

## تحلیل جریان رودخانه کارون در سه مقیاس روزانه، ماهانه، و فصلی با استفاده از شاخص‌های نظریه آشوب

فاطمه ادب- کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان  
حجت کرمی\* - استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان  
سید فرهاد موسوی - استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان  
سعید فرزین - استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۳/۹ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۱۲/۱۲

### چکیده

نظریه آشوب ابزاری مناسب برای تحلیل داده‌های دبی جریان رودخانه‌ها در نظر گرفته می‌شود. به دلیل ماهیت دینامیک و غیرخطی جریان رودخانه‌ها، یکی از چالش‌های مهم تشخیص رفتار جریان در مقیاس‌های زمانی مختلف است. در تحقیق حاضر، به منظور بررسی آشوب‌پذیری دبی جریان رودخانه کارون در سه مقیاس زمانی روزانه، ماهانه، و فصلی، از آمار ۴۵ ساله (۱۳۴۶-۱۳۹۰) ایستگاه هیدرومتری ملاتانی استفاده شده است. برای تعیین آشوبناکی جریان، سه روش- ۱. بازسازی فضای فاز؛ ۲. بُعد همبستگی؛ ۳. بزرگ‌ترین نمای لیاپانوف- به کار رفته است. به منظور برآورد دو پارامتر زمان تأخیر و بُعد محاط، از روش میانگین اطلاعات متقابل و روش نزدیک‌ترین همسایه کاذب استفاده شده است. نتایج حاکی از آن است که در مقیاس ماهانه، به دلیل بُعد همبستگی غیرصحیح (۲/۷۰۴)، دبی جریان رودخانه آشوبناک و پیش‌بینی‌شدنی است. مقادیر بزرگ‌ترین نمای لیاپانوف برای مقیاس‌های روزانه، ماهانه، و فصلی به ترتیب  $0.0017$ ،  $0.0093$ ، و  $0.0334$  به دست آمده است. مثبت‌بودن این مقادیر نیز نشان‌دهنده آشوب و حساسیت نسبت به شرایط اولیه سیستم است. در مقیاس‌های روزانه و فصلی، روند تغییرات بُعد همبستگی در برابر بُعد محاط نشان داد که رفتار جریان تصادفی است و بنابراین جریان رودخانه پیش‌بینی‌نشده است.

کلیدواژه‌ها: بزرگ‌ترین نمای لیاپانوف، بُعد همبستگی، پیش‌بینی، مقیاس زمانی، نظریه آشوب.

### مقدمه

رفتار آشوب‌گونه رفتاری تصادفی نیست؛ بلکه رفتاری قطعی است. اما از دیدگاه ناظری که از ساختار و عملکرد مولد سیگنال آشوب‌گونه بی‌اطلاع است، نمی‌توان این سیگنال را واقعاً تصادفی دانست و با استفاده از آزمون‌های آماری کاملاً تفکیک کرد (هاشمی گلپایگانی، ۱۳۸۸). با توجه به نظریه آشوب، در هر بی‌نظمی نظمی نهفته است. بدین معنا که نباید نظم را در یک مقیاس جست‌وجو کرد. پدیده‌هایی که در مقیاس محلی کاملاً تصادفی و پیش‌بینی‌پذیرند چه بسا در مقیاس بزرگ‌تر کاملاً پایا و پیش‌بینی‌پذیر باشند (شقاقیان و طالب بیدختی، ۱۳۸۸). با آگاهی از ماهیت حقیقی فرایند جریان رودخانه‌ای در مقیاس‌های مختلف زمانی و مکانی، می‌توان توانایی پیش‌بینی جریان رودخانه‌ای در مقیاس‌های مختلف را تعیین کرد. یکی از ویژگی‌های سیستم‌های آشوبی حساسیت آن‌ها نسبت به شرایط اولیه است. در این‌گونه

سیستم‌ها، تغییر کوچک در وضعیت اولیه می‌تواند به سرعت رفتار درازمدت یک سیستم را تغییر دهد؛ به گونه‌ای که رفتار آتی آن دیگر پیش‌بینی‌پذیر نخواهد بود.

تا کنون تحقیقاتی در زمینه آشوب برای بررسی جریان رودخانه انجام شده است. سیواکومار (۲۰۰۱) به وسیله نظریه آشوب به بررسی دینامیک بارش در چهار مقیاس زمانی در می‌سی‌سی‌پی پرداخت. بُعد همبستگی برای هر چهار مقیاس به صورت غیرصحيح به دست آمد که امکان وجود رفتار آشوبی در هر چهار مقیاس را نشان می‌داد. ریگوندا و همکاران (۲۰۰۴) به بررسی داده‌های دبی جریان سه رودخانه واقع در امریکا در سه مقیاس روزانه، پنج‌روزه، و هفت‌روزه از نظر آشوب‌پذیری پرداختند و بُعد همبستگی به عنوان شاخص رفتار آشوبی و تصادفی تحلیل شد. رفتار دو رودخانه به صورت آشوبی و رفتار یک رودخانه به صورت تصادفی مشاهده شد. ایشان 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 نشان‌دهنده 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. این منبع رو پیدا نکردمشقاقیان و طالب بیدختی (۱۳۸۸) رفتار جریان عبوری از رودخانه آنکوپاگر در ایالات متحده آمریکا را در مقیاس‌های مختلف زمانی بر اساس نظریه آشوب بررسی کردند. نتایج براساس 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)، رفتار جریان تصادفی است که دلیل احتمالی آن تعدد پارامترهای مؤثر در پدیده در مقیاس‌های بزرگ‌تر نسبت به مقیاس‌های کوچک‌تر است. اعلمی و ملکانی (۱۳۹۲) جریان رودخانه نهندچای را براساس نظریه آشوب تحلیل کردند و با در نظر گرفتن شاخص بُعد همبستگی دریافتند که جریان روزانه رفتار آشوبی کم دارد و روش دینامیک آشوبی برای شناسایی و پیش‌بینی جریان مناسب است. انیس‌حسینی و ذاکر مشفق (۱۳۹۳) با استفاده از نتایج شاخص‌های بُعد همبستگی (برابر ۳/۳۸) و بزرگ‌ترین نمای لیاپانوف مثبت (برابر ۰/۰۱۱)، رفتار دبی جریان رودخانه کشکان در مقیاس زمانی روزانه را آشوبناک بیان کردند. نتایج بررسی جریان رودخانه شطیط در مقیاس‌های زمانی روزانه، ماهانه، و فصلی با استفاده از معیارهای بُعد همبستگی و بزرگ‌ترین نمای لیاپانوف توسط ادب (۱۳۹۵) نشان داد که جریان در مقیاس روزانه آشوبناک است. اما در مقیاس‌های ماهانه و فصلی از روند تصادفی پیروی می‌کند.

