

Dor: [20.1001.1.2008921.1399.11.22.10.1](https://doi.org/10.1001.1.2008921.1399.11.22.10.1)

کاربرد مدل‌سازی در تجزیه و تحلیل شبکه بوم‌شناختی

ملیحه عرفانی^{۱*}، طاهره اردکانی^۲

۱ استادیار گروه محیط‌زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه زابل، ایران

۲ استادیار گروه علوم و مهندسی محیط‌زیست، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه اردکان، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۱/۲۷؛ تاریخ تصویب: ۱۳۹۹/۱۰/۰۸)

چکیده

تجزیه و تحلیل شبکه بوم‌شناختی (ENA) روشی نوین با رویکرد سیستمی است که به مطالعه ساختار و پویایی‌شناسی سیستم‌های بوم‌شناختی مانند شبکه‌های غذایی می‌پردازد. این روش همچنین قادر است کارکرد اکوسیستم‌ها را ارزیابی کند و امکان مقایسه سیستم بوم‌شناختی را از این نظر فراهم آورد. حوزه کاربرد این روش وسیع است و اخیراً در ارزیابی ریسک بوم‌شناختی به کارگرفته شده است. تاکنون تعداد قابل توجهی مدل شبکه بوم‌شناختی ساخته شده است و روش تجزیه و تحلیل شبکه در چند مدل به میزان قابل توجهی پیشرفت کرده است. از میان این مدل‌ها برای مطالعه روابط شبکه غذایی می‌توان به مدل اکوپث و مدل‌سازی معکوس اشاره کرد. یکی از مشکلات بر سر راه این روش‌ها، نیازمندی آنها به توصیف کامل جریان بین اجزا سیستم، مقدار هر یک از اجزا و صحت هر یک از داده‌ها است. از مهم‌ترین کاربردهای ENA می‌توان به تعیین سطح مجاز برداشت از منابع طبیعی و پیش‌بینی اثرات مداخلات انسانی بر سیستم‌های طبیعی اشاره کرد. با توجه به کاربرد گسترده این روش در حل مسایل مختلف محیط‌زیست از دیر باز به آن توجه می‌شده است، اما متأسفانه مطالعات انجام شده در ایران بسیار اندک است. بنابراین، مطالعه حاضر با هدف معرفی ENA و به خصوص مدل‌های تغذیه‌ای و کاربرد آن در سیستم‌های مورد بهره‌برداری انجام شده که می‌تواند مورد توجه پژوهشگران و مدیران در حوزه محیط‌زیست قرار گیرد.

کلید واژه‌ها: تجزیه و تحلیل شبکه بوم‌شناختی (ENA)، روش سیستمی، شبکه غذایی، مدل‌سازی بوم‌شناختی، ساختار و کارکرد اکوسیستم

سرآغاز

امروزه به طور گسترده‌ای مدل‌های اکوسیستمی به عنوان راهکاری مستقل در حل مسایل بوم‌شناختی مورد استفاده قرار می‌گیرند. این مدل‌ها را می‌توان در قالب تجزیه و تحلیل شبکه بوم‌شناختی^(۱) (ENA) مورد ارزیابی قرار داد. ENA تلفیقی از مدل‌سازی و تجزیه و تحلیل به منظور بررسی ساختار، عملکرد و تکامل اکوسیستم و سایر سیستم‌های پیچیده است (Borrett et al., 2017). چیزی که ENA را از سایر انواع تجزیه و تحلیل شبکه در حوزه اکولوژی متمایز می‌سازد، نوع شبکه مورد استفاده و همچنین روش تجزیه و تحلیلی است که در بررسی سیستم به کار رفته است. مدل‌های شبکه در ENA، از چگونگی گردش ماده و جریان انرژی در اکوسیستم پیروی می‌کنند (Fath et al., 2007) و به عبارتی نوع شبکه به کار رفته در ENA، عملکرد اکوسیستم را از نظر تولید زیستی، ارتباط متقابل بین گونه‌ها و ارتباط متقابل بین گونه، سیستم و محیط اطرافش توصیف و ارزیابی می‌کند (Ings et al., 2009). روش‌های به کار رفته در ساخت این نوع از مدل‌ها نیز متنوع بوده که از آن جمله می‌توان به روش‌های مدل‌سازی معکوس، مدل‌سازی بیوانرژتیک و شبیه‌سازی پویا اشاره کرد (Borrett et al., 2017). به کارگیری هر یک از روش‌ها نیازمند کسب داده‌هایی مانند تعیین اجزا سیستم، مقدار ذخیره اجزا، میزان جریان‌ات بین اجزا و جریان‌ات ورودی و خروجی از سیستم است (Fath & Scharler, 2018). بسیاری از دانشمندان بر این باورند که از میان مدل‌های ENA، مدل‌های تغذیه‌ای و یا به عبارت دیگر مدل‌هایی که بر پایه جریان رابطه تغذیه‌ای بین گروه‌های مختلف بنا نهاده شده‌اند، برای درک بهتر عملکرد اکوسیستم‌ها دارای اهمیت و کاربرد بیشتری هستند. یک مدل تغذیه‌ای کمی در واقع نشان‌دهنده مقدار جریان انرژی است که در طول زمان بین گروه‌های مختلف داخل اکوسیستم وجود دارد. مدل‌های تغذیه‌ای این دیدگاه را فراهم می‌آورند تا واکنش اکوسیستم در پاسخ به تاثیر سطوح مختلف برداشت و نیز تغییرات محیطی ارزیابی شود. به کمک این مدل‌ها می‌توان تاثیرات روند تغییرات گذشته و سناریوهای آینده را بر اکوسیستم سنجید (Andras et al., 2007; Kazanci et al., 2009).

