نظریه ی آشوب، فرکتال(برخال) و سیستم های غیر خطی در ژئومورفولوژی

امیر کرم*
استادیار، گروه جغرافیا، دانشگاه تربیت معلم

چکیده

از دیدگاه ژئومورفولوژی سیستمی، برخی سیستم های ژئومورفیک، سیستم های دینامیکی پیچیده ی غیرخطی هستند که رفتار آشوبناک، تصادفی و غیر قابل پیش بینی دارند. نظریه ی آشوب در ژئومورفولوژی سعی دارد این سیستم های غیرخطی و بسیار حساس به شرایط اولیه را مورد مطالعه قرار دهد. سیستم های ژئومورفیک در عین حال خود سازمانده بوده و حالت فرکتال(برخال) دارند. این ویژگی را می توان در بسیاری از سیستم های جریانی، حرکت های توده ای، سیستم خاک و زمین های مرطوب ساحلی مشاهده کرد. با استفاده از نظریه ی آشوب می توان بین فرم (بُعد فرکتال) و فرآیند(خودسازماندهی) در پدیده های ژئومورفولوژیک روابطی را برقرار کرد. نظریه ی آشوب به درک، تحلیل و پیش بینی پذیری سیستم های ژئومورفیک کمک می کند. پیچیدگی سیستم های ژئومورفیک و حالت آشوبناک آن ها به حدی است که نمی توان قواعد اساسی ریاضی و فیزیک را با قطعیت برای آن ها به کارگرفت و در مقیاسی بزرگ تعمیم داد. لذا دیدگاه های جدید سعی دارند برای تحلیل و شبیه سازی رفتار پیچیده ی سیستم های غیرخطی در ژئومورفولوژی از قواعد ساده و خرد مقیاس(فیزیک و ریاضی) در قالب مدل های سلولی اتومات استفاده کنند.

واژگان کلیدی: نظریه ی آشوب، فرکتال(برخال)، سیستم های غیرخطی، خودسازمانده، پیچیدگی، ژئومورفولوژی سیستمی.

مقدمه

در دهه های اخیر تحولی بزرگ در علوم طبیعی رخ داده، این تحول در شیوه ی درک و تبیین پدیده ها، به وسیله ی دانشمندانی صورت گرفته که پیش از این تبیین های خود را در قالب های منظم و مشخص ارائه می کردند. آنان پیشتر جهان را مجموعه ای از سیستم هایی تصور می کردند که مطابق با قوانین جبری و تعینی[1] طبیعت به صورتی مشخص و قابل پیش بینی در حرکتند و از این رو، معتقد بودند معلول ها به صورت خطی، برآیند علل خاصی هستند.

در حال حاضر آن ها بر نقش بی نظمی و آشوب[2] تاکید می کنند و جهان را مجموعه ای از سیستم هایی می دانند که به شیوه هایی خود سازمانده[3] عمل می کنند و پیامد آن وجود حالات غیر قابل پیش بینی است. اما در این شرایط، قوانین جبری طبیعی کماکان حاکمیت دارند و مشخص شده که سیستم ها به شیوه ای دورانی عمل می کنند که در آن بی نظمی منجر به نظم و نظم منجر به بی نظمی می شود. امروزه دیگر تصور

* نویسنده مسئول : ۰۹۱۲۶۶۵۸۲۷۰
E-mail: karam@tmu.ac.ir

1- Deterministic 2- Chaos 3- Self-Organized

ساده از نحوه ی فعالیت جهان جای خود را به تصوری پیچیده و پارادوکس گونه داده. این ایده ها و عقاید جدید، تئوری پیچیدگی[1] نامیده می شود و جنبه ای از این علم که توجه همگان را به خود جلب کرده، تئوری آشوب[2] یا نظم در بی نظمی نام دارد. نظریه ی آشوب یا نظم در بی نظمی سعی دارد ابزار حل مسائل پیچیده در محیط پرآشوب و آکنده از تغییر و تحول امروز و فردا را در اختیار انسان قرار دهد.

اعتقاد به آشوب و رابطه ی آن با نظم از دیر باز وجود داشته، در اندیشه و اسطوره های چین باستان، اژدها نماینده ی نظم یعنی یانگ[3] است که از آشوب سربر می آورد. هزیود[4] شاعر یونانی قرن هشتم پیش از میلاد نیز در سروده های خود می گوید که "نخست آشوب بوجود آمد. "ظاهرا مردمان باستان هم معتقد بوده اند که آشوب مقدم بر نظم است و به بیانی دیگر نظم از بی نظمی حاصل می شود (سردار، ۱۳۷۹، ۳).

نظریه آشوب، گسترش خود را بیشتر مدیون کارهای هنری پوانکاره[5]، ادوارد لورنز[6]، بنوا مندلبروت[7] و برخی دانشمندان دیگر است. پوانکاره اولین کسی بود که ثابت کرد، مساله سه جسم[8]، مسئله‌ای آشوبناک[9] و غیر قابل حل است. مسئله ی سه جسم به محاسبه و تعیین مدار حرکت قمرها ی طبیعی به دور یک سیاره اشاره دارد. پوانکاره بیان کرد که اگر یک قمر دوم به قمر اول یک سیاره اضافه شود، به دلیل اعمال نیروی غیر خطی جاذبه ی سه جسم بر یکدیگر، محاسبه ی مدار حرکت قمرها مسئله ای آشوبناک و غیر قابل حل است. تئوری آشوب برای اولین بار در سال ۱۹۶۵ توسط ادوارد لورنز در هواشناسی به کار رفت و وی آن را به یک علم تبدیل کرد. گریک[10] (۱۹۸۷) و پرسیول[11] (۱۹۸۹) سیر تاریخی آن را تبیین کردند و استوارت[12] (۱۹۸۹) و جنسین[13] (۱۹۸۷) به توضیح و تشریح مبانی اساسی این تئوری پرداختند (رامشت،۱۳۸۲، ۱۵). تئوری آشوب سپس در حیطه تمام علوم و مباحث تجربی، ریاضی، رفتاری، مدیریتی و اجتماعی وارد شد و باعث شکل گیری دیدگاه هایی جدید در علوم به ویژه هواشناسی، ژئومورفولوژی، نجوم، مکانیک، فیزیک، ریاضی، زیست شناسی، اقتصاد و مدیریت گردید.

