پژوهشکده محیط زیست

پژوهش و فناوری محیط‌زیست

وبگاه نشریه: www.journal.eri.acecr.ir

شاپا الکترونیکی: ۲۶۷۶-۳۰۶۰

مروری بر مدل‌های تاب‌آوری اکوسیستم: مقایسه، ارزیابی و کاربردهای محیط زیستی

محمد جواد تجدد[1]✉، بهرام ملک محمدی[2]، مکرم روانبخش[3]، طوبی عابدی[3]

۱- کارشناس پژوهشی، گروه محیط زیست طبیعی، پژوهشکده محیط زیست جهاد دانشگاهی گیلان، رشت، ایران

۲- دانشیار، گروه برنامه‌ریزی، مدیریت محیط زیست و HSE، دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران

۳- استادیار، گروه پژوهشی محیط زیست طبیعی، پژوهشکده محیط زیست جهاد دانشگاهی گیلان، رشت، ایران

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مروری

تاریخ دریافت:
۱۴۰۳/۰۹/۰۶

تاریخ پذیرش:
۱۴۰۴/۰۱/۱۷

دسترسی آنلاین:
۱۴۰۴/۰۲/۱۵

کلید واژه‌ها:
اکوسیستم،
تاب‌آوری،
مدل‌سازی،
محیط زیست

چکیده

تاب‌آوری اکوسیستم به عنوان قابلیت یک اکوسیستم برای مقاومت و بازیابی پس از تغییرات و تهدیدات طبیعی یا انسان ساخته شناخته می‌شود. این مقاله به مقایسه و ارزیابی مدل‌های تاب‌آوری اکوسیستم می‌پردازد و کاربردهای محیط زیستی آن‌ها را بررسی می‌کند. مدل‌ها شامل ۴ دسته نظری، آماری، عامل مبنا و ترکیبی می‌باشد. سپس عملکرد و کارایی هر مدل در مواجهه با تغییرات مختلف محیطی و تهدیدات محیط زیستی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در نهایت، کاربردهای زیست محیطی این مدل‌ها در حفظ و مدیریت منابع طبیعی، بهبود کیفیت محیط زیست و توسعه پایدار بررسی می‌شوند. در این مقاله مفاهیم و ارتباط آن‌ها با تاب‌آوری بررسی شده است؛ مفهوم خدمات اکوسیستمی و ارتباط آن با تاب‌آوری تشریح شده است. همچنین، نرم‌افزار InVEST و یک بررسی موردی مورد تحلیل قرار گرفته است. با توجه به مقایسه انجام شده، هیچ مدل واحدی به عنوان بهترین مدل برای تمامی شرایط قابل معرفی نیست و انتخاب مدل مناسب به اهداف پژوهش، نوع اکوسیستم مورد مطالعه و دسترسی به داده‌ها بستگی دارد.

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: javad.tajadod0181@gmail.com

Journal of Environmental Research and Technology, 9(16)2024. 143-153

Journal of Environmental Research and Technology

journal homepage: www.journal.eri.acecr.ir

Environmental Research institute

Online ISSN: 3060-2676

Ecosystem resilience models: Comparison, evaluation, and environmental applications

Mohammadjavad tajadod[✉1], Bahram malekmohammadi[2], Mokaram Ravanbakhsh[3], Tooba abedi[4]

1- Research Expert, Department of Natural Environment, Environmental Research Institute, Academic Center for Education Culture & Research (ACECR), Rasht, Iran.
2- Associate Professor, Department of Planning, Environmental Management and HSE, Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran.
3- Assistant Professor, Department of Natural Environment, Environmental Research Institute, Academic Center for Education Culture & Research (ACECR), Rasht, Iran.

Article Info

Article type:
Review Article

Article history:
Received:
2024/11/26
Accepted:
2025/04/06
Available online:
2025/05/05

Keywords:
Phytoplankton,
Per Ecosystem,
Resilience,
Modeling,
Environment

Abstract

Ecosystem resilience is defined as the capacity of an ecosystem to resist and recover after natural or human-induced disturbances and threats. This paper compares and evaluates different ecosystem resilience models and examines their environmental applications. The models are categorized into four groups: theoretical, statistical, agent-based, and hybrid models. The performance and effectiveness of each model are assessed in response to various environmental changes and threats. Furthermore, the environmental applications of these models in conserving and managing natural resources, improving environmental quality, and promoting sustainable development are reviewed. This paper also explores the related concepts and their connection to resilience, elaborates on the concept of ecosystem services and its relationship with resilience, and analyzes the InVEST software along with a case study. Based on the comparisons, no single model can be considered the best under all circumstances. The selection of an appropriate model depends on the research objectives, the type of ecosystem under study, and the availability of data.

