

بررسی الگوی آشوبی دبی جریان رودخانه دز در مقیاس‌های مختلف زمانی

فاطمه ادب^۱، سید فرهاد موسوی^{۲*}، حجت کرمی^۳ و سعید فرزین^۴

چکیده

یکی از چالش‌های مهم در علم هیدرولوژی، بررسی وجود خصوصیات مختلف در مقیاس‌های زمانی گوناگون است. با در نظر گرفتن رودخانه به‌عنوان سیستمی پویا و حساس به شرایط اولیه، از طریق به‌کارگیری تحلیل‌های غیرخطی و آشوبی می‌توان به مطالعه رفتار دبی جریان رودخانه‌ها پرداخت. امکان وجود رفتار آشوبی در دبی جریان رودخانه دز، در مقیاس‌های مختلف زمانی (روزانه، ماهانه و فصلی) در ایستگاه هیدرومتری بامدژ طی دوره آماری ۳۱ ساله (۹۰-۱۳۶۰) بررسی شد و از چهار روش دینامیک غیرخطی (۱) بازسازی فضای فاز، (۲) روش بُعد همبستگی، (۳) تعیین بزرگ‌ترین نمای لیاپانوف و (۴) محاسبه نمای هرست استفاده شد. برای برآورد دو پارامتر زمان تأخیر و بُعد محاط، از روش میانگین اطلاعات متقابل (AMI) و الگوریتم نزدیک‌ترین همسایه کاذب (FNN) استفاده شد. نتایج به دست آمده، نشان داد که زمان تأخیر برای داده‌های روزانه، ماهانه و فصلی به ترتیب ۸۰ روز، ۲ ماه و ۲ فصل و بُعد محاط بهینه به ترتیب ۱۰، ۳ و ۱ است. در هر دو مقیاس روزانه و ماهانه، به دلیل بُعد همبستگی غیرصحیح، بزرگ‌ترین نمای لیاپانوف مثبت و نمای هرست مخالف ۰/۵ است. دبی جریان رودخانه آشوبی است. با توجه به رفتار آشوبناک دبی جریان رودخانه دز در مقیاس‌های روزانه و ماهانه، امکان و قابلیت پیش‌بینی دبی در این دو مقیاس وجود دارد؛ ولی در مقیاس فصلی، به دلیل عدم وجود بُعد همبستگی، رفتار جریان تصادفی به دست آمد.

واژه‌های کلیدی: بُعد همبستگی، فضای فاز، نمای لیاپانوف، نمای هرست.

ارجاع: ادب ف. موسوی س. ف. کرمی ح. و فرزین س. ۱۳۹۷. بررسی الگوی آشوبی دبی جریان رودخانه دز در مقیاس‌های مختلف زمانی. مجله پژوهش آب ایران. ۲۸: ۸۳-۹۲.

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان.

۲- استاد گروه مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان.

۳- استادیار گروه مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان.

۴- استادیار گروه مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان.

* نویسنده مسئول: fmousavi@semnan.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۸/۱۵

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۴/۱۲

مقدمه

نظریه آشوب که پایه و اساس سیستم‌های دینامیک غیرخطی است در چند دهه اخیر تحولی بزرگ در شیوه درک و بیان پدیده‌ها ایجاد کرده است. این نظریه، به مطالعه سیستم‌هایی می‌پردازد که در نگاه اول نامنظم به نظر می‌رسند؛ ولی در واقع تحت حاکمیت قوانین مشخصی هستند. چنین سیستم‌هایی به شرایط اولیه بسیار حساس هستند، به شکلی که ورودی‌های در ظاهر کم‌اهمیت می‌توانند تأثیرات شگرفی روی آن‌ها داشته باشند. به چنین سیستم‌هایی، سیستم‌های آشوبناک گفته می‌شود (جانن و همکاران، ۱۳۹۴).

تاکنون پژوهش‌هایی در زمینه آشوب برای بررسی جریان رودخانه انجام شده است. از جمله، استفاده از زمان تأخیر و بُعد محاط برای بازسازی نمودار فضای فاز یک سری زمانی، برای مشخص کردن امکان وجود رفتار آشوبی و پیش‌بینی‌های غیرخطی، توسط جایاواردنا و لای (۱۹۹۴) بررسی شده است. آن‌ها داده‌های دبی روزانه را در دو ایستگاه هنگ‌کنگ برای شناسایی وجود آشوب بررسی کردند. نتایج این پژوهش نشان داد که مدل‌سازی اطلاعات سری زمانی دبی با کاربرد نمودار فضای فاز بهتر از روش سنتی ARMA قابل انجام است. ریگوندا و همکاران (۲۰۰۴)، دبی جریان سه رودخانه واقع در آمریکا را در سه مقیاس روزانه، پنج روزه و هفت روزه در نظر گرفتند و با استفاده از مفاهیم نظریه آشوب به تحلیل آشوبی یا تصادفی بودن جریان در این مقیاس‌ها پرداختند. رفتار دو رودخانه به صورت آشوبی و رفتار یک رودخانه به صورت تصادفی مشاهده شد. آن‌ها همچنین به این نتیجه رسیدند که رفتار دینامیک با افزایش مقیاس زمانی از روزانه تا هفتگی، از حالت قطعی به تصادفی تغییر می‌یابد. قربانی و همکاران (۲۰۱۰)، با استفاده از دو شاخص بُعد همبستگی و نمای لیاپانوف، جریان روزانه رودخانه کیزیلیرماک را بررسی کردند. نتایج، بُعد همبستگی کم (۲/۴) و مقدار مثبت بزرگ‌ترین نمای لیاپانوف (۰/۰۰۶۱) را نشان داد که هر دو حاکی از آشوبی بودن سری جریان است. یابین و چی (۲۰۱۴)، با بررسی جریان رودخانه سیلوانگ به این نتیجه رسیدند که جریان این رودخانه آشوبی است و می‌توان بر اساس نظریه آشوب آن را پیش‌بینی کرد. البوستان و اونوز (۲۰۱۵) با استفاده از روش‌های بازسازی فضای فاز، بُعد همبستگی و پیش‌بینی محلی به این

موضوع پرداختند که آیا در ایستگاه‌های آب‌سنجی دبی روزانه رودخانه ایرماک سبز رفتار آشوبی مشاهده می‌شود؟ نتایج این بررسی بیانگر وجود الگوی آشوبناک در تمامی ایستگاه‌ها بود.

