Archive of SID

جغرافیـــا و برنامـــه‌ریـــزی محیطـــی
سال ۲۵، پیـاپی ٥٤، شـماره ۲، تابسـتان ۱۳۹۳

پایداری دو جانبه و فروپاشی کاتاستروفیک: تحلیل ترمودینامیکی پدیده بیابان‌زایی

عـادل سـپهر: استادیار گروه مدیریت مناطق خشک و بیابانی، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران *

وصـول: ۱۳۹۱/۳/۳۰ پـذیرش: ۱۳۹۲/۱/۲۲، صص ۱۳۲-۱۱۹

چکیده

مطالعات صورت گرفته درباره پدیده بیابانی شدن عمدتا معطوف به تحلیل فرآیند بیابانی شدن در مفهوم تخریب اراضی در مناطق خشک و نیمه خشک و بررسی عوامل موثر در تسریع روند آن است. چنین برداشت‌هایی ناشی از نگاهی تـدریجی به بیابانی شدن اکوسیستم است. در چنین نگرشی مشکل بتوان مرز بین حالات پایداری و ناپایداری، تعـادل و عـدم تعـادل و آستانه های فروپاشی اکوسیستم را تفکیک و تشخیص داد. حال آنکه در جهان ترمودینامیک، وقایع به شکل دیگری رخ مـی-دهند. در دیدگاه ترموسیستمی، بیابان شدن یک منطقه را می‌توان نوعی جریان کاتاستروفیک از تغییـر حـالات مـاده و انـرژی دانست. به عبارتی بیابانی شدن گذر و عبور دینامیکی از یک حالت پایدار تولیدی به یک حالـت کـم‌تـر پایـدار یـا بـا تولیـد بیولوژیک کم‌تر است. این گذر در نتیجه آشوب‌ها و اغتشاشات سیستمی حاصل از تغییرات محیطی است. در این مقاله سعی شده است تا مفهوم بیابانی شدن ترمودینامیکی یا فروپاشی کاتاستروفیک در اکوسیستم بحث و بررسی شود. هدف غایی ایـن مقاله، بیان مفاهیمی است که این امکان را می‌دهد تا بر اساس رفتارهایی که در عناصر سیستم شکل می‌گیرد، بتوان بـه نـوعی نزدیکی سیستم را به آستانه‌های ناپایداری و فروپاشی تشخیص داد. نتیجه چنـین نگرشـی در مقالـه، معرفـی مبـاحثی نـو در تحلیل پایداری اکوسیستم و استفاده از الگوهای پوشش به عنوان علایم هشدار دهنده تغییـرات کاتاسـتروفیک در اکوسیسـتم است.

واژه‌های کلیدی: گذرهای بحرانی، فروپاشی اکوسیستم، بیابانی شدن، کاتاستروف، پایداری دوجانبه

۱- مقدمه

در نگرش منابع طبیعی، بیابانی شدن یـا بیابـان‌زایـی را فرایندی تخریبـی در منـاطق خشـک، نیمـه خشـک و خشک نیمه مرطوب در نظر می‌گیرند، آنچه در نهایت نابودی و زوال اکوسیستم را به همراه خواهـد داشـت. در این تفکر مفهوم بیابانی شدن یک منطقـه، فراینـدی تدریجی در طول زمان محسوب می‌شود که چهره یک چشم انـداز را از حالـت سـبز بـه حالـت بـایر مبـدل می‌سازد. در این بین تغییراتی که تسریع کننـده فراینـد بیابانی شـدن در یـک منطقـه هسـتند، گـاه از اقلـیم و عناصر آب و هوایی و گاه از فعالیت بشری منشاء مـی گیرند (سپهر و پرویان، ۱۳۹۰).

در مقابل، نگاه سیستمی به پدیده بیابانی شدن، بر پایـه نظریـه سیسـتم‌هـا و روابـط ترمودینـامیکی غالـب در

*نویسنده مسؤول: E-mail: adelsepehr@um.ac.ir

Downloaded from uijs.ui.ac.ir at 10:37 IRST on Monday September 29th 2014

www.SID.ir

Archive of SID

Downloaded from uijs.ui.ac.ir at 10:37 IRST on Monday September 29th 2014

سیستم‌های باز و بسته استوار است. در این نگرش اطلاعات اکوسیستم می‌تواند ماندگاری و بقاء آن را تضمین کند. وجود یک ضربه یا تغییر در شرایط به مثابه ورود اطلاعات جدید و نوعی آشوب و آشفتگی در سیستم است که پاسخ های متفاوتی را از سیستم حسب نوع اطلاعات و شدت آشفتگی به همراه خواهد داشت. بیابانی شدن (بیابان‌زایی) در این نگرش فروپاشی ترمودینامیکی اکوسیستم به دنبال عبور از شرایط ناتعادلی محسوب می‌شود. در این نگرش، مرگ اکوسیستمی به نوعی پاسخ به تغییر کاتاستروفیک (ناگهانی) در سیستم برای رسیدن به حالت پایدار است. مرگ سیستمی در اینجا خالی شدن انرژی سیستمی است که دستخوش آشوب‌های کاتاستروفی شده است. در این مقاله، بحث پیرامون تغییرات ترمودینامیکی در اکوسیستمی صورت گرفته است که عبور از مرزهایی که در این مقاله گذرهای بحرانی برای یک اکوسیستم خوانده شده است، تغییر حالت و وضعیت تعادلی اکوسیستم و گاه فروپاشی و مرگ سیستم را به همراه خواهد داشت.

در این مقاله سعی شده است تا با ارائه مفاهیم جدید در بحث تغییرات سیستم‌های باز، بیابانی شدن در ارتباط با شرایط کاتاستروفیک و آستانه‌های تغییر اکوسیستم تحلیل شود. پیدا کردن روش‌ها و راه کارهایی که بتواند به عنوان یک زنگ خطر یا علامت هشدار، نزدیکی اکوسیستم را به نقطه فروپاشی نشان دهد، می‌تواند در پیش‌بینی بیابانی شدن کمک کند. فرض اصلی مقاله این است که بیابانی شدن، یک فرایند سریع و کاتاستروفیک در فروپاشی ناگهانی حالت پوششی اکوسیستم به حالت بیابان و عاری از پوشش اکوسیستم است، که این پدیده کاتاستروف به وسیله تغییرات آرام در محیط رخ می‌دهد.

۲- تغییرات کاتاستروفیک و نقاط اوج (انشعابات کاتاستروفی)[1]

اساس فهم پاسخ‌های سیستم به تغییرات محیطی به مفاهیم تئوری کاتاستروف و انشعابات یا گره‌های ایجاد شده در پاسخ های غیر خطی ریاضی بر می‌گردد. در ریاضیات، تئوری کاتاستروف، مطالعه سیستم‌های پویا (دینامیک) غیر خطی است. نمودارهای کاتاستروف در ریاضی همراه با نقاط ویژه و خاص است. رفتار سیستم در این نقاط، حاصل اغتشاشات و آشفتگی‌های کوچک درون سیستم است که خود از تغییرات ناگهانی محیط ناشی می‌شود. به این نقاط کاتاستروفی در ریاضیات انشعاب یا شاخه[2] گفته می‌شود (شکل ۱).

از آنجاییکه در انشعابات کاتاستروفیک، پایداری سیستم نسبت به شرایط قبل از چین خوردگی کاتاستروف تغییر می‌کند، به این نقاط تقریبا غیر پایدار (در ادامه بحث می‌شود) یا انشعابات ناپایدار، نقاط اوج یا کج شدگی سیستمی[3] اتلاق می‌شود. این نقاط تعادلی، کلید فهم فروپاشی و تغییر تعادل غیر خطی در اکوسیستم است که در این مقاله با کمک این مفاهیم، بیابانی شدن اکوسیستم تحلیل شده است. برای درک

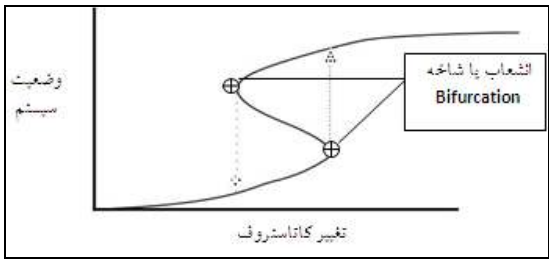
1 - Catastrophic Changes and Tipping Points (Catastrophic Bifurcations)
2 - Bifurcations (Fold Catastrophic point)
3 - Tipping Points

www.SID.ir

Archive of SID

Downloaded from uijs.ui.ac.ir at 10:37 IRST on Monday September 29th 2014

این مفاهیم و ارتباط آن با بحث بیابانی شدن اراضی، ناچار به شناخت اصول تعادل و پایداری در شرایط تغییرات غیر خطی خواهیم بود. بنابراین قبل از بیان هر مفهوم، به تحلیل این مفاهیم پرداخته شده است.



شکل ۱: شاخه‌ها و انشعابات ایجاد شده در اثر تغییرات ناگهانی (کاتاستروفیک) در سیستم

حالت تعادل در یک سیستم می‌تواند به طرق مختلف در شرایطی از قبیل فشار بیش از حد، ازدیاد دما، کمبود بارش و موارد دیگر، واکنش و حالات گوناگونی داشته باشد. در ارتباط با شناخت بیشتر مفاهیم تعادل و پایداری می‌توان به پژوهش‌های Ahnert (1960, 1967, 1970, 1971, 1976, 1978, 1982, 1984, 1987, 1988, 1994) اشاره کرد.

همانطور که بیان شد، فروپاشی‌های کاتاستروفیک از یک گره انشعابی ناشی می‌شود. بررسی این موضوع بر روی منحنی تعادل، درک دقیق‌تری از آنچه بحث خواهد شد پیش رو خواهد گذاشت (شکل ۲). در شرایطی که منحنی تعادل دارای چین خوردگی و یا نقاط انشعابی باشد، سه نقطه یا حالت تعادلی می‌تواند برای شرایط ایجاد شده مطرح باشد (پیکان‌ها و جهات نقاط انشعابی در شکل ۲، نشاندهنده مسیر حرکت و واکنش سیستم به شرایط عدم تعادل به منظور رسیدن به تعادل است).

همانطور که در نمودارهای a تا d نمایش داده شده است، از پیکان‌ها و جهات نمایش داده در نمودارهای a و b، می‌توان مفاهیم تعادل پایدار را برداشت کرد، اما نمودارهای c و d بازگوکننده انشعاب کاتاستروفیک و تعادل غیر ایستا هستند. اگر سیستم در شرایطی دور از نقاط انشعابی F_1 و F_2 در نمودارهای c و d عبور کند، اثر واکنشی سیستم خیلی دورتر از این نقاط در اکوسیستم معلوم می‌شود و عملا حرکت سیستم به سمت تعادل دورتر از نقاط انشعابی ناپایدار صورت می‌پذیرد. مفهوم تعادل ناپایدار یا غیر ایستا بدین سبب است که فاصله بین نقاط انشعابی F_1 و F_2 نشان داده شده در نمودارهای c و d، بصورت مرز گذر سیستم برای جذب به سمت دو منطقه پایدار در بالای نقطه F_1 و پایین نقطه انشعاب F_2 است. به همین دلیل این محدوده تعادلی غیر پایدار را که محل عبور سیستم برای رسیدن به تعادل پایدار است، منطقه و محدوده گذر یا جذب[1] گویند (در فیزیک به این محدوده، منطقه ناتعادلی[2] گفته می‌شود).

اگر سیستم به نقاط انشعاب خیلی نزدیک باشد (مثلا نقاط F_1 یا F_2)، یک تغییر جزیی در شرایط سیستم، مسبب تغییرات بزرگ و وسیع در شاخه پایین نمودار خواهد بود (نمودار c). همچنین، نزدیکی به این قبیل نقاط انشعابی موجب خواهد شد تا یک آشفتگی و اغتشاش کوچک در سیستم، موجب رانده شدن

[1] - Attraction Basin
2 - Non-equilibrium

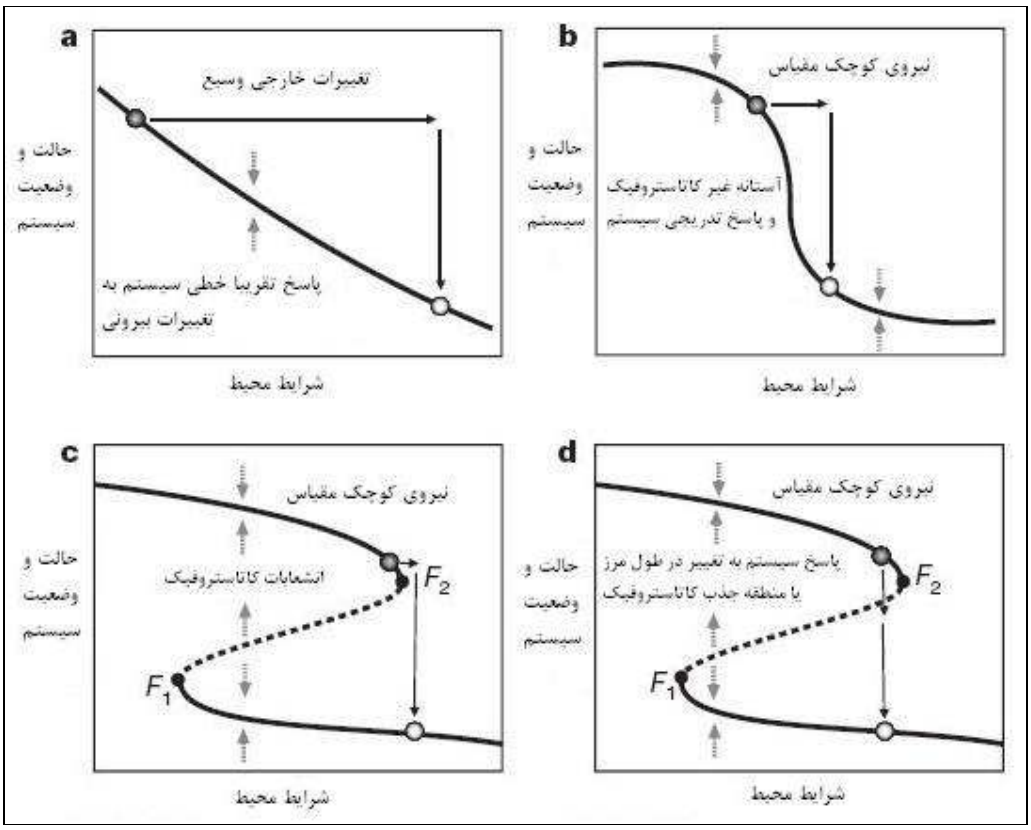
www.SID.ir

Archive of SID

Downloaded from uijs.ui.ac.ir at 10:37 IRST on Monday September 29th 2014

سیستم در طول مرز و محدوده گذر یا جذب شود (نمودار d).

بنابراین این نقاط انشعابی را می‌توان نقاط اوج یا تعادلی دانست، از این جهت که یک اغتشاش کوچک و جزئی در سیستم، موجب بروز تغییری وسیع و گذر یا عبور کاتاستروفیک در سیستم خواهد شد. این همان نقاط ناپایدار در تئوری کاتاستروف ریاضیات است.



شکل ۲: وضعیت سیستم در پاسخ به تغییرات خطی (a)، تدریجی (b) و کاتاستروفیک (c و d)، منطقه و محدوده گذر یا جذب (فاصله بین F_1 و F_2) که مشخص کننده وضعیت سیستم برای رسیدن به تعادل پس از ایجاد آشفتگی در شرایط است (اقتباس از شفر و همکاران، ۲۰۰۱ با اندکی تغییر).

اغتشاشات کوچک، در صورتیکه سیستم در دامنه‌ای قطعی از شرایط، حساسیت بسیار بالایی را به تغییر شرایط نشان دهد، می‌تواند تغییرات بزرگ و وسیع را در غیاب انشعابات حقیقی ایجاد کند. این بحث در نمودار b شکل ۲ نشان داده شده است. در اینجا حساسیت سیستم به شرایط، تغییر را ایجاد می‌کند. بنابراین تغییرات بزرگ عملا غیر کاتاستروفیک هستند. نمودار a در شکل ۲، مشخص کننده یک تغییر کوچک و آرام با شیبی ملایم در سیستم است که در نتیجه یک اغتشاش یا نیروی خارجی بزرگ در وضعیت سیستم و در پاسخ به اغتشاش بیرونی روی داده است.

www.SID.ir

Archive of SID

Downloaded from uijs.ui.ac.ir at 10:37 IRST on Monday September 29th 2014

در دیدگاه سیستمی، بحث بیابانی شدن کاتاستروفیک و علایم هشدار دهنده فروپاشی اکوسیستم در نمودارهای c و d و گاها در شرایطی که آستانه‌های غیر کاتاستروفیک مانند آنچه در نمودار b شکل ۲ نشان داده شده است، در میان باشد، مطرح می‌شوند. این موضوع، بحث پیش روی این مقاله است. شناخت محدوده گذر یا جذب که با بررسی علائمی خاص در ویژگی‌های اکوسیستم قابل درک است، می‌تواند مشخص کننده وجود تغییری تعادلی در اکوسیستم و نمود شرایط بیابانی باشد.

آنچه در بحث تحلیل سیستمی پدیده بیابانی شدن باید مدنظر باشد، شناخت مناطق گره یا انشعاب در اکوسیستم است، جاییکه می‌تواند به عنوان منطقه یا آستانه‌های غیرپایدار برای اکوسیستم شناخته شود. آستانه‌ها و نقاط انشعاب کاتاستروفیک در اکوسیستم با علایم و رفتارهای خاصی در اکوسیستم مشخص می‌شوند. شناخت این علایم در ارتباط با شناخت پدیده افت یا کاهش ناگهانی روند سیستمی است.

۳- پدیده افت ناگهانی یا کند شدن سیستمی[1]

مهم‌ترین سرنخی که به مثابه شاخصی برای تعیین زمان نزدیک شدن سیستم به آستانه بحرانی و یا نقاط اوج و انشعابی پیشنهاد شده است، در ارتباط با پدیده‌ای با عنوان " افت یا کند شدن بحرانی" در تئوری سیستم‌های پویا و دینامیک است. نزدیک شدن اکوسیستم به چشم‌انداز بیابان نیز در ارتباط با این پدیده قابل تحلیل است.

فرآیند افت یا کند شدن در سیستم برای دامنه‌ای از تغییرات یا انشعابات کاتاستروفیک و غیر کاتاستروفیک رخ می‌دهد، اما در این مقاله به بررسی این فرآیند در حالت وقوع انشعابات و تغییرات کاتاستروفیک در سیستم تمرکز شده است. درک پدیده افت ناگهانی در ارتباط با بیابانی شدن اکوسیستم در قالب تئوری گوی–کاسه[2] و تئوری ارتجاع سیستمی فهم دقیق‌تری از این پدیده ارائه می‌دهد. در این تحلیل، رفتار سیستم در برابر تغییرات به مانند توپی در چشم انداز دره و یا پرتگاه در نظر گرفته می‌شود (شکل ۳). توپ معرف وضعیت و حالت سیستم در شرایط مختلف و دره نماینده محدوده جذب یا گذر سیستم برای رسیدن به دو حالت پایدار یا گزینه‌های پایدار در بالا و پایین محدوده جذب است (آنچه در نمودار d شکل ۲ شرح داده شد). ظرفیت سیستم در ارتباط با پذیرش آشفتگی و تغییر به یکی از حالات و گزینه‌های پایدار ثانویه، در راستای ویژگی ارتجاعی سیستم و در رابطه با عرض و شیب محدوده یا منطقه جذب و گذر تعیین می‌شوند.

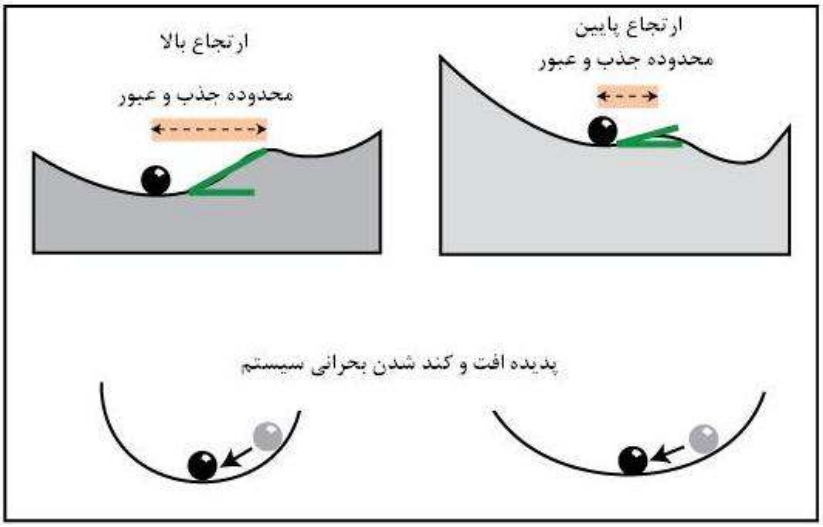
[1] - Slowing Down

2 - Ball-Valley

www.SID.ir

Archive of SID

Downloaded from uijs.ui.ac.ir at 10:37 IRST on Monday September 29th 2014



شکل ۳: تئوری توپ (گوی) و دره (پرتگاه) در بررسی مفهوم پدیده افت یا کند شدن سیستم

با توجه به شکل ۳ می‌توان چنین استنباط کرد که شرایطی که سیستم را به سمت آستانه‌های بحرانی یا گذرهای بحرانی و نقاط اوج و انشعاب نزدیک می‌کند، موجب کوچک کردن منطقه یا محدوده جذب و گذر سیستم به سمت حالات پایدار شده و در نتیجه ارتجاع سیستم هم کاهش یافته و کند می‌شود. به عبارتی یک آشفتگی یا اغتشاش کوچک کافی است تا کره یا توپ را که معرف وضعیت سیستم است به سمت پرتگاه سوق دهد. کاهش سراشیبی یا شیب محدوده جذب و گذر چنین معنی می‌دهد که آشفتگی مشابه در شرایطی که عملا حد آستانه یا گذری بحرانی برای سیستم محسوب نمی‌شود، می‌تواند در درازمدت به علت پدیده افت یا کاهش ناگهانی در سیستم، موجب از هم پاشیدن و از بین رفتن سیستم شود. افت و کاهش ناگهانی در ارتباط با نزدیک شدن سیستم به گذرها یا آستانه‌ها و نقاط اوج است که سیستم را در شرایط حداقل تعادل نشان می‌دهد. دینامیک تغییرات سیستم جهت ارزیابی ویژگی ارتجاعی و بازگشت آستانه های بحرانی با بررسی پدیده افت یا کاهش امکان پذیر است. زمانیکه سیستم به نقاط انشعابی کاتاستروف و به محدوده جذب و گذر نزدیک است، بعد از یک آشفتگی یا اغتشاش کوچک در سیستم، نرخ و سرعت بازسازی سیستم هم کاهش می‌یابد.

با توجه به منحنی تعادلی ارائه شده برای تغییرات کاتاستروفی در شکل ۲، به طور کلی مدت زمانی که طول می کشد تا سیستم در بین نقاط F_1 و F_2 به مسیری برای رسیدن به حالت پایدار پاسخ دهد و یا به عبارتی در طول محدوده جذب یا گذر و نقاط کاتاستروفی به حالت پایدار ثانویه دست یابد، زمان بازسازی[1] سیستم گفته می‌شود. ساده‌ترین راه برای اندازه‌گیری نقاط اوج یا گذرها و آستانه‌های بحرانی

[1] - *Recovery Time (Recovery Period)*

www.SID.ir

Archive of SID

Downloaded from uijs.ui.ac.ir at 10:37 IRST on Monday September 29th 2014

در یک اکوسیستم، اندازه گیری مستقیم زمان یا نرخ بازسازی سیستم برای برگشت به شرایط و وضعیت تعادلی در پی وقوع آشوب و آشفتگی در سیستم است.

در مواردی که سیستم به نقاط گذر یا آستانه که تحت عنوان انشعابات کاتاستروف بحث شد، نزدیک باشد، نرخ و زمان بازسازی می‌تواند کاهش نشان دهد که این روند کاهشی در ارتباط با ماهیت پدیده افت یا کند شدن بحرانی در سیستم است. داکوس[1] و همکاران (۲۰۰۸) با انجام آزمایش اجرای پالس‌های اغتشاش و آشفتگی در موقعیتی که سیستم از نقاط گذر یا آستانه‌های بحرانی دور است و زمانیکه به این نقاط نزدیک است، نشان داد که تفاوت فاحشی در زمان برگشت به حالت تعادل یا پایداری مشابه پایداری اولیه (سرعت بازسازی سیستم) در این دو وضعیت برای سیستم مطرح است.

زمان برگشت یا بازسازی طولانی‌تر معرف پایداری کم‌تر سیستم و بنابراین نزدیکی سیستم به نقاط بحرانی یا انشعابات است. در شرایط آزمایشگاهی، اندازه‌گیری سرعت بازسازی با کمک ایجاد پالس‌های اغتشاش آسا صورت می‌گیرد. این مورد نیز بدیهی است که هرچه آشوب یا اغتشاش بزرگ تر باشد، قاعدتا زمان لازم برای برگشت به شرایط پایداری، طولانی‌تر است.

امروزه از تئوری پدیده افت بحرانی در سیستم‌ها، به منظور بررسی و ضبط ماهیت تغییرات در نقاط اوج و تعادل در اکوسیستم‌ها استفاده می‌شود. از آنجا که پایش اکوسیستم‌ها با کمک بررسی نرخ و سرعت پدیده بازسازی[2] پس از تغییرات، مشکل و عملا غیرممکن است، بنابراین از بررسی نقاط انشعابی یا شاخه‌های ایجاد شده در سیستم که معرف وقوع آشوب و اغتشاش در اکوسیستم و الگوی رفتاری سیستم در برابر تغییرات است، برای این منظور استفاده می‌شود.

٤- خاصیت ارتجاعی[3]

ویژگی ارتجاعی، ظرفیت یک سیستم را برای پذیرش تغییرات و سازگار شدن با آستانه‌های بحرانی مشخص می‌کند. برای اکوسیستم‌های بیابانی، این پدیده سیستمی می‌تواند در ارتباط با توفان‌های گرد و غبار، رواناب، سیل و فرسایش مطرح باشد.

هر اندازه توانایی سیستم در ارتباط با کنار آمدن با شرایط ذکر شده بیشتر باشد، پایداری سیستم در طول زمان زیادتر است. این امر معرف ارتجاع بالاتر سیستم است. نزدیکی به آستانه‌های بحرانی برای گذرهای کاتاستروفیک، ویژگی ارتجاعی یک اکوسیستم را نشان می‌دهد که مشخص می‌کند که یک آشفتگی و اغتشاش کوچک کافیست که اکوسیستم را به مرحله فروپاشی و تبدیل به یک حالت دیگر برساند.

این موضوع به عنوان بحث تعادل اکوسیستم مطرح است و متاسفانه دانش ما در ارتباط با بسیاری از اکوسیستم‌ها یا به طور کلی سیستم‌ها جهت پیش‌بینی آستانه‌های بحرانی کافی نیست. به عبارتی در زمان

[1] - Vasilis Dakos

[2] - Recovery
[3] - Resilience

www.SID.ir

Archive of SID

Downloaded from uijs.ui.ac.ir at 10:37 IRST on Monday September 29th 2014

حاضر اندازه‌گیری ارتجاعات سیستمی به طور مستقیم مشکل است. در چنین محدودیت‌هایی یک دیدگاه دیگر می‌تواند برای این مورد استفاده شود. دیدگاه علمی در این زمینه استفاده از ویژگی‌های ژنریک آستانه‌های بحرانی (نقاط انشعابی) به منظور گسترش شاخص‌های پیش آگهی است که می‌توانند به عنوان شاخص‌های غیر مستقیم برای اندازه‌گیری ارتجاعات سیستمی استفاده شوند. این شاخص‌ها بیانگر مشخصات آماری ساده‌ای هستند که به طور مستقیم بوسیله پایش متغیرهای یک سیستم قابل اندازه‌گیری است. به زبان دیگر این تئوری پیشنهاد می‌کند که ما می‌توانیم خط یک گذر را بوسیله مشخصه‌های پایش از قبیل تغییرات جمعیتی، تجمع ریز مغزی‌ها یا الگوهای پوششی در اکوسیستم‌ها تعیین کنیم. حقیقت این است که تغییرات این شاخص‌ها، گذرهای بحرانی را در ارتباط با برگشت یک سیستم به حالت تعادل بعد از یک اغتشاش یا آشوب که منجر به رفتن به سمت نقطه صفر در دیاگرام انشعابات می‌شود، پیش-بینی می‌کند.

بر پایه قوانین ترمودینامیک، سیستم‌های باز در محدوده ناتعادلی یا همان محدوده جذب، رفتارهای آشوب را از خود نشان می‌دهند که حاصل آن شکل-گیری الگوها و اشکال منظم است. به عبارتی با کمک روند تغییرات این الگوها به نوعی می‌توان نوسانات ارتجاع اکوسیستم را در محدوده نقاط انشعابی پایش کرد. این موضوع را می‌توان در وضعیتی از حالات پایداری در سیستم جستجو کرد که تحت پایداری دو جانبه شناخته شده است.

۵- پایداری دوجانبه (دو طرفه)[1] یا لحظه‌ای

یک سیستم پایدار دو جانبه، می‌تواند به طور ناگهانی به یکی از حالات پایدار اطرافش تغییر کند. در فیزیک، این حالات به این علت صورت می‌گیرد تا سیستم به منظور تخلیه انرژی، از حالت با انرژی زیاد به حالتی با انرژی پایین تر تبدیل شود. این تغییر در سیستم‌های پایدار دوجانبه در طبیعت به شرایط محیطی بستگی دارد (شکل ٤). از این تغییرات ناگهانی در طبیعت با عنوان گذرهای متوقف[2] یاد می-شود. پایداری دو جانبه اغلب در مدل‌های اکوژئومورفیک مشاهده می‌شود و تحت تئوری اثرات بزرگ حاصل از عوامل یا علل کوچک[3] در مطالعات طبیعی شناخته شده است (Sherratt, 2005).

منطقه پایدار آزاد یا دو جانبه، جایی است که عوامل محیطی و مشخصه‌های سیستم تحت این منطقه رخ می‌دهد. منطقه پایدار و تشکیل الگوهای منظم در اکوسیستم به این معنی است که اشکال خاص الگوهای منظم می‌تواند مشخصه منطقه پایدار دو جانبه باشد. این فرضیه مخصوصا در اکوسیستم‌های طبیعی مطرح است، جاییکه پایداری دوجانبه می‌تواند منجر به تغییر ناگهانی بین حالات اکوسیستم تحت تغییرات تدریجی خارجی و افت شرایط بالقوه اکولوژیکی- اقتصادی شود (شکل ٤). مشخص کردن

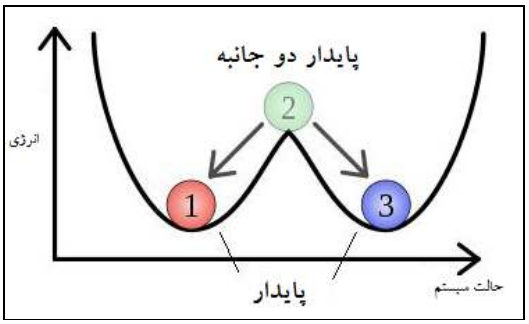
[1] - Bistability
[2] - Discontinuous transitions
[3] - Big Effects from Small Causes

www.SID.ir

Archive of SID

Downloaded from uijs.ui.ac.ir at 10:37 IRST on Monday September 29th 2014

الگوهایی که تنها در مناطق پایداری دو جانبه رخ می‌دهد، می‌تواند منجر به شاخص‌های تغییر حتمی از یک حالت سالم به حالت تخریب در اکوسیستم شود.



شکل ٤: نمای شماتیک از منطقه پایداری دو جانبه (کاهش انرژی در راستای ثبات)

بر اساس تئوری پایداری دوجانبه، وقتی صحبت از آستانه یا گذرهای بحرانی در یک اکوسیستم می‌شود، پایداری به مفهوم خالی شدن انرژی یک سیستم در ترمودینامیک مطرح می‌شود، به دیگر بیان، منطقه گذر یا جذب جایی است که اکوسیستم بر اثر تغییرات و انشعابات کاتاستروفیک به آستانه‌ای از شرایط رسیده است که در این آستانه انرژی پتانسیل بالایی در سیستم وجود دارد. به همین علت این نقاط را نقاط اوج یا عطف سیستم می‌گویند. در نقاط اوج به نوعی حالت پایداری دو جانبه حکمفرماست.

حال با توجه به مفاهیم مطرح شده درباره تغییرات کاتاستروفیک در سیستم و چگونگی پاسخ سیستم به تغییرات در راستای رسیدن به پایداری، به تحلیل پدیده بیابانی شدن با توجه به مباحث مطرح شده پرداخته شده است.

٦- بحث

مناطق خشک و نیمه خشک در حدود ۳۰٪ از مساحت کره زمین را در برگرفته‌اند. در این مناطق سیستم‌های اکوهیدروژئومورفیک با بازخوردهای قوی در مقیاس‌های کوچک تا وسیع به چشم می‌خورد. به طور کلی پوشش گیاهی این مناطق در برگیرنده حالتی موزائیکی یا الگویی متنوع بر حسب میزان بارش و نفوذ آب، بصورت هموژن[1] (یکنواخت و همگن) در خاک های لخت همراه با توده‌های سنگی و بصورت هتروژن[2] (ناهمگن همراه با تنوع زمینی[3] بالا) در مناطق با پوشش مناسب و خاک تحول یافته است (شکل ٦).

با توجه به مفهوم پایداری دوجانبه در رابطه با تعادل کاتاستروفیک و نزدیکی اکوسیستم ها به نقاط اوج و گذرهای بحرانی، می‌توان مرزی اقلیمی را به عنوان یک حد گذر یا آستانه اکولوژیکی برای تغییر شرایط ترمودینامیکی اکوسیستم و تغییرات تعادلی در نظر گرفت. از آنجایی که اکوسیستم‌های نیمه خشک غالبا مرز چشم‌اندازهای بین بیابان‌های خشک در یک سمت و اکوسیستم‌های سبزتر و یا با پوشش بیشتر در سمت دیگر شناخته می‌شوند، تحلیل الگوهای پوششی این مناطق می‌تواند به فهم فرآیند بیابانی شدن کمک کند. لذا در این تحقیق، مناطق نیمه خشک، گذر اکولوژیکی یا آستانه برای تغییر شرایط تعادلی محیط و بیابانی شدن پیشنهاد شده است. اکوسیستم‌های نیمه

[1] - Homogenous
[2] - Hetrogenous
[3] - Geodiversity

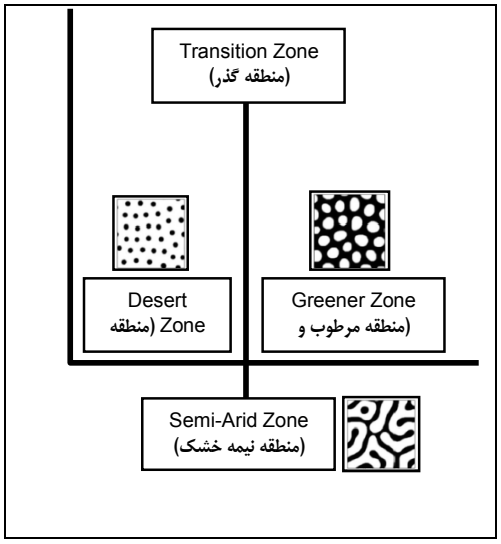
www.SID.ir

Archive of SID

Downloaded from uijs.ui.ac.ir at 10:37 IRST on Monday September 29th 2014

خشک، اکوسیستم‌هایی با بارش متوسط سالانه ۲۵۰ تا ۵۰۰ میلی‌متر هستند و بطور مشخص در مرز محیط-های بیابانی یافت می‌شوند. از طرف دیگر اکوسیستم-های سبزتر از قبیل ساوانا، علفزارها و جنگل‌ها، در سمت دیگر محیط‌های بیابانی واقع شده‌اند. به دیگر سخن، مناطق نیمه خشک را می‌توان به نوعی خط گذر برای اکوسیستم تعبیر نمود (شکل ۵). با توجه به مفاهیم مطرح شده، می‌توان مناطق نیمه خشک را در محدوده‌ای از رفتارهای ناتعادلی سیستم قلمداد کرد که قرارگیری اکوسیستم در شرایط پایداری دوجانبه، پراکنشی از الگوهای منظم را در این مناطق رقم زده است.

تشکیل الگوهای پوشش گیاهی نتیجه‌ای از بازخورد مثبت در مقیاس‌های کوچک است. تشکیل این الگوها در مناطق خشک به دسترسی به آب برای پوشش در این مناطق برمی‌گردد. با افزایش آب قابل دسترسی برای لکه‌های پوشش، الگوهای پوشش شکل می-گیرند. دسترسی آب به میزان بارش، ویژگی‌های خاک، توپوگرافی و عوامل مشابه دیگر بستگی دارد که در تشکیل الگوهای فضایی موثرند (شکل ۵ و ٦). همانطور که گفته شد می‌توان از شاخص‌هایی برای بررسی نقاط انشعابی یا اوج در اکوسیستم کمک گرفت. دینامیک الگوهای پوشش می‌تواند به مثابه علائمی در شناخت گذرهای بحرانی اکوسیستم و شروع بیابانی شدن ملاک عمل قرار گیرد. مطالعات نشان می‌دهد که دیاگرام‌های انشعابات می‌تواند نشان دهند که تغییرات کاتاستروفیک در الگوهایی با طول موج‌های بلند رخ می‌دهد. در دید ریاضیات این الگوها می‌توانند با نواری از نقاط پیک شناخته شوند. طبق نظر کراس و هاهنبرگ (۱۹۹۳)[1]، شکل‌گیری الگوهای منظم را در سیستم‌های بیولوژیکی، شیمیایی و فیزیکی متنوعی شاهد هستیم. بیشتر این الگوهای منظم به منظور درک واضح‌تر در قالب الگوهای منحصر به فردی که در پوست حیوانات وجود دارد، نظیر الگوهای نقطه‌ای در پلنگ، نواری در گورخر و ببر تشریح شده است (Kefi et al, 2007). در شکل ٦، تنوع الگوی پوششی این مناطق نشان داده شده است. الگوی نواری یا پوست ببری در پوشش گیاهی یک مشخصه بارز محیط‌های نیمه‌خشک است. مکانیزم ایجاد پوست ببری یا الگوی نواری به رقابت گیاه برای آب به عنوان عامل اصلی شکل دهی این الگوها در مناطق نیمه خشک مربوط می‌شود (شکل ۷).



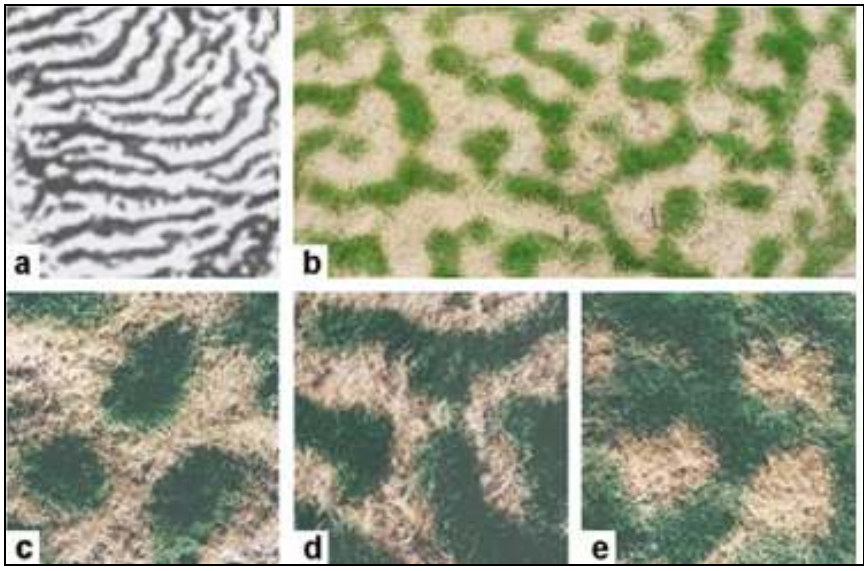
شکل ۵: شکل گیری الگوها در مناطق خشک، نیمه خشک و مرطوب (منبع: نگارنده)

[1] - *Cross and Hohenberg, 1993*

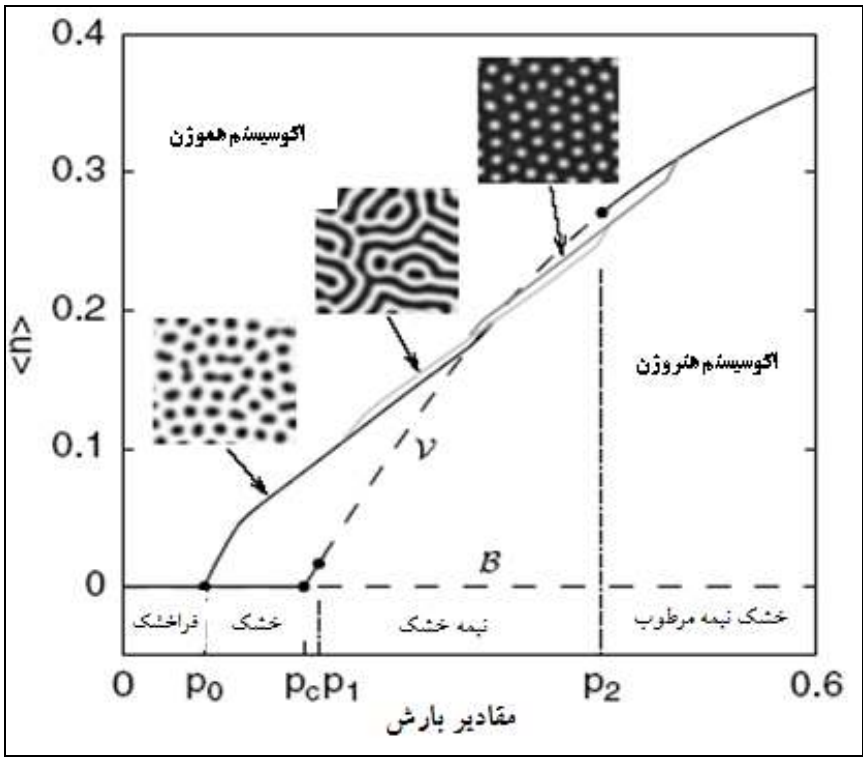
www.SID.ir

Archive of SID

Downloaded from uijs.ui.ac.ir at 10:37 IRST on Monday September 29th 2014



شکل ٦: الگوهای پوست ببری و نواری پوشش گیاهی در دامنه‌های مناطق نیمه خشک (a, b, d)، الگوهای نقطه‌ای پوشش در مناطق خشک (c) و الگوی سوراخی یا دناتی در مناطق مرطوب (e) (اقتباس از ون هاردنبرگ و همکاران، ۲۰۰۱)



شکل ۷: ارتباط بیومس (n) و بارش (p): خط B معرف حالت یا وضعیت بایر است، جاییکه بیومس تقریبا برابر با صفر است (n=0). منحنی v مشخص کننده الگوی یکنواخت پوشش گیاهی است. به طور کلی الگوهای پوشش به عنوان یک شاخص تغییرات محیطی مشخص کننده وضعیت سیستم و شرایط اقلیمی است (اقتباس از ون هاردنبرگ و همکاران، ۲۰۰۱، با اندکی تغییر).

www.SID.ir

Archive of SID

Downloaded from uijs.ui.ac.ir at 10:37 IRST on Monday September 29th 2014

بر اساس شکل ۷، آنچه مشخص است این است که تغییر و دینامیک الگوهای پوشش گیاهی در مناطق مختلف با توجه به شرایط رطوبتی مناطق صورت می-گیرد. به عبارتی رقابت برای آب، الگوهای پوشش گیاهی را در مناطق خشک، نیمه خشک و مرطوب دستخوش تغییر کرده است. همانطور که قبلا در بحث سیستم‌ها بیان شد تحلیل سرعت و نرخ بازسازی تغییرات اکوسیستمی جهت بررسی پاسخ سیستم به تغییرات کاتاستروفیک مشکل است. به همین جهت استفاده از شاخص‌هایی که به شکلی معرف وضعیت سیستم در شرایط محیطی هستند می‌توانند به عنوان علایم هشدار و پیش‌آگاهی در بررسی نزدیکی سیستم به آستانه‌ها یا انشعابات کاتاستروفی یا همان محدوده جذب و گذر (دره در تئوری گوی-دره) بکار روند. این علائم، هشدار دهنده وضعیت سیستم از لحاظ پایداری یا عدم ثبات و در نهایت فروپاشی اکوسیستم محسوب می‌شوند.

در ارتباط با بیابانی شدن آنچه در ذهن با توجه به ترمودینامیک سیستم مطرح می‌شود، نگاهی سیستمی به تغییرات کاتاستروفیکی است که اکوسیستم را به دامنه فروپاشی یا بیابانی شدن نزدیک می کند. الگوهای پوشش گیاهی می‌تواند به عنوان یک شاخص معرف وضعیت اکوسیستم باشد. الگوهای نواری اکوسیستم نیمه خشک و تغییر آن به سمت الگوهای نقطه‌ای معرف نزدیکی سیستم به مرحله فروپاشی، نابودی یا اکوسیستم بیابان است.

در محدوده پایداری دو جانبه، انرژی ترمودینامیک سیستم بالاست و اکوسیستم ناچار است برای رسیدن به پایداری به سمت پایداری یا ثبات کامل پیش رود و یا به عبارتی انرژی خود را تقلیل دهد. این تغییر در راستای محیط و منابع آب و بیومس صورت می‌گیرد. واضح است که در شرایط کمبود بارش و بیومس، حرکت به سمت فروپاشی و بیابانی شدن است. بنابراین در این تحلیل، بیابان اکوسیستم پایداری است که از دید ترمودینامیکی به مرگ انرژی رسیده است.

۷- نتیجه گیری

بیابانی شدن، یک فرایند سریع و کاتاستروفیک در فروپاشی ناگهانی حالت پوششی اکوسیستم به حالت بیابان و عاری از پوشش اکوسیستم است. این پدیده کاتاستروف به وسیله تغییرات آرام در محیط رخ می دهد.

در همه اکوسیستم‌ها، تغییرات تدریجی در اقلیم، سطوح غذایی، زیستگاه ها و تغییرات زیستی مختلفی در حال وقوع و یا به وقوع پیوسته است. به طور کلی پاسخ و واکنش طبیعت به این تغییرات تدریجی در اکوسیستم به صورت خیلی آرام و ملایم است. مطالعه دریاچه‌ها، لندفرم‌ها، اقیانوس‌ها، جنگل‌ها و محیط های خشک نشان داده است که تغییرات ملایم و آرام می‌تواند منجر به یک حالت ثابت و پایدار شود. گرچه تنوع و گوناگونی رخدادهای طبیعی شرایط مختلفی را رقم می زند، اما بررسی‌ها موید این مطلب است که کاهش تحمل پذیری اکوسیستم موجب بروز و خلق حالات و وضعیت های ناپایدار در اکوسیستم می شود، یا به عبارتی موجب نزدیکی اکوسیستم به نقاط اوج و کاهش محدوده جذب یا محدوده پایداری دوجانبه می‌شود. از این رو استراتژی های مدیریت پایدار اکوسیستم باید بر روی حفظ آستانه‌های تحمل پذیری اکوسیستم تمرکز یابد (سپهر، ۱۳۹۱).

پاسخ اکوسیستم به شرایط و تغییرات محیطی گاه بصورت خطی برای تغییرات تدریجی و گاه بصورت

www.SID.ir

Archive of SID

Downloaded from uijs.ui.ac.ir at 10:37 IRST on Monday September 29th 2014

چین خورده و غیر خطی برای تغییرات ناگهانی است. در حالت چین خورده، عملا دو منطقه پایدار در منحنی تعادل سیستمی وجود خواهد داشت. نقاط چین خوردگی، به عنوان یک محدوده غیر پایدار یا دقیق‌تر منطقه با پایداری دوجانبه در راستای رسیدن اکوسیستم به دو منطقه پایدار مشخص و مطرح هستند. این نقاط انشعابی چین خورده را نقاط اوج اکوسیستمی گویند.

با توجه به تحلیل‌های بحث شده، بیابان مرحله فروپاشی یک اکوسیستم محسوب می‌شود، به عبارتی تغییرات کاتاستروفیک، اکوسیستم را از حالت پوششی به حالت بایر رسانده است. در اینجا عملا نزدیکی سیستم به آستانه‌های کاتاستروفی، پدیده افت اکوسیستمی و کاهش بازسازی، اکوسیستم را به مرگ نزدیک تر می‌کند. می توان با بررسی علایمی، نزدیکی اکوسیستم را به آستانه های بحرانی تشخیص داد. بررسی دینامیک الگوهای پوشش گیاهی، علایمی هشدار دهنده برای اکوسیستمی زنده و پویا محسوب می‌شوند که با مطالعه آنها، با مدیریت اصولی، می‌توان پایداری اکوسیستمی را حفظ نمود. این پژوهش از نخستین گام‌های برداشت شده در تحلیل ترمودینامیکی پدیده بیابانی شدن در ایران محسوب می‌شود و انتظار می‌رود ادامه تحقیقات این پژوهش به ارائه مدلی ترمودینامیکی برای تحلیل پایداری اکوسیستم و پیش‌بینی بیابانی شدن منجر شود.

سپاسگزاری

این مقاله بخشی از تحقیقات انجام یافته در قالب طرح پژوهشی کد ۱۰۰۶۱۹ با قرارداد ۱۵/۲۸۷۴۰ است که با حمایت‌های مالی و معنوی مدیریت ارتباط علمی دانشگاه و جامعه (معاونت پژوهش و فناوری) دانشگاه فردوسی مشهد و معاونت علمی-فناوری ریاست جمهوری (بنیاد ملی نخبگان) در حال انجام است. نویسنده مقاله بر خود لازم می‌داند از تمام یاری دهندگان طرح در سازمان‌های یاد شده تشکر و قدردانی نماید.

منابع

اختصاصی، محمدرضا و عادل سپهر، ۱۳۹۰. روش‌ها و مدل‌های ارزیابی و تهیه نقشه بیابانزایی، انتشارات دانشگاه یزد، چاپ اول، ۲۸۸ ص

سپهر، عادل و ناصر پرویان، ۱۳۹۰. تهیه نقشه آسیب پذیری بیابانزایی و اولویت بندی راهبردهای مقابله در اکوسیستم‌های استان خراسان رضوی بر پایه الگوریتم نارتبه ای پرامسه، پژوهشهای دانش زمین، سال دوم، شماره ۸، ۷۱-۵۸

سپهر، عادل، ۱۳۹۱. هبوط و عروج اکوسیستمی: پارادایم ارتجاع اکوسیستمی و پارادوکسی بنام توسعه پایدار، ارائه شده در اولین کنفرانس ملی راهکارهای دستیابی به توسعه پایدار در بخشهای کشاورزی، منابع طبیعی و محیط زیست، اسفندماه ۱۳۹۱، وزارت کشور.

Ahnert, F., 1960. Estuarine meanders in the Chesapeake Bay area. Geogr. Rev., 50: 390-401.

Ahnert, F., 1967. The role of the equilibrium concept in the interpretation of landforms of fluvial erosion and deposition. In: P. Macar (Editor), L'Evolution des Versants. Universit6 de Liege, pp. 23-41

Ahnert, F., 1970. Functional relationships between denudation, relief and uplift in large mid-latitude drainage basins. American Journal of Science, 268: 243-263

Ahnert, F., 1971. A general and comprehensive theoretical model of slope profile

www.SID.ir

Archive of SID

D'Odorico, P., et al., 2005. Noise-induced stability in dry land plant ecosystems. Proc. Natl. Acad. Sci. USA 28, 10819–10822.

Dakos V, Scheffer M, van Nes EH, Brovkin V, Petoukhov V, 2008. Slowing down as an early warning signal for abrupt climate change. Proc Nat Academic Science USA 105: 14308–14312.

Díaz-Sierra, R., et al., 2010. Positive interactions, discontinuous transitions and species coexistence in plant communities. Theor. Popul. Biol. 77, 131–144.

Kéfi S, Rietkerk M, van Baalen M, Loreau M, 2007. Local facilitation, bistability and transitions in arid ecosystems. Theor Popul Biol 71:367–379

Klausmeier CA, 1999. Regular and irregular patterns in semiarid vegetation. Science 284:1826–1828

Scheffer M, Carpenter S, Foley JA, Folke C, Walker B, 2001. Catastrophic shifts in ecosystems. Nature 413:591–596

Sherratt JA, 2005. An analysis of vegetation stripe formation in semiarid landscapes. J Math Biol 51:183–197

Turing AM, 1952. The chemical basis of morphogenesis. Philos Trans R Soc Lond B 237:37–72

von Hardenberg J, Meron E, Shachak M, Zarmi Y, 2001. Diversity of vegetation patterns and desertification. Phys Rev Lett 8719:198101-1–198101-4

development. Univ. Maryland Occ. Pap. Geogr., 1 :95 pp.

Ahnert, F., 1976. Brief description of a comprehensive three-dimensional process-response model of landform development. Z.

Ahnert, F., 1977. Some comments on the quantitative formulation of geomorphological processes in a theorectical model. Earth Surf. Process., 2: 191-201.

Ahnert, F., 1982. Untersuchungen tiber das Morphoklima und die Morphologie des lnselberggebietes von Machakos, Kenia. Catena Suppl., 2: 1-72.

Ahnert, F., 1984. Local relief and the height limits of mountain ranges. American Journal of Science, 284: 1035-1055.

Ahnert, F., 1987a. Process-response models of denudation at different spatial scales. Catena Suppl., 10: 31-50.

Ahnert, F., 1987b. Approaches to dynamic equilibrium in theoretical simulations of slope development, Earth Surface Process Landforms, 12: 3-15.

Ahnert, F., 1988. Modelling landform change. In: M.G. Anderson (Editor), Modelling Geomorphological Systems. Wiley, Chichester, pp. 375-400.

Ahnert, F., 1994. Randomness in geomorphological process response models. In: M.J. Kirkby (Editor), Process Models and Theoretical Geomorphology. Wiley, Chichester, pp. 3-21.

Downloaded from uijs.ui.ac.ir at 10:37 IRST on Monday September 29th 2014

www.SID.ir