

بررسی ماهیت آشوبناکی نوسانات روزانه تراز آب دریاچه ارومیه

یوسف حسن زاده^{*}، محمد تقی اعلمی^۱، سعید فرزین^۲، سیدرضی شیخ الاسلامی^۴ و المیرا حسن زاده^۵

^۱ استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

^۲ دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

^۳ دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

^۴ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

^۵ دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران و زمین شناسی، دانشگاه ساسکاچوان، کانادا

چکیده

نظریه آشوب به مطالعه پدیده‌ها و سیستم‌های دینامیکی غیرخطی و پیچیده‌ای می‌پردازد که رفتار آن‌ها در نگاه اول تصادفی به نظر می‌سد، اما در واقع همین سیستم‌ها تحت حاکمیت قوانین مشخصی می‌باشند و با نگاهی عمیق‌تر، نوعی دوره تناوب و نظم در آنها مشهود می‌گردد. حساسیت به شرایط اولیه، ناپایداری، غیرپریودیک، قطعی و غیرخطی بودن، خصوصیات یک سیستم آشوبناک را تعریف می‌کنند. در سیستم‌های هیدرولوژیکی آشوبناک نیز، می‌توان از تحلیل سری زمانی بلند مدت، سری زمانی کوتاه مدت را استخراج کرد و همچنین اطلاعات و روابط سیستم را بدون نیاز به یافتن قوانین یا روابط دینامیکی حاکم، کشف کرد. از آن‌جا که نوسانات تراز آب دریاچه‌ها ماهیتی دینامیکی و غیرخطی دارد، لذا نظریه آشوب می‌تواند نقش مهمی را در شناخت این پدیده ایفا نماید. با لحاظ اهمیت و موقعیت ملی - جهانی دریاچه ارومیه، هدف از این تحقیق، مطالعه نوسانات روزانه تراز آب دریاچه ارومیه در طول دوره آماری ۴۴ ساله اخیر با استفاده از مفاهیم نظریه آشوب می‌باشد. اولین گام جهت مطالعه یک فرآیند با این نظریه، بررسی آشوبناکی آن است که روش بعد همبستگی از مرسوم‌ترین این روش‌ها است. بدین منظور پس از محاسبه زمان تأخیر و بازسازی فضای حالت، بعد محاط با استفاده از توابع خود همبستگی و الگوریتم نزدیکترین همسایگی کاذب تعیین شده و سپس شیب نمودار بعد همبستگی محاسبه گردیده است. مقدار عددی غیر صحیح این شیب، مبین آشوب‌پذیری سیستم می‌باشد. نمای لب‌پانوف و پهنای باند در توان طیفی فوریه نیز دیگر شاخص‌های بررسی ماهیت آشوبناکی هستند که در این مطالعه مورد بررسی قرار گرفته‌اند و نتایج حاصله از آنها نیز حاکی از آشوبی بودن سیستم می‌باشد.

واژگان کلیدی: دریاچه ارومیه، نوسانات تراز آب، نظریه آشوب، بعد محاط، نمای لب‌پانوف.

۱- مقدمه

طوری که نزدیک به نصف وسعت دریاچه به شوره زار تبدیل شده است [۳]. طی ۴۴ سال اخیر تراز آب دریاچه حدود ۶ متر کاهش یافته است. حداکثر و حداقل تراز آب در این دوره آماری، به میزان ۱۲۷۷/۶۷ و ۱۲۷۲/۱۸ متر بوده است [۴]. از جمله نوسانات شدید تراز آب دریاچه ارومیه نیز، در سال ۱۳۳۱ بوده که در این سال سطح آب دریاچه بسیار پایین‌تر از تراز متوسط بوده است. در حالی که در سال‌های ۱۳۴۷، ۱۳۶۴، ۱۳۷۲ و ۱۳۷۳ به دلیل وقوع تر سالی، سطح آب به حدود ۳ متر بالاتر از تراز متوسط رسیده و سبب پیشروی آب دریاچه به سمت خشکی و وارد کردن خسارات به زمین‌های اطراف و حاشیه‌نشینان دریاچه شده است [۵ و ۶]. بررسی‌ها نشان می‌دهد تغییرات اقلیمی و خشکسالی، سهمی ۷۰ درصدی و عوامل انسانی، سهمی ۳۰ درصدی در ایجاد نوسانات و کاهش تراز آب دریاچه دارند [۴].

با توجه به آنچه که بیان گردید، مطالعه نوسانات تراز آب دریاچه‌ها سبب جلب توجه محققان نقاط مختلف دنیا گردیده

نوسانات تراز دریاچه‌ها از دیرباز مورد توجه متخصصان و دانشمندان علوم مختلف بوده است. تحقیقات و مطالعاتی مانند تعیین خط ساخت و ساز ساحلی، پیش‌بینی حمل رسوب، پتانسیل فرسایش سواحل و تعیین حجم آب موجود در دریاچه‌ها به شکلی متأثر از نوسانات دریاچه‌ها می‌باشد. دریاچه ارومیه به عنوان بزرگ‌ترین دریاچه داخلی کشور و دومین دریاچه آب شور جهان، از منظرهای مختلف اقتصادی، اجتماعی و زیست محیطی اهمیت بالایی در کشور و منطقه دارد. حوضه دریاچه ارومیه با دارا بودن حدود ۳/۱۵ درصد از سطح کشور، حدود ۷ درصد کل منابع آب سطحی کشور را دارد [۱]. اکنون در کمال تأسف و ناباوری این تالاب بین‌المللی با تهدیدات و مسائل بسیاری درگیر است. طی سالیان اخیر به علت حاکمیت خشکسالی و تغییر اقلیم از یک سو [۲] و احداث تأسیسات آبی، اجرای طرح‌های عمرانی و اضافه برداشت آب از رودخانه‌های واقع در حوضه از سوی دیگر، تراز آب این دریاچه به شدت کاهش یافته است به

غیرپریودیک در سیستم‌های دینامیکی غیرخطی نوسانی می‌پردازد و به شرایط اولیه و وضعیت شروع رفتار به شدت حساس می‌باشد. فرآیندهای آشوبناک ماهیتاً قطعی هستند. پس ناپایداری، رفتار غیر پریودیک، سیستم‌های قطعی و غیر خطی بودن در کنار همدیگر یک سیستم آشوبناک تعریف می‌کنند [۱۵]. این روش بر مبنای تحلیل پویایی سیستم و تفکر سیستماتیک بنا نهاده شده و در مطالعه و بهبود یادگیری سیستم‌های پیچیده کاربرد وسیعی دارد. هدف اصلی استفاده از این روش فهم چرا و چگونگی یک رخداد دینامیکی و تلاش برای اجرای سیاست‌ها و مدیریت کردن آن رخداد است.

از آنجا که نوسانات تراز آب دریاچه‌ها ماهیتی دینامیکی دارد، زیرا که نوسانات دریاچه‌ها تابع زمان و پارامترهای متعددی از جمله حجم ورودی و خروجی، بارش، تبخیر و دخالت انسان می‌باشد که به صورت غیرخطی با یکدیگر ارتباط دارند و مدیریت چنین محیط‌های اکولوژیکی حساسی نیاز به کسب اطلاعات دقیق در فواصل زمانی مختلف دارد، نظریه آشوب نقش بی‌ظیری را در کسب اطلاعات از این پدیده‌ها می‌تواند ایفا کند. این نظریه برای اولین بار در سال ۱۹۶۵ توسط دانشمندی به نام ادوارد لورنز^۱ در هواشناسی به کار برده شد و سپس در حیطه تمام علوم و مباحث تجربی، ریاضی، رفتاری، مدیریتی و اجتماعی وارد شده و اساس تغییرات بنیادی در علوم به ویژه هواشناسی، نجوم، مکانیک، فیزیک، ریاضی، زیست‌شناسی، اقتصاد و مدیریت را فراهم آورده است [۱۵]. نظر به توان وسیع نظریه آشوب در تجزیه و تحلیل پدیده‌ها، تاکنون پژوهشگران نقاط مختلف دنیا تحقیقات گسترده‌ای را انجام داده‌اند که به برخی از آن‌ها اشاره می‌گردد: Zaldívar و همکاران [۱۶] از نظریه آشوب برای شبیه‌سازی تراز آب ونیز ایتالیا استفاده کردند. نتایج نشان دهنده توانایی این نظریه در شبیه‌سازی بود. Solomatine و همکاران [۱۷] سری زمانی موج دریای شمال را با استفاده از نظریه آشوب مطالعه کردند و بیان داشتند که این سری زمانی آشوبناک می‌باشد و قابلیت پیش بینی کوتاه مدت را دارد. Solomatine و همکاران [۱۸] تخمین سطح آب دریای شمال را با استفاده از نظریه آشوب و شبکه‌های عصبی مصنوعی انجام دادند. نتایج، برتری نظریه آشوب را نسبت به مدل‌های خطی همچون خود همبستگی و مدل ARIMA، در تخمین سطح موج آب در منطقه ساحلی نشان داد. Stehlik [۱۹] به بررسی آشوب‌پذیری دبی روزانه رودخانه پرداخت. در این تحقیق با توجه