در طبیعت و فرآیندهای حاکم بر آن نیز می توان نظم و آشوب را مشاهده کرد. پدیده های طبیعی در حالت معمول از نوعی نظم برخوردارند، چنانچه به هر دلیلی شرایط عادی بر هم خورد بی نظمی و آشوب رخ می دهد، اما سیستم های طبیعی معمولا از طریق بازخورد به یک خود تنظیمی و نظم مجدد دست می یابند. ژئومورفولوژی با فرآیندهای طبیعی و فرم ها سروکار داردو ژئومورفولوژیست ها علاقه مندند که کاربرد و سودمندی ایده ها و روش های نظریه ی آشوب را در ژئومورفولوژی کشف کنند. ایده وروش هایی که غیر خطی بودن در فرآیند های طبیعی را نشان دهد. ژئومورفولوژیست ها معتقدند که رفتار آشوبناک و خود سازمانده در سیستم های زمینی معمول است و حالات پایدار، نسبتا غیر معمولند. با این وجود رفتار آشوبناک به مقیاس وابسته بوده و ممکن است در مقیاس هایی دیگر، رفتار منظم رخ دهد. آشوب در

1- Complexity theory 2- Chaos theory 3- Yang 4- Hesiod 5- Henri Poincare 6- Edvard Lorenz 7- Benoit Mandelbrot 8- Three body 9- Chaotic 10- Glerick (1987) 11- Percival (1989) 12- Percival (1989) 13- Jensen (1987) 14- Disequilibrium

ژئومورفولوژی بیشتر مربوط به مقوله ی ناتعادلی است و این مفهوم در ژئومورفولوژی ترمودینامیک یا سیستمی تبیین پذیر است(رامشت، ۱۳۸۲، ۱۸).

ادبیات موضوعی آشوب و مفاهیم مرتبط باآن در ژئومورفولوژی نسبتا جدید است. برای مثال هاگت[1] (۱۹۸۸) کاربرد این تئوری را در ژئومورفورلوژی بیان کرد، دای[2] (۱۹۸۱) و لورنز[3] (۱۹۸۹) نیز این تئوری را در جغرافیای انسانی و سیستم های اقتصادی مورد بحث قراردادند(رامشت، ۱۳۸۲، ۱۵). مالانسون و همکاران[4] (۱۹۹۰) نظریه ی آشوب در جغرافیای طبیعی را بررسی کردند (مالانسون و همکاران،۱۹۹۰). فیلیپس[5] (۱۹۹۲) اثر بالا آمدن آب سواحل دریا و تاثیر آن بر سیستم ژئومورفیک اراضی مرطوب را مطالعه کرد (فیلیپس، ۱۹۹۲). رودریگوئز- ایتارب و رینالدو[6] (۱۹۹۷) مسئله ی فرکتال[7] (برخال)[8] و خود سازماندهی در حوضه های رودخانه ای را مورد بررسی قراردادند (رودریگوئز- ایتارب و رینالدو، ۱۹۹۷). فیلیپس مجداد در سری مقالاتی در کتاب خود تحت عنوان "سیستم های سطح زمین،" وجود آشوب در رواناب سطحی، تکامل دامنه ها، اراضی مرطوب ساحلی و سیستم های خاک را بررسی کرد (فیلیپس، ۱۹۹۹). باآس[9] (۲۰۰۲) آشوب، فرکتال ها و خود سازماندهی در ژئومورفولوژی ساحلی را مطالعه کرد (باآس، ۲۰۰۲). کین و همکاران[10] (۲۰۰۲) رفتار آشوبناک در سیستم حرکت توده ای را بررسی کردند (کین و همکاران، ۲۰۰۲). فونستادزوز مارکوس[11] (۲۰۰۳) به مطالعه ی خودزسازماندهی در سیستم های ساحل رودخانه ای پرداختند (فونستاد و مارکوس، ۲۰۰۳) و پلتیر[12] (۲۰۰۷) رفتار فرکتال در لندفرم های جریانی را مورد مطالعه قرار داد(پلتیر، ۲۰۰۷). در ایران، نظریه آشوب و مفاهیم مرتبط به آن در ژئومورفولوژی اول بار به وسیله رامشت (۱۳۸۰) مطرح شد(رامشت،۱۳۸۰، ۸۹) وبسط کامل ترآن بعدا در مقاله ای با عنوان "نظریه کیاس و کاربرد آن در ژئومورفولوژی" به وسیله ی وی ارائه شد. رامشت در این مقاله ضمن تشریح این نظریه، جایگاه و کاربرد آن در ژئومورفولوژی را بیان کرد و نمونه هایی از کیاس (آشوب) در دره های هنجن و طامه ی منطقه ی کاشان را مورد بررسی و بحث قرارداد (رامشت، ۱۳۸۲، ۳۶-۱٤).

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

نظریه ی آشوب

آشوب در لغت به معنی در هم ریختگی، آشفتگی و بی نظمی است و مترادف آن در مکانیک توربولانس یا تلاطم می باشد. این واژه به معنی فقدان هرگونه ساختار یا نظم است و معمولا در محاورات روزمره آشوب و آشفتگی نشانه بی نظمی و سازمان نیافتگی به نظر می رسد و جنبه منفی در بر دارد. اما در واقع با پیدایش نگرش جدید و روشن شدن ابعاد علمی و نظری آن امروزه دیگر بی نظمی و آشوب به مفهوم سازمان نیافتگی، ناکارائی و در هم ریختگی تلقی نمی شود بلکه بی نظمی، وجود جنبه های غیرقابل پیش بینی در

1- Huggett (1988) 2- Day (1981) 3- Lorenz (1989) 4- Malanson et al .(1990) 5- Rodrigues-Iturbe & Rinaldo (1997) 6- Rodrigues - Iturbe & Rinaldo (1997) 7- Fractal

۸- برخال از دو واژه فارسی "برخ" به معنی شکستن (fraction) و پسوند " ال" به معنی مرتبط، ساخته شده، مثل چنگال و پوشال

9- Baas(2002) 10- Qin, et al. (2002) 11- Fonstad & Marcus (2003) 12- Pelletier (2007)

پدیده های پویاست که ویژگی خاص خود را داراست. آشوب نوعی بی نظمی منظم[1] یا نظم در بی نظمی است. بی نظم از آن رو که نتایج آن غیر قابل پیش بینی است و منظم به آن جهت که از نوعی قطعیت برخوردار است. بی نظمی در مفهوم علمی یک مفهوم ریاضی محسوب می شود که شاید نتوان خیلی دقیق آن را تعریف کرد اما می توان آن را نوعی اتفاقی بودن همراه با قطعیت دانست. قطعیت به خاطر این که بی نظمی دلایل درونی دارد و به علت اختلالات خارجی رخ نمی دهد و اتفاقی بودن به دلیل آن که رفتار بی نظم، بی قاعده و غیرقابل پیش بینی دقیق است.

نظریه ی آشوب به مطالعه ی سیستم‌های دینامیکی آشوبناک[2] می‌پردازد. سیستم‌های آشوبناک، سیستم‌های دینامیکی غیر خطی[3] هستند که نسبت به شرایط اولیه‌شان بسیار حساس‌اند. تغییری اندک در شرایط اولیه ی چنین سیستم‌هایی باعث تغییرات بسیار در آینده خواهد شد.این پدیده به اثر پروانه ای[4] مشهور است.