مرور مطالعات صورت گرفته در این خصوص نشان داد که در ابتدا (Hannon, 1973) با اقتباس از نظریه ورودی و خروجی

اقتصاد، اکوسیستم را به صورت ساختار سیستمی نشان داد که هر یک از اجزای آن با جریان انرژی یا ماده به صورت مستقیم و یا غیر مستقیم با یکدیگر ارتباط دارند. (Patten et al., 1976) ایده‌های Hannon را به صورت نظریه تجزیه و تحلیل جریان‌ات در اکوسیستم منتشر کردند. (Finn, 1980) شاخصی بین صفر تا یک را برای کمی کردن روابط اجزا در چرخه اکوسیستم تعریف نمود. (Han, 1997) ماتریسی را براساس شاخص فاین، برای اندازه‌گیری روابط میان اجزا در چرخه اکوسیستم ابداع کرد. تقریباً همزمان با این مطالعات، مطالعه مستقلی توسط (Jabariyan, 1998) انجام شد. در این پژوهش از تجزیه و تحلیل شبکه جهت تعیین آسیب‌پذیری بوم‌شناختی اکوسیستم‌ها استفاده شد. روش مورد استفاده مشابه روش Fine بوده با این تفاوت که اجزا ماتریس را به جای گونه‌ها، عوامل محیطی‌زستی تشکیل می‌دادند و پس از پر کردن ماتریس بر اساس وجود و عدم وجود ارتباط متقابل بین اجزا، در نهایت مقدار شاخص تعادل اکوسیستم محاسبه می‌شد. در این روش در صورتی که این عدد صفر باشد، سیستم دارای تعادل شکننده، اگر منفی باشد، سیستم فاقد تعادل و در صورت مثبت بودن آن، سیستم دارای تعادل بالنده است. پژوهشی مشابه این مطالعه توسط (Andras et al., 2007) انجام شد. آن‌ها عوامل محیطی مانند نوع خاک، شرایط آب و هوا، کودها و بیماری‌ها را به همراه گونه‌های گیاهی و جانوری جهت بررسی اثر آفت‌کش‌ها بر روی شبکه بوم‌شناختی مطالعه کردند. در این مطالعه با توجه به کمبود داده‌های کمی در خصوص ارتباط متقابل بین گونه‌ها و سایر فاکتورهای محیطی، از برچسب‌های کیفی به صورت صفر و یک در ماتریس مشابه روش Finn استفاده شد، با این تفاوت که علامت‌های مثبت و منفی نیز به آن‌ها اضافه شد، به این صورت که ارتباط بین جز A به B زمانی $+1$ می‌گیرد که حضور یا عامل محیطی A، حضور گونه یا فاکتور محیطی B را تسهیل می‌کند و اگر عکس این عمل رخ دهد -1 می‌گیرد. در جدول (۱) برخی از مطالعات در این زمینه با توجه به اهداف مختلف به طور خلاصه نشان داده شده است.

مطالعات منتشر شده نشان می‌دهند که شبکه‌های بوم‌شناختی، شبکه‌های بی‌مقیاس^(۲) هستند (Garlaschelli et al., 2003; Zhang et al., 2019) و بنابراین می‌توان از آن‌ها برای مقایسه شبکه‌های مختلف استفاده کرد.

هدف از این مطالعه معرفی برخی از مدل‌هایی است که در

ابداع، معرفی و به کار گرفته شدند. از برجسته‌ترین آنها می‌توان به مدل رابطه شکار- شکارگر که لوتکا- ولترا ابداع و معرفی کردند، اشاره کرد.

مدل‌های نسل دوم: دهه ۱۹۶۰ میلادی سرآغازی برای ابداع و معرفی مدل‌هایی در زمینه رابطه میان تغییر در کاربری سرزمین و آثار آن بر کیفیت آب رودخانه بود.

مدل‌های نسل سوم: این گروه از مدل‌ها در دهه ۱۹۷۰ میلادی ابداع شدند و شروعی بود برای به کارگیری مدل‌های بوم‌شناختی جهت مدیریت محیط‌زیست از قبیل پویایی عناصر و مواد مغذی و کمی‌سازی منابع آلاینده.

مدل‌های نسل چهارم: این مدل‌ها در دهه ۱۹۸۰ میلادی ابداع شدند. در این دوره مدل‌سازان بوم‌شناختی به ساده‌سازی سیستم‌های بوم‌شناختی در کنار کاربرد گسترده سیستم اطلاعات جغرافیایی و روش‌های پیشرفته آماری روی آوردند.

مدل‌های نسل پنجم: دهه ۱۹۹۰ میلادی مدل‌هایی ابداع شد که به مدل‌ساز امکان در نظر گرفتن پویایی ساختاری سیستم‌های بوم‌شناختی را می‌دهند و همچنین می‌توان به توسعه نرم‌افزارهای مدل‌سازی همچون Ecopath, Stella و MATLAB اشاره نمود.

مدل‌های نسل ششم: در دهه اول ۲۰۰۰ میلادی مدل‌هایی بر اساس روش‌های مرسوم هوش مصنوعی، ماشین یادگیرنده و غیره ابداع شدند.

با توجه به سیر تکاملی مدل‌ها مشهود است که در مدل‌های اولیه با استفاده از معادلات دیفرانسیل مانند لوتکا- ولترا و یا مدل‌های رقابت به توصیف بوم‌شناختی کمی ارتباط متقابل بین گونه‌ها، پرداخته می‌شده است. این مدل‌ها می‌توانستند تنها بر بخش کوچکی از روابط متقابلی که در درون سیستم‌ها رخ می‌داد، احاطه داشته باشند و قادر به در نظر گرفتن دیگر گونه‌های جامعه و تمامی فرایندهای غیرزیستی نبودند (Fath & Borrett, 2006)، چرا که کارایی این مدل‌ها در صورت کم بودن تعداد گونه‌های دخیل در مدل‌سازی بهتر بوده و با افزایش تعداد گونه‌ها، انجام محاسبات سخت‌تر و پیچیده‌تر و کارایی مدل کاهش می‌یافت (Preziosi & Pastorok, 2008). نتیجه این دیدگاه محدود، این واقعیت بود که نمی‌توان روابط غیرمستقیم را در سیستم‌ها کمی کرد. استفاده از این دیدگاه بیش از یک قرن حاکم بوده است (Fath & Borrett, 2006). به تدریج مدل‌ها پیشرفت کرد و در تجزیه و تحلیل شبکه‌های بزرگ مقیاس و

ENA و به خصوص در شبکه‌های تغذیه‌ای به کار می‌روند و همچنین نشان دادن حوزه‌های کاربردی آنها در سیستم‌های بوم‌شناختی مورد بهره‌برداری است.