شفاقیان و طالب‌بیدختی (۱۳۸۸)، رفتار جریان عبوری از رودخانه آنکوپاگر در ایالات متحده آمریکا در مقیاس‌های مختلف زمانی بر اساس نظریه آشوب را بررسی کردند. نتایج آن‌ها بر اساس بُعد همبستگی نشان داد که در مقیاس‌های زمانی کوچک (۱۵ دقیقه‌ای، ساعتی و تا حدی روزانه) رفتار جریان به صورت آشوبی است. در حالی که در مقیاس‌های زمانی بزرگ‌تر (هفتگی)، جریان رفتار کاملاً تصادفی از خود نشان می‌دهد که دلیل آن احتمالاً به خاطر تعدد پارامترهای مؤثر بر پدیده در مقیاس‌های بزرگ‌تر نسبت به مقیاس‌های کوچک‌تر است.

قاهری و همکاران (۱۳۹۱) به ارزیابی جریان رودخانه با استفاده از نظریه آشوب پرداختند. نتایج آن‌ها حاکی از دقت قابل قبول و مناسب نظریه آشوب در پیش‌بینی جریان رودخانه اهرچای است. اعلمی و ملکانی (۱۳۹۲) جریان رودخانه نهندچای را براساس شاخص بُعد همبستگی مورد تحلیل قرار دادند و دریافتند که جریان رفتار آشوبی کم دارد و روش دینامیک آشوبی برای شناسایی و پیش‌بینی جریان مناسب است. جباری و همکاران (۱۳۹۳) با استفاده از آزمون بُعد همبستگی و نمای هرست، به تعیین وجود رفتار آشوبی یا تصادفی در جریان روزانه رودخانه نازلوچای پرداختند. مقدار بُعد همبستگی ۲/۸ به دست آمد و نتیجه نمای هرست مخالف ۰/۵ شد که نشان از غیرتصادفی بودن و وجود آشوب در جریان رودخانه داشت. در پژوهش انیس‌حسینی و ذاکر مشفق (۱۳۹۳)، سری زمانی آبدی روزانه رودخانه کشکان از دیدگاه نظریه آشوب تحلیل شده است. نتایج به دست آمده با استفاده از معیارهای آشوبناکی، شرایط یک سیستم آشوبناک را برای جریان رودخانه در حوضه آبریز کشکان ترسیم می‌کند.

با توجه به پژوهش‌های انجام شده بر اساس نظریه آشوب در حوضه دبی جریان، می‌توان با استفاده از شاخص‌های تعیین‌کننده، آشوبی یا تصادفی بودن سیستم را بررسی کرد. لیکن در مطالعات انجام شده، معمولاً از دو شاخص بُعد همبستگی و نمای لیاپانوف استفاده شده است. شاخص‌های دیگر همچون نمای هرست و روش بازسازی

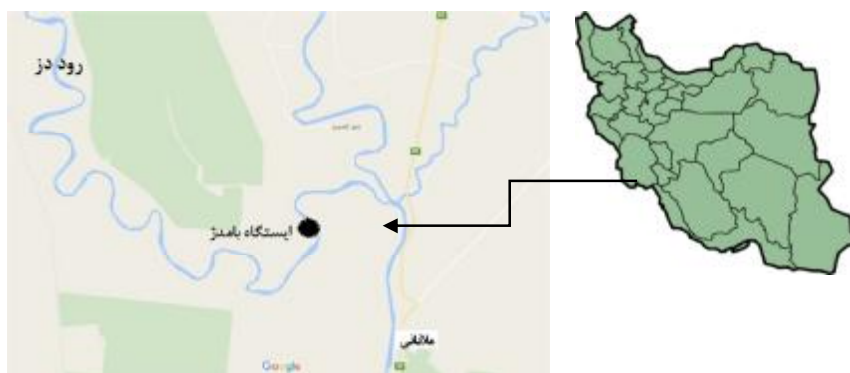
شمال اندیمشک و دزفول، وارد جلگه خوزستان می‌شود. این رودخانه پس از عبور از شهر دزفول و طی مسافت پُریبچ و خمی به طول تقریبی ۱۸۶ کیلومتر (دزفول تا بند قیر) در بند قیر با رودخانه‌های شَطیط و گرگر یکی می‌شود و کارون بزرگ را تشکیل می‌دهد که به سمت اهواز روان می‌شود (موحد، ۱۳۸۹). ایستگاه بامدژ، آخرین ایستگاه آب‌سنجی تا قبل از تلاقی با کارون بزرگ است. داده‌های دبی جریان روزانه و ماهانه این ایستگاه طی ۳۱ سال آبی (۱۳۶۰ تا ۱۳۹۰) استفاده شد. شکل ۱ موقعیت رود دز و ایستگاه بامدژ را نشان می‌دهد.

فضای فاز کمتر مورد توجه قرار گرفته است. همچنین در اکثر مطالعات پیشین، فقط مقیاس‌های زمانی کوتاه‌مدت (مثلاً ساعتی و روزانه) تحلیل و مقیاس‌های زمانی بلندمدت همچون ماهانه و فصلی کمتر بررسی شده است؛ در صورتی که برای اعمال فرضیات روش‌های آشوب، مانند فرض نامتناهی بودن داده‌ها و نیز برای تخمین داده‌ها، بررسی پدیده در مقیاس‌های بلندمدت ضروری می‌باشد.

مواد و روش‌ها

موقعیت منطقه مورد مطالعه

رودخانه دز از دو شاخه اصلی به نام سزار و بختیاری تشکیل شده است و پس از خروج از منطقه کوهستانی از



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

این معادلات و نوع آن‌ها باید پارامترهای زمان تأخیر^۵ و بُعد محاط^۶ تعیین شوند (حسن‌زاده و همکاران، ۱۳۹۱). تکنیک متداولی که تاکنز (۱۹۸۱) ارائه داده است، از روش تأخیر برای نگاشتن یک سری زمانی واحد در یک فضای de بُعدی استفاده می‌کند. بر اساس روش تاکنز، شبکه‌ای به طول m از روی یک سری زمانی عبور داده و یک ماتریس به طول m تشکیل می‌شود.