در سال ۱۹۶۰ هواشناس آمریکایی ادوارد لورنز برای شبیه سازی سیستم های جوی از معادلات غیر خطی استفاده کرد. او در خلال مطالعاتش به این نکته پی برد که تغییرات کوچک (حتی یک هزارم) در شرایط اولیه باعث تغییرات زیادی در نتیجه می شود و تنها با گرد کردن اعداد بعد از چهارمین رقم اعشار در محاسبات اختلاف بزرگی در نتیجه حاصل خواهد شد. او این تمثیل را به کار برد که اگر پروانه ای در برزیل بال هایش را به هم بزند، آیا نتایج حاصل از برخورد بال این پروانه با هوا می تواند باعث توفانی در تگزاس بشود؟

لورنز برای مدل سازی عمل رفتار آشوبناک سیستم گازی در آتمسفر سه معادله از عرصه ی فیزیک و دینامیک سیالات به عاریه گرفت(شکل ۱). اختلاف درجه حرارت بین بالا و پایین یک سیستم گازی، انحراف دمای نرمال و دامنه ی جریانات همرفتی متغیرهایی بودند که او به کار گرفت. لورنز یک مدل ساده ی اقلیمی مشتمل بر سه معادله ی غیر خطی را بسط داد که در آن، سیستم برای ایجاد جریان همرفت از پایین گرم می شد. معادلات تغییر در شدت حرکت همرفتی(X)، نوسانات افقی دما(Y) و نوسانات عمودی دما (Z) در طی زمان را نشان می دادند. او با ارائه سه معادله دیفرانسیل حالتی را بیان کرد که در آن تابع به صورت آشوبناک در می آید و در اصطلاح به آن آشوب می گویند. علی رغم سادگی، این سیستم مدل سازی شده رفتار آشوبناکی از خود نشان داد که بر رفتار غیر قابل پیش بینی این نوع سیستم ها دلالت داشت. رفتار آشوبناک در سیستم ها با استفاده از دیاگرام های فاز[5] مشخص می شود.

1- Orderly Disorder 2- Chaotic dynamic systems 3- Non-linear Dynamic Systems 4- Butterfly effect
5- Phase diagrams

Lorenz Equations

$$\frac{dx}{dt} = \sigma(y(t) - x(t))$$
$$\frac{dy}{dt} = -y(t) - x(t)z(t) + \rho x(t)$$
$$\frac{dz}{dt} = x(t)y(t) - \beta z(t)$$

Constants : $\sigma = 3$; $\rho = \frac{268}{10}$; $\beta = 1$ (These values determine the behavior of the trajectory)

Initial Conditions : $x(t) = 0$; $y(t) = 1$; $z(t) = 0$

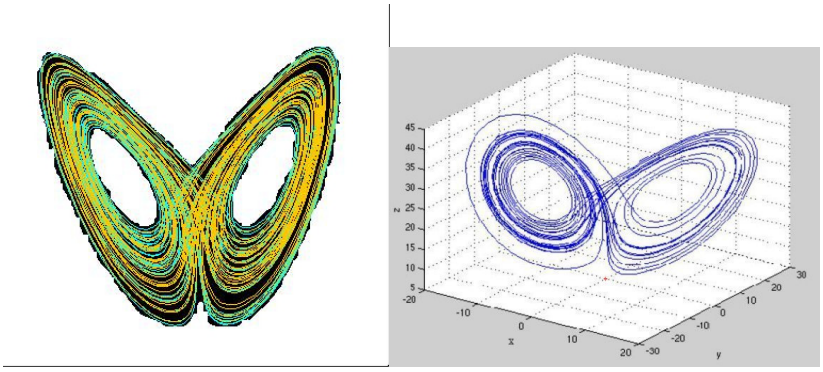
$x(t)$ → amplitude of convective currents
$y(t)$ → temperature difference between rising and falling air currents
$z(t)$ → normal temperature deviation
t → time step

شکل ۱: معادلات لورنز برای مدل سازی رفتار آشوبناک سیستم اقلیم

این دیاگرام ها حالت سیستم در زمان بر حسب متغیرها را روی نمودار ترسیم می کنند.مثلا در مدل لورنز، دیاگرام فاز، هر نقطه از زمان را در تکامل سیستم بر روی X، Y و Z در محور مختصات رسم می کند. یک سیستم پایدار[1] دیاگرام فازی دارد که در یک نقطه همگرا می شود و یک سیستم دوره ای یا نوسانی[2]، دیاگرام فاز شبه حلقوی دارد. چنین شکل هایی بر روی دیاگرام فاز، رباینده‌ها[3] نام دارند.

دیاگرام های فاز، سیستم های آشوبناکی هستند که به وسیله ی رباینده‌های شگفت[4] (نامتجانس) به نمایش در می آیند (الگوهای پیچیده ی دوشاخه ای که حالت های ممکنه ی یک سیستم در جریان زمان را نشان می دهند). برای مثال مدل لورنز، رباینده شگفتی دارد که شبیه پروانه یا صورتک جغد است (شکل ۲). رباینده‌های شگفت، فرکتال[5] یا برخال هستند. به تصویرهای شکل(۲) سیستم خط سیرلورنز[6] هم گفته می شود که فوق العاده به شرایط اولیه حساسند. رباینده لورنز، یک ساختار سه بعدی مطابق با رفتار دراز مدت جریان آشوبناک است که شکل پروانه وار دارد.

1- Stable system 2- Oscillating or periodic system 3- Attractors 4- Fractal 5- Lorenz Trajectory system



شکل ۲: راست: رباینشگر لورنز در حالت سه بعدی، **چپ**: رباینشگر لورنز در حالت دو بعدی

به عقیده ی مالانسون و همکاران (۱۹۹۰)، نظریه ی آشوب سه اصل مرکزی دارد :

۱- بسیاری از سیستم های ساده ی جبری و تعینی، به ندرت قابل پیش بینی اند؛

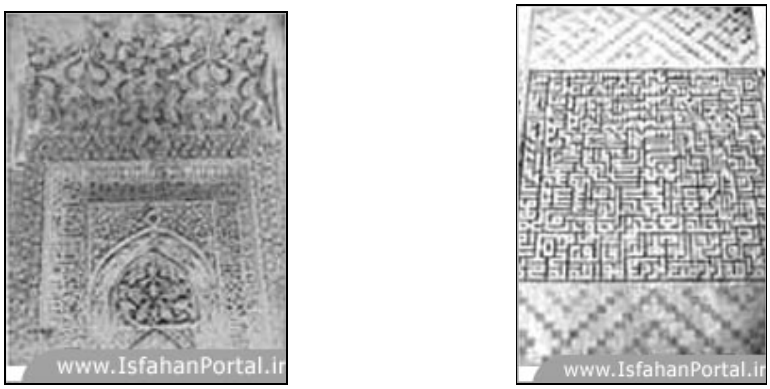
۲- برخی سیستم ها، حساسیت شدیدی نسبت به شرایط اولیه نشان می دهند. تغییر خیلی کوچکی در درونداد معادله در ابتدا، سبب بروندادهای به شدت بزرگ و متفاوت می شود؛

۳-پیوستگی و ترکیب اصل اول و دوم یک حالت تصادفی را بوجود می آورد که می تواند کلا منظم باشد (همان طور که رباینشگرهای شگفت در دیاگرام های فاز نشان می دهند).

