

نظریه آشوب در ژئومورفولوژی جریانی (مطالعه موردی تغییرات بستر رود کل، هرمزگان)

هیوا علمی‌زاده: استادیار ژئومورفولوژی، دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر، خرمشهر، ایران*
سیاوش شایان: استادیار ژئومورفولوژی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

وصول: ۱۳۹۰/۱۲/۱ پذیرش: ۱۳۹۱/۱۱/۲۲، صص ۲۳۰-۲۱۷

چکیده

نظریه کیاس به بیان نوعی نظم در چهارچوب روندی بی‌نظم می‌پردازد، گرچه سیستم‌های پیچیده صرفاً ظاهری پر آشوب و نامنظم دارند و در نتیجه نامنظم و تصادفی به نظر می‌رسند، در واقعیت دارای نظم پیچیده و تابع یک جریان معین هستند. این مقاله به تبیین مبانی تئوری کیاس و تطبیق آن در ژئومورفولوژی جریانی با تحلیل تغییرات مسیر رودکل در سواحل شمالی تنگه‌هرمز می‌پردازد و برای دستیابی به چنین منظوری با مقایسه عکس‌های هوایی و تصاویر ماهواره‌ای در دوره‌های زمانی مختلف، ضمن تشریح پاره‌ای مفاهیم، تغییرات بستر رودکل در طول زمان را که شواهد بارز کیاس به‌شمار می‌آید، تشریح نموده و با مواردی که این پدیده در آن قابل مشاهده نیست، مقایسه می‌کند. نتایجی که این تئوری در اختیار ما قرار می‌دهد، تغییر مقیاس در نگاه به وقایع است؛ به گونه‌ای که بتوان نظم ساختاری آن را کشف کرد. مسیرهای قبلی رود کل حالتی از سیستم جریانی است که با فرایندهای امروزی در تعادل نیستند و بیانگر نوعی بی‌نظمی در رابطه بین پاسخ فرم و فرایند می‌باشد، اما این امر به مفهوم ایجاد عدم تعادل در کل سیستم نیست؛ تغییرات حول وحوش میانگین صورت می‌گیرد و نوسان خاصی که بیانگر افت و خیز روند کلی تغییر باشد، دیده نمی‌شود. منحنی ناتعادلی در ابتدا تغییرات فرمی زیادی نشان می‌دهد، اما این تغییر در جهت دستیابی به پایداری است، اگرچه هنوز این امر رخ نداده است. واژه‌های کلیدی: نظریه آشوب، تحولات غیرخطی، ژئومورفولوژی جریانی، تغییر بستر، رود کل.

مقدمه

میلاادی توسط نیوتن زمانی که می‌خواست حرکات منظومه شمسی را بر اساس قوانین جدیدش، تئوری عمومی جاذبه مدلسازی کند، پرورش یافت (ماگنیتسکی، ۲۰۰۸، ۱۹). - است که تمام توجه خود را بر روی حرکت‌های ترکیبی (Complex motions) قرار داده که تماماً غیرخطی هستند و از پیچیدگی و حساسیت زیادی برخوردارند، به‌طوری‌که بر اساس دیفرانسیل - مدل غیرخطی سیستم - می‌توان

نظریه کیاس به مطالعه سیستم‌های دینامیکی کیاتیک (Chaoitic) (آشوبناک) و بیان نوعی نظم در چهارچوب روندی بی‌نظم می‌پردازد. این تئوری نوع پیشرفته‌ای از تئوری دستگاه‌های پویا - dynamical systems theory: شاخه‌ای از ریاضیات که با دستگاه‌هایی که حرکتشان بر اساس قوانین ساده‌ای هستند در رابطه می‌باشد. این تئوری برای اولین بار در قرن هفدهم

نامنظم دارند؛ در حالی که در ذات خود از یک قاعده و قانون پیروی می‌کنند و در نتیجه نامنظم و تصادفی به نظر می‌رسند، در حالی که در واقعیت دارای نظم پیچیده و تابع یک جریان جبری با یک فرمول ریاضی مشخص هستند که بر پایه نظریه رشد غیر خطی با بازخورد شکل گرفته است. به عبارتی دیگر هنگامی که از دید میکروسکوپی به یک پدیده و سایر رویدادهای در ارتباط با آن بنگریم دچار یک آشفتگی می‌شویم که گاهی آن را به عنوان بی‌نظمی مطرح می‌کنیم؛ این در حالی است که اگر به این پدیده با یک نگرش ماکروسکوپی بنگریم به سیر منظمی از حرکت آن پدیده و سایر ارتباطات آن پی می‌بریم که حاکی از پدیده‌ای دیگر بجز تصادف می‌باشد. به طور مثال شاید پدیده زلزله پدیده‌ای بی‌نظم تلقی شود، اما اگر از یک نگرش چند ساله خارج شویم و با یک نگرش چند هزار ساله به پدیده زلزله نگاه کنیم، به خوبی شاهد واقعیت‌هایی خواهیم بود که پیش از هر چیزی قطعیت در آن سیستم مطرح می‌شود.

نکته جالب در رفتار یک سیستم - که عمل بازخورد منفی آن با تأخیر مواجه می‌باشد - این است که اگر، یک یا چند فرایند با بازخور مثبت به این سیستم اضافه شود، ناپایداری سیستم وخیم‌تر شده و الگوهای شگرفی ایجاد می‌شوند. در واقع، فشار فزاینده‌ای که درون حلقه با بازخور مثبت وجود دارد، نیروهای عدم تعادل حلقه‌های با بازخورد منفی را قوی‌تر کرده، وضعیت ناپایداری و عدم تعادل آن را پیچیده‌تر می‌کند. سیستم‌هایی که دارای این ویژگی هستند غالباً فرایند آشوبی ایجاد می‌کنند. یک سیستم دارای فرایند آشوبی نوسانات و چرخه‌هایی ایجاد می‌کند که دوره آن اساساً بی‌نهایت است و در دوره مورد مطالعه هرگز

رفتار یک سیستم آشوبناک را مطالعه کرد^۱. نکته بااهمیت آن است که اگر رفتار یک سیستم کیاتیک را داشته باشیم^۲، آنگاه حتماً نخواهیم توانست به مدل سیستم پی‌بریم، این واقعیت نشأت گرفته از رفتار بسیار پیچیده سیستم‌های کیاتیک است (زلینکا^۳، ۲۰۰۹، ۲۹۱). به همین دلیل یکی از جالب‌ترین کاربردهای سیستم‌های کیاس رمزنگاری می‌باشد، از طرفی پردازش این رفتارها در نهایت می‌تواند در شرایطی به پیش‌بینی وضعیت رفتار سیستم منجر شود^۴ و لذا کاربردهایی وسیع در مباحث پیش‌بینی وضعیت هوا و یا کلی‌تر اقلیم‌شناسی، زلزله و کلاً بحث سری-های زمانی^۵ مطرح می‌شود.