است. Kubik [۷] در تحقیقی، حداکثر تراز آب سالانه در دریاچه بادخیز میشیگان را بررسی کرد. وی منحنی احتمال وقوع تراز بیشینه سطح آب دریاچه را بدست آورد. Klige [۸] کاهش آرام و تدریجی سطح آب دریای خزر را مورد مطالعه قرار داد. این کاهش در طی شانزده هزار سال گذشته به بیش از ۴۰ متر بالغ می‌شود. Buchberger [۹] تحقیقاتی در مورد بررسی تغییرات سطح آب در یکی از دریاچه‌های بادخیز انجام داده است. در این دریاچه، متوسط سطح آب به صورت یک سری زمانی تحلیل گردید و مدل مناسب برای آن $AR(1)$ تشخیص داده شد. Salas و همکاران [۱۰] اثر بارندگی، تبخیر و دبی ورودی بر کاهش تراز آب دریاچه‌های کیلامبت^۱ و گنتوک^۲ در غرب استرالیا را مورد بررسی قرار داد. نتایج این مطالعه حاکی از آن است که مهم‌ترین علت کاهش تراز آب دریاچه‌ها، کاهش نسبت بارندگی به تبخیر بوده است. Stephen [۱۱] بیان سطح آب دریاچه‌های چکسون^۳ و فلوریدا^۴ را براساس عناصر اقلیمی بارش و تبخیر و با استفاده از فناوری‌های سنسجش از دور مطالعه کرد. نتیجه این مطالعه حاکی از دقت بالای فناوری‌های سنسجش از دور در پایش و ارزیابی نوسان‌های دوره‌ای سطح آب این دو دریاچه می‌باشد. Bayram و همکاران [۱۲] در استانبول با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای نوار ساحلی بخش اروپایی شهر را مطالعه و تغییرات زمانی نوار ساحلی برای سال‌های ۱۹۶۳، ۱۹۹۸ و ۲۰۰۰ را استخراج کردند. Astushi و همکاران [۱۳] دریاچه بیکال در سیبری جنوبی را بررسی کردند. نتایج نشان داد که در دوران‌های گرم، تراز آب دریاچه بسیار بالاتر از دوران‌های سرد بوده و این امر ناشی از ورود حجم بیشتری از آب در دوران گرم بوده است. Kebede و همکاران [۱۴] نیز میزان تغییر تراز آب دریاچه تانا^۵ در اتیوپی را براساس معادله بیان آبی دریاچه، شبیه‌سازی کردند. نتایج حاکی از تأثیر بسیار زیاد تراز آب نسبت به حجم جریان ورودی و خروجی دریاچه می‌باشد.

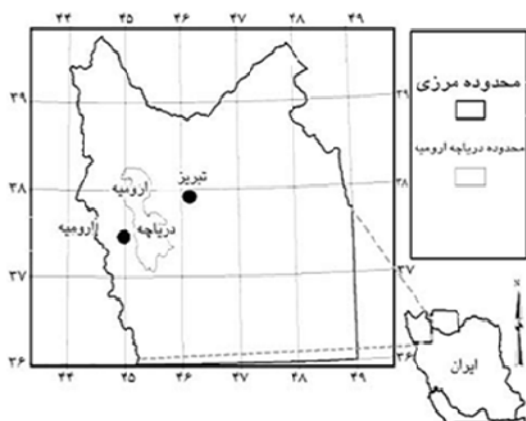
پدیده‌های طبیعی بی‌شماری وجود دارند که عملکرد آنها در یک مقیاس زمانی کوتاه مدت کاملاً تصادفی و بی‌نظم بنظر می‌رسند، لیکن با تغییر مقیاس می‌توانند به نوعی دوره تناوب و نظم دست‌یابند و امکان پیش‌بینی آنها در آینده نیز فراهم گردد. به عبارتی دیگر در هر بی‌نظمی، نظمی نهفته است؛ این ایده پایه اصلی نظریه آشوب می‌باشد که به مطالعه رفتار ناپایدار و

- 1- Keilamlbete
- 2- Gnetuk
- 3- Jackson
- 4- Florida
- 5- Tana

6- Deterministic
7- Edward Lorenz

۲- موقعیت و ویژگی‌های جغرافیایی دریاچه ارومیه

دریاچه ارومیه با طول تقریبی ۱۳۵ تا ۱۵۰ کیلومتر و به عرض ۱۵ تا ۵۰ کیلومتر، مساحتی در حدود ۵۰۰۰ کیلومتر مربع (متغیر در سال‌های مختلف)، تراز متوسط ۱۲۷۵/۶ متر از سطح دریاهای آزاد و عمق متوسط ۶ متر، یکی از بزرگترین دریاچه‌های جهان می‌باشد [۲۵]. موقعیت جغرافیایی دریاچه ارومیه در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی دریاچه ارومیه در شمال غرب ایران

۳- نظریه آشوب

در چند دهه اخیر، تحولی عظیم در شیوه درک و بیان پدیده‌ها، توسط محققین صورت گرفته است. در سالیان گذشته، آن‌ها تبیین‌های خود را در قالب‌های منظم و مشخص ارائه می‌دادند. اما اکنون بر نقش خلاقانه بی‌نظمی و آشوب تأکید کرده و جهان را مجموعه‌ای از سیستم‌هایی می‌دانند که به شیوه‌هایی خود سازمان‌ده -سیستم با محیط خود به تعادل رسیده و تکامل می‌یابد- عمل می‌نمایند. نظریه آشوب به مطالعه سیستم‌های غیرخطی در محدوده‌ای بین رفتار تناوبی^۴ و رفتار تصادفی^۵ می‌پردازد. این نوع سیستم‌ها به شرایط اولیه به شدت حساس می‌باشند. در نگاه اول برخی از سیستم‌های آشوبناک ممکن است کاملاً نظام‌مند و تناوبی و یا حتی برخی تصادفی به نظر آیند؛ در هر یک از این حالت‌ها هر دوی این فرض‌ها (تناوبی بودن و تصادفی بودن) مردود هستند. به طور مشخص می‌توان گفت سیستم‌های آشوبناک، سیستم‌هایی معین هستند یعنی در هر لحظه سیستم را می‌توان به شکل زیر بیان کرد:

به مفهوم تأخیر زمانی، دو سری از داده‌های دبی رودخانه اولریسکا^۱ در جمهوری چک، با مدت تأخیر زمانی مختلف، جهت بررسی امکان رفتار آشوبی داده‌ها و برآورد تأثیر مدت زمان تأخیر در ماهیت جاذب‌های متناظر تجزیه و تحلیل شدند. Regonda و همکاران [۲۰] داده‌های جریان سه رودخانه در مقیاس‌های زمانی مختلف روزانه، پنج روزه و هفت روزه را از نظر آشوب‌پذیری بررسی نمودند. تعدادی از سری داده‌ها رفتار آشوبناک و برخی رفتار تصادفی نشان دادند. Kocak و همکاران [۲۱] با استفاده از مدل پیش‌بینی موضعی نظریه آشوب، پیش‌بینی جریان روزانه سد یاملا^۲ را مورد مطالعه قرار دادند که پیش‌بینی‌های کوتاه مدت، نتیجه بهتری نسبت به روش‌های دیگر نشان داد. Shang و همکاران [۲۲] تکنیک‌های مدل‌سازی سری زمانی غیر خطی را جهت تحلیل داده‌های رسوبات معلق بکار گرفتند. نتایج نشان داد که خصوصیات آشوبناک در پدیده انتقال رسوب وجود دارد و تکنیک‌های بر پایه دینامیک فضای حالت می‌تواند برای تحلیل و پیش‌بینی غلظت رسوبات معلق استفاده شود. Ghorbani و همکاران [۲۳] وجود آشوب در سری زمانی جریان روزانه رودخانه را با استفاده از شاخص‌های بعد همبستگی و نمای لیاپانوف مورد مطالعه قرار دادند و نشان دادند که نتایج هر دو شاخص حاکی از وجود آشوب در سری زمانی مورد مطالعه می‌باشند. خطیبی و همکاران [۲۴] نوسانات ساعتی تراز آب بندر هیلاریز بوت^۳ در غرب استرالیا را در سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۲ با استفاده از نظریه آشوب و برنامه ریزی ژنتیک مورد بررسی و پیش‌بینی قرار دادند. نتایج حاکی از دقت بالای روش برنامه‌ریزی ژنتیک و نظریه آشوب -اندکی دقت بالاتر- در پیش‌بینی می‌باشد.