ایده اساسی درباره شیوه انتخاب زمان تأخیر این است که در بیشتر مواقع، سری زمانی دنباله‌ای از اعداد اسکالر اندازه‌گیری شده از بعضی کمیت‌های وابسته به وضعیت کنونی سیستم است که از تقسیم بر مضرب ثابت از زمان نمونه‌برداری به دست می‌آید. بر مبنای چنین معادل‌سازی، فضای فاز می‌تواند با استفاده از المان $x_t = [x_{t-1}, x_{t-2}, \dots, x_{t-n}]$ سری‌های زمانی ایجاد شود و تأخیر آن مطابق با سری‌های زمانی جدید خواهد بود:

پارامترهای معرف آشوبناکی

در این پژوهش، برای تخمین رفتار آشوبی دبی جریان رودخانه دز، چهار روش دینامیک غیرخطی شامل بازسازی فضای فاز^۱ براساس تئوری تاکنز، روش بُعد همبستگی^۲، روش بزرگ‌ترین نمای لیاپانوف^۳ و روش نمای هرست^۴ استفاده شد.

زمان تأخیر، بُعد محاط و بازسازی فضای فاز

فضای فاز (حالت)، ابزاری سودمند برای مطالعه سیستم‌های دینامیک است. بر طبق این مفهوم، یک سیستم دینامیک می‌تواند توسط یک نمودار فضای فاز یک سری زمانی توصیف شود. هر سیستم دینامیک شامل معادلات دیفرانسیل با مشتقات جزئی است. برای تعیین

1- Phase space reconstruction
2- Correlation dimension
3- Greatest Lyapunov exponent
4- Hurst exponent

5- Delay time
6- Embedding dimension

می‌شود. مقدار اشباع، همان بُعد همبستگی است (الشریگی و همکاران، ۲۰۰۲).

نمای لیاپانوف

در این پژوهش، عامل کشیدگی و بزرگ‌ترین نمای لیاپانوف براساس روش پیشنهادی روزنشتین (به نقل از شانگ و همکاران، ۲۰۰۹) محاسبه شده است. با داشتن مقدار بُعد محاط بهینه m ، مقدار این نما محاسبه می‌شود. در صورت نبود بُعد محاط بهینه، این مقدار بر اساس m های مختلف پیش‌بینی می‌شود. بزرگ‌ترین نمای لیاپانوف به شکل زیر تعریف شده است:

$$I_{\max} = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t - t_0} \log \frac{d(t)}{d(t_0)} \quad (۳)$$

که $d(t_0)$ فاصله اقلیدسی دو حالت نزدیک در زمان t_0 است. وجود نمای لیاپانوف مثبت شاخص آشوبی بودن سیستم است (دانیا و کومار، ۲۰۱۰).

نمای هرست

این آزمون را برای نخستین بار هارولد هرست^۴، هیدرولوژیست بریتانیایی در سال ۱۹۵۱ طی مطالعاتی که برای تشخیص فرایند ورودی جریان آب در سدی روی رودخانه نیل انجام داد، ارائه کرد (هرست، ۱۹۵۱). جریان ورودی آب در سدها معمولاً تصادفی فرض می‌شدند؛ ولی هرست با مطالعه داده‌های دوره‌های گذشته به وجود دوره‌های نامتناوبی در جریان ورودی آب پی برد. وی نشان داد که اگر مقدار نمای هرست برابر با $0/5 < H < 1$ باشد، دلالت بر یک فرایند مستقل و کاملاً تصادفی دارد. اگر $0 < H < 0/5$ باشد، دلالت بر بی‌دوام بودن فرایند دارد (جونز و همکاران، ۱۹۹۶). برای محاسبه نمای هرست، هرست از روش دامنه بازمقیاس شده^۵ به شرح زیر استفاده کرده است:

۱. سری زمانی X به طول N به تعدادی سری زمانی کوتاه‌تر با طول $n=N, N/2, N/4$ تبدیل می‌شود.
۲. برای سری‌های زمانی به طول n ، مقدار میانگین به دست می‌آید (m).

$$Y_t = \{x_t, x_{t-t}, x_{t-2t}, \dots, x_{t-(m-1)t}\} \quad (۱)$$

که در آن t زمان تأخیر، m بُعد محاط و Y_t بردار تأخیر را نشان می‌دهد. برای محاسبه فضای فاز، نخستین مرحله، تخمین پارامترهای زمان تأخیر (t) و بُعد محاط‌شدگی (m) است (جانن و همکاران، ۱۳۹۴). زمان تأخیر می‌تواند از روش ارزیابی تابع همبستگی 1 (ACF) یا میانگین اطلاعات متقابل (AMI)^۲ به دست آید. در این پژوهش، از روش میانگین اطلاعات متقابل برای تخمین زمان تأخیر سیستم دینامیک استفاده شد. زمان مربوط به اولین مینیمم تابع میانگین اطلاعات متقابل، به عنوان مناسب‌ترین زمان تأخیر در بازسازی فضای فاز پیشنهاد شده است؛ زیرا در این زمان، فضای فاز تکامل بیشتری دارد. علاوه بر آن، برآورد نامناسب زمان تأخیر می‌تواند به تخمین کمتر و یا بیشتر بُعد همبستگی منجر شود. بُعد محاط نیز با بهره‌گیری از الگوریتم نزدیک‌ترین همسایه کاذب (FNN)^۳ به دست می‌آید. این الگوریتم، اطلاعاتی درباره بُعد محاط بهینه برای سیستم دینامیک فراهم می‌کند (فریزر و کولکمن، ۲۰۰۴؛ به نقل از حسن‌زاده و همکاران، ۱۳۹۱؛ فهیم‌فرد و همکاران، ۱۳۹۴).