جدول (۱): برخی از مطالعات انجام شده در حل مسایل به روش تجزیه و تحلیل شبکه بوم‌شناختی

منبع/ منابع	اهداف
Andras et al., 2007 Preziosi & Pastorok, 2008 Barausse et al., 2009 Min et al., 2011 Yi et al., 2017	ارزیابی ریسک
Jeong et al., 2001 Periorellis et al., 2004 Bodin & Norberg, 2007	ارزیابی آسیب پذیری در سیستم‌های طبیعی
Bondavalli & Ulanowicz, 1999 Spieles & Mitsch, 2003 Baird et al., 2004 Barausse et al., 2009 Lee et al., 2011 Rakshit et al., 2017 Raoux et al., 2017 Horn et al., 2019	تجزیه و تحلیل شبکه غذایی
Caswell, 1989	تعیین میزان برداشت از ذخایر
Bodin & Norberg, 2007 Burel & Baudry, 1990 Zhang & Wang, 2006 Minor et al., 2009	اکولوژی و پویایی‌شناسی سیمای سرزمین
Wang & Johnson, 2000	شبیه‌سازی هیدرودینامیک
Biswas, 1981 Stow et al., 2003 Park et al., 2005	توسعه مدل‌های کیفیت آب
Kharrazi & Akiyama, 2019	مدیریت منابع آب
Su et al., 2017 Wang et al., 2018	مدیریت ذخایر انرژی
Zhang et al., 2019	مدیریت جهت کاهش آلودگی هوا
Banerjee et al., 2017	ارزیابی سلامت اکوسیستم

سیر تحول مدل‌سازی در سیستم‌های بوم‌شناختی

استفاده از ایده‌های شبکه در مطالعات بوم‌شناختی سابقه طولانی دارد (Borrett et al., 2017) و با یک فرایند تکاملی همراه بوده است که این سیر تکاملی موجب به وجود آمدن و معرفی انواع مدل‌ها شده است. در ادامه به اختصار به سیر تحول مدل‌سازی در این حوزه اشاره شده است (Jabariyan Amiri, 2017):

مدل‌های نسل اول: این گروه از مدل‌ها در دهه ۱۹۲۰ میلادی

تحلیل ویژگی‌های ساختاری و عملکردی شبکه روابط متقابل، بدون تنزل دادن مدل به حداقل اجزا فرضی آن است. بنابراین هدف مدل‌های شبکه این است که همه اجزای محیط زیست و روابط متقابل را وارد مدل کرده و روابط کلی را تجزیه و تحلیل و اهمیت آن‌ها را تعیین کند. برخی از کاربردهای مدل‌های تجزیه و تحلیل شبکه بوم‌شناختی عبارتند از (Ings et al., 2009):

- بررسی و تشخیص روابط موجود بین گروه‌های مورد مطالعه
- معرفی با اهمیت‌ترین گونه‌های اکوسیستم و گونه‌هایی که با تغییر جزیی موجب تغییر بزرگی در سیستم می‌شوند.
- شناسایی گونه‌های واکنش‌پذیر و پایدار در مقابل تغییرات
- امکان بررسی اثر یک تغییر بوم‌شناختی عمده بر کل اکوسیستم
- مقایسه سناریوهای مختلف برداشت از حیات وحش و آبیان
- مقایسه سناریوهای مختلف استفاده از آفت‌کش‌ها، کودهای شیمیایی و غیره در اراضی کشاورزی برای تصمیم‌گیری
- عاقلانه در مورد سیاست‌های استفاده متعادل از آن‌ها با حفظ سطح بهره‌برداری مورد نظر
- تعیین آسیب‌پذیری بوم‌شناختی و نشان دادن بزرگنمایی زیستی شبکه‌های غذایی
- امکان پیش‌بینی زیتوده
- پیش‌بینی و حتی کاهش عواقب ناشی از آشفستگی‌های محیطی مانند از بین رفتن زیستگاه، تغییر اقلیم و هجوم گونه‌های بیگانه

علاوه بر موارد ذکر شده تجزیه و تحلیل شبکه غذایی را می‌توان یکی از اجزا مهم ارزیابی ریسک بوم‌شناختی دانست که البته در ابتدای راه بوده و اغلب در چنین مطالعاتی تغییرات زمانی و مکانی در جوامع و ترکیب غذایی دریافت‌کننده‌های کلیدی نادیده گرفته می‌شود. لازم به ذکر است که کاربرد تجزیه و تحلیل شبکه غذایی در مدیریت ریسک نیازمند توجه به مواردی چون انواع مختلف شبکه‌های غذایی؛ تعریف نیچ‌های تغذیه‌ای؛ تغییرپذیری در شبکه‌ها با توجه به زیستگاه، مکان و زمان و مسایل مربوط به طرح نمونه‌برداری اولیه و جمع‌آوری داده‌های رژیم غذایی است (Preziosi & Pastorok, 2008).

ساختار شبکه بوم‌شناختی

در مدل‌سازی شبکه نیاز به تعیین اجزا است که شامل گونه‌ها، سطوح غذایی، گروه‌های کارکردی (Ulanowicz, 2011; Andras et al., 2007) و یا دیگر فاکتورهای محیطی مرتبط

پیچیده مانند سیستم‌های بوم‌شناختی کاربرد یافت (Preziosi & Pastorok, 2008). امروزه ابزارهای مدل‌سازی جدید توان اجرای تعداد زیادی از معادلات را دارند، اما باید توجه کرد که استفاده از این ابزارها، منجر به راه‌حل‌های متوسط می‌شود و اهمیت عملی و واقعی تفاوت‌های فردی بین اجزا نادیده گرفته می‌شود. مدل‌های شبکه تئوری گراف^(۳) که در سیستم‌های پیچیده بزرگ مقیاس از قبیل سیستم‌های بوم‌شناختی به کار می‌رود از آن جمله است (Albert et al., 2000; Proulx et al., 2005). در هر حال با وجود کاربرد گسترده ENA، این گونه مدل‌ها در درجه اول، با هدف تجزیه و تحلیل ساختاری شبکه‌های غذایی در دنیا به کار گرفته شده است که طیفی از مدل‌های ساده تا پیچیده را شامل می‌شود (Dunne et al., 2002; Rossberg et al., 2005).