همان‌گونه که ذکر گردید مطالعه تراز سطح آب اهمیت فراوانی در زمینه ارزش‌های اکولوژیکی دریاچه، میزان رواناب، کشاورزی، مدیریت منابع آب و بسیاری از مسائل روزمره دارد و بدین منظور مدل‌های مختلف تجربی، نیمه تجربی و هوشمند توسعه یافته‌اند. با توجه به تأثیرگذاری عوامل مختلف بر روی نوسانات تراز آب دریاچه، می‌توان این سیستم را به عنوان یک سیستم دینامیکی مطرح نمود و از آنجائی که نظریه آشوب به مطالعه سیستم‌های دینامیکی می‌پردازد، لذا مطالعه این فرآیند با این نظریه می‌تواند به عنوان روش مناسبی مطرح گردد که تاکنون بحث در این مقوله صورت نپذیرفته است.

4- Periodic
5- Random

1- Uhlirska
2- Yamula
3- Hillarys Boat

که در آن T ، فاصله زمانی یا زمان تأخیر^۲ نامیده می‌شود که حداقل بازه زمانی بیانگر کل نمونه، می‌باشد [۲۸]. یکی از دلایلی که منجر به اتخاذ تصمیمات نادرست می‌شود، در نظر نگرفتن تأخیر زمانی می‌باشد. تأخیرها با ایجاد یک سکون و اینرسی، منجر به رفتار نوسانی سیستم می‌شوند و معمولاً مرز بین اثرات کوتاه مدت و بلند مدت مدل را نشان می‌دهند [۲۹].

طبق قضیه «ابعاد محدود شده تیکن» اگر مقدار d به قدر کافی بزرگ باشد بردار $y(t)$ بسیاری از خاصیت‌های دینامیکی مهم $x(t)$ را بازتولید می‌کند. بنابراین برای تحلیل بسیاری از ویژگی‌های سیستم دیگر نیازی به $x(t)$ نداریم. برای به کار بردن این قضیه به صورت مؤثر دو گام باید طی شود:

در گام اول، مقدار تأخیر یا همان T و در گام دوم، مقدار d یا همان بعد محدود شده تعیین می‌گردد [۲۸]. روش اساسی برای تقریب زمان تأخیر که از سری‌های زمانی حاصل می‌شود عبارت است از میانگین اطلاعات متقابل^۳ (AMI) (رابطه (۴)). این روش با در نظر گرفتن T به عنوان زمان لازم برای از بین بردن ارتباط میان مقادیر دو سری زمانی و در نتیجه انتخاب نخستین عبور از صفر تابع همبستگی می‌باشد.

زمان مربوط به اولین مینیمم تابع میانگین اطلاعات متقابل، به عنوان مناسب‌ترین زمان تأخیر در بازسازی فضای حالت پیشنهاد شده است. زیرا در این زمان، فضای حالت تکامل بیشتری دارد. روندی که نخستین مینیمم زمان تأخیر برای تابع میانگین اطلاعات متقابل را تعریف می‌کند بدین صورت می‌باشد:

$$I(T) = \sum_{s(t), s(t+T)} \Pr(s(t), s(t+T)) \log_2 \left[\frac{\Pr(s(t), s(t+T))}{\Pr(s(t))\Pr(s(t+T))} \right] \quad (4)$$

که در آن t تعداد کل داده‌های سری زمانی، $\Pr(s(t))$ و $\Pr(s(t+T))$ به ترتیب احتمالات $s(t)$ و $s(t+T)$ می‌باشند. Pr نیز مقدار تابع احتمال است که می‌توان آن را از هیستوگرام مربوط به داده‌ها استخراج کرد [۲۶].

پس از تعیین زمان تأخیر، فضای حالت ترسیم می‌گردد. حالت‌ها در تحلیل فضای آشوب نقش اساسی ایفا می‌کنند. مفهوم فضای حالت، ابزاری سودمند برای مطالعه سیستم‌های دینامیک می‌باشد. مطابق این مفهوم، یک سیستم دینامیک می‌تواند توسط یک نمودار فضای حالت توصیف شود. این سیستم شامل یک مختصات با متغیرهایی است که در فرمول

$$X(t) = (x(t), x(t-\tau), x(t-2\tau), \dots, x(t-(k-1)\tau)) \quad (1)$$

که در آن t شاخصی اسکالر، نظیر زمان، برای بیان داده‌ها، k بعد سیستم و τ فواصل بین مشاهدات است. حال فرض کنید F تابع غیر خطی حاکم بر سیستم باشد. به دلیل معین بودن سیستم برای هر $t + \tau$ می‌توان نوشت:

$$F: \mathfrak{R}^k \rightarrow \mathfrak{R}^k \quad (2)$$

$$x(t + \tau) = F(X(t)) + p(t)$$

به دلیل وجود خطاهایی نظیر گرد کردن، سرشکنی و خطاهای موجود در اندازه‌گیری، متغیر احتمال $p(t)$ ، با میانگین صفر در نظر گرفته شده است. در سیستم‌های معین خطای موجود (اختلاف بین هر دو حالت مجاور) یا بسیار کم باقی می‌ماند (سیستم‌های پایدار و عادی) یا به صورت نمایی رشد می‌کند (سیستم‌های آشوبناک). در حالی که در سیستم‌های تصادفی این خطا و اختلاف به صورتی کاملاً اتفاقی و تصادفی توزیع می‌شود [۲۶].

۳-۱- زمان تأخیر، فضای حالت و بعد محاط

از آنجایی که سیستم‌های آشوبناک، سیستم‌هایی هستند که رفتار لحظه‌ای آن‌ها پارامترهای متعددی بستگی دارد، در رابطه (۱)، k مقدار بزرگی خواهد بود. از طرفی با افزایش پارامترهای دخیل در رفتار یک سیستم، حجم داده‌ها و عملیات محاسباتی به شدت افزایش می‌یابد از این رو برای k های بزرگ‌تر از ۱۰ مناسب‌تر خواهد بود از همان مدل‌های متغیر تصادفی برای بیان سیستم استفاده کنیم [۲۷]. شیوه‌های مختلفی برای تقلیل بعد سیستم و انتخاب پارامترهایی که رفتار سیستم را با خطای قابل قبولی توضیح می‌دهند، وجود دارد. یکی از کلیدی‌ترین این روش‌ها، قضیه «ابعاد محدود شده تیکن»^۱ است. در این قضیه با کاهش بعد سیستم از k به d به جای بردار $x(t)$ بردار $y(t)$ در نظر گرفته می‌شود. این قضیه را به صورت زیر می‌توان نوشت:

$$s(t) = h(x(t)) \quad R^k \rightarrow R \quad (3)$$

$$y(t) = [s(t), s(t+T), s(t+2T), \dots, s(t+(d-1)T)]$$

2- Delay time

3- Average mutual information

1- Taken

$$\|y_d(t) - y_d^{NN}(t)\| = \max_{0 \leq j \leq d-1} |s(t+jT) - s^{NN}(t+jT)| \quad (۹)$$

با افزایش مقدار d ، $E1(d)$ به سمت یک نزدیک تر می شود. مناسبترین مقدار d مقداری است که در آن تغییرات $E1(d)$ متوقف شود و روند تقریباً ثابتی را طی کند. همچنین برای سیستم‌هایی با متغیرهای تصادفی کمیت‌های زیر تعریف می شوند:

$$E2(d) = \frac{E^*(d+1)}{E^*(d)},$$

$$E^*(d) = \frac{1}{N-dT} \sum_{t=0}^{N-dT-1} |s(t+dT) - s^{NN}(t+dT)| \quad (۱۰)$$

در سیستم‌هایی که رفتار تصادفی دارند مقدار $E2(d)$ ، برای همه داده‌ها نزدیک به یک باقی می ماند. در حالی که در سیستم‌های آشوبناک این مقدار برای d های کوچک، کم تر از یک است [۳۲].

