمانی مناسب، برای پیش‌بینی و درک صحیح از میزان و جهت تغییرات مخرب محیطی، به خصوص گسترش

منابع

- BITELLI, G., CURZI, P. & MANDANICI, E. Morphological and lithological aspects in the northeastern Libyan desert by remote sensing. SPIE Europe Remote Sensing, 2009. International Society for Optics and Photonics, 74781W-74781W-11.
- BOARDMAN, J. 'Automated spectral un-mixing of AVIRIS data using convex geometry concepts: in Summaries. Fourth JPL Airborne Geoscience Workshop (JPL Publication 93-26, v. 1, 1993), 1993. 11.
- GONZALEZ, R. C. & WOODS, R. E. 2002. Digital image processing. Prentice Hall Upper Saddle River.
- HARALICK, R. M., STERNBERG, S. R. & ZHUANG, X. 1987. Image analysis using mathematical morphology. *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, 532-550.
- HEZHI, W. & ZHAOGANG, L. 2009. Application of Threshold Segmentation and Mathematical Morphology to Edge Detection of Remote Sensing Image in the Ulan Buh Desert. *Forest Engineering*, 2, 003.
- HOLLING, C. S. 1973. Resilience and stability of ecological systems. *Annual review of ecology and systematics*, 1-23.
- KRUSE, F., LEFKOFF, A., BOARDMAN, J., HEIDEBRECHT, K., SHAPIRO, A., BARLOON, P. & GOETZ, A. 1993.

- The spectral image processing system (SIPS)—interactive visualization and analysis of imaging spectrometer data. *Remote sensing of environment*, 44, 145-163.
- KUMAR, U. & RAMACHANDRA, V. 2008. Endmembers discrimination in MODIS using spectral angle mapper and maximum likelihood algorithms. *Int. J. Appl. Rem. Sens.*, 1, 1-14.
- LILLISAND, T. M., KIEFER, R. W. & CHIPMAN, J. 2000. Remote sensing and image interpretation. *John wiley & sons., New York, NY.*
- LUDWIG, J. A., WILCOX, B. P., BRESHEARS, D. D., TONGWAY, D. J. & IMESON, A. C. 2005. Vegetation patches and runoff-erosion as interacting ecohydrological processes in semiarid landscapes. *Ecology*, 86, 288-297.
- MICHELSEN, K. & DE RAEDT, H. 2000. Morphological image analysis. *Computer Physics Communications*, 132, 94-103.
- ORTIZ, F. & TORRES, F. 2004. Vectorial morphological reconstruction for brightness elimination in colour images. *Real-Time Imaging*, 10, 379-387.
- PETERS, R. A. 1995. A new algorithm for image noise reduction using mathematical morphology. *Image Processing, IEEE Transactions on*, 4, 554-568.
- PINTY, B., WIDLOWSKI, J.-L., GOBRON, N., VERSTRAETE, M. M. & DINER, D. J. 2002. Uniqueness of multiangular measurements. I. An indicator of subpixel surface heterogeneity from MISR. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 40, 1560-1573.
- PUIGDEFÁBREGAS, J. 2005. The role of vegetation patterns in structuring runoff and sediment fluxes in drylands. *Earth Surface Processes and Landforms*, 30, 133-147.
- RHEE, J., IM, J. & CARBONE, G. J. 2010. Monitoring agricultural drought for arid and humid regions using multi-sensor remote sensing data. *Remote Sensing of Environment*, 114, 2875-2887.
- SCHEFFER, M., CARPENTER, S., FOLEY, J. A., FOLKE, C. & WALKER, B. 2001. Catastrophic shifts in ecosystems. *Nature*, 413, 591-596.
- SERRA, J. 1983. *Image analysis and mathematical morphology*, Academic Press, Inc.
- SHOSHANY, M. 2012. Identifying Desert Thresholds by Mapping Inverse Erodibility and Recovery Potentials in Patch Patterns Using Spectral and Morphological Algorithms. *Land Degradation & Development*, 23, 331-338.
- SIVAPALAN, M. 2005. Pattern, process and function: elements of a unified theory of hydrology at the catchment scale. *Encyclopedia of hydrological sciences*.
- TERVONEN, T., SEPEHR, A. & KADZIŃSKI, M. 2015. A multi-criteria inference approach for anti-desertification management. *Journal of environmental management*, 162, 9-19.
- THORNES, J. 1985. The ecology of erosion. *Geography*, 222-235.
- UMBAUGH, S. E. 1997. *Computer vision and image processing: a practical approach using cviptools with cdrom*, Prentice Hall PTR.
- WILSON, S. S. The PIXIE-5000—a systolic array processor. Proc. IEEE Comput. Soc. Workshop Comp. Architecture for pattern analysis and image database management, Miami Beach, FL, Nov, 1985. 18-20.
- YU, H. G. 2004. Morphological image segmentation for co-aligned multiple images using watersheds transformation.
- YUANXIANG, L. & DAWEL, Q. 2008. Application of Mathematical Morphological Double-gradient Algorithm in Edge Detection of Rotten Wood Image [J]. *Forest Engineering*, 5, 006.