* Corresponding author E-mail address: javad.tajadod0181@gmail.com

مقدمه

ریشه‌شناسی "Resilio" "Resilience" است که از کلمه لاتین "bounce" گرفته شده است و به معنای بازگشت به جایگاه اصلی خود است. Holling در سال ۱۹۷۳ برای اولین بار کلمه تاب‌آوری را تعریف کرد. تاب‌آوری از منظر هولینگ به میزان اختلالی که یک سیستم می‌تواند به صورت پایدار قبل از تغییر در کنترل یا ساختار آن تحمل کند. تاب‌آوری به طور گسترده در بسیاری از رشته‌ها از جمله مکانیک، روانشناسی، جامعه شناسی و بوم شناسی استفاده می‌شود. رشته‌های مختلف درک متفاوتی از مفهوم آن و تأکیدات متفاوت دارند. با این حال، اجماع به دست آمده توانایی یک سیستم برای مقابله و بازیابی از تغییرات خارجی، تداخل و تغییرات خود است(Chao, 2021). در مباحث اکولوژیکی تاب‌آوری اکوسیستم به توانایی یک اکوسیستم برای جذب، بازسازی و بازگشت به حالت اولیه پس از مواجهه با تغییرات و اختلالات مختلف اشاره دارد. این مفهوم شامل توانایی اکوسیستم برای حفظ ساختار و عملکرد خود در برابر فشارهای خارجی مانند تغییرات اقلیمی، فعالیت‌های انسانی و حوادث طبیعی است. تاب‌آوری اکوسیستم می‌تواند به سه نوع اصلی تقسیم شود که شامل: تاب‌آوری مهندسی، تاب‌آوری اکولوژیکی و تاب‌آوری اجتماعی-اکولوژیکی می‌باشد. در تاب‌آوری مهندسی اشاره به توانایی یک سیستم برای بازگشت سریع به حالت اولیه پس از اختلالات دارد. در تاب‌آوری اکولوژیکی ظرفیت اکوسیستم برای جذب تغییرات و بازسازی بدون تغییر اساسی در ساختار و عملکرد می‌باشد. در این بین تغییرات اقلیمی نیز یکی از بزرگترین تهدیدات برای اکوسیستم‌های طبیعی است. افزایش دما، تغییرات الگوی بارش، و افزایش فراوانی و شدت حوادث طبیعی مانند سیلاب‌ها و خشکسالی‌ها می‌تواند توانایی اکوسیستم‌ها را برای حفظ ساختار و عملکرد خود تحت فشار قرار دهد. تاب‌آوری اکوسیستم در بحث حفظ تنوع زیستی، خدمات اکوسیستمی و کاهش اثرات اقلیمی بسیار حیاتی می‌باشد. فعالیت‌های انسانی مانند کشاورزی، شهرسازی، صنعت و استخراج منابع طبیعی می‌توانند فشارهای زیادی بر اکوسیستم‌ها وارد کنند.

اکوسیستم‌های تاب اور می‌توانند به اقتصاد محلی و جهانی کمک کنند، به ویژه در بخش‌هایی مانند کشاورزی، شیلات و گردشگری. همچنین می‌توانند منابع طبیعی مانند آب، خاک و جنگل را برای استفاده پایدار حفظ کنند. تاب‌آوری اکوسیستم به دلیل توانایی آن در حفظ ساختار و عملکرد در برابر تغییرات و اختلالات، یکی از مفاهیم کلیدی در زمینه مدیریت محیط زیستی است. در مواجهه با چالش‌های ناشی از تغییرات اقلیمی و فعالیت‌های انسانی، تقویت تاب‌آوری اکوسیستم‌ها می‌تواند به حفظ تنوع زیستی، ارائه خدمات اکوسیستمی و تضمین پایداری منابع طبیعی کمک کند.

ریشه شناسی "Resilio" "Resilience" است که از کلمه لاتین "bounce" گرفته شده است و به معنای بازگشت به جایگاه اصلی خود است. تاب‌آوری به طور گسترده در بسیاری از رشته‌ها از جمله مکانیک، روانشناسی، جامعه شناسی و بوم شناسی استفاده می‌شود. رشته‌های مختلف درک متفاوتی از مفهوم آن و تأکیدات متفاوت دارند. با این حال، اجماع به دست آمده توانایی یک سیستم برای مقابله و بازیابی از تغییرات خارجی، تداخل و تغییرات خود است. کشورهای سراسر جهان به برنامه ریزی و ساخت شهرهای تاب آور متعهد هستند، اما اکثر آنها کشورهای توسعه یافته هستند و ویژگی‌های محلی قوی از خود نشان می‌دهند، مانند «نیویورک قوی تر و انعطاف پذیرتر» در نیویورک، ایالات متحده، «مدیریت ریسک‌ها و افزایش انعطاف پذیری» در لندن، بریتانیا، «طرح تقویت قلمرو انعطاف پذیر» در ژاپن، و مواردی از این دست. «نیویورک قوی تر و انعطاف پذیرتر» در نیویورک، با تجزیه و تحلیل تغییرات کلی آب و هوا شروع می‌شود، مجموعه ای از اقدامات را انجام می‌دهد. تجزیه و تحلیل تأثیر بلایای طبیعی، از جمله تجزیه و تحلیل افزایش امن سطح دریا، طوفان و سیل در نیویورک، و فهرست زیرساخت‌های شهری و منابع انسانی، از جمله خط ساحلی حفاظت، ساخت و ساز، بهبود اقتصادی، پیشگیری از بلایای اجتماعی و هشدار اولیه، احیای محیط زیست و سایر زیرساخت‌های شهری و ساخت و ساز محیط زندگی برنامه اقدام، و حمایت مالی ارائه می‌کند. «مدیریت خطرات و افزایش انعطاف‌پذیری» در لندن، بریتانیا مستلزم آن است که ساخت یک شهر تاب‌آور باید جنبه‌های زیر را داشته باشد: ۱) شناسایی بلایای احتمالی. ۲) تعیین اهداف انعطاف پذیر؛ ۳) اجرای پروژه‌ها؛ ۴) ارزیابی و به روز رسانی منظم پروژه‌ها و اهداف. لندن به وضوح مفهوم انعطاف پذیری را مطرح کرد. لندن، که هسته اصلی آن انجام ارزیابی ظرفیت واکنش و اقدامات برای خطر بلایای بزرگ و حوادثی است که ممکن است در لندن رخ دهد، تا اطمینان حاصل شود که در هنگام وقوع حوادث

بزرگ، شهر می‌تواند سازگار، تحمل کند، تصمیم بگیرد و به سرعت پاسخ دهید، تا ضرر را به حداقل برسانید. ژاپن مفهوم «تقویت طرح قلمرو تاب آور» را به چهار هدف اساسی تقسیم می‌کند: ۱) بهترین تلاش را برای محافظت از جان مردم انجام دهید. ۲) حفاظت از عملکردهای مهم دولت و جامعه از آسیب‌های مهلک؛ ۳) اطمینان از به حداقل رساندن اموال ملی و امکانات عمومی. ۴) توانایی بازیابی سریع (Chao, 2021). در جدول (۱) تعریف تاب‌آوری، آسیب‌پذیری، سازگاری، مقاومت، پایداری و پادشکنندگی آورده شده است:

تاب‌آوری اکوسیستم به عنوان یک مفهوم چند وجهی، شامل تعاریف و رویکردهای مختلفی است که هر کدام به جنبه‌های خاصی از توانایی اکوسیستم‌ها برای مقابله با تغییرات و اختلالات می‌پردازد. در ادامه، به توضیح سه نوع اصلی تاب‌آوری اکوسیستم می‌پردازیم: تاب‌آوری مهندسی، تاب‌آوری اکولوژیکی و تاب‌آوری اجتماعی-بوم شناختی.

