

نظریه پیچیدگی و اندازه‌گیری پیچیدگی اکوسیستم‌ها در سیمای سرزمین

احسان رحیمی*^۱، عبدالرسول سلمان ماهینی^۲

۱ دانشجوی دکتری محیط‌زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران
۲ استاد گروه محیط‌زیست دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۵/۱۶؛ تاریخ تصویب: ۱۳۹۸/۰۴/۱۰)

چکیده

پیچیدگی مفهومی مبهم در بوم‌شناسی است که در مطالعه‌های مختلفی به منظور توصیف وضعیت یک اکوسیستم به کار گرفته شده است. نویسندگان بسیاری اذعان کرده‌اند که اکوسیستم نمونه‌ای از یک سیستم پیچیده است. کنش‌های متقابل میان موجودات منجر به پیچیدگی اکوسیستم‌ها می‌شود و کنش‌های متقابل میان موجودات و محیط بی‌جان نیز بر این پیچیدگی تاثیر می‌گذارد. اکوسیستم‌ها از طریق فرایند خودسازمان‌دهی به سوی پیچیدگی بیش‌تر حرکت می‌کنند و پیچیده‌ترین سیستم‌ها در محدوده بینابینی نظم و بی‌نظمی قرار می‌گیرند (Parrott, 2010). آشفتگی‌های طبیعی موجب می‌شوند تا اکوسیستم به سوی وضعیت بی‌نظمی حرکت کند در حالی که دخالت‌های انسان این سیستم‌ها را به سوی نظم بیش‌تر سوق می‌دهد که موجب پیچیدگی کم‌تر اکوسیستم‌ها می‌شود. امروزه، نبود شناخت و درکی کافی از مفهوم پیچیدگی موجود در اکوسیستم‌ها منجر به تخریب اکوسیستم‌های مهمی شده است و احیا و بازسازی آن‌ها را مشکل‌تر ساخته است. زیرا، این اکوسیستم‌ها حاصل کنش‌های متقابل میان مولفه‌های تشکیل دهنده خود بوده‌اند و با از بین رفتن یکی از این مولفه‌ها کارکرد سایر مولفه‌ها نیز با مشکل روبه‌رو شده است. این مطالعه با هدف تشریح مفهوم پیچیدگی به عنوان یک ویژگی مهم از اکوسیستم‌ها و معرفی معیارهای اندازه‌گیری این پیچیدگی تلاش می‌کند تا دانش کارشناسان و مدیران محیط‌زیست را نسبت به اثرات ناشی از فعالیت‌های انسانی افزایش دهد. معیارهای به کار گرفته شده به منظور توصیف پیچیدگی اکوسیستم‌ها شامل معیارهای مکانی، زمانی، ساختاری و مکانی-زمانی هستند. باید خاطر نشان کرد که اگر معیارهای مناسبی به منظور توصیف پیچیدگی اکوسیستم‌ها توسعه داده شود، آنگاه می‌توان پیچیدگی بوم‌شناختی را به عنوان شاخصی بوم‌شناختی در بررسی سیمای سرزمین به کار گرفت.

کلید واژه‌ها: نظریه پیچیدگی، سیستم‌های پیچیده، اندازه‌گیری پیچیدگی اکوسیستم‌ها، خود سازمان‌دهی، فعالیت‌های انسانی

سرآغاز

لازم به ذکر است که بخش‌های مقدماتی و توصیفی این مطالعه برگرفته از دو کتاب پیچیدگی در بوم‌شناسی سیمای سرزمین (Green, 2006) و اصول و روش‌های بوم‌شناسی سیمای سرزمین (Farina, 2006) هستند و بخش‌های مربوط به اندازه‌گیری پیچیدگی برگرفته از مطالعه‌ای با عنوان اندازه‌گیری پیچیدگی اکولوژیکی (Parrott, 2010) است. نظریه پیچیدگی^(۱) به عنوان گرایش علمی غالب در دهه ۱۹۹۰ شناخته شد. این نظریه قادر به توضیح پیچیدگی انواع سیستم‌ها است. این سیستم‌ها می‌توانند موسسات چند ملیتی، انقراض گونه‌ها، یا اکوسیستم‌هایی مانند جنگل‌های بارانی یا خودآگاهی انسانی باشند. همه این سیستم‌ها براساس قوانینی یکسان شکل گرفته‌اند (Lewin, 1992). نظریه پیچیدگی به سه جزء اصلی تقسیم می‌شود. ۱. پیچیدگی الگوریتمی^(۲) که در قالب نظریه پیچیدگی ریاضیاتی و نظریه اطلاعات^(۳) ادعا می‌کند که پیچیدگی یک سیستم نهفته در توصیف مشکل ویژگی‌های سیستم است. ۲. پیچیدگی قطعی^(۴) که به نظریه آشوب^(۵) و نظریه فاجعه^(۶) می‌پردازد و فرض می‌کند که کنش متقابل دو یا سه متغیر کلیدی می‌تواند منجر به ایجاد سیستم‌های مقاوم در برابر ناپیوستگی‌های ناگهانی شود. ۳. پیچیدگی تجمعی^(۷) به این موضوع می‌پردازد که چگونه عناصر فردی در ایجاد سیستم‌هایی با رفتار پیچیده به طور هماهنگ کار می‌کنند. در اصطلاحات میان رشته‌ای، محققان اغلب انواع مختلفی از پیچیدگی را در حل یک مشکل به کار می‌گیرند با این نگرش که این رویکردها مکمل یکدیگر هستند. این سه نوع پیچیدگی بیش‌تر درگیر با چگونگی توصیف ماهیت یک سیستم با توجه به بخش‌های سازنده آن در یک روش غیرتقلیلی هستند. با این حال، نظریه پیچیدگی در فلسفه ارگانیسم (Whitehead, 1925)، شبکه‌های عصبی (McCulloch & Pitts, 1943)، سایبرنتیک (Wiener, 1961) و شبکه‌های خودکار (Von Neumann, 1966) به چشم می‌خورد. نظریه پیچیدگی دربرگیرنده ارتباطات غیرخطی میان اشیایی است که مدام در حال تغییر هستند. نظریه پیچیدگی به چگونگی به وجود آمدن یک رفتار پیچیده از کنش‌های متقابل محلی نسبتاً ساده میان مولفه‌های سیستم در طول زمان می‌پردازد. همچنین به این موضوع که سیستم‌هایی که ویژگی‌های هم‌نیروبخشی و ناگهانی دارند را نمی‌توان بدون

توجه به ارتباطات زیرمولفه‌ای درک کرد. رفتار سیستم‌ها در اصطلاحاتی عمومی توسط (Ludwig Von Bertalanffy, 1962) توصیف شده است. با توجه به این نویسنده ضعف علم گذشته در نتیجه رویکرد کاهش‌گرایانه بوده که واحدهای اصلی را به طور مستقلانه مورد بررسی قرار می‌داده و ویژگی‌های به وجود آمده از تجمع این واحدها را نادیده گرفته است. نظریه سیستم‌های عمومی^(۸) به خاطر کلیت تصور شده‌اش توسط بخش وسیعی از دانشمندان نادیده گرفته شده است و شدیداً با نظریه پیچیدگی در ارتباط است. نظریه پیچیدگی اثبات‌گرا است اما نظریه سیستم‌های عمومی تفسیرگرا است (Phelan, 1999). چنانکه توسط Manson (2001) ذکر شده است، پیچیدگی یک ویژگی از چندین سیستم از محدوده‌های فیزیکی و اکولوژیکی تا اقتصادی است. به عنوان مثال نظریه پیچیدگی را می‌توان به منظور بررسی اینکه جوامع گیاهی چگونه ساختاری دارند و چگونه حفظ گردیده‌اند (Anand & Orloci, 1996) مورد استفاده قرار داد. پیچیدگی فرایندی خودگویا نیست و به الگوهای ویژه‌ای برای بررسی آن نیاز است. پیچیدگی به وسیله ادغام مکانیسم‌های تصادفی و جبری به وجود آمده است. عدم آگاهی از بسیاری از این مکانیسم‌ها برحسب عدم قطعیت به وسیله نظریه اطلاعات مورد بررسی قرار می‌گیرد. سیستم‌های پیچیده ویژگی‌های مشترک خود را به اشتراک می‌گذارند، از نظر ترمودینامیکی باز هستند، متشکل از تعداد زیادی عناصر هستند، سازگار هستند و مولفه‌های سیستم به طور غیرخطی با یکدیگر در کنش هستند، در فضا و مکان ناهمگن هستند و سرگذشتی برگشت ناپذیر دارند. سیستم‌های پیچیده یک رفتار بحرانی دارند. بدین معنی که یک تغییر ناگهانی در وضعیت رخ می‌دهد (آستانه تراوش (Ziff, 1986)) به عنوان جهش مضاعف یا نزول پیوستگی در نظریه گراف (Seely, 2000). سیستم‌های پیچیده ویژگی‌های برجسته‌ای دارند از جمله این که دارای کنش‌های متقابل سلسله مراتبی و چندمقیاسی، خودسازماندهی و رفتار غیرقابل پیش‌بینی هستند (همچنین نگاه کنید به Wu & Marceau, 2002). ساختار مکانی یک سیستم پیچیده را نمی‌توان به وسیله هندسه سنتی نشان داد بلکه با استفاده از هندسه چین‌خوردگی^(۹) می‌توان به این مهم دست یافت (Hastings & Sugihara, 1993). نویسندگان بسیاری اذعان کرده‌اند که یک اکوسیستم نمونه‌ای از یک سیستم پیچیده

از فنون اخیر که در زمینه‌هایی مانند نظریه اطلاعات و فیزیک توسعه یافته‌اند را با توجه به مطالعه (Parrott, 2010) توصیف می‌کند. در صورت موفقیت این معیارهای پیچیدگی می‌توانند به عنوان شاخص‌های تجمع تغییرات و ساختار اکوسیستم عمل کنند.