سیستم‌های کیاتیک، سیستم‌های پویای غیرخطی هستند که نسبت به شرایط اولیه‌شان بسیار حساس‌اند. تغییری اندک در شرایط اولیه چنین سیستم‌هایی باعث بروز تغییرات بسیار در آینده خواهد شد، به طوری که رفتارهای آینده آنها دیگر قابل پیش‌بینی نمی‌باشد؛ با این حال هیچ لزومی به وجود عنصر تصادف در ایجاد رفتار آشوبی نیست و سیستم‌های دینامیکی جبری^۶ نیز می‌توانند رفتار آشوبناک از خود نشان‌دهند. می‌توان گفت که رفتار سیستم‌های آشوبگون بین سیستم‌های جبری^۷ و سیستم‌های نویزی قرار دارد. در دیدگاه کیاس، سیستم‌های پیچیده صرفاً ظاهری پر آشوب و

۱ مشابه سیگنال‌های یک فرستنده و یا رفتارهای ثبت شده در بورس معاملات و یا نتایج ثبت شده توسط زلزله نگار

۲ مانند نوسان‌های ثبت شده توسط زلزله نگار و یا شرایط اقلیمی در مدل هواشناسی و یا حتی تغییرات بورس

3 Zelinka.I

۴ در بیان این موضوع احتیاط کرده و می‌گوییم منظورمان کلی نیست.

5 Time Series

6 Deterministic

7 Deterministic

اجازه می‌دهد روند آتی حرکت آنها بر خلاف باورهای قبلی پیش‌بینی شوند.

این مقاله با هدف دست‌یابی به متغیرهایی که موجب ناپایداری بستر رود می‌شوند، سعی در تبیین تغییرات بستر با استفاده از نظریه کیاس دارد. نهفته بودن نظم و پیروی از الگوی غیرخطی، علی‌رغم تغییرات به ظاهر نامنظم و اغتشاش‌گونه بستر رود کل فرضیه این پژوهش می‌باشد. محدودیت‌های فصلی و گرمای هوا در طول تابستان، نبودن راه‌های قابل دسترسی به تمام نقاط به ویژه مناطق پیرامون خط ساحلی و کمبود منابع و مطالعات محیطی در منطقه و به‌ویژه محدود بودن تصاویر دوره‌ای جهت استخراج تغییرات بستر، از مهم‌ترین محدودیت‌های این پژوهش بوده‌اند.

پیشینه پژوهش:

تا چند دهه پیش دانشمندان جهان را مجموعه‌ای از سیستم‌هایی می‌دانستند که مطابق با قوانین جبری طبیعت به طریقی کاملاً مشخص و قابل پیش‌بینی در حرکت می‌باشند، اما با پیشرفت علم بسیاری از رویدادهای طبیعی دیگر قابل توجیه به‌وسیله دیدگاه‌های جبرگرایانه قبلی نبودند. تلاش‌های دانشمندان برای توصیف چنین رویدادهایی منتج به ارائه نظریه‌های کوانتوم و نسبیّت در فیزیک و نظریه کیاس در ریاضیات شد. این نظریه گسترش خود را بیشتر مدیون کارهای هانری پوانکاره^۱، ادوارد لورنز^۲، بنوا مندلبروت^۳ و مایکل فایگن‌باوم^۴ می‌باشد. پوانکاره اولین کسی بود که اثبات کرد، مساله سه جرم (به عنوان مثال، خورشید، زمین، ماه) مساله‌ای آشوبی و

تکرار نمی‌شوند. چرخه‌های غیرتکراری در یک سیستم آشوبی به این علت به وجود می‌آیند که مرزهای غیرخطی آن باعث می‌شود حرکت به سمت جلو و عقب کشیده شود، به طوری که بر مسیرهای قبلی آن منطبق نباشد. این حرکت‌ها موجب می‌شود تا یک سیستم آشوبی به شرایط اولیه خود بسیار حساس باشد. اگر یک یا چند مقدار از شرایط اولیه تغییر بسیار کمی داشته‌باشد، مسیر زمانی جدید سیستم به طور نمایی از مسیر زمانی قبلی جدا خواهد شد. از این ویژگی مهم سیستم‌های آشوبی می‌توان در ساختن آزمون‌هایی برای پی‌بردن به فرایندهای آشوبی استفاده نمود.

هر چند نظریه آشوب در دهه‌های اخیر جزء پژوهش‌های علمی رشته‌های گوناگون قرار گرفته، اما مفهوم ساده آن ریشه در برداشت‌های اولیه انسان در مورد جهان دارد. طبق این دیدگاه اگرچه امور جهان بی‌نظم، تصادفی و در نتیجه، غیرقابل پیش‌بینی به نظر می‌رسند، اما در عین حال از یک نظم و قطعیت برخوردار هستند. این دیدگاه با توجه به تحول شدید در ابزارهای محاسباتی الکترونیکی باعث حرکت جدیدی در پژوهش‌های علمی دهه ۱۹۷۰ به بعد، در علوم فیزیک و ریاضی شد. این تحولات منجر به ارایه شیوه‌های جدیدی برای مطالعه جریان‌های بسیار پیچیده به ظاهر تصادفی و غیرقابل پیش‌بینی گردید. نتایج این مطالعات به تدریج در سایر علوم که با این نوع پدیده‌ها مواجه هستند- مانند رشته‌های مختلف علوم پایه، مهندسی، هواشناسی، اقتصاد و اخیراً ژئومورفولوژی - به‌کار گرفته شد. مسئله مشترک این علوم شناسایی راه‌های تشخیص نظم نهفته در سیستم‌های بسیار پیچیده‌ای است که در صورت موفقیت

1 Henri Poincare

2 Edward Lorenz

3 Mandelbrot

4 Mitchell Feigenbaum

داده‌ها و روش:

در تبیین نظریه آشوب در ژئومورفولوژی جریانی، پس از تشریح برخی مفاهیم، متغیرهای موثر در تغییرات بستر رود کل به روش تحلیلی بررسی شده و با استفاده از عکس‌های هوایی سال ۱۹۵۷، تصاویر ماهواره لندست TM مربوط به سال‌های ۱۹۷۷-۱۹۸۹-۲۰۰۱ و ۲۰۰۵، تغییرات مسیر رود کل با استفاده از GIS و در محیط نرم‌افزار ArcGIS(9.3) در دوره‌های زمانی مختلف استخراج شده‌است. در ادامه برداشت‌های میدانی با استفاده از فنون ژئومورفولوژیک مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته‌اند و تغییرات و ناپایداری بستر با استفاده از تحلیل‌های ژئومورفیکی بررسی شد؛ بعد از استخراج تغییرات مسیر و ترسیم آن، تبیین این تغییرات و الگوی منظم یا غیرمنظم و تصادفی ناپایداری بستر با نظریه کیاس صورت گرفت و در نهایت نتیجه‌گیری از یافته‌های تحقیق انجام شد.