مواد و روش‌ها

روش شناسی مدنظر به منظور انجام مطالعه حاضر، مبتنی بر روش تحقیق کمی بوده و با بهره گیری از منابع علمی داخلی و بین المللی و اسناد مکتوب، سعی شد تا تحلیل متحوا صورت گیرد و ادبیات موضوع کلاس بندی و ابعاد آن مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. بر اساس محتوای مقاله، بخش «مواد و روش‌ها» که در این مرور به کار گرفته شده است، شامل بررسی و تحلیل جامعی از متون موجود در مورد تاب‌آوری اکوسیستم بوده است. مواد اولیه شامل مدل‌های مختلف تاب‌آوری اکوسیستم بود که نویسندگان آن‌ها را به چهار نوع اصلی دسته‌بندی کردند: مدل‌های نظری، آماری، مبتنی بر عامل و مدل‌های ترکیبی.

این مرور همچنین رویکردهای نرم و مفهوم خدمات اکوسیستم و ارتباط آن‌ها با تاب‌آوری را در نظر گرفت. علاوه بر این، نرم‌افزار InVEST به عنوان ابزاری خاص برای مدل‌سازی ارزش‌گذاری خدمات اکوسیستم معرفی شد و به کاربرد بالقوه آن در ارزیابی تاب‌آوری اشاره کوتاهی شد. روش‌های به کار گرفته شده در این مرور بر مقایسه و ارزیابی مدل‌های شناسایی‌شده متمرکز بود. این ارزیابی، عملکرد و کارایی هر نوع مدل را در زمینه تغییرات و تهدیدات مختلف محیطی در نظر گرفت. مقایسه بر اساس چندین معیار انجام شد، از جمله مبنای نظری یا تجربی ساختار مدل، انعطاف‌پذیری، پیچیدگی، دقت، توانایی پیش‌بینی شرایط جدید، نیازمندی‌های داده‌ای، قابلیت کاربرد در موقعیت‌های مختلف، زمان توسعه و هزینه توسعه. این مرور همچنین شامل تحلیل یک مطالعه موردی بود که از نرم‌افزار InVEST برای ارزیابی تاب‌آوری یک اکوسیستم تالابی با استفاده از یکپارچه‌سازی داده‌های تولید آب و پوشش گیاهی استفاده کرد. این رویکرد روش‌شناختی امکان مقایسه‌ای ساختاریافته از پارادایم‌های مختلف مدل‌سازی و بررسی کاربردهای عملی آن‌ها در مدیریت محیط‌زیست را فراهم کرد.

جدول (۱) تعریف‌ها و مفاهیم (نگارنده، ۱۴۰۳)

عنوان	پژوهشگر/سال	تعریف
تاب‌آوری	Holling (1973, 1986)	میزان اختلالی که یک سیستم می‌تواند به‌صورت پایدار قبل از تغییر در کنترل یا ساختار آن تحمل کند.
آسیب‌پذیری	Williams LRR, Kapustka LA. (2000)	برآوردی از ناتوانی یک اکوسیستم برای تحمل استرس‌های بیش از توان ظرفیت زموان و مکان است.
پایداری[1]	Harrison(1979)	پایداری به توانایی اکوسیستم در حفظ ساختار و عملکرد خود در مواجهه با تغییرات و اختلالات اشاره و پایداری بازگشت پذیری (Resistance Stability) دارد. پایداری می‌تواند به دو صورت پایداری مقاومت (Resilience Stability) اندازه گیری شود.
پادشکنندگی	Taleb (2012)	پادشکنندگی قابلیت بهبود سیستم در موقعیت‌های خطر و اختلال است. در این حالت نه تنها هیچ اختلالی قادر به واردکردن آسیب به سیستم نیست، بلکه در چنین شرایطی سیستم رشد می‌کند.

1. Stability

یافته‌های پژوهش

- **تاب‌آوری مهندسی (Engineering Resilience)**

تاب‌آوری مهندسی به توانایی یکی سیستم برای بازگشت سریع به حالت اولیه پس از اختلال اشاره دارد. این نوع تاب‌آوری بیشتر بر سرعت بازیابی و بازگشت به حالت تعادل تمرکز دارد. در این رویکرد، تاب‌آوری به عنوان فاصله زمانی و سرعت بازگشت سیستم به حالت پایدار اولیه اندازه گیری می‌شود.

الف) سرعت بازگشت به حالت اولیه مهم ترین معیار است
ب) فرض می‌شود که یک حالت تعادل پایدار وجود دارد که سیستم به آن باز نمی گردد.
ج) بیشتر در زمینه‌های مهندسی و فیزیکی مورد استفاده قرار می‌گیرد.
مثال: بازگشت سریع یک رودخانه به سطح آب و کیفیت اولیه پس از سیلاب

- **تاب‌آوری بوم شناختی (Ecological Resilience)**

تاب‌آوری اکولوژیکی به ظرفیت یک اکوسیستم برای جذب تغییرات و اختلالات بدون تغییر اساسی در ساختار و عملکرد آن اشاره دارد. این نوع تاب‌آوری بر توانایی سیستم برای حفظ چندین حالت تعادل پایدار و مقاومت در برابر تغییرات بزرگ‌تر تمرکز دارد.

الف) انعطاف پذیری و توانایی سیستم برای حفظ کارکردها و خدمات اکوسیستمی
ب) امکان وجود حالت‌های تعادل چندگانه و تغییر بین آن‌ها
ج) تاکید بر پایداری و دوام بلند مدت اکوسیستم
مثال: یک جنگل که پس از آتش سوزی می‌تواند با بازسازی گیاهان و حیات وحش خود، به تعادل جدیدی دست یابد.

- **تاب‌آوری اجتماعی-بوم شناختی (Social-Ecological Resilience)**

تاب‌آوری اجتماعی- اکولوژیکی تعامل بین انسان‌ها و اکوسیستم را در نظر می‌گیرد و به توانایی سیستم‌های ترکیبی برای سازگاری، بازسازی و تعبیر در مواجهه با فشارها و شوک‌ها می‌پردازد. این رویکرد به ارتباطات پیچیده و پویا بین جوامع انسانی و محیط زیست طبیعی توجه دارد
الف) تاکید بر تعاملات و وابستگی‌های متقابل بین جوامع انسانی و اکوسیستم‌ها
ب) توانایی سیستم‌های اجتماعی-بوم شناختی برای سازگاری و تحول در مواجهه با تغییرات
ج) در نظر گرفتن عوامل اجتماعی، اقتصادی و فرهنگی در کنار عوامل اکولوژیکی
مثال : یک جامعه ساحلی که با استفاده از مدیریت پایدار منابع ماهیگیری و بهبود زیر ساخت‌ها و توانایی خود را برای مقابله با تغییرات اقلیمی و افزایش سطح دریاها تقویت می‌کند.

- **زمان بازگشت (Recovery Time)**

به مدت زمان لازم برای بازگشت یک اکوسیستم به وضعیت تعادل اولیه پس از وقوع یک اختلال یا شوک اشاره دارد. به عنوان مثال پس از آتشسوزی جنگلی، مدت زمانی که طول می‌کشد تا پوشش گیاهی و جمعیت حیوانات به حالت اولیه بازگردند، می‌تواند به عنوان زمان بازگشت اندازه گیری می‌شود. کوتاه تر بودن بازگشت نشان دهنده تاب‌آوری بالاتر اکوسیستم است.

- **پایداری (Stability)**

پایداری به توانایی اکوسیستم در حفظ ساختار و عملکرد خود در مواجهه با تغییرات و اختلالات اشاره دارد. پایداری می‌تواند به

صورت پایداری مقاومت (Resilience Stability) اندازه گیری شود. برای مثال یک تالاب که می‌تواند سطح آب و جمعیت گونه‌ها را بدون تغییرات بزرگ در مواجهه با خشکسالی حفظ کند. نشان دهنده پایداری مقاومت بالایی است که یک جنگل پس از قطع درختان می‌تواند به سرعت به وضعیت اولیه بازگردد، دارای پایداری بازگشت پذیری بالاست. پایداری بالا نشان دهنده توانایی اکوسیستم در مقابله با تغییرات و حفظ عملکردهای حیاتی است.

- تنوع زیستی (Biodiversity)

تنوع زیستی شامل تنوع گونه‌ها، تنوع ژنتیکی و تنوع اکوسیستمی است. تنوع زیستی بالا معمولا با تاب‌آوری بیشتر اکوسیستم مرتبط است. برای مثال یک جنگل با تعداد زیادی گونه‌های گیاهی و جانوری مختلف نسبت به یک جنگل تک گونه ای، تاب‌آوری بیشتر در مواجهه با بیماری‌ها و تغییرات محیطی دارد. تنوع زیستی بالا می‌تواند باعث افزایش قابلیت تطبیق و بازگشت اکوسیستم در مواجه با اختلالات شود.

- بهره‌روی اولیه خالص (Net Primary Productivity-NPP)

بهره‌وری اولیه خالص به مقدار زیست توده تولید شده توسط گیاهان در اکوسیستم پس از کسر مقدار تنفس گیاهان اشاره دارد. میزان زیست توده تولید شده در یک سال در جنگل بارانی نسبت به یک دشت خشک، می‌تواند به‌عنوان شاخصی از تاب‌آوری اکوسیستم مقایسه شود. بهره‌وری بالا نشان دهنده سلامت و تولید بالای اکوسیستم است که می‌تواند به تاب‌آوری بیشتر منجر شود.

- شاخص‌های خدمات اکوسیستمی (Ecosystem Services Indices)

این شاخص‌ها عملکردهای مختلف اکوسیستم مانند تنظیم اب، تصفیه هواف تنوع زیستی، و تولید منابع غذایی را اندازه گیری می‌کنند. ارزیابی کیفیت آب در یک رودخانه و توانایی آن در تصفیه آلودگی‌ها می‌تواند به عنوان یک شاخص خدمات اکوسیستمی مورد استفاده قرار گیرد. ارائه خدمات اکوسیستمی پایدار نشان دهنده یک اکوسیستم تاب آور است که می‌تواند نیازهای انسانی و محیطی را در مواجهه با تغییرات برآورده کند.

- شاخص‌های سلامت خاک (Soil Health Indices)

این شاخص‌ها شامل معیارهایی مانند محتوای مواد آلی، تراکم زیستی خاک، و فعالیت میکروبی می‌شوند. اندازه گیری محتوای مواد آلی و فعالیت میکروبی در خاک‌های کشاورزی به عنوان شاخصی از سلامت و تاب‌آوری خاک می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. سلامت خاک بالا نشان دهنده توانایی خاک در حمایت از پوشش گیاهی و دیگر عملکردهای اکوسیستمی است.

- مدل‌های نظری

مدل‌های نظری بر اساس اصول و مفاهیم بنیادی بوم شناختی و ریاضیاتی ساخته می‌شوند و روابط بین متغییرهای مختلف در اکوسیستم را شبیه سازی می‌کنند. از ویژگی‌های این مدل قابلیت شبیه سازی سناریوهای مختلف و همچنین بر اساس تئوری‌ها و فرضیات علمی است. از نقاط قوت این مدل میتوان به انعطاف پذیری بالا در تغییر فرضیات و پارامترها و همچنین ارائه درک عمیق تر از فرایندهای اکوسیستمی نام برد. همچنین، از نقاط ضعف این مدل می‌تواند به نیاز به داده‌های دقیق برای تنظیم و اعتبارسنجی و همچنین پیچیدگی و زمان بر بودن فرایند توسعه نام برد.

- مدل‌های آماری و داده محور

مدل‌های اماری براساس تحلیل داده‌های تجربی و مشاهده ای ساخته می‌شوند و از روش‌های آماری برای شناسایی الگوها و روابط

بین متغییرها استفاده می‌کنند. این مدل‌ها بر پایه داده‌های واقعی و مشاهده ای می‌باشد و استفاده از تکنیک‌های آماری مانند رگرسیون و تحلیل مولفه‌های اصلی ازویژگی‌های این مدل‌هاست. مدل‌های رگرسیون چند متغییره که رابطه بین تنوع زیستی و عوامل محیطی را تحلیل می‌کنند از جمله نقاط قوت این مدل‌ها استفاده از داده‌های واقعی که منجر به نتایج معتبر می‌شود و همچنین سرعت و سادگی در تحلیل و تفسیر داده‌ها می‌باشد. نقاط ضعف این مدل وابستگی به کیفیت و کمیت داده‌های موجود و همچنین محدودیت در پیش بینی شرایط جدید است.

- مدل‌های عامل محور (مبتنی بر عامل)

مدل‌های عامل مبنا بر تعاملات بین عوامل مستقل (مانند گونه‌ها، انسان‌ها یا واحدهای اکوسیستمی) تمرکز دارند و رفتار کل سیستم را از طریق شبیه سازی رفتارهای فردی این عوامل تحلیل می‌کنند. از ویژگی‌های شبیه سازی رفتارهای فردی و تعاملات بین عوامل و قابلیت مدل سازی سیستم‌های پیچیده و ناهمگن می‌باشد. نقاط ضعف این مدل‌ها نیاز به داده‌های دقیق برای پارامترسازی و همچنین پیچیدگی در توسعه و تحلیل مدل‌ها می‌باشد.

- مدل‌های ترکیبی

مدل‌های ترکیبی، ترکیبی از رویکردهای مختلف (نظری، آماری و عامل مبنا) را به کار می‌گیرد تا از نقاط قوت هریک استفاده کنند و نقاط ضعف آن‌ها را کاهش دهند. از ویژگی‌های این مدل می‌توان به ترکیب رویکردهای نظری، آماری و عامل مبنا و نیز استفاده از بهترین ویژگی هر رویکرد می‌باشد. برای مثال مدلی که از داده‌های آماری برای تنظیم پارامترهای مدل نظری استفاده می‌کند و سپس تعاملات عوامل را شبیه سازی می‌کند.

- رابطه تاب‌آوری و خدمات اکوسیستمی

تاب‌آوری در زمینه خدمات اکوسیستم، به ظرفیت اساسی یک اکوسیستم برای حفظ خدمات مطلوب اکوسیستم در مواجهه با نوسانات محیطزیستی و بهره‌برداری انسان اطلاق می‌شود (Folke et al., 2004). خدمات اکوسیستمی، فرایندهای طبیعی است که انسان برای بقا و رفاه خود به آن وابسته است (Mcdonald, 2009). مزایایی که انسان از طبیعت استخراج می‌کند به عنوان خدمات اکوسیستمی شناخته می‌شود. آن‌ها را می‌توان به چهار دسته تقسیم کرد (TEEB, 2011). در جدول (۲) تقسیم‌بندی خدمات اکوسیستمی به همراه توضیحات آورده شده است.

جدول (۲) تقسیم‌بندی خدمات اکوسیستمی (یوسف‌زاده و همکاران، ۱۳۹۶)

خدمات تامین	خدمات تنظیم	خدمات حمایتی	خدمات فرهنگی
غذا، آب تازه، مواد اولیه و گیاهان دارویی	تنظیم کیفیت هوا و اقلیم محلی، تجزیه و ذخیرهسازی کربن، تعدیل رویدادهای خیلی شدید، تصفیه هرز آب، جلوگیری از فرسایش و حفظ حاصلخیزی خاک، گردهافشانی و کنترل بیولوژیکی	زیستگاه مناسب برای گونه‌ها، حمایت از تنوع ژنتیکی	تفریح و سرگرمی و سلامت ذهنی و جسمی، توریسم، کاربردها زیباییشناسی و الهام گرفتن برای فرهنگ و هنر و طراحی، ارزش معنوی و فرصتهای آموزشی است

- **مقایسه مدل‌ها**

جدول (۳) مقایسه مدل‌های مرتبط با تاب‌آوری (نگارنده)

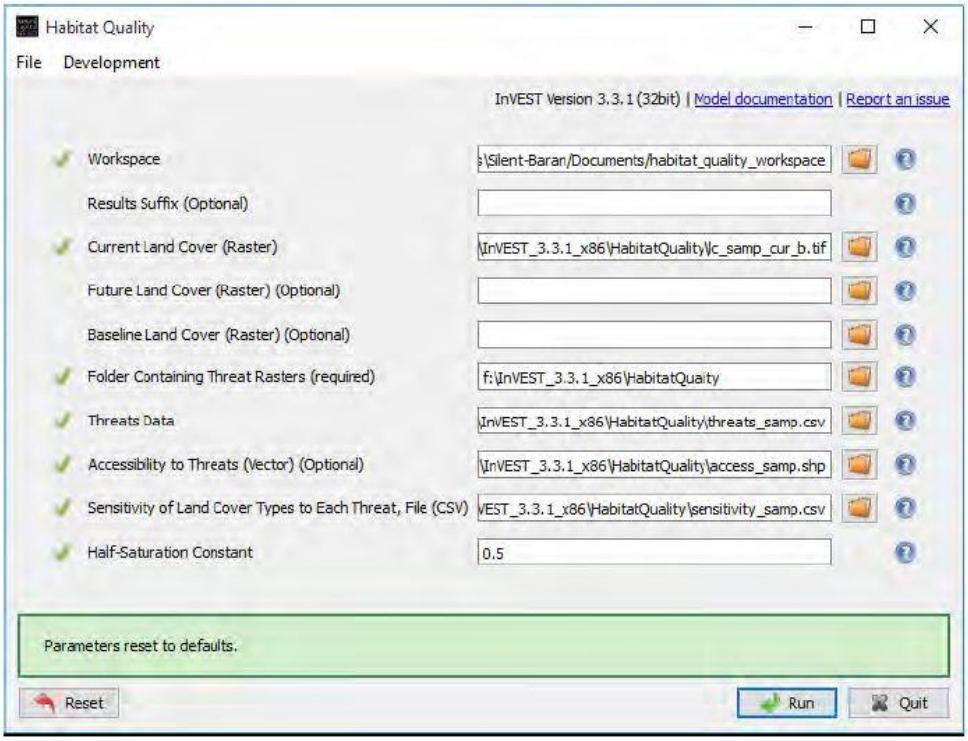
جنبه	مدل‌های نظری (Theoretical Models)	مدل‌های آماری (Statistical Models)	مدل‌های عامل مبنا (Agent-Based Models)	مدل‌های ترکیبی (Hybrid Models)
مبنای ساختار	اصول و مفاهیم تئوریک	داده‌های تجربی و مشاهده ای	تعاملات بین عوامل مستقل	ترکیب رویکردهای مختلف
انعطاف پذیری	بالا (قابلیت شبیه سازی سناریوهای مختلف)	نسبتا پایین (محدود به داده‌های موجود)	بالا (قابلیت شبیه سازی رفتارهای نوظهور)	بسیار بالا (استفاده از ویژگی‌های مختلف)
پیچیدگی	پیچیده و زمان بر	ساده تر و سریع تر	پیچیده و نیازمند محاسبات زیاد	بسیار پیچیده و نیازمند تخصص‌های مختلف
دقت و جزئیات	بالا (ارائه درک عمیق تر از فرایندهای اکوسیستمی)	وابسته به کیفیت و کمیت داده‌ها	بالا(شبیه سازی تعاملات پیچیده)	بسیار بالا (ترکیب دقت و جزئیات رویکردهای مختلف)
پیش بینی شرایط جدید	امکان پذیر(با تغییر فرضیات و پارامترها)	محدود (وابستگی به داده‌های گذشته)	اماکن پذیر (شبیه سازی رفتارهای نوظهور)	بسیار اماکن پذیر(ترکیب مدل‌های مختلف)
نیاز به داده‌ها	نیاز به داده‌های دقیق برای تنظیم اعتبارسنجی	نیاز به داده‌های گسترده و معتبر برای تحلیل	نیازه به داده‌های دقیق برای پارامترسازی	نیاز به داده‌های دقیق و گسترده برای تنظیم و ترکیب
کاربرد شرایط واقعی	مناسب برای شرایط با داده‌های محدود	مناسب برای شرایط با داده‌های فراوان	مناسب برای سیستم‌های پیچیده و ناهمگن	مناسب برای تحلیل جامع و چندجانبه
زمان توسعه	طولانی (به دلیل پیچیدگی در توسعه مدل‌ها)	کوتاه تر (به دلیل سادگی نسبی)	طولانی (به دلیل پیچیدگی در شبیه سازی عوامل)	بسیار طولانی (به دلیل ترکیب و هماهنگی مدل‌ها)
هزینه توسعه	بالا(به دلیل نیاز به تخصص‌های مختلف و زمان زیاد)	پایین تر (به دلیل سادگی نسبی و داده محور)	بالا(به دلیل نیاز به محاسبات و داده‌های دقیق)	بسیار بالا (به دلیل نیاز به ترکیب و هماهنگی)
نرم افزار	نرم افزار MATLAB	نرم افزار R	نرم افزار Netlogo	نرم افزار AnyLogic

- **معرفی نرم‌افزار اینوست(InVEST) به منظور مدل‌سازی تاب‌آوری**

یکی از ابزارهای نقشه‌سازی کالا و خدمات اکوسیستم، ابزار یکپارچه ارزش‌گذاری خدمات اکوسیستم و همکنشی میان خدمات، InVEST است که توسط پروژه سرمایه طبیعی توسعه‌یافته است (اسداللهی و دیگران، ۱۳۹۵). ابزار InVEST شامل مجموعه‌ای از مدل‌های مجزاست که هر یک به بررسی و تحلیل الگوی مکانی خدمات اکوسیستم و تغییرات آنها با توجه به تغییر کاربری /پوشش اراضی می‌پردازد. InVEST برای نقشه‌سازی خدمات زیستگاهی، به مدلسازی کیفیت زیستگاه می‌پردازد و فرض بر این است که نواحی با کیفیت زیستگاه بالاتر سطوح مختلف تنوع زیستی را بهتر حمایت خواهد کرد (شارپ، ۲۰۱۴).

- **مطالعه موردی و کاربردها**

اگرچه نرم‌افزار اینوست به صورت مستقیم برای محاسبه تاب‌آوری به کار نمی‌رود ولی می‌توان با ترکیب مدل‌هایی مانند مدل تولید آب با شاخص‌های پوشش گیاهی و سایر شاخص‌های اکولوژیکی میزان تاب‌آوری بوم‌سیستم‌ها و سازندهای اکولوژیکی را کمی و مدل کرد. برای مثال می‌توان به پایان نامه نوریان (۱۴۰۱) که در زمینه « ارزیابی تاب‌آوری تالاب‌ها در مناطق خشک و نیمه‌خشک با کاربرد مدلسازی خدمات اکوسیستمی (مطالعه موردی: تالاب پریشان)» اشاره کرد.



تصویر (۱) نمایی از مدل کیفیت زیستگاه در ابزارInVEST -

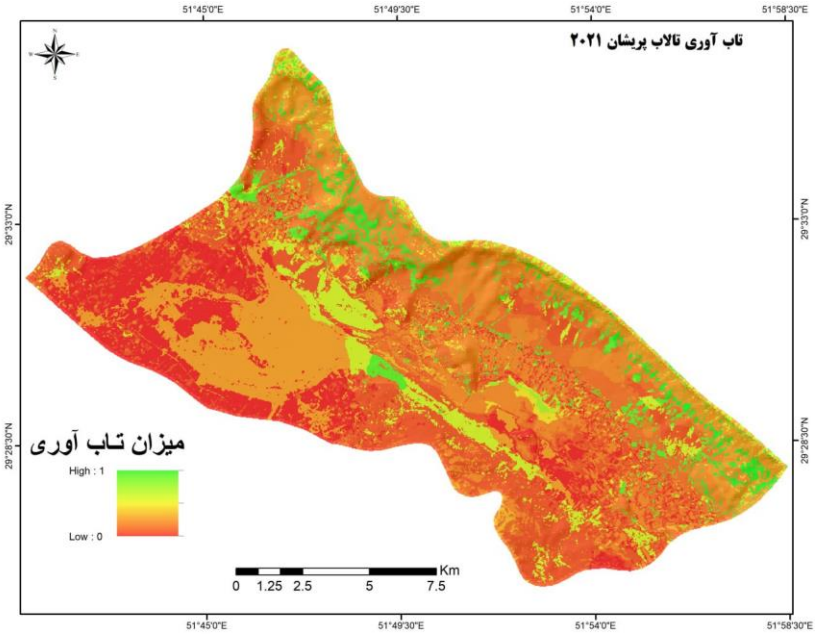
با استفاده از روش پیشنهادی این پژوهش که خروجی مورد نظر از مراحل قبلی یعنی مدلسازی خدمات اکوسیستمی است؛ می‌توان میزان تاب‌آوری را به طریق زیر محاسبه کرد:

نقشه استانداردسازی شده پوشش گیاهی × نقشه استاندارد خدمات اکوسیستمی (تولید آب) = میزان تاب‌آوری

با توجه به ماهیت و هدف این مطالعه، جداول مربوط به روش پیشنهادی کمی‌سازی پهنه‌های تاب‌آوری مناطق اکولوژیکی (تالاب‌ها) در مناطق خشک و نیمه‌خشک بر اساس منابع اطلاعاتی و با بومی‌سازی برای تاب‌آوری اکولوژیک منطقه مذکور براساس نظریات کارشناسان محیط‌زیست گردآوری شده‌اند.

جدول (۴) تفسیر استانداردسازی نقشه پهنه‌بندی تاب‌آوری اکولوژیک (تالاب پریشان)
(روش پیشنهادی نگارندگان: نوریان و ملک‌محمدی، ۱۴۰۱)

نام طبقه	رتبه	شرح
تاب‌آور	۱- ۰/۸	سیستم توانایی نسبتا کاملی برای بازگشت به حالت تعادل پس از یک اختلال موقتی را تامین می‌کند. سیستم باثبات‌تر و پایدار است.
نسبتاً تاب‌آور	۰/۸ -۰/۶	سیستم توانایی بالایی برای بازگشت به حالت تعادل پس از یک اختلال موقتی را تامین می‌کند. سیستم نسبتا باثبات‌تر و پایدار است.
تاب‌آوری متوسط	۰/۶ -۰/۴	سیستم توانایی متوسطی برای بازگشت به حالت تعادل پس از یک اختلال موقتی را تامین می‌کند. سیستم دارای ثبات و پایداری متوسطی است.
تاب‌آوری کم	۰/۴ -۰/۲	سیستم توانایی کمی برای بازگشت به حالت تعادل پس از یک اختلال موقتی را تامین می‌کند. سیستم دارای ثبات و پایداری کمی است.
ناتاب‌آوری (آسیب‌پذیر)	۰/۲-۰	سیستم توانایی بازگشت به حالت تعادل پس از یک اختلال موقتی را ندارد. سیستم ثبات و پایداری ندارد و کاملا آسیب‌پذیر است.



تصویر (۲) نقشه استانداردسازی شده شاخص تاب‌آوری تالاب پریشان در سال ۲۰۲۱ (نوریان، ۱۴۰۱)

بحث و نتیجه‌گیری

مدل سازی تاب‌آوری اکوسیستم‌ها اهمیت بالایی در فهم و مدیریت تنوع زیستی و پایداری محیط زیست دارد. هر یک از مدل‌های نظری، آماری، عامل مبنا و ترکیبی دارای نقاط قوت و ضعف خاص خود هستند که انتخاب مناسب ترین مدل به هدف، نوع داده‌ها و پیچیدگی اکوسیستم مورد مطالعه بستگی دارد. برای مثال مدل‌های نظری به عنوان پایه و اساس سایر مدل‌ها، نقش مهمی در درک مفاهیم و فرآیندهای تاب‌آوری اکوسیستم ایفا می‌کنند. این مدل‌ها با ارائه چارچوب‌های تئوریک، امکان بررسی روابط پیچیده بین اجزای مختلف اکوسیستم و شناسایی عوامل موثر بر تاب‌آوری را فراهم می‌کنند. با این حال، استفاده از این مدل‌ها به تنهایی برای پیش‌بینی و مدیریت تاب‌آوری اکوسیستم کافی نیست و نیاز به ترکیب آن‌ها با سایر مدل‌های تجربی و محاسباتی وجود دارد. مدل‌های آماری با ارائه روش‌های کمی برای تحلیل داده‌های تجربی، امکان ارزیابی و پیش‌بینی تاب‌آوری اکوسیستم را فراهم می‌کنند. این مدل‌ها برای شرایطی که داده‌های فراوان و معتبر در دسترس است، بسیار مفید هستند. با این حال، محدودیت این مدل‌ها در شبیه‌سازی رفتارهای نوظهور و پیچیده اکوسیستم است و نیاز به ترکیب آن‌ها با مدل‌های عامل مبنا و ترکیبی وجود دارد. مدل‌های عامل مبنا و ترکیبی با ارائه روش‌های محاسباتی برای شبیه‌سازی تعاملات بین اجزای مختلف اکوسیستم، امکان بررسی پویایی‌های پیچیده و غیرخطی تاب‌آوری را فراهم می‌کنند. این مدل‌ها برای شرایطی که نیاز به شبیه‌سازی رفتارهای نوظهور و پیش‌بینی سناریوهای مختلف وجود دارد، بسیار مناسب هستند. با این حال، پیچیدگی و زمان‌بر بودن توسعه این مدل‌ها از معایب آن‌ها است و نیاز به تخصص‌های مختلف و داده‌های دقیق و گسترده وجود دارد. در نهایت، انتخاب مدل مناسب برای مطالعه تاب‌آوری اکوسیستم به اهداف پژوهش، نوع اکوسیستم مورد مطالعه و دسترسی به داده‌ها بستگی دارد. در بسیاری از موارد، استفاده از ترکیبی از مدل‌های مختلف می‌تواند نتایج دقیق‌تر و جامع‌تری ارائه دهد. برای مثال، می‌توان از مدل‌های نظری برای ارائه چارچوب‌های مفهومی، از مدل‌های آماری برای تحلیل داده‌های تجربی و از مدل‌های عامل مبنا و ترکیبی برای شبیه‌سازی پویایی‌های پیچیده اکوسیستم استفاده کرد. همچنین، استفاده از نرم‌افزارهای مختلف مانند AnyLogic، Netlogo، R و MATLAB می‌تواند در توسعه و اجرای مدل‌های تاب‌آوری اکوسیستم مفید باشد.

با توجه به مزایا و معایب هر مدل، مدل‌های ترکیبی به عنوان بهترین گزینه برای مدلسازی تاب‌آوری اکوسیستم پیشنهاد می‌شوند. این مدل با ترکیب رویکردهای نظری، آماری و عامل مبنا می‌توانند دقت و جامعیت بیشتری در تحلیل و پیش‌بینی تاب‌آوری اکوسیستم‌ها فراهم کنند. اگرچه توسعه این مدل‌ها پیچیده و هزینه بر است، اما مزایای آن‌ها در ارائه نتایج دقیق و کاربردی،

ارزش سرمایه‌گذاری را دارد. به طور خاص، در شرایطی که داده‌های کافی و متنوع در دسترس است و هدف تحلیل جامع و دقیق تاب‌آوری اکوسیستم می‌باشد، استفاده از مدل‌های ترکیبی می‌تواند بهترین انتخاب باشد. این مدل قابلیت انعطاف‌پذیری بالایی دارند و می‌توانند به درک بهتر و مدیریت موثرتر اکوسیستم کمک کنند.

منابع

اسدالهی، زهرا، سلمان ماهینی، عبدالرسول (۱۳۹۵). بررسی اثر تغییر کاربری اراضی بر عرضه خدمات اکوسیستم (ذخیره و ترسیب کربن). پژوهش‌های محیط زیست، ۲۰۳-۲۱۴.

نوریان، محمد مهدی (۱۴۰۱). *ارزیابی تاب‌آوری تالاب‌ها در مناطق خشک و نیمه‌خشک با کاربرد مدلسازی خدمات اکوسیستمی (مطالعه موردی: تالاب پریشان)*. پایان‌نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه تهران. دانشکده محیط زیست.

Taleb, N. N. (2014). Antifragile: Things that gain from disorder (Vol. 3). Random House Trade Paperbacks.

Williams, LRR, Kapustka LA. (2000). "Ecosystem vulnerability: a complex interface with technical components", Environ Toxicol Chem; 19:1055-8.

Dou, Z., Stefanovski, D., Galligan, D., Lindem, M., Rozin, P., Chen, T., & Chao, A. M. (2021). Household food dynamics and food system resilience amid the COVID-19 pandemic: A cross-national comparison of China and the United States. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, *4*, 577153.

Chao, W. (2021, June). Research on sponge city planning based on resilient city concept. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Vol. 793, No. 1, p. 012011). IOP Publishing.

Folke, C.; Carpenter, S.; Walker, B.; Scheffer, M.; Elmqvist, T.; Gunderson, L. & Holling, C. S. 2004. Regime shifts, resilience, and biodiversity in ecosystem management. Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics, 557–581.

Holling, C. S. (1973). Resilience and stability of ecological systems.

Mcdonald, R. I. 2009. Ecosystem service demand and supply along the urban-to-rural gradient. Journal of Conservation Planning, 5, 1–14.

Harrison, G. W. (1979). Stability under environmental stress: resistance, resilience, persistence, and variability. *The American Naturalist*, *113*(5), 659-669.

Sharp, R., Chaplin-Kramer, R., Wood, S., Guerry, A., Tallis, H and Taylor, R. 2014 InVEST User's Guide: Integrated Valuation of Environmental Services and Tradeoffs (Stanford, CA: The Natural Capital Project) p 321.

Teeb, 2011. TEEB manual for cities: Ecosystem services in urban management. The Economics of ecosystems and biodiversity (TEEB).