فرکتال(برخال)

فرکتال یا رفتار فرکتالی در واقع رفتاری است که در طبیعت و هر چیزی که متمایل به داشتن یک حالت تعادلی است، وجود دارد.طبیعت اگر چه به ذات خود هوشمند نیست اما تغییرات خارجی که بر طبیعت اعمال می شود آن را به سمتی سوق می دهد که تغییر خارجی مذکور را خنثی کند. به عبارت دیگر چرخه اکوسیستم خودش را اصلاح می کند.به همین دلیل یکی از معانی که برای رفتار فرکتالی قایل می شوند "تغییر رفتار" می باشد که البته معنای صحیح تر آن تغییر رفتار برای رسیدن به یک تعادل کلی است.

در ریاضیات و هندسه نیز، هندسه فرکتالی در نقطه مقابل هندسه اقلیدسی قرار می گیرد. به تبعیت از هندسه فرکتالی در طبیعت، در معماری نیز این هندسه از قدیم الایام به وسیله معماران به ویژه معماران اسلامی استفاده شده. نمونه های بسیار زیادی از هندسه فرکتالی را می توان در معماری های سنتی و قدیمی اسلامی و ایرانی مخصوصا در معماری مساجد، بقعه ها و نقوش و تزئینات این نوع ساختمان ها مشاهده کرد. نمونه ای از آن را در معماری بقعه پیر بکران در نزدیکی اصفهان مربوط به سال های ۷۰۳ تا ۷۱۲ هجری می توان ملاحظه کرد(شکل ۳). هندسه فرکتال در معماری کلیساها و بناهای قدیمی اروپا نیز دیده می شود.



شکل ۳: نمونه هایی از معماری و تزئینات فرکتالی(برخال) در بقعه پیربکران در اصفهان

منبع : عکس ها: سایت پورتال اصفهان

با این وجود از نظر ریاضی و واژه شناسی لاتین، واژه فرکتال اولین بار توسط بنوا منـدلبروت ریاضـیدان فرانسوی لهستانی الاصل در سال ۱۹۷۵ ابداع شد. مندلبروت تحقیقات خود را از سال ۱۹۶۰ شروع کرد ولی اولین بار کلمه فرکتال را در مقاله ای در سال ۱۹۷۵ در مورد شکل سواحل انگلستان به کار بـرد. منـدلبروت وقتی بر روی تحقیقی پیرامون طول سواحل انگلیس مطالعه می کرد به این نتیجـه رسـید کـه هـر گـاه طـول سواحل با مقیاس بزرگ اندازه گرفته شود بیشتر از زمانی است کـه مقیـاس کـوچکتر باشـد. از لحـاظ واژه، مندلبروت اصطلاح فرکتال را از واژه لاتین Fractus یا Fractum (به معنی شکسته) برگرفـت تـا بـر ماهیـت قطعه قطعه شونده که یکی از مشخصه های اصلی این فرم است، تاکید داشته باشد. واژه فرکتـال بـه معنـای سنگی است که به شکل نامنظم شکسته شده باشد.

از دید هندسی به شیئی فرکتال یا شکنه گویند که دارای سه ویژگی باشد:

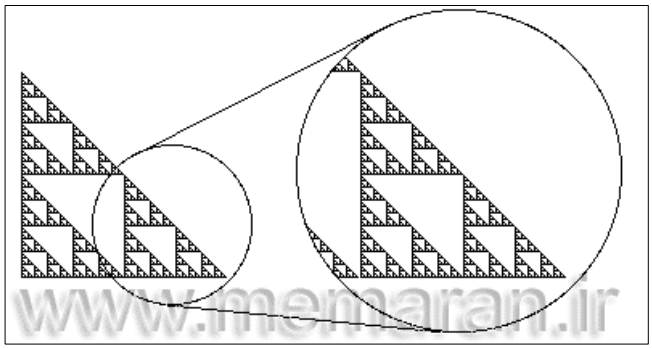
۱- اول این که دارای خاصیت خود همانندی[1] باشد؛

۲- در مقیاس خرد بسیار پیچیده باشد؛

۳- بُعد آن یک عدد صحیح نباشد(مثلاً ۱/۵ باشد).

پدیده های فرکتال خود همانند هستند یعنی در مقیاس هـای متفـاوت، جزییـات مـشابهی ازخـود نـشان می دهند(مثلا یک درخت کاج یا ریشه ی درختان و شکل ٤). در بسیاری از پدیده های ژئومورفولوژیکی هم چون شبکه های رودخانه ای و خطوط ساحلی این خود همانندی فرکتال قابل مـشاهده اسـت (بـرای مثـال براف[2] ۱۹۸۱). به این معنی که هرچه با دقت بیشتری به تصویر فرکتال نگاه شود، شکل هـا در یـک مقیـاس مشخص در جزییات شبیه شکل های دیگر در یک مقیاس دیگر اسـت. شـاخص و انـدازه ی کمـی سـازی مقیاس فرکتال ودخود همانندی، بُعد فرکتال[3] (D) می باشدکه ازطریق روابط ریاضی قابل محاسبه است. بُعـد فرکتال بزرگتر یعنی پدیده خیلی بی نظم است.

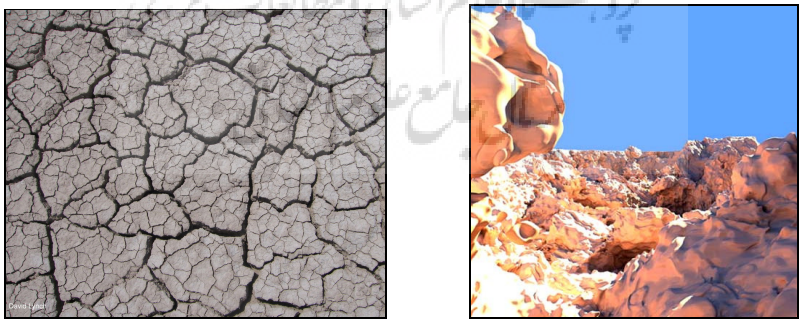
1- Self- similar
2- Burrough (1981)
3- Fractal dimension (D)


www.memaran.ir

شکل ٤: نمونه ای از یک شکل فرکتال(برخال)

شکل های فرکتالی با زندگی روزمره ی ما گره خورده، با کمی دقت به اطراف خود، می توان بسیاری از این اشکال را یافت. از گل فرش و گل کلم گرفته تا شکل کوه ها، ابرها، دانه برف و باران، شکل ریشه، تنه و برگ درختان و بالاخره شکل سرخس ها، سیاهرگ و حتی می توان از این هم فراتر رفت، سطح کره ماه، منظومه شمسی و ستارگان همه اشکال فرکتالی هستند(شکل ٥).

