

شناسایی، کمی‌سازی و پیش‌بینی الگوهای سیمای سرزمین در مکان و زمان

احسان رحیمی*^۱، عبدالرسول سلمان ماهینی^۲

۱ دانش‌آموخته کارشناسی ارشد محیط‌زیست، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان
۲ دانشیار دانشکده شیلات و محیط‌زیست، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۶/۲۳؛ تاریخ تصویب: ۱۳۹۵/۱۱/۰۴)

چکیده

در بوم‌شناسی سیمای سرزمین، رویکردهای شناسایی و کمی‌سازی الگوهای سیمای سرزمین برای نمایش گسسته سیمای سرزمین به خوبی توسعه داده شده‌اند. گسسته‌سازی اغلب به عنوان کلی‌سازی و ساده‌سازی دیده شده است. با این وجود، الگوهای سیمای سرزمین به وسیله فرایندهای پویا و پیچیده‌ای شکل گرفته‌اند که در مقیاس‌های مکانی و زمانی مختلفی عمل می‌کنند. بنابراین، هنگامی که سیمای سرزمین به عنوان شب‌های تدریجی دیده می‌شوند و یا به هنگام کمی‌سازی مکانی سطوح تدریجی حاصل از شبیه‌سازی سیمای سرزمین، معیارهای سیمای سرزمین استاندارد می‌شوند که بتواند الگوهای گسسته سیمای سرزمین یا ویژگی‌های فردی لکه‌ها را کمی‌سازی کند، وجود ندارد. این مطالعه با هدف شناخت و درک رویکردهای به کار رفته در بوم‌شناسی سیمای سرزمین به منظور توصیف ناهمگنی مکانی اکوسیستم‌ها، به بررسی و تجزیه و تحلیل رویکردهای مختلفی از قبیل معیارهای سیمای سرزمین، معیارهای سنجش سطح، تجزیه و تحلیل طیفی و موجی، معیارهای حاصل از زمین آمار و زنجیره‌های خودکار مارکوف در کمی‌سازی تغییرات مکانی-زمانی الگوها می‌پردازد. وجود رویکردها و روش‌های مختلف در شناسایی، کمی‌سازی و پیش‌بینی الگوهای سیمای سرزمین بیانگر این است که الگوهای سیمای سرزمین را نمی‌توان تنها با یک معیار یا شاخص خاص ارزیابی یا کمی‌سازی کرد. بنابراین، روش‌های کمی‌سازی را باید با توجه به هدف بررسی الگوهای سیمای سرزمین و فرایندهای بوم‌شناختی مورد نظر انتخاب کرد.

کلید واژه‌ها: بوم‌شناسی سیمای سرزمین، کمی‌سازی الگوهای سیمای سرزمین، رویکردهای پیوسته و گسسته، تغییرات مکانی-زمانی سیمای سرزمین

سراغاز

بوم‌شناسی سیمای سرزمین یکی از جوان‌ترین شاخه‌های بوم‌شناسی است که بعد از جنگ جهانی دوم در کشورهای اروپای مرکزی و شرقی پدیدار شد (Schreiber, 1990) و بعدها در آمریکا (Forman, 1990) و آسیا گسترش یافت. ریشه‌های این رشته در عمق جغرافیا، زیست‌شناسی جغرافیایی و مدیریت زمین قرار دارد. ۲۰۰ سال پیش، جغرافیدان و دانشمندی آلمانی به نام الکساندر ون هامبولد، سیمای سرزمین را به عنوان «تمام ویژگی‌های یک ناحیه» در نظر گرفت (Farina, 2008). اصطلاح بوم‌شناسی سیمای سرزمین اولین بار توسط زیست‌گیتاشناس آلمانی کارل ترول در اواخر دهه ۱۹۳۰ بکار گرفته شد (Farina, 2008). ترول امیدوار بود که علم جدیدی از ترکیب رویکرد مکانی (افقی) جغرافی‌دانان با رویکرد کارکردی (عمودی) بوم‌شناسان تکامل یابد. بوم‌شناسی سیمای سرزمین، زاده یک علم مربوط به انسان است (Naveh & Lieberman, 1994; Kim & Weaver, 2013)، که اخیراً توسط بوم‌شناسان به عنوان یک سطح بسیار نویدبخش از مطالعه بوم‌شناسی پذیرفته شده است (Risser, 1984; Forman & Godron, 1986; Turner, 1989; Wiens et al., 1993; Farina, 1993; Forman, 1995; Moss, 2000; Turner et al., 2001; Farina, 2008). یکی از تفاوت‌های اساسی میان بوم‌شناسی سیمای سرزمین و دیگر شاخه‌های بوم‌شناسی، تاکید و تمرکز بر الگوی مکانی اکوسیستم‌های چندگانه در سیمای سرزمین ناهمگن است. امروزه، جامعه بوم‌شناسی سیمای سرزمین به رویکردهای تحلیلی مناسبی نیاز دارد که بتوانند تکه‌تکه شدگی زیستگاه را در مقیاس‌های مکانی مختلف اندازه‌گیری کند و به آسانی توسط طراحان مورد استفاده قرار بگیرند. بوم‌شناسی سیمای سرزمین تلاش می‌کند تا معیارهایی را توسعه دهد که به طور منظم الگوهای سیمای سرزمین را توصیف و اثرات تغییر الگوها را بر گونه‌های مختلف پیش‌بینی کند (Riitters et al., 1995; Farina, 2008). اگرچه معیارهای بسیاری براساس الگوی لکه، راهرو و پس‌زمینه به منظور کمی‌سازی ناهمگنی سیمای سرزمین ارائه گردیده است اما، اکثر آن‌ها در توصیف فرایندهای بوم‌شناختی ناتوان هستند (Tischendorf, 2001; Girvetz et al., 2007) زیرا فاکتورهای فراوانی وجود دارد که بر صحت و کاربرد آن‌ها تاثیر می‌گذارد، از جمله این موارد می‌توان به صحت منبع داده، اثر

مقیاس، تفسیر بوم‌شناسی و سیستم طبقه‌بندی کاربری اراضی اشاره کرد (Liu et al., 2013). همچنین، عدم قطعیت مربوط به طبقه‌بندی می‌تواند قابلیت اطمینان معیارهای سیمای سرزمین به دست آمده از نقشه‌های موضوعی را با مشکل مواجه سازد (Fan & Myint, 2014). تمامی مواردی که ذکر شد بیانگر این است که مدل‌های گسسته سیمای سرزمین مانند الگوی لکه، راهرو و پس‌زمینه نمی‌تواند نمایشی واقعی از ناهمگنی سیمای سرزمین ارائه دهد و در نتیجه منجر به کاهش اطلاعات اکولوژیکی می‌شود. شناخت و به کارگیری رویکردهایی که سیمای سرزمین را بدون نیاز به طبقه‌بندی آن مورد ارزیابی قرار می‌دهند، کمک فراوانی به جامعه طراحان و برنامه‌ریزان بوم‌شناسی سیمای سرزمین و در نتیجه حفاظت از تنوع زیستی وابسته به آن می‌کند. در این راستا، رویکردهای جدیدی به منظور کمی‌سازی الگوهای سیمای سرزمین پیشنهاد شده است که به طور واضح فرایندهای اکولوژیکی را با توصیفات دیگر ترکیب می‌کند.

ویژگی‌های اصلی بوم‌شناسی سیمای سرزمین

به منظور استفاده مناسب از معیارهای الگوی سیمای سرزمین، درک مفهوم علمی آن‌ها بسیار اهمیت دارد. درحالی که ممکن است محدوده کاربردهای معیارهای سیمای سرزمین متنوع باشد، بیش‌تر معیارها به طور خاص برای مطالعات بوم‌شناسی سیمای سرزمین توسعه داده شده‌اند. بنابراین، بیشتر طراحان درباره مفاهیم و اصول بوم‌شناسی سیمای سرزمین آگاه هستند و برای آن‌ها استفاده از معیارهای سیمای سرزمین به طور مناسب تسهیل می‌شود. سیمای سرزمین به عنوان یک منطقه وسیع چند کیلومتری که در آن اکوسیستم‌های محلی و کاربری‌های اراضی تکرار شونده وجود دارد (Forman & Godron, 1986; Forman, 1995) تعریف می‌گردد. موزاییک سیمای سرزمین متشکل از عناصر مکانی (لکه، راهرو، زمینه) است و معیارهای سیمای سرزمین به اندازه‌گیری، توصیف و درک اهمیت این عناصر و الگوی مکانی آن‌ها کمک می‌کنند. بوم‌شناسی سیمای سرزمین بر ارتباط میان ساختار و کارکرد سیمای سرزمین و روند تغییر سیمای سرزمین در طول زمان تمرکز می‌کند. بدین منظور باید اساس مفهومی ساختار و کارکرد سیمای سرزمین بررسی گردد.

ساختار سیمای سرزمین

تصفیه آب به وسیله خاک و تالاب‌ها، حریم‌بندی مواد غذایی توسط راهروهای رودخانه‌های و حفظ تنوع‌زیستی. تنظیم، حلقه‌های پس‌خور منفی را ایجاد می‌کند که پایداری کلی سیمای سرزمین را تضمین می‌کند (Naveh, 1998). همچنین کارکرد سیمای سرزمین می‌تواند به طور خاص اشاره به جریان انرژی، مواد مغذی، گونه‌ها، مردم و در نهایت فرایندهای بوم‌شناسی مانند تولید بیومس یا تصفیه و پالایش باران و موادی از قبیل آب یا مواد غذایی مانند کربن، فسفر و نیتروژن در درون اکوسیستم‌ها که در میان هوا و ارگانیس‌ها (کربن)، خاک و ارگانیس‌ها (فسفر) یا بین هوا، خاک و ارگانیس‌ها (نیتروژن) جریان می‌یابند، داشته باشد (Forman, 1995).