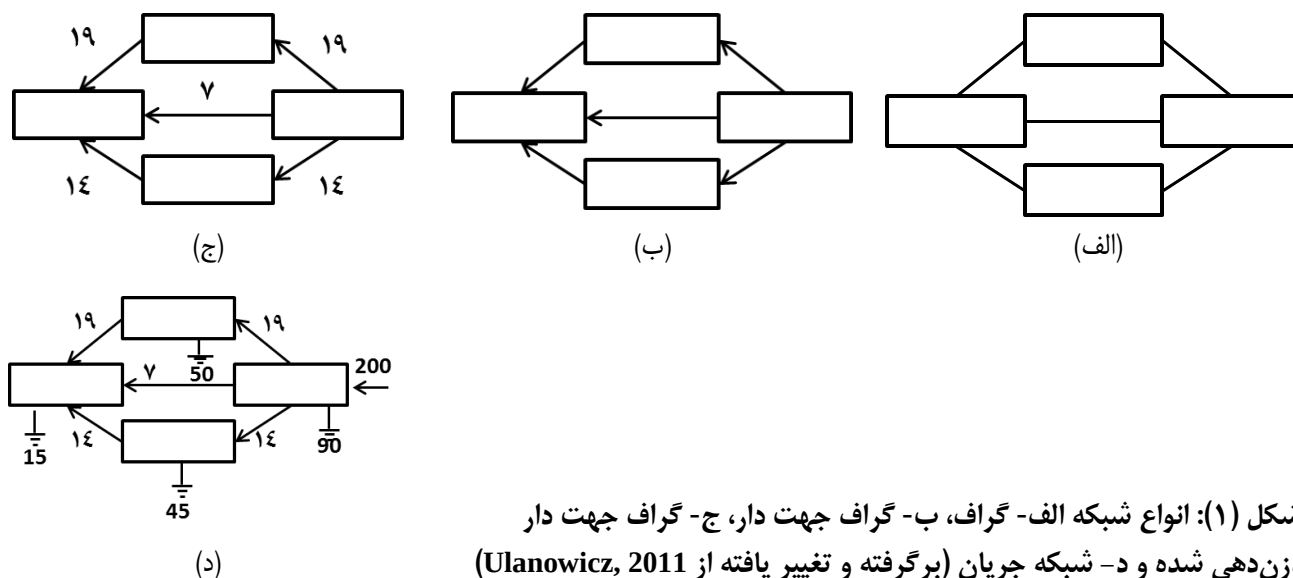
از دیدگاه دیگر بر اساس اینکه این مدل‌ها چند فرایند یا گونه را دخیل می‌کنند، پیشرفت‌هایی در گذر زمان حاصل شده است. این مدل‌ها در ابتدا تک‌گونه‌ای و یا تک‌فرایندی بودند که برای اهداف پیش‌بینی و تفسیر مفید بودند (Ulanowicz, 2009). از جمله این مدل‌های تک‌فرایندی می‌توان به مطالعه (Jassby & Platt, 1976) اشاره کرد که جهت بررسی رابطه فتوسنتز و نور برای فیتوپلانکتون‌ها استفاده شده است. مدل‌های به کار رفته جهت شبیه‌سازی هیدرودینامیک در مطالعات محققانی مانند مطالعه (Johnson & Wang, 2000) و مطالعه (Biswas, 1981) نیز از انواع تک‌فرایندی است. به تدریج با افزایش مشکلات محیط‌زیستی و درک این مساله که این مشکلات بیش از یک فرایند بیولوژیک را درگیر می‌کند، مدل‌های دیگری مطرح شدند. به این مدل‌ها، مدل‌های چندگانه^(۴) گفته می‌شود که فرضیه‌هایی در خصوص کل جوامع بیولوژیک در نظر می‌گیرند و در مقابل مدل‌های قدیمی قرار دارند که به آن‌ها مدل‌سازی فرد-پایه^(۵) نیز گفته می‌شود (De Angelis & Gross, 1992). با وجود پیشرفت‌های مدل‌های چندفرایندی، معمولاً این مدل‌ها رفتار واقعی اکوسیستم را نشان نمی‌دهند، مگر اینکه جامعه مدل‌سازی شده، یک فاکتور فیزیکی و یا شیمیایی غالب داشته باشد (Ulanowicz, 2011).

کاربرد ENA

همان‌طور که پیشتر گفته شد ENA در ابتدا برای تجزیه و تحلیل ساختاری شبکه غذایی به کار رفته است. ENA قادر به تجزیه و

مرتبط می‌کنند (ورودی‌ها و خروجی‌ها)، نشان می‌دهند (Ulanowicz, 2004). شبکه می‌تواند جهت نشان دادن روابط بین اجزا به صورت گراف، گراف جهت‌دار^(۶) و گراف جهت‌دار وزن‌دهی شده^(۷) ترسیم شود (شکل ۱).

(Andras et al., 2007) است. در واقع هدف مدل‌های شبکه این است که همه اجزا محیط‌زیست و روابط متقابل را وارد مدل کرده و روابط کلی را تجزیه و تحلیل و اهمیت آن‌ها را تعیین کند (Fath, 2004). مدل‌ها، جریان مستقیم ماده و انرژی بین اجزا مختلف، همچنین سایر جریاناتی که اجزا را با خارج از سیستم



شامل می‌شود (Fath et al., 2007). این جریانات می‌توانند با واحدهای مختلفی بر طبق هدف تحقیق نمایش داده شوند. به طور مثال می‌توان از گرم کربن (یا نیتروژن یا فسفر) در مترمربع در سال، کیلوکالری در هکتار در ماه و غیره استفاده کرد (Ulanowicz, 2004).