فرکتال(برخال) در پدیده ها وفرم های ژئومورفیک نیز دیده می شود.برخی الگوهای ژئومورفیک صرف نظر از مقیاس فضایی، شبیه به هم هستند. در عکس های هوایی بسترهای ریپل ها و پهنه های ماسه ای بدون حضور یک مقیاس فاصله ای مشخص، از همدیگر غیرقابل تمایزند.برخی شبکه های رودخانه ای به صورت آماری چه در مقیاس حوضه و چه در مقیاس زیرحوضه مشابه هم هستند. بسیاری از شکل های ژئومورفیک چنین خصوصیاتی را نشان می دهند که به آن ها تغییر ناپذیری در مقیاس[1] یا ژئومتری فرکتال گفته می شود.



شکل ٥: نمونه هایی از اشکال فرکتالی یا برخالی در طبیعت

1- Scale invariance

رفتار پدیده های تغییرناپذیر در مقیاس تحت عنوان خودسازماندهی بحرانی[1](SOC) مطالعه می شود. یکی از اصلی ترین دلایلی که علاقه مندی به 'بعد فرکتال را فزاینده کرد آگاهی از مسئله ی ارتباط سیستم های دینامیک اتلافی[2] و فضاهای فرکتال (و زمان) با هم بودواکنون مبانی نظری وجود دارد که می توان فرم(یعنی 'بعد) را به فرآیند ها(یعنی خود سازماندهی بحرانی) مرتبط کرد.

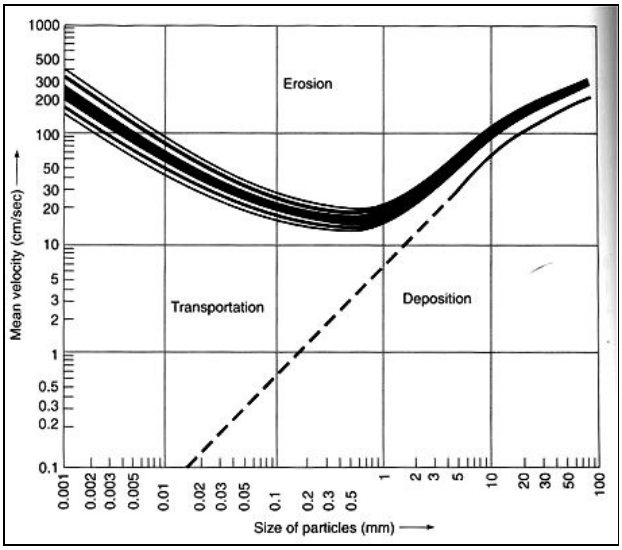
علومی مثل ژئومورفولوژی با متغیرهای ذاتی مرتبطند که خیلی دقیق قابل پیش بینی یا تکرار نیستند و حساسیت زیادی به شرایط اولیه دارند. اگر رخدادهای واقعی غیرقابل پیش بینی باشند، غیر قابل تبیین نیز هستند. فرکتال ها، اجزاء بنیادین روش هایی هستند که برای تحلیل یا مدل سازی این قبیل رخدادها و سیستم های غیرخطی و پیچیده در ژئومورفولوژی مورد نیازند. پلتیر (۲۰۰۷) نشان داد که ساختار فرکتال و آشوب شکل ذاتی تکامل لندفرم های جریانی است (پلتیر، ۲۰۰۷). الگوهای فرکتال، آشوب و خود سازماندهی در مقابل تفاسیر فرآیند مبنا، فرضیه های صفرقابل آزمونی را فراهم می آورند که می توانند به درک پیچیدگی های فرآیند و فرم کمک کنند.

دینامیک سیستم های غیر خطی

ژئومورفولوژیست ها از دیرباز می دانندکه لندفرم ها نتیجه ی برهم کنش های پیچیده در مقیاس های مکانی وزمانی متفاوتند(شوم ولیچی[3] ۱۹٦۵، شوم ۱۹۷۹، برانسدن وتورنز[4] ۱۹۷۹). این دیدگاه ها اخیرا ازطریق تلفیق یافته های علمی باروش ها وابزارهای تحلیلی توسعه یافته(در مبحث دینامیک سیستم های غیرخطی NSD در فیزیک و ریاضی)، تقویت شده وبسط یافته است.

واژه ی غیرخطی، روابط نابرابر بین نیروهای موثر یا تنش و پاسخ ژئومورفیک را بیان می دارد. منحنی کلاسیک سرعت آب هیول استروم[5] مثالی خوب در این زمینه است که اندازه ی دانه ها در رابطه با سرعت جریان و مراحل سه گانه ی حمل، فرسایش و نهشته گذاری را نشان می دهد(شکل ٦). این منحنی، یک منحنی غیر خطی است که نشان می دهد برونداد(اندازه ی رسوب) با درونداد(سرعت) متناسب نیست و فاکتورهایی همچون چگالی دانه و چسبندگی بین دانه ای نیز مهمند. ژئومورفولوژی یک چشم انداز نیز به وسیله ی برهم کنش آرایه ی عظیمی از چنین فرآیندهای فعال در بخش های مختلف چشم انداز و در مقیاس های زمانی متفاوت کنترل می شود.

1- Self-Organized Criticality (SOC)
2- Dissipative
3- Schumm & Lichty (1965)
4- Brunsden & Thornes(1979)
5- Hjulstrom



شکل ٦: منحنی سرعت/ اندازه ی دانه های هیول استروم(Hjulstrom) و روابط غیرخطی

در مثال دامنه ی ناپایدار، دینامیک غیرخطی به این معنی است که روابط بین شدت ریزش باران روی یک دامنه و اندازه و زمان یک زمین لغزش می تواند پیچیده و غیرخطی باشد و تنها یک عامل منفرد نمی تواند در آن موثر باشد. عقیده بر این است که همه ی سیستم های پیچیده، اجزاء بر هم کنشگری دارند که رفتار غیـر خطی دارند. برخی منابع و حالت های غیر خطی سیستم های ژئومورفیک در جدول (۱) ارائه شده اند.

جدول ۱: برخی منابع وحالت های غیرخطی

منبع غیر خطی	چرا غیر خطی است	مثال ها
آستانه ها	هرجا که آستانه وجود دارد، بروندادها یا پاسخ ها با درونداد متناسب نیستند.	نیروهای موثر در برابر نیروهای مقاومتی
اثرات انباره ای	اضافه شدن یا برداشت توده از محل باعث ایجاد تاخیر و کندی و ناپیوستگی در توازن روابط درونداد/ برونداد می شود.	حمل، انبارش و نهشته گذاری رسوب
اشباع و تخلیه	اثرات تغییر در درونداد یا تغییرات اعمال نیرو در رابطه با مقدار بهینه	تاثیر رطوبت موجود در نرخ هوازدگی، تاثیر ضخامت خاک/ رگولیت بر هوازدگی سنگ بستر
خودنیرودهی، بازخورد مثبت	تغییرات یا آشفتگی باعث افزایش رشد درونی وتقویت نیروهای بیرونی می شود.	توسعه ی انحلال در چاله ها ونیواسیون[1] در حفره ها، افزایش تغییرات در هوازدگی/ مقاومت فرسایش، برتری پدیده های جریانی
خودسازماندهی	سازگاری پیچیده ومستقل از نیروهای بیرونی	برهم کنش جریان/ فرم بستر، زمین های نقش دار پریگلاسیر، شبکه های رودخانه ای