تابع بُعد همبستگی

تابع بُعد همبستگی برای فضای فاز m بُعدی به شکل معادله (۲) است. این مقدار برای سری زمانی با دینامیک آشوبی، از نوع غیرصحيح است؛ در حالی که برای سیستم تصادفی، این مقدار نامحدود است.

$$c(r) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{2}{N(N-1)} \sum_{1 \leq i < j \leq N} k(r - |Y_i - Y_j|) \quad (۲)$$

که در آن $c(r)$ تابع بُعد همبستگی، k تابع هویساید، N تعداد نقاط در فضای مذکور و r شعاع کره ساخته شده به مرکز Y_i یا Y_j است. برای شعاع‌های مثبت، رابطه قانونی قوی بین تابع بُعد همبستگی و شعاع در نظر گرفته می‌شود: $c(r) \approx Er^{d_2}$. بر اساس این رابطه، d_2 بُعد همبستگی است. در یک فرایند تصادفی، d_2 بدون رسیدن به یک مقدار اشباع در نمودار d_2 برحسب m به طور صعودی با افزایش m تغییر می‌کند؛ در حالی که در فرایندهای جبری، مقدار d_2 بعد از یک m معین اشباع

1- Assessment of correlation function
2- Average mutual information
3- The closest false neighborhood

4- Hurst exponent
5- Rescaled range

زمانی بیانگر ارتباط و همبستگی اطلاعات آن سری در مقیاس‌های مختلف زمانی است که آن را خصوصیت فراکتالی می‌نامند (یانگ و نورث، ۱۹۹۶).

نتایج و بحث

برای تحلیل دبی جریان رودخانه دز در مقیاس‌های زمانی روزانه، ماهانه و فصلی، طی دوره آماری ۳۱ ساله (۹۰-۱۳۶۰)، پس از محاسبه زمان تأخیر و بُعد محاط، فضای فاز ترسیم شد. در شکل ۲، میانگین اطلاعات متقابل در مقابل زمان تأخیر برای سه دوره زمانی مختلف رسم شده است.

با توجه به شکل ۲، اولین مینیمم محلی، برای داده‌های روزانه، ماهانه و فصلی، زمان تأخیر را می‌دهد که به ترتیب برابر ۸۰ روز، ۲ ماه و ۲ فصل است.

مقادیر نزدیک‌ترین همسایگی کاذب به ازای مقادیر مختلف بُعد محاط برای دبی جریان رودخانه دز در ایستگاه بامدژ در مقیاس‌های مختلف زمانی در شکل ۳ رسم شده است. نقطه متناظر با اولین مینیمم موضعی به عنوان بُعد محاط بهینه انتخاب می‌شود. بر اساس شکل ۳، بُعد محاط بهینه برای دبی جریان روزانه، ماهانه و فصلی به ترتیب برابر ۳، ۱۰ و ۱ به دست آمده است.

۳. مقدار نرمال شده‌ی داده‌ها به دست می‌آید $(Y_t = X_t - m)$.

۳. سری زمانی تجمعی Z_t محاسبه می‌شود $(t=1,2,3,\dots,n)$.

۴. دامنه تعدیل شده R_m مشخص می‌شود $(R_n = \text{Max}((Z_t) - \text{Min}(Z_t)))$.

۵. با محاسبه انحراف معیار داده‌ها (S_n) ، دامنه تغییر مقیاس داده شده با رابطه R_n/S_n به دست می‌آید.

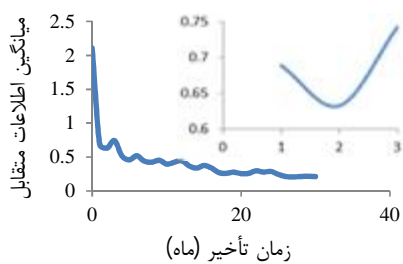
مراحل ذکر شده برای تمام سری‌های زمانی کوچک‌تر انجام می‌شود. در نهایت، با استفاده از مفاهیم آماری، رابطه (۴) تعریف می‌شود:

$$\frac{R(n)}{S(n)} = Cn^H \quad (۴)$$

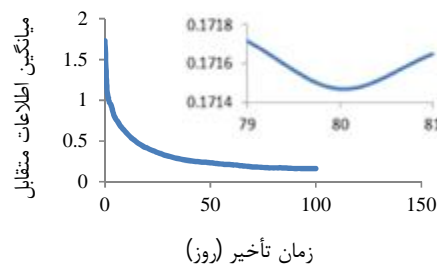
که در آن $\frac{R(n)}{S(n)}$ دامنه تجدید مقیاس شده، C عدد ثابت، n تعداد مشاهدات و H نمای هرست است. در عمل

می‌توان با رسم نمودار لگاریتم $\frac{R(n)}{S(n)}$ در مقابل لگاریتم n

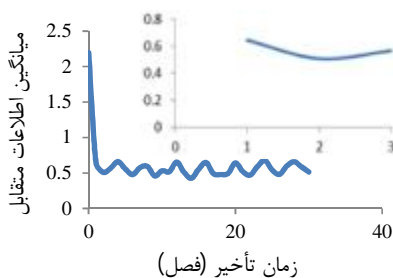
و برازش خط مناسب، شیب خط را به دست آورد که برابر با H خواهد بود. در نهایت، با توجه به مقدار H می‌توان پی به نوع فرایند، اعم از تصادفی و غیرتصادفی، برد (جباری و همکاران، ۱۳۹۳). سپس با استفاده از رابطه $D=2-H$ ، بُعد فراکتال (D) برآورد می‌شود. فراکتالی بودن یک سری