جهت توسعه مدل‌های شبکه غذایی باید زیتوده و برخی از پارامترهای فیزیولوژیک از قبیل مصرف (C)، تولید (P)، تنفس (R) و دفع (E) برای هر یک از اجزا شبکه کمی شوند. حتی می‌توان تنفس و دفع را در صورت لزوم به عنوان یک خروجی در نظر گرفت. به علاوه سهم مصرف هر یک از اجزا نیز در شبکه باید مشخص شود. این تقسیم را می‌توان در یک ماتریس غذایی- جریان ماده از جز j به i رسم نمود. برای همه اجزا، بر اساس قانون بقای جرم و قوانین ترمودینامیک ورودی‌ها باید با خروجی‌ها در تعادل باشد ($C = P + R + E$). بنابراین، همان‌طوری که ذکر شد به منظور کمی کردن شبکه، باید جریان‌های وارد شده به داخل هر یک از اجزا و یا خارج شده از هر یک آنها برآورد شوند. در اغلب مطالعات ENA، جهت کسب این داده‌ها از روش‌های تجربی

همان‌طوری که در شکل (۱) نشان داده شده است، شبکه جهت‌دار علاوه بر نشان دادن ارتباطات بین اجزا، جهت ارتباط را نیز نشان می‌دهد. بدین معنی که نشان می‌دهد کدام جز بر روی کدام جز اثر فعال دارد. به عبارتی ارتباطات بین اجزا را می‌توان در یک ماتریس متقارن به صورت صفر (عدم وجود ارتباط) و یک (وجود ارتباط) نشان داد. در این حالت اگر تعداد اجزا سیستم n باشد، ماتریس $n \times n$ خواهد بود. در این نوع شبکه تمام ارتباطات هم وزن تلقی می‌شوند که در سیستم‌های واقعی چنین وضعیتی معمولاً رخ نمی‌دهد. بنابراین مسیریایی که اثر بیشتری نسبت به سایر مسیرها دارند، باید وزن بیشتری داشته باشند که چنین حالتی را در گراف جهت‌دار وزن‌دهی شده می‌توان دید. نوع آخر شبکه، شبکه جریان^(۸) نام دارد که در آن وزن‌ها بر اساس انتقال یک واسط فیزیکی مانند انرژی یا ماده (مانند کربن، نیتروژن و غیره) در نظر گرفته می‌شود و میزان ذخیره هر یک از اجزا نیز مشخص است (Ulanowicz, 2011). مدل جریان شبکه اساساً یک شبکه غذایی بوم‌شناختی (جریان ماده و انرژی) است که مسیرهای غیرتغذیه‌ای مانند اتلاف ماده و انرژی به خارج از سیستم و مسیرهای پوده‌خواری را نیز

زیتوده، زیتوده، مساحت زیستگاه اشغال شده، زیتوده در منطقه زیستگاهی ($T.km^2$)، ترکیب رژیم غذایی و مرگ و میر صیاد مورد نیاز است (Ings et al., 2009). اخیراً به این نرم‌افزار یک ماژول شبیه‌سازی پویا اکوسیم (Ecosim) اضافه شده است که کاربردهای مدیریتی بیشتری برای مدیریت محیط‌زیست دارد (Fath et al., 2007). در نرم‌افزار ترکیبی اکوپت و اکوسیم قابلیت‌های مدل‌سازی فضایی نیز ایجاد شده است. البته نتایج این نرم‌افزار به جامعیت نرم‌افزار اکونت نیست چرا که اکونت علاوه بر شبیه‌سازی پویا به تجزیه و تحلیل شبکه‌هایی با وضعیت ایستا نیز می‌پردازد. معادله اکوسیم عبارت است از:

(۲)

$$\frac{dB_i}{dt} = f(B_i) - MB_i - F_i B_i - \sum_{j=1}^n c_{ij} (B_i B_j)$$

که در آن $f(B_i)$ تابع B_i است و i تولید اولیه است یا به عبارتی $f(B_i)$ عبارت است از:

(۳)

$$f(B_i) = g_i \sum c_{ij} (B_i B_j)$$

اگر i مصرف باشد، g_i کارایی رشد خالص است و $c_{ij}(B_i B_j)$ تابعی است که برای پیش‌بینی نرخ مصرف از B_i به B_j استفاده می‌شود. C_{ij} براساس خصوصیات آسیب‌پذیری طعمه‌ها تعیین می‌شود (Allain et al., 2007).

مدل‌سازی معکوس (Inverse modelling)

روش دیگر برای ساخت شبکه‌های جریان بوم‌شناختی، مدل‌سازی معکوس است. در این روش یک شبکه غذایی ساختاری برای اکوسیستم بر اساس تغذیه و الگوی جریان ساخته می‌شود. فرض این روش بر این است که زیتوده اجزا در حالت پایدار هستند، به طوری که جریان کل وارد شده به یک جز برابر با میزان کل جریانی است که از آن خارج می‌شود. این رویکرد اگر چه به خوبی اکوپت شناخته شده نیست، اما در بسیاری از موارد به کار گرفته شده است (Fath et al., 2007).

مدل اکونت (EcoNet)

نرم‌افزار اکونت یک نرم‌افزار تجزیه و تحلیل و شبیه‌سازی برای سیستم‌های بوم‌شناختی است. این نرم‌افزار به صورت آنلاین در سایت <http://eco.engr.uga.edu> قابل اجرا است و نیازی به نصب ندارد. قابلیت بالای اکونت در سادگی اجرای آن است. اکونت به راحتی می‌تواند مدل‌هایی با 10^5 جز و 10^5 جریان ساخته،

استفاده شده است (Lee et al., 2011) به این ترتیب می‌توان از پژوهش‌های صحرایی اولیه در رابطه با تولید اولیه، تنفس و تغذیه، برخی از جریان‌ها را جمع‌آوری کرد. برخی دیگر از مطالعات، داده‌های مورد نیاز را از منابع مقالات و نتایج مدل‌های شبیه‌سازی شده به دست آورده‌اند. در بیشتر موارد منابع داده مذکور همه داده‌های مورد نیاز را برای ساخت شبکه تهیه نمی‌کند. در این موارد توصیه می‌شود تجزیه و تحلیل حساسیت^(۹) جهت ارزیابی شبکه با مشاهده اثر وارد کردن یک داده ورودی غلط انجام شود (Fath et al., 2007). وقتی شبکه غذایی چه از طریق داده‌های صحرایی و یا الگوریتم‌ها ساخته شد، اجرای ENA ساده بوده و بسته‌های نرم‌افزاری مختلفی جهت ارزیابی آن در دسترس است (Fath and Borrett, 2006).