منبع: فیلیپس (۲۰۰٦)

1- Nivation

جذابیت دینامیک سیستم غیرخطی به خاطر دستیابی به درکی کلی در مورد رفتار سیستم های ژئومورفیک است. یعنی درک رفتارهایی که به طور معمول در روش های عرفی میدانی قابل مشاهده نیستند. به علاوه بینش حاصل از دینامیک سیستم های غیر خطی، امکان نگاشت مدل های شناخته شده در سیستم های واقعی را فراهم می آورد. در عمل بر سر تشریح وجود یک مدل در سیستم های واقعی و این که ایده های دینامیک غیر خطی مفیدند، مباحثه وجود دارد. با این وجود دینامیک های غیر خطی در موارد ذیل بینش و اطلاعات سودمندی را فراهم کرده اند:

۱- امکان پذیری و عدم امکان پذیری پیش بینی پدیده های ژئومورفیک؛

۲- تمایزبین تغییرات ژئومورفیک جبری (بیرونی) و خود بخودی[1]؛

۳- حساسیت و برگشت پذیری[2] چشم اندازها نسبت به اثرات؛

٤- کاربرد روش شناسی ها، مقیاس های مدل سازی و مفهوم سازی مناسب در ژئومورفولوژی.

برای تشریح رفتار سیستم های غیرخطی، شناخت و تمایز تغییرات ذاتی(درونی) و بیرونی لازم و مفید است. تغییرات ذاتی به صورت خود به خودی ازطریق خود سازماندهی به عنوان بخشی از دینامیک خود سیستم بدون دخالت هر نیروی موثر خارجی رخ می دهند (مثل ایده ی تحول بیولوژیکی). در این زمینه تبیینی به نام پیکان زمان[3] ارائه شده که تلویحا در قانون دوم ترمودینامیک بیان شده و پیش بینی می کند که هر سیستم به سوی یک نقطه ی تعادل حرکت کرده و توسعه می یابد، یعنی جایی که انرژی آزاد کمینه و آنتروپی (بی نظمی) ترمودینامیک بیشینه می شود. لذا در مثال جریان آب، انرژی آزاد بر سازماندهی شبکه ی رودخانه ای به ویژه تراکم زهکشی تاثیر می گذارد به طوری که پتانسیل کل آب برای فرسایش و حمل رسوب در سراسر چشم انداز کمینه (پخش) می شود، همان گونه که در چرخه ی کلاسیک تحول چشم انداز دیویس، تعادل ترمودینامیک زمانی حاصل می شود که ناهمواری به یک سطح دشتگون (پنه پلین) تبدیل شود. با تمام این احوال سطح زمین کاملا به وسیله ی دشتگون ها پوشیده نشده بلکه از یکسری آرایه ها و فرم های دیگر ژئومورفیک تشکیل شده. واضح است که اغلب چشم اندازها برای خود پیکان زمان تحول خاصی (یعنی نقطه تعادل) دارند. بنابراین با در نظرگرفتن ایده ی پیکان زمان، رفتارهای دیگری وجود دارد که سیستم ژئومورفیک را به عنوان یکسری نقاطی تشریح می کند که از تعادل خیلی دورند و از آن ها تحت عنوان سیستم های اتلافی (پراکنده ساز) یاد می شود(پریگوگاین[4]، ۱۹۹٦).

یکی از این رفتارها پیچیدگی در سیستم است. پیچیدگی، شرایط سیستم های باز و اغلب بخش بندی شده ای را توصیف می کند که حالات منظم ناشی از جریان های انرژی درون سیستم را نشان می دهند. در خلال مقیاس های زمانی انسانی، فرم این حالات غیر قابل تغییر به نظر می رسد اما در مقیاس های زمانی

1- Spontaneous
2- Resilience
3- Arrow of time
4- Perigogaine (1996)

طولانی تر این سیستم ها رشد کرده و پیچیده و منظم می شوند، همان طور که در هوازدگی پیشرفته، سنگ به افق های خاکی تبدیل می شود که پشتیبان یک اکوسیستم پیچیده ی زمینی است.

سیستم های پیچیده، سیستم های پویای غیرخطی هستند که به وسیله ی نظریه ی آشوب مطالعه می شوند و در آن ها تعدادزیادی متغیر مستقل به طرق مختلف با هم در تعاملند. سیستم های پیچیده قابلیت آن را دارند که میان آشوب و نظم توازن برقرار کنند.

حالت دیگر رفتار آشوبناک[1] است. آشوب در معادلات ریاضی به راحتی دیده می شود (مثل آشفتگی جریان آب) امادرژئومورفولوژی دلالت ها و شواهد آن ساده وخیلی روشن نیست. رفتار آشوبناک به این معنی است که مسیر فرآیندهای بر هم کنشگر در طول زمان به شرایط اولیه وکوچکترین انحراف و اختلال بیرونی خیلی حساس است.سیستم آشوبناک، سیستم ناپایداری است که به موازات آن که سیستم حرکتش را از نقطه ی شروع آغاز می کند، به طور پیشرونده غیر قابل پیش بینی می شود. با این وجود مدل سیستم های آشوبناک همان طور که پیشتر ذکر شد در محدوده های خوب شناخته شده ی ربایشگر ها قرار می گیرد. سیستم های ژئومورفیک به نیروهای بیرونی مثل اقلیم و فعالیت های انسانی نیز واکنش نشان می دهند. ماهیت واکنش به نیرو و شرایط سیستم بستگی دارد و واکنش می تواند با تاخیر زمانی به صورت باز خورد و برگشت پذیر و یا برگشت ناپذیر(به حالت اول) باشد.

شناخت دینامیک سیستم های غیرخطی به تعریف حساسیت یا حالت برگشت پذیری (به حالت اول) سیستم ژئومورفیک کمک می کند. مفهوم و شواهد سیستم های غیرخطی در ژئومورفولوژی شناخته شده اند و پذیرفته ایم که برخی برونـدادهای ژئومورفیک غیر قابل پیش بینی و در طول تاریخ چشم اندازها تصادفی اند.

پذیرش این مسئله نوعی کاهش گری[2] است، یعنی نوعی روش شناسی که در آن برون یابی قواعد بزرگ مقیاس ریاضی برای سیستم های غیر خطی ناممکن است (لین وریچاردز[3]،۱۹۹۷). در این رابطه بیان شده که مسئله ی پارادوکس (ناسازگاری) مفاهیم نگاشت سیستم های غیر خطی و چشم انداز واقعی(مسئله کاهش‌گری)، از طریق مدل های محاسباتی با قواعد ساده قابل حل است. این دانش جدید برای شبیه سازی سیستم‌ها، وقتی که سلول های بر هم کنشگر حاوی قواعد ساده در مراحل زمانی متوالی باشند از مدل سلول های اتومات[4] استفاده می کند. مدل های رسوب و جریان آب بر اساس شبکه های سلولی و معادلات ساده، توانمندی زیادی را برای شبیه سازی توسعه ی فضایی فرم های ژئومورفیک پیچیده و با رفتار غیر خطی، از خود نشان داده اند (ولفرام[5]، ۲۰۰۲).