ب- ماهانه

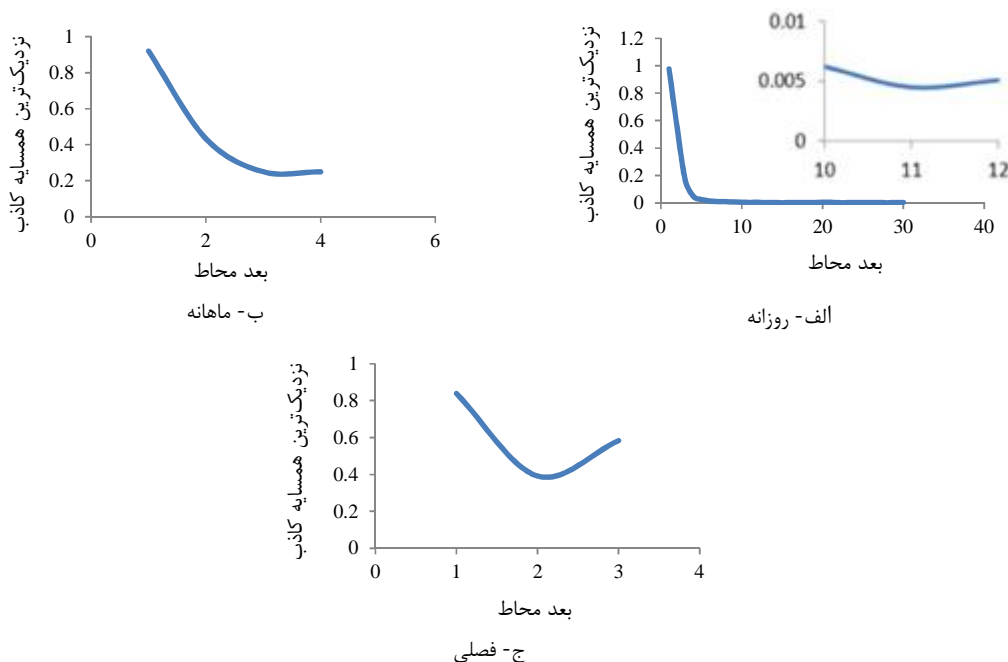


الف- روزانه



ج- فصلی

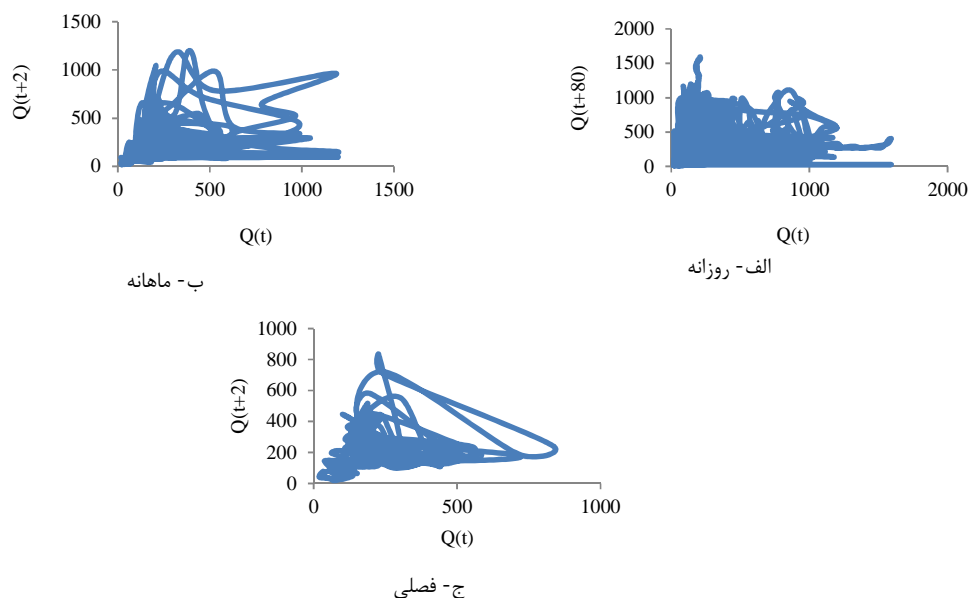
شکل ۲- زمان تأخیر دبی جریان رودخانه دز در مقیاس‌های زمانی مختلف: الف) روزانه، ب) ماهانه و ج) فصلی



شکل ۳- تعیین بُعد محاط دبی جریان رودخانه دز در مقیاس‌های زمانی مختلف: الف) روزانه، ب) ماهانه و ج) فصلی

شده‌اند، قابل توصیف هستند (حسن‌زاده و همکاران، ۱۳۹۱). با توجه به شکل ۴، مناطق جاذب با افزایش مقیاس زمانی، کمتر شده است و شکل فضای فاز انسجام کمتری پیرامون محورهای افقی و عمودی نمودارها پیدا می‌کند. با توجه به روش بازسازی فضای فاز، سری مورد بررسی در مقیاس روزانه و ماهانه آشوبناک و در مقیاس فصلی، تصادفی است.

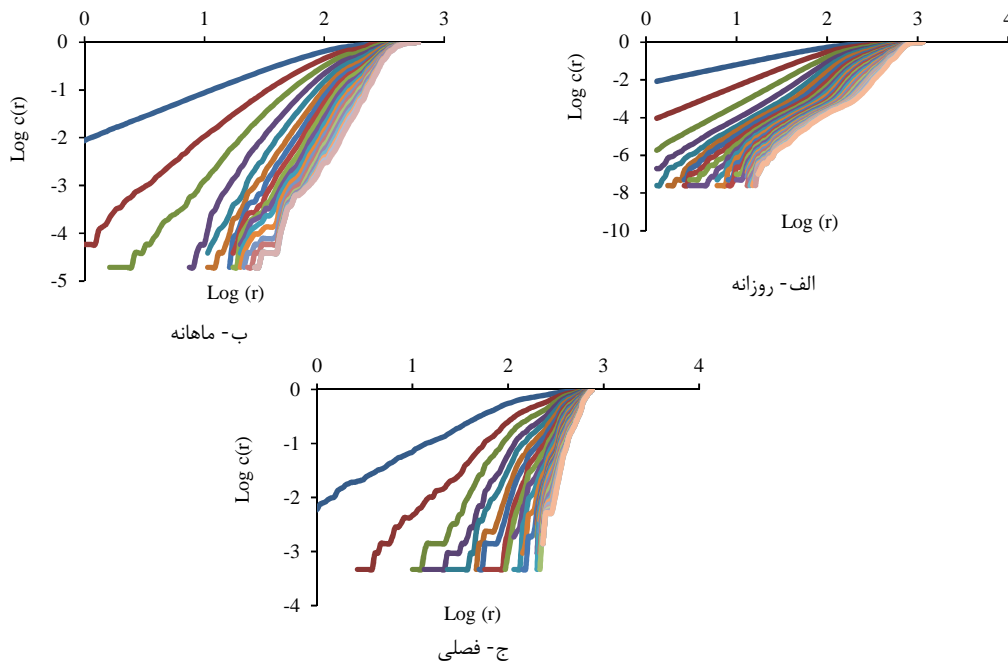
با توجه به مقادیر به دست آمده برای زمان تأخیر و بُعد محاط، نمودارهای فضای فاز دو بُعدی دبی جریان در مقیاس‌های زمانی مختلف در شکل ۴ ترسیم شده است. به طور کلی، نمودارهای فضای فاز، تکامل یک گروه زمانی را نشان داده و در صورت وجود، مناطق جاذب را مشخص می‌کنند. سیستم‌های آشوبناک به وسیله خط سیرهای محدود کراننداری که داخل ناحیه‌ای در فضای فاز جذب



شکل ۴- ترسیم فضای فاز در زمان تأخیر برای مقیاس‌های زمانی مختلف: الف) روزانه، ب) ماهانه و ج) فصلی

مورد مطالعه را نشان داده است. این نمودار، ارتباط میان $c(r)$ و شعاع r با افزایش بُعد محاط را بیان می‌کند.