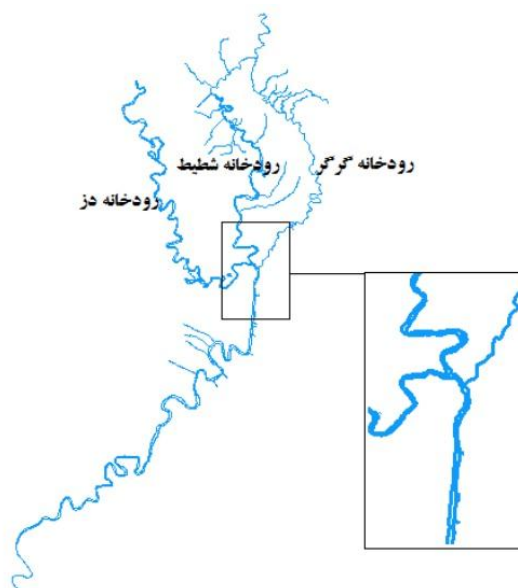
با توجه به تحقیقات انجام‌شده، براساس نظریه آشوب در حوضه دبی جریان، می‌توان با استفاده از شاخص‌های تعیین‌کننده، آشوبی یا تصادفی بودن سیستم را بررسی کرد. با توجه به اهمیت رودخانه کارون در کشور، تحلیل روند آشوبی بودن، کمک به پیش‌بینی جریان می‌کند که می‌توان از آن در برنامه‌ریزی‌های شهری استفاده کرد. تحلیل آشوبی دبی جریان رودخانه کارون برای مقیاس‌های مختلف زمانی انجام نشده است. بدین منظور، از شاخص‌های بُعد همبستگی و نمای لیاپانوف و همچنین روش ترسیم فضای حالت برای تشخیص سری‌های زمانی آشوبناک از تصادفی استفاده شده است. در این تحقیق، براساس داده‌های دبی جریان ایستگاه ملآثانی در رودخانه کارون، به بررسی وجود آشوب در مقیاس‌های زمانی روزانه، ماهانه، و فصلی در بازه زمانی ۱۳۴۶-۱۳۹۰ پرداخته شده است.

## مواد و روش‌ها

برای تشخیص فرایند آشوبی از تصادفی، پس از محاسبه زمان تأخیر با روش میانگین اطلاعات متقابل و بُعد محاط با روش نزدیک‌ترین همسایه کاذب، فضای حالت ترسیم شده است. سپس، با استفاده از بُعد همبستگی، به مقایسه آشوب‌پذیری رودخانه کارون در مقیاس‌های زمانی مختلف پرداخته شده است. نمای لیپانوف و طیف توان فوریه نیز برای هر سه مقیاس زمانی روزانه، ماهانه، و فصلی محاسبه و نتایج به‌دست‌آمده مقایسه شده است.

## موقعیت منطقه مورد مطالعه

رودخانه کارون با دبی متوسط ۷۳۶ متر مکعب بر ثانیه یکی از پرآب‌ترین رودخانه‌های ایران به‌شمار می‌رود که حوضه آبریزی حدود ۶۶۹۳۰ کیلومتر مربع دارد. پس از پیوستن رودخانه‌های دز، شطیط، و گرگر در محلی به نام بند قیر، بالاتر از شهرستان ملاتانی، ایستگاه ملاتانی قرار دارد (طباطبایی و همکاران، ۱۳۹۲) (شکل ۱). داده‌های دبی استفاده‌شده در این تحقیق، مربوط به سال ۱۳۴۶ تا ۱۳۹۰ است. خلاصه‌ای از مشخصات آماری جریان رودخانه کارون در جدول ۱ درج شده است.



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

جدول ۱. مشخصات آماری دبی جریان رودخانه کارون در مقیاس‌های زمانی مختلف در ایستگاه ملاتانی (۱۳۴۶-۱۳۹۰)

دبی فصلی ( $m^3/s$ )	دبی ماهانه ( $m^3/s$ )	دبی روزانه ( $m^3/s$ )	مشخصه آماری
۱۸۴	۵۴۰	۱۵۰۸۶	تعداد داده‌ها
۶۳۱٫۳۱	۶۳۱٫۱۱	۵۳۶٫۹۵	میانگین
۲۳۹۰٫۹۵	۳۰۶۰٫۶	۴۷۱۲	حداکثر مقدار
۱۲۸٫۱۵	۱۱۱٫۶۸	۱٫۷۵	حداقل مقدار
۳۷۵٫۴	۴۲۸٫۰۹۶	۴۱۹٫۴۵	انحراف معیار

## بازسازی فضای حالت

بر اساس مفهوم بازسازی فضای حالت، یک سیستم دینامیک می‌تواند توسط یک نمودار فضای حالت توصیف شود. بنابراین، یکی از گام‌های اساسی در تحلیل سری‌های زمانی حاصل از یک فرایند غیرخطی، بازسازی فضای حالت است. تئوری تاکنز روش متداولی برای بازسازی فضای حالت است. بر اساس این تئوری، اگر سری زمانی از یک سیستم دینامیک معین به دست آمده باشد، آن‌گاه بازسازی فضای حالت این سیستم به کمک همین سری زمانی  $x_t = [x_1, x_2, \dots, x_n]$  و با ایجاد تأخیرهای زمانی به اندازه  $\tau$  در بعد محاط بهینه  $m$  امکان‌پذیر است. تابع  $Y(t+1)$  مطابق با رابطه ۱ بیان می‌شود:

$$Y(t+1) = f(y(t), y(t-\tau), \dots, y(t-(m-1)\tau)) \quad (1)$$

اگر داده‌های موجود در سری زمانی آشوبناک باشند، تابع  $Y(t+1)$  لزوماً غیرخطی است. بنابراین، برای بازسازی فضای حالت سیستم مورد بررسی، نیاز به تعیین دو پارامتر زمان تأخیر و بُعد محاط است.

روش اساسی برای تقریب زمان تأخیر، که از سری‌های زمانی به دست می‌آید، روش میانگین اطلاعات متقابل است. در این روش، که بر اساس تئوری اطلاعات شانون بنا شده، زمان رخ دادن اولین مینیمم در تابع میانگین اطلاعات متقابل به عنوان زمان تأخیر مناسب انتخاب می‌شود. اطلاعات متقابل بین اندازه  $x(t)$  و اندازه  $x(t+\tau)$  عبارت است از میزان فراگیری در مورد اندازه‌گیری  $x(t+\tau)$  با استفاده از اندازه‌گیری  $x(t)$  که به صورت رابطه ۲ است:

$$\text{Log}_2\{p(y(t), y(t+\tau)) / p(y(t))p(y(t+\tau))\} \quad (2)$$

$$I(T) = \sum_{x(t), x(t+\tau)} K(x(t), x(t+\tau)) \cdot \log_2 \left[ \frac{k(x(t), x(t+\tau))}{k(x(t)) \cdot k(x(t+\tau))} \right] \quad (3)$$

که  $k(x(t))$  و  $k(x(t+\tau))$  در رابطه بالا احتمال‌های مجزایی هستند که باید تخمین زده شوند. به منظور محاسبه آن‌ها، هیستوگرام مربوط به  $x(t)$  و  $x(t+\tau)$  در نظر گرفته می‌شود و برای محاسبه احتمال مشترک  $(x(t), x(t+\tau))$  از هیستوگرام بردار  $(x(t), x(t+\tau))$  استفاده می‌شود. زمان رخ دادن اولین مینیمم در تابع اطلاعات متقابل به عنوان زمان تأخیر بهینه خواهد بود.