چیستی پیچیدگی

پیچیدگی پدیده‌ای شناخته شده است اما تعریف آن مشکل است. تعریفی کلی مشکل است زیرا اصطلاح پیچیدگی در روش‌های مختلف و در زمینه‌های مختلفی نمایان شده است. به عنوان مثال، در علوم کامپیوتری، معمولا اشاره به زمان مورد نیاز برای محاسبه راه‌حل یک مشکل دارد. در ریاضیات معمولا مرتبط با تغییرات غیرخطی و آشفتن است. (Green et al., 2006) پیچیدگی را به عنوان فراوانی و تنوع شکل و رفتار تعریف می‌کند که در اغلب سیستم‌های بزرگ دیده می‌شود (Bossomaier & Green 1998, 2000). اگر یک گورخر شروع به دویدن کند، تمام گله دچار وحشت می‌شوند و پا به فرار می‌گذارند. این رم کردن تصادفی نیست. گورخرهای در حال دویدن به یکدیگر برخورد نمی‌کنند اما چسبیده به هم حرکت می‌کنند و سرشان در یک سمت است. این یک رفتار پیچیده است. این رم کردن به واسطه کنش‌های متقابل میان گورخرها پدیدار می‌گردد. این ویژگی که بیش‌ترین ارتباط را با پیچیدگی دارد، «ظهور» نامیده می‌شود. ظهور اشکال زیادی دارد. یک جنگل از کنش‌های متقابل میلیون‌ها گیاه، حیوان و میکروب با یکدیگر و با سیمای سرزمین پدیدار می‌گردد.

چه چیزی موجب پیچیدگی اکوسیستم‌ها می‌شود؟

هنگامی که در مورد پیچیدگی در جهان طبیعی سخن می‌گوییم، ناگزیر بحث با تنوع‌زیستی آغاز می‌شود. دانشمندان از عبارت تنوع‌زیستی در چندین روش استفاده می‌کنند، تغییرپذیری ژنتیکی و یا تنوع اکوسیستم و جمعیت. تعداد کل گونه‌ها تقریباً بین ۱۰ تا ۳۰ میلیون تخمین زده شده است (May, 1988). اکثر مهره‌داران و گیاهان گلدار شناسایی گردیده‌اند، اما بی‌مهرگان، باکتری‌ها و سایر مخلوقات میکروسکوپی هنوز به خوبی شناسایی نگردیده‌اند (Wilson, 1992; Tangley, 1998). با سرعت فعلی تحقیقات طبقه‌بندی، حداقل ۳۰۰ سال دیگر طول می‌کشد تا نمونه‌های موجود در مجموعه‌ها را ثبت کنند (Green & Klomp, 1997). تنوع عظیمی از روش‌هایی که گونه‌ها با

است (Levin, 1998). نظریه اکولوژیکی تاریخچه‌ای طولانی در توصیف اکوسیستم‌ها از نظر جریان‌های مواد و انرژی میان مولفه‌های چندگانه در کنش متقابل دارد (Jorgensen & Müller, 2000; Odum, 1968) و مدلی مفهومی ارائه می‌دهد که با مدل‌های مفهومی فعلی سیستم‌های پیچیده بسیار سازگار است. اخیرا بوم‌شناسان مفهومی پیشنهاد داده‌اند که می‌توان ساختار و کارکرد اکوسیستم‌ها را با توجه به نظریه‌های ظهور، خودسازمان‌دهی، شبکه و تغییرات غیرخطی برگرفته از علوم فیزیکی درک و توصیف کرد (Levin, 1999; Solé & Bascompte, 2006). دیدگاه‌های جدید در بوم‌شناسی، اکوسیستم‌ها را به عنوان شبکه‌هایی سازگار و پویا از مولفه‌های در حال کنش معرفی می‌کند (Harris, 2007; Liu et al., 2007). طبیعی به نظر می‌رسد که فرض کنیم، اگر یک اکوسیستم یک سیستم پیچیده است پس هر تغییر در وضعیت آن در معیارهای تعیین کننده پیچیدگی این سیستم پیچیده نیز بازتاب خواهد داشت (Parrott, 2005). چگونه می‌توان پیچیدگی یک سیستم را اندازه‌گیری کرد، موضوعی که همیشه مطرح بوده و یک چالش کلیدی در تحقیقات پیچیدگی سیستم‌ها باقی گذاشته است. از خودتان پرسید کدام اکوسیستم پیچیده‌تر است: یک صخره مرجانی سالم و متنوع یا یک صخره مرجانی که تحت سلطه جلبک‌ها است؟ رشد ثانویه یک جنگل ساحلی معتدل که ۸۰ سال پیش تحت بهره‌برداری قرار گرفته یا یک عرصه جنگلی قدیمی در کنار آن که بیش از ۸۰۰ سال است که دچار آشفتنی نشده است؟ اکثر خوانندگان پاسخی حسی به این پرسش می‌دهند و اکوسیستم‌های مختلف را براساس پیچیدگی کمتر یا بیش‌تر نسبت به سایر اکوسیستم‌ها طبقه‌بندی می‌کنند. اکنون ما چگونه پیچیدگی یک اکوسیستم را اندازه‌گیری می‌کنیم؟ آیا می‌توانیم این ویژگی که در هر سطح از سیستم پیچیدگی خاص خود را دارد کمی‌سازی کنیم؟ و اگر می‌توانیم، آیا می‌توان از آن به عنوان یک شاخص اکولوژیکی استفاده کرد که به ما اطلاعاتی درباره سیستم ارائه دهد؟ اگرچه پیچیدگی مرتبط با معیارهای جامع و کل‌نگر ساختار و کارکرد اکوسیستم است، اما می‌توان آن را به عنوان یک ویژگی مجزا از یک سیستم در نظر گرفت (Parrott, 2010). از اینرو، اندازه‌گیری و کمی‌سازی این ویژگی امکان‌پذیر است و اکوسیستم‌ها را براساس پیچیدگی کمتر یا بیش‌تر نسبت به سایرین طبقه‌بندی کرد (Parrott, 2010). مطالعه حاضر تعدادی

می‌شود که همین عامل بر منبع اصلی این تغییرات تاثیر می‌گذارد. به عنوان مثال، شیرها گورخرها را می‌خورند و موجب کاهش جمعیت گورخرها می‌شوند. اما اگر جمعیت گورخرها خیلی کاهش یابد، آن وقت تعداد گورخرهای در دسترس شیرها کم می‌شود و در نتیجه جمعیت شیرها نیز کاهش می‌یابد. این تناوب به جمعیت گورخرها اجازه می‌دهد تا مجدداً رشد کنند در نتیجه به حالت تعادل اولیه باز می‌گردند. علاوه بر تاکید بر فرایندهای اساسی رایج، نظریه سیستم‌های عمومی مفهوم خودسازمان‌دهی را نیز معرفی نمود. الگوها و نظم در طبیعت از دو منبع اصلی ناشی می‌شود. یک منبع نیروها و محدودیت‌های بیرونی است. به عنوان مثال، شرایط محیطی گسترش جمعیت‌های پستانداران و گیاهان را در یک سیمای سرزمین محدود می‌کند. این قبیل از فرایندها به خوبی شناخته و مورد بررسی قرار گرفته‌اند. با این حال، منبع دقیق‌تر نظم و سازمان‌دهی از کنش‌های متقابل و فرایندهای درونی ناشی می‌شود. به عنوان مثال همان‌طور که در بالا دیدیم پس‌خور به حفظ ثبات و یا عدم ثبات یک اکوسیستم کمک می‌کند. گونه‌های مشابه بر سر منابع رقابت می‌کنند و این رقابت بر مکان حضور آن‌ها در سیمای سرزمین تاثیر می‌گذارد. یکی دیگر از مفاهیم نظریه سیستم‌های عمومی، نگاه جامع یا کل‌نگری از طبیعت است. این مفهوم بر ارتباطات میان تمام سیستم و بخش‌های سازنده آن تاکید می‌کند. اشیا در طبیعت خود بخشی از یک مجموعه بزرگ‌تر هستند (Koestler, 1967). دومین منبع الهام‌بخشی برای نظریه پیچیدگی پژوهش عملیاتی یا تحقیق در عملیات است. این زمینه در طول جنگ جهانی دوم به خاطر نیاز به طراحی عملیات نظامی پیچیده به وجود آمد. در جهان پس از جنگ، استفاده از آن به مدیریت کسب و کار و مهندسی گسترش یافت. در هر سیستم بزرگ، نیاز به هماهنگ کردن فعالیت تعداد زیادی از عناصر مجزا اما وابسته به یکدیگر است. شاید مهم‌ترین درسی که تحقیق در عملیات ارائه می‌دهد این است که سیستم‌های بزرگ و پیچیده گرایش به غیرقابل پیش‌بینی بودن دارند.

پیدایش پیچیدگی

فرضیه‌های مختلفی به منظور توضیح پیدایش پیچیدگی بیان شده است.