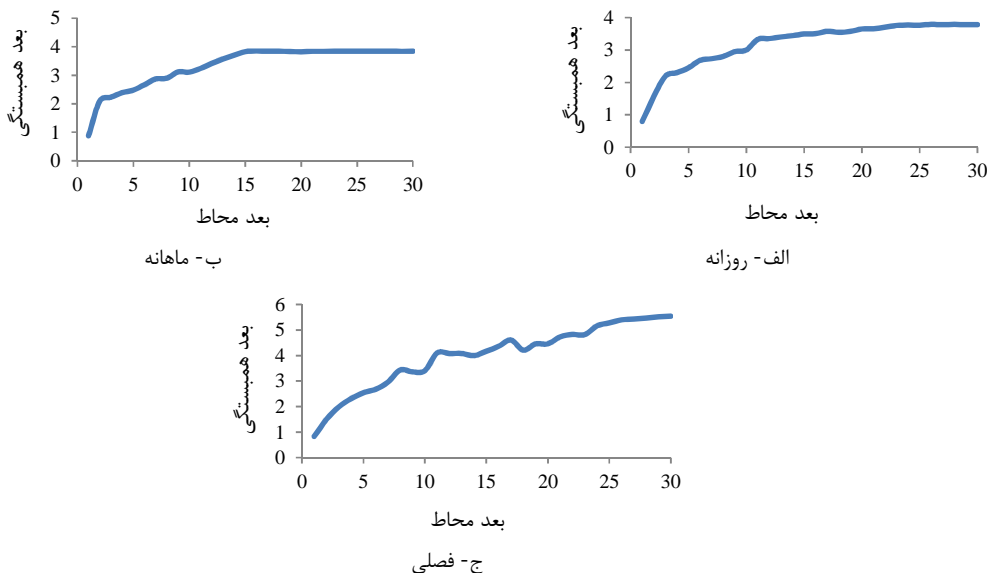
با داشتن زمان تأخیر بهینه و با در نظر گرفتن بُعد محاط ۱ تا ۳۰ برای مقیاس‌های مختلف، تابع بُعد همبستگی $c(r)$ در مقابل شعاع r محاسبه شده است. شکل ۵، نمودار تغییرات $\log c(r)$ در مقابل $\log(r)$ در مقیاس‌های زمانی



شکل ۵- مجموع همبستگی در برابر شعاع همبستگی در مقیاس‌های زمانی مختلف: الف) روزانه، ب) ماهانه و ج) فصلی

شده است. در شکل ۶، تغییرات بُعد همبستگی در مقابل بُعد محاط در سه مقیاس زمانی نشان داده شده است.

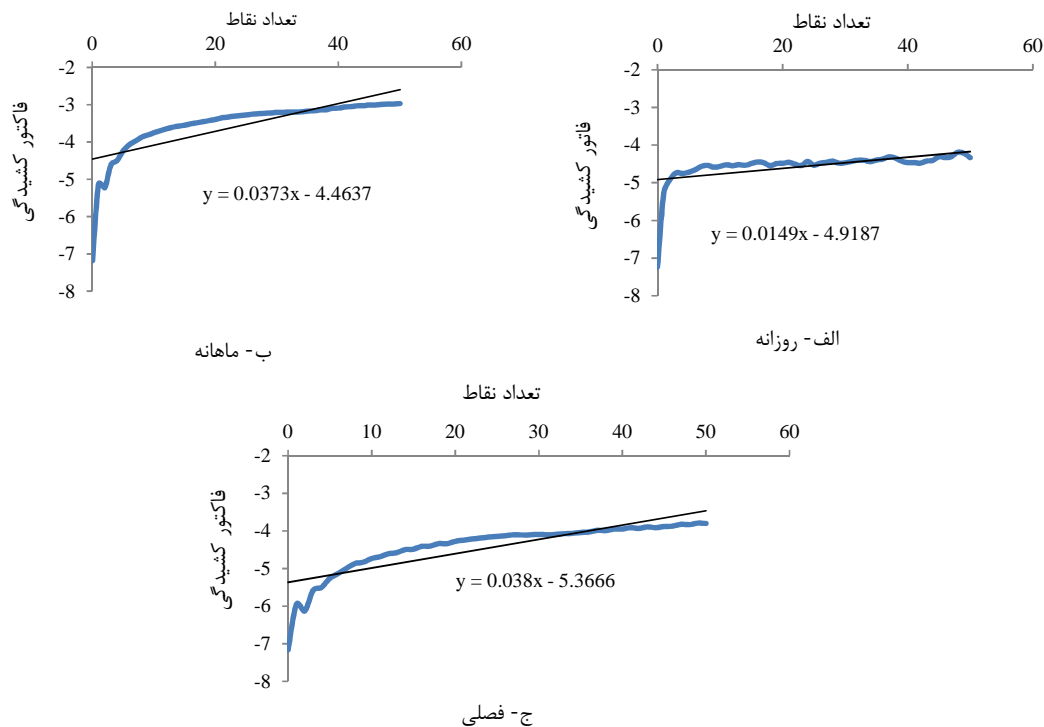
برای بررسی آشوب‌پذیری دبی جریان، مقادیر شیب منحنی‌ها با روش حداقل مربعات به ازای مقادیر r محاسبه



شکل ۶- به اشباع رسیدن روند تغییرات بُعد همبستگی در برابر بُعد محاط در مقیاس‌های زمانی الف) روزانه و ب) ماهانه و ج) سیر صعودی روند تغییرات در مقیاس فصلی

صعودی دارد و به اشباع نمی‌رسد و این دلیل بر تصادفی بودن سیستم در این مقیاس زمانی است. مقدار بزرگ‌ترین نمای لیاپانوف برای سه مقیاس زمانی روزانه، ماهانه و فصلی در شکل ۷ نشان داده شده است. در هر سه مقیاس زمانی، مقدار نمای لیاپانوف بر اساس شیب منحنی عامل کشیدگی در برابر زمان، به ترتیب برابر $0/0149$ ، $0/0373$ و $0/0380$ به دست آمد که همگی مثبت هستند. بر اساس پژوهش خطیبی و همکاران (۲۰۱۲) روش نمای لیاپانوف برای یک سری زمانی تصادفی نیز ممکن است نتیجه مشابهی دهد. راه مناسب‌تر این است که از معیارهای بیشتری برای تعیین آشوب‌پذیری استفاده شود.