مدل‌های ENA

در ادامه برخی از مدل‌های ENA که به صورت نرم‌افزاری نیز در دسترس هستند معرفی شده است. از آنجائیکه مقصود این بخش از مطالعه معرفی مدل‌های توسعه یافته برای ENA است، جهت طولانی نشدن مطلب، تنها مدل پرکاربرد اکوپت با جزئیات بیشتر توضیح داده شده و سایر مدل‌ها به صورت مختصر معرفی شده‌اند.

مدل اکوپت (Ecopath)

مدل‌سازی بیوانرژتیک جهت ساخت و تجزیه و تحلیل جریان توده-متوازن^(۱۰) شبکه‌ها در این نوع مدل به کار رفته است (Borrett et al., 2017; Christensen et al., 2008). تاکنون مدل‌های شبکه بسیار متنوعی با استفاده از این روش ساخته شده است. معادله اصلی برای اکوپت عبارت است از:

(۱)

$$B_i \left(\frac{P}{B} \right)_i EE_i = Y_i + \sum B_j \left(\frac{Q}{B} \right)_j DC_{ji} + BA_i + NM_i$$

که در آن B_i و B_j به ترتیب بیوماس شکار (i) و شکارچی (j)، $(P/B)_i$ نسبت تولید به زیتوده، EE_i کارایی سطح غذایی بوم‌شناختی، Y_i میزان صید در واحد مکان و زمان، $(Q/B)_j$ مصرف غذا در واحد زیتوده، DC_{ji} میزان شرکت i در رژیم غذایی j ، AB_i تجمع بایمس i و NM_i مهاجرت خالص i (مهاجرت به خارج - مهاجرت به داخل) است (Allain et al., 2007). برای مدل‌سازی در این نرم‌افزار اطلاعات تولید/زیتوده، مصرف/

پرداخته‌اند و در کمتر مطالعه‌ای جنبه‌های کارکردی اکوسیستم بررسی شده‌است. دلیل این امر بر اساس (Lee, 2011) اندک بودن تعداد نمایه‌های نشان‌دهنده کارکرد اکوسیستم است.

با وجود همه موانع مذکور، این روش‌ها در دنیا تاکنون به طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار گرفته و پیشرفت‌هایی حاصل نموده و بیشتر از پیش تصحیح شده‌اند. مدل‌های ENA از شکل تک گونه‌ای و یا تک فرایندی به سمت مدل‌های چند فرایندی در حال تکامل هستند، با این حال همچنان مدل‌های سابق جهت پیش‌بینی و تفسیر مفید هستند. به طور کلی هر یک از مدل‌های توسعه یافته دارای معایب و مزایایی خاصی بوده که باید با توجه به هدف مطالعه، اجزا مورد مطالعه سیستم و پیچیدگی سیستم انتخاب شوند. با وجود کاربرد گسترده این مدل‌ها در نقاط مختلف دنیا و همچنین در سیستم‌های بوم‌شناختی متنوع با اهداف مختلف، این روش‌های در ایران کمتر مورد توجه بوده و شایسته است در مطالعات آینده با داده‌های کمی مربوط به اجزا اکوسیستم‌های مختلف به خصوص اکوسیستم‌های تحت بهره‌برداری، مورد استفاده قرار گیرند. با کمک این مدل‌ها می‌توان واکنش اکوسیستم تحت بهره‌برداری را با تغییر مقدار موجودی و جریانات بین اجزا پیش‌بینی نمود و در خصوص میزان بهره‌برداری مجاز از اجزا سیستم واقع‌بینانه‌تر عمل کرد به نحوی که همواره تعادل سیستم بوم‌شناختی مورد نظر حفظ شود. وجود بانک اطلاعات بوم‌شناختی، در دسترس قرارگیری آن برای پژوهشگران و همچنین برآورد صحیح داده‌ها نیز جهت هر گونه بررسی رفتار سیستم‌های بوم‌شناختی تحت بهره‌برداری و دخالت انسانی نیز ضروری است.

یادداشت‌ها

1. Ecological network analysis
2. Scale- free
3. Graph theoretical network models
4. Multiple process models
5. Individual- based
6. Directed graph (dgraph)
7. Weighted digraph
8. Flow networks
9. Sensitivity analysis
10. Mass- balanced

شبیه‌سازی و تجزیه و تحلیل کند. نیازهای اولیه برای اجرای مدل عبارتند از: جریانات بین اجزای سیستم، میزان اولیه اجزا، سرعت جریان که از تقسیم اندازه جریان بر میزان اولیه اجزا به دست می‌آید (Fath et al., 2007).

مدل وینسام (WinSAAM)

این مدل نیز به صورت نرم‌افزاری در دسترس و قابل دانلود رایگان است. ونسیم برای به دست آوردن نرخ انتقال ماده یا انرژی بین اجزا سیستم کاربرد دارد (Lee et al., 2011).

سایر مدل‌ها

بسته‌های نرم‌افزاری دیگری را نیز می‌توان برای ENA به کار برد. نرم‌افزار استلا (STELLA) یکی از این موارد است. استلا یک نرم‌افزار شبیه‌سازی پویاست که جهت طراحی ساختار شبکه کاربرد دارد (Fath et al., 2007). این نرم‌افزار به طور گسترده‌ای استفاده می‌شود زیرا دارای گرافیک قوی بوده و کاربران می‌توانند به راحتی اشکال هندسی نماینده اجزا و جریانات در سیستم را وارد مدل کنند. نرم افزار دیگر enaR نام دارد که توسعه یافته بسته قبلی خود است که توسط (Borrett & Fath, 2006) در محیط متلب توسعه یافته است. (Lau et al., 2015) قابلیت‌های بیشتری از نسخه قبلی برای enaR در محیط R فراهم آوردند.

نتیجه‌گیری

ENA قادر به تجزیه و تحلیل خصوصیات ساختاری و عملکردی شبکه روابط متقابل درون سیستم‌های بوم‌شناختی بدون تنزل دادن مدل به حداقل اجزا فرضی آن است. بنابراین هدف مدل‌های شبکه این است که همه اجزا محیط‌زیست و روابط متقابل را وارد مدل کرده و روابط کلی را تجزیه و تحلیل و اهمیت آن‌ها را تعیین کند. همچنین جهت کمی کردن جریانات و ارتباطات متقابل بین اجزا سیستم از تعدادی نمایه بهره می‌برد که این نمایه‌ها را می‌توان برای مقایسه کارکرد اکوسیستم‌ها به کار گرفت.

فقدان مدل‌های شبکه کمی و مشکلات ساخت مدل‌ها (کمبود داده و صحت آن‌ها) از مهمترین محدودیت‌های روش ENA برای ارزیابی و مقایسه پاسخ‌های کارکردی اجتماعات زیستی به آشفتگی‌های ناشی از عوامل طبیعی و به‌خصوص بهره‌برداری‌های انسانی است. در این راستا اغلب پژوهشگران به بررسی ساختاری اکوسیستم‌ها و واکنش آن نسبت به تغییرات طبیعی و انسانی

فهرست منابع

- Albert, R.; Jeong, H. & Barabasi, A. L. 2000. Error and attack tolerance of complex networks, *Nature*, 406: 378-382.
- Allain, V.; Nicol, S.; Essington, T.; Okey, T.; Olson, B. & Kirby, D. 2007. An Ecopath with Ecosim model of the Western and Central Pacific Ocean warm pool pelagic ecosystem. Scientific committee, third regular session. Honolulu, United States of America, p 42.
- Andras, P.; Gwyther, R.; Madalinski, A.; Lynden, S.; Andras, A. & Young, M. 2007. Ecological network analysis: an application to the evaluation of effects of pesticide use in an agricultural environment, *Pest Management Science*, 63 (10): 943–953.
- Baird, D.; Christian, R. R.; Peterson, C. H. & Johnson, G. A. 2004. Consequences of hypoxia on estuarine ecosystem function: energy diversion from consumers to microbes, *Ecological Applications*, 14 (3): 805–822.
- Banerjee, A.; Chakrabarty, M.; Rakshit, N.; Mukherjee, J. & Ray, S. 2017. Indicators and assessment of ecosystem health of Bakreswar reservoir, India: An approach through network analysis, *Ecological Indicators*, 80: 163-173.
- Barausse, A.; Duci, A.; Mazzoldi, C.; Artioli, Y. & Palmeri, L. 2009. Trophic network model of the Northern Adriatic Sea: Analysis of an exploited and eutrophic ecosystem, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 83 (4): 577–590.
- Biswas, A. K. 1981. *Models for Water Quality Management*, McGraw-Hill.
- Bodin, O. & Norberg, J. 2007. A network approach for analysis spatially structured populations in fragmented landscape, *Landscape Ecology*, 22 (1): 31-44.
- Bondavalli, C. & Ulanowicz, R. E. 1999. Unexpected effects of predators upon their prey: the case of the American Alligator, *Ecosystems*, 2 (1): 49-63.
- Borrett, S. R.; Sheble, L.; Moody, J. & Anway, E. C. 2017. Bibliometric review of ecological network analysis: 2010–2016, *Ecological Modelling*, 382: 63-82.
- Burel, F. & Baudry, J. 1990. Structural dynamic of hedgerow network landscape in Brittany France, *Landscape ecology*, 4 (4): 197- 210.
- Caswell, H. 1989. *Matrix Population Models*, Sinauer.
- De Angelis, D. L. & Gross, L. J. 1992. *Individual-Based Models and Approaches in Ecology*, Chapman and Hall.
- Dunne, J. A.; Williams, R. J. & Martinez, N. D. 2002. Food-web structure and network theory: the role of connectance and size, *PNAS*, 99:12917–12922.
- Fath, B. & Scharler, U. 2018. *Systems Ecology: Ecological Network Analysis*. In: Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences, Elsevier, 1083-1088.
- Fath, B. D. 2004. Network analysis applied to large-scale cyber-ecosystems, *Ecological Modelling*, 171 (4): 329–337.
- Fath, B. D. & Borrett, S. R. 2006. A Matlab Function for Network Environ Analysis, *Environmental Modelling and Software*, 21: 375-405.
- Fath, B. D.; Scharler, U. M.; Ulanowicz, R. E. & Hannon, B. 2007. Ecological network analysis: network construction, *Ecological Modeling*, 208: 49–55.
- Finn, J. T. 1980. Flow analysis of models of the hubbard brook ecosystem, *Ecology*, 61: 562–571.

- Garlaschelli, D.; Caldarelli, G. & Pietronero, L. 2003. Universal scaling relations in food webs, *Nature*, 423: 165–168.
- Han, B. P. 1997. On several measures concerning flow variables in ecosystems, *Ecological Modelling*, 104: 289–302.
- Hannon, B. 1973. The structure of ecosystems. *Journal of Theoretical Biology*, 41 (3): 535-546.
- Horn, S.; Vega, C.; Asmus, R.; Schwemmer, P.; Enners, L.; Garthe, S.; Haslob, H.; Binder, K. & Asmus, H. 2019. Impact of birds on intertidal food webs assessed with ecological network analysis. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 219: 107-119.
- Ings, T. C.; Montoya, J. M.; Bascompte, J.; Bluthgen, N.; Brown, L.; Dormann, C. F.; Edwards, F.; Figueroa, D.; Jacob, U.; Jones, J. I.; Lauridsen, R. B.; Ledger, M. E.; Lewis, H. M.; Olesen, J. M.; van Veen, F. J.; Warren, P. H. & Woodward, G. 2009. Ecological networks- beyond food webs, *Journal of Animal Ecology*, 78: 253–269.
- Jabariyan Amiri, B. 1998. Introducing an objectivist method for determining the ecological vulnerability of ecosystems, *Journal of Environmental Studies*, 24(21): 58-68.
- Jabariyan Amiri, B. 2017. Environmental modeling, University of Tehran Press.
- Jassby, A. D. & Platt, T. C. 1976. Mathematical formulation of the relationship between photosynthesis and light for phytoplankton, *Limnology and Oceanography*, 21: 540–547.
- Jeong, H.; Mason, S. P.; Barabasi, A. L. & Oltvai, Z. N. 2001. Lethality and centrality in protein networks, *Nature*, 411: 41–42.
- Kazanci, C.; Matamba, L.; Tollner, E. W. 2009. Cycling in ecosystems: An individual based approach, *Ecological Modelling*, 220 (21): 2908-2914.
- Kharrazi, A. & Akiyama, T. 2019. Application of the Ecological Network Analysis (ENA) Approach in Water Resource Management Research: Strengths, Weaknesses, and Future Research Directions. In: Singh R.; Kolok A. & Bartelt-Hunt S. (eds) *Water Conservation, Recycling and Reuse: Issues and Challenges*, Springer, Singapore.
- Lau, M. K.; Borrett, S. R.; Hines, D. E. & Singh, P. 2015. Tools for Ecological Network Analysis, Package 'enaR'. P48. URL <https://github.com/SEELab/enaR>.
- Lee, K. M.; Lee, S. Y. & Connolly, R. M. 2011. Combining stable isotope enrichment, compartmental modelling and ecological network analysis for quantitative measurement of food web dynamics, *Methods in Ecology and Evolution*, 2: 56–65.
- Min, Y.; Jin, X.; Chang, J.; Peng, C.; Gu, B.; Ge, Y. & Zhong, Y. 2011. Weak indirect effects inherent to nitrogen biogeochemical cycling within anthropogenic ecosystems: A network environ analysis, *Ecological Modelling*, 222: 3277– 3284.
- Minor, E. S.; Tessel, S. M.; Engelhardt, K. A. M. & Lookingbill, T. R. 2009. The role of landscape connectivity in assembling exotic plant communities: a network analysis, *Ecology*, 90:1802–1809.
- Park, K.; Jung, H. S.; Kim, H. S. & Ahn, S. M. 2005. Three-dimensional hydrodynamic-eutrophication model (HEM-3D): application to Kwang-Yang Bay, Korea, *Marine Environmental Research*, 60: 171–193.
- Patten, B. C.; Bosserman, R. W.; Finn, J. T. & Cale, W. G. 1976. Propagation of cause in ecosystems. In: Patten, R. C. (ed) *System analysis and simulation in ecology*, IV, Academic Press.
- Periorellis, P.; Idowu, O. C.; Lynden, S. J.; Young, M. P. & Andras, P. 2004. Dealing with complex networks of protein interactions: a security measure. *Proc 9th IEEE Internat Conf on Engineering of Complex Systems (ICECCS)*, IEEE Computer Society, Los Alamitos, California, pp. 29- 36.

- Preziosi, D. V. & Pastorok, R. A. 2008. Ecological food web analysis for chemical risk assessment, *Science of the total environmental*, 406 (3): 491 – 502.
- Proulx, S. R.; Promislow, D. E. L. & Phillips, P. C. 2005. Network thinking in ecology and evolution, *Trends in Ecology and Evolution*, 20 (6): 345–353.
- Rakshit, N.; Banerjee, A.; Mukherjee, J.; Chakrabarty, M.; Borrett, S. & Ray, S. 2017. Comparative study of food webs from two different time periods of Hooghly Matla estuarine system, India through network analysis, *Ecological Modelling*, 356: 25-37.
- Raoux, A.; Tecchio, S.; Pezy, J.; Lassalle, G.; Degraer, S.; Wilhelmsson, D.; Cachera, M.; Ernande, B.; Le Guen, C.; Haraldsson, M.; Grangeré, K.; Le Loch, F.; Dauvin, J. & Niquil, N. 2017. Benthic and fish aggregation inside an offshore wind farm: Which effects on the trophic web functioning?, *Ecological Indicators*, 72: 33-46.
- Rossberg, A. G.; Matsuda, H.; Amemiya, T. & Itoh, K. 2005. An explanatory model for food-web structure and evolution, *Ecological Complexity*, 2 (3): 312–321.
- Spieles, D. J. & Mitsch, W. J. 2003. A model of macroinvertebrate trophic structure and oxygen demand in freshwater wetlands. *Ecological Modelling*, 161: 183–194.
- Stow, C.; Roessler, C.; Borsuk, M.; Bowen, J. & Reckhow, K. 2003. Comparison of Estuarine Water Quality Models for Total Maximum Daily Load Development in Neuse River Estuary, *Journal of Water Resources Planning and Management*, 129 (4): 307–314.
- Su, M.; Zhang M.; Lu, W.; Chang, X.; Chen, B.; Liu, G.; Hao, Y. & Zhang, Y. 2017. ENA-based evaluation of energy supply security: Comparison between the Chinese crude oil and natural gas supply systems, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 72: 888-899.
- Ulanowicz, R. E. 2004. Quantitative methods for ecological network analysis, *Computational Biology and Chemistry*, 28 (5-6): 321-339.
- Ulanowicz, R. E. 2009. The Dual Nature of Ecosystem Dynamics, *Ecological Modelling*, 220: 1886–1892.
- Ulanowicz, R. E. 2011. Quantitative methods for ecological network analysis and its application to coastal ecosystems, *Treatise on Estuarine and Coastal Science*, 9: 35-57.
- Wang, H. V. & Johnson, B. J. 2000. Validation and application of the second generation three dimensional hydrodynamic model of Chesapeake Bay, *Water Quality and Ecosystem Modeling*, 1 (1-4): 51–90.
- Wang, S.; Liu, Y. & Chen, Y. 2018. Multiregional input–output and ecological network analyses for regional energy–water nexus within China, *Applied Energy*, 227: 353-364.
- Yi, Y.; Tang, C.; Yi, T.; Yang, Z. & Zhang, S. 2017. Health risk assessment of heavy metals in fish and accumulation patterns in food web in the upper Yangtze River, China, *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 145: 295-302.
- Zhang, L. & Wang, H. 2006. Planning an ecological network of Xiamen Island (China) using landscape metrics and network analysis, *Landscape and Urban Planning*, 78 (4): 449–456.
- Zhang, Y.; Li, Y.; Hubacek, K.; Tian, X. & Lu, Z. 2019. Analysis of CO₂ transfer processes involved in global trade based on ecological network analysis, *Applied Energy*, 233-234: 576-583.