محدوده مورد مطالعه:

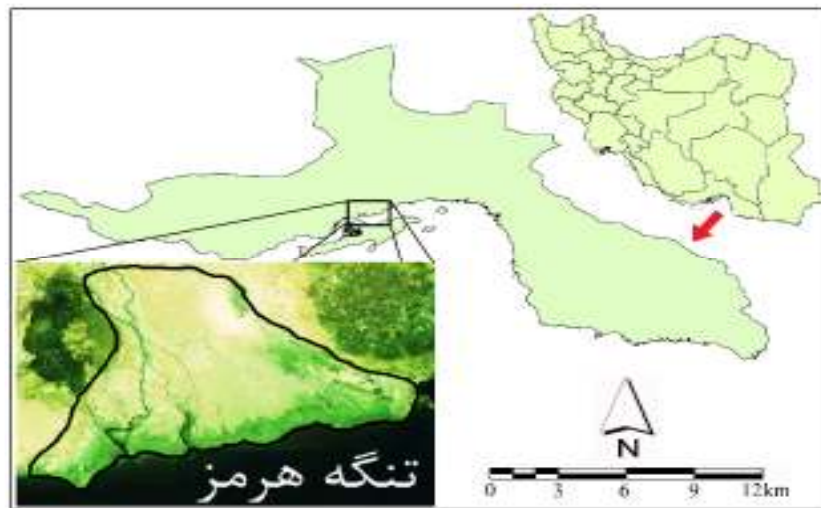
رود کل با تشکیل دلتایی به وسعت ۲۰۵/۹ کیلومتر مربع، در بین طول جغرافیایی ۵۵°-۵۸° و ۴۳°-۵۵° شرقی و عرض جغرافیایی ۲۷°-۰۸° و ۲۶°-۵۸° شمالی واقع شده و از جنوب به تنگه هرمز، از غرب و شرق به گنبد‌های نمکی گچین و خمیر و از شمال به کوه‌های پولادی محدود می‌شود (شکل ۱). رود اصلی این حوضه رود کل است که از شمال به جنوب جریان دارد. سرشاخه‌های مهم آن شامل رودبال داراب، شور لار و رسول از غرب و رودهای ده‌شیخ و دورودی و گهره از شمال و غرب به این رود می‌ریزند. محدوده تحت بررسی از نظر زمین‌شناسی دارای ویژگی ساختمانی - رسوبی است و این امر موجب گردیده تا واحدهای ساختمانی با خصوصیات

غیرقابل حل است. پس از سال ۱۹۵۰ توسعه نظریه کیاس سرعت بیشتری گرفت، چرا که دانشمندان دریافتند که تئوری خطی در بسیاری از موارد نمی‌تواند به سادگی رفتارهای مشاهده شده در آزمایش‌های معین را توجیه کند. در کنار این مسئله ظهور نرم‌افزارهای کامپیوتری نیز کمک شایانی به رشد این تئوری نمود، چرا که بسیاری از مسائل تئوری کیاس درگیر تکرارهای بسیار زیاد روابط ساده ریاضی می‌شد که محاسبه آنها به‌طور دستی غیرممکن بود، اما کامپیوتر به سادگی این محاسبات را انجام می‌داد. در ایران کارهای چندانی در مورد کیاس صورت نگرفته، در این رابطه مشیری (۱۳۸۱) کاربردهای کیاس را در اقتصاد تشریح کرده و رامشت (۱۳۸۲ و ۱۳۸۰) کیاس را از دیدگاه ژئومورفولوژی با تبیین و تشریح مفاهیمی چون تعادل، ناعادلی و عدم تعادل مورد بررسی قرار داد. در سطح جهان مفهوم کیاس توسط رن و همکاران^۱ (۱۹۹۵) در زلزله، تسونیس^۲ (۱۹۸۹) در پیش-بینی شرایط جوی، سیواکومار^۳ (۲۰۰۴) در ژئوفیزیک، رودریگوئز^۴ (۲۰۰۵) در ژئومورفولوژی جریانی مطرح و تبیین شد. هوارد^۵ (۱۹۸۲) تعادل و مقیاس زمانی را در رودهای آبرفتی بررسی نمود، هاگت^۶ (۱۹۸۸) ارتباط و کاربرد این تئوری در ژئومورفولوژی را بیان کرده و به کارگرفتن دینامیک‌های غیرخطی را برای توضیح هدررفتن انرژی و ماده در درون یک سیستم توصیه - نمود و ساناسیرج و همکاران (۲۰۰۴) از تئوری کیاس در افزایش دقت پیش‌بینی جزر و مد بهره گرفتند.

- 1 Ren. Y. J, et.al.
- 2 Tsonis, A.A.
- 3 Sivakumar, B.
- 4 Rodriguez J. A.
- 5 Howard. A.D.
- 6 Huggett

الگوی ساختاری حاکم بر شمال ناحیه از نوع ساختمان‌های دوپلکس و راندگی‌های بزرگ مقیاس است که در اثر آن ورق‌های دگرگون‌شده و نادگرگونه به مقدار متفاوتی به سمت جنوب‌غرب جابه‌جا و رانده شده‌اند. دگرگون و دگرشکل بودن سنگ‌ها از خاصه‌های این بخش است. بارش‌های رگباری و عدم ریزش برف در سطح وسیعی از محدوده مورد مطالعه، ماهیت سیلابی رودها و طغیان آنها را هنگام بارندگی به دنبال دارد. از طرف دیگر به دلیل ویژگی‌های هیدرولوژیکی و موقعیت پایابی رودخانه که به تنگه-هرمز می‌ریزد و وجود دلتای نسبتاً وسیع و دشت‌های سیلابی در دهانه رود کل، محدوده مورد مطالعه احتمال ریسک سیل‌خیزی بالایی دارد.

و ویژگی‌های متفاوت خود در سطح محدوده گسترش‌یابند. وجود رسوبات تبخیری و برخی از نبوده‌های چین‌شناسی کوتاه‌مدت نشانه‌ای از حرکات قائم (خشکی‌زایی) در دلتای رود کل است. تمام این رسوبات به طور هم‌شیب روی رسوبات پالئوزوئیک قرار دارند و هیچ نوع فعالیت ماگماتیسم و دگرگونی طی فاز آلی در این حوضه مشاهده نمی‌شود. در شمال، شمال غربی و شرق منطقه عوامل مؤثر در چین‌خوردگی کماکان پویا هستند، به همین دلیل زمین‌حرکت‌های رو به بالا دارد که با فشردگی و کوتاه‌شدگی پوسته و در نتیجه تمرکز انرژی همراه است - رها شدن انرژی تقریباً دائمی است به همین لحاظ تکان‌های زمین به صورت زمین‌لرزه زیاد است که گاهی، با ویرانی زیاد و تلفات انسانی همراه است.