متداول‌ترین روش تعیین بُعد محاط بهینه از سری‌های زمانی آشوبی روش شمارش نزدیک‌ترین همسایه‌های کاذب است. در این روش، بررسی می‌شود که چه موقع انقطاع کاذب در مسیرهای حالت، که از تصویر نمودن جاذب در یک فضا با بُعد کم ناشی شده است، متوقف می‌شود (پری زنگنه و همکاران، ۱۳۸۹). به عبارت دیگر، درصد نزدیک‌ترین همسایه‌های کاذب به ازای ابعاد مختلف محاسبه می‌شود و بُعدی که در آن درصد همسایه‌ها به صفر یا حداقل برسد به عنوان بُعد محاط در نظر گرفته می‌شود. برای تعیین همسایه‌های کاذب، نخست با در نظر گرفتن  $m$  مؤلفه برای هر بردار تأخیر، می‌توان بردارهای تأخیر  $Y_i(t)$  را مطابق رابطه ۴ در فضای محاط تشکیل داد:

$$Y_i(t) = [y(t), y(t-\tau), \dots, y(t-(m-1)\tau)]^T \quad (4)$$

$r$  امین همسایه هر بردار تأخیر  $Y_i(t)$  به صورت رابطه ۵ است:

$$Y_r^{NN}(t) = [y(t), y(t-\tau), \dots, y(t-(m-1)\tau)]^T \quad (5)$$

که  $r=1, 2, \dots, n$  و فاصله بین دو بردار همسایه بر اساس نرم اقلیدسی به صورت رابطه ۶ محاسبه می‌شود:

$$R_m^2 = \sum_{i=0}^{m-1} [y(t-i\tau) - y(t_r-i\tau)]^2 \quad (6)$$

اگر بردار  $Y_r^{NN}(t)$  یک همسایه واقعی برای بردار  $Y_i(t)$  باشد، این همسایگی نشئت گرفته از ماهیت دینامیک سیستم است. ولی اگر این همسایگی در اثر تصویر از یک فضای با بُعد بیشتر به فضای با بُعد کمتر انجام گرفته باشد، در این صورت با رفتن از بُعد  $m$  به بُعد  $m+1$ ، این همسایه‌های کاذب از همسایگی بردار  $Y_i(t)$  خارج می‌شوند. با افزایش بُعد از  $m$  به  $m+1$ ، مؤلفه‌های اضافه شده به بردارهای تأخیر  $Y_i(t)$  و  $Y_r^{NN}(t)$  به ترتیب  $y(t-m\tau)$  و  $y(t_r-m\tau)$  خواهند بود. بنابراین، فاصله بین دو بردار بر اساس نرم اقلیدسی در فضای  $m+1$  بُعدی به طور مشابه به صورت رابطه ۷ محاسبه می‌شود:

$$R_{m+1}^2 = R_m^2 + [y(t - m\tau) - y(t_r - m\tau)]^2 \quad (7)$$

بنابراین، فاصله اضافه شده در فضای  $m+1$  بُعدی را نسبت به فاصله دو بردار در فضای  $m$  بُعدی به صورت رابطه ۸ خواهیم داشت:

$$\sqrt{\frac{R_{m+1}^2 - R_m^2}{R_m^2}} = \frac{|y(t - m\tau) - y(t_r - m\tau)|}{R_m} \quad (8)$$

هرگاه کمیت‌های فوق‌الذکر از یک مقدار آستانه (حدود ۱۰-۱۵) فراتر برود، همسایه تحت بررسی کاذب در نظر گرفته می‌شود (پری زنگنه و همکاران، ۱۳۸۹).

### بُعد همبستگی

در آنالیز سری زمانی، یکی از مراحل مهم تعیین وجود رفتار آشوبی، محاسبه بُعد همبستگی است. برای فضای حالت  $m$  بُعدی، تابع همبستگی  $M(r)$  به شکل رابطه ۹ تعریف می‌شود:

$$M(r) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{2}{N(N-1)} \sum_{1 \leq i < j \leq N} L(r - |Y_i - Y_j|) \quad (9)$$

که در آن  $L$  تابع هویساید پله‌ای با  $u \geq 0$  بر  $L(u)=1$  و  $u \leq 0$  بر  $L(u)=0$  بوده و  $|Y_i - Y_j|$  تعداد نقاط در فضای مزبور و  $r$  شعاع کره ساخته شده به مرکز  $Y_i$  یا  $Y_j$  است. برای مقادیر مثبت  $r$ ، تابع همبستگی  $M(r)$  با رابطه ۱۰ به  $r$  مرتبط می‌شود، که در این رابطه  $g$  یک ضریب ثابت (رابطه ۱۰) و  $D_2$  توان همبستگی است که از رابطه ۱۱ به دست می‌آید (الشوریگی و همکاران، ۲۰۰۲):

$$M(r) \underset{r \rightarrow 0}{\underset{N \rightarrow \infty}{\approx}} g r^{D_2} \quad (10)$$

$$D_2 = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\log M(r)}{\log(r)} \quad (11)$$

### بزرگ‌ترین نمای لیاپانوف

روزنشتین<sup>۱</sup> شیوه جدیدی برای محاسبه بزرگ‌ترین نمای لیاپانوف با استفاده از سری‌های زمانی ارائه کرد. این روش، بعد از بازسازی فضای حالت مناسب با استفاده از مقادیر  $\tau$  و  $m$ ، یک نقطه  $X_{n0}$  را انتخاب و همه نقاط همسایه  $X_n$  با فاصله‌ای نزدیک‌تر از یک فاصله  $r$  از آن را پیدا کرده و متوسط فاصله آن‌ها از آن نقطه را محاسبه می‌کند. این روند برای محاسبه یک مقدار متوسط  $S$  به نام فاکتور کشیدگی<sup>۲</sup> برای  $N$  نقطه در طول مسیر تکرار می‌شود (شانگ و همکاران، ۲۰۰۵).

1. Rosenstein  
2. Stretching Factor

$$S = \frac{1}{N} \sum_{n_0=1}^N \ln \left[ \frac{1}{|u_{X_{n_0}}|} \sum |X_{n_0} - X_n| \right] \quad (12)$$

که  $|u_{X_{n_0}}|$  تعداد همسایه‌های یافت‌شده در اطراف نقطه  $X_{n_0}$  است. شیب قسمت خطی نمودار فاکتور کشیدگی  $S$  در برابر تعداد نقاط  $N$  یا زمان  $t=N\Delta t$ ، یعنی نمودار  $S$  برحسب  $N$  یا  $t$  در بخش ابتدایی آن نشان‌دهنده تقریب بزرگ‌ترین نمای لپانوف است (شانگ و همکاران، ۲۰۰۵). مثبت بودن مقدار شیب به دست‌آمده از نمودار نشان‌دهنده آشوبی بودن سیستم است.

### طیف توان فوریه

طیف توان فوریه با بهره‌گیری از آنالیز فوریه، برای نشان دادن فرکانس فراز و نشیب‌های زمانی متغیرهای پویا، به دست می‌آید. برای داده‌های تناوبی، این شاخص در فرکانس‌هایی که معرف سیستم‌اند حالتی میخی‌شکل داشته و در بقیه فرکانس‌ها در نزدیکی صفر قرار می‌گیرد. اما برای سیستم آشوبناک، این شاخص دارای پهنای وسیعی است. در عمل، تشخیص سامانه‌های آشوبناک از سامانه‌هایی که رفتاری به شدت تصادفی دارند با استفاده از این کمیت مشکل است (کوجاک و همکاران، ۲۰۰۷).