همان‌طور که در شکل ۶- الف مشخص است، نمودار به حالت اشباع رسیده و از بُعد محاط ۲۲، نمودار ثابت شده است. مقدار بُعد همبستگی در این مقیاس برابر $3/765$ است. در مقیاس زمانی ماهانه (شکل ۶- ب) نیز نمودار در بُعد محاط ۲۰ شروع به اشباع شدن می‌کند و از مقدار $3/84$ فراتر نمی‌رود؛ به همین دلیل، بُعد همبستگی مناسب (d_2) برای مقیاس روزانه و ماهانه به ترتیب برابر $3/765$ و $3/84$ در نظر گرفته می‌شود. اشباع شدن بُعد همبستگی و غیرصحیح بودن آن دلالت بر آشوب‌پذیر بودن دبی رودخانه دز در مقیاس‌های روزانه و ماهانه دارد. در مقیاس فصلی، با توجه به شکل ۶- ج نمودار سیر



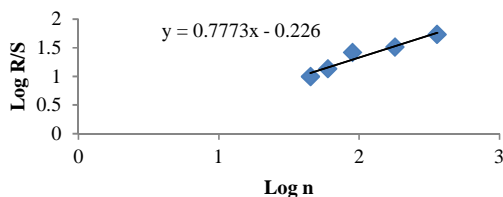
شکل ۷- نمای لیاپانوف برای دبی جریان رودخانه دز در مقیاس‌های مختلف

فراکتال در مقیاس‌های روزانه، ماهانه و فصلی به ترتیب برابر با $1/244$ ، $1/222$ و $1/247$ محاسبه می‌شود. نتایج بررسی شاخص‌ها حاکی از این است که دبی جریان رودخانه دز در مقیاس‌های زمانی روزانه و ماهانه، با توجه به هر چهار شاخص فضای فاز، بعد همبستگی، نمای لیاپانوف و نمای هرست، آشوبناک است؛ اما در مقیاس بلندمدت فصلی، نتایج شاخص‌ها یکسان نیست. نتایج حاصل از فضای فاز و بُعد همبستگی، حاکی از تصادفی

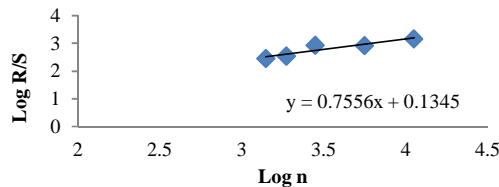
برای محاسبه نمای هرست، نمودار لگاریتم $\frac{R(n)}{S(n)}$ در مقابل لگاریتم n ، در سه مقیاس زمانی، رسم (شکل ۸) و شیب خط برازش داده شده محاسبه شد. مقدار شیب در سه مقیاس روزانه، ماهانه و فصلی به ترتیب برابر $0/7556$ ، $0/7773$ و $0/7525$ به دست آمد که هر سه متفاوت از $0/5$ بوده و بنا بر اساس مطالعات هرست (۱۹۵۱) نشان‌دهنده‌ی غیرتصادفی بودن (وجود آشوب) جریان رودخانه دز است. با توجه به رابطه $D=2-H$ ، مقادیر بُعد

چنین استنباط کرد که نماهای لیاپانوف و هرست برای تعیین آشوبناکی سری‌های زمانی، کافی نیستند. با وجود این، این دو شاخص، در صورت آشوبناک بودن سری زمانی مورد بررسی، کاربردهای خاص خودشان را دارند.

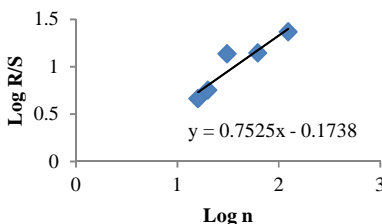
بودن سری زمانی در مقیاس ماهانه بود؛ اما نتایج نمای لیاپانوف و نمای هرست، عکس این مطلب را بیان کرد. با توجه به اینکه مراجع، بُعد همبستگی را مهم‌ترین شاخص معرفی کرده‌اند؛ بنابراین دبی جریان رودخانه دز در مقیاس فصلی، تصادفی است. به عبارت دیگر، می‌توان



ب- ماهانه



الف- روزانه



ج- فصلی

شکل ۸- نمای هرست برای دبی جریان رودخانه دز در مقیاس‌های زمانی مختلف

آشوبناک است؛ ولی در مقیاس فصلی، به دلیل نبود بُعد همبستگی، رفتار دبی جریان رودخانه، تصادفی است. بنابراین، نماهای لیاپانوف و هرست برای تعیین آشوبناکی سری‌های زمانی کافی نیستند. البته در مقیاس فصلی، به علت کم بودن اندازه سری زمانی، محدودیت‌هایی وجود دارد که لازم است مورد بررسی بیشتر قرار گیرد. با توجه به رفتار آشوبناک دبی جریان رودخانه دز در مقیاس‌های زمانی روزانه و ماهانه، قابلیت پیش‌بینی دبی رودخانه در گذر زمان وجود دارد. پیش‌بینی مؤلفه‌های هیدروانفورماتیک، از جمله دبی جریان رودخانه‌ها، یکی از موارد اساسی در طراحی‌ها و مطالعات مربوط به این منابع به شمار می‌آید. در ادامه پژوهش حاضر، مطالعه عوامل تأثیرگذار بالادست ایستگاه بامدژ و همچنین بررسی تأثیر آنها بر دبی جریان رودخانه دز در مقیاس‌های زمانی مختلف، موضوع مناسبی است که جا دارد بدان پرداخته شود.