شکل ۱: محدوده جغرافیایی دلتای رود کل در شمال تنگه‌هرمز

بخش علیای جلگه و به ترتیب با نظم خاص، و آبرفت‌های ریزدانه در بخش‌های پایین جلگه و در نزدیکی دریا نهشته می‌شوند. به‌طوری‌که تنها مواد رسی، ماری، سیلتی و ماسه‌ای که ریزترین بافت را بین آبرفت‌ها دارند، به خط ساحلی رسیده و در امتداد

یافته‌های تحقیق

تحلیل ژئومورفیکی تغییرات بستر:

رود کل به محض خروج از کوهستان و ورود به دشت ساحلی، با کاهش شیب مواجه شده و رسوبات خود را ته‌نشین می‌سازد. آبرفت‌های درشت‌تر در

زمان‌های کوتاه‌تری تغییر مسیر دهد، به‌طوریکه تغییر مسیر و انحراف شبکه‌زهکشی در سطح دلتا جزء مشخص‌ترین خصائص آن است. با توجه به سوابق مطالعات انجام گرفته و بررسی آبرفت‌ها و هیدرولوژی، دلایل اصلی این تغییر مسیرها عبارتند از:

۱. تاثیرات تکتونیکی، طبق بررسی‌های به‌عمل آمده در نتیجه سابداکشن پوسته اقیانوسی هند به زیر ایران، سواحل جنوبی کشور در حال بالآمدن^۱ مداوم هستند. مقدار آن در چابهار حدود ۳/۵ میلی‌متر در سال اندازه‌گیری شده است. این برخاستگی موجب کاهش بیشتر شیب بخش جلگه‌ساحلی شده و تغییر مسیر آبراهه را تسریع می‌کند.

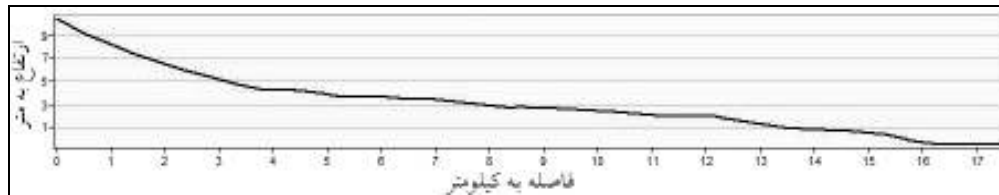
۲. به‌دلیل ریزبافت بودن آبرفت‌های دلتا به‌ویژه در بخش میانی تا قاعده دلتا، فرسایش جانبی و کناری آبراهه‌ها افزایش داشته و تکامل مائند در آن به سرعت روی می‌دهد. با استناد به مبانی نظری تکامل پیچان‌رود، تغییر مسیرها را از دامنه کاو و مقعر آنها تسریع می‌کند.

۳. کوتاه بودن آبراهه اصلی موجب می‌شود که رود کل بعد از یک بارش کوتاه‌مدت حالت سیلابی پیدا کند(شکل ۲). کوتاه بودن زمان تمرکز و شدت بارش موجب سرریز شدن آبراهه و تغییر مسیر آنها می‌شود. این ویژگی در زمان‌هایی که دامنه بارش‌های موسمی به منطقه کشیده می‌شود، از شدت و فراوانی بیشتری برخوردار است. شیب زیاد نیم‌رخ طولی حوضه‌آبخیز، فقر پوشش گیاهی، نفوذ پذیری کم سازندهای حوضه، شرایط بارش سیلابی و ماهیت رگباری بارش، موجب رخداد سیلاب‌های دوره‌ای در این منطقه می‌شود.

آن توزیع می‌شوند. هر چند در شرایط استثنایی و در دوره‌های سیلابی که رود از حداکثر دبی برخوردار و توان حمل زیادی دارد، می‌تواند قطعات درشت‌تر را تا مسافت بیشتری حمل نموده و منتقل نماید. با این وجود این قطعات حداکثر تا بخش‌های میانی دلتا منتقل گشته و نهشته می‌شوند. یکی از دلایل اصلی ناپایداری‌های بستر رودخانه در بخش میانی و پایین-دست، ریزدانه و سست‌بودن آبرفت‌های این بخش از دلتا می‌باشد؛ علاوه بر این تغییر مسیرهای متعدد در این بخش نیز تا حد زیادی نتیجه همین پدیده است. سطوح بالادست دلتا توسط بستر اصلی رود و انشعابات آن به‌طور عمیقی بریده شده‌اند و قطعات مختلفی از ریگ، قلوه‌سنگ و شن به ویژه در حواشی ارتفاعات و بستر رود دیده می‌شود. در سطح بخش-های میانی دلتا مواد عمدتاً منشاء خشکی دارند و به-صورت نهشته‌های سطحی دیده می‌شوند؛ به‌طرف سطوح پائینی، آبرفت‌ها بیشتر منشاء ترکیبی دریایی-آبرفتی دارند و عمدتاً از مواد ریزدانه تشکیل شده‌اند. بررسی‌های فیزیکی آبرفت‌ها نشانگر آن است که بافت آبرفت‌های سطح دلتا به‌طور یکنواخت از راس دلتا به-سوی خط ساحلی تغییر یافته و به‌طور قابل ملاحظه‌ای ریزدانه می‌شود. به‌طوریکه در نزدیکی خط ساحلی حتی در بستر سیلابی رودخانه اثر مشخص از مواد درشت‌تر حتی در حد ریگ و شن یافت نمی‌شود. شاید از دلایل عمده این مسئله وجود سازندهای سست مارن و ماسه‌سنگی موجود در حوضه‌های آبخیز منتهی به جلگه‌ساحلی و از سویی گستردگی و شیب بسیار کم این جلگه است که موجب چنین دانه-بندی منظمی شده‌است. همین ویژگی باعث شده‌است که رود کل از پایداری چندانی برخوردار نبوده و در

پدیده از مهم‌ترین مسائلی است که آن را تهدید می‌کند. سطوح دلتا به دلیل بافت نسبتاً ریزدانه، دارای شیب بسیار کمی بوده و در دوره‌های بارش سیلابی، بستر رود به‌ویژه در بخش‌های میانی بسیار ناپایدار می‌گردد. این مسئله موجب شریانی شدن جریان‌ها و گسترش عرض بستر رودها می‌شود. علاوه بر این سرریز شدن سیلاب‌ها موجب تغییرمسیر آنها شده و مخاطرات انسانی، تهدید و تخریب سازه‌ها و پل‌ها، اراضی کشاورزی و سکونت‌گاه‌های انسانی پیرامون آنها را به‌دنبال دارد.

بارش‌های منطقه، عمدتاً حالت رگباری دارند و به دلیل کوتاه بودن مسیر آبراه‌ها زمان تمرکز نسبتاً کوتاهی نیز دارند. این بارش‌ها با حالت سیلابی به سرعت جریان یافته و موجب فرسایش شدیدی در مسیر خود می‌گردند. بررسی داده‌های رسوب نیز نشان می‌دهد که نسبت بار معلق رسوب رود از حد نرمال بالاتر بوده و این خود نتیجه ریزدانه بودن آبرفت‌های منطقه است. کاهش نسبی سرعت جریان در پایین دست و از بخش‌های میانی دلتا منجر به سرریز شدن آن می‌گردد. کم وسعت بودن دلتا و سیلابی بودن بارش‌ها در دوره‌های بازگشت نسبتاً کوتاه، موجب تغییرمسیر رود در دوره‌های کوتاه و رخداد سیلاب شده است و این



شکل ۲- نیمرخ طولی رود کل

طول سیگنال زمانی مورد بحث نیز بزرگتر باشد دقت نتایج نیز بیشتر می‌گردد. قابلیت پیش‌بینی: یک سیستم کاتیک (آشوبناک) در دل خود از یک قانون تبعیت می‌کند. این ویژگی امکان پیش‌بینی سیگنال را بر اساس مقادیر اولیه متفاوت فراهم می‌نماید. برای این منظور سیستم پیش‌بینی کننده می‌بایست از دینامیک حاکم بر سیگنال آشوبناک اطلاع داشته باشد. برخلاف سیستم نویزی که به هیچ عنوان قابل پیش‌بینی نیست و از این جهت به سادگی از یک سیستم آشوبناک قابل تمایز است. در یک سیستم آشوبناک به خاطر حساسیت نسبت به شرایط اولیه، هر چه نقطه دورتری مورد پیش‌بینی قرار گیرد، دقت پیش‌بینی کمتر می‌شود.