یکدیگر در کنش هستند وجود دارد. کنش‌های متقابل میان دو گونه می‌تواند اشکال فراوانی داشته باشد. مانند شکار، رقابت و زندگی انگلی. هنگامی که تعداد گونه‌های زیادی حضور داشته باشد، تعداد جفت‌های کنش کننده بسیار زیاد می‌شود. به عنوان مثال، اگر فرض کنیم ۱۰۰ گونه در یک ناحیه زندگی می‌کنند پس ۴۹۵۰ جفت گونه کنش کننده ممکن وجود دارد. گونه‌ها صرفاً به صورت جفتی کنش نمی‌کنند، اثر یک گونه بر سایر گونه‌ها با حضور گونه سوم تغییر می‌کند. اگر به ترکیب‌های ممکن گونه‌های چندگانه نگاه کنیم، احتمالات به نسبت‌های نجومی می‌رسد. بیش از $10^{13} \times 1/7$ روش وجود دارد که در آن جوامع ۱۰ گونه از ائتلاف ۱۰۰ گونه تشکیل می‌دهد (Green et al., 2006). این عدد برابر با فاصله زمین تا ماه در سانتیمتر است. برای جوامع متشکل از ۵۰ گونه در یک زمان این عدد به بیش از 10^{12} ترکیب می‌رسد. بوم‌شناسان معتقد هستند که اکوسیستم‌هایی که دارای تعداد زیادی گونه هستند مانند جنگل بارانی آمازون با نرخ‌های انقراض پایین و تغییرات اندک در اندازه جمعیت در طول زمان گرایش به پایدار شدن دارند. در مقابل، آن‌ها اکوسیستم‌هایی با تعداد گونه‌های کم را دیده‌اند مانند توندرا قطب شمال که نوسانات بسیار بزرگ‌تری را در اندازه جمعیت و فراوانی انقراض را تجربه می‌کنند. این موضوع منجر به این می‌شود که بوم‌شناسان عقیده داشته باشند که پیچیدگی در اکوسیستم‌ها موجب پایداری آن‌ها می‌شود و آن‌ها را در برابر آشفتگی مقاوم می‌سازد.

ریشه‌های نظریه پیچیدگی

ریشه‌های نظریه پیچیدگی را می‌توان در چندین حوزه علمی جستجو کرد، یکی از این حوزه‌ها زیست‌شناسی است. در آغاز دهه ۱۹۲۰ زیست‌شناسی آلمانی به نام Ludwig von Bertalanffy مفهومی ارائه داد به نام نظریه سیستم‌های عمومی (Von Bertalanffy, 1968). این نظریه چندین مفهوم مهم را به وجود آورد. اولین نکته‌ای که ون شناسایی کرد فرایندهای رایج و یکسانی بود که در سیستم‌های مختلف به طور سطحی رخ می‌دهند. یک مثال خوب پس‌خور است که نقشی چشمگیر در سیستم‌های کنترل مهندسی و همچنین زیست‌شناسی ایفا می‌کند. پس‌خورها هنگامی رخ می‌دهند که تغییرات در یک بخش از سیستم موجب تغییرات در بخشی دیگر

فرضیه عدم قطعیت

با توجه به این فرضیه پیچیدگی مفهومی مرتبط با غیرقابل پیش‌بینی بودن پدیده‌ها است. این عدم قطعیت احتمال جفت شدن یک سیستم با سایر سیستم‌ها را کاهش می‌دهد. به عنوان مثال، یک لکه برفی در نواحی کوهستانی مدیترانه‌ای شانس برای بقا در تابستان‌های داغ ندارد اما شکل لکه در حال آب شدن و نرخ ذوب آن را نمی‌توان به طور روزانه پیش‌بینی کرد. پوشش گیاهی هیچ شانس برای متصل شدن به یک بستر تکاملی از نظر مکانی ندارد، زیرا فرایندهای رویشی آن به وسیله ذوب برف محدود شده است. عدم قطعیت موجب شرایط جدیدی می‌شود که در آن سیستم توسعه می‌یابد، احیا می‌گردد یا خود را با استراتژی‌هایی تطبیق می‌دهد. به عبارت دیگر پیچیدگی به معنی عدم قطعیت است و احتمالات جدیدی از آرایش تصادفی الگوها و فرایندها را ایجاد می‌کند. با این نگاه، ما می‌توانیم سیستم‌هایی مانند رودخانه و جنگل را از نظر غیرقابل پیش‌بینی بودن توصیف کنیم. نکته این است که آیا عدم قطعیت با پدیده‌هایی مانند فراوانی گونه یا دگرگونی و به هم‌پیوستگی جامعه مرتبط است یا نه (Tilman et al., 1996).

فرضیه درون قلمرویی

با توجه به این فرضیه، پیچیدگی شامل مکانیسم‌هایی است که به وسیله آن‌ها یک قلمرو با سایر قلمروها ارتباط برقرار می‌کند (Farina et al., 2004). بنابراین، یک قلمرو باید یک کد داشته باشد تا قادر به تبادل الگوها و فرایندهایی باشد که ویژگی‌های درون قلمرویی خاصی دارند. در چنین سناریویی، پیچیدگی به وسیله مکانیسم‌هایی بیان می‌گردد که ارتباط میان سیستم‌های مختلف را تضمین می‌کنند (Barbieri, 2003). کدها و مکانیسم‌های مرتبط بیان پیچیدگی هستند. با این نگاه، پیچیدگی ظهور کدهای طبیعی است که به یک سیستم اجازه می‌دهد تا با یک سیستم قرارگرفته در سایر قلمروهای مکانی-زمانی یا سازماندهی ارتباط برقرار کند. این فرضیه بسیار مهیج است و به وسیله بوم‌شناسان بسیاری اتخاذ گردیده است (Allen & Starr, 1982; O'Neill et al., 1986; Allen & Hoekstra, 1992). هنگامی که ارتباطات عددی میان سیستم‌ها را مطالعه می‌کنیم، الگوی پیچیدگی را به عنوان یک ویژگی به وجود آمده از کدگذاری بین سیستمی به کارگرفته‌ایم. در این نمونه پیچیدگی هم‌معنی با زبانی است که سیستم‌های

مختلف را متصل می‌کند و به وسیله مکانیسم‌های کدگذاری لازم در انتقال انرژی و اطلاعات (Stonier, 1990 & 1996) و ارگانیسم‌های سراسر سیستم‌های همسایه بیان می‌گردد.

فرضیه اتصال

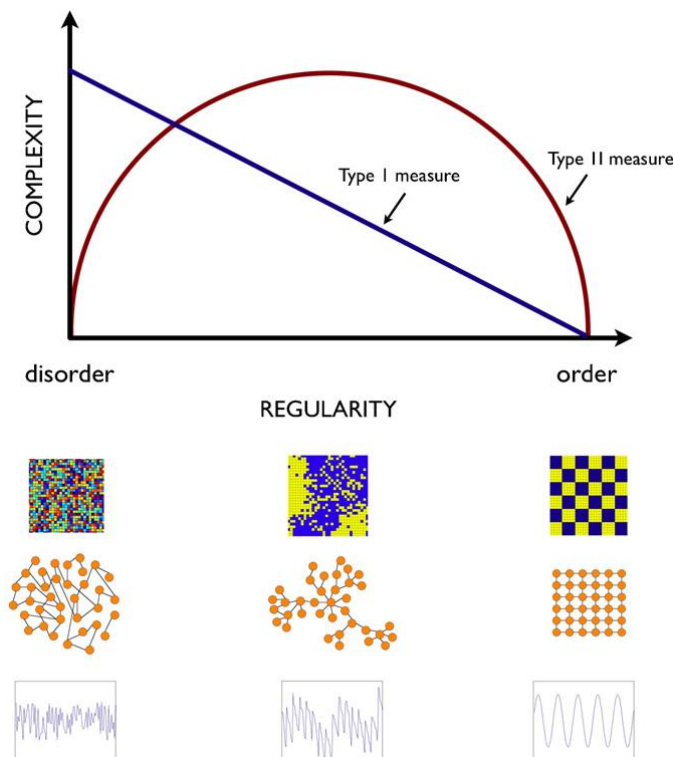
جهان فعلی در حال پیوسته‌تر شدن است. بدین معنی که تغییر انرژی و اطلاعات در حال افزایش است. که چندین پیامد بر هومئوستازی سیستم‌ها و بقای آن‌ها دارد. همچنین به معنی تبدالی سریع از اطلاعات میان سیستم‌ها است و می‌تواند عایق‌بندی موردنیاز به وسیله یک سیستم برای حفظ خود را مختل کند. اتصالات در حفظ یک سیستم مهم هستند اما یک سیستم زمانی به حیات خود ادامه می‌دهد که واحدهای خودتنظیم کننده وجود داشته باشند (Maturana & Varela, 1980). اگر ما اتصالات را افزایش دهیم، فرایندهای درون این واحدها، ساختارهای ذاتی خود را کاهش می‌دهند به دلیل اینکه اطلاعات زیادی دریافت شده و به طور دقیق تخصیص داده نشده‌اند و آنگاه تمام سیستم فرومی‌پاشد. اطلاعات بیش‌تر توسط یک سیستم محدود می‌شود و انتظار کنش‌های حفره‌ای‌تر می‌رود. لبریز شدن اطلاعات سرعت واکنش را کاهش می‌دهد و احتمال نتایج غیرقابل پیش‌بینی را گسترش می‌دهد. با استفاده از یک استعاره، ما می‌توانیم فرایندهای سیستم‌های سازمان‌دهنده را با حرکت ثابت امواج دریا مقایسه کنیم. حرکات ترجمه‌ای نظم و قاعده امواج ثابت را به هم می‌زنند. در همین روش، اتصال میان واحدها، وضعیت ثابت و خودسازنده این واحدها را کاهش می‌دهد، در نتیجه وضعیت‌های پیچیده و ناپایداری ایجاد می‌گردد.