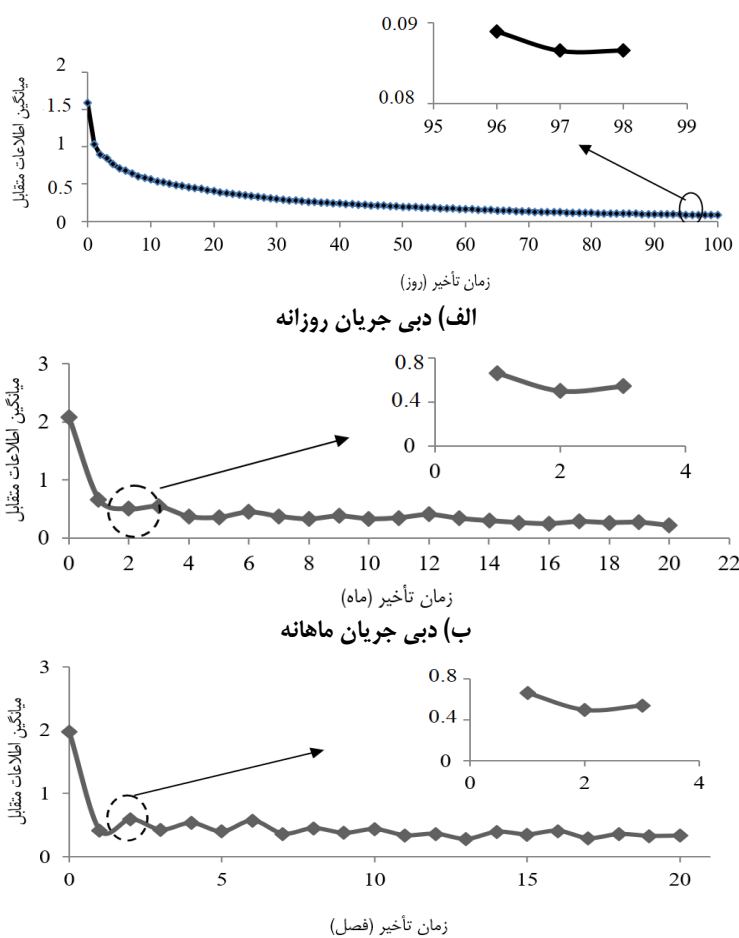
تابع طیف توانی به شکل رابطه ۱۳ تعریف شده است:

$$F(\omega) = \frac{1}{N^2} \left| \sum_{t=0}^{N-1} x(t) \exp(-i(2\pi/N)t\omega) \right| \quad (13)$$

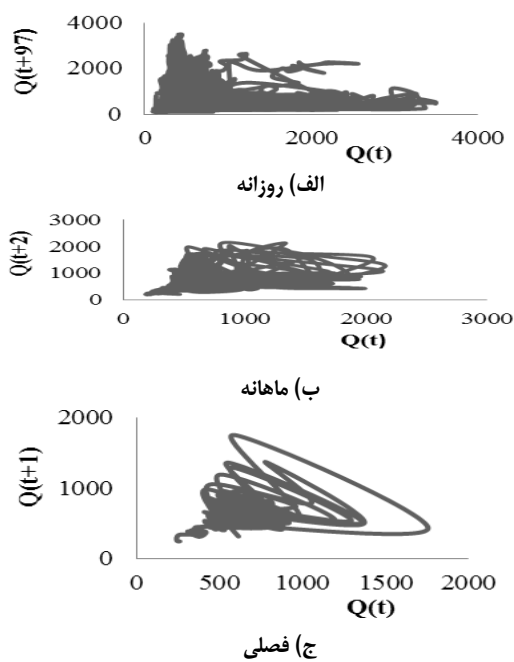
### یافته‌های پژوهش

به منظور تحلیل دبی جریان رودخانه کارون در مقیاس‌های زمانی روزانه، ماهانه، و فصلی طی ۴۵ سال دوره آماری ۱۳۴۶-۱۳۹۰، پس از محاسبه زمان تأخیر و بُعد محاط، فضای حالت ترسیم شد. میانگین اطلاعات متقابل (شکل ۲) زمان تأخیر را مشخص می‌کند و براساس روش نزدیک‌ترین همسایه کاذب، بُعد محاط (شکل ۳) محاسبه شده است. براساس روش میانگین اطلاعات متقابل، اولین مینیمم محلی، همان‌طور که در شکل ۲ مشخص است، برای داده‌های روزانه، ماهانه، و فصلی زمان تأخیر را به ترتیب برابر ۹۷، ۲، و ۱ به دست داده است. با افزایش مقیاس زمانی، زمان تأخیر روند کاهشی داشته است. در تحقیق مرادی‌زاده کرمانی (۱۳۸۹) نیز همین روند کاهشی زمان تأخیر در مقیاس روزانه تا ۱۰ روز مشاهده شده است.

براساس زمان تأخیر بهینه به دست‌آمده، فضای حالت برای سه مقیاس در شکل ۳ رسم شده است. اگر زمان تأخیر در مقایسه با مقیاس‌های زمانی مربوط به ذات سیستم کوچک انتخاب شود،  $y(t)$  و  $y = (T+t)$  به هم نزدیک بوده و وابسته‌اند. بنابراین، همه بردارهای تأخیر در حوالی محور قطری فضا متمرکز می‌شوند. از طرف دیگر، اگر زمان تأخیر بزرگ انتخاب شود،  $y(t)$  و  $y = (t+t)$  مستقل از هم خواهند بود (اعلمی و ملکانی، ۱۳۹۲).

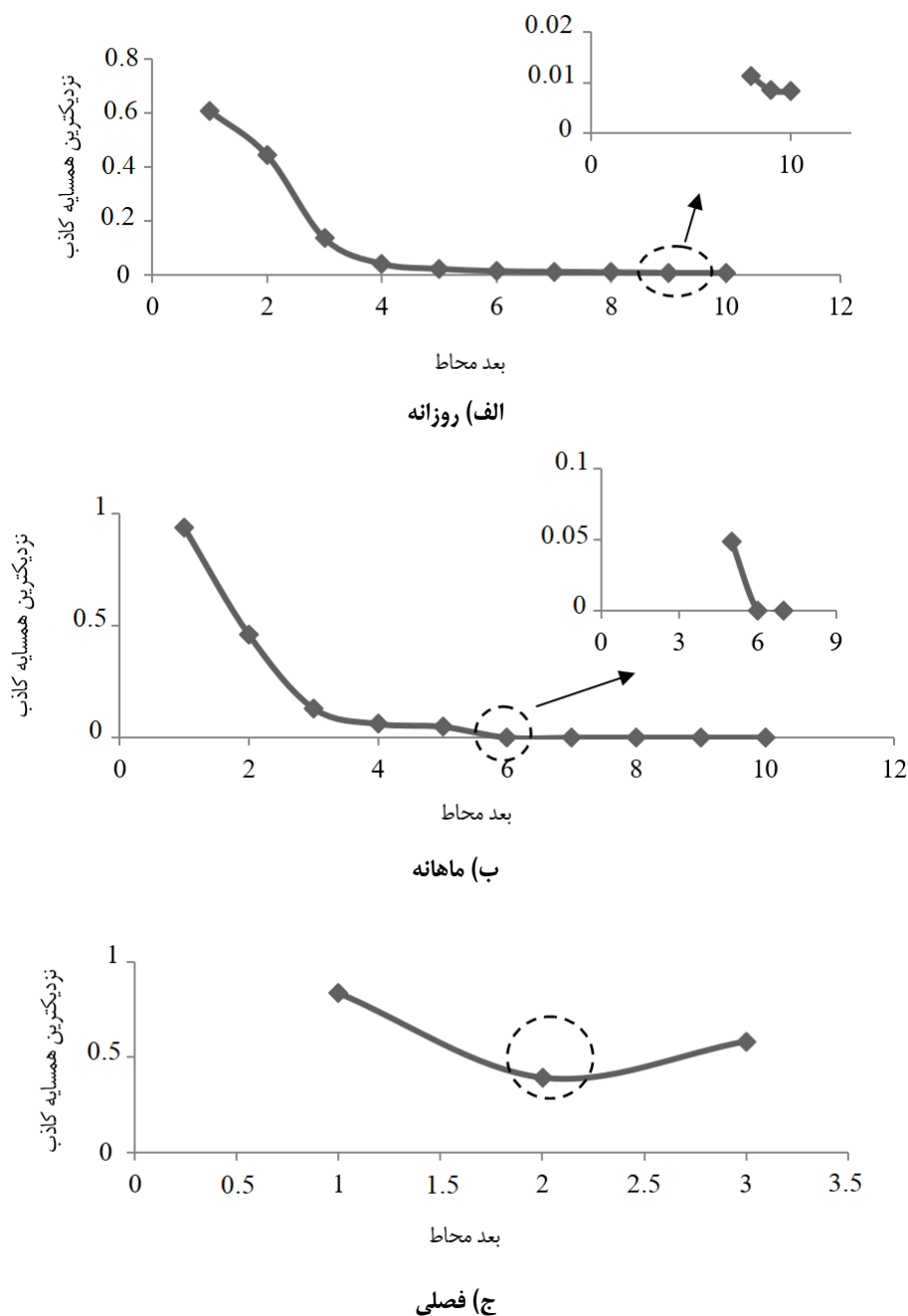


شکل ۲. زمان تأخیر جریان رودخانه کارون در مقیاس‌های زمانی مختلف: الف) روزانه، ب) ماهانه، و ج) فصلی



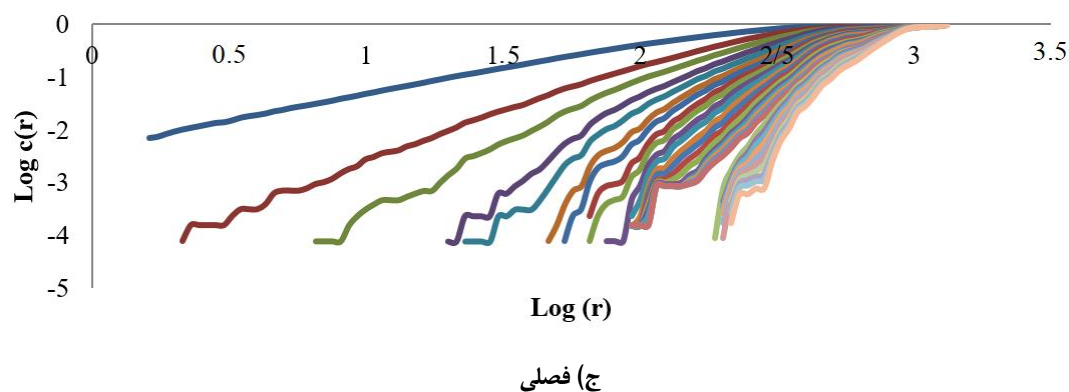
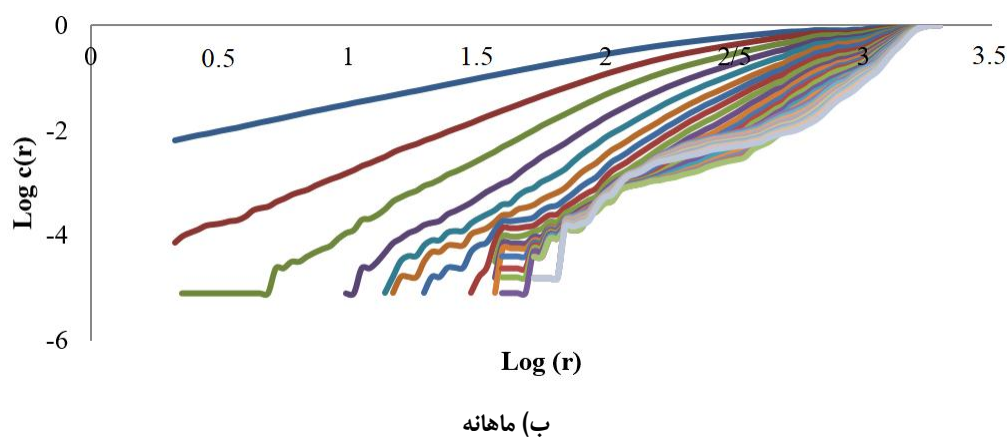
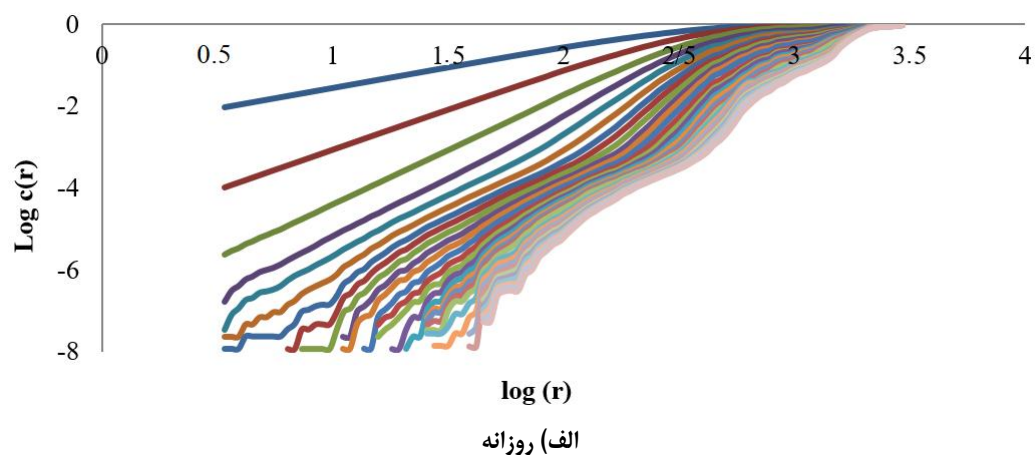
شکل ۳. ترسیم فضای حالت در زمان تأخیر برای مقیاس‌های زمانی مختلف: الف) روزانه، ب) ماهانه، و ج) فصلی

در شکل ۴، بُعد محاط برای دبی جریان روزانه، ماهانه، و فصلی به ترتیب برابر ۹، ۶ و ۲ به دست آمده است. در ادامه، با داشتن زمان تأخیر بهینه و با در نظر گرفتن بُعد محاط ۱ تا ۳۰ برای مقیاس‌های مختلف، تابع بُعد همبستگی محاسبه شده است. شکل ۵ نمودار تغییرات  $\log c(r)$  در مقابل  $\log(r)$  را نشان می‌دهد. این نمودار ارتباط میان تابع همبستگی  $c(r)$  و شعاع  $r$  با افزایش بُعد محاط را نشان می‌دهد. به دلیل وجود نوفه در داده‌ها به ازای مقادیر کوچک  $\log(r)$  نوساناتی در نمودار مشاهده می‌شود.



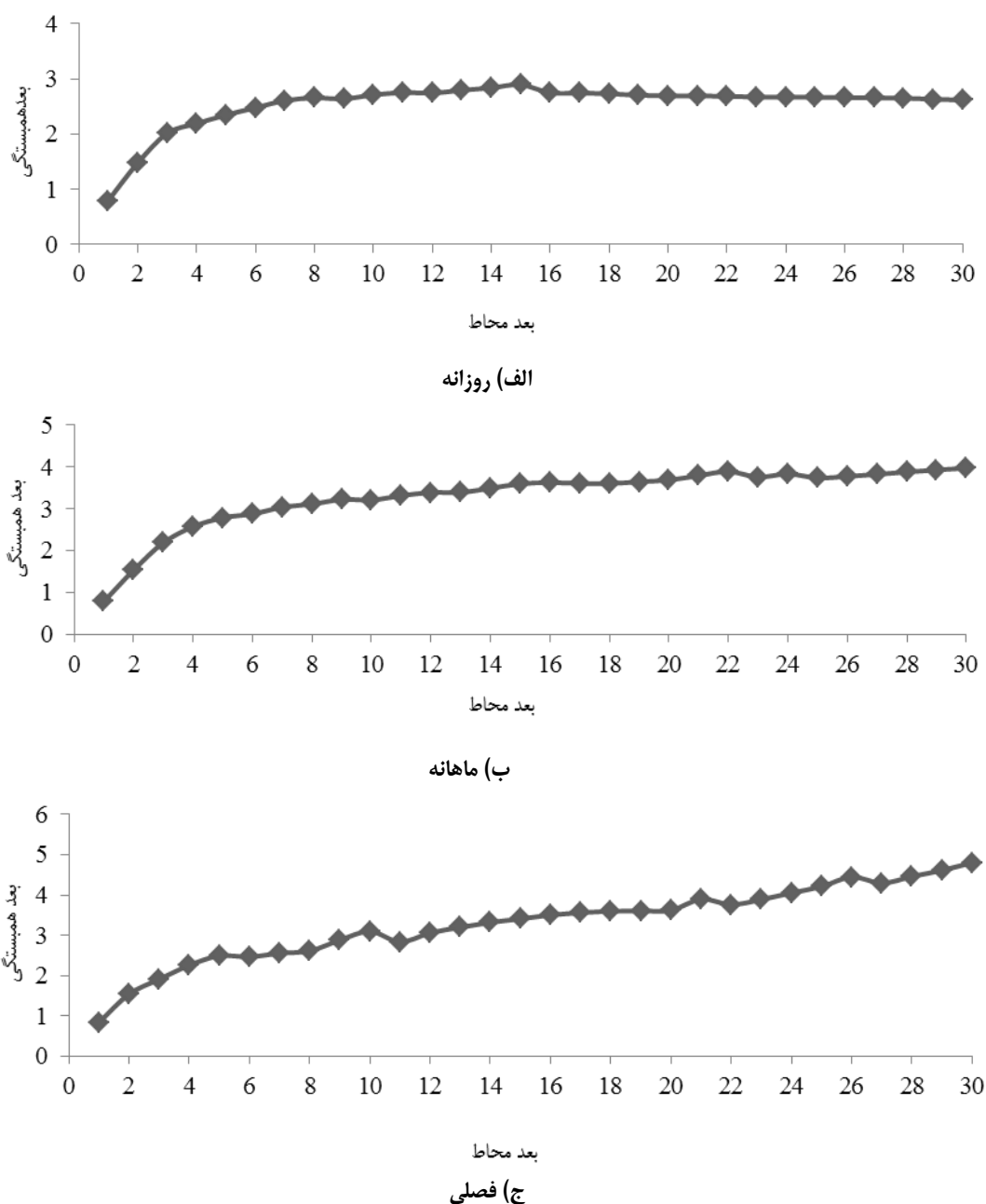
شکل ۴. تعیین بُعد محاط دبی جریان رودخانه کارون در مقیاس‌های زمانی مختلف: الف) روزانه، ب) ماهانه، و ج) فصلی





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

برای تعیین بُعد همبستگی و بررسی آشوب‌پذیری جریان، مقادیر شیب منحنی‌ها با استفاده از روش حداقل مربعات به ازای مقادیر  $r$  محاسبه شده است. شکل ۶ روند تغییرات بُعد همبستگی در مقابل بُعد محاط برای مقیاس‌های مختلف را نشان می‌دهد. اگر این منحنی به دست آمده در ازای افزایش بُعد محاط به اشباع برسد، داده‌ها از آشوب‌پذیری برخوردارند و مقدار اشباع اندازه بُعد همبستگی را نشان می‌دهد و در صورتی که به اشباع نرسند، داده‌ها دارای رفتار تصادفی هستند.



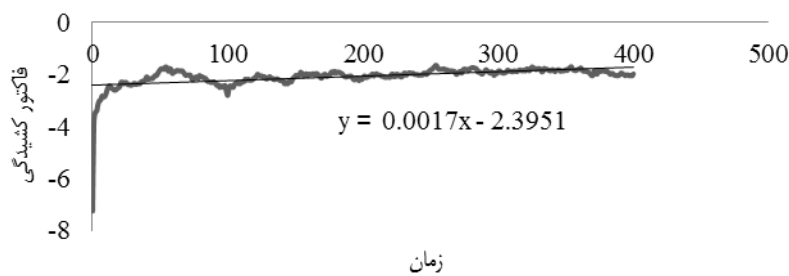
شکل ۶. روند تغییرات بُعد همبستگی در برابر بُعد محاط در مقیاس های زمانی مختلف: الف) روزانه، ب) ماهانه، و ج) فصلی

همان طور که در شکل ۶- الف مشخص است، نمودار به اشباع نرسیده و به صورت صعودی در حال افزایش است. پس نمی توان بُعد همبستگی را برای آن تعیین کرد. پس در این مقیاس، جریان به صورت تصادفی است. اما در شکل ۶- ب، در مقیاس ماهانه، نمودار در بُعد محاط ۲۰ شروع به اشباع شدن می کند و از مقدار  $2.704$  فراتر نمی رود. به همین دلیل، بُعد همبستگی مناسب برای این مقیاس برابر  $D2=2.704$  در نظر گرفته می شود. اشباع شدن بُعد همبستگی و غیر صحت بودن آن دلیل بر آشوب پذیر بودن جریان در این مقیاس است. در مقیاس فصلی، همان طور که در شکل ۶- ج پیداست، نمودار سیر صعودی دارد و به اشباع نمی رسد و این دلیل بر تصادفی بودن سیستم در این مقیاس است. بر اساس تحقیق فهمید فرد و همکاران (۱۳۹۴) مبنی بر تأثیر سد بر دینامیک انتقال رسوب، دو ایستگاه قبل و بعد از

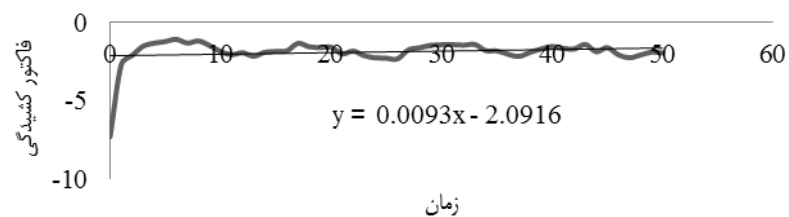
سد در مقیاس زمانی ده‌روزه براساس بُعد همبستگی و فضای حالت بررسی شد که، بر اساس نتایج آن، در ایستگاه پایین‌دست سد، آشوب در سری زمانی رسوب معلق در کوتاه‌مدت (کمتر از ۱۰ روز) وجود ندارد. پس این سری می‌تواند دست‌خوش تغییرات ناشی از عوامل محیطی از جمله تحت تأثیر وجود سد قرار بگیرد. بنابراین، در این تحقیق تصور می‌شود به دلیل موقعیت جغرافیایی ایستگاه ملّاثانی، که پایین‌تر از بند قیر قرار گرفته، تصادفی‌بودن در مقیاس روزانه به دلیل وجود این بند و رسیدن سه رود به یکدیگر قبل از ایستگاه است و به همین دلیل در مقیاس بزرگ‌تر یعنی ماهانه سیستم کاملاً آشوبناک است.

در ادامه، به منظور بررسی دیگر شاخص آشوب در سری‌های زمانی مورد مطالعه، نمای لیاپانوف رسم شده است (شکل ۷).

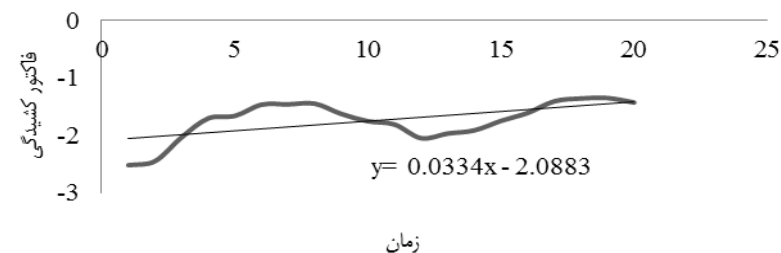
با توجه به این شکل، مقادیر بزرگ‌ترین نمای لیاپانوف بر اساس شیب منحنی در نمودار به‌دست می‌آید. همان‌طور که در شکل یادشده پیداست، مقادیر بزرگ‌ترین نمای لیاپانوف برای مقیاس‌های روزانه، ماهانه، و فصلی به‌ترتیب ۰/۰۰۹۳، ۰/۰۳۳۴ و ۰/۰۰۹۳ به‌دست آمده است. مثبت‌بودن این مقادیر نشان‌دهنده آشوب و حساسیت نسبت به شرایط اولیه سیستم است. آشوب‌پذیری داده‌ها می‌تواند از روش‌هایی همچون نمای لیاپانوف و طیف توان فوریه نیز محاسبه شود. ولی این روش‌ها فقط قادر به تشخیص رفتار آشوبی از تصادفی هستند و نمی‌توانند مانند روش بُعد همبستگی، علاوه بر تشخیص رفتار آشوبی از تصادفی، میزان پیچیدگی داده‌ها را تعیین کنند (جانی و همکاران، ۱۳۹۴)



(الف) روزانه



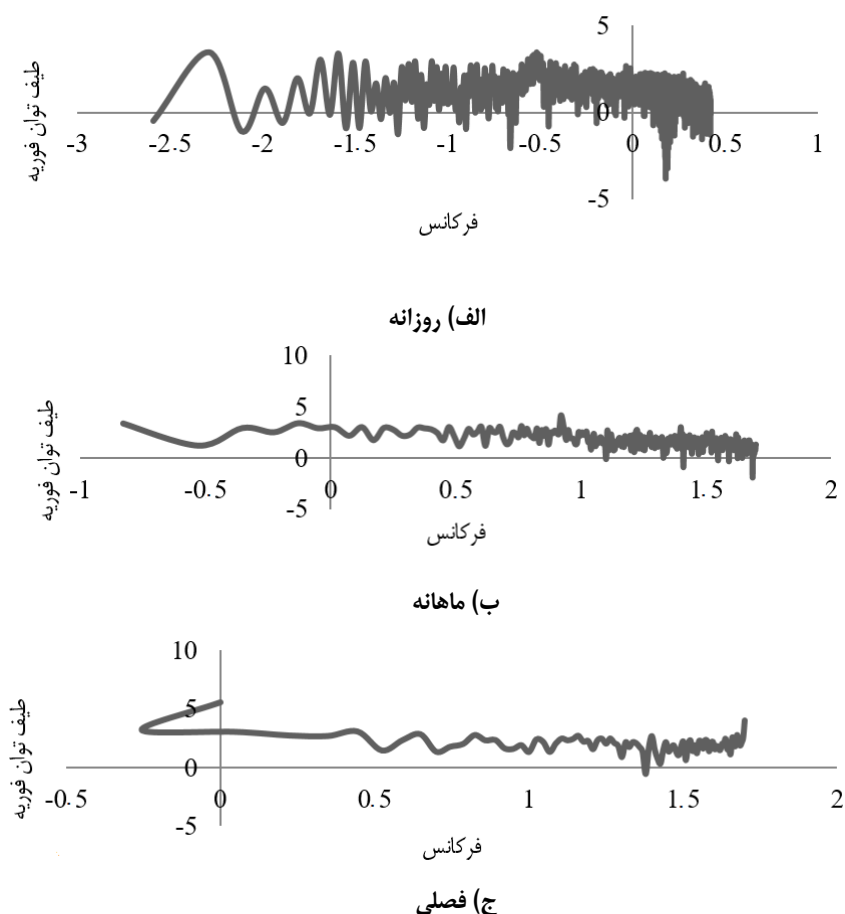
(ب) ماهانه



(ج) فصلی

شکل ۷. مقادیر ماکزیمم نمای لیاپانوف دبی جریان رودخانه کارون در مقیاس‌های زمانی مختلف: (الف) روزانه، (ب) ماهانه، و (ج) فصلی

در ادامه، طیف توان فوریه به‌عنوان شاخصی دیگر برای تعیین آشوبناکی سیستم در شکل ۸ برای مقیاس‌های زمانی روزانه، ماهانه، و فصلی رسم شده است. همان‌طور که در شکل ۸ مشخص است، وسعت پهنای باند با افزایش مقیاس زمانی کاهش می‌یابد و در قسمت ماهانه پهنای وسیع باند دلیل دیگری بر صحت آشوبناکی سیستم در این مقیاس است. همان‌طور که قبلاً نیز گفته شد، توان طیفی فوریه به‌تنهایی معیار کاملی برای تشخیص ماهیت آشوبناکی نیست. در جدول ۲ نتایج به‌دست‌آمده از محاسبات درج شده است.



شکل ۸. پهنای باند در طیف توان فوریه در مقیاس‌های زمانی مختلف: الف) روزانه، ب) ماهانه، و ج) فصلی

جدول ۲. نتایج محاسبه پارامترهای مرتبط با آشوبناکی رودخانه کارون

نوع پدیده	مقیاس	زمان تأخیر	بُعد محاط	بُعد همبستگی	نمای لیاپانوف
روزانه	روزانه	۹۷	۹	ندارد	۰/۰۰۱۷
جریان رودخانه	ماهانه	۲	۶	۲/۷۰۴	۰/۰۰۹۳
فصلی	فصلی	۱	۲	ندارد	۰/۰۳۳۴

### نتیجه‌گیری

نظریه آشوب یکی از علوم نوین و کاربردی در دهه‌های اخیر است. براساس محاسبات انجام‌شده در مقیاس‌های زمانی روزانه، ماهانه، و فصلی، با توجه به معیارهای بُد همبستگی، نمای لیاپانوف، و طیف توان فوریه، مشاهده شد که دبی جریان ماهانه رودخانه کارون در ایستگاه ملّاثانی دارای بُد همبستگی غیرصحیح و برابر ۲/۷۰ و نمای لیاپانوف برابر

۰/۰۰۹۳ شد. مجموعه پارامترهای محاسبه شده فوق نشان از وجود آشوب در این مقیاس زمانی است. در نتیجه، رفتار سیستم غیرتصادفی است و می‌توان دبی جریان را در این مقیاس پیش‌بینی کرد. در مقیاس‌های روزانه و فصلی، به دلیل نداشتن مقدار عددی برای بُعد همبستگی، که یکی از مرسوم‌ترین روش‌ها برای تعیین آشوبناکی جریان است، دبی جریان رودخانه کارون به صورت تصادفی است. یکی از دلایل آشوبی نبودن دبی جریان در این مقیاس‌ها می‌تواند شرایط محلی ایستگاه مورد بررسی (ملآثانی) باشد که بعد از بند قیر قرار گرفته است. با توجه به نتایج رفتار جریان سه رودخانه دز، گرگر و شطیط که قبل از بند قیر واقع شده‌اند می‌توان نتایج رودخانه کارون در ایستگاه ملآثانی را که بعد از بند قیر قرار دارد تفسیر کرد.

### پیشنهادها

پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آتی برای تأثیر بند قیر در روند رفتار جریان رودخانه‌های یادشده مطالعاتی انجام شود. همچنین، توصیه می‌شود در صورت آشوبی بودن رودخانه یادشده با استفاده از نظریه آشوب پیش‌بینی انجام پذیرد. در صورت دسترسی به داده‌های کافی و مورد اطمینان از دیگر ایستگاه‌های منطقه نیز پیشنهاد می‌شود تعداد بیشتری ایستگاه برای استخراج نتایج انتخاب شود.

## منابع

- 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.
- پری زنگنه، م.؛ عطایی، م. و معلم، پ. (۱۳۸۹). بازسازی فضای حالت سری‌های زمانی آشوبی با استفاده از یک روش هوشمند، *فصل‌نامه پژوهش در فناوری برق*، ۱(۳): ۱-۱۰.
- جانی، ر.؛ قربانی، م. و شمسایی، ا. (۱۳۹۴). تحلیل بارش ماهانه بندرانزلی با استفاده از نظریه آشوب در شرایط تغییر اقلیم، *مجله پژوهش آب ایران*، ۹(۱): ۲۹-۳۹.
- شقایقان، م.ر. و طالب بیدختی، ن. (۱۳۸۸). بررسی وجود آشوب در جریان رود در مقیاس‌های زمانی گوناگون، *نشریه مهندسی منابع آب*، ۲(۳): ۱-۸.
- طباطبایی، م.ر.؛ شاهدی، ک. و سلیمانی، ک. (۱۳۹۲). مدل شبکه عصبی مصنوعی برآورد غلظت رسوب معلق رودخانه‌ای به کمک تصاویر سنجنده مودیس (مطالعه موردی ایستگاه هیدرومتری ملائانی - رودخانه کارون)، *نشریه آب و خاک*، ۲۷: ۱۹۳-۲۰۴.
- انیس حسینی، م. و ذاکر مشفق، م. (۱۳۹۳). تحلیل و پیش‌بینی جریان رودخانه کشکان با استفاده از نظریه آشوب، *مجله هیدرولیک*، ۳(۸): ۴۵-۶۱.
- ادب، ف. (۱۳۹۵). شبیه‌سازی و تحلیل دبی جریان رودخانه‌های کارون و دز با استفاده از نظریه آشوب، پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی و مدیریت منابع آب، دانشگاه سمنان.
- فهم‌فرد، 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.
- مرادی‌زاده کرمانی، ف. (۱۳۸۹). تخمین جریان رودخانه با استفاده از نظریه آشوب و برنامه‌ریزی ژنتیک در مقیاس‌های زمانی مختلف، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تبریز.
- هاشمی گلپایگانی، م. (۱۳۸۸). *آشوب و کاربردهای آن در مهندسی*، تهران: امیرکبیر.
- Abrabanel, H. (1996). *Analysis of Observed Chaotic Data*, Springer-Verlag, New York.
- Adab, F. (2016). Simulation and Analysis of River Flow of Karun and Dez Rivers Using Chaos Theory, MSc. Thesis, Semnan University.
- Alami, M.T. and Malekani, L. (2014). Phase Space Reconstruction and Fractal Dimension Using of Delay Time and Embedding Dimension, *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 43(1): 15-21 (Text in Persian).
- Banks, J.; Dragan, V. and Jones, A. (2003). *Chaos: A Mathematical Introduction*, Cambridge University Press.
- Elshorbagy, A.; Simonovic, S. and Paun, U.S. (2002). Estimation of Missing Streamflow Data Using Principle of Chaos Theory, *Journal of Hydrology*, 255: 123-133.
- Farzier, C. and Kockelman, K. (2004). Chaos Theory and Transportation System: An Instructive Example, *Proc. of 83rd Annual Meeting of the Transportation Research Board*, Washington D.C., USA.

- Ghorbani, M.A.; Kisi, O. and Alinezhad, M.A. (2010). Probe Into the Chaotic Nature of Daily Streamflow Time Series by Correlation Dimension and Largest Lyapunov Methods, *Applied Mathematical Modeling*, 34: 4050-4057.
- Hashemi Golpayegani, M. (2009). *Chaos and Its Applications in Engineering*, Amir Kabir University Press.
- Jani, R.; Ghorbani, M. and Shamsaei, A. (2015). Analysis of Monthly Rainfall in the Bandar Anzali Using Chaos Theory under Climate Change Conditions, *Iranian Water Research Journal*, 9(1): 29-39 (Text I Persian).
- Kockak, K.; Bali, A. and Bektasoglu, B. (2007). Prediction of Monthly Flows by Using Chaotic Approach, *International Congress on River Basin Management*, Antalya Turkey, pp. 553-559.
- Lange, H. (2003). Time Series Analysis of Ecosystem Variables with Complexity Measures, *InterJournal for Complex Systems*, 250: 1-9.
- Moradizadeh Kermani, F. (2010). Estimation of River Flow Using Chaos Theory and Genetic Programming in Different Time Scales. MSc. Thesis, Tabriz University.
- Ott, E. (2002). *Chaos in Dynamical Systems*, Cambridge University Press, New York.
- Pari Zanganeh, M.; Ataei, M. and Moallem, P. (2010). Phase Space Reconstruction of Chaotic Time Series Using an Intelligent Method, *Journal of Transactions of Electrical Technology*, 1(3): 3-10.
- 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.
- Fahimfard, S.; Shamsaei, A.; Fattahi, M. and Farzin, S. (2015). Investigation of the Effect of Dam on Chaotic Pattern of Suspended Load Transport (Case Study: Karaj Dam), *Journal of Water Resources Engineering*, 8: 89-100 (Text in Persian).
- Shaghaghian, M.R. and Talebbeydokhti, N. (2009). Investigation of Chaos in River Flow at Different Time Scales, *Water Resources Engineering*, 2(3): 1-8 (Text in Persian).
- Sivakumar, B. (2001). Rainfall dynamics at different temporal scales: A chaotic perspective, *Hydrology and Earth System Sciences*, 5(4): 645-652.
- Shang, P.; Li, X. and Kamae, S. (2005). Chaotic Analysis of Traffic Time Series, *Chaos, Solitons and Fractals*, 25: 121-128.
- Sivakumar, B. (2009). Nonlinear dynamics and chaos in hydrologic system: Latest developments and a look forward, *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 23: 1027-1036.
- Tabatabaei, M.R.; Shahedi, K. and Soleymani, K. (2013). Artificial Neural Network Model of Estimating Suspended Solids Concentration of River Using Modis Images (Case Study: Mollasani Hydrometric Station- Karun River), *Journal of Soil and Water*, 27: 193-204 (Text in Persian).
- Yabin, S. and Chi, D. (2014). Improving Numerical Forecast Accuracy with Ensemble Kalman Filter and Chaos Theory, *Journal of Hydrology*, 512: 540-548.