ویژگی‌های فرایندهای آشوبناک:

مهم‌ترین مشخصه‌های فرایندهای آشوبناک عبارتند از: طیف فرکانسی، شکل منحنی‌های فضای حالت، بعد دینامیک سازنده سیگنال، حساسیت به شرایط اولیه، کنترل پذیری، جذب کننده‌های پیچیده و شکستگی‌های ناگهانی کیفی (کای وان و چوکوانگ^۱ ۲۰۰۸، ۳۶۹)؛ که می‌توانند به عنوان معیارهای تشخیصی استفاده شوند. لازم به ذکر است که هر یک از این ویژگی‌ها، دارای دقت مربوط به خود بوده و برای اظهار نظر دقیق، یک معیار کافی نیست و هرچه تعداد معیارها بیشتر باشد ارزیابی به دست آمده نیز دقیق تر است. از طرفی هرچه

کنترل پذیری: با توجه به وجود یک ساختار قانونمند در داخل یک پدیده آشوبناک می‌توان سیستم را کنترل نمود. هنگام استخراج نگاشت بازگشتی مربوط به یک سیستم آشوبناک، منحنی فضای حالت به صورت یک سری الگوهای تکراری در می‌آید. در حقیقت کنترل-پذیری با امکان پیش‌بینی سیگنال ارتباط مستقیم دارد. اگر یک سیستم آشوبگون در یک حلقه بسته تحت کنترل قرارگیرد، در این شرایط اگر کنترل‌کننده از دینامیک و ساختار تولید کننده سیگنال آشوبگون اطلاع داشته‌باشد، می‌تواند با تولید یک سیگنال کنترلی مناسب، خروجی را تحت کنترل قرار دهد (مرس و همکاران^۱، ۲۰۰۸، ۴۸۹).

جذب‌کننده‌های پیچیده^۲: مسیرهای زمانی کلیه سری-های پویای پایدار (معمولی یا آشوبی) دارای حدی هستند که به آن تعادل یا جذب‌کننده گفته می‌شود. در سیستم‌های آشوبی، جذب‌کننده‌ها، بسیار پیچیده و عجیب هستند که می‌توان آنها را به این صورت تعریف کرد: "یک جذب‌کننده پیچیده، مجموعه‌ای از نقاط غیرقابل شمارش^۳ است، به طوری که کلیه مسیرهای زمانی که درون آن شروع شده‌باشند، در داخل آن باقی می‌مانند و همچنین کلیه مسیرهای زمانی مجاور به آن جذب خواهند شد. مسیرهای زمانی که در داخل مجموعه شروع شوند، می‌توانند غیرقابل تکرار باشند و یا به هر تعداد از قبل تعیین شده به‌طور اختیاری تکرار شوند" (سان و

همکاران^۴، ۲۰۰۹، ۹۱). در برخی سیستم‌های پویای غیرخطی که دارای جذب‌کننده‌های پیچیده‌ای هستند، می‌توان مسیر طی شده را عیناً برگشت-ها که به سیستم‌های همیلتونی^۵ معروف هستند، اگر شرایط اولیه و معادلات حرکت^۶ را داشته باشیم، می‌توانیم مسیرهای طی شده به سمت جذب‌کننده‌ها را در جهت معکوس دنبال کنیم (موکام و همکاران^۷، ۲۰۰۴، ۷۹۳)؛ به عبارت دیگر این سیستم‌ها از لحاظ زمانی برگشت-پذیر هستند. در برخی مدل‌های پویای غیرخطی هرچند در صورت در دست داشتن شرایط اولیه و معادلات حرکت امکان محاسبه تقریبی مسیرهای انتقالی وجود دارد، اما این مسیرها غیرقابل برگشت زمانی هستند، زیرا تعداد بی‌نهایت مسیرهای زمانی انتقالی وجود دارند که به جذب‌کننده‌ها منتهی شده‌اند. این مدل‌ها، همان مدل‌های آشوبی هستند.

حساسیت بسیار زیاد به شرایط اولیه: یکی از شیوه-هایی که می‌توان آشوبناک بودن یک سیستم را آزمایش نمود، تغییر شرایط اولیه آن به مقدار خیلی کم و بررسی خروجی آن است. در صورتی که تغییرات خروجی شدید باشد، سیستم مربوطه آشوبگون خواهد بود. سیستم‌های تولیدکننده فرآیند آشوبگون حساسیت بالایی به شرایط اولیه دارند به طوری که به ازای تغییر بسیار کوچکی در شرایط اولیه، خروجی تغییر بسیار می‌کند (گراس برگر، ۱۹۹۳، ۱۳۳) به این صورت که اگر دو سری زمانی با فرایندهای آشوبی، اما با شرایط اولیه بسیار نزدیک به هم را در نظر بگیریم، مسیرهای زمانی آنها پس از مدتی متمایز شده به طور کامل به صورت

1 Meresse, S, et.al.

2 Strange Attractors

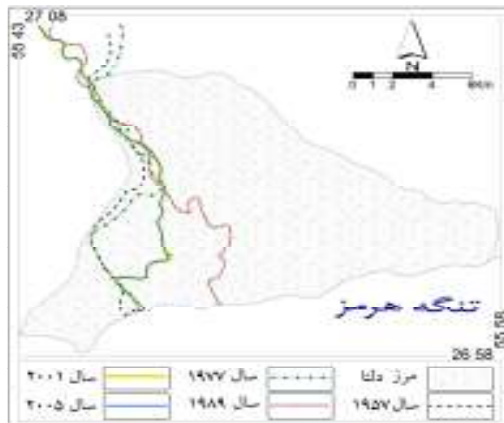
۳ مجموعه قابل شمارش یک مجموعه بی‌نهایتی است که عناصر آن متناظر با تعداد عناصر یک مجموعه اعداد صحیح باشد. در غیر این صورت، مجموعه غیر قابل شمارش نامیده می‌شود.