1- Chaotic behavior
2- Reductionism
3- Lean & Richards(1997)
4- Cellular automata
5- Wolfram (2002)

خودسازماندهی بحرانی

وقتی یک سیستم دور از تعادل وارد یک دوره ی آشوبناک شود خودبخود به سطح متفاوتی از نظم دست می یابد و این درواقع خودسازماندهی است. خود سازماندهی بحرانی رویکردی برای شناخت سیستم های غیرخطی است که توسط بک[1] ابداع شد و در کتابی با نام" طبیعت چگونه کار می کند "تشریح شد (بک، ۱۹۹۷). خود سازماندهی بحرانی رویکردهای جدید نظریه ی آشوب، نظریه ی پیچیدگی و فرکتال را با هم مرتبط و تلفیق کرده و در صدد است تبیین های بهتری برای رفتار پیچیده ی سیستم های غیر خطی فراهم آورد.

ژئومورفولوژیست هااخیر اً به ایده ی خود سازماندهی بحرانی علاقه مند شده اند چون این ایده به تشریح بسیاری از چشم اندازهای پیچیده کمک می کند. مثلا چرا و چگونه الگوهای منظمی از قبیل شبکه های رودخانه ای، جویبارها، پلیگون های سنگی، پشته های ماسه ای ساحلی و سیستم های ماسه ای شکل گرفته و توسعه می یابند؟ برای پاسخ به این پرسش ها رویکردهای کاهش گرایانه امیدوارند که فیزیک پایه و فرآیندهای عملگر در مقیاس خرد را مطالعه کنند و یک پاسخ کلی بدهند. با این وجود چنین رویکردهایی نمی توانند ارتباط کاملا موفقیت آمیزی بین فرآیندها و الگوها در مقیاس های مختلف بیابند. آیا چنین الگوهایی در عوض می توانند مثال هایی از خود سازماندهی بحرانی باشند؟ در جایی که الگوهای منظم از رفتار پیچیده ی فرآیندهای کوچک مقیاس تر نشات گرفته اند؟

در بررسی چنین سیستم هایی، بسیاری از ژئومورفولوژیست ها از مدل های سلولی با قواعد ساده برای بیان بر هم کنش بین سلول های مجاور کمک گرفته اند. الگوها به موازات آن که این مدل ها اجرا می شوند در یک مقیاس بزرگتر از این قواعد ساده پیروی می کنند. مثال های متعددی برای کاربرد مدل های سلولی در بررسی خودسازماندهی بحرانی در سیستم های ژئومورفیک وجود دارد. ورنر[2] (۱۹۹۵) شکل گیری پشته های ماسه ای ساحلی را مطالعه کرد و پی برد که آن ها از طریق مدل سلولی و براساس بر هم کنش جریان آب، حمل رسوب و تغییرات شکل شناختی قابل شبیه سازی هستند(ورنر، ۱۱۰۹، ۱۹۹۵). در مقیاس بزرگتر رودریگوئز- ایتارب و رینالدو (۱۹۹۷) از مدل هایی برای توسعه ی شبکه ی جریانی استفاده کردند که شبکه های حاصل از آن ها خصوصیات فرکتالی و چند فرکتالی[3] داشتند و به نظر آن ها محصول خود سازماندهی بحرانی بودند. با این وجود علی رغم این مدل های شبیه سازی، خودسازماندهی بحرانی هنوز وضعیت نامعلومی در سیستم های ژئومورفیک طبیعی دارد. رفتار سیستم های مدل سازی شده به سادگی قابل استفاده در سیستم های طبیعی نیست چون اغلب داده های کافی در این مورد وجود ندارد و نیروهای بیرونی نیز در این رابطه تاثیر زیادی دارند. ورنر (۲۰۰۳) پیشنهاد کرده که برای مدل سازی الگوی لندفرم پیچیده، مدل های سلسله مراتبی[4] مناسب ترند.

1- Bak (1997)
2- Werner (1995)
3- Multi fractal
4- Hierarchical models

نتیجه گیری

آشوب، فرکتال، سیستم های غیر خطی و خود سازماندهی مفاهیم وابسته و مربوط بـه همـی هـستند کـه در سیستم های پیچیده ی طبیعی و انسانی وجود دارند. نظریه ی آشوب و مفاهیم مرتبط به آن سعی دارد ابـزار حل و درک مسائل پیچیده را در اختیار انسان قرار دهد.نظریه ی آشوب، سیستم های دینامیکی آشوبناک یعنی سیستم های غیر خطی بسیار حساس به شرایط اولیه را مورد مطالعه قرار می دهد. همان گونه کـه معـادلات لورنز نشان داده، رفتار سیستم های غیر خطی آشوبناک و غیر قابل پیش بینی است. نظریه ی آشوب هماننـد نظریات نسبتا جدید پیش ازخود همچون نظریه ی بازی ها و منطق فازی، دیدگاه ها و روش شناسی جدیدی را برای تبیین پدیده ها عرضه کرده و علی رغم ضعف ها، ابهامات و سودمند یش ممکن اسـت در آینـده بـا موج جدیدی از نظریات جایگزین شود و این مسئله ماهیت تکاملی علم است.

رفتار آشوبناک در اغلب سیستم های دینامیکی پیچیده ی طبیعـی و ژئومورفیـک از جملـه جریـان هـای سطحی، حرکت توده ای، سیستم خاک و غیره دیده می شود و دیدگاه های جدید در ژئومورفولوژی تـلاش می کنند رفتار پیچیده ی آشوبناک در سیستم های مذکور را از طریق نظریه ی آشوب و مفاهیم مرتبط بـا آن تحلیل و تبیین کنند. نظریه ی آشوب در عرصه ی ژئومورفولـوژی در پـی کـشف رابطـه ی بـین سـادگی و پیچیدگی و رابطه ی منظم بودن و تصادفی بودن در سیستم های طبیعی و ژئومورفیک اسـت. آشـوب نـشان می دهد که سیستم های ژئومورفیک در عین جبری و تعینی بودن و پیروی از قوانین اساسی فیزیک، ممکـن است بی نظم، پیچیده و غیر قابل پیش بینی باشند. برخی از الگوهای ژئومورفیک (همچون ریپل مـارک هـا، پهنه های ماسه ای و شبکه های رودخانـه ای) صـرفنظر از مقیـاس فـضایی خـود، شـبیه بـه هـم هـستند و خصوصیات فرکتال یا برخالی دارند. این شکل ها بوسیله ی فرآیند خودسازماندهی تکامل می یابند می توان روابط بین فرم (شکل و بعد فرکتال) و فرآیند (خودسازماندهی بحرانی) در سیستم های ژئومورفیک را بر این اساس تحلیل نمود. در واقع علاقه مندی و کاربرد مسائل فرکتال در ژئومورفولوژی به این خـاطر اسـت کـه بسیاری از لندفرم های ژئومورفیکی حالت فرکتال دارند و شکل گیری وتحول فرکتال ها را می توان با روابط ریاضی تبیین کرد. از این طریق می توان تحول و تکامل لندفرم های فرکتال را مدل سازی کرد همان گونه که پلتیر نشان داده ساختار فرکتالی و آشوب، شکل ذاتی تکامل در لندفرم های جریانی است (پلتیر ۲۰۰۷).

