

تحلیل و پیش‌بینی جریان رودخانه کشکان با استفاده از نظریه آشوب

مسعود انیس حسینی¹، محمد ذاکر مشفق^{2*}

1- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی رودخانه، دانشگاه صنعتی جندی شاپور، دزفول

2- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی جندی شاپور، دزفول

* دزفول، صندوق پستی 64615-334

moshfegh@jsu.ac.ir

چکیده - در این پژوهش از دیدگاه نظریه آشوب، سری زمانی آبدی روزانه رودخانه کشکان تحلیل شده است. قبل از انجام تحلیل مبتنی بر نظریه آشوب، میزان داده‌های نوفه‌ای سری زمانی با استفاده از روش‌های تخمین هسته گوسی و تبدیل موجک مورد بررسی قرار گرفت. همچنین رفتار آماری سری زمانی با توابع خودهمبستگی و خودهمبستگی جزئی ارزیابی شد. سپس در بازسازی فضای فاز این سیستم به روش تأخیرها، از روش‌های میانگین اطلاعات متقابل و نزدیک‌ترین همسایگان کاذب، به ترتیب برای تشخیص زمان تأخیر بهینه و بُعد تعبیه بهینه سیستم استفاده شده است. در همین حال، بعد فراکتالی سیستم با استفاده از روش بعد همبستگی و همچنین حساسیت به شرایط اولیه سیستم با استفاده از روش توان لیاپانوف آزموده شده و در انتها نیز پیش‌بینی با استفاده از روش تقریب محلی انجام شده است. کاهش درصد همسایگان کاذب به دنبال افزایش بعد تعبیه، نشان‌دهنده وجود جاذب فراکتالی در فضای فاز سیستم است؛ که در کنار توان لیاپانوف مثبت به دست آمده، شرایط یک سیستم آشوبناک را برای جریان رودخانه در حوضه آبریز کشکان ترسیم می‌کند. به دنبال این نتایج، پیش‌بینی به روش تقریب محلی بر اساس فضای فاز بازسازی شده انجام شد؛ که دقت رضایت‌بخش به دست آمده، بیان‌گر کارایی روش‌های مبتنی بر نظریه آشوب برای تحلیل و پیش‌بینی جریان رودخانه در حوضه آبریز رودخانه کشکان است. این کارایی در مقایسه‌ای که با روش برنامه‌سازی ژنتیک انجام شد؛ مورد تایید بیشتری قرار گرفت.

کلیدواژگان: نظریه آشوب، توان لیاپانوف، روش تقریب محلی، تحلیل غیرخطی، رودخانه کشکان.

1- مقدمه

که این امر در واسنجی مدل با توجه به شرایط مطالعه، دشواری ایجاد می‌کند. با چنین شرایطی، حرکت به سمت مدل‌های داده‌محور¹ برای محققان از جذابیت ویژه‌ای برخوردار می‌شود. در کنار روش‌های غیرخطی مبتنی بر

کارایی بهتر روش‌های غیرخطی در تحلیل سیستم‌های پیچیده، نظیر سیستم حاکم بر جریان رودخانه‌ها بر کسی پوشیده نیست. در این میان، مدل‌های مفهومی در طی مراحل توسعه خود به پارامترهای متعددی وابسته هستند

1. Data-Driven

مشاهده کرد (Hense, 1987). ویلکوکس و همکاران از جمله اولین کسانی بودند که رفتار آشوبی را در دبی جریان حاصل از ذوب برف در حوضه‌ای در آمریکا بررسی کردند که در مطالعه ایشان نشانه‌ای از وجود آشوب، حتی با درجه کم پیدا نشد (Wilcox et al., 1990). پس از آن، پژوهشگرانی مانند جاپاواردنا و لی (Jayawardena and Lai, 1994)، پورپوراتو و ریدولفی (Porporato and Ridolfi, 1996)، لیو و همکاران (Liu et al., 1998)، وانگ و گان (Wang and Gan, 1998)، کراسوسکایا و همکاران (Krasovskaia et al., 1999)، سیواکومار (Sivakumar, 2004) و خطیبی و همکاران (Khatibi et al., 2012)، رفتار آشوبی را در سری زمانی دبی بررسی کردند و نتیجه گرفتند که در سری زمانی دبی، آشوب وجود دارد. با این وجود، مطابق بعضی تحقیقات در خصوص وجود آشوب در سری زمانی دبی رودخانه تردید وارد شده است (Pasternack, 1999; 2001).

با وجود مطالعات بسیاری که در زمینه آشوب در فرایندهای هیدرولیکی انجام شده است، هنوز تصویر روشنی از نقاط ضعف و قوت روش‌های مبتنی بر این نظریه در تحلیل و پیش‌بینی این دسته فرایندها، مشخص نشده است (Sivakumar, 2009; Khatibi et al., 2012). همچنین از تنوع نتایج در تحقیقات گذشته برای رودخانه‌های مختلف و درجات مختلفی از رفتار آشوبناک گزارش شده، می‌توان این‌گونه برداشت کرد که برای استفاده از مدل‌های مبتنی بر نظریه آشوب در سیستم هر رودخانه، شناسایی آشوب و میزان آن، به طور جداگانه مورد نیاز خواهد بود.

در ایران، مطالعاتی در این زمینه بر اساس نظریه آشوب انجام گرفته است (قاهری و همکاران، 1391; Gorbani et al., 2012; Fattahi et al., 2013). در یکی از مطالعات اخیر، مرادی‌زاده کرمانی و همکاران در تحقیق خود که برای 30 سال داده از سری زمانی دبی رودخانه لیقوان در

هوش مصنوعی همچون برنامه‌سازی ژنتیک و شبکه‌های عصبی مصنوعی، نظریه آشوب نیز در دهه‌های گذشته توجه بسیاری از محققان را به خود جلب کرده است.