4 Sun, Y, et.al

5 Hamiltonian

6 Equation of Motion

7 Moukam K, et.al.



شکل ۳: تغییرات مجرای رود کل در پنج دوره زمانی

شکستگی‌های ناگهانی ساختاری در مسیر زمانی: سری‌های آشوبناک در برخی از مراحل مسیر زمانی خود، ممکن است دچار شکستگی‌های ناگهانی ساختاری شوند. شکل (شماره ۳) نشان می‌دهد که چگونه یک سری آشوبی پس از دو دوره نوسانات یکنواخت از سال ۱۹۵۷ تا ۱۹۷۷ به یک باره دچار شکستگی شده و در سال ۱۹۸۹ مسیری کاملاً متفاوت را دنبال می‌کند و مجدداً در سال‌های ۲۰۰۱ و ۲۰۰۵ دچار نوسان شده و به صورت هموار در می‌آید. این ویژگی سری‌های آشوبناک کار پیش‌بینی آنها را بسیار مشکل می‌کند. به عنوان مثال، اگر پیش‌بینی کننده‌ای قصد داشته باشد این سری آشوبی را با استفاده از سه دوره مشاهده اولیه پیش‌بینی کند، قطعاً خطای پیش‌بینی فاحشی را مرتکب خواهد شد، هر چند که از تکنیک‌های بسیار پیشرفته برای این کار استفاده کرده باشد. این پدیده، حاکی از آن است که رفتار یک سری آشوبناک از یک فرایند معین تبعیت می‌کند و به‌طور کلی با رفتار یک سری تصادفی متفاوت است. اگر رفتار یک سری از فرایند تصادفی به دست آمده باشد، قابل پیش‌بینی نیست؛ اما اگر از فرایندی آشوبناک ایجاد شده باشد، هر چند پیچیده بوده و تصادفی به

دو سری زمانی متفاوت از یکدیگر به نظر خواهند رسید. هرچه شرایط اولیه دوسری به هم نزدیک‌تر باشند، مدت زمانی که مسیرهای زمانی آنها شبیه به هم باشند، بیشتر خواهد شد. این شدت وابستگی به شرایط اولیه در یک سری به تاثیر پروانه‌ای^۱ شهرت دارد. این ویژگی سری‌های آشوبی به‌خوبی بیانگر این است که اگر متغیرها فرایند آشوبی داشته باشند، پیش‌بینی متغیرها بسیار دشوار و در بلندمدت غیرممکن خواهد بود، زیرا در صورت بروز کوچکترین تغییر در شرایط اولیه، رفتار سری به‌طورکلی تغییر یافته و از سری قبلی کاملاً متمایز خواهد بود. نتیجه این حساسیت نسبت به شرط اولیه می‌تواند منجر به بروز رفتارهای بسیار پیچیده و تصادفی و غیر قابل پیش‌بینی شود. نکته جالب در مورد یک سری آشوبناک این است که تغییر بسیار کوچک در هر یک از این مقادیر، مسیر زمانی کاملاً جدا و متمایزی را ایجاد می‌کند^۲. چنان که این تغییرات را می‌توان در حدود دلتای رود کل طی زمان مشاهده کرد (شکل ۳).

^۱ Butterfly Effect: این اصطلاح به این نکته اشاره دارد که حرکت بال‌های یک پروانه در یک نقطه (کمترین تاثیر ممکن) می‌تواند منجر به تغییرات آب و هوایی در کره زمین شود. بدین ترتیب که اگر جریان هوا یک فرایند آشوبی باشد، بال زدن یک پروانه می‌تواند منجر به ایجاد تغییرات اساسی در آب و هوای جهان مانند شروع طوفان و گردباد در اقیانوس و یا جلوگیری از بروز یک خشک‌سالی در آینده شود (آندریاس ۲۰۰۲، ۳۱۱).

^۲ اگر تغییر در شرط اولیه موجب تغییر اندکی در نتیجه شد گوئیم رخداد نسبت به شرط اولیه پایدار است. در این حالت قرار دادن مقدار تقریبی به جای مقدار واقعی مشکلی ایجاد نمی‌کند. مثلاً می‌توان بجای $\sqrt{2}$ از ۱.۱۴ استفاده کرد و هر چه دقت را بالاتر برد به جواب دقیق‌تری در محاسبات رسید اما بعضی رخدادها آنقدر نسبت به شرط اولیه حساسند که حتی بکار بردن مقدار تقریبی $\sqrt{2}$ با دقت سه رقم اعشار هم ممکن است منجر به نتیجه‌ای کاملاً متفاوت با وقتی که $\sqrt{2}$ با دقت شش رقم اعشار به کار می‌رود، شود. لذا حساسیت نسبت به شرط اولیه پیش‌بینی رفتار فرآیند را در زمان‌های طولانی عملاً غیر ممکن می‌کند.

نظر برسد، به علت معین بودن فرایند قابل پیش‌بینی است. یک فرایند تصادفی به شرایط اولیه حساسیت زیادی ندارد، از این‌رو مسیرهای زمانی آن با شرایط اولیه متفاوت باید همگرا باشند. عکس این حالت در مورد یک فرایند آشوبناک صادق است، یعنی مسیر زمانی با کوچکترین تغییر در مقدار اولیه سری زمانی دچار تغییرات اساسی می‌شود؛ بنابراین مسیرهای زمانی یک فرایند آشوبی با شرایط متفاوت اولیه باید واگرا باشند. براین اساس می‌توان آزمونی بر پایه واگرا یا همگرا بودن مسیرهای زمانی یک سری با شرایط متفاوت اولیه انجام داد، به طوری که اگر مسیرهای زمانی با شرایط اولیه مختلف واگرا نباشد، سری متعلق به یک فرایند تصادفی و در غیر این صورت یک فرایند آشوبناک خواهد بود. یک پدیده آشوبناک بر اساس دو ویژگی مهم از یک پدیده نویزی تفکیک می‌گردد:

اول: دامنه پدیده آشوبناک بین دو مقدار مشخص قرار دارد و می‌توان برای آن مرز تعیین نمود.
دوم: در پدیده‌های آشوبناک، در بازه‌های کوچک زمانی امکان پیش‌بینی سیگنال وجود دارد، در حالی که در پدیده‌های نویزی چنین خصوصیتی مشاهده نمی‌شود. پدیده دوشاخه شدن^۱ در منحنی‌های مربوط به فضای حالت به ازای بعضی مقادیر پارامترها، یکی از مشخصات فرآیندهای آشوبناک است.^۲
بحث و نتیجه‌گیری:

پیشرفت‌های چشمگیر در ابزارهای محاسباتی در دهه‌های اخیر، امکان به‌کارگیری نظریه‌های مبتنی بر وجود الگوهای غیرخطی جبری یا کینتیک (آشوبناک) به ظاهر تصادفی را فراهم آورده است. درحقیقت، نظریه کیاس امکان مطالعه دقیق‌تر ویژگی‌های رفتاری بسیار پیچیده متغیرهای ژئومورفیکی را که با ابزارهای متداول میسر نیست، فراهم می‌کند تا با کشف الگو و نظم پیچیده حاکم بر رفتار چنین متغیرهایی، از آنها برای پیش‌بینی روند آتی استفاده شود. در ژئومورفولوژی برای غالب متغیرها رفتاری تصادفی در نظر گرفته می‌شود؛ نتیجه چنین فرضی این است که تغییرات این متغیرها قابل پیش‌بینی نیستند. علی‌رغم توسعه روش‌های گوناگون، به‌منظور کشف فرایند کینتیک (آشوبناک) هنوز نمی‌توان ادعا کرد که این روش‌ها به خوبی قادر به تمایز یک فرایند خطی با اختلالات تصادفی از یک فرایند غیر-خطی معین (کیاس) باشند. اما با وجود چنین کاستی در پژوهش‌های تجربی، می‌توان به‌طور کلی چنین نتیجه گرفت که با توجه به احتمال وجود فرایند آشوبی، اعمال روش استاندارد و متداول یعنی به‌کارگیری مدل‌های خطی در برآورد و پیش‌بینی این سری‌ها، ناکافی بوده و در برخی موارد می‌تواند نتایج گمراه‌کننده‌ای به دنبال داشته باشد.

مطابق تئوری کیاس، همه رخدادها و رفتارها تابع نظم علمی نیستند و اگرچه می‌توان به پیش‌بینی آن‌ها نیز مبادرت کرد؛ ولی پیش‌بینی‌های به‌شمار خطی نمی‌تواند راه حل مناسبی آید. با تجربه و آزمون مدل‌های جبری ساده^۳ نمی‌توان روند تحول و تغییرات مسیر رود را در زمان $t+1$ نسبت به زمان t محاسبه

1 Bifurcation

^۲ پدیده آشوب در فرآیندهای زمان گسسته و زمان پیوسته مشاهده می‌شود؛ در فرآیندهای زمان پیوسته، پیچیدگی سیستم یکی از لازمه‌های وجود پدیده آشوب است، به طوری که باید حداقل سه متغیر حالت در یک سیستم آشوبناک وجود داشته باشد (ابرهارت، ۱۹۹۸، ص ۴۴) و (فیلیپس، ۲۰۰۶، ۱۲۱).

علمی که این تئوری در اختیار ما قرار می‌دهد، تغییر مقیاس در نگاه به وقایع است به گونه‌ای که بتوان نظم ساختاری آن را کشف کرد. البته نگاه جدید این منطق به نظم، بسیاری از نظریات را در ژئومورفولوژی مورد چالش قرار می‌دهد. در یک سیستم آشوبناک در فاصله زمانی بسیار کم، یک حرکت پریودیک می‌تواند منجر به پیوند دیگری شود که مثلاً در آن فرکانس کاری، مدار به فرکانسی بالاتر تغییر یابد. چنین تکاملی از یک حرکت پریودیک غیرپایدار به پیوند دیگر می‌تواند منجر به رفتارهای تصادفی‌گونه در یک سیستم شود که این قابلیت بررسی در بحث تحلیل زمان کوتاه ممکن نیست. غالب آزمون‌های مربوط به کشف فرایند آشوبناک در یک سری زمانی نیاز به داده‌های فراوان دارند. متأسفانه در ژئومورفولوژی تولید داده‌ها با فراوانی بسیار، به راحتی سایر علوم تجربی و آزمایشگاهی امکان‌پذیر نیست. این مشکل، به‌ویژه در مورد متغیرهایی مانند دبی و تکتونیک نمود بیشتری دارد. بنابراین، در چنین مواردی نتیجه آزمون‌ها را باید با احتیاط بیشتری تفسیر و یا آنها را با انجام سایر آزمون‌های تکمیلی مقایسه کرد.

امروزه پرداختن به مفهوم کیاس در علوم مختلف و ژئومورفولوژی در حال گسترش است. چه بسیار مدل‌هایی که بر پایه فرض خطی بودن و تصادفی بودن روندها بنا نهاده شده‌اند که از این پس از اعتبار می‌افتند. با اثبات وجود آشوب در روند یک متغیر و یک سیستم ژئومورفیک، تخمین دقیق پارامترها حساسیت می‌یابد و تمامی برآوردهای گذشته از اعتبار می‌افتند، زیرا از خصوصیات اصلی مدل‌های آشوبی حساسیت

نمود؛ و در بسیاری از موارد نوعی بی‌نظمی در تبیین چنین روندهائی دیده می‌شود. این بی‌نظمی‌ها که بر وجود ناتعادلی^۱ در سیستم و به‌صورت آشفتگی‌هایی در روند معادلات جبری بروز می‌کند، آشوب نام دارد و مقطعی از روند که دارای چنین بی‌نظمی‌هایی است، دلالت بر رفتارهای آشوبناک^۲ دارد که شناخت مکانیسم آن‌ها با فنون جبری ساده امکان‌پذیر نیست و آشنائی، درک و تبیین مکانیسم آشوبناک چنین رفتاری مستلزم به‌کارگیری فنون غیرخطی^۳ به‌ویژه در مقیاس زمانی بلندمدت است.

رفتارهای به‌ظاهر تصادفی از نوعی نظم برخوردارند و مطالعه الگو و تیپ‌های چنین بی‌نظمی‌هایی حقایق فیزیکی خاصی را روشن می‌کند؛ این نکته را باید خاطر نشان کرد که تبیین الگوهای بی‌نظمی در رفتار سیستم‌ها بدین معنی نیست که ما قادر به تحلیل علی رفتار آنها شده‌ایم، زیرا معادلات غیرخطی که بدین شیوه برای رفتار سیستم‌ها تدوین می‌شود، قابل حل نبوده لذا پیش‌بینی در آن‌ها نیز میسر نخواهد بود. نظم را نباید تنها در یک مقیاس جستجو کرد. پدیده‌ای که در مقیاس محلی، کاملاً تصادفی و غیرقابل پیش‌بینی به نظر می‌رسد، چه بسا در مقیاس بزرگتر، کاملاً قابل پیش‌بینی باشد. بسیاری از تغییرات ژئومورفیکی که در مقیاس ۲۰ ساله ممکن است کاملاً تصادفی و بی‌نظم به‌نظر برسند، ممکن است در مقیاس ۲۰۰ ساله، ۲۰۰۰ ساله یا ۲۰۰۰۰ ساله دارای دوره تناوب مشخص و یا نوعی نظم علی باشند. روش

1 Disequilibrium

2 Chaotic

3 Non-linear

که این پدیده‌ها در آن رخ می‌دهد، آنقدر کوتاه است که می‌توان شاهد تحول در چشم اندازه‌های ژئومورفولوژیک یک منطقه بود (مثل تغییر در مجرا یا وسعت یک رود یا جا به جایی مواد در جریان یک ریزش دامنه‌ای).

مسیرهای قبلی رود کل حالتی از سیستم است که با فرایندهای امروزی در تعادل نیستند و بیانگر نوعی بی‌نظمی در رابطه بین پاسخ فرم و فرایند است، اما این به مفهوم ایجاد عدم تعادل در کل سیستم نیست؛ بلکه به واسطه تغییرات سریع و دیرکرد در پاسخ سیستم به آن تغییرات، بی‌نظمی خاصی در روند عام ایجاد شده که پس از سپری شدن زمان تاخیر مجدداً روند عام قبلی حاکمیت می‌یابد. ناتعادلی وقتی رخ می‌دهد که بین پاسخ متغیرهای وابسته (متغیرهای فرم (زا) به میزان تغییراتی که در متغیرهای غیروابسته (میزان عناصر و عوامل فرایندی) رخ داده است، تاخیر زمانی وجود داشته باشد و در رابطه ورودی‌های سیستم با خروجی‌های آن (فرم و فرایند) نوعی عدم هماهنگی زمانی دیده شود؛ به عبارتی فرم‌ها در برابر تغییرات فرایند با زمان تاخیر پاسخ دهند، به طوری که این دیرکرد در پاسخ، نوعی اغتشاش و بی‌نظمی در مقایسه با روند عمومی سیستم تلقی شود. تغییرات حول وحوش میانگینی صورت می‌گیرد و نوسان خاصی که بیانگر افت و خیز روند کلی تغییر باشد، دیده نمی‌شود. منحنی ناتعادلی در ابتدا تغییرات فرمی زیادی نشان می‌دهد، اما این تغییر در جهت دستیابی به پایداری- است؛ اگرچه هنوز این اتفاق رخ نداده است.

نسبت به اندازه پارامترها و شرایط اولیه است؛ که این مساله اهمیت توجه بیشتر به اندازه‌گیری متغیرها را خاطر نشان می‌سازد. با ورود دیدگاه سیستمی به ژئومورفولوژی بسیاری از پدیده‌های ژئومورفولوژیک که با دیدگاه‌های دیگر تبیین‌پذیر نبودند، تحلیل‌پذیر شده و کیاس در ژئومورفولوژی قادر به بازشناسی پیچیدگی‌های خاص ناشی از تعامل متغیرهای شکل-زاست؛ آنچه در تغییرات بستر رودکل با دیدگاه کیاس مطرح است، را نمی‌توان تصادفی و بدون نظم دانست، زیرا تغییرات بستر به نوع تعامل متغیرهای فرم و فرایند بستگی دارد. این مساله بیشتر در دیدگاه سیستمی و مقوله ناتعادلی^۱ مطرح، و در ژئومورفولوژی سیستمی تبیین‌پذیر است. در دیدگاه سیستمی تحلیل‌های ژئومورفیک بر اساس رابطه بین فرایند و فرم صورت می‌گیرد و لذا تعادل حالت یا رابطه معینی از نحوه ارتباط فرم و فرایند در یک دستگاه شکل‌زا تلقی می‌شود. این تعادل به این معنی نیست که هیچ‌گونه تغییری وجود ندارد، بلکه نوعی گرایش در ناپایداری بستر و جهت آن‌ها دیده می‌شود و اگرچه نوساناتی وجود دارد ولی این نوسانات حول یک محور خاص است. به طوری‌که پایداری در چشم انداز خود انعکاسی از وجود نوعی تعادل بین فرم و فرایند تلقی شده است. در چشم‌اندازهای متعادل متغیرهای وابسته به فرم با نیروهای طبیعی به وجود آورنده سیستم‌های شکل‌زا در تعادل و توازن می‌باشند، اگرچه تعادل بین فرم و فرایند ناگهانی به وجود نمی‌آید، ولی گاه مقیاس زمانی

- methods for chaotic data. *Chaos* 3 (2), pp 127-141.
- Howard. A.D.(1982): Equilibrium and time scales in geomorphology: application to sand-bed alluvial streams. *Earth Surface Processes and Landforms*. 7:303-325.
- Huggett. R.J.(1988): Dissipative Systems: implications for geomorphology. *Earth Surface Processes and Landforms*. Vol. 13, pp 45- 49.
- Magnitskii. N.A.(2008): Universal Theory of Dynamical Chaos in Nonlinear Dissipative systems of differential equations, *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, Volume 13, Issue 2, pp 416-433.
- Meresse, S, et.al.(2008): Formation and evolution of the chaotic terrains by subsidence and magmatism: *Hydraotes Chaos, Mars, Icarus*, Volume 194, Issue 2, pp 487-500
- Moukam K, Bowong. S, Tchawoua. C, Kaptouom. E (2004): Strange attractors and chaos control in a Duffing-Van der Pol oscillator with two external periodic forces, *Journal of Sound and Vibration*, Volume 277, Issues 4-5, pp 783-799.
- Phillips, J.D.(2006): Deterministic chaos and historical geomorphology: A review and look forward. *Geomorphology* (76), pp109-121.
- Ren. Y. J, Elishakoff. I & Shinozuka. M(1995): Conditional simulation of non-Gaussian random fields for earthquake monitoring systems, *Chaos, Solitons & Fractals*, 5(1), pp 91-101.
- Rodriguez J. A.(2005): Outflow channel sources, reactivation, and chaos formation, *Xanthe Terra, Mars, Icarus*, Volume 175, Issue 1, pp 36-57
- Sannasiraj. S. A, Zhang.H, Babovic.V,(2004): Enhancing tidal prediction accuracy in a deterministic model using chaos theory, *Advances in Water Resources*, Volume 27, Issue 7, pp 761-772.
- حوادث نئوتکتونیک در محدوده مورد مطالعه در زمره رفتارهای کیاتیک محسوب می‌شوند و حتی اگر در ورودی به سیستم تغییری ایجاد نشود، تغییر سطح اساس منطقه در سیستم شکل‌زائی منطقه را که به نوعی با متغیرهای شکل‌زا در تعادل بوده - علی‌رغم آنکه هیچ تغییری در ورودی سیستم حادث نشده - به واکنش غیر تعادلی واداشته است.
- منابع**
- رامشت، محمدحسین(۱۳۸۰): تعادل در دیدگاه‌های ژئومورفولوژی، فصلنامه تحقیقات جغرافیائی، شماره ۶۵-۶۶
- رامشت، محمدحسین(۱۳۸۲): نظریه کیاس در ژئومورفولوژی، مجله جغرافیا و توسعه، شماره ۱، صص: ۱۳-۳۶.
- مشیری، سعید(۱۳۸۱): نظریه آشوب و کاربردهای آن در اقتصاد، فصلنامه پژوهش‌های اقتصادی ایران، شماره ۱۲، صص ۲۹-۷۱.
- Andreas C. W.(2002): Chaos, Fractals and Self-organization in Coastal Geomorphology: simulating dune landscapes in vegetated environments, *Geomorphology*, Volume 48, Issues 1-3, pp 309-328.
- Cai-Wan Chang-Jian, Chao-Kuang Chen(2008): Chaos and bifurcation of a flexible rotor supported by porous squeeze couple stress fluid film journal bearings with non-linear suspension, *Chaos, Solitons & Fractals*, Volume 35, Issue 2, pp 358-375.
- Eberhart R(1998): Chaos theory for the biomedical engineer; *IEEE Eng. in Med. and Biology*; 8:pp41-45
- Grassberger, P, Hegger, R, Kantz, H, Schaffrath, C(1993): On noise reduction

- Tsonis, A.A. (1989): Chaos and unpredictability of weather. *Weather*, Vol. 44, 258-263.
- Zelinka, I. (2009): Real-time deterministic chaos control by means of selected evolutionary techniques, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Volume 22, Issue 2, pp 283-297.
- Sivakumar, B. (2004): Chaos theory in geophysics: past, present, and future. *Chaos, Solitons Fractals* 19, pp441 – 46.
- Sun, Y., Sisomphon, P., Babovic, V. (2009): Efficient data assimilation method based on chaos theory and Kalman filter with an application in Singapore Regional Model, *Journal of Hydro-environment Research*, Volume 3, Issue 2, pp 85-95.