۳-۲- شاخص‌های تشخیص وجود آشوب در سری زمانی

برای آنالیز داده‌ها اولین گام تشخیص دادن این نکته است که آیا داده‌های موجود رفتاری آشوبناک دارند یا نه. در ادامه شاخص‌هایی معرفی خواهند شد که با اندازه‌گیری آن‌ها می توان آشوبناک یا تصادفی بودن سیستم را تعیین کرد.

۳-۲-۱- بعد همبستگی

زبان هندسی آشوب، فراکتال‌ها می باشند. کلمه فراکتال از کلمه لاتین فراکتوس^۱ به معنای قطعات شکسته و نامنظم نشأت می گیرد که برای بیان مفهوم ابعاد فراکتالی کاربرد دارد. مفهومی که در سال ۱۹۱۹ توسط هوسدرف^۲ گسترش یافت. این مفهوم در سال ۱۹۶۷ توسط مندلبرات^۳ برای توصیف پدیده‌های طبیعی به تفصیل بسط داده شد. وی در سال ۱۹۸۳ با معرفی هندسه فراکتالی به عنوان هندسه طبیعت، توجه بسیاری را به این هندسه نوین جلب کرد [۳۳]. این مفهوم می تواند کاربردهای وسیعی در توصیف پدیده‌های آشوبناک در علوم متفاوت داشته باشد.

ویژگی اساسی در توصیف یک الگوی فراکتال، بعد آن (D) می باشد. در هندسه اقلیدسی، اشیاء فراکتال نیستند، بلکه دارای

ریاضی آن وجود دارد و متغیرها نشان دهنده وضعیت سیستم در هر لحظه خاص می باشند. تکنیک متداولی که توسط تیکن ارائه شده از روش تأخیر برای نگاشتن یک سری زمانی واحد در یک فضای d بعدی استفاده می کند. روش تاکن به بیان ساده به این صورت است که یک شبکه‌ای به طول d از روی سری زمانی عبور داده می شود و به این ترتیب یک ماتریس با تعداد سطرهای برابر d تشکیل می یابد. برای سری زمانی:

$$x(t) = (x_0, x_1, x_2, x_3, \dots, x_i, \dots) \quad (۵)$$

ماتریس برای باز سازی خط سیر این گونه است:

$$X = \begin{bmatrix} x_0 & x_1 & x_2 & \dots & x_{m-1} \\ x_0 & x_1 & x_2 & \dots & x_m \\ x_0 & x_1 & x_2 & \dots & x_{m+1} \\ \vdots & & & & \end{bmatrix} \quad (۶)$$

تاکن نشان داده است که چنین ماتریسی کلیه ویژگی‌های هندسی سیستم دینامیکی اولیه را بیان می کند. انتخاب هوشیارانه تأخیرها (تغییر پریود نمونه برداری مقادیر متوالی X_i) با تأثیر بر وسعت جاذب نتیجه را بهتر می کند [۳۰]. برای سری‌های زمانی اسکالر که $t=1,2,3,\dots$ ضای حالت می تواند با استفاده از تأخیرها ایجاد شود.

در گام بعد برای تعیین بعد محدود شده یا d می توان روشی را که توسط Cao ابداع شده است، به کار برد؛ طبق رابطه زیر [۳۱]:

$$E1(d) = \frac{E(d+1)}{E(d)} \quad (۷)$$

در رابطه بالا $E(d)$ به صورت زیر محاسبه می شود:

$$E(d) = \frac{1}{N-dT} \sum_{t=0}^{N-dT-1} \frac{\|y_{d+1}(t) - y_{d+1}^{NN}(t)\|}{\|y_d(t) - y_d^{NN}(t)\|} \quad (۸)$$

که در آن N معرف طول سری داده‌ها، d بعد محدود شده و NN نماینگر نزدیک‌ترین بردار همسایه به بردار دیگر است که توسط معیار زیر تعریف می شود:

1- Fractus
2- Hausdroff
3- Mendelbrot

$$D_C = \lim_{R \rightarrow 0} \frac{\log C(R)}{\log R} \quad (14)$$

در رابطه (۱۴)، D_C بیانگر بعد همبستگی است. گراسبرگر و پروکاشیا ارزیابی $C(R)$ را در محدوده مقادیر R پیشنهاد نمودند و سپس نتیجه گرفتند که D_C از شیب خط مستقیمی که بر ناحیه خطی از پلات $\log C(R)$ در مقابل $\log R$ متناسب شده است، بدست می‌آید. اگر D_C عدد صحیح نباشد در این حالت یکی از خصایص مهم سامانه‌های آشوبناک بروز می‌کند [۳۶].

۳-۲-۳- نمای لیپانوف^۳

یک مشخصه مهم سیستم‌های آشوبناک، حساسیت آنها نسبت به شرایط اولیه است. برای نشان دادن میزان حساسیت پاسخ سیستم به تحریک‌های کوچک، این کمیت را ارزیابی می‌کنند. نمای لیپانوف λ_m با میانگین نرخ افزایشی به صورت زیر تعریف می‌شود [۳۷]:

$$\lambda_m = \frac{1}{N \Delta t} \sum_{t=0}^{N-1} \ln \left(\left| \frac{s(t + \Delta t) - s'(t + \Delta t)}{s(t) - s'(t)} \right| \right) \quad (15)$$

در رابطه فوق، N تعداد کل داده‌ها، $S(t)$ تابع اسکالر بازسازی شده توسط بعد محاط، $S'(t)$ تابع اسکالر نزدیک به $S(t)$ و Δt بازه زمانی می‌باشد.

مثبت بودن نمای لیپانوف نشان دهنده آشوب است. دو نقطه با همسایگی بی‌نهایت کوچک در حالت اولیه، در جهت m به شدت از یکدیگر جدا می‌شوند. این پدیده "وابستگی حساس به شرایط اولیه" خوانده می‌شود.

۳-۲-۴- توان طیفی فوریه^۴

تابع توان طیفی فوریه به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$P(\omega) = \frac{1}{N^2} \left| \sum_{t=0}^{N-1} x(t) (\exp(-i(2\pi/N)t\omega)) \right|^2 \quad (16)$$

این توان طیفی با بهره‌گیری از آنالیز فوریه، برای نشان دادن فرکانس فراز و نشیب‌های زمانی متغیرهای پویا، به دست می‌آید.

بعد صحیح هستند. اما در یک الگوی فراکتال تکرار ساختار موجب می‌شود که خط، صفحه را اشغال کند. در این صورت مقدار بعد بین ۱ تا ۲ متغیر است. با افزایش پیچیدگی و غنای ساختار تکرار شونده، این مقدار به ۲ نزدیکتر می‌شود. تعداد زیادی الگوریتم طی پنجاه سال اخیر برای محاسبه بعد فراکتالی تبیین شده است، که از بین این روش‌ها، بعد همبستگی کاربرد بیشتری دارد. الگوریتم بعد همبستگی در سال ۱۹۸۳ توسط Procaccia و Grassberger ابداع گردید [۳۶].

۳-۲-۲- الگوریتم گراسبرگر- پروکاشیا^۱

بعد همبستگی یکی از روش‌های مرسوم تعیین آشوبناکی سیستم و همچنین بعد آشوبی می‌باشد. این کمیت برای سامانه‌های آشوبناک عدد صحیح نخواهد بود. الگوریتم گراسبرگر- پروکاشیا مبتنی بر تخمین زیر است: احتمال آن که دو نقطه از یک مجموعه درون یک سلول مشابه با اندازه R باشند، حدوداً برابر با احتمال آن است که دو نقطه از مجموعه با فاصله $|x(i) - x(j)|$ که مقدار آن کمتر یا مساوی با R است، از هم جدا شده باشند. $C(R)$ از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۳۵]:

$$C(R) = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i=0}^{(N-dT-1)} \sum_{j=0, j \neq i}^{(N-dT-1)} \Theta(R - |x(i) - x(j)|) \quad (11)$$

که در آن N معرف طول دامنه داده‌ها و $\Theta(x)$ عبارت است از تابع مشخصه هویساید^۲:

$$\Theta(x) = \begin{cases} 0 & x < 0 \\ 1 & x \geq 0 \end{cases} \quad (12)$$

هنگامی که $N \rightarrow \infty$ ، مقادیر R به صفر نزدیک می‌شود و تخمین در رابطه (۱۱) به مقدار دقیق خود خواهد رسید. در این صورت برای محاسبه نرخ تغییر $C(R)$ می‌توان نوشت:

$$C(R) = \lim_{R \rightarrow 0} kR^{D_C} \quad (13)$$

با حل رابطه بالا مقدار D_C بدست می‌آید:

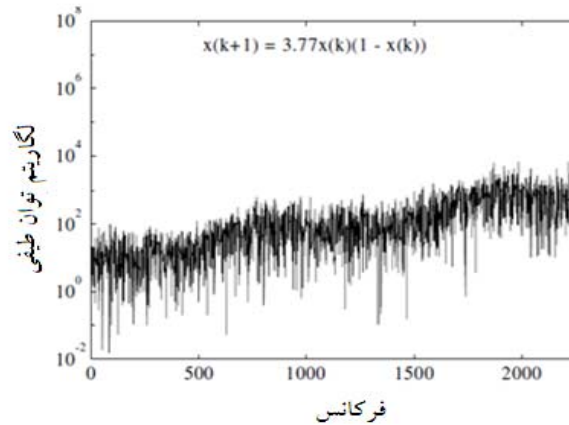
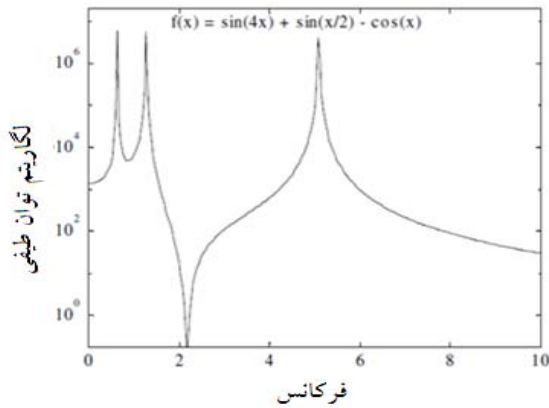
3- Lyapunov exponent

4- Fourier power spectrum

1- Grassberger- Procaccia

2- Heaviside

تشخیص سامانه‌های آشوبناک از سامانه‌هایی که رفتاری به شدت تصادفی دارند با استفاده از این کمیت مشکل است [۲۱]. در شکل (۲) این شاخص برای یک رفتار آشوبناک (سمت راست و یک رفتار تناوبی (سمت چپ) رسم شده است.



شکل ۲- توان طیفی فوریه برای یک تابع متناوب (سمت چپ) و یک تابع آشوبناک (سمت راست)

جدول ۱- خصوصیات آماری سری زمانی تراز آب دریاچه ارومیه

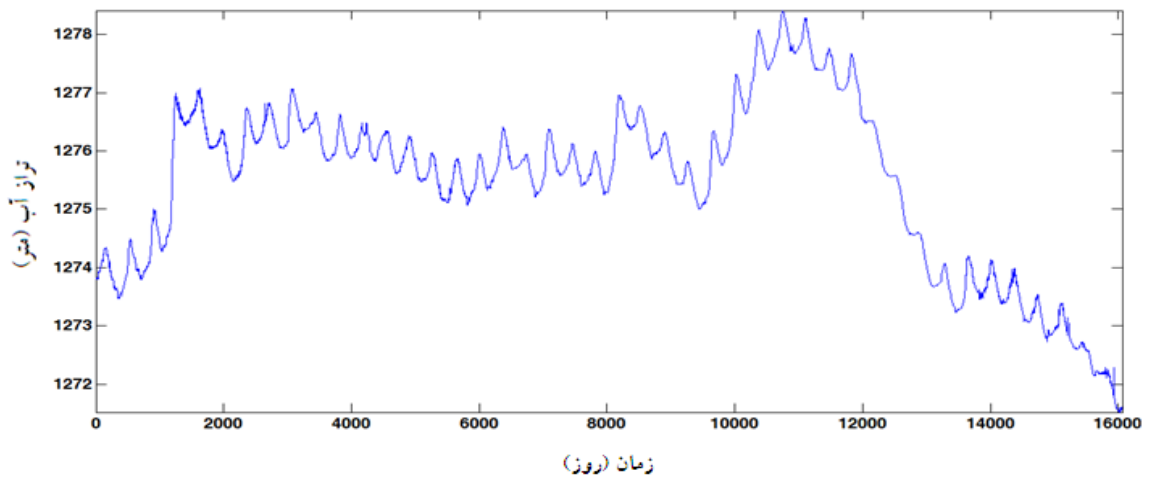
۱۶۰۶۳	تعداد داده‌ها
۱۲۷۵/۴۶	میانگین (m)
۱/۴۴	انحراف معیار (m)
۱۲۷۸/۴۱	مقدار بیشینه (m)
۱۲۷۱/۵۲	مقدار کمینه (m)
-۰/۵۵۹	چولگی (m)

برای استفاده از قضیه ابعاد محدود شده تاکن، مقدار تأخیر زمانی (T)، برابر با اولین مینیمم تابع (AMI) در نظر گرفته می‌شود. بدین منظور، تابع فوق در شکل (۵) رسم گردیده‌است. از آنجا که T مناسب برابر است با اولین مینیمم این تابع، بنابراین با توجه به شکل (۵)، زمان تأخیر داده‌ها برابر با ۱۲۵ محاسبه می‌گردد.

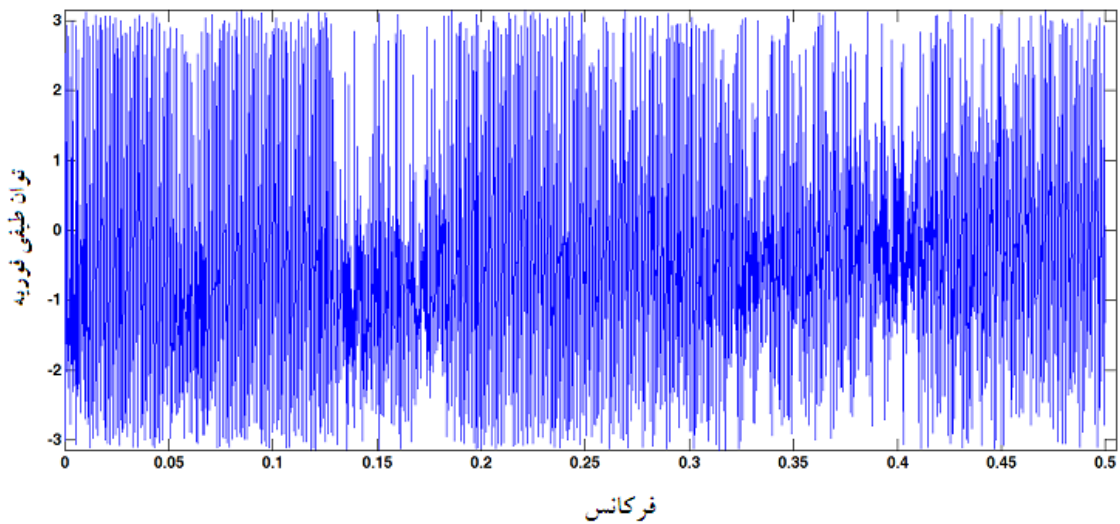
۴- نتایج و بحث

نوسانات روزانه تراز آب دریاچه ارومیه، از مهم‌ترین عوامل بیلان آب دریاچه است که مقادیر روزانه آن طی دوره شاخص مورد بررسی و برآورد قرار می‌گیرد. سری زمانی مقادیر فوق طی یک دوره آماری ۴۴ ساله اخیر در شکل (۳) رسم گردیده است. خصوصیات آماری سری زمانی مورد مطالعه در این تحقیق محاسبه و در جدول (۱) ارائه شده است.

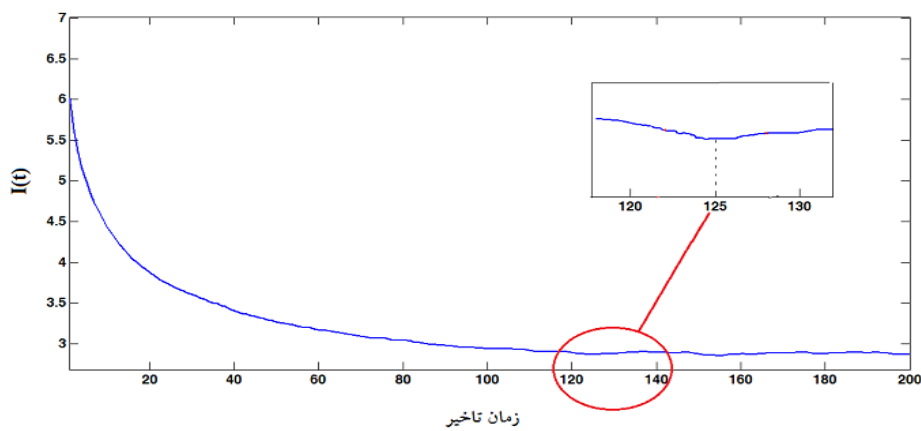
قبل از بازسازی فضای حالت، ابتدا مقادیر توان طیفی فوریه به عنوان اولین شاخص تعیین آشوبناکی سری زمانی مورد مطالعه، ترسیم گشته و در شکل (۴) نمایش داده شده است. پهنای وسیع باند توان طیفی فوریه در شکل فوق، نشانگر رفتاری آشوبناک برای این سیستم می‌باشد.



شکل ۳- سری زمانی نوسانات روزانه سطح آب دریاچه ارومیه طی دوره ۴۴ ساله



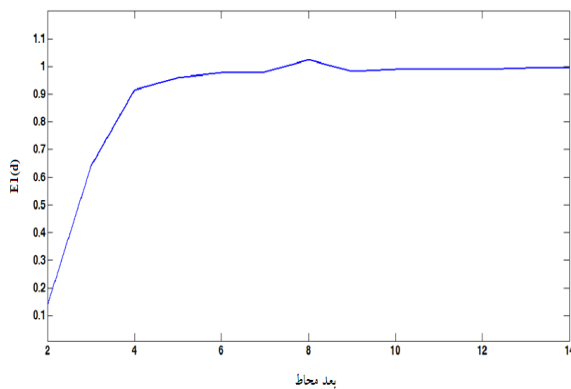
شکل ۴- پهنای باند وسیع در توان طیفی فوریه مربوط به دوره آماری



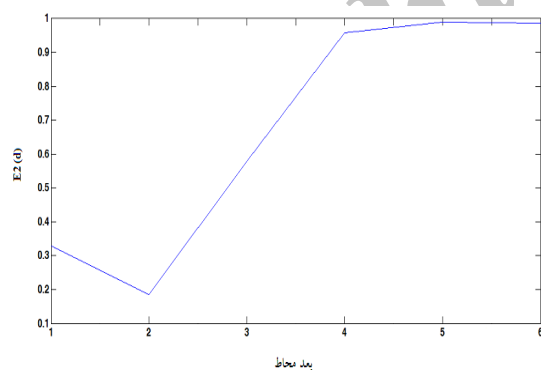
شکل ۵- تابع (AMI) به ازای زمان‌های تأخیر متفاوت

پس از تعیین زمان تأخیر و رسم فضای حالت، با استفاده از روش Cao بعد محاط تعیین می‌گردد. این روش، اصلاح شده الگوریتم نزدیک‌ترین همسایگی کاذب می‌باشد [۲۹] و نسبت به دیگر روش‌ها دارای مزایای زیر است [۳۶]:

وابستگی زیادی به تعداد داده‌های موجود ندارد، قابلیت تمایز بین سیگنال‌های قطعی و احتمالاتی را دارا می‌باشد و در مورد سری‌های زمانی با بعد جذب بالا نیز کارایی مطلوبی دارد. این روش توسط دو کمیت $E1(d)$ و $E2(d)$ تعریف می‌شود. مقادیر این دو کمیت محاسبه شده است که به ترتیب در شکل‌های (۷) و (۸) مشاهده می‌شوند.



شکل ۷- نمودار تغییرات بعد همبستگی با افزایش بعد محاط نوسانات روزانه تراز آب دریاچه ارومیه

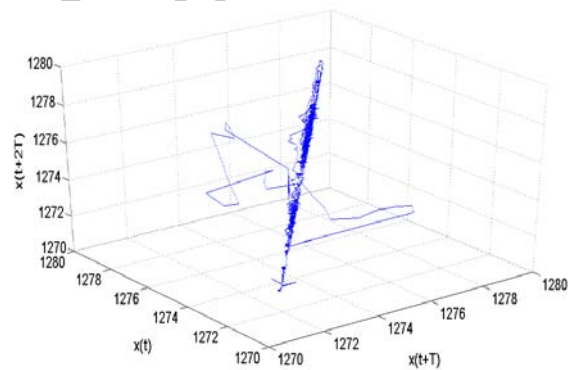


شکل ۸- نمودار تغییرات $E2(d)$ نسبت به افزایش بعد محاط

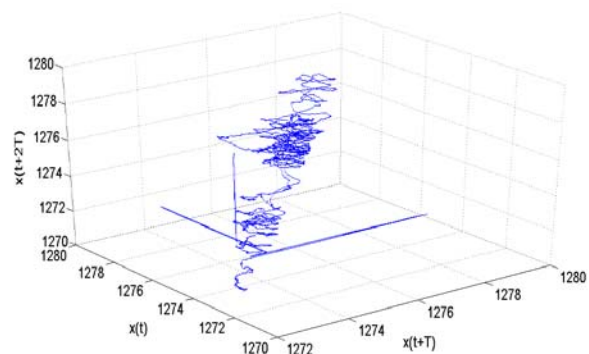
با توجه به شکل (۷)، $E1(d)$ تا مقدار مشخصی بالا رفته و سپس در پیرامون ۱ نوسان پیدا می‌کند. در $d = 4$ دچار یک پیچ خوردگی شده است، بنابراین بعد محاط برابر با ۴ می‌شود و نوعی از اشباع بعد از بعد ۴ مشخص می‌باشد. مقدار کم بعد محاط نشان از بعد پایین سیستم دارد. در این بعد، رفتار دینامیکی سیستم به صورت غیر خطی است.

پس از تعیین زمان تأخیر، نمودارهای فضای حالت ترسیم می‌گردد. شکل‌های (۶- الف و ب) فضای حالت را برای گروه‌های زمانی ۱۰ (عددی کوچک تر از زمان تأخیر) و ۱۲۵ (زمان تأخیر)، نشان می‌دهند. این نمودارها در یک فضای سه بعدی رسم شده‌اند.

نمودارهای شکل (۶) به راحتی می‌توانند تکامل یک گروه زمانی را نشان داده و در صورت وجود، مناطق جاذب را مشخص کند. همان‌گونه که در این شکل ملاحظه می‌شود، فضای جاذب در $T = 10$ نسبت به فضای جاذب در $T = 125$ کمتری را اشغال کرده است. یک سیستم آشوب می‌تواند از حالت نظم به آشوب در نوسان باشد. با افزایش ناپایداری سیستم، نواحی جاذب به سیستم فشار وارد می‌کنند و سیستم را به حالت نظم برمی‌گردانند. این پروسه سبب فعال نگه داشته شدن سیستم می‌شود.



الف) $T = 10$



ب) $T = 125$

شکل ۶- نمودار فضای حالت برای داده‌های مربوط به نوسانات

روزانه سطح آب دریاچه ارومیه در زمان‌های

الف) $T = 10$ و ب) $T = 125$

در نهایت، بررسی اجمالی شاخص‌های آشوب، مقدار غیر صحیح (تقریباً برابر با ۳/۸۴) شیب نمودار بعد همبستگی، نمای لیپانوف مثبت و پهنای وسیع باند در توان طیفی فوریه، همگی نشانگر رفتار کاملاً آشوبناک سیستم مورد مطالعه می‌باشند. این امر مبین آن است که رفتار سیستم غیر تصادفی است و به عبارتی جزو فرآیندهای استوکاستیکی مطرح نمی‌شود. همچنین بعد همبستگی بدست آمده حاکی از رفتار کم بعد نوسانات تراز آب دریاچه می‌باشد. در سطوح نظری و عملی مزایای عمده‌ای از نظریه آشوب برای تحلیل سیستم‌های هیدرولوژیکی وجود دارد که اهم آن‌ها عبارتند از:

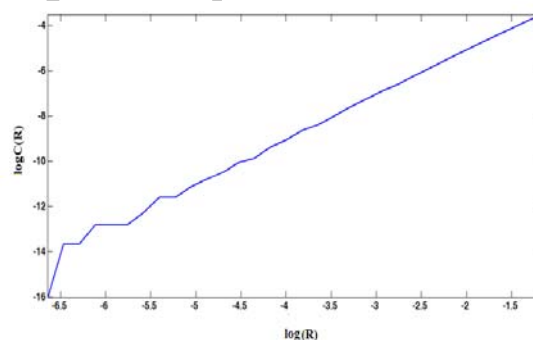
الف) می‌توان از تحلیل سری زمانی بلند مدت (مثلاً روزانه)، سری زمانی کوتاه مدت (مثلاً ساعتی) را استخراج کرد.
ب) اطلاعات و روابط سیستم را بدون نیاز به کشف قوانین یا روابط دینامیکی حاکم کشف می‌کند.
ج) برای سیستم‌های شدیداً غیر خطی نیز قابل اجراست و همچنین کلیه پارامترهای دینامیکی مهم سیستم را محاسبه می‌نماید.

۵- نتیجه‌گیری

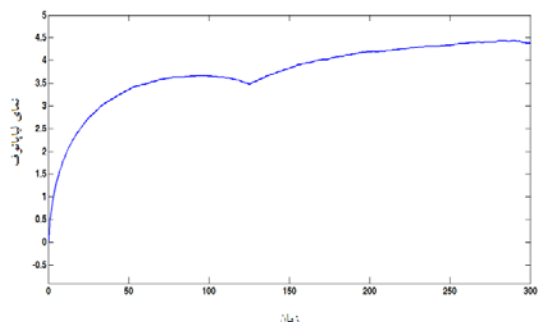
طی سالیان اخیر تراز آب دریاچه ارومیه ۶ متر کاهش یافته است که این امر مسبب مشکلات فراوان اکولوژیکی، اقتصادی و اجتماعی گشته است. شرایط آب و هوایی حاکم بر حوضه آبریز به علاوه اثرات فعالیت‌های انسانی، عوامل اصلی در ایجاد نوسانات تراز آب دریاچه به شمار می‌روند. با توجه به وجود عوامل فوق و سایر عوامل فیزیکی، فرض غیر خطی بودن سیستم نوسانات صحیح به نظر می‌رسد. از آنجا که این نوسانات ماهیتی دینامیکی داشته و مدیریت چنین اکوسیستم‌های حیاتی نیاز به کسب اطلاعات دقیق در فواصل زمانی مختلف دارد، نظریه آشوب می‌تواند نقش بی‌نظیری را در کسب اطلاعات از این پدیده و آنالیز و مدل‌سازی آن ایفا کند. در این مطالعه، ضمن معرفی ابزارهای مختلف نظریه آشوب، عملکرد این نظریه جهت مدل‌سازی رفتار پیچیده نوسانات روزانه تراز آب دریاچه ارومیه در طول ۴۴ سال دوره آماری اخیر مورد بررسی قرار گرفت. با استفاده از روش‌های تابع خودهمبستگی و شمارش نزدیکترین همسایگی کاذب، مقدار زمان تأخیر $T = 125$ حاصل گردید و پس از ترسیم فضای حالت، مقدار بعد محاط $d = 4$ بدست آمد. مقادیر بعد همبستگی، نمای لیپانوف و توان طیفی فوریه، به عنوان شاخص‌های تمایز بین رفتار آشوبناک و تصادفی به کار گرفته شد. بعد همبستگی غیر صحیح برابر با ۳/۸۴، پهنای وسیع

آنچه که با توجه به شکل (۸) محرز است، آنست که مقادیر $E2(d)$ برای مقادیر کوچک d کمتر از یک باقی مانده است که معرف آشوبناکی رفتار سیستم است [۳۲].

به منظور تعیین بعد همبستگی، نمودار $\log C(R)$ در مقابل تغییرات $\log(R)$ در شکل (۹) رسم گردیده است. شیب قسمت خطی این دیاگرام با تقریب خوبی مقدار D_C را بدست می‌دهد. آنچه که از شکل (۹) استنباط می‌شود، مقدار غیر صحیح (تقریباً برابر با ۳/۸۴) شیب نمودار بعد همبستگی است. این امر نشانگر رفتار آشوبناک سیستم می‌باشد. همچنین حاکم بودن آشوب با بعد همبستگی کم، یک نتیجه مهم در پی دارد و آن امکان پیش‌بینی دقیق سری زمانی نوسانات روزانه دریاچه ارومیه در فواصل زمانی کوتاه مدت می‌باشد. در ادامه، به منظور بررسی دیگر شاخص وجود آشوب در سری زمانی مورد مطالعه، نمودار نمای لیپانوف در شکل (۱۰) نمایش داده شده است.



شکل ۹- نمودار تغییرات نسبت $\log C(R)$ در مقابل $\log(R)$ - شیب غیر صحیح نمودار بعد همبستگی (تقریباً برابر با ۳/۸۴)



شکل ۱۰- مقادیر نمای لیپانوف برای سری زمانی نوسانات روزانه تراز آب دریاچه ارومیه

با توجه به شکل (۱۰)، مقادیر این نما مثبت می‌باشد. مثبت بودن نمای لیپانوف نشان دهنده آشوب و حساسیت سیستم نسبت به شرایط اولیه می‌باشد.

- [8] Klige, R. K., "Man Results of Paelo Hydrologic Investigation", Institute of Water Problems, Academy of Sciences of the USSR, 1983.
- [9] Buchberger, S. G., "Conditional Frequency Analysis of Autocorrelated Lake Levels", Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE, 1995, 121 (2), 158-170.
- [10] Salas, J., Shin, H., "Uncertainty Analysis of Reservoir Sedimentation", Journal of Hydraulic Engineering, 1999, 125 (4), 339-350.
- [11] Stephen, A. K., "Remote Sensing and GIS Study of Long-Term Water Mass Balance Lake Jackson", College of Engineering Science, Technology & Agriculture. Florida, U.S.A, 2002.
- [12] Bayram, B., Bayraktar, H., Helvacı, C., Acar, U., "Coast Line Change Detection Using Corona, SPOT and IRS ID Images", Turkey-Istanbul, 2004.
- [13] Astushi, U., Masaki, T., Yoshio, I., "Lake-Level Change During the Past 100000 Years at Lake Baikal, Southern Siberia", Quaternary Research, 2004, 62, 214-222.
- [14] Kebede, S., Travi, Y., Alemayehu, T. Marc, V., "Water Balance of Lake Tana and its Sensitivity to Fluctuations in Rainfall, Blue Nile Basin, Ethiopia", Journal of hydrology, 2005, 316, 233-247.
- [15] Kocak, K., Saylan, L., Sen, O., "Nonlinear Time Series Prediction of O₃ Concentration in Istanbul", Atmosphere Environment, 2000, 34, 1267-1271.
- [16] Zaldivar. J. M, Strozzi, F., Gutierrez. E., Shepherd, I. M, "Early Detection of High Water at Venice Lagoon Using Chaos Theory Techniques": EUR Report 17317. Ispra: E.C, 1998.
- [17] Solomatine, D. P., Rojas, C. J, Velichov, S., Wust, J. C., "Chaos Theory in Predicting Surge Water Levels in the North Sea", 4th International Conference on Hydroinformatics, Iowa, USA, 2000.
- [18] Solomatine, D. P., Velickov, S., Wust, J. C., "Predicting Water Levels and Currents in the North Sea Using Chaos Theory and Neural Networks", Proc. 29th IAH Congress, Beijing, China: 1-11. September, 2001.
- [19] Stehlik, J., "Deterministic Chaos in Runoff Series", Czech Hydrometeorological Institute, Department of Experimental Hydrology, 143, 06 Prague, 2003.
- [20] Regonda, S. K., Sivakumar, B., Jain, A., "Temporal Scaling in River Flow: Can it be باند درتوان طیفی فوریه و نمای لیاپانوف مثبت، همگی نشان دهنده آن است که نوسانات تراز آب دریاچه، دارای ماهیتی آشوبناک می‌باشد. این امر مبین آن است که رفتار سیستم غیرتصادفی است و به عبارتی می‌توان تراز آب دریاچه را پیش‌بینی کرد. همچنین حاکم بودن آشوب با بعد همبستگی کم، حاکی از امکان پیش‌بینی دقیق سری زمانی مورد مطالعه در فواصل زمانی کوتاه مدت می‌باشد. نمودار $E2(d)$ برای مقادیر کوچک d کمتر از یک باقی مانده که این نیز معرف رفتار آشوبی این سری زمانی می‌باشد. دیگر نتایج نشان می‌دهد که روش‌های غیر خطی نظیر بعد همبستگی، قابلیت بررسی دقیق میزان نوسانات را دارند که این امر با تحلیل‌های خطی میسر نمی‌باشد. به علاوه این روش‌ها درک بهتری از تفسیر نتایج ارائه می‌دهند.
- ۶- مراجع**
- [۱] مؤسسه تحقیقات آب "مدیریت جامع منابع آب حوضه دریاچه ارومیه"، گزارش سنتز، ۱۳۸۵.
- [2] Zarghami, M., Abdi, A., Babaeian, I., Hassanzadeh, Y., Kanani, R., "Impact of Climate Change on Runoffs in East Azerbaijan, Iran", Journal of Global and Planetary Changes, 2011, 78, 137-146.
- [۳] حسن‌زاده، ا.، حسن‌زاده، ی.، ضرغامی، م.، "مدلسازی تأثیر جریان آب سطحی بر کاهش تراز دریاچه ارومیه به کمک پویایی سیستم‌ها"، نشریه مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تبریز، جلد ۴۱، شماره ۲، سال ۱۳۹۰، ۸-۱.
- [۴] وزارت نیرو، دفتر برنامه‌ریزی کلان آب و آبفا، "گزارش تخصیص آب طرح‌های توسعه منابع"، ۱۳۸۶.
- [۵] حسن‌زاده، ی.، "مطالعه رفتار هیدرودینامیکی دریاچه ارومیه و اثرات آن در سواحل مجاور"، دومین کنفرانس بین‌المللی سواحل، بندر و سازه‌های دریایی (ICOPMAS)، دانشگاه علم و صنعت ایران، آذرماه ۱۳۷۵.
- [۶] حسن‌زاده، ی.، زراعت پرور، ع.، "بررسی هیدرولوژی دریاچه ارومیه و علل نوسان سطح آب دریاچه و روش‌های کنترل آن"، اولین همایش دریاچه ارومیه، دانشکده فنی دانشگاه ارومیه، شهریور ۱۳۸۰.
- [7] Kubik, H., "Procedure for Computing Frequency of Maximum Lake Levels", The Hydrologic Engineering Center, December 1974.

- [28] Abarbanel, H., "Analysis of Observed Chaotic Data", Springer-Verlag, New York, 1996.
- [29] Kennel, M. B., Brown, R., Abarbanel, H. D. I., "Determining Embedding Dimension for Phase-Space Reconstruction Using a Geometric Construction", *Physical Review A*, 1992, 45, 3403-3411.
- [30] Kocak, K., Bali, A., "Prediction of Monthly Flows by Using Chaotic Approach", *International Congress on River Basin Management, Antalya, Turkey, 2007*.
- [31] Cao, L., "Practical Method for Determining the Minimum Embedding Dimension of Scalar Time Series", *Physica D*, 2007, 110, 43-50.
- [32] Strozzi, F., Tenreiro, E., Noe, C., Rossi, T., "Application of Non-Linear Time Series Analysis Techniques to Nordic Spot Electricity Market Data", *Liuc Papers, Series Tecnologia*, 2007, 11, 1-5.
- [33] Turner, J. M., "Fractal Geometry in Digital Imaging", London: Academic Press, 1998.
- [34] Hilborn, R. C., "Chaos and Nonlinear Dynamics", Oxford University Press, 2000.
- [35] Henry, B., Lovell, N., "Nonlinear Dynamics Time Series Analysis", in *IEEE (Ed.)* 1999.
- [36] Grassberger, P., Procaccia, I., "Characterization of Strange Attractors", *Physical Review Letters*, 1983, 50 (14), 346-349.
- [37] Banks, J., Dragan, V., Jones, A., "Chaos, A Mathematical Introduction", Cambridge University Press, 2003.
- [21] Kocak, K., Bali, A., Bektasoglu, B., "Prediction of Monthly Flows by Using Chaotic Approach", *International Congress on River Basin Management, Antalya, Turkey, 22-24 March, 2007, Chp 4*, 117, 553-559.
- [22] Shang, P., Na, X., Kamae, S., "Chaotic Analysis of Time Series in the Sediment Transport Phenomenon", *Chaos, Solitons and Fractals*, 2009, 41, 368-379.
- [23] Ghorbani, M. A., Kisi, O., Aalinezhad, M., "A Probe into the Chaotic Nature of Daily Streamflow Time Series by Correlation Dimension and Largest Lyapunov Methods", *Applied Mathematical Modelling*, 2010, 34, 4050-4057.
- [24] Khatibi, R., Ghorbani, M. A., Aalami, M. T., Kocak, K., Makarynsky, O., Makarynska, D., Aalinezhad, M., "Dynamics of Hourly Sea Level at Hillarys Boat Harbour, Western Australia: A Chaos Theory Perspective", *Ocean Dynamics*, 2011, 61, 1797-1807.
- [۲۵] توفیقی، م. ع.، "مدلسازی عددی جریان در دریاچه ارومیه به منظور تعیین موقعیت و دهانه بهینه پل میانگذر"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، ۱۳۸۴.
- [26] Frazier, C., Kockelman, K., "Chaos Theory and Transportation Systems: An Instructive Example", *Proc of 83rd Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington D.C., USA*, 2004.
- [27] Gilmore, R., "Topological Analysis of Chaotic Dynamical Systems", *Review of Modern Physics*, 1998, 70, 1455-1529.

Study of Chaotic Nature of Daily Water Level Fluctuations in Urmia Lake

Y. Hassanzadeh^{1*}, M.T. Aalami¹, S. Farzin¹, S.R. Sheikholeslami² and E. Hassanzadeh³

¹ Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz

² Faculty of Civil Engineering, Amirkabir University of Technology

³ Civil and Geological Engineering Department, University of Saskatchewan, Canada

Abstract

Chaos theory studies complex and nonlinear dynamic systems and phenomena that their behavior seems to be stochastic and irregular at first glance, but in fact these systems are ruled by certain laws and with a deeper look, a kind of periodicity and regularity are evident in them. Sensitivity to initial conditions starting behavior, instability, non-linearity and non-periodic behavior, define a chaotic system. In addition, in chaotic hydrological systems, the short term time series can be extracted through analysis of long term time series. Furthermore, Information and relationships of the system can be achieved without any need to find the rules and governing dynamic relationships. Since the lakes water level fluctuations are dynamic and management of these ecosystems requires exact data at different intervals, chaos theory can play a unique role in acquiring information from this phenomenon. In recent years, Urmia Lake water level as an international wetland has been significantly reduced. Considering to the importance of this lake in Iran and the world, the purpose of this paper is to study the daily fluctuations in the Urmia Lake water level during the past 44 years using the concepts of chaos theory. To study the chaotic behavior of this phenomenon, correlation function, which is one of the exact methods to study these behaviors, was used; therefore, after computing the delay time and reconstructing the phase space, embedding dimension is determined using correlation function and false nearest neighbor algorithm, eventually correlation graph's slope is calculated. The non-integer digit result for this slope is an important index to identify this system as a chaotic system. In addition, studying the other indexes of chaotic behavior of water level such as positive Lyapunov exponent and broad band Fourier power spectrum show the quite chaotic behavior of time series studied.

Keywords: Urmia Lake, Water level fluctuations, Chaos theory, Embedding dimension, Lyapunov exponent.

Received: November 2011

Accepted: May 2012