نتیجه‌گیری

علی‌رغم این که تاکنون مدل‌های ریاضی متعددی برای مدل‌سازی فرایندهای هیدرولوژیک پیشنهاد شده است، اما هنوز رویکرد ریاضیاتی یکسانی وجود ندارد. امروزه، با تکامل مدل‌ها، تحلیل فرایندهای هیدرولوژیک با استفاده از مدل‌هایی قطعی غیرخطی نسبت به مدل‌های تصادفی، بهتر انجام می‌شود. در این پژوهش، ضمن معرفی مفاهیم نظریه آشوب و کاربرد آن، دبی جریان رودخانه پُراهمیت دز در مقیاس‌های زمانی مختلف (روزانه، ماهانه و فصلی) در ایستگاه هیدرومتری بامدژ طی دوره آماری ۳۱ سال (۱۳۶۰-۹۰) تحلیل و بررسی شد. در این زمینه، پس از محاسبه پارامترهای زمان تأخیر و بُعد محاط، با استفاده از روش‌های میانگین اطلاعات متقابل (AMI) و نزدیک‌ترین همسایه کاذب (FNN)، فضای فاز ترسیم شد. سپس با استفاده از شاخص‌های بُعد همبستگی، نمای لیاپانوف و نمای هرست، رفتار آشوبی سری زمانی در مقیاس‌های زمانی مختلف بررسی شد. نتایج نشان داد که در مقیاس‌های روزانه و ماهانه، دبی جریان رودخانه دز

منابع

- daily rainfall. *Advances in Water Resources*. 33(3): 327-347.
12. Elshorbagy A. Simonovic S. P. and Panu U. S. 2002. Estimation of missing streamflow data using principles of chaos theory. *Journal of Hydrology*. 255(1): 123-133.
 13. Frazier C. and Kockelman K. 2004. Chaos theory and transportation systems: Instructive example. *Journal of the Transportation Research Board*. 1897: 9-17.
 14. Ghorbani M. A. Kisi O. and Alinezhad M. 2010. A probe into the chaotic nature of daily streamflow time series by correlation dimension and largest Lyapunov methods. *Applied Mathematical Modelling*. 34(12): 4050-4057.
 15. Hurst H. E. 1951. Long-term storage capacity of reservoirs. *Transactions American Society of Civil Engineers*. 116: 770-808.
 16. Jayawardena A. W. and Lai F. 1994. Analysis and prediction of chaos in rainfall and stream flow time series. *Journal of Hydrology*. 153(1): 23-52.
 17. Jones C. L. Lonergan G. T. and Mainwaring D. E. 1996. Wavelet packet computation of the Hurst exponent. *Journal of Physics A: Mathematical and General*. 29(10): 2509-2527.
 18. Khatibi R. Sivakumar B. Ghorbani M. A. Kisi O. Koçak K. and Frasadizadeh D. 2012. Investigating chaos in river stage and discharge time series. *Journal of Hydrology*. 414: 108-117.
 19. Pang J. and North C. P. 1996. Fractals and their applicability in geological wireline log analysis. *Journal of Petroleum Geology*. 19(3): 339-350.
 20. Regonda S. K. Sivakumar B. and Jain A. 2004. Temporal scaling in river flow: Can it be chaotic? *Hydrological Sciences Journal*. 49(3): 373-385.
 21. Shang P. Na X. and Kamae S. 2009. Chaotic analysis of time series in the sediment transport phenomenon. *Chaos Solitons & Fractals*. 41(1): 368-379.
 22. Takens F. 1981. Detecting strange attractors in turbulence. *Lecture Notes in Mathematics*. 898: 366-381.
 23. Yabin S. and Chi D. 2014. Improving numerical forecast accuracy with ensemble Kalman filter and chaos theory. *Journal of Hydrology*. 512: 540-548.
۱. اعلمی م. ت. و ملکانی ل. ۱۳۹۲. بازسازی فضای حالت و بُعد فرکتالی جریان رودخانه با استفاده از زمان تأخیر و بُعد محاط. نشریه مهندسی عمران و محیط زیست. ۴۳(۷۰): ۱۵-۲۱.
 ۲. انیس حسینی م. و ذاکرمشفق م. ۱۳۹۳. تحلیل و پیش بینی جریان رودخانه کشکان با استفاده از نظریه آشوب. مجله هیدرولیک. ۸(۳): ۴۵-۶۱.
 ۳. جانی ر. قربانی م. ع. و شمسایی ا. ۱۳۹۴. تحلیل بارش ماهانه بندر انزلی با استفاده از نظریه آشوب در شرایط تغییر اقلیم. مجله پژوهش آب ایران. ۹(۱۶): ۲۹-۳۹.
 ۴. جباری ث. رضایی ح. و محمدنژاد ب. ۱۳۹۳. بررسی وجود آشوب در جریان روزانه رودخانه نازلوچای. همایش ملی کشاورزی و منابع طبیعی. دانشگاه شهید بهشتی، ۵ تیر.
 ۵. حسن زاده ی. اعلمی م. ت. فرزین س. شیخ الاسلامی ر. و حسن زاده ا. ۱۳۹۱. بررسی ماهیت آشوبناکی نوسانات روزانه تراز آب دریاچه ارومیه. نشریه مهندسی عمران و محیط زیست. ۴۲(۶۶): ۹-۲۰.
 ۶. شفاقیان م. ر. و طالب بیدختی ن. ۱۳۸۸. بررسی وجود آشوب در جریان رود در مقیاس های زمانی گوناگون. فصلنامه مهندسی منابع آب. ۲(۳): ۱-۸.
 ۷. فهیم فرد س. شمسایی ا. فتاحی م. و فرزین س. ۱۳۹۴. بررسی تأثیر سد بر الگوی آشوبی انتقال بار معلق رود (مطالعه موردی: سد کرج). مجله مهندسی منابع آب. ۸: ۸۹-۱۰۰.
 ۸. قاهری ع. قربانی م. ع. دل افروز ه. و ملکانی ل. ۱۳۹۱. ارزیابی جریان رودخانه با استفاده از نظریه آشوب. مجله پژوهش آب ایران. ۱۰: ۱۷۷-۱۸۶.
 ۹. موحد ع. و زاده دباغ ن. ۱۳۸۹. ارزیابی توان اکولوژیک محدوده رودخانه دز حد فاصل سد تنظیمی تا بند قیر برای طبیعت گردی. محیط شناسی. ۳۶(۵۵): ۱۳-۲۴.
 10. Albostan A. and Önöz B. 2015. Implementation of chaotic analysis on river discharge time series. *Energy and Power Engineering*. 7: 81-92.
 11. Dhanya C. T. and Kumar D. N. 2010. Nonlinear ensemble prediction of chaotic