با این وجود سیستم های ژئومورفیک، سیستم های پیچیده و غیر خطی اند. یعنی از متغیر های متعدد و بر هم کنش های متفاوت و همچنین روابط غیر خطی تشکیل شده اند، لذا پیش بینی رفتار آن ها مشکل اسـت. در درون سیستم های غیر خطی ژئومورفیک تغییرات ذاتی دینـامیکی بـدون دخالـت نیروهـای خـارجی رخ می دهد که سعی دارند سیستم را در حالت توازن نگه دارند. بـه عبـارت دیگـر هنگـامی کـه سیـستم هـای غیرخطی وارد یک مرحله ی آشوبناک می شوند خود بخود به سطح متفـاوتی از نظـم یـا خـود سـازماندهی دست می یابند. شناخت، مدل سازی و نگاشت رفتار پیچیده ی این نوع سیستم ها و نحوه ی خودسازماندهی در آن ها در عمل بسیار مشکل است. بنابراین به راحتی نمی توان قوانین ریاضی و فیزیک را برای رفتار های

نوسانی، بلند مدت و پیچیده ی سیستم های ژئومورفیک به کار برد. ایـن موضـوع بـه نـوعی روش شناسـی کاهش گری انجامیده که بر مبنای آن پدیده های پیچیده می توانند از طریق روابط و قواعـد سـاده تحلیـل و تبیین شوند. مدل های سلولی اتومات و سلسله مراتبی از جمله مدل هـای شـبیه سـازی هـستند کـه اخیـرا ژئوموفولوژیست ها از آن ها برای تحلیل رفتار سیستم های غیر خطی و خود سازمانده استفاده می کننـد. در این مدل ها بر هم کنش سلول های مجاور با استفاده از قواعد ساده ی ریاضی و فیزیک شبیه سازی می شود. اگر چه این مدل ها نمی توانند رفتار واقعی را به نمایش گذارند اما تا حد زیادی قادرند پیش بینی پذیری را تعدیل و اصلاح کنند.

منابع

۱-سردار، ضیاءالدین وایونا آبرامس، (۱۳۷۹):"آشوب قدم اول"، ترجمه ی آرام قریب، انتشارات شیرازه، چـاپ اول، تهران.

۲-رامشت، م.ح. و منوچهر توانگر، (۱۳۸۰): "مفهوم تعـادل در دیـدگاه هـای فلـسفی ژئومورفولـوژی"، فـصل نامـه تحقیقات جغرافیایی، شماره ۵۳-۵۲، مشهد.

۳-رامشت، م.ح. (۱۳۸۲): "نظریه کیاس در ژئومورفولوژی، "مجله جغرافیا و توسعه، بهار و تابستان ۱۳۸۲، زاهدان.

4- Baas, A.C.W. (2002): "Chaos, Fractals and Self-Organization in Coastal Geomorphology: Simulating Dune Landscapes in Vegetated Environments", Geomorphology 48, 309-328

5- Bak, P. (1997):"How Nature Works". Copernicus Ltd .New York

6- Brunsden, D. and Thorenes, J.B. (1979):" Landscapes Sensitivity and Change ".Transaction of The Institute of British Geographers 4, 463-484

7- Burrough, P.A. (1981):"Fractal Dimension of Landscapes and other Environmental Data". Nature 294, 240-242

8- Fonstad, M .A. and Marcus, W.A. (2003):"Self-Organized Criticality in Riverbank Systems". Annals of Association of American Geographers 93.(2), 281-296

9- Goudie, A.S. (2004): "Encyclopedia of Geomorphology, Vol. 1, Rout Ledge Ltd. UK. 142-143.

10- Lane, S. N. and Richards, K. S. (1997):"Linking River Channel form and Process, Time, Space and Causality Revisited". Earth Surface Process and Landform 22, 249-260.

11- Malanson, G.P. et al. (1990):"Chaos Theory in Physical Geography". Physical Geography 11, 293-394.

12- Pelletier, J. D. (2002):" Fractal Behavior in Space and Time in Simplified Model of Fluvial Landform Evolution". Geomorphology 91, 291-301

13- Phillips, J. D. (1992):"Qualitative Chaos in Geomorphic Systems, With an Example from Wetland Response to Sea Level Rise". J. Geol, 100, 365-374.

14- Phillips, J. D. (1999):" Earth Surface Systems: Complexity, Order and Scale". Oxford: Blackwell.

15- Phillips, J. D. (2006):" Evolutionary Geomorphology: Thresholds and Nonlinearity in Landform Response to Environmental Change". Hydrology and Earth System Sciences 10, 731-742.

16- Perigogine, I. (1996):" The End of Certainty ".New York: The Free Press.

17- Qin, S. Et Al. (2002):"A Nonlinear Dynamical Model of Landslide Evolution".

Geomorphology, 43, 77-87.
18- Rodrigues-Iturbe, I .and Rinaldo, A. (1997):" Fractal River Basin (Chance and Self-Organization)" .Cambridge, Cambridge University Press.
19- Schumm, S.A. and Lichty, R.W. (1965):" Time, Space and Causality in Geomorphology ".American Journal of Science 263, 110-119.
20- Schumm, S.A. (1979):" Geomorphic Threshold: The Concept and Its Applications". Transaction of The Institute of British Geographers 4, 485-515.
21- Werner, B.T. (1995):" Aeolian Dunes: Computer Simulation and Attractor Interpolation". Geology 23, 1107-1110.
22- Werner, B.T. (1999):" Complexity in Natural Landform Patterns ".Science 284, 102-104
23- Werner, B.T. (2003):" Modeling Landforms As Self-Organized, Hierarchical Dynamic Systems". In,Iverson, R.M .Wilcock, P. (Eds), Prediction in Geomorphology. AGU Geophysical Monographs. Pp. 131- 150.
24- Wolfram, S. (2002):" Anew Kind of Science" .Champaign, IL: Wolfram Media.
25- http://www.niu.edu/landform/nonlinearRules.html
26- http://www.ecometry.biz/patterns.html
27- http://www.viewsfromscience.com/documents/webpages/chaos_p3.html
28- http://www.cs.sjsu /faculty/rucker/chaos.html
29- http://www.univers-review.ca /R01-09-chaos.html
30- http://www.isfahanportal.ir/framework.jsp?SID=2175.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی