

معرفی روشی جهت ارزیابی و پایش «سلامت اکوسیستم» با به‌کارگیری فناوری سنجش از دور

نادیا عباس زاده تهرانی

دکترای برنامه ریزی محیط زیست، استادیار پژوهشگاه هوا فضا، وزارت علوم، تحقیقات و فناوری

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۰۳/۲۰؛ تاریخ تصویب: ۱۳۹۴/۱۲/۰۹)

چکیده

گسترش آثار منفی فعالیت‌های انسانی و در نتیجه از بین رفتن بخش عمده‌ای از ساختار و عملکرد اکوسیستم‌های مهم در سراسر جهان، از مهمترین مباحث محیط‌زیستی قرن حاضر محسوب می‌شود که ضرورت ارزیابی و کنترل روندهای مخرب مذکور را نمایان می‌سازد. ارزیابی و پایش سلامت اکوسیستم به معنای بررسی مستمر عملکرد کلی سیستم شامل: نظارت بر وضعیت پایایی و پایداری ساختار و عملکرد و فرایندها و میزان قدرت بازگشت پذیری آن پس از بروز آشفتگی و تنش است. سلامت اکوسیستم همواره با تدوین شاخص‌هایی کمی و بررسی تغییرات آنها در طول زمان پایش می‌شود. به نظر می‌رسد پتانسیل‌های موجود در فناوری سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی و تلفیق آنها توانایی ایجاد داده‌های فضایی (با تواتر بالای زمانی، مکانی و طیفی و غیره) می‌تواند در تدقیق و بهبود شاخص‌های به کار رفته در پایش و ارزیابی سلامت اکوسیستم مفید باشد. بنابراین، تحقیق حاضر به بررسی و امکان‌سنجی ایجاد یک روش نوین جهت پایش و ارزیابی سلامت اکوسیستم با تکیه بر شاخص‌های مکانمند حاصل از فناوری سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی پرداخته است. نتایج تحقیق نشان می‌دهد که از میان شاخص‌های سنجش از دوری ارزیابی سلامت و پایداری اکوسیستم‌ها، نقشه پوشش گیاهی با تواتر زمانی مناسب و شاخص‌های گیاهی مانند LAI و NDVI بیشترین نقش را در برآورد سلامت اکوسیستم ایفا می‌نمایند. این تحقیق، به‌کارگیری متریک‌های منظر و تنوع زیستی، همچنین تلفیق شاخص‌های غیر سنجش از دوری (مانند برآورد فشار محیط‌زیستی در مقایسه با ظرفیت برد منطقه) با شاخص‌های عنوان شده را جهت برآورد دقیق‌تر سلامت اکوسیستم پیشنهاد می‌نماید.

کلید واژه ها: سلامت اکوسیستم، سنجش از دور، شاخص، توان، ساختار، تاب آوری

سرآغاز

پایدار و پویاست، سازمان و استقلال خود و نسبت بین تنش (استرس) و تاب آوری (تاب آوری) خود را حفظ می‌کند. مفهوم «سلامت جمعیت انسانی» باید در یک چارچوب اکولوژیکی به‌عنوان یک تفسیر از ظرفیت پشتیبانی حیات توسط محیط‌زیست در نظر گرفته شود. در نتیجه، سلامت جمعیت یک ملاک مهم برای پایداری محسوب می‌شود؛ چیزی که در طول زمان نشان می‌دهد که آیا به طور رضایت بخشی حیطه‌های اکولوژیکی و اجتماعی را پایدار ساخته‌ایم یا خیر؟

سیستم‌های پشتیبان حیات بیوسفر، شامل سیستم‌های خشکی و آبی تولید غذا، تالاب‌ها که کیفیت آب را حفظ می‌کنند، محدودیت‌های اکولوژیکی وارد بر عوامل بیماری‌های عفونی و ناقلان آنها و بافرینگ (یا ضربه‌گیری) در مقابل بلایای طبیعی (مانند: سیلاب‌ها، طوفان‌ها و زمین‌لغزش و غیره) می‌باشند که توسط جنگل‌های حفاظت‌شده و خطوط ساحلی آرایه می‌شود. اگر تغییرات محیط‌زیستی بزرگ‌مقیاس مانند: تغییرات اقلیمی، تخریب سرزمین و ازدست‌دادن تنوع‌زیستی اتفاق بیافتد، باید انتظار کاهش ظرفیت پشتیبان حیات بیوسفر را داشته باشیم.

در نهایت، به نظر می‌رسد پتانسیل‌های موجود در فناوری سنجش‌از‌دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی و تلفیق آنها (توانایی ایجاد داده‌های فضایی با تواتر بالای زمانی، مکانی و طیفی) می‌تواند در تدقیق و بهبود شاخص‌های بکار رفته در پایش و ارزیابی سلامت اکوسیستم مفید باشد. بنابراین، تحقیق حاضر به بررسی و امکان‌سنجی ایجاد یک روش نوین جهت پایش و ارزیابی سلامت اکوسیستم با تکیه بر به‌کارگیری شاخص‌های فضایی حاصل از فناوری سنجش‌از‌دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی می‌پردازد.

سلامت اکوسیستم

ایده سلامت اکوسیستم در دهه ۸۰ میلادی، به ادبیات محیط‌زیست وارد شد. سلامت اکوسیستم برای اولین بار به صورت مقابل تعریف شد: «سیستم اکولوژیکی که سالم و عاری از سندرم زجر^(۳) است؛ اگر ایستا و پایدار باشد». با تکامل دانش اکولوژی، ایده سلامت اکوسیستم به مفهومی جامع شامل اکولوژی، اقتصاد و جمعیت بسط یافت. ایده سلامت اکوسیستم سه فاز تکمیلی مشخص را پشت سر گذاشته است (Su et al., 2010).

گسترش آثار منفی فعالیت‌های انسانی و در نتیجه از بین رفتن بخش عمده‌ای از ساختار و عملکرد اکوسیستم‌های مهم در سطح جهان، از مهمترین مباحث محیط‌زیستی قرن حاضر محسوب می‌شود. امروزه، شواهد بسیاری مبتنی بر وجود مقادیر بالای استرس در بیشتر اکوسیستم‌های تحت سلطه انسان و از دست رفتن تدریجی کارایی آنها وجود دارد. خدمات فراهم شده توسط این اکوسیستم‌ها برای رفاه زندگی انسانی بسیار مهم هستند. از آن جایی که اکوسیستم‌های تحت تنش، شدیداً تخریب شده و تنزل کیفیت پیدا می‌کنند، قابلیت فراهم کردن خدماتی که قبل از بروز تنش و آشفتگی آرایه می‌کردند را از دست می‌دهند. بنابراین، توانایی محیط‌زیست در پایدار ساختن فعالیت‌های اقتصادی و سلامت انسان‌ها به تدریج کاهش می‌یابد. اکوسیستم‌ها در نتیجه تداوم فشار، به طور تدریجی دچار فروافت و تخریب می‌شوند؛ مگر آن که انسان‌ها استراتژی‌هایی پیشگیرانه و بازیابی‌کننده، جهت حصول به سلامت و یکپارچگی اکوسیستم‌ها اتخاذ نمایند.

در این راستا، ارزیابی و پایش سلامت اکوسیستم، به‌معنای بررسی مستمر عملکرد کلی سیستم، شامل: نظارت بر وضعیت پایایی و پایداری ساختار و عملکرد و فرایندها و میزان قدرت بازگشت‌پذیری آن پس از بروز آشفتگی‌ها و استرس‌ها می‌باشد. سلامت اکوسیستم همواره با تدوین شاخص‌هایی کمی و بررسی تغییرات آنها در طول زمان، پایش می‌شود.

به طور کلی، ایده «سلامت» برای نمایش سرزندگی افراد و اخیراً برای جمعیت‌ها (انسان‌ها، حیوانات اهلی و حیات‌وحش) به‌کار می‌رود. بسط موضوع سلامت به اکوسیستم‌ها، در پاسخ به شواهد جمع‌آوری شده از ناکارآمدی بسیار اکوسیستم‌های تحت غلبه انسان، صورت گرفته‌است. گسترش ایده سلامت به سطوح منطقه‌ای (اکوسیستم‌ها، حوضه‌های آبریز، حوضه‌های آبخیز و سیمای سرزمین) فرصت‌های جدیدی را جهت تلفیق علوم اجتماعی، طبیعی و بهداشتی، فراهم می‌آورد. تعریف سلامت اکوسیستم با اکولوژی تنش^(۱) مرتبط است که سلامت را براساس ساختار سیستم، برگشت‌پذیری (تاب آوری) و قدرت^(۲) آن و عدم وجود علایم پریشانی در اکوسیستم تعریف می‌کند. این تعریف همچنین شامل وجود فعالیت‌های اساسی و ویژگی‌های کلیدی است که سیستم حیات را پایدار می‌سازد. یک اکوسیستم سالم،

- در فاز اول به ویژگی‌های خود اکوسیستم توجه شده‌است.
- سپس به خدماتی که به انسان‌ها می‌دهند
- در نهایت، ویژگی‌های اکوسیستم و خدمات آن برای انسان‌ها

جدول (۱): تاریخچه تکامل ایده سلامت اکوسیستم

زمان	رخداد
<۱۹۰۰	Hutton در سال ۱۷۸۸ برای اولین بار ایده سلامت طبیعی را مطرح کرد: کره زمین به عنوان یک ابر ارگانسیم خود تنظیم.
۱۹۰۰-۱۹۳۹	Clements & weaver در سال ۱۹۲۹ معرفی اکوسیستم به مثابه یک موجود زنده با ویژگی‌های سالم و ناسالم: فرضیه‌های توالی جامعه و کلیماکس (نقطه اوج).
۱۹۴۰-۱۹۶۹	Leopold در سال ۱۹۴۱ اولین بار «سلامت سرزمین» را مطرح کرد. و «بیماری سرزمین» را برای توصیف اختلال عملکرد سرزمین بکار برد. همچنین، ایده «سلامت لنداسکیپ» را مطرح کرد: به صورت ظرفیت سرزمین جهت احیای خودش.
۱۹۷۰-۱۹۷۹	Woodwell در سال ۱۹۷۰ تاثیر تنش‌های آلودگی را بر روی ساختار و عملکرد اکوسیستم مورد بررسی قرار داد.
	Barret در سال ۱۹۷۶ اهمیت مقوله «اکولوژی استرس» را مطرح نمود.
	Odum در سال ۱۹۷۹ مبحث اکولوژی سیستمی را ارتقا داد: اکوسیستم‌هایی که «خود تنظیم هستند» و «بازخورد دارند»، که می‌توانند پس از بروز استرس خود را احیا کنند، نیاز به دخالت مدیریتی ندارند.
	Rapport و همکاران در سال ۱۹۷۹، تیوری «سلامت سرزمین» لیوپولد را توسعه داد و واژه «پزشکی اکوسیستم» را به عنوان روشی برای ارزیابی اکوسیستم به روشی یکپارچه مطرح نمود.
۱۹۸۰-۱۹۸۹	انجمن اکولوژی آمریکا، سمپوزیومی را بنام «روش‌های یکپارچه نمایش و مدیریت اکوسیستم‌های تحت تنش» در کنفرانس سالانه ۱۹۸۴ برگزار کرد.
	Rapport و همکارانش در سال ۱۹۸۵: اکوسیستم نمی‌تواند به عنوان موجود در نظر گرفته شود و نمی‌تواند تحت نامالیمات به طور مستقل پاسخ دهد.
	اکولوژیست‌هایی مانند کاستانزا و راپورت بیان کردند که اکوسیستم‌ها تحت استرس ناکارآمد می‌شوند و نمی‌توانند خدمات پایه و ضروری را برای انسان‌ها فراهم کنند. آنها مبحث سلامت اکوسیستم را مطرح و توجه عموم را به تخریب محیط زیست جلب نمودند.
	سازمان جهانی بهداشت (WHO) پروژه «شهرهای سالم» را بنا نهاد.
	Schaeffer و همکاران در سال ۱۹۸۸، محاسبه سلامت اکوسیستم را مدنظر قرار داد و اصول ارزیابی و روش‌های آن را مطرح نمود.
	در سال ۱۹۸۹، Rapport سلامت اکوسیستم را به صورت «ایستایی» و «پایداری» سیستم توضیح داد که می‌تواند توسط توان تولید، ساختار و تاب آوری، نشان داده شود.
	انجمن مدیریت سلامت اکوسیستم آبی در کانادا ایجاد شد.
ادامه دارد - ۱۹۹۰	Rapport در سال ۱۹۹۲، ایده schaeffer به عنوان «نبود بیماری»، به سوی یک «سندرم جامع زجر اکوسیستم» را توسعه داد. در این زمان موضوع «سلامت» به طور گسترده‌ای توسط دانشگاهیان و محققان مطالعه می‌شد.
	ژورنال‌های مختلف علمی در مورد سلامت اکوسیستم ایجاد شدند.
	Shear در سال ۱۹۹۶، ارزیابی اکوسیستم آبی منطقه Great Lakes را انجام داد.
	چندین کتاب مهم (به ویژه توسط راپورت) در فاصله سال‌های ۱۹۹۵ تا ۲۰۰۴، در زمینه سلامت اکوسیستم ایجاد شد.
	Gue و همکارانش در سال ۲۰۰۲، بر روی سلامت اکوسیستم شهری در چین مطالعه کردند.

منبع جدول: (Su et al., 2010)

۱. وجود قابلیت هموستازی (خود تنظیمی) ۲. عدم وجود بیماری
 ۳. وجود تنوع و پیچیدگی . حفظ پایایی و تاب آوری (برگشت پذیری) ۵. توان یا حوزه عمل برای رشد و تولید ۶. تعادل میان اجزای سیستم. کاستانزا تاکید می‌کند که وجود همه یا بیشتر این ویژگی‌ها به طور همزمان ضرورت دارد؛ در نتیجه او یک

راپورت و همکارانش، وظایف اکوسیستم را متشکل از دو بخش در نظر گرفته‌اند: برآورده ساختن نیازهای منطقی انسان‌ها و در عین حال حفظ سازمان خودش (Rapport et al., 1998). بنا به نظر کاستانزا، در یک اکوسیستم سالم، موارد زیر برقرار است (Wang et al., 2008).

اندکس (نمایه) کلی سلامت سیستم را ارایه کرده است:

$$HI = V * O * R$$

در این فرمول، V برابر با توان تولید (عملکرد)، O برابر با شاخص ساختار سیستم و R برابر با شاخص تاب آوری است. با ارایه این نمایه، کاستانزا مهمترین و کلیدی ترین خواص اکوسیستم را جهت پوشش دادن به مفهوم سلامت اکوسیستم به کار برده است (Jørgensen et al., 2005).

Kay از واژه شادابی اکوسیستم^(۴) - اشاره به توانایی یک اکوسیستم در حفظ سازمان خود- استفاده می کند. بنابراین میزان یا مقیاس یکپارچگی، باید منعکس کننده دو جنبه از وضعیت سازمانی یک اکوسیستم باشند: یعنی ساختار و عملکرد. عملکرد، شامل فعالیت‌های کلی اکوسیستم است و ساختار، ارتباطات داخلی میان اجزای سیستم می‌باشد. مقیاس‌های عملکرد، میزان انرژی کسب شده توسط سیستم را نشان می‌دهد. مقیاس‌های ساختار، نشان دهنده مسیری که اکسرژی سرتاسر سیستم حرکت می‌کند، می‌باشد. بنابراین، میزان اکسرژی ذخیره شده در سیستم می‌تواند یک نمایانه منطقی برای ساختار باشد. سلامت اکوسیستم می‌تواند با اندازه‌گیری برگشت‌پذیری (تاب آوری) هنگام بروز تنش خارجی، توان تولید (عملکرد) و سازمان (ساختار) آن ارزیابی شود.

توان تولید: بر اساس فعالیت، متابولیسم و توان تولید اولیه اندازه گیری می‌شود. یک مثال از کاهش توان تولید در حوزه آبریز Great Lakes در شمال امریکا، کاهش تعداد آبریان و کاهش حاصلخیزی خاک کشاورزی درون این حوزه آبریز است.

سازمان^(۵): می‌تواند در قالب تنوع و تعداد تعاملات میان مولفه‌های سیستم، ارزیابی شود. یک مثال خوب از حوزه آبریز Great Lakes، کاهش تنوع ریختی و عملکردی آبریان به دلیل وجود استرس‌های چندگانه است.

رزلیانس (تاب آوری)^(۶): (ظرفیت خنثی‌کنندگی): بر اساس ظرفیت و توان سیستم در حفظ ساختار و عملکردش در حضور استرس، اندازه گیری می‌شود. وقتی از تاب آوری سیستم تجاوز شود، سیستم می‌تواند به وضعیت جایگزین^(۸) دیگری وارد شود. یک مثال خوب، تغییر از آبریان کفزی به پلاژیک غالب در حوزه آبریز Great Lakes است. حال این سوال پیش می‌آید که چگونه می‌توانیم تعریفی کاربردی از سلامت اکوسیستم ارایه دهیم که با امکانات برابر، در سیستم‌های پیچیده و در تمامی مقیاس‌ها قابل به کارگیری باشد؟

نخست آن که، تعریف مناسب و درخور از سلامت اکوسیستم، باید ایده سلامت را که در بالا به آن اشاره شد، تلفیق کند. به ویژه باید مقیاسی ترکیبی از تاب آوری سیستم، امید به زندگی، تعادل، ساختار (تنوع) و تولید (متابولیسم) باشد. دوم، تعریف باید توصیف جامع از سیستم باشد. توجه به فقط یک بخش از سیستم به بقیه قسمت‌ها وزن صفر می‌دهد. سوم، تعریف نیاز به به کارگیری فاکتور وزن‌دهی دارد تا مولفه‌های مختلف سیستم را بتوان با هم مقایسه و تلفیق کرد. باید وزن دهی به کار رود برای مولفه‌هایی که به وابستگی عملکردی پایداری سیستم بر مولفه‌ها، مرتبط هستند و وزن‌ها باید با تغییر سیستم، تغییر کنند تا بتوانند تعادل را در نظر بگیرند و چهارم، تعریف باید سلسله مراتبی باشد تا بتواند تعامل مقیاس‌های مختلف زمانی و مکانی را نشان دهد. بنا به نظر کاستانزا و همکارانش، یک سیستم اکولوژیکی زمانی سالم و عاری از سندرم دیسترس (زجر) است که ایستا و پایدار است- یعنی فعال است و ساختار و خودگردانی^(۷) و تاب آورش را نسبت به تنش در طول زمان حفظ می‌کند (Costanza et al., 1992). بنابراین، سلامت اکوسیستم بطور نزدیکی مرتبط با ایده پایداری است که معیاری جامع، چندمقیاسی و پویا برای تاب آوری، ساختار و توان سیستم است. جهت سالم و پایدار بودن، یک سیستم باید سطح فعالیت متابولیک خود و همچنین ساختار داخلی و سازماندهی خود را حفظ کند (تنوع فرایندها بطور مؤثری به همدیگر مرتبط هستند). همچنین، باید در مقابل تنش‌های بیرونی- در طول یک چارچوب زمانی و مکانی معمول در سیستم- قابلیت برگشت‌پذیری خود را حفظ کند. در عمل این مفهوم به چه معناست؟

جدول (۱)، سه مولفه اصلی این ایده پیشنهادی برای سلامت اکوسیستم (تاب آوری، سازمان و قدرت) را به همراه مفاهیم و معیارهای مرتبط در رشته‌های گوناگون نشان می‌دهد.

سه مولفه اساسی سلامت اکوسیستم

توان (Vigor) یک اکوسیستم، معیاری از فعالیت، متابولیسم یا قدرت باروری آن است. برای مثال، تولید ناخالص اولیه در سیستم‌های اکولوژیکی و تولید ناخالص ملی در سیستم‌های اقتصادی. فرض بر این است که توانایی یک سیستم جهت بهبود یافتن از یک استرس، به متابولیسم کلی، جریان انرژی (Odum, 1971) و یا «چشم انداز رشد آن»^(۸) (Bayne, 1987) وابسته

می‌توان گفت یک سیستم سالم، می‌تواند تنوع موثر گونه‌ها و مسیرهای تبدیلی را ایجاد کند. در حالی که، ریداندنسی (افزونگی) و تاب‌آوری (برگشت‌پذیری) خود را به عنوان بیمه‌ای در مقابل استرس و توانایی قابل ملاحظه جهت بازیابی سریع یا به‌کارگیری استرس در جهت مثبت، حفظ می‌نماید.

تجارب و تحقیقات پیشین

در طول دهه گذشته، پیشرفت‌های بسیاری در حیطه شناخت سلامت اکوسیستم صورت گرفته‌است که می‌توان به مطالعات ارزشمند (Waltner-Toews, 1996; Bertollo, 2001; Muñoz-Erickson et al., 2007; Bunch et al., 2008; Waltner-Toews et al., 2008; Wiegand et al., 2010) اشاره نمود. اگرچه که کاربردهای عملی این ایده، محدودتر بوده است. در هر حال، مطالعات کاربردی بسیاری وجود دارند که از روش‌های دیگری استفاده می‌کنند که در آنها تعدادی از اصول رهیافت اکوسیستمی به کار می‌رود. همچنین، شاخص‌های متعددی برای سلامت اکوسیستم در نظر گرفته شده‌اند و در آنها، هر سه جنبه «قدرت»، «سازمان» و «تاب‌آوری» به اشکال مختلفی به عنوان مقیاس‌های سلامت اکوسیستم مطرح شده‌اند. مانند: مطالعات (Schaeffer et al., 1988; Jørgensen, 1992; Havens, 1994; Callicott, 1995; Levins, 1995; Xu, 1997; Su et al., 2010).

Jørgensen (1995 a,b) اکسرژی، اکسرژی ساختاری و ظرفیت‌های بافری اکولوژیکی را به عنوان شاخص‌های اندازه‌گیری سلامت اکوسیستم معرفی کرده‌است. Xu (1997) از اندکس تنوع، اندکس وضعیت تروفیک، اکسرژی و اکسرژی ساختاری و ظرفیت بافری فیتوپلانکتون بعنوان ظرفیت اکولوژیکی ارزیابی سلامت اکوسیستم در دریاچه Chao که دریاچه ای کم عمق و اوتروفیک در چین است استفاده کرد.

(Mageau et al., 1998) اشاره می‌کند که «توان تولید» بطور کاربردی می‌تواند توسط «بهره‌وری یا حاصلخیزی» و یا از طریق انرژی و ماده سیستم اندازه‌گیری شود. «ساختار» می‌تواند توسط تنوع اجزاء و درجه ارتباط دو طرفه‌اشان ارزیابی شود. تاب‌آوری نیز می‌تواند توسط توانایی سیستم در حفظ ساختار و الگوهای رفتاری آن در هنگام استرس و تنش محاسبه گردد (Holling, 1986).

در مطالعه LU و همکاران ۲۰۰۳، توان تولید توسط مقادیر نسبی طول شاخه‌های جدید، ساختار توسط میانگین مقادیر نسبی

است که برابر با اختلاف میان انرژی مورد نیاز جهت نگهداری سیستم و انرژی در دسترس سیستم، برای تمامی منظورها می‌باشد. هر یک از این معیارها، در توانایی‌های سیستم جهت پاسخ‌گویی به تنش‌های کلی دیده شده‌است.

سازماندهی یک سیستم، به تعداد و تنوع تعاملات میان مولفه‌های سیستم‌اشاره دارد. معیارهای سازماندهی تحت تاثیر تنوع گونه‌ای و تعداد مسیرهای تبادل ماده بین اجزا قرار دارد. برای مثال، مشخصه یک سیستم بسیار سازمان‌یافته، تنوع بالای اجزای تخصصی و مسیرهای تخصصی تبادل مرتبط با آنهاست. با کاهش تنوع گونه‌ای و کاهش درجه تخصصی بودن مسیرهای تبادل، سازماندهی کاهش می‌یابد. درک این مساله مهم است که برای هر سطح تنوع گونه‌ای، سازماندهی می‌تواند با توجه به الگوی مسیرهای تبادل میان آنها تغییر کند.

سیستمی که دارای گونه‌هایی است که فقط از یک یا دو نوع گونه خاص تغذیه می‌کنند و در عوض آنها هم صید یک یا دو گونه دیگر می‌شوند، نسبت به سیستمی که همان تعداد تغذیه کننده عمومی با مسیرهای چندگانه تبادل بین آنها دارد، میزان سازماندهی بیشتری دارد. بنابراین سازماندهی بسط معیار قدیمی «تنوع» است که الگوهای تبادل میان اجزای سازمان را نیز در نظر می‌گیرد.

تاب‌آوری یا برگشت‌پذیری یک سیستم، به توانایی سیستم در حفظ ساختار و الگوهای رفتاری‌اش هنگام بروز استرس اشاره دارد (Holling, 1986). در این مطالعه، منظور از تاب‌آوری، توانایی سیستم در حفظ توان و سازماندهی‌اش هنگام استرس می‌باشد.

یک سیستم سالم، سیستمی است که از تاب‌آوری کافی هنگام بروز آشفتگی‌های کوچک مقیاس مختلف برخوردار است.

ایده تاب‌آوری سیستم دو مؤلفه اصلی دارد: یک جنبه مهم که به طور گسترده‌ای استفاده می‌شود، اشاره دارد به طول مدت زمانی که طول می‌کشد تا یک سیستم از استرس بازیابی شود؛ جنبه دیگر به شدت استرسی که سیستم می‌تواند تحمل کند و یا آستانه مشخص سیستم برای جذب استرس‌های مختلف، مربوط است. نکته‌ای که باید مورد توجه قرار گیرد، این است که وضعیت سیستم هنگامی که استرس از آستانه‌ها گذر می‌کند، می‌تواند از «سقوط کامل سیستم» تا وارد شدن به «وضعیت ایستای دیگر» (که شرایط مطلوب‌تری را با توجه به استرس موجود برای سیستم فراهم می‌کند)، متفاوت باشد. در واقع،

(Kerr & Ostrovsky, 2003).

پیشرفت‌های مناسب در توسعه تیوری‌های سنجش از دور و داده‌ها و فناوری آن در طول ۳۵ سال گذشته، موجب ایجاد روش‌های کلی و مناسبی جهت جمع‌آوری داده از پهنه‌های بسیار وسیع شده است که برای بسیاری از ویژگی‌های اکولوژیکی می‌تواند برآوردهای قابل اطمینان بیشتری را نسبت به روش‌های پیمایش زمینی، ایجاد کند (Davis & Roberts, 2000).

داده‌های سنجش از دوری، در مطالعات اکولوژیکی در وهله اول جهت مشخص کردن پوشش گیاهی، توصیف ساختار زیستگاه و اندازه‌گیری خواص بیوفیزیکی استفاده می‌شوند. توانایی متغیرهای سنجش از دوری در عمل، به عنوان جایگزین خواص مهم اکولوژیکی (مانند تنوع زیستی، بهره‌وری) تابعی از نزدیکی ارتباط میان تابش اندازه‌گیری شده و متغیرهای محیط‌زیستی مورد نظر می‌باشد. متغیرهای «وضعیت» آنهایی هستند که می‌توانند به طور مستقیم توسط تابش امواج الکترومغناطیسی اندازه‌گیری شوند. مانند: اندکس سطح برگ و یا بیوماس (Curran, 2001; Curran et al., 1998). در حالی که، اغلب متغیرهای محیط‌زیستی وجود دارند که به طور غیرمستقیم با اندازه‌گیری‌های واقعی تابش مرتبط هستند. مانند: تنوع زیستی و بهره‌وری که مورد توجه اکولوژیست‌ها می‌باشند. طیف گسترده‌ای از گزینه‌ها برای انتخاب به منظور بهره‌گیری از ارتباطات شناخته شده ما بین مقادیر داده‌های نوری / مایکروویو و خواص بیوفیزیکی پدیده‌های اکولوژیکی وجود دارد.

مروری بر شاخص‌های سنجش از دوری سلامت اکوسیستم

با بررسی مطالعات انجام شده و نتایج تحقیقات، به نظر می‌رسد: تلفیق نتایج به صورت یک رهیافت یکپارچه می‌تواند در انتخاب شاخص‌های نهایی سلامت اکوسیستم با تکیه بر شاخص‌های سنجش از دوری، راهگشا باشد.

در جدول (۲)، نتایج مطالعات در مورد شاخص‌های سنجش از دوری و غیر سنجش از دوری مولفه‌های سلامت اکوسیستم ارائه شده است.

براین اساس، مولفه‌های اصلی سلامت اکوسیستم در اکثر مطالعات، توان تولید، سازمان و تاب‌آوری در نظر گرفته شده است. در مورد مولفه «توان تولید» که در ادبیات موضوع به صورت: فعالیت، متابولیسم و توان تولید اولیه تعریف شده است،

ارتفاع گیاه، قطر زمین و دامنه تاج و تاب‌آوری توسط ظرفیت سیستم در مواجهه با استرس و بازگشت به وضعیت اولیه پس از خاتمه استرس در نظر گرفته شده است (Pimm, 1984; Holling, 1986). این ویژگی توسط ظرفیت سیستم در بازگشت بعد از یک تلاطم و تنش اندازه‌گیری می‌شود. در این مطالعه نور خورشید به وفور وجود دارد و عامل محدودکننده رشد در شرایط استرس، آب است. بنابراین، هنگامی که شاخص‌های تاب‌آوری در نظر گرفته می‌شوند، مقادیر رطوبت متناسب آشیان اکولوژیکی (نیچ) به عنوان شاخص تاب‌آوری در نظر گرفته شده است.

ارتباطی تنگاتنگ و نزدیکی میان سلامت اکوسیستم و خدمات اکوسیستم وجود دارد. خدمات اکوسیستم عملکردهایی است که برای جوامع انسانی سودمندی دارد. مانند: سم‌زدایی مواد شیمیایی، پالایش آب، تولید گونه‌های مورد استفاده جهت تغذیه انسان و غیره. استرس و تنش به طور معمول هم‌کمیت و هم‌کیفیت این خدمات را کاهش می‌دهد. برعکس، اکوسیستم‌های سالم، دامنه کاملی از خدمات اکوسیستمی را ارائه می‌کنند. در مدیریت پایدار اکوسیستم‌ها و جهت حصول به شاخص‌های پایداری، می‌توان وضعیت خدمات اکوسیستمی را به عنوان شرایط آرمانی در نظر گرفت و هدف را حصول به آنها از طریق پایش و مدیریت فعال اکوسیستم قرار داد.

شاخص‌های سنجش از دوری سلامت اکوسیستم

مطالعات اخیر نشان داده که مشکلات اکولوژیکی مانند: از دست دادن تنوع زیستی گرفته تا تغییرات کاربری اراضی، از پیشرفت فناوری‌های زمین-مکانی مانند GIS و سنجش از دور، هم در فراهم نمودن داده و هم در دسترسی به ابزارهای آنالیز داده‌های مکان دار، منفعت بسیار برده است. تلفیق سنجش از دور و GIS برای نقشه‌سازی و پایش اکولوژیکی اگرچه در مطالعات گذشته اشاره شده است (Estes, 1993; Stoms & Goodchild, 1994; Franklin, 1995) اما همچنان روز به روز با بحرانی‌تر شدن مشکلات اکولوژیکی، بیش از پیش اهمیت پیدا می‌کنند (EPA, 1998).

در مرور منابعی که اخیراً در مورد کاربردهای سنجش از دور در تحقیقات اکولوژیکی انجام شده است، سه حیطة کاربرد عمده خاطر نشان شده است: طبقه‌بندی کاربری اراضی، اندازه‌گیری‌های تلفیقی اکوسیستم و آشکارسازی تغییرات چند زمانه

۱. شاخص‌های تنوع‌زیستی (مانند: شانون) ۲. تغییرات بیوماس+ شاخص وضعیت تغذیه ۳. ارتفاع گیاه، ساختار و دامنه تاج ۴. تغییرات کاربری اراضی ۵. تغییر شدت استفاده از زمین ۶. تغییرات رطوبت ۷. تراکم پوشش

در حالی که شاخص‌های سنجش ازدوری پیشنهاد شده در مطالعات به طور کلی شامل موارد زیر می باشند:

۱. شاخص NDVI جهت اندازه‌گیری بیوماس، درصد پوشش، تراکم ساقه، سلامت توده سرپا و تنوع‌زیستی
۲. پوشش اراضی طبقه‌بندی شده حاصل از تصاویر ماهواره‌ای به همراه DEM
۳. آشکارسازی تغییرات پوشش به روش تسلدکپ جهت نقشه‌سازی تاج پوشش گیاهی
۴. شاخص سطح برگ LAI
۵. انحراف استاندارد حداکثر NDVI ماهانه (بررسی ساختار و ترکیب گونه‌ای)

۶. DEM (مدل رقمی ارتفاعی زمین) جهت استخراج و Topographic Wetness Index, Stream Power Index Sediment Transport Index (اندکس‌هایی که جهت بررسی وضعیت رطوبت و رسوبگذاری و فرسایش پهنه به کار می‌رود و از طریق نقشه DEM قابل محاسبه می باشند).

بهترین تعریف از مولفه «تاب آوری» به صورت: توانایی سیستم در حفظ ساختار و عملکردش هنگام بروز استرس و تنش، ارایه شده است. ویژگی‌هایی از اکوسیستم که نشان دهنده آن هستند، عبارتند از:

۱. پایداری عملکرد و ساختار سیستم ۲. یکپارچه بودن سیستم و تکه تکه نشدن آن ۳. نشانه‌های تنش اولیه: کاهش نرخ تولید، کاهش نرخ تجزیه، از دست دادن مواد مغذی و نشانه‌های تنش پیشرفته: تغییرات ساختاری، شیفت در ترکیب گونه‌ای ۴. عدم وجود «سندرم زجر اکوسیستم» که با پایش (تغییر در اندازه یا طیف جامعه، غنای گونه‌ای، میزان گونه‌های مهاجم یا مقاوم، بیماری، ایستایی و درجه تجمع زیستی مواد آلاینده) اندازه‌گیری می شود.

شاخص‌های غیرسنجش از دوری معرفی شده در مطالعات مختلف جهت پایش تاب آوری عبارتند از:

۱. نسبت (MS/RT) به معنای: حداکثر تنش قابل تحمل برای سیستم تقسیم بر زمان احیا یا ریکاوری (مدت زمان بازگشت

ویژگی اکوسیستم مرتبط با آن که بر سلامت اکوسیستم تاثیرگذار است، به طور کلی به صورت چهار ویژگی معرفی شده است:

۱. میزان بهره‌وری یا حاصلخیزی ۲. میزان کل انرژی ورودی به سیستم ۳. اختلاف میان انرژی در دسترس و انرژی لازم برای نگهداری سیستم یا اختلاف انرژی ورودی به خروجی ۴. نسبت تبخیر- تعرق واقعی و بالقوه.

شاخص‌های غیر سنجش از دوری که جهت برآورد تولید در مطالعات گذشته در نظر گرفته شده است، عبارتند از:

۱. میزان تولید ناخالص اولیه (ماده یا انرژی ورودی به سیستم) (GPP)
۲. میزان تولید خالص اولیه (ماده یا انرژی در دسترس برای اکوسیستم) (NPP)
۳. میزان انرژی (نوعی از اکسرژی که تبدیل به یک نوع انرژی (مثلا نور خورشید) می‌شود و به کیفیت انرژی توجه دارد.
۴. میزان اکسرژی (اختلاف میان انرژی در دسترس و انرژی لازم برای نگهداری سیستم. [انرژی ورودی- انرژی خروجی (انترپی) = اکسرژی]

و شاخص‌های سنجش از دوری برآورد «توان تولید» به صورت زیر خلاصه شده‌اند:

۱. به‌کارگیری تصاویر ماهواره‌ای و استخراج و پردازش NDVI^(۹) (جهت بررسی تولید ناخالص اولیه)
۲. به‌کارگیری و پردازش NDVI به همراه داده‌های مدل رقمی ارتفاع (DEM)

۳. به‌کارگیری داده‌های NDVI به همراه دمای سطح زمین ویژگی‌هایی در سیستم که مرتبط با مولفه «ساختار» (که به صورت: تنوع اجزا و تعاملات میان مولفه‌های سیستم تعریف شده است) می‌باشند، عبارتند از:

۱. تنوع ریختی و عملکردی اجزا، تنوع‌زیستی (تنوع گونه‌ای)
۲. تغییر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی (در پهنه‌های آبی مانند سطح آب، دما، کدورت، رسوب‌گذاری و در کف دریا: ترکیب بستر، درجه لجن‌گیری، جمعیت بازمانده)
۳. تبادل ماده و انرژی بیشتر در ساختارهای پیچیده تر
۴. تمایل به درونی کردن یا بازیافت زایدات خود در ساختارهای پیچیده و منسجم‌تر

مهمترین شاخص‌های غیرسنجش از دوری ارایه شده حاصل از مطالعات گوناگون پیشین، عبارتند از:

۳. انحراف معیار پج (جهت نشان دادن ناهمگونی منظر)
 ۴. ضریب تغییرات اندازه پج (جهت نشان دادن تغییرپذیری نسبی سراسر منظر).
 علاوه بر موارد مذکور، شاخص سلامت اکوسیستم جامع، مطالعه و تلفیق شاخص‌های اکولوژیکی (کیفیت منابع آب، خاک، هوا، تنوع زیستی، تولید محصول) و شاخص‌های اجتماعی (جمعیت، اشتغال، درآمد) و شاخص‌های تعاملی حاصل تعاملات اکولوژیکی و اجتماعی (کاربری زمین، تصمیمات مدیریتی و ترجیحات اجتماعی) را به طور هم زمان جهت حصول به دید جامع از سلامت اکوسیستم، پیشنهاد می‌نماید.

سیستم به وضعیت اولیه) ۲. کاهش نرخ تولید/ تنفس (نشانه اختلال در عملکرد سیستم) ۳. شاخص‌های تکه تکه شدگی زیستگاه مانند (متریک‌های سیمای سرزمین: ترکیب، ارتباط، منزوی شدن، اندازه، آرایش) ۴. عوامل محدودکننده محیطی مانند نور، رطوبت (Lu et al., 2003) ۵. تغییرات آلودگی‌ها ۶. تغییرات اندازه موجودات (افزایش استرس موجب شیفیت به سمت افراد کوچک‌تر می‌شود) و شاخص‌های سنجش از دوری معرفی شده در مطالعات گوناگون عبارتند از:

۱. بررسی و پایش NDVI دوره‌ای ۲. محاسبه متریک‌های منظر و تکه‌تکه (پهرو) شدگی شامل: متریک‌های انزوا، فاصله، تراکم، تعداد و نوع پج، غنای نوع پج، میانگین اندازه پج

جدول (۲): شاخص‌های مهم سلامت اکوسیستم پیشنهاد شده در مطالعات مختلف

مؤلفه سلامت	تعریف	خصوصیت اکوسیستم مرتبط با سلامت	شاخص غیر سنجش از دوری	شاخص سنجش از دوری و GIS
توان تولید	فعالیت - متابولیسم - توان تولید اولیه (Mageau et al. 1995)	بهره‌وری یا حاصلخیزی میزان کل انرژی ورودی به سیستم	GPP ^(۱۰) (Mageau et al. 1995) NPP ^(۱۱) (Mageau et al. 1995) (Wulder, 1998) امرزی ^(۱۲) (Zeng et al., 2010) اکسرزی ^(۱۳) (Xu et al. 2012)	NDVI جهت بررسی تولید ناخالص اولیه (Friedle et al. 1994) Ramsey et al., 1995) NDVI + دمای سطح زمین (Running, 1990) DEM ^(۱۴) (مستخرج از تصاویر سنجش از دوری یا نقشه): محاسبه Solar radiation
ساختار	تنوع اجزا و تعاملات میان مؤلفه‌های سیستم (Mageau et al. 1995)	تنوع ریختی و عملکردی اجزا - تنوع زیستی (تنوع گونه ای)	مهمترین: شاخص تنوع زیستی (مانند: شانون) تراکم پوشش تغییرات بیوماس + شاخص وضعیت تغذیه ارتفاع گیاه، ساختار و دامنه تاج (Lu et al., 2003) تغییرات کاربری اراضی	NDVI (اندازه گیری بیوماس، درصد پوشش، تراکم ساقه، سلامت توده سرپا و تنوع زیستی) (Kerr & Ostrovsky, 2003; Alpine, 2005; Seto et al. 2004) پوشش اراضی طبقه بندی شده + DEM (Luoto et al., 2002b; Storms & Estes, 1993) آشکار سازی تغییرات پوشش به روش تسلدکپ جهت نقشه سازی تاج پوشش گیاهی (Cohen & Florella, 1998) شاخص سطح برگ LAI (Wulder, 1998)

ادامه جدول (۲): شاخص‌های مهم سلامت اکوسیستم پیشنهاد شده در مطالعات مختلف

مؤلفه سلامت	تعریف	خصوصیت اکوسیستم مرتبط با سلامت	شاخص غیر سنجش از دوری	شاخص سنجش از دوری و GIS
		تغییر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی (در پهنه‌های آبی مانند سطح آب، دما، کدورت، رسوب گذاری و در کف دریا: ترکیب بستر، درجه لجن‌گیری، جمعیت بازمانده) ساختارهای پیچیده‌تر، تبادل ماده و انرژی بیشتری دارند. ساختارهای پیچیده و منسجم‌تر، تمایل به درونی کردن یا بازیافت زایدات خود دارند.	تغییر شدت استفاده از زمین تغییرات رطوبت	انحراف استاندارد حداکثر NDVI ماهانه (بررسی ساختار و ترکیب گونه ای) نقشه پوشش گیاهی + DEM (Trescino et al., 2001) DEM (مدل رقمی ارتفاعی زمین) جهت استخراج: Topographic Wetness Index Stream Power Index ^(۱۵) Sediment Transport Index
تاب آوری	توانایی سیستم در حفظ ساختار و عملکردش هنگام بروز استرس و تنش (Holling, 1986)	پایداری عملکرد و ساختار سیستم یکپارچه بودن سیستم و تکه تکه نشدن آن نشانه‌های تنش اولیه: کاهش نرخ تولید، کاهش نرخ تجزیه، از دست دادن مواد مغذی عدم وجود سندرم زجر اکوسیستم که با پایش (تغییر در اندازه یا طیف جامعه، غنای گونه ای، میزان گونه‌های مهاجم یا مقاوم، بیماری، ایستایی و درجه تجمع زیستی مواد آلاینده) اندازه گیری می‌شود (Rapport et al., 1985)	نسبت MS/RT ^(۱۶) کاهش نرخ تولید/ تنفس (نشانه اختلال در عملکرد سیستم) شاخص‌های تکه تکه شدگی زیستگاه. مانند (متریک‌های سیمای سرزمین: ترکیب، ارتباط منزوی شدن، اندازه، آرایش) (Karr, 1991) عوامل محدودکننده محیطی مانند نور، رطوبت (Lu et al., 2003) تغییرات اندازه موجودات ^(۱۷) تغییرات آلودگی ها	NDVI دوره ای (جهت نشان دادن تغییرپذیری نسبی سراسر منظر) (Mc Gorigal, 2002) متریک‌های منظر و تکه تکه شدگی: متریک‌های: انزوا، فاصله پیچ ها، لبه، تعداد پیچ، غنای نوع پیچ، تراکم پیچ، میانگین اندازه پیچ، انحراف معیار پیچ (جهت نشان دادن ناهمگونی منظر) ضریب تغییرات اندازه پیچ

منبع: (تهرانی، ۱۳۹۳)

روش پژوهش

در این تحقیق، با بررسی مطالعات پیشین درخصوص شاخص‌ها و مؤلفه‌های سلامت اکوسیستم و از طرفی دیگر بررسی مطالعات انجام شده در مورد توانایی‌های فناوری سنجش از دور در پایش این شاخص‌ها و به‌کارگیری تجارب و نظر کارشناسی، چارچوبی مناسب جهت تلفیق فناوری مذکور در مطالعات سلامت اکوسیستم معرفی شده است. همان‌طور که عنوان شد، سلامت

اکوسیستم به‌طور کلی به معنای پایدار نگه داشتن یکپارچگی ساختار و عملکرد اکوسیستم - و خدمات مرتبط با آنها- می‌باشد. شاخص‌های سلامت اکوسیستم در واقع باید دور یا نزدیک شدن به سمت پایداری را اندازه بگیرند (McMullan, 1997). یک اکوسیستم سالم، یک واحد اجتماعی- اکولوژیکی است که «پایدار و با ثبات» است. بدان معنا که ساختار و برگشت‌پذیری خود را در مقابل تنش‌ها در طول زمان حفظ کرده و در حالی که

یافته‌ها

در این تحقیق، با به‌کارگیری نتایج حاصل از مطالعات پیشین و همچنین پتانسیل‌های فناوری سنجش از دور و GIS در پایش سلامت اکوسیستم‌ها، شاخص‌های سلامت اکوسیستم با معرفی شاخص‌های سنجش از دوری موثر، در جدول (۳) معرفی شده‌اند. با به‌کارگیری چارچوب «فشار-وضعیت-اثر-پاسخ» (PSIR)، در بخش فشار، عوامل محرک اولیه یا ایجادکننده فشار در نظر گرفته شده‌اند که در اکوسیستم‌های پسرخته، از مهمترین این عوامل، افزایش میزان جمعیت و متعاقب آن مصرف مواد و انرژی مرتبط با آنها و دستکاری عظیم در شکل زمین و پوشش اراضی و کاربری ناحیه و وارد آوردن فشار جمعیتی به صورت مصرف منابع و انتشار زایدات بیش از ظرفیت تحمل اکوسیستم می‌باشد که در قالب شاخص‌های سنجش از دوری: اندکس بیابان‌زایی (مناطق تحت خطر بیابان‌زایی) و درصد مناطق تخریب‌شده به کل ناحیه و شاخص‌های غیر سنجش از دوری مکانمند: تراکم ناخالص جمعیت، جای پای اکولوژیک (هکتار سرانه سرزمین مورد نیاز جهت برآورد مصارف جمعیت ساکن در محلی خاص) و میزان فشار محیط‌زیستی وارد بر منطقه در مقایسه با ظرفیت برد آن (حداکثر جمعیت یا فشار حاصل از آنها که توسط یک اکوسیستم به طور پایدار تحمل می‌شود)، به تصویر کشیده می‌شود.

در بخش «وضعیت اکوسیستم» دو مولفه «توان تولید» و «ساختار»، با توجه به لزوم پرداختن به آنها در بررسی مطالعات قبلی، مد نظر قرار گرفته است. در مورد مولفه «توان تولید»، در بخش شاخص‌های سنجش از دوری، شاخص تولید ناخالص اولیه (GPP) و درصد پوشش گیاهی با توجه به ویژگی‌هایی که جهت انتخاب شاخص‌ها در گزارش ذکر شده است، در نظر گرفته شده‌اند که داده‌ها و اطلاعات مورد نیاز جهت برآورد آنها عبارتند از: NDVI، DEM و نقشه پوشش گیاهی / کاربری اراضی که تمامی از طریق پردازش داده‌های سنجش از دوری قابل استحصال است.

در مورد مولفه ساختار، در بخش سنجش از دوری، شاخص‌های: پوشش گیاهی، تراکم پیچ‌ها و تنوع سیمای سرزمین در نظر گرفته شده‌اند. داده‌ها و اطلاعات مورد نیاز نیز عبارتند از: NDVI، نقشه پوشش اراضی، LAI، DEM (شاخص سطح برگ)، شاخص تراکم پیچ، شاخص انحراف معیار پیچ، در بخش غیر

می‌تواند دوام اقتصادی (و توان تولید پایدار) داشته باشد، جوامع انسانی و محیط طبیعی را نیز پایدار نگه می‌دارد. جهت ایجاد یک چارچوب مناسب برای ارزیابی پایداری اکوسیستم شهری باید به مباحث مهم زیر توجه ویژه داشت (UNU/IAS, 2003):

۱. خدمات و کالاهای شهری (انسانی و اکولوژیکی)

۲. آثار منفی فعالیت‌های انسانی

۳. مقیاس آثار

۴. تدوین شاخص‌های مناسب ارزیابی در چارچوب فشار-وضعیت-پاسخ (PSR)

در تحقیق حاضر، جهت تعیین شاخص‌های سلامت اکوسیستم همان طور که پیشتر عنوان شد، به‌منظور در نظر گرفتن تمامی جنبه‌های موثر بر سلامت اکوسیستم، از چارچوب PSIR استفاده شده است. در ادامه تحقیق و با به‌کارگیری شاخص‌ها در یک اکوسیستم مشخص، جهت تعیین ضریب اهمیت (وزن و یا سهم) هر یک از شاخص‌های منتخب، می‌توان از رهیافت تجزیه و تحلیل سلسله مراتبی (AHP) استفاده کرد (Tehrani & Makhdoum, 2013). در نهایت، با استفاده از رابطه زیر، اندکس نهایی سلامت اکوسیستم محاسبه می‌شود.

$$HI = \sum_{i=1}^n Wi * Ci$$

HI = اندکس جامع سلامت اکوسیستم = Wi وزن شاخص‌ها
 Ci = ارزش کمی و بدون بعد شاخص‌ها.

با در نظر گرفتن ویژگی‌هایی که جهت تدوین شاخص‌های سلامت اکوسیستم لازم است، مانند: لحاظ نمودن ابعاد مختلف بیولوژیکی، اجتماعی، داشتن حساسیت بالا، کاربردی بودن، قابلیت اندازه‌گیری، قابل تفسیر و تلفیق پذیری و به‌صرفه بودن و در دسترس بودن داده‌های قبلی و دراز مدت، قابلیت پیش‌بینی داشتن و غیر مخرب بودن، تداوم داشتن و دارای مقیاس مناسب بودن و به‌روز بودن، تلاش شده تا در حد امکان، ویژگی‌های مذکور جهت معرفی شاخص‌های نهایی سلامت اکوسیستم مورد توجه قرار گیرند. جهت تعیین اندکس نهایی سلامت اکوسیستم لازم است شاخص‌های سنجش از دوری با یکسری از شاخص‌های غیر سنجش از دوری مربوط به اکوسیستم شهری از جمله تراکم جمعیت و میزان سرانه GDP ادغام شوند.

تراکم، تعداد و نوع پج، غنای نوع پج، میانگین اندازه پج می باشد. همچنین، شاخص غیر سنجش از دوری سلامت اکوسیستم در چارچوب پیشنهادی عبارتند از: شاخص تنوع زیستی شانون، نسبت MS/RT، میزان عوامل محدودکننده محیطی، تغییرات اندازه موجودات، درصد گونه‌های مهاجم یا مقاوم می باشد.

سنجش از دوری نیز شاخص تنوع زیستی شانون^(۲۴) در نظر گرفته شده است. در بخش «اثر»، مولفه «تاب آوری» (قدرت بازگشت به شرایط اولیه پس از بروز آشفستگی) در نظر گرفته شده است. شاخص‌های سنجش از دوری این مولفه عبارتند از: تغییرات کاربری اراضی، تنوع زیستی و متریک‌های منظر که داده‌ها و اطلاعات مرتبط با آنها برابرند با: تفاوت NDVI دوره ای، متریک‌های انزوا، فاصله

جدول (۳): شاخص‌های پیشنهادی سلامت اکوسیستم

شاخص‌های غیر سنجش از دوری	داده یا اطلاعات مورد نیاز	شاخص‌های سنجش از دوری	سلامت اکوسیستم	چارچوب PSIR
- تراکم ناخالص جمعیت - جای پای اکولوژیک ^(۱۹) یا میزان فشار محیط زیستی وارد بر منطقه در مقایسه با ظرفیت برد ^(۲۰) آن	- NDVI - نقشه پوشش گیاهی / کاربری اراضی Land cover/Land use map	- اندکس بیابان‌زایی (DRI) ^(۱۸) (Dragan et al., 2005) - درصد مناطق تخریب شده به کل ناحیه	آشفستگی‌های بالقوه	فشار
	- NDVI - DEM - نقشه پوشش گیاهی / کاربری اراضی	- تولید ناخالص اولیه (GPP) - درصد پوشش گیاهی - نسبت کاربری اراضی	توان تولید	وضعیت
شاخص تنوع زیستی شانون	- NDVI - نقشه پوشش اراضی + DEM - LAI ^(۲۱) - شاخص تراکم پج - شاخص انحراف معیار پج	- میزان پوشش گیاهی - اندکس تراکم پج‌ها - اندکس تنوع سیمای سرزمین	ساختار سازمان	
- شاخص تنوع زیستی شانون - نسبت MS/RT ^(۲۲) - میزان عوامل محدودکننده محیطی - تغییرات در اندازه موجودات - درصد گونه‌های مهاجم یا مقاوم	- تفاوت NDVI دوره‌ای - متریک‌های انزوا، فاصله تراکم، تعداد و نوع پج، غنای نوع پج، میانگین اندازه پج	- تغییرات کاربری اراضی - تنوع زیستی - متریک‌های منظر	تاب آوری (قدرت بازگشت به شرایط اولیه پس از بروز آشفستگی)	اثر
- تنوع زیستی (گیاهی و جانوری)	NDVI و شیب	- شاخص فرسایش خاک ^(۲۳)	پاسخ طبیعی	پاسخ اجتماعی
- میزان سرانه GDP سبز - نرخ جنگل کاری - میزان سواد محیط زیستی			پاسخ اجتماعی	

در مورد مولفه پاسخ اجتماعی نیز شاخص‌های غیرسنجش از دوری میزان سرانه GDP سبز و نرخ جنگل کاری و میزان سواد محیط زیستی در نظر گرفته شده است.

بحث و نتیجه گیری

همان طور که مطالعات پیشین نیز تایید می‌کنند، از میان

در بخش «پاسخ» نیز پاسخ‌های طبیعی و اجتماعی در نظر گرفته شده‌اند. شاخص‌های سنجش از دوری بخش طبیعی عبارتند از: شاخص فرسایش خاک که با به‌کارگیری شاخص NDVI و ویژگی‌های شکل زمین، قابل استحصال می‌باشد. شاخص غیرسنجش از دوری در این بخش نیز تنوع زیستی (گیاهی و جانوری) در نظر گرفته شده است.

پوشش گیاهی جهانی و تغییرات آنها را به دست آورد که اعتبار و صحت آنها با روش‌های آماری می‌تواند مورد تایید قرار گیرد. همان طور که با گذشت زمان، پردازش داده‌ها و اخذ آنها تکامل پیدا می‌کند، باید در انتظار روزی بود که پوشش اراضی و تغییرات اکوسیستم‌های جهانی، به طور معمول، به‌هنگام شود و در مدل‌های مختلف جهت پایش وضعیت آنها به کار گرفته‌شود. مدل‌هایی که شناخت و درک بشریت را از پویایی‌های سیستم‌های پیچیده تعاملی که پشتیبان و پایدارکننده حیات بر سطح کره زمین هستند، ارتقاء می‌بخشند.

یادداشت‌ها

1. Stress Ecology
2. Vigor
3. Distress syndrome
4. Ecosystem Integrity
5. Organization
6. Resilience
7. Alternate state
8. Scope of growth
9. Normalized Deference Vegetation Index
۱۰. تولید ناخالص اولیه (ماده یا انرژی ورودی به سیستم)
۱۱. تولید خالص اولیه (ماده یا انرژی در دسترس برای اکوسیستم)
۱۲. نوعی از اکسرژی است که تبدیل به یکنوع انرژی (مثلاً نور خورشید) می‌گردد و به کیفیت انرژی توجه دارد.
۱۳. اختلاف میان انرژی در دسترس و انرژی لازم برای نگهداری سیستم: انرژی ورودی - انرژی خروجی (انترپی) = اکسرژی
۱۴. مدل رقومی ارتفاعی زمین
۱۵. شاخص توان فرسایشی پهنه بالادست (در حوضه‌های آبریز)
۱۶. حداکثر تنش قابل تحمل برای سیستم تقسیم بر زمان احیاء یا ریکاوری (مدت زمان بازگشت سیستم به وضعیت اولیه)
۱۷. افزایش استرس موجب شیفت به سمت افراد کوچکتر می‌شود.
18. Desertification Risk Index
19. Ecological Footprint (هکتار سرانه سرزمین مورد نیاز جهت برآورد مصارف جمعیت ساکن در محلی خاص)
20. Carrying Capacity (حداکثر جمعیت یا فشار حاصل از آنها که توسط یک اکوسیستم بطور پایدار تحمل می‌شود)
21. Leaf Area Index (شاخص سطح برگ)
۲۲. نسبت حداکثر تنش قابل تحمل تقسیم بر زمان لازم جهت احیاء یا ریکاوری سیستم
23. Soil erosion index
24. Shannon-wiener index:

شاخص‌های سنجش از دوری ارزیابی سلامت و پایداری اکوسیستم‌ها، نقشه پوشش گیاهی با تواتر زمانی مناسب و شاخص‌های گیاهی مانند NDVI و LAI بیشترین نقش را در برآورد سلامت اکوسیستم ایفا می‌نمایند. این تحقیق به کارگیری شاخص‌های مکانمند مانند متریک‌های منظر و تنوع‌زیستی و همچنین تلفیق شاخص‌های غیر سنجش از دوری (مانند برآورد فشار محیط‌زیستی در مقایسه با ظرفیت برد منطقه) با شاخص‌های عنوان شده را جهت برآورد دقیق تر سلامت اکوسیستم پیشنهاد می‌نماید.

همان طور که عنوان شد، در جمع‌بندی روش‌های ارایه شده و پیشنهادی این گزارش به نظر می‌رسد، تلفیق نتایج به صورت یک رهیافت یکپارچه یعنی تکیه بر شاخص‌های سنجش از دوری به همراه به کارگیری شاخص‌های غیر سنجش از دوری موثر، می‌تواند در معرفی یک اندکس نهایی سلامت اکوسیستم موفق عمل کند. به ویژه آن که در اکوسیستم‌های پسرخته (مانند اکوسیستم شهری) به دلیل بهم خوردن توازن طبیعی عملکرد و ساختار و فرایند و مقادیر بالای ورودی مواد و انرژی و خروجی زیاد مواد زاید و آلاینده‌ها، تلفیق شاخص‌های مربوط به مصرف ماده و انرژی و تولید زایدات در برآورد صحیح تر میزان سلامت اکوسیستم، بسیار مفید خواهد بود.

آنچه مسلم است، نحوه امتیازدهی و تلفیق شاخص‌های مذکور با توجه به ویژگی‌های منطقه مورد مطالعه، مقیاس موردنظر، نوع و مقیاس داده سنجش از دوری، هدف مطالعه و داده‌ها و اطلاعات در دسترس و مکمل، تفاوت خواهد کرد. نتایج این تحقیق، به صورت به کارگیری شاخص‌های سنجش از دوری سلامت اکوسیستم در غالب یک مدل GIS ایی برای ارزیابی آثار سدسازی بر روی سلامت اکوسیستم حوزه آبریز سد طالقان، بصورت کاربردی مورد آزمون قرار گرفته است که موفقیت این روش را جهت برآورد وضعیت سلامت اکوسیستم مذکور نشان می‌دهد (جعفری، ۱۳۹۳).

نتایج این تحقیق آشکار می‌سازد که سنجش از دور، ابزاری قدرتمند جهت گردآوری داده‌های محیط‌زیستی است که در صورت تلفیق با دیگر داده‌های مرتبط، می‌تواند در مطالعات اکوسیستمی متنوع، مورد استفاده قرار گیرد.

باید توجه داشت که اخذ و پردازش داده‌ها می‌تواند در مواردی هنوز گران و دشوار باشد. اما پردازش داده‌های سنجش از دوری، تنها راهی است که می‌توان توسط آن، داده‌های به‌روز و یکپارچه

$$H' = -\sum_{i=1}^s p_i \ln p_i \quad \text{فرمول ۱}$$

H' : شاخص شانون-وینر، p_i : فراوانی نسبی هر گونه،
s: تعداد گونه‌ها

فهرست منابع

- جعفری، پ. ۱۳۹۳. معرفی یک سیستم پشتیبانی تصمیم‌گیری مکانی فازی برای ارزیابی سلامت و پایداری اکوسیستم. پایان نامه کارشناسی ارشد. دانشکده مهندسی نقشه برداری. دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی.
- عباس زاده تهرانی، ن. ۱۳۹۳. بررسی و تدوین شاخص‌های ارزیابی و پایش سلامت اکوسیستم با بهره‌گیری از فناوری سنجش از دور و GIS. پژوهشکده سامانه‌های فضانوردی، پژوهشگاه هوافضا.
- Barrett, G.W. 1976. Stress ecology. *Bioscience*; 26(3):192-4.
- Bayne, B.L. 1987. *The Effects of Stress and Pollution on Marine Animals*. Praeger, New York.
- Beasley, V. 2005. Ecosystem health concept and practice from the veterinary hygiene point of view. University of Illinois .USA.
- Clements, F.E. & Weaver, J.E. 1929. *Plant ecology*. New York: McGraw-Hill
- Costanza, R.; Norton B. G. & Haskell B. D. 1992. *Ecosystem health: new goals for environmental management*. Island Press, Washington, D.C., USA.
- Curran, P. J.; Milton, E. J.; Atkinson, P. J. & Foody, G. M. 1998. Remote sensing: from data to understanding. In Longley, P. A., Brooks, S. M., McDonnell, R. and Macmillan, B. (eds), *Geocomputation: A Primer*. Wiley: Chichester, UK, 33-59.
- Curran, P. J. 2001. Remote sensing: using the spatial domain. *Environmental and Ecological Statistics* 8, 331-344.
- Davis, F.W. & Roberts, D.A. 2000. Stand structure in terrestrial ecosystems. In Sala, O. E., Jackson, R. B., Mooney, H. A. and Howarth, R. W. (eds), *Methods in Ecosystem Science*. Springer: New York, NY, USA, 7-30.
- Dragan, M.; Sahsuvaroglu, T.; Gitas, I. & Feoli, E. 2005. Application and validation of a desertification risk index using data for Lebanon, *Management of Environmental Quality: An International Journal*, Vol. 16 Iss: 4, pp.309 - 326.
- EPA (Environmental Protection Agency). 1998. *Ecological Research Strategy*. EPA/600/R-98/086, June 1998. EPA: Washington, DC, USA; 130 Available at: <http://www.epa.gov /ORD/ WebPubs /final>.
- Guo, X. R.; Yang, J.R. & Mao, X.Q. 2002. Primary studies on urban ecosystem health assessment. *China Environ Sci*; 22(6):525-9 in Chinese.
- Holling, C. S. 1986. The resilience of terrestrial ecosystems: Local surprise and global change. In: Clark WC and Munn RE (eds) *Sustainable Development of the Biosphere*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Hutton J. 1788. Member of the Royal Academy of Agriculture at Paris. p. 209-304.
- Jørgensen, S. E.; Costanza, R. & Xu, F. L. 2005. *Handbook of Ecological Indicators for Assessment of Ecosystem Health*. CRC Press, 2000 N.W. Corporate Blvd., Boca Raton, Florida 33431. ISBN 1 56670 665 3.
- Kerr, J. T. & Ostrovsky, M. 2003. From space to species: ecological applications for remote sensing. *Trends in Ecology and Evolution* 18, 299-305.
- Leopold, A. 1941. *Wilderness as a land laboratory*. *Living Wilderness*; 6: 3.
- Lu, H. M.; Raupach, T.; McVicar, & Barrett, D. 2003. Decomposition of vegetation cover into woody and

- herbaceous components using AVHRR NDVI time series. *Remote Sensing of Environment*, 86, 1–18.
- Mageau, M. T.; Costanza, R. & Ulanowicz, R. E. 1998. Quantifying the trends associated with developing ecosystems. *Ecol Modeling*.
- McMullan, C. 1997. Indicators of urban ecosystem health. McMaster University. www.idrc.ca/en/ev-345-210-1.CD.topic.html.
- Odum, E.P. 1979. Perturbation theory and the subsidy–stress gradient. *Bioscience*; 29(6):349–52.
- Odum, H. T. 1971. *Environment, Power and Society*. Wiley, New York.
- Pimm, S. L. 1984. The complexity and stability of ecosystems. *Nature* 307: 321–326.
- Rapport, D. J. 1992. What is clinical ecology? In: Costanza R, Norton BG, Haskell BD, editors. *Ecosystem Health: New Goals for Environmental Management*. Island Press, Washington D.C; p. 144–56.
- Rapport, D.J. 1989. What constitute ecosystem health. *Perspect Biol Med*; 33(2):120–32.
- Rapport, D.J.; Thorpe, C. & Regier H.A. 1979. Ecosystem medicine. *Bull Ecol Soc Am*; 60: 180–2.
- Rapport, D.J.; Costanza, R. & McMichael, A. J. 1998. Assessing ecosystem health. *TREE press*, vol.13, no. 10.
- Su, M.; Fath, B.D. & Yang, Z. 2010. Urban ecosystem health assessment: A review. *Science of the Total Environment* 408, 2425–2434.
- Rapport, D. J; Regier, H.A. & Hutchison T.C. 1985. Ecosystem behavior under stress. *Am Nat*; 125: 617–40.
- Schaeffer, D.J.; Henricks, E.E. & Kerster, H.W. 1988. Ecosystem health: I measuring ecosystem health. *Environ Manage*; 12(3):445–55.
- Shear, H. 1996. The development and use of indicators to assess the state of ecosystem health in the Great Lakes. *Ecosyst Health*; 2:241–58
- Tehrani, A.N. & Makhdoum, F.M. 2013. Implementing a spatial model of Urban Carrying Capacity Load Number (UCCLN) to monitor the environmental loads of urban ecosystems, Case study: Tehran metropolis. *Ecological Indicators* 32(2013)197–211.
- UNU/IAS. 2003. *Urban ecosystem analysis: Identifying tools and methods*. UNU/IAS Report. United Nation University.
- Wang, W.; Ding, Y.; Cheng, X. & Zhao, S. 2008. *Ecosystem Health Assessment in Inner Mongolia Region Based on Remote Sensing and GIS*. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol.37. Part B1. Beijing.
- Wiegand, J.; Raffaelli, D.; Smart, J. C. R. & White, P.C.L. 2010. Assessment of temporal trends in ecosystem health using a holistic indicator. *Journal of Environmental Management* 91 (2010) 1446e1455.
- Woodwell, G.M. 1970. Effects of pollution on the structure and physiology of ecosystems. *Science*; 168:429–33.
- XU, F.; YANG, Z.F.; CHEN, B. & ZHAO, Y.W. 2012. Ecosystem Health Assessment of Baiyagdian Lake Based on Thermodynamic Indicators. The 18th Biennial Conference of International Society for Ecological Modelling. *Procedia Environmental Sciences* 13 (2012) 2402–2413.
- Xu, F.L.; Zhao, Z. Y. & Zhan, W. 2005. An ecosystem health index methodology (EHIM) for Lake Ecosystem health assessment. *Ecological Modeling*, 188, pp. 327-339.
- Zeng, R.; Zhao, Y. & Yang, Z. 2010. Emergy-based Health Assessment of Baiyangdian Watershed Ecosystem in Temporal and Spatial Scales. International Society for Environmental Information Sciences 2010 Annual Conference (ISEIS). *Procedia Environmental Sciences* 2 (2010) 359–371.