اندازه‌گیری پیچیدگی

اکوسیستم‌ها مانند تمام سیستم‌های پیچیده، تغییراتی غیرخطی در مکان و زمان از خود نشان می‌دهند که توصیف آن با استفاده از روش‌های کمی استاندارد بسیار مشکل است. تغییرات یک سیستم پیچیده (نهفته در اصطلاحی به نام "در لبه آشوب"^(۱۱)) (Langton, 1992) میان دو حد از نظم (برابر با الگوی مکانی یکنواخت یا تعادل زمانی) و بی‌نظمی (برابر با توزیع مکانی تصادفی یا عدم اختلال) واقع گردیده است که نشان دهنده تعادل میان نظم اساسی و غیرپیش‌بینی بودن کامل (آشوب) است. مطالعات نظریه نمودار نشان می‌دهد که ساختار سازمانی یا شبکه کنش‌های متقابل میان مولفه‌های سازنده یک سیستم

دارای الگوهایی مانند چرخه‌های تناوبی باشند که خودشان به گونه‌ای قابل پیش‌بینی در مکان و زمان تکرار می‌شوند و ممکن است ساختاری سازمان‌یافته داشته باشند که در آن هر گره از سیستم تعداد یکسانی از اتصالات دارد. سیستم‌های بی‌نظم دارای ساختار مکانی تصادفی هستند و تغییراتی تصادفی از خود نشان می‌دهند و یک سازمان‌دهی تصادفی از مولفه‌ها دارند. درک چنین سیستم‌هایی ساده است و می‌توان به سادگی آن‌ها را با استفاده از یک تابع توزیع احتمالی توصیف کرد. در حالی که تلاش‌های اولیه در کمی‌سازی پیچیدگی اکولوژیکی معیارهایی مانند تعداد محورهای معنی‌دار در یک تجزیه و تحلیل مولفه‌های اصلی از یک مجموعه داده را ارائه داده‌اند (Meyer, 1988) اما این زمینه در جست‌وجوی معیارهای حساس‌تر پیش رفته است که ممکن است به عنوان شاخص‌های اکولوژیکی عمل کنند.

پیچیده نیز ساختاری مشخص دارد که نه تصادفی است و نه کاملاً منظم (Barabasi, 2009). بنابراین، تحقیقات اخیر بر توسعه روش‌هایی به منظور توصیف ویژگی‌های مکانی و زمانی سیستم‌های پیچیده تمرکز کرده‌اند و سیستم را با شبیهی تدریجی از نظم و بی‌نظمی طبقه‌بندی می‌کنند. معیارهای پیچیدگی دو نوع هستند (Atmanspacher, 2007): نوع ۱ معیارهایی هستند که با افزایش بی‌نظمی در سیستم به صورت خطی افزایش می‌یابند و نوع ۲ معیارهایی هستند که شکلی محدب دارند و بالاترین مقادیر خود را به سیستم‌هایی که دارای نظم متوسطی هستند نسبت می‌دهند (شکل ۱). هر کدام از این دو نوع معیار در مطالعات مختلف به کار گرفته شده‌اند که هدف تمایز قایل شدن میان سیستم‌های ساده و پیچیده بوده است (Grassberger, 1988). به عنوان مثال، سیستم‌های منظم ساده ممکن است



شکل (۱): پیچیدگی در مقابل نظم. معیارهای پیچیدگی طبقات ساختارها یا تغییرات را با شبیهی تدریجی از نظم و بی‌نظمی متمایز می‌کنند. معیارهای نوع ۱ بالاترین مقدار را به سیستم‌های بی‌نظم اختصاص می‌دهند در حالی که معیارهای نوع ۲ تابعی محدب هستند که بالاترین مقدار را به سیستم‌های قرار گرفته در میان دو حد از نظم و بی‌نظمی اختصاص می‌دهد. مثال‌هایی از نشان‌های مکانی و زمانی متناظر با هر طبقه از سیستم نیز نشان داده شده است. در اینجا نویسنده استدلال کرده که سیستم‌های دارای بی‌نظمی و نظم بالا سیستم‌های ساده‌ای هستند و پیچیده‌ترین سیستم‌ها در محدوده‌ای بینابینی از نظم قرار گرفته‌اند (Parrott, 2010).

معیارهای زمانی

محاسبه می‌شود.

$$H_G(L) = H_S(L + 1) - H_S(L) \quad (۱)$$

که H_S آنتروپی شانون از توالی زیر است

$$H_S(L) = \sum_{i=1}^n P_{L,i} \log_2 P_{L,i} \quad (۲)$$

پیچیدگی نوسانات (C_F) برابر با

$$C_F = \sum_{i=1}^n P_{L,ij} \left(\log_2 \frac{P_{L,i}}{P_{L,j}} \right)^2 \quad (۳)$$

که $P_{L,ij}$ احتمال مشاهده لغت j بلافاصله پس از لغت i است. پیچیدگی نوسانات گسترده‌ای از نظم و ارتباطات میان لغات در یک توالی را مورد بررسی قرار می‌دهد.

معیارهای متوسط افزایش اطلاعات و پیچیدگی نوسانات به طور موفقیت‌آمیزی در توصیف انواع مختلف سری‌های زمانی اکولوژیکی به کارگرفته شده‌اند. (Hauhs & Lange, 2008) نشان دادند که این معیارها می‌توانند به طور موفقیت‌آمیزی بین پیچیدگی رواناب (تخلیه سری‌های زمانی) از یک منطقه عمدتاً شهری در مقابل حوضه‌های آبخیز جنگلی و بین سیستم‌های رودخانه‌ای از بخش‌های مختلف زمین تمایز قایل شوند. (Pachepsky et al., 2006) از همین روش‌ها به منظور توصیف سری‌های زمانی جریان آب در میان نیمرخ‌های خاک مختلف استفاده نمود. در حالی که متوسط افزایش اطلاعات و پیچیدگی نوسانات مزیت‌هایی در توصیف پیچیدگی داشته‌اند اما این رویکرد دارای کاستی‌هایی نیز است و آن کاهش اطلاعاتی است که در پیش‌رفتار سری‌های زمانی رخ می‌دهد، همچنین نیاز به سری‌های نسبتاً طولانی (بیش‌تر از ۱۰۰۰ اندازه‌گیری) به منظور ایجاد نتایج معنی‌دار است. مطالعات بعدی باید توسعه معیارهای اطلاعات مبنا سازگار با سری‌های زمانی کوتاه‌تر و طبقات ارزشمندتر (فراتر از طبقه‌بندی‌های باینری) را مورد توجه قرار دهند. علاوه بر معیارهای اطلاعات نظری متنوع از پیچیدگی، روش‌های تجزیه و تحلیل سری‌های زمانی غیرخطی نیز در توصیف ساختار اساسی یک مجموعه داده می‌تواند به کارگرفته شود که بینش‌های مهمی در ماهیت تغییرات زمانی سیستم‌ها می‌تواند داشته باشد. با این حال، تجزیه و تحلیل مجموعه داده‌های اکولوژیکی بسیار مشکل است، بخشی از این مشکل به تمایز میان اختلال و غیراختلال برمی‌گردد و بخشی دیگر مربوط به طول کوتاه اکثر سری‌های زمانی موجود است.

معیارهای زمانی پیچیدگی را می‌توان به منظور توصیف سری‌های زمانی متغیرهای مختلف توصیف کننده تغییرات یک سیستم به کارگرفت. از آنجا که سری‌های زمانی را می‌توان به عنوان زنجیره‌ای از نمادها در نظر گرفت، گزینه‌ای مناسب برای کاربرد معیارهای اطلاعات مبنای پیچیدگی است، اکثر آن‌ها دارای آنتروپی شانون^(۱۲) هستند و یا مشتقاتی از آنتروپی شانون را دارند (Kolmogorov, 1965; Chaitin, 1977; Gell-). چنین معیارهایی نیاز دارند تا داده‌ها به صورت باینری باشند و یا تعداد ثابتی از نمادها وجود داشته باشند که مستلزم کاهش اطلاعات داده‌های پیوسته و با ارزش است. بنابراین معیارهای پیچیدگی مبتنی بر احتمال (Pi) مشاهده نماد i در داده‌ها هستند، همچنین مبتنی بر احتمالات مرتبه دوم مانند فراوانی مشاهدات نماد i مجاور نماد j یا مشاهده زنجیره‌ای خاص از نمادهای طول L در این سری‌ها است (شناخته شده به عنوان L-words). برای یک توالی از نماد باینری، تعداد لغات ممکن که از طول L می‌توان به دست آورد برابر با 2^L است. فراوانی نسبی رخداد هر لغت L (L-word) در این توالی نماد به عنوان $P_{L,i}$ در نظر گرفته شده است (برای یک توالی تصادفی دارای احتمال یکسانی هستند). هر دو معیارهای نوع ۱ و نوع ۲ پیچیدگی را می‌توان در توصیف توالی نماد به کارگرفت. این معیارها را می‌توان به منظور طبقه‌بندی و مقایسه سری‌های زمانی از سیستم‌های مختلف در امتداد محوری از نظم یا بی‌نظمی استفاده نمود و به طور گسترده‌ای در توصیف توالی نماد در علوم اطلاعات به کارگرفته شده‌اند.

تا کنون دو معیار از پیچیدگی که مبتنی بر اطلاعات نظری هستند در سری‌های زمانی اکولوژیکی به کارگرفته شده‌اند این دو معیار عبارتند از متوسط افزایش اطلاعات^(۱۳) (MIG) (Wackerbauer et al., 1994) و پیچیدگی نوسانات^(۱۴) (Bates & Shepard, 1993). متوسط افزایش اطلاعات، مقدار اطلاعات جدید به دست آمده به وسیله خواندن یک نماد اضافی در یک سری زمانی را اندازه‌گیری می‌کنند و برای سری‌های زمانی این مقدار به حداکثر می‌رسد. بنابراین متوسط افزایش اطلاعات از معیارهای نوع ۱ است. پیچیدگی نوسانات معیاری است که مرتبط با درجه ساختار در سری‌های زمانی است و جز معیارهای نوع ۲ است. متوسط افزایش اطلاعات به شکل زیر