پیوستگی سیمای سرزمین

پیوستگی یک ویژگی نوپا از سیمای سرزمین است که به خوبی ارتباط میان ساختار و کارکرد سیمای سرزمین را شرح می‌دهد. به طور کلی پیوستگی اشاره به درجه تسهیل یا ممانعت سیمای سرزمین در برابر جریان انرژی، مواد معدنی، مواد مغذی، گونه‌ها و مردم در سرتاسر سیمای سرزمین دارد. پیوستگی یک ویژگی نوپا از سیمای سرزمین است که از کنش متقابل میان ساختار (ترکیب و وضعیت موزاییک سیمای سرزمین) و کارکرد (جریان‌ات آب، چرخش مواد غذایی و حفظ تنوع‌زیستی) سیمای سرزمین به وجود می‌آید. از آنجا که پیوستگی برای کارکرد مناسب اکوسیستم ضروری است، رابط بزرگی در مدیریت و طرح‌ریزی حفاظت است (Naveh, 1994; Forman, 1995; Bennet, 1999). به عنوان مثال مفهوم گذرگاه سبز، پیوستگی را به عنوان کلیدی در تامین راهروهای چند کارکردی برای مدیریت هیدرولوژیکی، حرکت گونه‌ها، تفرج و حراست فرهنگی سیمای سرزمین در نظر می‌گیرد (Ahern, 2004). شاید آسان‌ترین راه فهمیدن مفهوم پیوستگی، در زمینه حرکت گیاهان و جانوران است. در این زمینه پیوستگی اشاره به درجه‌ای دارد که سیمای سرزمین حرکت افراد را در میان لکه‌های زیستگاهی تسهیل می‌کند. پیوستگی بر میزان حرکت جمعیت‌های محلی در جمعیتی با ساختار مکانی (فراجمعیت) تاثیر می‌گذارد و از این‌رو، در پایداری جمعیت‌ها در یک سیمای سرزمین تکه‌تکه شده بسیار مهم است (Forman & Godron, 1986; Opdam, 1991; Opdam et al., 1993; Forman, 1995; Bennet, 1999; Naveh, 1994). علاوه بر تاثیرگذاری بر نرخ‌های حرکت و

ساختار سیمای سرزمین توصیفی از ارتباطات مکانی میان اکوسیستم‌ها است، یا به طور ویژه توزیع انرژی، مواد و گونه‌ها در ارتباط با اندازه، تعداد، نوع و وضعیت اکوسیستم‌ها است. چندین روش عمده برای توصیف ساختار سیمای سرزمین وجود دارد هر کدام از این روش‌ها انواع مختلفی از داده‌ها را به کار می‌گیرند. در استفاده از داده‌های نقطه‌ای، ویژگی مورد نظر معمولاً موقعیت جغرافیایی هر نقطه است. شبکه‌های خطی درون یک سیمای سرزمین ممکن است در مطالعه سیستم‌های هیدرولوژیکی مانند رودخانه‌ها، گذرگاه‌های حیات‌وحش، شبکه‌های انرژی و حمل و نقل مفید باشند. داده‌های پیوسته یا سطحی به دلیل شیب‌های تدریجی برای نشان دادن تغییرپذیری سیمای سرزمین مفید هستند (McGarigal & Cushman, 2005). داده‌های طبقه‌بندی شده ساختار لکه‌ای سیمای سرزمین را نشان می‌دهند که به طور رایج در نقشه‌های خاک یا پوشش زمین دیده می‌شود. از سه عنصر اساسی سیمای سرزمین به منظور تعریف ساختار سیمای سرزمین استفاده می‌شود: لکه، راهرو و زمینه (Forman & Godron, 1986). با این سه عنصر هر سیمای سرزمینی را می‌توان توصیف کرد. این مدل که این سه عنصر را ادغام می‌کند مدل لکه، راهرو و پس‌زمینه نامیده می‌شود (Forman, 1995). در رویکرد بوم‌شناسی سیمای سرزمین، عناصر سیمای سرزمین را تنها می‌توان به طور کامل از طریق درک مفهومشان فهمید. اهمیت بوم‌شناختی ویژگی‌های مکانی (اندازه، شکل یا توزیع مکانی) عناصر سیمای سرزمین به تنهایی توسط این ویژگی‌ها تعیین نشده است بلکه به وسیله در نظر گرفتن اثرات آن ویژگی‌ها بر یکدیگر و دیگر عناصر سیمای سرزمین تعیین شده است. تمام عناصر سیمای سرزمین صرف نظر از نوع کاربری ویژه آن‌ها، از طریق ویژگی‌های مکانی خود بر کارکردهای سیمای سرزمین تاثیر می‌گذارند. این یک رابطه متقابل اساسی و قابل اجرا در هر نوع سیمای سرزمین (شهری، روستایی و طبیعی) می‌باشد.

کارکرد سیمای سرزمین

کارکرد سیمای سرزمین می‌تواند اشاره به دسته‌های وسیعی از خدمات داشته باشد که سیمای سرزمین ارائه می‌دهد مانند تولید، حفاظت و تنظیم. خدمات تولید، نیاز انسان به غذا، چوب، تفرج و حمل و نقل را تامین می‌کند. حفاظت برای کارکردهای طبیعی مانند تصفیه باران، تولید اکسیژن و جذب کربن دی‌اکسید،

و دلایل و پیامدهای اکولوژیکی آن را در مقیاس‌های مختلف مورد بررسی قرار می‌دهد (Turner, 2005). به هنگام پرداختن به موضوع ناهمگنی، به منظور شناخت منابع آن و در نظر گرفتن مقیاس، بسیار مهم است که میان انواع مختلف ناهمگنی تمایز قائل شویم (Levin, 1978, 1992; Wiens, 2000).

انواع الگوهای سیمای سرزمین

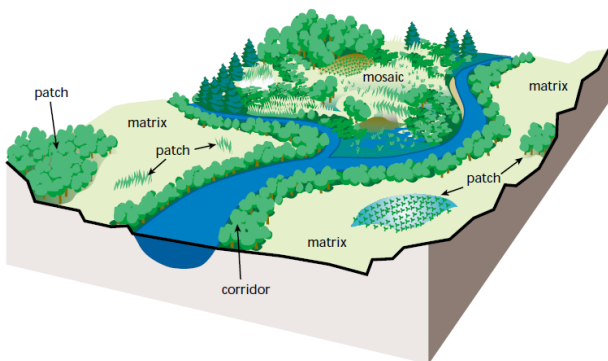
یک سیستم اکولوژیکی یا ویژگی سیستم موردنظر ممکن است در فضا و زمان ناهمگن باشد. در بوم‌شناسی سیمای سرزمین، معمولاً ناهمگنی به عنوان الگوی سیمای سرزمین یا ساختار سیمای سرزمین اشاره شده است و به طور کلی تغییرات سیمای سرزمین اشاره به تغییرات الگوی سیمای سرزمین در طول زمان دارد. امروزه بوم‌شناسان سیمای سرزمین بیشتر به ساختار سیمای سرزمین توجه دارند تا تغییرات سیمای سرزمین (Gustafson, 1998). ساختار و تغییرات سیمای سرزمین را می‌توان با استفاده از مدل‌های پیوسته یا گسسته ناهمگنی، مورد مطالعه قرار داد. بسیاری از رویکردها فرض می‌کنند که سیمای سرزمین متشکل از اشیاء یا لکه‌هایی گسسته است که متعلق به طبقات یا شرایط سیستمی خاصی هستند و لکه‌ها در یک زمینه همگن و یا در یک موزایک جاسازی شده‌اند (Forman & Godron, 1986; Forman, 1995). این گونه نمایش‌های گسسته از سیمای سرزمین فراوان هستند و برای ساده‌سازی و کمی‌سازی سیمای سرزمین پیچیده مفید هستند. نمایش گسسته سیمای سرزمین در طیف وسیعی از موضوعات بوم‌شناسی سیمای سرزمین بسیار موفق بوده است، از جمله تکه‌تکه شدگی زیستگاه (Hargis et al., 1998)، توصیف سیمای سرزمین (Chopping, 1996)، پایش تغییرات سیمای سرزمین (Lausch & Herzog, 2002) و حفاظت (Thompson & McGarigal, 2002). با وجود این، گفته می‌شود که بسیاری از پدیده‌های طبیعی ممکن است در درجه اول ماهیتی پیوسته و تدریجی داشته باشند و نمی‌توان آن‌ها را به صورت گسسته نمایش داد (Regan et al., 2000; Bolliger & Mladenoff, 2005; McGarigal & Cushman, 2005). برخلاف الگوی گسسته، الگوی شیب تدریجی، تغییرات تدریجی یک پدیده را نشان می‌دهد. مفاهیم مبتنی بر شیب تدریجی در نمایش بسیاری از ویژگی‌های سیمای سرزمین نسبت به مفهوم گسسته موزایک لکه مناسب‌تر هستند (Bolliger &

الگوها، پیوستگی بر جریان ژن که برای بقای بلند مدت جمعیت‌ها ضروری است نیز تاثیر می‌گذارد (Selman & Doar, 1992). یک تغییر ناگهانی در پیوستگی سیمای سرزمین ممکن است مانع پراکنش موفق جمعیت‌ها شود و جمعیت‌های بزرگ به طور ناگهانی به جمعیت‌های کوچک و ایزوله تبدیل شوند. این روند ممکن است منجر به کاهش سریع در اشغال لکه و در نهایت انقراض جمعیت در سیمای سرزمین شود. بنابراین پیوستگی اغلب موضوعی بسیار مهم در رابطه با حفاظت از جمعیت‌ها می‌باشد. پیوستگی برای جمعیت‌ها ممکن است در روش‌های زیادی حاصل شود. اندازه، تعداد و توزیع لکه‌های زیستگاهی بر اتصال فیزیکی لکه‌ها در سراسر سیمای سرزمین تاثیر می‌گذارد و ممکن است تعیین‌کننده اصلی اتصال برای گونه‌ها باشند (Selman & Doar, 1992; Fritz, 1979). این احتمال هنگامی زیاد است که یک ساختار لکه گسسته وجود دارد که در آن در سیمای سرزمین متشکل از لکه‌های زیستگاهی و غیر زیستگاهی است که دست کم توسط گونه‌ها دیده می‌شود. در این وضعیت هنگامی که زیستگاه فراوان و گسترده باشد، پیوستگی تقریباً حتمی شده است. اتصالات فیزیکی میان لکه‌های زیستگاهی از طریق راهروها نیز ممکن است بر پیوستگی جمعیت‌ها تاثیر بگذارد (Baudry & Merriam, 1988). راهروها کارکردهای متفاوتی با توجه به پیوستگی دارند، آن‌ها ممکن است زیستگاه تولید مثلی افراد را تامین کنند و بنابراین پیوستگی جمعیت‌های بزرگتر را به وسیله حفظ جریان ژنی برقرار کنند. آن‌ها ممکن است تنها زیستگاه پراکنش را تامین کنند، بنابراین حرکت در بین لکه‌های زیستگاهی بزرگتر را آسان می‌کنند. همچنین راهروها ممکن است به عنوان موانع یا فیلترهایی عمل کنند که از حرکت ارگانسیم‌ها در راهروها جلوگیری می‌کنند (Forman & Godron, 1986).

الگوهای سیمای سرزمین

سیمای سرزمین به عنوان منطقه‌ای که از لحاظ مکانی حداقل در یک فاکتور ناهمگن است، تعریف می‌شود (Turner et al., 2001). این تعریف حداقل، ناهمگنی را به عنوان مفهومی کلیدی در نظر می‌گیرد. در حقیقت اکثر سیستم‌های اکولوژیکی ناهمگن هستند. فاکتورهای محیطی در فضا و زمان تغییر می‌کنند و اکثر گونه‌ها به طور غیریکنواخت توزیع شده‌اند. بوم‌شناسی سیمای سرزمین بر کمی‌سازی ناهمگنی تمرکز می‌کند

تلاش‌هایی به منظور ترکیب ابعاد بالاتر در نمایش سیمای سرزمین مبتنی بر الگوی لکه، راهرو و پس‌زمینه صورت گرفته است (Hoechstetter et al., 2008; Stupariu et al., 2010). محدودیت دیگر این رویکرد ناشی از ترسیم اجتناب‌ناپذیر لکه‌ها به وسیله مرزهای گسسته است. به هر حال، در طبیعت مرزهای آشکار میان کاربری‌های مختلف نزدیک به هم نادر است. در عوض، تغییرات تدریجی یا اکوتون‌ها بیش‌تر به چشم می‌خورد. تبدیل مقادیر سنجنده‌ها به طبقات پوشش گیاهی یا کاربری اراضی مستعد خطا است و محدودیت‌هایی از قبیل وضوح مکانی، زمان مشاهده، مقیاس و توانایی ما در تطابق زمینی داده‌های سنجش از دور را به همراه دارد. بنابراین اختلافی معنی‌دار میان نقشه‌های پوشش زمین مبتنی بر الگوی لکه، راهرو و پس‌زمینه و سیمای سرزمین واقعی وجود دارد. این اختلافات اغلب در تجزیه و تحلیل‌های بعدی نادیده گرفته می‌شوند، و این ممکن است دلیل بینش‌های محدودی باشد که تاکنون از کمی‌سازی بوم‌شناسی سیمای سرزمین به دست آمده است.



شکل (۱): نمایش اصلاحات پایه در الگوی لکه، راهرو و پس‌زمینه (Group FISGRW, 1998)

الگوی شیب تدریجی

افزایش آگاهی از محدودیت‌های الگوی لکه، راهرو و پس‌زمینه، نبود ارتباط معنی‌دار میان شاخص‌های سیمای سرزمین مبتنی بر این الگو و متغیرهای پاسخ اکولوژیکی، موجب ایجاد انگیزه برای جستجوی رویکردهای جایگزین در حمایت از کمی‌سازی ساختار سیمای سرزمین شد. این تلاش‌ها منجر به توسعه و شناخت الگوی شیب تدریجی شد (Müller, 1998; McGarigal & Cushman, 2005; McGarigal et al., 2009). الگوی شیب تدریجی، ساختار سیمای سرزمین را به صورت پیوسته در الگوی

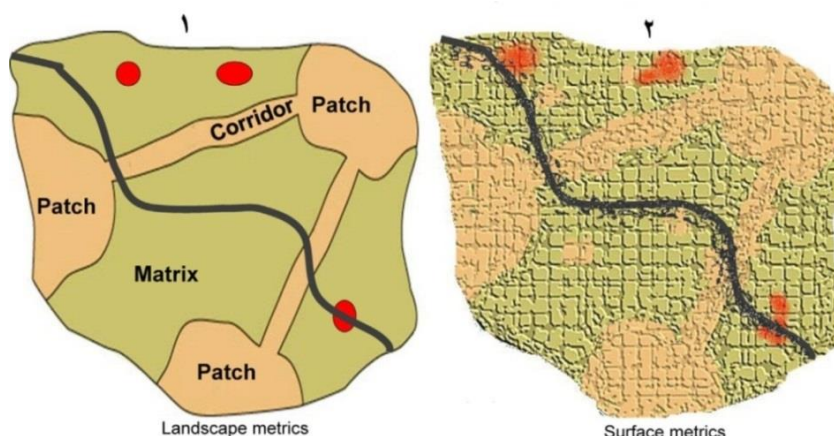
طوری که طبقه‌بندی متغیرهای پیوسته به واحدهای گسسته ممکن است منجر به کاهش اطلاعات شود. اینکه یک پدیده نسبتاً گسسته یا پیوسته به نظر می‌رسد اغلب بستگی به مقیاس مطالعه دارد، خصوصاً وضوح مکانی یا دانه^(۱)، وضوح اندازه‌گیری و مقیاس سلسله مراتبی (Gosz, 1993; McGarigal & Cushman, 2005). مباحث مفهومی درباره این که ویژگی‌های طبیعی ماهیتی پیوسته یا گسسته دارند موضوع جدیدی نیست و به سخنان گلیسون و کلمنت در طول نیمه اول قرن بیستم برمی‌گردد (Keller & Golley, 2000). از نظر روش‌شناسی، پیوستگی ویژگی‌های طبیعی را می‌توان با استفاده از منطق فازی مورد ارزیابی قرار داد. این روش در اصل توسط زاده در سال ۱۹۶۵ معرفی گردید و بعدها توسط سایرین توسعه یافت (Bezdek, 1981; McBratney & Odeh, 1997; Minasny & McBratney, 2002). در این رویکرد هر واحد یا هر سلول ممکن است یک یا چند تیپ را به خود اختصاص دهد و درجه عضویت هر تیپ به وسیله یک تابع عضویت بیان شده است.

الگوی لکه، راهرو و پس‌زمینه

امروزه بوم‌شناسی سیمای سرزمین مبتنی بر الگوی لکه، راهرو و پس‌زمینه است که در آن سیمای سرزمین به عنوان مجموعه‌ای از لکه‌های گسسته مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد (Forman, 1995; Turner et al., 2001). در این الگو ساختار سیمای سرزمین به سه عنصر اصلی پس‌زمینه، راهرو و لکه خلاصه شده است (Forman & Godron, 1986)، (شکل ۱). در این الگو، سیمای سرزمین به وسیله لکه، راهرو و پس‌زمینه توصیف می‌گردد و این سه عنصر به طور مستقیم بر الگوها و جریان‌های درون سیمای سرزمین تاثیر می‌گذارند. در چند دهه اخیر با الگوی لکه، راهرو و پس‌زمینه به عنوان یک الگوی کارآمد، پیشرفت‌های سریعی در کمی‌سازی الگوهای سیمای سرزمین به وجود آمده است. سادگی الگوی لکه، راهرو و پس‌زمینه، سازگاری آن با الگوهای داده‌ای در سامانه اطلاعات جغرافیایی مانند چند ضلعی‌ها و در دسترس بودن داده‌های سنجش از دور همراه با روش‌های طبقه‌بندی، منجر به استفاده گسترده و فراتر از حد انتظار از این الگو شده است. رویکرد موزاییک لکه تنها نمایشی دو بعدی از ساختار سیمای سرزمین را نمایش می‌دهد، اگرچه

می‌دهند. از سوی دیگر، نمایش های الگوی شیب تدریجی از سیمای سرزمین با خروجی خام سنجنده‌ها مشابهت دارد. این نقشه‌ها مشابه تصاویر رقومی هستند که در آن هر پیکسل نمایانگر ارزش بازتاب یک فرکانس خاص است. شاخص پوشش گیاهی تفاضلی نرمال شده (NDVI) مثالی خوب برای این موضوع است که نمایانگر مقدار پوشش گیاهی سبز است. به طور کلی، رویکرد شیب تدریجی در مقایسه با رویکرد الگوی لکه، راهرو و پس‌زمینه نیاز به فرضیات کمتری دارد و نمایشی واقعی‌تر از سیمای سرزمین ارائه می‌دهد. با این وجود، الگوهای شیب تدریجی، تنها یک متغیر از سیمای سرزمین را نمایش می‌دهند که می‌توان به ارتفاع، مطلوبیت زیستگاه یا تراکم پوشش گیاهی اشاره کرد. در الگوی لکه، راهرو و پس‌زمینه این پارامترها مطابق با یک کاربری یا یک طبقه هستند. الگوهای شیب تدریجی متعددی را می‌توان به منظور نمایش جنبه‌های مختلف یک سیمای سرزمین در یک نقشه شیب تدریجی رویهم‌گذاری و یکی کرد. عیب این الگو در نمایش سیمای سرزمین، سختی استخراج یا محاسبه معیارهای سیمای سرزمین از نقشه‌های پیوسته است. کمی‌سازی ویژگی‌های سیمای سرزمین توسط این الگو در مقایسه با معیارهای سیمای سرزمین مبتنی بر الگوی لکه، راهرو و پس‌زمینه، کمتر سر راست است. علاوه بر این تفسیر نتایج معیارهای حاصل از الگوی شیب تدریجی می‌تواند مشکل باشد.

داده‌ای رستری نمایش می‌دهد (شکل ۲). بنابراین، هر سلول یا پیکسل از داده رستری، کوچکترین واحد همگن و واحد مکانی گسسته است که نمایش تغییرات پیوسته ویژگی‌های درون سیمای سرزمین را میسر می‌سازد. الگوی شیب تدریجی هیچ فرضیه‌ای را درباره شکل، اندازه و وضعیت مناطق همگن در نظر نمی‌گیرد و نیازی به ترسیم و تعریف مرزهای آشکار میان اینگونه مناطق ندارد. نمایش‌های سیمای سرزمین مبتنی بر الگوی شیب تدریجی حاوی اطلاعات خیلی بیش‌تری هستند و بنابراین نمایشی بسیار واقعی‌تر از سیماهای سرزمین را ارائه می‌دهد (Lausch et al., 2015). همچنین، الگوی شیب تدریجی به طور ضمنی نمایش بعد سوم ساختار سیمای سرزمین را مقدور می‌سازد. بعد سوم در محدوده مقدار یک متغیر خاص قرار گرفته است، مانند مطلوبیت زیستگاه، ارتفاع یا رطوبت خاک. نمایش سیمای سرزمین براساس الگوی شیب تدریجی به وسیله دو رویکرد انجام می‌شود. ۱. تجزیه و تحلیل شیب تدریجی متغیرهای سیمای سرزمین از نقشه‌های طبقه‌بندی شده و ۲. استفاده از داده‌های میدانی پیوسته که معمولاً از داده‌های سنجش از دور به دست می‌آیند (Cushman, 2010). یک مثال خوب برای نمایش سیمای سرزمین براساس الگوی شیب تدریجی، نقشه‌های مطلوبیت زیستگاه گونه‌ها است. بسته به گستره خانگی یا پراکنش، این نقشه‌های مطلوبیت زیستگاه، سطحی پیوسته یا شیب تدریجی از مطلوبیت زیستگاه را ارائه



شکل (۲): نمایش ساختار سیمای سرزمین

۱. الگوی لکه، راهرو و بستر ۲. الگوی شیب تدریجی (Lausch et al., 2015)

اکوسیستم و وضعیت مکانی آن‌ها به وجود می‌آید. این عناصر سیمای سرزمین، توزیع انرژی، مواد و گونه‌ها را در یک سیمای سرزمین تعیین می‌کنند (Forman & Godron, 1986;)

رویکردهای اندازه‌گیری تکه تکه شدگی در

بوم‌شناسی سیمای سرزمین

ساختار یک سیمای سرزمین از ویژگی‌های عناصر فردی یک

مثال، شاخص‌های بوم‌شناختی معمولاً برای محیط یا گروه‌های تاکسونومیک خاص در مکان‌های ویژه، خیلی خاص هستند (شکل ۳). این شاخص‌ها معمولاً متکی به دانش کارشناسی هستند و از مشاهدات میدانی حاصل می‌گردند. شاخص‌های بوم‌شناختی شامل مقادیر النبرگ (Ellenberg, 1988) که جزئیات مربوط به نیازهای یک گونه گیاهی خاص یا جوامع را محک می‌زند. این شاخص‌ها به منظور تخمین غنای گونه‌ها (Duelli & Obrist, 1998, 2003)، پایش تغییرات کاربری‌های اراضی (Cousins & Lindborg, 2002) و ارزیابی تاثیرات آشفستگی و مدیریت (Dale et al., 2002). استفاده شده‌اند. پس مزیت شاخص‌های بوم‌شناختی شامل اطلاعات خیلی خاص از یک گونه یا جمعیت در یک مکان خاص است. همچنین این شاخص‌ها نمایانگر فرایند یا پاسخی خاص هستند که تعیین آن‌ها ممکن است بسیار سخت و هزینه‌بر باشد.

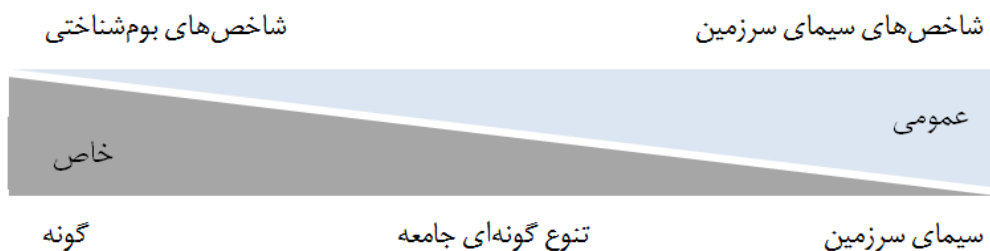
شاخص‌های سیمای سرزمین

این شاخص‌ها مکمل شاخص‌های بوم‌شناختی هستند که ویژگی‌ها را در مقیاس سیمای سرزمین توصیف می‌کنند و اطلاعاتی درباره مقدار و آرایش مکانی کاربری‌های مختلف (Jones et al., 2000; Gergel et al., 2002; Wade et al., 2003) و یا کیفیت محیط‌زیست (Forman & Alexander, 1998) ارائه می‌دهند.

(Turner et al., 1989). ویژگی‌های الگوهای سیمای سرزمین مانند وضعیت و ترکیب عناصر، که اغلب به عنوان ناهمگنی مکانی یا سیمای سرزمین یاد می‌شوند، بر فرایندهای اکولوژیکی و در نتیجه تنوع زیستی تاثیر می‌گذارند و اثراتی عمیق بر کارکرد سیستم‌های اقتصادی-اجتماعی و اکولوژیکی برجای می‌گذارند (Forman & Godron, 1986; Cushman et al., 2010). به منظور تعیین اثرات ناهمگنی سیمای سرزمین بر فرایندهای بوم‌شناختی از شاخص‌ها استفاده می‌شود که توصیف‌کننده‌های کیفی یا معیارهای کمی هستند و اطلاعات ارزشمندی را برای ارزیابی ساختار، کارکرد و ترکیب یک سیستم (Dale, 2001) با بهترین استفاده از منابع موجود ارائه می‌دهند. شاخص‌ها یک سیستم را براساس معیارهایی شناسایی می‌کنند که در زمان یا مکان مورد پایش قرار گرفته‌اند و اطلاعاتی را درباره وضعیت یا حالت سیستم (ایستا)، تغییرات آن (دینامیک) و روند آن ارائه می‌دهند (Dale, 2001). شاخص‌ها به طور گسترده‌ای در زمینه‌های تحقیقی مختلف به کار گرفته شده‌اند، از جمله: مدیریت محیط زیست، سیاست و تصمیم‌گیری در مورد موضوعات مختلفی مانند آلودگی‌ها محیط زیستی (Mal et al., 2002) و یکپارچگی اکوسیستم (Grove, 2002). در این اینجا، به شاخص‌هایی اشاره می‌شود که از روش‌های مختلف به منظور کمی‌سازی و ارزیابی ویژگی‌های سیمای سرزمین مشتق شده‌اند.

شاخص‌های بوم‌شناختی

شاخص‌های مختلف کاربردهای مختلفی نیز دارند، به عنوان



شکل (۳): شاخص‌های بوم‌شناختی و شاخص‌های سیمای سرزمین (Bolinger et al., 2007)

مانند پایگاه داده سامانه اطلاعات جغرافیایی، عکس‌های هوایی و تصاویر سنجنش از دور به دست می‌آیند. بنابراین، مزیت این شاخص‌ها این است که برای مناطق بزرگ آسان‌تر و ارزان‌تر به دست می‌آیند. ویژگی‌های مختلفی را با استفاده از این شاخص‌ها می‌توان در سطح سیمای سرزمین اندازه‌گیری کرد. اهداف اولیه

شاخص‌های سیمای سرزمین اطلاعاتی درباره ویژگی‌های مرتبط با سیمای سرزمین و تغییرات آن‌ها ارائه می‌دهند. از آنجا که سیمای سرزمین از سطح تجمع بیش‌تری نسبت به ویژگی‌های فردی لکه‌ها برخوردار هستند. بنابراین، اطلاعات حاصل از این شاخص‌ها کلی‌تر هستند. شاخص‌های سیمای سرزمین از منابعی

نقش مهمی را در شکل‌دهی سیستم‌های اکولوژیکی و سیمای سرزمین ایفا می‌کند (Taylor et al., 1993; Bolinger et al., 1997; Bolinger, 2005; with, 1997). سیمای سرزمین را می‌توان به طور گسسته و پیوسته در مکان و زمانی مشخص اندازه‌گیری کرد. اندازه‌گیری‌های ایستا سیمای سرزمین در مراحل زمانی خاصی انجام گردیده‌اند درحالی که اندازه‌گیری‌های پویا به طور پیوسته در زمان انجام شده‌اند. توصیف ایستا سیمای سرزمین معمولاً متکی به مشاهدات تجربی است (مانند مشاهدات میدانی، پایگاه داده سامانه اطلاعات جغرافیایی و عکس‌های هوایی) که سیمای سرزمین را در مراحل زمانی خاصی نمایش می‌دهند. حالت و وضعیت سیستم‌های کوچک مقیاس را می‌توان از طریق مشاهدات منظم مانند هفتگی و سالانه مورد پایش و بررسی قرار داد. برای سیستم‌های بزرگ مقیاس مانند سیمای سرزمین وضعیت سیستم را می‌توان از طریق داده‌های چند زمانه مانند تصاویر سنجش از دور پایش نمود. به عنوان یک قاعده، اثرات بلند مدت تغییرات محیط‌زیستی در آینده یا گذشته را نمی‌توان تنها با استفاده از داده‌های تجربی ارزیابی کرد. برای ارزیابی‌های پویای سیمای سرزمین مدل‌ها ابزار مناسبی برای درک بهتر کارکرد، الگو و تنوع سیستم‌ها و ارزیابی پیامدهای تغییرات ویژگی‌های فردی سیستم ارائه می‌دهند (شکل ۴).

شاخص‌های سیمای سرزمین کمی‌سازی مقدار و آرایش مکانی کاربری‌ها و فراهم نمودن مقایسه میان سیمای سرزمین مختلف هستند. هدف کمی‌سازی الگوهای سیمای سرزمین به دست آوردن ویژگی‌هایی است که مهم هستند. بنابراین، بستگی به سوالات تحقیق، اهداف، خطاهای قابل قبول و داده‌های موجود دارد. در گذشته، توصیف سیمای سرزمین براساس دو شاخص بود ۱. توپولوژی که اشاره به تعداد عناصر دارد و ۲. پراکنش^(۲) که تعداد عناصر سیمای سرزمین یا تیپ‌های زیستگاهی را اندازه‌گیری می‌کند (Snacken & Antrop, 1983). امروزه سیمای سرزمین توسط معیارهای ترکیب و وضعیت توصیف می‌شوند (Gustafson, 1998; Turner et al., 2001). ترکیب سیمای سرزمین را می‌توان به وسیله شاخص‌هایی مانند درصد مساحت اندازه‌گیری کرد. وضعیت اشاره به آرایش مکانی عناصر سیمای سرزمین دارد. آرایش مکانی عناصر تعیین کننده چگونگی قرارگیری تیپ‌های سیمای سرزمین نسبت به یکدیگر است و شامل شاخص‌های است که از نظریه اطلاعات^(۳) (O'Neill et al., 1988)، هندسه چین‌خوردگی^(۴) (Milne, 1988; Milne et al., 1992; With, 1994) و نظریه تراوش^(۵) (O'Neill et al., 1988; Gustafson & Parker, 1992; Johnson & Milne, 1992; Milne, 1998) حاصل گردیده‌اند. همچنین بیان شده که درجه و نوع کنش‌های متقابل میان عناصر سیمای سرزمین،

آنتروپی مکانی-زمانی ⁺ تشخیص از تغییرات غیرخطی ⁺ طیف‌های توان‌دار ⁺	ماتریس انتقال ⁺ زنجیره‌های مارکوف ⁺	پویا (زمان) ایستا (زمان)
معیارهای سنجش سطح ⁺ بعد چین‌خوردگی، حفره‌بندی ⁺ زمین‌آمار ⁺ تجزیه و تحلیل موجی ⁺	معیارهای سیمای سرزمین ⁺ بعد چین‌خوردگی، حفره‌بندی ⁺ پیچیدگی الگوریتمی ⁺	
پیوسته (فضا)	گسسته (فضا)	

شکل (۴): معیارهای کمی مورد استفاده در توصیف سیمای سرزمین در فضا و زمان. شاخص‌های نمایانگر سیمای سرزمین مبتنی بر داده‌های تجربی (میدانی و سامانه اطلاعات جغرافیایی) با علامت * مشخص شده‌اند. علامت + نشان دهنده شاخص‌های است که سیستم‌ها را با استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی توصیف می‌کنند (Bolinger et al., 2007)

تصاویر گرافیکی مانند نقشه‌های نمایانگر سیمای سرزمین به کار می‌گیرند. اندازه بهینه یک فایل یا تصویر فشرده را می‌توان به عنوان تراکم تمام کنش‌های متقابل میان مولفه‌های دیجیتال

شاخص‌های ایستا و گسسته سیمای سرزمین
 پیچیدگی الگوریتمی^(۶)

کمپیوترها الگوریتم‌های خاصی را برای فشرده‌سازی فایل‌ها یا

عنوان مثال، مقایسه سیماهای سرزمین مختلف در یک روش یکسان، ارزیابی همان سیمای سرزمین در زمان‌های مختلف، یا مقایسه همان سیمای سرزمین در سناریوهای مختلف (Gustafson, 1998). معیارهای سیمای سرزمین دو جنبه اساسی ساختار سیمای سرزمین را اندازه‌گیری می‌کنند: ترکیب و وضعیت. ترکیب سیمای سرزمین اشاره به تنوع و فراوانی انواع لکه‌ها بدون توجه به ویژگی و آرایش مکانی آن‌ها دارد. معیارهای ترکیب تعداد لکه‌ها، فراوانی نسبی هر کدام از لکه‌ها و تنوع کلی انواع لکه‌ها را اندازه‌گیری می‌کنند. اگر چه معیارهای ترکیب به طور مکانی صریح نیستند اما اثرات مکانی مهمی دارند (Gustafson, 1998). در مقابل، وضعیت سیمای سرزمین اشاره به ویژگی و آرایش مکانی، موقعیت و جهت‌گیری عناصر سیمای سرزمین دارد. معیارهای وضعیت فاکتورهایی مانند شکل و فشردگی لکه‌ها، فاصله بین لکه‌های همان کلاس (فاصله نزدیکترین همسایگی)، انبوهی انواع لکه‌ها و درجه تضاد در طول حاشیه لکه‌ها را اندازه‌گیری می‌کند. ترکیب و وضعیت سیمای سرزمین بر فرایندهای بوم‌شناختی به طور مستقل و متقابل تاثیر می‌گذارد. بنابراین فهمیدن اینکه چه بخشی از الگوی سیمای سرزمین به وسیله یک معیار خاص کمی‌سازی شده است بسیار مهم است (McGarigal et al., 2002). معیارهای سیماهای سرزمین را بسته به هدف موردنظر می‌توان در چهار سطح به کارگرفت: ۱. سلول (تنها هنگام استفاده از داده‌های رستری) ۲. لکه ۳. کلاس ۴. سیمای سرزمین. معیارهای سطح سلول فعلا در بوم‌شناسی سیمای سرزمین به خوبی توسعه داده نشده‌اند و به کار نیز گرفته نشده‌اند. مزیت معیارهای سیمای سرزمین شامل محاسبه و یادگیری آسان آن‌ها توسط بوم‌شناسان سیمای سرزمین است (McGarigal et al., 2002). با این وجود، ارتباط بوم‌شناختی محدوده وسیعی از معیارهای موجود در ارزیابی مشکل است و اگر با توجه به مفهوم و محدودیت‌ها تجزیه و تحلیل نشوند منجر به نتایج گمراه‌کننده می‌شود (Li & Wu, 2004). به عنوان مثال، نشان داده شده است که برخی از معیارها، اگرچه به طور متفاوتی محاسبه شده‌اند اما همبستگی بالایی دارند (Ritters et al., 1995; Gustafson, 1998; Turner et al., 2001; Neel et al., 2004). سایر مطالعات نشان داده‌اند که مقایسه معیارها در مقیاس‌های مختلف نیز دشوار است (Wu et al., 2002). بنابراین، بسته به مقیاس مطالعه، نتایج متفاوتی در بوم‌شناسی حاصل شده است (Turner

تصویر سیمای سرزمین تفسیر کرد. بنابراین، اندازه را می‌توان به عنوان معیاری از پیچیدگی سیمای سرزمین براساس الگوریتم‌های فشرده‌سازی تفسیر کرد (Sprott et al., 2002; Bolinger et al., 2003). محاسبه پیچیدگی الگوریتمی آسان است و مقایسه میان تصاویر مختلف سیمای سرزمین در زمان‌های مختلف را امکان‌پذیر می‌سازد. با این وجود، این معیار، معیاری نسبی است و جزئیات مربوط به این که کدام یک از عناصر سیمای سرزمین موجب افزایش یا کاهش اندازه فایل می‌شود را ارائه نمی‌دهد.

معیارهای سیمای سرزمین^(۷)

از نظر آماری معیارهای سیمای سرزمین نمایانگر سیماهای سرزمین یا ویژگی‌های فردی لکه‌ها هستند و ابزار استاندارد به منظور تجزیه و تحلیل سوالات مرتبط با ترکیب و وضعیت سیمای سرزمین هستند (Turner et al., 2001; McGarigal et al., 2000). معیارهای ترکیب سیمای سرزمین، الگوهای سیمای سرزمین را شناسایی و توصیف می‌کنند درحالی‌که، معیارهای وضعیت، آرایش مکانی عناصر سیمای سرزمین را مورد بررسی قرار می‌دهند. ترکیب سیمای سرزمین با استفاده از معیارهایی مانند تنوع سیمای سرزمین (شانون و سیمپسون) یا نسبت منطقه اشغال شده توسط تیپ‌های زیستگاهی ارزیابی می‌شود (Turner et al., 2001). معیارهای وضعیت سیمای سرزمین شامل مجاورت لکه‌ها^(۸)، شکل لکه‌ها یا پیوستگی میان لکه‌ها هستند (Turner et al., 2001). اندازه و شکل لکه‌ها بر فرایندهای بوم‌شناختی مختلفی تاثیر می‌گذارند مانند جریان‌ات میان لکه‌ها در استراتژی‌های غذایی حیوانات (Zollner & Lima, 1997). خصوصیات شکل لکه را می‌توان به طور مستقیم با ناهمگنی کلی سیمای سرزمین مرتبط دانست، در حالی‌که، مساحت یک لکه رابط بزرگ بوم‌شناختی است که تعیین‌کننده فضا برای حفظ پایداری جمعیت است. معیارهای سیمای سرزمین ساختار مکانی لکه‌ها، طبقات لکه‌ها و کل موزاییک لکه (سیمای سرزمین) را توصیف و اندازه‌گیری می‌کنند. معیارها اطلاعات مفیدی را ترکیب و وضعیت سیمای سرزمین ارائه می‌دهند به عنوان مثال، نسبت هر نوع کاربری اراضی موجود و یا اندازه و شکل عناصر سیمای سرزمین را نشان می‌دهد. ارزش اصلی معیارهای سیمای سرزمین در سودمندی آن‌ها برای مقایسه وضعیت‌های مختلف سیمای سرزمین است به

سری‌های زمانی، تجزیه و تحلیل طیفی با فرض همپوشانی ساختارهای دوره‌ای با طول موج (بسامد) و دامنه‌های متفاوت، با استفاده از تحلیل فوریه سری‌ها را به امواج سینوسی و کسینوسی تبدیل می‌کند. به منظور ارزیابی طیف فوریه، لگاریتم دامنه مربع در مقابل لگاریتم بسامد رسم می‌شود. تجزیه و تحلیل سطوح مکانی متکی به پریدوگرام^(۱۳) است که معیاری از واریانس است که در مقابل واریانس رسم می‌گردد (Dale, 2000). نتایج به دست آمده از تجزیه و تحلیل طیفی را می‌توان به طور گرافیکی به وسیله پریدوگرام نشان داد، کاربرد این شاخص‌ها در بوم‌شناسی سیمای سرزمین کمک به شناسایی مقیاس‌های زمانی و مکانی خاص است که به طور معمول در سیمای سرزمین وجود دارند.

چین‌خوردگی‌ها و حفره^(۱۴)

چین‌خوردگی‌ها (Mandelbrot, 1983) نمایانگرهای عددی پیچیدگی هستند. بسیاری از اشیاء مربوط به تحقیقات بوم‌شناسی سیمای سرزمین دارای چین‌خوردگی در دو یا سه بعد هستند. چین‌خوردگی‌ها ویژگی‌های مختلفی دارند (Sprott, 2003). به عنوان مثال دارای اشکال هندسی بسیار نامنظم هستند یا شبیه به یکدیگر هستند به این معنی که عناصر فردی یک شیء مشابه تمام شیء است. نسخه‌های بی‌پایان، عناصر سیمای سرزمین را می‌سازند. خودتشابهی^(۱۵) به این معنی است که شیء مستقل از مقیاس مشاهدات است و الگوهای بزرگ مقیاس را می‌توان با استفاده از ویژگی‌های الگوهای کوچک مقیاس پیش‌بینی کرد و برعکس. حد بالایی مقیاس توسط حد شیء یا سیمای سرزمین تعیین می‌گردد. حد پایین توسط اندازه دانه‌بندی تعیین می‌شود. در مطالعات سیمای سرزمین هندسه چین‌خوردگی را می‌توان به منظور کمی‌سازی پیچیدگی مکانی سیمای سرزمین استفاده کرد (Mandelbrot, 1983; Milen, 1988, 1991; Milen et al., 1992; Sprott et al., 2002; Bollinger et al., 2003). چین‌خوردگی‌ها را می‌توان به وسیله الگوریتم‌هایی توصیف کرد که نسبت فضای هندسی اشغال شده به وسیله چین‌خوردگی را کمی‌سازی می‌کنند. چین‌خوردگی‌هایی که دارای بعد چین‌خوردگی یکسان هستند ممکن است ظواهر مختلفی داشته باشند (Plotnick et al., 1993). در الگوهای گسسته این تفاوت‌ها به وسیله اندازه حفره‌ها تعیین می‌شوند. به منظور کمی‌سازی بافت مرتبط با الگوهای پراکنش مکانی، اندازه‌گیری حفره‌ها در ساختار هندسی توسط شاخص‌های حفره‌بندی صورت

et al., 2001; Li & Wu, 2004). علاوه بر این بیان شده که روش‌های فعلی کمی‌سازی سیمای سرزمین در مقایسه با توانایی ما در تفسیر ویژگی‌های سیمای سرزمین مرتبط با فرایندهای بوم‌شناسی پیشرفته‌تر هستند (Turner et al., 2001). بنابراین، بررسی ارتباطات میان الگوها و فرایندها نیازمند ارزیابی دقیق است (Turner et al., 2001; Li & Wu, 2004).

شاخص‌های پیوسته و ایستا سیمای سرزمین زمین آمار^(۹)

زمین آمار روشی برای کمی‌سازی سطوح پیوسته و ارزیابی میزان و گستره همبستگی مکانی^(۱۰) است. همبستگی مکانی شاخصی است که پدیده‌ای را اندازه‌گیری می‌کند که در آن مشاهدات نزدیک به هم نسبت به آن‌هایی که دورتر هستند مشابه‌تر هستند. فاصله‌ای که در آن همبستگی مکانی فعالیت می‌کند، نشان‌دهنده مقیاس مکانی یک سیستم است. بنابراین، مشاهداتی که فراتر از این فاصله هستند دارای همبستگی آماری و اکولوژیکی نیستند. همبستگی مکانی مثبت ناشی از یک فرایند مکانی مانند پراکنش است. اکثر رویکردهای کمی‌سازی همبستگی مکانی در اهداف کاربردی‌شان متفاوت هستند، روش‌های زمین آمار به منظور تخمین پارامترهای جمعیت از مشاهدات وابسته یا درون‌یابی مقادیر در مکان‌های مشاهده نشده، بر ساختار کوواریانس مکانی یک متغیر تمرکز می‌کنند. از سوی دیگر هدف آماره‌های توسعه یافته در جغرافیا بررسی حضور یک فرایند مکانی به منظور مدل کردن این فرایند و محاسبه همبستگی مکانی به هنگام ارزیابی همبستگی میان متغیرهای مکانی است (Fortin et al., 2001). با این وجود، تمام این روش‌ها نیازمند یک فرض ثابت است، یعنی ساختار همبستگی مکانی باید در سرتاسر منطقه مورد مطالعه یکسان باشد. مدل‌سازی واریوگرام^(۱۱) به طور گسترده‌ای برای ارزیابی ساختار مکانی متغیرهای پیوسته به کار گرفته شده است (Haining, 1997). واریوگرام نمودار سمی‌واریانس^(۱۲) میان مشاهدات جفتی در مقابل فاصله جغرافیایی است. این نمودار را می‌توان به طور چشمی به منظور ارزیابی چگونگی تغییر واریانس متغیر با فاصله تفسیر کرد.

تجزیه و تحلیل طیفی

تجزیه و تحلیل طیفی در زمره بهترین روش‌های شناخته شده به منظور توصیف داده‌های زمانی است. هنگام تجزیه و تحلیل

جوامع بوم‌شناسان سیمای سرزمین قرار گرفته‌اند (Mcgarigal & Cushman, 2005).

شاخص‌های پویا و گسسته سیمای سرزمین

اولین مرحله در کمی‌سازی تغییرات سیمای سرزمین مقایسه میان دو دوره زمانی است. به عنوان مثال طبقه‌بندی تصاویر سنجنش از دور در مراحل زمانی مختلف، نتایج تغییر بسامدها به عنوان شاخصی از تغییر سیمای سرزمین است که نمایانگر میزان و موقعیت تغییرات مکانی است. بدیهی است که این گونه مقایسات تنها زمانی معتبر است که روش به کار گرفته شده یکسان باشد یعنی زمین مرجع باشند و الگوریتم‌های طبقه‌بندی و نمونه‌گیری و قوانین به کار رفته یکی باشند. مقایسه براساس ویژگی‌های نقشه یا پیکسل‌ها است (ارزیابی تغییرات از حالتی به حالتی دیگر). با استفاده از ماتریس‌های تغییر و زنجیره‌های مارکوف، تغییر وضعیت هر پیکسل بین دو دوره زمانی در یک ماتریس احتمال تغییر تعیین می‌گردد (Dale et al., 2002). این ماتریس، ماتریسی مربعی است که سطرها و ستون‌های یکسانی دارد که وضعیت‌ها را نشان می‌دهند. یک سلول در سطر A و یک سلول در ستون B بیانگر احتمال تغییر یک پیکسل با وضعیت اولیه A به وضعیت B در یک مرحله زمانی است. احتمال تغییر به وسیله تعداد تغییرات مشاهده شده A به B تقسیم بر تعداد پیکسل‌های دارای وضعیت A به دست می‌آید. برای K مرحله زمانی با فواصل زمانی ثابت، $k-1$ ماتریس تغییر حاصل می‌گردد. ماتریس تغییر، مقدار تغییرات میان همه کاربری‌ها در مراحل زمانی را نشان می‌دهد. تحت این فرض که تغییر یک پیکسل بین دوره‌های زمانی t_1 و t_2 تنها بستگی به وضعیت پیکسل در زمان t_1 دارد، ماتریس احتمال تغییر، یک زنجیره مارکوف مرتبه اول را توصیف می‌کند (El-Shaarawi, 2002). گاهی اوقات در بوم‌شناسی این فرض با ایجاد الزامات زمان نگه‌داری جایگزین می‌شود، بدین معنی که یک پیکسل برای ثابت ماندن در وضعیت A حداقل در X مرحله زمانی قبل از تغییر به وضعیت B نیاز دارد (Acevedo et al., 1995; Yemshanov & Perera, 2002). در برخی از حالات، زنجیره مارکوف صرف‌نظر از شرایط اولیه، در یک حالت تعادل همگرا می‌شود (Usher, 1992). یک زنجیره مارکوف سستی، یک فرایند زمانی ضمنی را ارائه می‌دهد. درحالی که، معرفی یک بعد مکانی واضح منجر به زنجیره‌های مکانی-زمانی می‌شود که زنجیره مارکوف را با

می‌پذیرد (Plotnick et al., 1993; Mandelbrot, 1983). شاخص‌های حفره‌بندی شاخص‌هایی مفید با ساختار سطحی برای داده‌های پیوسته سیمای سرزمین هستند که قله‌ها و دره‌ها را اندازه‌گیری می‌کنند (Mcgarigal & Cushman, 2005). به علاوه، این شاخص‌ها ابعاد چندگانه جدادگی را در مقیاس‌های مختلف اندازه‌گیری می‌کنند (Wu & Sui, 2001).

تجزیه و تحلیل موجی (۱۶)

تجزیه و تحلیل موجی مشابه تجزیه و تحلیل طیفی است اما به جای نمایش یک الگو به وسیله ترکیب خطی توابع سینوسی در مقیاس‌های مختلف، از توابع موجی انعطاف‌پذیرتری استفاده می‌کند (Percival, 2001). تجزیه و تحلیل موجی جایگزین امیدوارکننده‌ای برای توصیف و تقسیم‌بندی سیمای سرزمین هستند و این روش به آسانی داده‌های بزرگی مانند تصاویر سنجنش از دور را به کار می‌گیرد (Bradshaw & Spies, 1992; Mcgarigal & Cushman, 2005). مزیت تجزیه و تحلیل موجی این است که اطلاعات سلسله مراتبی ساختار سطح را حفظ می‌کند و همزمان تجزیه الگو را مقصور می‌سازد (Bradshaw & Spies, 1992). نتایج را می‌توان به دو گونه تفسیر کرد: ۱. واریانس موجی، مقیاس‌هایی را شناسایی می‌کند که تاثیر زیادی بر الگو دارند، در حالی که درجه تطبیق تابع موجی را می‌توان به طور مستقیم از روی داده‌ها نقشه‌سازی کرد. بنابراین، شناسایی موقعیت مکانی یک ساختار خاص را فراهم می‌سازد. ۲. تجزیه و تحلیل موجی را می‌توان به عنوان یک متغیر توضیحی به منظور پیش‌بینی پاسخ‌های زیستی استفاده کرد (Keitt & Urban, 2005).

شاخص‌های سنجنش سطح (۱۷)

سطوح پیوسته ویژگی‌های زیادی دارند و نمی‌توان آن‌ها را به وسیله رویکردهای زمین آمار که فواصل همبستگی را کمی‌سازی می‌کنند یا توسط تجزیه و تحلیل طیفی که مقیاس‌های مکانی و زمانی خاصی از ساختارهای دوره‌ای را شناسایی می‌کند، ارزیابی کرد. ویژگی‌های اضافه سطوح پیوسته عبارتند از ناهمواری، چولگی، انحنا و قله‌های محلی. این ویژگی‌ها را باید با استفاده از شاخص‌های سنجنش سطح ارزیابی کرد، این شاخص‌ها مبتنی بر روش‌هایی هستند که در فیزیک مولکولی و میکروسکوپی توسعه داده شده‌اند (SPIP, 2001). اخیراً این شاخص‌ها مورد توجه

شبکه‌های خودکار ترکیب می‌کند (Balzter et al., 1998).

شاخص‌های پویا و پیوسته سیمای سرزمین

شاخص‌های پویا و پیوسته برای تغییرات سیمای سرزمین را می‌توان در سیستم‌های پویا یا نظریه اطلاعات پیدا کرد. در حال حاضر این شاخص‌ها متکی به شبیه‌سازی مدل‌ها هستند. زیرا داده‌های تجربی (مانند عکس‌های هوایی و داده‌های میدانی) به ندرت اطلاعات بلند مدت (سری‌های زمانی) را ارائه می‌دهند. یک مثال از شاخص‌های پویا و پیوسته، پیچیدگی مکانی و زمانی است که تغییرات لکه‌های پوشش گیاهی را کمی‌سازی می‌کنند (Parrott, 2005). این شاخص مشابه آنتروپی اطلاعات-مبنای شانون^(۱۸) است و با لکه‌های تجمع یافته، تصادفی و طبقه‌بندی^(۱۹) شده فرق دارد (Parrott, 2005).

توان لیاپانوف^(۲۰)

شاخص‌هایی به منظور ارزیابی قابلیت پیش‌بینی یک سیستم به وسیله اندازه‌گیری گستره‌ای هستند که در آن تغییرات کوچک بزرگ‌تر شده‌اند. بنابراین چگونگی حساسیت یک سیستم به آشفتگی‌ها و تغییرات را اندازه‌گیری می‌کنند. در اکثر موارد آشفتگی‌ها گرایش به بزرگ‌تر شدن دارند و اهمیتی ندارد که آشفتگی‌های اولیه چقدر کوچک بودند. این رفتار که در آن آشفتگی‌های کوچک، بزرگ‌تر می‌شوند، به عنوان حساسیت به شرایط اولیه نامیده می‌شود. توان‌های لیاپانوف نرخ متوسطی را بازتاب می‌کند که در آن آشفتگی‌ها افزایش یا کاهش می‌یابند. هر توان شمار توان‌های لیاپانوف به فراوانی ابعاد فضا هستند، هر توان نشان‌دهنده این است که آیا آشفتگی‌ها در یک مسیر خاص افزایش می‌یابند یا کاهش (Eckmann & Ruelle, 1985). در نتیجه، کاربرد توان‌های لیاپانوف در بوم‌شناسی سیمای سرزمین ارزیابی در پیش‌بینی مدل‌ها است. به علاوه، از آنجا که وابستگی به شرایط اولیه یکی از نشانه‌های آشوب^(۲۱) است (Sprott, 2003)، توان‌های لیاپانوف را می‌توان به منظور ارزیابی این که آیا یک سیستم آشفته است یا نه به کار گرفت. ارزیابی جذبه زیباشناختی هنر و طبیعت (Hunziker et al., 2007)، نشان می‌دهد که تعادل سادگی و پیچیدگی، نظم و غیرقابل پیش‌بینی بودن، بیش‌تر توسط انسان‌ها ترجیح داده می‌شود (Aks & Sprott, 1996). نتایج نشان داد که همبستگی میان توان‌های لیاپانوف (غیرقابل پیش‌بینی بودن فرایندهای پویا) و ترجیحات

زیباشناختی مردم برای الگوها، توان‌های لیاپانوف متوسطی داشت که متناظر با بسیاری از اشیا طبیعی است (Aks & Sprott, 1996).

بحث و نتیجه‌گیری

هدف بوم‌شناسی سیمای سرزمین تعیین مکان و زمان ناهمگنی و چگونگی تاثیر آن بر فرایندها است (Turner, 1989). بنابراین، آنچه که بوم‌شناسی سیمای سرزمین را از سایر شاخه‌های بوم‌شناسی متمایز می‌کند، تاکید و تمرکز بوم‌شناسی سیمای سرزمین بر الگوی مکانی اکوسیستم‌ها است. از آنجا که الگوهای سیمای سرزمین بر فرایندهای بوم‌شناختی اکوسیستم تاثیر می‌گذارند، بنابراین، شناخت، پیش‌بینی و درک این الگوها به منظور حفظ تنوع‌زیستی امری ضروری و مهم است. موضوع اساسی در این زمینه، حول انتخاب‌های یک محقق در اندازه‌گیری و به تصویر کشیدن ناهمگنی است، به طور ویژه، چگونه این انتخاب‌ها تحت تاثیر الگوهای که مشاهده خواهند شد، قرار می‌گیرند و چه مکانیسم‌هایی ممکن است به عنوان فاکتورهای بالقوه دخالت داده شوند. در واقع به خوبی شناخته شده است که الگوهای مشاهده شده و ارتباطات آشکار آن‌ها با متغیرهای پاسخ، اغلب به بستگی به مقیاسی دارد که برای مشاهده این الگوها انتخاب شده است (Wiens, 1989). موفقیت در درک ارتباطات میان الگو و فرایند منوط به تشخیص صحیح ناهمگنی در روشی است که به ارگانسیم‌ها یا فرایندهای مورد نظر مربوط است. با این نگاه، بوم‌شناسان سیمای سرزمین یک الگوی واحد را اتخاذ کرده‌اند، که این الگو مدل موزاییک لکه ساختار سیمای سرزمین است (Forman, 1995). در مدل موزاییک لکه، سیمای سرزمین به عنوان مجموعه‌ای از لکه‌های گسسته نمایش داده می‌شود. اکثر ناپیوستگی‌ها در تغییرات اساسی محیط‌زیستی به عنوان مرزهای گسسته میان لکه‌ها نمایش داده شده‌اند، سایر تغییرات یا به وسیله همین لکه‌ها نشان داده می‌شوند و یا اصلاً در نظر گرفته نمی‌شوند. این مدل ثابت کرده که کاملاً کارآمد است. به خصوص، یک چارچوب سازمانی ساده ارائه می‌دهد که طرح آزمایشی، تجزیه و تحلیل و مدیریت سازگار با ابزار را تسهیل می‌کند. در واقع، اصول مهم بوم‌شناسی سیمای سرزمین امروزی براساس این دیدگاه به وجود آمده‌اند (به عنوان مثال، موضوعات ساختار لکه، مفهوم لکه، تغییرات الگو با مقیاس). با این وجود، حتی سرسخت‌ترین حامیان مدل موزاییک

کاهش ادغام روش‌های زمین آماری و چند متغیره به جعبه ابزار بوم‌شناسی سیمای سرزمین می‌شود.

یادداشت‌ها

1. Grain
2. Chorology
3. Information Theory
4. Fractal Geometry
5. Percolation Theory
6. Algorithmic complexity
7. Landscape metrics
8. Patch adjacency
9. Geostatistics
10. Spatial autocorrelation
11. Variogram
12. Semivariance
13. Periodogram
14. Fractals and lacunarity
15. Self-similarity
16. Wavelet analysis
17. Surface metrics
18. Information-based Shannon entropy
19. Ordered
20. Lyapunov exponents
21. Chaos

لکه می‌دانند که نمایش طبقه‌ای متغیرهای محیط‌زیستی اغلب نمایشی ضعیف از ناهمگنی واقعی یک سیستم که ممکن است متشکل از شیب‌های تدریجی و پیوسته چند بعدی باشد را ارائه می‌دهد. تا کنون مدل‌های جایگزین ساختار سیمای سرزمین، براساس تغییرات پیوسته محیط‌زیستی به خوبی توسعه داده نشده‌اند. اعتقاد بر این است که پیشرفت‌های فراتر در بوم‌شناسی سیمای سرزمین به علت فقدان روش و ابزار تجزیه و تحلیلی برای به تصویر کشیدن و تجزیه و تحلیل پدیده‌های پیوسته بوم‌شناختی در سطح سیمای سرزمین محدود شده‌اند. فرض بر این است که ساده‌سازی تغییرپذیری محیط‌زیستی در سطح سیمای سرزمین به نقشه‌های طبقه‌بندی شده، اندازه‌گیری وضوح ویژگی‌های پیوسته را با شکست مواجه می‌سازد و منجر به کاهش قابل توجهی از اطلاعات، موضوعات مشکل‌آفرین ذهنیت و موجب انتشار خطا می‌گردد. توجه سنتی بر تجزیه و تحلیل نقشه‌های طبقه‌بندی شده، به استثنای دیدگاه‌های دیگر، کارآیی و انعطاف‌پذیری تجزیه و تحلیل کمی پدیده‌های مکانی را محدود می‌کند و منجر به جدایی مداوم میان روش‌ها و ایده‌های جوامع و بوم‌شناسی سیمای سرزمین و همچنین موجب

فهرست منابع

- Acevedo, M.F.; Urban, D.L. & Aflan, M. 1995. Transition and gap models of forest dynamics. *Ecological Applications*. 5: 1040–1055.
- Ahern, J. 2004. Greenways in the USA: theory, trends and prospects. *Jongman & Pungetti*.
- Aks, D.J. & Sprott, J.C. 1996. Quantifying aesthetic preference for chaotic patterns. *Empirical Studies of the Arts*. 14: 1–16.
- Balster, H.; Braun, P.W. & Kohler, W. 1998. Cellular automata models for vegetation dynamics. *Ecological Modelling*. 107: 113–125.
- Baudry, J. & Merriam, H.G. 1988. Connectivity and connectedness: Functional versus structural patterns in landscapes. In *Connectivity in landscape ecology: Proceedings of the 2nd International Seminar of the International Association for Landscape Ecology*, ed. K.F. Schreiber, 23–38. Paderborn, Germany: Munstersche Geographische Arbeiten 29. Ferdinand Schoningh.
- Bennett, A.F. 1999. Linkages in the landscape: the role of corridors and connectivity in wildlife conservation. *Iucn*. p.
- Bezdek, J.C. 1981. *Models for pattern recognition*. Springer. p: 1-13.
- Bolliger, J.; Sprott, J.C. & Mladenoff, D.J. 2003. Self-organisation and complexity in historical landscape patterns. *Oikos* 100: 541–553.
- Bolliger, J. & Mladenoff, D.J. 2005. Quantifying spatial classification uncertainties of the historical Wisconsin landscape (USA). *Ecography*. 28:141-156.

- Bolliger, J.; Wagner, H.H. & Turner, M.G. 2007. Identifying and quantifying landscape patterns in space and time. In: Kienast, F.; Wildi, O. & Ghosh, S. A Changing World. Challenges for Landscape Research, 177–194.
- Bradshaw, G.A. & Spies, T.A. 1992. Characterising canopy gap structure in forests using wavelet analysis. *Journal of Ecology*. 80: 205–215.
- Cousins, S.A.O. & Lindborg, R. 2002. Assessing changes in plant distribution patterns – indicator species versus plant functional types. *Ecological Indicators*. 1: 17–27.
- Cushman, S.A.; Gutzweiler, K.; Evans, J.S. & McGarigal, K. 2010. The gradient paradigm: a conceptual and analytical framework for landscape ecology. *Springer*. p: 83-108.
- Dale, M.R.T. 2000. *Spatial pattern analysis in plant ecology*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Dale, V.A. 2001. Challenges in the development and use of ecological indicators. *Ecological Indicators* 1: 3–10.
- Dale, V.H.; Fortes, D.T. & Ashwood, T.L. 2002. A landscape-transition matrix approach for land management. *Integrating Landscape Ecology into Natural Resource Management*. 265-293.
- Duelli, P. & Obrist, M.K. 1998. In search of the best correlates for local organismal biodiversity in cultivated areas. *Biodiversity and Conservation*. 7: 297–309.
- Duelli, P. & Obrist, M.K. 2003. Biodiversity indicators: the choice of values and measures. *Agriculture Ecosystems and Environment*. 98: 87–98.
- Eckmann, J.P. & Ruelle, D. 1985. Ergodic theory of chaos and strange attractors. *Rev. Mod. Phys* 57: 617–656.
- Ellenberg, H. 1988. *Vegetation ecology of Central Europe*, 4th ed. Cambridge University Press.
- Fan, C. & Myint, S. 2014. A comparison of spatial autocorrelation indices and landscape metrics in measuring urban landscape fragmentation. *Landscape and Urban Planning*. 121:117-128.
- Farina, A. & di storia naturale della Lunigiana, M. 1993. *L'ecologia dei sistemi ambientali*. CLEUP. p.
- Farina, A. 2008. *Principles and methods in landscape ecology: towards a science of the landscape*. Springer Science & Business Media. p.
- Forman, R. & Godron, M. 1986. *Landscape ecology*. 619 pp. John Wiley & Sons, New York.
- Forman, R.T. 1990. The beginnings of landscape ecology in America. *Springer*. p: 35-41.
- Forman, R.T. 1995. *Land mosaics: the ecology of landscapes and regions*. Cambridge university press. p.
- Forman, R.T. & Alexander, I.F. 1998. Roads and their major ecological effects. *Ann. Rev. Ecol. Syst.* 29: 207–231.
- Fortin, M.J.; Dale, M.R.T. & ver Hoef, J. 2001. Spatial analysis in ecology. In: Piegorsch W.W. (ed.). *The Encyclopedia of Environmetrics*, pp. 2051–2058. John Wiley and Sons Ltd.
- Fritz, R.S. 1979. Consequences of insular population structure: distribution and extinction of spruce grouse populations. *Oecologia*. 42:57-65.
- Gergel, S.E.; Turner, M.G.; Miller, J.R.; Melack, J.M. & Stanley, H.E. 2002. Landscape indicators of human impacts to riverine systems. *Aquatic Science*. 64: 118–128.
- Girvetz, E.H.; Jaeger, J.A. & Thorne, J.H. 2007. Comment on “Roadless space of the conterminous United States”. *Science*. 318:1240b-1240b.
- Gosz, J.R. 1993. Ecotone hierarchies. *Ecological applications*. 370-376.