مختلف زیستگاه است (شکل ۲). بعد چین‌خوردگی نیز به عنوان معیاری از پیچیدگی مکانی اکوسیستم‌ها پیشنهاد شده است. این معیار برای الگوهای مناسب است که حداقل در یک مقیاس موردنظر خودتشابه هستند که اغلب برای مواردی از قبیل اشکال فیزیکی سیمای سرزمین مانند رشته کوه‌ها، خطوط ساحلی و شبکه‌های رودخانه‌ای مناسب هستند (Mandelbrot, 1983; Barnsley, 1993). این معیار به طور گسترده‌ای در مقیاس سیمای سرزمین به منظور توصیف الگوهای کاربری اراضی مانند تکه‌تکه شدگی جنگل در تصاویر ماهواره‌ای به کارگرفته شده است (Krummel et al., 1987; Wiens & Milne, 1989). افزایش بعد چین‌خوردگی همبستگی مثبتی با مناظر طبیعی و با ترجیحات انسانی برای سیمای سرزمین مختلف دارد. با این حال، هنگامی که یک الگوی مکانی به طور آشکارا خود تشابه نباشد، کاربرد و محاسبه بعدچین‌خوردگی مشکل‌ساز است. علاوه بر این، برخی از نویسندگان اذعان کرده‌اند که سیستم‌های پیچیده لزوماً در همه مقیاس‌ها خود تشابه نیستند (Wolpert & Macready, 2007) و در بوم‌شناسی، این عقیده که اکوسیستم‌ها دارای چندین مقیاس مکانی هستند و در این مقیاس‌ها ساختارها و فرایندهای مختلفی وجود دارد، پذیرش قابل توجهی را به خود جلب کرده است. به همین دلیل، بعد چین‌خوردگی به عنوان معیاری از پیچیدگی مکانی اکوسیستم‌ها کاربرد محدودی دارد. بوم‌شناسان سیمای سرزمین معیارهای فراوانی به منظور توصیف الگوهای موجود در یک سیمای سرزمین تولید نموده‌اند (O'Neill et al., 1988). معیارهای آن‌تروپی و پراکندگی جایگزین خوبی برای معیارهای نوع ۱ پیچیدگی هستند. زیرا، این معیارها یکنواختی را در مقابل تصادفی بودن الگوهای سیمای سرزمین طبقه‌بندی می‌کنند. بسیاری از معیارهای دیگر شی‌گرا هستند و توصیف کننده اشکال قابل شناسایی در یک بستر مکانی هستند. روش‌های توصیف پیچیدگی اشکال دربرگیرنده معیارهایی ساده مانند نسبت محیط به مساحت و نسبت مساحت لکه به مساحت محیط اطرافش هستند (Parrott, 2010). (Moser et al., 2002) معیاری را ارائه داد که پیچیدگی مکانی سیمای سرزمین را وسیله تعداد نقاط منحصر به فرد مورد نیاز برای ترسیم مرزهای میان لکه‌ها توصیف می‌کند. آن‌ها این معیار را برای یک مزرعه کشاورزی به کارگرفتند و همبستگی مثبتی با فراوانی گونه‌های گیاهی مشاهده کردند. این نوع از معیارهای پیچیدگی مبتنی بر شکل

تلاش در تشخیص آشوب در داده‌های اکولوژیکی به وسیله توان‌های لیاپانوف یا بازسازی جاذب اصلی با موفقیت‌های باورنکردنی مواجه نشده است (Hastings et al., 1993) اگرچه چندین نمونه امیدوارکننده با سری‌های زمانی طولانی‌تر وجود دارد (Benincà et al., 2008). روش‌های کمتر مرسوم مانند تجزیه و تحلیل کمی بازگشت^(۱۵) (RQA) می‌تواند ساختار داده‌هایی که تمامی آزمون‌های تصادفی بودن را پشت سر گذاشته‌اند، نشان دهد و برای سری‌های زمانی کوتاه‌تر مناسب‌تر هستند (Marwan et al., 2007). فنون RQA مبتنی بر تجزیه و تحلیل الگوها در نمودارهای بازگشت است و می‌تواند درجه تصادفی بودن و جبرگرایی در تغییرات سیستم را اندازه‌گیری کند. معیارهای جبرگرایی در RQA را می‌توان با پیچیدگی سری‌های زمانی مرتبط دانست که به عنوان معیارهای نوع ۱ پیچیدگی عمل می‌کنند. RQA به طور موفقیت‌آمیزی در توصیف سری‌های زمانی سیستم‌های زیست‌شناختی و اجتماعی به کارگرفته شده است و کار اخیر (Proulx et al., 2008; Proulx & Parrott, 2009) پتانسیل RQA را در توصیف تغییرات سیستم‌های اکولوژیکی واقعی و شبیه‌سازی شده نشان داده است.

معیارهای مکانی

معیارهای مکانی پیچیدگی قادر به توصیف الگوهای منظم، تصادفی و پیچیده دو بعدی هستند. معیارهای مکانی تغییرات یا کارکرد یک سیستم را توصیف نمی‌کنند اما در عوض وضعیت مکانی آن را در یک زمان خاص توصیف می‌کنند. تعداد کمی از معیارهای اطلاعات مبنا مانند آن‌تروپی شانون و متوسط افزایش اطلاعات در داده‌های اکولوژیکی مکانی به کارگرفته شده‌اند. در این موارد، این معیارها در داده‌های رستری به کارگرفته شده‌اند. برای سری‌های زمانی این داده‌ها نیازمند پیش‌پردازش به منظور کاهش طبقات هستند و مبتنی بر احتمال (Pi) مشاهده مقادیر خاصی از پیکسل در این رستر هستند. احتمالات مرتبه دوم نیز به کارگرفته شده‌اند و شامل احتمالات یافتن وضعیت‌های مکانی خاص از مقادیر هستند (به عنوان مثال، در یک مربع 3×3 ، $1 \times 2 \times 1$ و 2×2). (Proulx & Parrott, 2008) متوسط افزایش اطلاعات (MIG) را معیاری مناسب برای پیچیدگی مکانی اکوسیستم‌ها بیان می‌کند. آن‌ها نشان دادند که متوسط افزایش اطلاعات تصاویر گرفته شده از زیراشکوب جنگلی همبستگی مثبتی با تنوع گونه‌های گیاهی دارد و قادر به تشخیص انواع

تنوع زیستی و پیچیدگی زیستگاه با یکدیگر را در مقیاس‌های مختلف آشکار سازند.

مشابه با معیارهای نوع ۲ پیچیدگی هستند. این معیارها در مقیاس سیمای سرزمین به کار گرفته شده‌اند و در ترکیب با معیارهای مکان ویژه می‌توانند چگونگی ارتباط و اتصال



شکل (۲). تجزیه تحلیل تصاویر روشی مناسب برای توصیف پیچیدگی مکانی اکوسیستم‌ها و سیمای سرزمین است. در مطالعه انجام شده توسط Proulx & Parrott (2008) متوسط افزایش اطلاعات را برای مقادیر پیکسل‌های تصاویر زیراشکوب جنگلی (a) و حفره (b) در یک جنگل بالغ متشکل از راش و افرا را محاسبه نمود. نتایج یک نشان زمانی واضح از پیچیدگی در طول فصل رشد را نشان داد و این روش قادر به تشخیص تیپ‌های مختلف زیستگاهی شد و میان مناطق دارای تنوع بالا و پایین تمایز قابل شد (Parrott, 2010).

به طور موفقیت‌آمیزی در توصیف داده‌ها به کار گرفته شده‌اند (شکل ۳) از جمله در مجموعه‌ای از تصاویر تکراری از یک اکوسیستم جنگلی (Parrott et al., 2008) و تصاویر سنجش از دور دربرگیرنده دمای سطح آب (Bottin, 2009).

معیارهای ساختاری

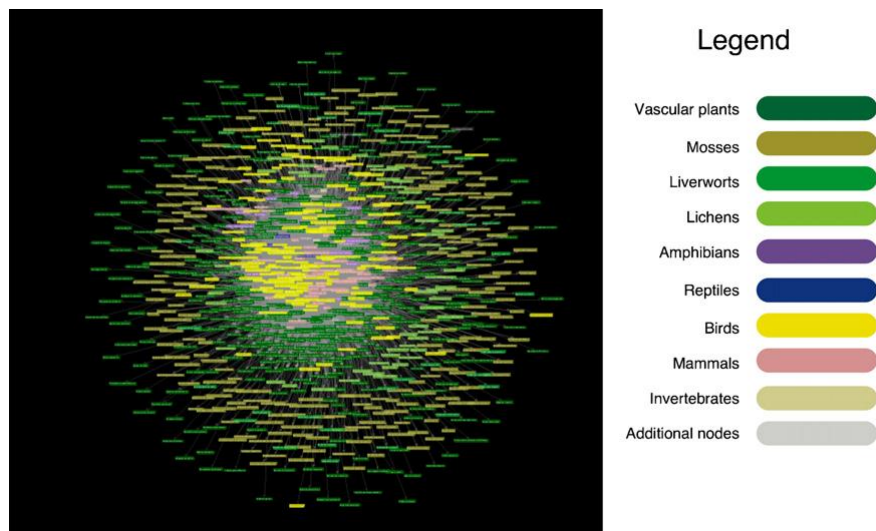
معیارهای ساختاری پیچیدگی، سازمان‌دهی و ارتباطات میان مولفه‌های یک سیستم را توصیف می‌کنند. کاربرد طبیعی این روش‌ها در تجزیه و تحلیل شبکه‌هایی است که در آن‌ها مولفه‌ها به وسیله گره‌ها و ارتباطات به وسیله لبه‌های متصل کننده دو گره به یکدیگر نشان داده شده‌اند. تحقیق‌های اخیر در سیستم‌های پیچیده نشان داده‌اند که طیف وسیعی از سیستم‌های مختلف همگی ساختاری مشابه و غیرتصادفی را به اشتراک می‌گذارند (Watts & Strogatz, 1998; Barabasi and Albert, 1999; Barabasi, 2009). این ساختار غیرتصادفی و بی‌نظم نشانی از سیستم پیچیده است و به خوبی در اکوسیستم‌ها قابل رویت است. بوم‌شناسی تاریخچه‌ای طولانی در توصیف اکوسیستم‌ها به عنوان شبکه‌ها دارد که شروع آن با مدل‌های مفهومی اولیه توصیف کننده جریان ماده و انرژی از میان منابع

معیارهای مکانی - زمانی

در نهایت، تغییرات اکوسیستم‌ها در مکان و زمان گسترش می‌یابند، با این حال، روش‌های توصیف پیچیدگی این تغییرات مکانی زمانی خیلی محدود هستند. (Kaspar & Schuster, 1987) استفاده از تابع همبستگی مکانی برای تشخیص الگوهای مکانی زمانی پیچیده در داده‌های دو بعدی (دارای یک بعد زمانی و یک بعد مکانی) را نشان داد. سایر نویسندگان تجزیه و تحلیلی مشابه را بر داده‌های نقطه‌ای اکولوژیکی انجام داده‌اند اما هدف تشخیص همزمانی جمعیت‌ها در مقیاس‌های مختلف بوده است (Bjornstad et al., 1999). (Parrott, 2005; Parrott et al., 2008) معیاری اطلاعات مینا از پیچیدگی مکانی زمانی ارائه داده‌اند که در داده‌های رستری سه بعدی قابل به کارگیری است، مانند متغیرهای مکانی زمانی کاربری اراضی. معیارهای مکانی زمانی پیچیدگی، ساختارهای سه بعدی را توصیف می‌کنند و به بسترهای که از لحاظ مکانی زمانی کاملاً یکنواخت هستند عدد صفر را اختصاص می‌دهد، مقدار بینابینی را به بسترهای تصادفی و عدد ۱ را به بسترهایی که دارای توزیع قوی از لکه‌ها هستند اختصاص می‌دهد (به عنوان مثال، یک بستر عمدتاً توسط لکه‌های تک سلولی اشغال شده است). معیارهای مکانی زمانی

شبکه‌های منظم و تصادفی انتظار می‌رود (Montoya & Solé, 2002; Williams et al., 2002). پیامدهای یک ساختار غیرتصادفی مهم هستند زیرا سیستم‌های دارای مقیاس باز نسبت به کاهش تصادفی گره‌ها مقاوم هستند (یک گره انتخاب شده به طور تصادفی محتمل پیوستگی بالایی نیست) اما آسیب‌پذیری بالایی نسبت به کاهش قطب‌ها یا مراکز دارند (Albert et al., 2000). اگر اکوسیستم‌ها ساختاری مشابه با سایر سیستم‌های پیچیده دارند، این نوع از تجزیه و تحلیل می‌تواند به مدیران حفاظت کمک کند تا گونه‌هایی که قطب‌های پیوسته دارند را شناسایی کنند. زیرا، تمرکز تلاش‌های مدیریتی بر روی اتصالات باشد. این امکان نیز وجود دارد که قطب‌ها یا مراکز اکوسیستم گونه‌های کلیدی باشند. تفسیر و تجزیه و تحلیل اکوسیستم‌ها از دیدگاه یک شبکه، اطلاعات مفیدی در اختیار مدیران قرار می‌دهد تا اثرات بالقوه مداخله‌ها را تشخیص دهند.

اصلی سیستم‌ها است (Odum, 1968). مفهوم شبکه غذایی نیز مفهومی مشهور در مطالعات بوم‌شناسی است که در آن گره‌ها نمایانگر گونه‌ها یا گروه‌های کارکردی هستند و ارتباطات تغذیه‌ای به وسیله اضلاع نمایش داده می‌شوند. کارهای اخیر در تجزیه و تحلیل شبکه‌های غذایی نشان داده‌اند که ساختار شبکه‌های غذایی طبیعی در واقع بی‌نظم و غیرتصادفی است و بسته به وضوح شبکه غذایی مطالعه شده، می‌توان آن‌ها را با استفاده از نظریه نمودار توصیف نمود (Bascompte, 2009; Ings et al., 2009) (شکل ۳). تجزیه و تحلیل داده‌های توصیف کننده شبکه‌های غذایی اکوسیستم‌های آبی و خشکی نشان داده‌اند که اکوسیستم‌ها شبکه‌های جهانی کوچکی هستند، این موضوع به وسیله طول مسیر بین دو گونه که به طور تصادفی انتخاب شده‌اند تشخیص داده شده است که این مسیر به طور قابل ملاحظه‌ای کوتاه‌تر از آن چیزی است که در



شکل (۳): تجزیه و تحلیل شبکه را می‌توان به منظور توصیف پیچیدگی ساختاری یک اکوسیستم به کار گرفت. این شکل یک زنجیره غذایی برای ۹۱۳ گونه در کانادا را نشان می‌دهد. گره‌ها (مستطیل‌های رنگی) نمایانگر گونه‌ها و اتصالات نمایانگر ارتباطات صید و صیادی میان گونه‌ها است. تجزیه و تحلیل درجه توزیع (توزیع تعداد اتصالات به ازای هر گره) این شبکه غذایی ساختاری غیرتصادفی را نشان می‌دهد که نمونه‌ای از انواع مختلف شبکه‌های پیچیده است (Arii et al., 2007).

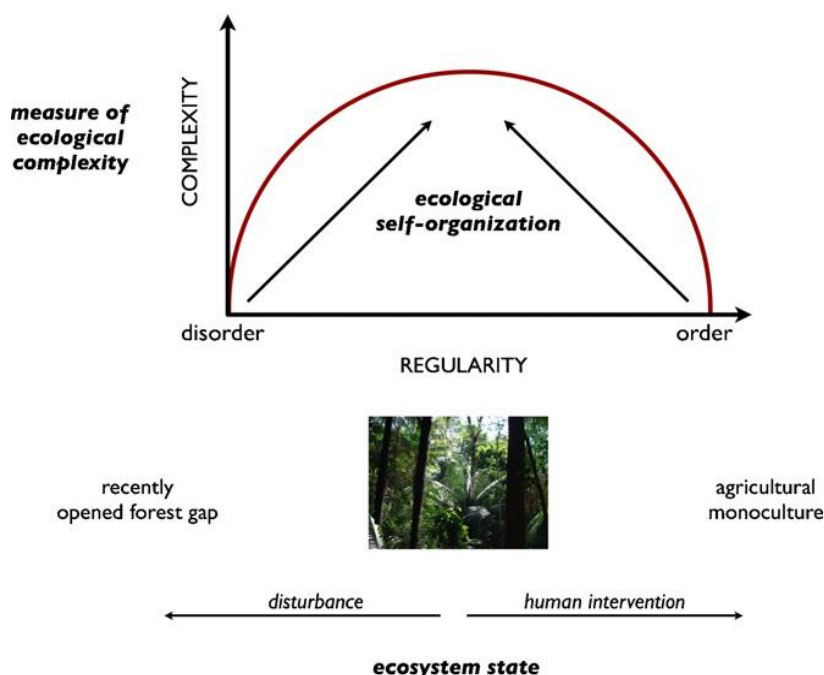
در تجزیه و تحلیل داده‌های اکولوژیکی وجود دارد. به طور واضح مفهوم پیچیدگی اکولوژیکی برای اکولوژی مهم است و نیاز است تا آن را بهتر تعریف نماییم. پیچیدگی اکولوژیکی بیشتر به مفاهیمی مانند انعطاف‌پذیری اکولوژیکی و یکپارچگی اکولوژیکی مرتبط است (Levin, 1999; Harris, 2007). در واقع اکثر بوم‌شناسان یک همبستگی مثبت بین درجه پیچیدگی یک اکوسیستم و سلامت آن یا یکپارچگی آن قرار می‌دهند که هر دو

نتیجه‌گیری

تحقیقات اخیر به تایید حضور نشان‌های ساختاری، مکانی، زمانی و مکان-زمانی که الگوهای مشترک را در تمامی سیستم‌ها پیچیده به اشتراک می‌گذارند، ادامه می‌دهند. معیارهای پیچیدگی به کمی‌سازی این الگوها می‌پردازند. علی‌رغم پذیرش در حال رشد پیچیدگی اکولوژیکی به عنوان یک ویژگی مهم از یک سیستم، مطالعات اندکی از به کارگیری معیارهای پیچیدگی

به کارگرفت. بنابراین، پیچیدگی شاخص مفیدی از وضعیت و سلامت یک اکوسیستم است. پیچیدگی ممکن است به عنوان شاخصی از درجه بلوغ یا سازمان‌دهی یک اکوسیستم عمل کند و در این مورد مکمل معیارهای خودسازمان‌دهی است. (Müller, 2005) فرض نمود که پیچیدگی یک اکوسیستم طبیعی با بلوغ آن افزایش می‌یابد و از طریق فرایند توسعه درک پیچیدگی، ویژگی‌های یک اکوسیستم گرایش به یک وضعیت جاذب دارند که تابعی از شرایط منطقه و کارکردهای اکولوژیکی غالب است. نویسندگان بسیاری اذعان کرده‌اند که این فرایند خودسازمان‌دهی و سازگاری است که در حفظ یک سیستم پیچیده در وضعیت حداکثر پیچیدگی (در ناحیه بینابینی نظم و بی‌نظمی) عمل می‌کند (Nicolis and Prigogine, 1977; Kay, 1991; Müller, 2005; Fath et al., 2004).

موجب افزایش انعطاف‌پذیری و نیرومندی سیستم می‌شوند (Loreau et al., 2001; Hooper et al., 2005). قطعا ناهمگنی مولفه‌ها در یک سیستم افزایش ساختار و کارکرد را به همراه دارد بنابراین، می‌تواند به عنوان معیاری مناسب از نیرومندی عمل کند. علاوه بر این، همبستگی مثبت بین پیچیدگی زیستگاه و تنوع گونه‌ای فرضیه‌ای طولانی مدت در اکولوژی است که به وسیله مطالعات مختلفی از خشکی تا دریا تایید گردیده است (MacArthur & MacArthur, 1961; Roth, 1976; Heck and Wetstone, 1977; August, 1983). مطالعات آتی باید کمی‌سازی پیچیدگی زیستگاه را با استفاده از معیارهای پیچیدگی مکانی و زمانی به کارگرفته شده در تصاویر ماهواره‌ای انجام دهند. اگر یک ارتباط کمی بین پیچیدگی زیستگاه و تنوع‌زیستی بافت شد، آنگاه این تجزیه و تحلیل را می‌توان به منظور شناسایی مناطق در اولویت حفاظت



شکل (۵): پیچیدگی اکولوژیکی به عنوان یک شاخص اکولوژیکی. یک اکوسیستم به سوی پیچیدگی بیش‌تر حرکت می‌کند و این کار را از طریق فرایند خود سازمان‌دهی انجام می‌دهد که سیستم را به دور از دو حد نظم و بی‌نظمی به سوی حداکثر پیچیدگی می‌کشاند. این وضعیت حداکثر پیچیدگی یک جاذب مکان ویژه است که به وسیله شرایط فیزیکی و محیطی غالب محدود شده است. آشفتگی‌های طبیعی موجب می‌شوند تا اکوسیستم به سوی وضعیت بی‌نظمی حرکت کند در حالی که دخالت‌های انسان به شکل انرژی ورودی این سیستم را به سوی نظم بیش‌تر سوق می‌دهد که به طور طبیعی شدنی نیست. در اینجا یک کشت تک محصولی مانند یک مزرعه ذرت به عنوان تشبیهی از یک سیستم منظم عمل می‌کند در حالی که یک حفره که به تازگی در جنگل ایجاد شده و در آن دانه‌ها به طور تصادفی می‌افتند و فقط شروع به جوانه زدن می‌کنند مثالی از یک اکوسیستم بی‌نظم است. شاید یک جنگل بارانی قدیمی مختل نشده (تصویر مرکزی) بهترین مثال از پیچیده‌ترین اکوسیستم روی زمین باشد (Parrott, 2010).

که حداکثر پیچیدگی را از طریق توسعه ساختارهای اتلافی به بار می‌آورد ساختار درونی خود را بهینه می‌کند (Nicolis & Prigogine, 1977; Kay, 1991).

یادداشت‌ها

1. Complexity Theory
2. Algorithmic Theory
3. Information Theory
4. Deterministic Theory
5. Chaos Theory
6. Catastrophic Theory
7. Aggregate Theory
8. General System Theory
9. Fractal Geometry
10. Emergence
11. Shannon-Weaver
12. At The Edge Of Chaos
13. Mean Information Gain
14. Fluctuation Complexity
15. Recurrence Quantification Analysis

شکل (۵) نمایانگر ترکیبی از ارتباط فرضی میان این وضعیت حداکثر پیچیدگی و درجه سازمان‌دهی سیستم است. در این شکل فرض گردیده که برای مجموعه‌ای از شرایط محیطی، فرایند خودسازمان‌دهی یک سیستم مختل نشده را به سوی یک بهینه محلی می‌کشاند که می‌توان آن را به عنوان وضعیت حداکثر پیچیدگی اندازه‌گیری کرد. در این زمینه معیارهای نوع ۲ پیچیدگی به عنوان شاخص‌های وضعیت اکوسیستم معنی‌دارتر هستند. (Kutsch et al., 2001) از مجموعه‌ای از شاخص‌ها از قبیل معیارهای پیچیدگی اطلاعات مینا به عنوان ابزارهای کمی‌سازی درجه خودسازمان‌دهی اکوسیستم‌های مختلف استفاده نمود که ارتباط دهنده خودسازمان‌دهی، پیچیدگی و وضعیت اکوسیستم است. آن‌ها استنتاج کردند که یک جنگل راش بالغ نسبت به یک زمین کشاورزی واقع در مجاورت آن پیچیده‌تر و دارای خودسازمان‌دهی بیش‌تری است. مطالعات آتی باید بر تشخیص تفاوت‌های نامحسوس‌تر میان اکوسیستم‌های مشابه در مراحل مختلف توسعه تمرکز کنند. اکوسیستم‌ها سیستم‌های بازی هستند که از طریق فرایند خودسازمان‌دهی و فرایندهایی

فهرست منابع

- Allen, T.F.H. & Starr, T.B. 1982. Hierarchy. Perspectives for ecological complexity. The University of Chicago Press. Chicago and London.
- Allen, T.F.H. & Hoekstra, T.W. 1992. Toward a unified ecology. Columbia University Press, New York.
- Albert, R.; Hawoong, J. & Barabasi, A. 2000. Error and attack tolerance of complex networks. Nature, 406.
- Anand, M. & Orloci, L. 1996. Complexity in plant communities: the notion and quantification. J. Theor. Biol. 179: 179–186.
- Arii, K.; Derome, R. & Parrott, L. 2007. Examining the potential effects of species aggregation on the network structure of food webs. Bulletin of Mathematical Biology 69, 119–133.
- Atmanspacher, H. 2007. A semiotic approach to complex systems. In: Mehler, A., Kohler, R. (Eds.), Aspects of Automatic Text Analysis. Springer, Berlin, 79–91.
- August, P. 1983. The role of habitat complexity and heterogeneity in structuring tropical mammal communities. Ecology, 1495–1507.
- Barabasi, A. 2009. Scale-free networks: a decade and beyond. Science 325, 412–413.
- Barabasi, A. & Albert, R., 1999. Emergence of scaling in random networks. Science 286, 509–512.
- Barbieri, M. 2003. The organic code. An introduction to semantic biology. Cambridge University Press, Cambridge.
- Barnsley, M. 1993. Fractals Everywhere. Academic Press, London.
- Bascompte, J. 2009. Disentangling the web of life. Science 325, 416–419.

- Bates, J.E. & Shepard, H.K. 1993. Measuring complexity using information fluctuation. *Physics Letters A* 172, 416–425.
- Benincà, E.; Huisman, J.; Heerkloss, R.; Johnk, K.; Branco, P.; Van Nes, E.; Scheffer, M. & Ellner, S. 2008. Chaos in a long-term experiment with a plankton community. *Nature* 451, 822–825.
- Bjornstad, O.; Ims, R. & Lambin, X. 1999. Spatial population dynamics: analyzing patterns and processes of population synchrony. *Trends in Ecology & Evolution* 14, 427–432.
- Bossomaier, T.R.J. & Green, D.G. 1998. *Patterns in the Sand*. Sydney, Allen and Unwin.
- Bossomaier, T.R.J. & Green, D.G. 2000. *Complex Systems*. New York, Cambridge Univ. Press.
- Bottin, Z. 2009. *Spatio-Temporal Complexity of the Sea Surface Temperatures of the Philippines*. The University of the Philippines, Diliman, Quezon City.
- Carlson, J.M. & Doyle, J. 2002. Complexity and robustness. In: *Proceedings of the National Academy of Science*, 99, pp. 2538–2545.
- Chaitin, G. 1977. Algorithmic information theory. *IBM Journal of Research and Development* 21, 350–359.
- Dunne, J.A.; Williams, R.J. & Martinez, N. 2002. Network structure and biodiversity loss in food webs: robustness increases with connectance. *Ecology Letters* 5, 558–567.
- Farina, A.; Bogaert, J. & Schipani, I. 2004. Cognitive landscape and information: new perspectives to investigate the ecological complexity. *BioSystems* 79: 235–240.
- Farina, A. 2006. *Principle and methods in landscape ecology: Toward a science of landscape*. Springer. P 435.
- Fath, B.; Jorgensen, S.; Patten, B. & Straskraba, M. 2004. Ecosystem growth and development. *BioSystems* 77, 213–228.
- Gell-Mann, M. & Lloyd, S. 1996. Information measures, effective complexity and total information. *Complexity* 2, 44–52.
- Grassberger, P. 1988. Complexity and forecasting in dynamical systems. In: Peliti, L., Vulpiani, A. (Eds.), *Measures of Complexity*. Springer-Verlag, Berlin, pp. 1–22.
- Green, D.G. & Klomp, N.I. 1997. Networking Australian biological research. *Australian Biologist* 10: 117–120.
- Green, D.G.; Klomp, N.; Rimmington, G. & Sadedin, S. 2006. Complexity in landscape ecology. Springer, p 217.
- Hagerhall, C.M.; Purcell, T. & Taylor, R. 2004. Fractal dimension of landscape silhouette outlines as a predictor of landscape preference. *Journal of Environmental Psychology* 24, 247–255.
- Harris, G. 2007. *Seeking Sustainability in an Age of Complexity*. Cambridge University Press.
- Hastings, H.M. & Sugihara, G. 1993. *Fractals. A user's guide for the natural sciences*. Oxford University Press, Oxford.
- Hastings, A.; Hom, C.; Ellner, S.; Turchin, P. & Godfray, H.C.J. 1993. Chaos in ecology: is mother nature a strange attractor? *Annual Review of Ecological Systems* 24, 1–33.
- Hauhs, M. & Lange, H. 2008. Classification of runoff in headwater catchments: a physical problem? *Geography Compass* 2, 235–254.
- Heck, J.K. & Wetstone, G. 1977. Habitat complexity and invertebrate species richness and abundance in tropical seagrass meadows. *Journal of Biogeography* 4, 135–142.

- Hooper, D.; Chapin I.F.; Ewel, J.; Hector, A.; Inchausti, P.; Lavorel, S.; Lawton, J.; Lodge, D.; Loreau, M. & Naeem, S. 2005. Effects of biodiversity on ecosystem functioning: a consensus of current knowledge. *Ecological Monographs* 75, 3–35.
- Ings, T.; Montoya, J.; Bascompte, J.; Blüthgen, N.; Brown, L.; Dormann, C.; Edwards, F.; Figueroa, D.; Jacob, U.; Jones, J.I.; Lauridsen, R.; Ledger, M.; Lewis, H.; Olesen, J.; Veen, F.J.F.; Warren, P. & Woodward, G. 2009. Ecological networks – beyond food webs. *Journal of Animal Ecology* 78, 253–269.
- Jorgensen, S. & Müller, F. (Eds.). 2000. *Handbook of Ecosystem Theories and Management*. Lewis Publishers, Washington, DC, p. 584.
- Kaspar, F. & Schuster, H.G. 1987. Easily calculable measure for the complexity of spatiotemporal patterns. *Physical Review A* 36, 842–848.
- Kay, J. 1991. A non-equilibrium thermodynamic framework for discussing ecosystem integrity. *Environmental Management* 15, 483–495.
- Koestler, A. 1967. *The Ghost in the Machine*. London, Hutchinson.
- Kolmogorov, A. 1965. Three approaches for defining the concept of information quantity. *Problems of Information Transmission* 1, 3–8.
- Krummel, J.; Gardner, R.; Sugihara, G.; O’neill, R. & Coleman, P. 1987. Landscape patterns in a disturbed environment. *Oikos*, 321–324.
- Kutsch, W.; Steinborn, W.; Herbst, M.; Baumann, R.; Barkmann, J. & Kappen, L. 2001. Environmental Indication: a field test of an ecosystem approach to quantify biological self-organization. *Ecosystems* 4, 49–66.
- Langton, C. 1992. Life at the edge of chaos. *Artificial Life II* 10, 41–91.
- Lewin, R. 1992. *Complexity: Life at the Edge of Chaos*. MacMillan. New York.
- Levin, S. 1998. Ecosystems and the biosphere as complex adaptive systems. *Ecosystems* 1, 431–436.
- Levin, S. 1999. *Fragile Dominion*. Perseus Publishing, Cambridge, p. 250.
- Liu, J.; Dietz, T.; Carpenter, S.R.; Alberti, M.; Folke, C.; Moran, E.; Pell, A.N.; Deadman, P.; Kratz, T. & Lubchenco, J. 2007. Complexity of coupled human and natural systems. *Science* 317, 1513.
- Lloyd, S. 2001. Measures of complexity: a non-exhaustive list. *IEEE Control Systems* 21, 7–8.
- Loreau, M.; Naeem, S.; Inchausti, P.; Bengtsson, J.; Grime, J.; Hector, A.; Hooper, D.; Huston, M.; Raffaelli, D. & Schmid, B. 2001. Biodiversity and ecosystem functioning: current knowledge and future challenges. *Science* 294, 804.
- MacArthur, R.H. & MacArthur, J.W. 1961. On bird species diversity. *Ecology* 42, 594–598.
- Mandelbrot, B.B. 1983. *The Fractal Geometry of Nature*. W.H. Freeman and Company, New York.
- Manson, S.M. 2001. Simplifying complexity: a review of complexity theory. *Geoforum* 32: 405–414.
- Marwan, N.; Carmen Romano, M.; Thiel, M. & Kurths, J. 2007. Recurrence plots for the analysis of complex systems. *Physics Reports* 438, 237–329.
- Maturana, H.R. & Varela, F.J. 1980. *Autopoiesis and cognition. The realization of the living*. D. Reidel Publishing Company. Dordrecht, Holland.
- May, R.M. 1973. *Stability and Complexity in Model Ecosystems*. Princeton University Press, New York.
- May, R.M. 1976. Simple mathematical models with very complicated dynamics. *Nature* 26: 459–467.
- May, R.M. 1988. How many species are there on Earth? *Science* 241: 1441–1449.
- McCann, K. 2000. The diversity-stability debate. *Nature* 405, 228–233.

- McCulloch W.S. & Pitts, W. 1943. A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. *Bull. Math. Biophysics* 5: 115-137.
- Meloche, F. 2005. Caractérisation de l'auto-organisation et de la complexité des écosystèmes. Université de Montréal, Montreal.
- Meyer, J.A. 1988. Complexity in ecological systems. In: Peliti, L., Vulpiani, A. (Eds.), *Measures of Complexity*. Springer-Verlag, Berlin, pp. 139-145.
- Myers, N.; Mittermeier, R.A.; Mittermeier, C.G.; Da Fonseca, G.A.B. & Kent, J. 2000. Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature* 403: 853-858.
- Montoya, J. & Solé, R. 2002. Small world patterns in food webs. *Journal of Theoretical Biology* 214, 405-412.
- Moser, D.; Zechmeister, H.G.; Plutzer, C.; Sauberer, N.; Wrabka, T. & Grabherr, G. 2002. Landscapes patch shape complexity as an effective measure for plant species richness in rural landscapes. *Landscape Ecology* 17, 657-669.
- Müller, F. 2005. Indicating ecosystem and landscape organization. *Ecological Indicators* 5, 280-294.
- Müller, F. & Leupelt, M. (Eds.) 1998. *Eco Targets, Goal Functions and Orientors*. Springer, Berlin.
- Müller, F.; Hoffmann-Kroll, R. & Wiggering, H. 2000. Indicating ecosystem integrity- theoretical concepts and environmental requirements. *Ecological Modelling* 130, 13-23.
- Nicolis, G. & Prigogine, I. 1977. *Self-Organization in Nonequilibrium Systems: From Dissipative Structures to Order Through Fluctuations*. Wiley, New York.
- O'Neill, R.V.; DeAngelis, D.L.; Waide, J.B. & Allen, T.F.H. 1986. *A hierarchical concept of ecosystems*. Princeton University Press, Princeton, New Jersey
- O'Neill, R.V.; Krummel, J.R.; Gardner, R.; Sugihara, G.; Jackson, B.; DeAngelis, D.L.; Milne, B.T.; Turner, M.; Zygmunt, B.; Christensen, S.W.; Dale, V.H. & Graham, R.L. 1988. Indices of landscape pattern. *Landscape Ecology* 1, 153-162.
- Odum, E. 1968. Energy flow in ecosystems: a historical review. *Integrative and Comparative Biology* 8, 11.
- Pachepsky, Y.; Guber, A.; Jacques, D.; Jiri Simunek, b.; Genuchten, M.T.V.; Nicholson, T. & Cady, R. 2006. Information content and complexity of simulated soil water fluxes. *Geoderma* 134, 253-266.
- Parrott, L. 2002. Complexity and the limits of ecological engineering. *Transactions of the ASAE* 45, 1697-1702.
- Parrott, L. 2005. Quantifying the complexity of simulated spatiotemporal population dynamics. *Ecological Complexity* 2, 175-184.
- Parrott, L. & Kok, R. 2006. Use of an object-based model to represent complex features of ecosystems. In: Minai, A., Bar-Yam, Y. (Eds.), *Unifying Themes in Complex Systems*. Springer, Berlin, pp. 169-179.
- Parrott, L.; Proulx, R. & Thibert-Plante, X. 2008. Three-dimensional metrics for the analysis of spatiotemporal data in ecology. *Ecological Informatics* 3, 343-353.
- Parrott, L. 2010. Measuring ecological complexity. *Ecological Indicators* 10, 1069-1076
- Phelan, S.E. 1999. A note on the correspondence between complexity and system theory. *Systemic Practice and Action Research* 12: 237-246.
- Proulx, R. & Parrott, L. 2008. Measures of structural complexity in digital images for monitoring the ecological signature of an old-growth forest ecosystem. *Ecological Indicators* 8, 270-284.
- Proulx, R. & Parrott, L. 2009. Structural complexity in digital images as an ecological indicator for monitoring forest dynamics across scale, space and time. *Ecological Indicators* 9, 1248-1256.

- Proulx, R.; Cote, P. & Parrott, L. 2008. Use of recurrence analysis to measure the dynamical stability of a multi-species community model. *The European Physical Journal-Special Topics* 164, 117–126.
- Roth, R.R. 1976. Spatial heterogeneity and bird species diversity. *Ecology* 57, 773–782.
- Seeley, D.A. 2000. Network evolution and the emergence of structure. In: Bossomaier, T.R.J. & Green, D.G (Eds.), *Complex systems*. Cambridge University Press, Cambridge. 51–89.
- Stonier, T. 1990. *Information and the internal structure of the universe. An exploration into information physics*. Springer-Verlag, Berlin.
- Stonier, T. 1996. Information as a basic property of the universe. *BioSystems* 38: 135–140.
- Solé, R.V. & Bascompte, J., 2006. *Self-Organization in Complex Ecosystems*. Princeton University Press, Princeton, NJ.
- Tangley, L. 1998. How many species exist? *Natl. Wildlife* 37: 32–33.
- Tilman, D.; Wedin, D. & Knops, J. 1996. Productivity and sustainability influenced by biodiversity in grassland ecosystems. *Nature* vol 379.
- Von Bertalanffy, L. 1968. *General Systems Theory: Foundations, Development, Applications*. New York, Braziller.
- Von Neumann, J. 1966. *The Unknown and Unknowable*. Santa Fe Institute, Santa Fe, MA.
- Wackerbauer, R.; Witt, A.; Atmanspacher, H.; Kurths, J. & Scheingraber, H. 1994. A comparative classification of complexity measures. *Chaos, Solitons & Fractals* 4, 133–173.
- Watts, D. & Strogatz, S. 1998. Collective dynamics of ‘small-world’ networks. *Nature*, 393.
- Whitehead, A.N. 1925. *Science and the Modern World*. Macmillan, New York.
- Wiener, N. 1961. *Cybernetics: Or, Control and Communication in the Animal and Machine*. MIT Press, Cambridge, MA.
- Wiens, J. & Milne, B. 1989. Scaling of ‘landscapes’ in landscape ecology, or, landscape ecology from a beetle’s perspective. *Landscape Ecology* 3, 87–96.
- Williams, R.J.; Berlow, E.; Dunne, J.A.; Barabasi, A. & Martinez, N. 2002. Two degrees of separation in complex food webs. *PNAS* 99, 12913–12916.
- Wilson, E.O. 1992. *The Diversity of Life*. London, Penguin.
- Wolpert, D.H. & Macready, W. 2007. Using self-dissimilarity to quantify complexity. *Complexity* 12, 77–85.
- Wu, J. & Marceau, D. 2002. Introduction. *Modeling complex ecological systems: an introduction*. *Ecological Modelling* 153: 1–6.
- Ziff, R. 1986. Test of scaling exponents for percolation-cluster perimeters. *Phys. Rev. Lett.* 56: 545–548.