- Group, F.F.I.S.R.W. 1998. Stream Corridor Restoration: Principles, Processes, and Practices. Published USA government, October.
- Grove, S.J. 2002. Tree basal area and dead wood as surrogate indicators of saproxylic insect faunal integrity: a case study from the Australian lowland tropics. *Ecological Indicators* 1: 171–188.
- Gustafson, E.J. 1998. Quantifying landscape spatial pattern: what is the state of the art? *Ecosystems*. 1:143-156.
- Gustafson, E.J. & Parker, G.R. 1992. Relationship between landcover proportion and indices of landscape spatial pattern. *Landscape Ecology*. 7: 101–110.
- Haines- Young, R. & Chopping, M. 1996. Quantifying landscape structure: a review of landscape indices and their application to forested landscapes. *Progress in physical geography*. 20:418-445.
- Haining, R. 1997. *Spatial Data Analysis in the Social and Environmental Sciences*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Hargis, C.D.; Bissonnette, J.A. & David, J.L. 1998. The behavior of landscape metrics commonly used in the study of habitat fragmentation. *Landscape Ecology* 13: 167–186.
- Hoechstetter, S.; Walz, U.; Dang, L. & Thinh, N. 2008. Effects of topography and surface roughness in analyses of landscape structure—a proposal to modify the existing set of landscape metrics. *Landscape Online*. 3:1-14.
- Hunziker, M.; Buchecker, M. & Hartig, T. 2007. Space and place – two aspects of the human-landscape relationship. In: Kienast F., Wildi O. and Ghosh S. (eds.). *A Changing World. Challenges*
- Johnson, A.R. & Milne, B.T. 1992. Diffusion in fractal landscapes: simulations and experimental studies of tenebrionid beetle movement. *Ecology*. 73: 1968–1983.
- Jones, K.B.; Neale, A.C.; Nash, M.S.; Riitters, K.H.; Wickham, J.D.; O'Neill, R.V. & Van Remortel, R.D. 2000. Landscape correlates of breeding bird richness across the United States midatlantic region. *Environmental Monitoring and Assessment*. 63: 159–174.
- Keller, D.R. & Golley, F.B. 2000. *The philosophy of ecology: from science to synthesis*. University of Georgia Press. p.
- Kim, K.C. & Weaver, R.D. 1994. *Biodiversity and landscapes: a paradox of humanity*. Cambridge University Press. p.
- Keitt, T.H. & Urban, D. 2005. Scale-specific inference using wavelets. *Ecology* 86: 2497–2504.
- Lausch, A. & Herzog, F. 2002. Applicability of landscape metrics for the monitoring of landscape change: issues of scale, resolution and interpretability. *Ecological indicators*. 2:3-15.
- Lausch, A.; Blaschke, T.; Haase, D.; Herzog, F.; Syrbe, R.U.; Tischendorf, L. & Walz, U. 2015. Understanding and quantifying landscape structure—A review on relevant process characteristics, data models and landscape metrics. *Ecological Modelling*. 295:31-41.
- Levin, S.A. 1978. *Pattern formation in ecological communities*. Springer. p: 433-465.
- Levin, S.A. 1992. The problem of pattern and scale in ecology: the Robert H. MacArthur award lecture. *Ecology*. 73:1943-1967.
- Li, H. & Wu, J. 2004. Use and misuse of landscape indices. *Landscape Ecology* 19: 389–399.
- Liu, D.; Hao, S. Liu, X. Li, B. He, S. & Warrington, D. 2013. Effects of land use classification on landscape metrics based on remote sensing and GIS. *Environmental earth sciences*. 68:2229-2237.
- Mal, T.K.; Uveges, J.L. & Turk, K.W. 2002. Fluctuating asymmetry as an ecological indicator of heavy metal stress in *Lythrum salicaria*. *Ecological Indicators*. 1:189-195.

- Mandelbrot, B. 1982. *The fractal geometry of nature*. Freeman.
- McBratney, A.B. & Odeh, I.O. 1997. Application of fuzzy sets in soil science: fuzzy logic, fuzzy measurements and fuzzy decisions. *Geoderma*. 77:85-113.
- McGarigal, K.; Cushman, S.A.; Neel, M.C. & Ene E. 2002. FRAGSTATS: Spatial pattern analysis program for categorical maps. Computer software program produced by the authors at the University of Massachusetts, Amherst, MA, U.S.A. <http://www.umass.edu/landeco/research/fragstats/fragstats.html>.
- McGarigal, K. & Cushman, S. 2005. The gradient concept of landscape structure. In: Weins, J. and Moss, M.(eds), *Issues and perspectives in landscape ecology*, Cambridge Univ. Press, pp. 112-119.
- McGarigal, K.; Tagil, S. & Cushman, S.A. 2009. Surface metrics: an alternative to patch metrics for the quantification of landscape structure. *Landscape Ecology*. 24:433-450.
- Milne, B.T. 1998. Motivation and benefits of complex systems approaches in ecology. *Ecosystems*. 1: 449 – 456.
- Milne, B.T.; Turner, M.G.; Wiens, J.A. & Johnson, A.R. 1992. Interactions between the fractal geometry of landscapes and allometric herbivory. *Theoretical Population Biology*. 41: 337–353.
- Minasny, B. & McBratney, A. 2002. FuzME Version 3.0 <http://www.usyd.edu.au/su/agric/acpa/fkme/program.html>. The University of Sydney, Sydney, Australia.
- Moss, M.R. 2000. Interdisciplinarity, landscape ecology and the Transformation of Agricultural Landscapes'. *Landscape Ecology*. 15:303-311.
- Müller, F. 1998. Gradients in ecological systems. *Ecological modelling*. 108:3-21.
- Naveh, Z. 1998. The role of landscape ecology in the Mediterranean. *Challenges for Mediterranean landscape ecology: the future of cultural landscapes-examples from the Alentejo region: proceedings of the 1st national workshop of landscape ecology*. Portuguese Association for Landscape Ecology APEP, Montemor-o-Novo.
- Naveh, Z. 1994. Biodiversity and landscape management. In *Biodiversity and landscapes: A paradox to humanity*, eds. K.C. Kim and R.D. Weaver. 187–207. Cambridge: Cambridge University Press.
- Naveh, Z. & Lieberman, A.S. 2013. *Landscape ecology: theory and application*. Springer Science & Business Media. p.
- Neel, M.C.; McGarigal, K. & Cushman, S.A. 2004. Behaviour of class-level landscape metrics across gradients of class aggregation and area. *Landscape Ecology* 19: 435–455.
- O'Neill, R.V.; Milne, B.T.; Turner, M.G. & Gardner, R.H. 1987. Resource utilization scales and landscape pattern. *Landscape Ecology*. 2: 63–69.
- Opdam, P. 1991. Metapopulation theory and habitat fragmentation: a review of holarctic breeding bird studies. *Landscape ecology*. 5:93-106.
- Opdam, P.; van Apeldoorn, R. Schotman, A. & Kalkhoven, J. 1993. Population responses to landscape fragmentation. *Springer*. p: 147-171.
- Parrott, L. 2005. Quantifying the complexity of simulated spatiotemporal population dynamics. *Ecological Complexity* 2: 175–184.
- Percival, D.B. 2001. Wavelets. In: Piegorsch W.W. (ed.). *The Encyclopedia of Environmetrics*, pp. 2338–2351. John Wiley and Sons Ltd., New York.
- Plotnick, R.E.; Gardner, R.H. & O'Neill, R.V. 1993. Lacunarity indices as measures of landscape texture. *Landscape Ecology* 8: 201–211.

- Regan, H.M.; Colyvan, M. & Burgman, M. A. 2000. A proposal for fuzzy International Union for the Conservation of Nature (IUCN) categories and criteria. *Biological Conservation*. 92:101-108.
- Riitters, K.H.; O'Neill, R.; Hunsaker, C.; Wickham, J.D.; Yankee, D.; Timmins, S.; Jones, K. & Jackson, B. 1995. A factor analysis of landscape pattern and structure metrics. *Landscape ecology*. 10:23-39.
- Risser, P.G. 1984. *Landscape ecology: directions and approaches*. Illinois Natural History Survey. p.
- Selman, P. & Doar, N. 1992. An investigation of the potential for landscape ecology to act as a basis for rural land use plans. *Journal of Environmental Management*. 35:281-299.
- Schreiber, K.F. 1990. The history of landscape ecology in Europe. Springer. p: 21-33.
- Snacken, F. & Antrop, M. 1983. Structure and dynamics of landscape systems. In: Drdos J. (ed.). *Landscape synthesis: geoecological foundations of the complex landscape management*, pp. 10-30. Veda Publishing House of the Slovak Academy of Sciences, Bratislava.
- SPIP, 2001. The scanning probe image processor. Image metrology APS. Lyngby, Denmark
- Sprott, J.C. 2003. *Chaos and time-series analysis*. Oxford University Press, Oxford.
- Sprott, J.C.; Bolliger, J. & Mladenoff, D.J. 2002. Self-organised criticality in forest-landscape evolution. *Physics Letters*. 297: 267-271.
- Stupariu, M.; Pătru-Stupariu, I. & Cuculici, R. 2010. Geometric approaches to computing 3D-landscape metrics. *Landscape Online*. 24:1-12.
- Taylor, P.D.; Fahrig, L.; Henein, K. & Merriam, G. 1993. Connectivity is a vital element of landscape structure. *Oikos*. 68: 571-573.
- Thompson, C.M. & McGarigal, K. 2002. The influence of research scale on bald eagle habitat selection along the lower Hudson River, New York (USA). *Landscape Ecology*. 17:569-586.
- Tischendorf, L. 2001. Can landscape indices predict ecological processes consistently? *Landscape ecology*. 16:235-254.
- Turner, M.G. 1989. Landscape ecology: the effect of pattern on process. *Annual review of ecology and systematics*. 17:1-197.
- Turner, M.G.; Gardner, R.H. & O'Neill, R.V. 2001. *Landscape ecology in theory and practice: pattern and process*. Springer Science & Business Media. p.
- Turner, M.G. 2005. Landscape ecology in North America: past, present, and future. *Ecology*. 86:1967-1974.
- Usher, M.B. 1992. Statistical models of succession. In: Glenn-Lewin D.C., Peet R.K. and Veblen T.T. (eds.), *Plant succession: theory and prediction*, pp. 215-248. Chapman and Hall, London.
- Wade, T.G.; Wickham, J.D.; Nash, M.S.; Neale, A.C.; Riitters, K.H. & Jones, K.B. 2003. A comparison of vector and raster GIS methods for calculating landscape metrics used in environmental assessments. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 69: 1399-1405.
- Wiens, J.A.; Chr, N.; Van Horne, B. & Ims, R.A. 1993. Ecological mechanisms and landscape ecology. *Oikos*. 369-380.
- Wiens, J. 2000. Ecological heterogeneity: an ontogeny of concepts and approaches. *The ecological consequences of environmental heterogeneity*. 9-31.
- With, K.A. 1994. Using fractal analysis to assess how species perceive landscape structure. *Landscape Ecology* 9: 25-36.
- With, K.A. 1997. The application of neutral landscape models in conservation biology. *Conserv Biol*. 11: 1069-1080.

- Wu, J.; Shen, W.; Sun, W. & Tueller, P.T. 2002. Empirical patterns of the effects of changing scale on landscape metrics. *Landscape Ecology* 17: 761–782.
- Wu, X.B. & Sui, D.Z. 2001. An initial exploration of a lacunarity-based segregation measure. *Environment and Planning B: Planning and Design* 28: 433–446.
- Yemshanov, D. & Perera, A.H. 2002. A spatially explicit stochastic model to simulate boreal forest cover transitions: general structure and properties. *Ecological Modelling*. 150: 189-209.
- Zadeh, L.A. 1965. Fuzzy sets. *Information and control*. 8:338-353.
- Zollner, P.A. & Lima, S.L. 1997. Landscape-level perceptual abilities in white-footed mice: perceptual range and the detection of forested habitat. *Oikos* 80: 51–60.