رفتار آشوبناک در یک فرایند، نوعی از رفتار است که حساسیت به شرایط اولیه در آن مشاهده شود و پارامترهای مؤثر آن، نسبت به هم استقلال کامل نداشته باشند و در عین حال وابستگی کامل نیز بین آن‌ها دیده نشود (Islam and Sivakumar, 2002). همچنین در فضای فازی که برای سیستم بازسازی می‌شود، نمودار جاذب¹ با الگوی فراکتالی دیده می‌شود. از این الگوهای فراکتالی، تحت عنوان تعین‌پذیری² پنهان سیستم یاد می‌شود. شناسایی آشوب به صورت کلی با توجه به فضای فاز بازسازی شده انجام می‌شود که به این منظور، حساسیت به شرایط اولیه نمودار جاذب و همچنین بعد فراکتالی آن ارزیابی می‌شود. در صورت مشاهده رفتار آشوبناک در سیستم، با توجه به الگوی شکل گرفته در فضای فاز آن، می‌توان به تخمینی از دینامیک سیستم بر مبنای نظریه آشوب دست یافت. هدف از کاربرد مبنای نظریه آشوب، شناسایی تعین‌پذیری نهفته در پس رفتار پیچیده سیستم‌هایی مانند جریان رودخانه است. تحقیقات لورنز در سال 1963 حساسیت به شرایط اولیه را با عنوان اثر پروانه‌ای³ معرفی کرد (Lorenz, 1993) و به همراه جاذب فراکتالی که برای معادلات دیفرانسیل مدل همرفت در لایه‌ای از سیال مشاهده شد، سنگ بنای نظریه آشوب گردید و تا امروز کاربرد آن در رشته‌های گوناگون توسعه داشته است. در زمینه مهندسی آب، تحقیقات در شناخت فرایندها بر مبنای نظریه آشوب از اواخر دهه 80 میلادی آغاز شده است.

برای اولین بار، هنس برای تحلیل سری زمانی بارش از اصول این نظریه استفاده کرد و درجه کم آشوبناکی را

1. Attractor
2. Determinism
3. Butterfly Effect

آشوب، مناسب تلقی می‌شود. در تحقیق حاضر، به صورت جامع‌تر رفتار سیستم از دیدگاه نظریه آشوب بررسی شده و پس از شناسایی و تحلیل رفتار آشوبناک، بر این اساس پیش‌بینی نیز انجام گرفته است. با توجه به رفتار تصادف‌گونه جریان رودخانه کشکان، برای تحلیل این فرایند از متغیر رواناب روزانه استفاده شده است. در ابتدا میزان نوفه¹ در داده‌های سری زمانی با استفاده از روش تخمین هسته گوسی² و تبدیل موجک³ بررسی شده است. سپس با استفاده از توابع خودهمبستگی⁴ و خودهمبستگی جزئی⁵ رفتار آماری داده‌ها و ویژگی‌های تصادفی و تعیین‌پذیری آن‌ها بررسی شده است. از روش‌های میانگین اطلاعات متقابل⁶ و نزدیکترین همسایگان کاذب⁷ برای بازسازی فضای فاز سیستم استفاده شده و سپس بعد فراکتالی جاذب سیستم و حساسیت به شرایط اولیه، به ترتیب با استفاده از روش‌های بعد همبستگی⁸ و توان لیاپانوف⁹ تخمین زده شده‌اند. در بخش پایانی، با استفاده از روش تقریب محلی¹⁰ در فضای فاز، پیش‌بینی برای سری زمانی رواناب انجام شده است و سپس مقایسه‌ای نیز میان نتایج این روش با روش برنامه‌سازی ژنتیک صورت گرفته تا کارایی آن بهتر مشخص شود.

2- مواد و روش‌ها

قبل از انجام عملیات شناسایی آشوب در سری زمانی، لازم است که میزان نوفه در میان داده‌های ثبت شده بررسی شود. بر این اساس، می‌توان از روش تخمین هسته

یکی از زیرحوضه‌های دریاچه ارومیه انجام داده‌اند؛ پس از استفاده از 29 سال نخست برای بازسازی فضای فاز، با استفاده از روش تقریب محلی به دقتی مناسب در پیش‌بینی بر مبنای نظریه آشوب رسیده‌اند (مرادی‌زاده کرمانی و همکاران، 1391). در رابطه با حوضه کشکان که تحقیق حاضر در مورد آن انجام گرفته، اندک تحقیقی می‌توان یافت که با استفاده از روش‌های تحلیل غیرخطی به بررسی سیستم جریان رودخانه در این حوضه پرداخته باشد. زارع اندلانی و ذاکرمشفق از رویکرد درخت تصمیم در تحلیل سری زمانی دبی رودخانه کشکان استفاده کرده‌اند (زارع اندلانی و ذاکرمشفق، 1391). همچنین با رویکرد برنامه‌سازی ژنتیک، جریان رودخانه کشکان در تحقیق ذاکرمشفق و والی‌پور مورد بررسی قرار گرفته است (ذاکرمشفق و والی‌پور، 1391؛ والی‌پور و ذاکرمشفق، 1392- الف؛ 1392- ب).

صحرائی و ذاکرمشفق در تحقیق خود، با استفاده از ماشین بردار پشتیبان اقدام به پیش‌بینی دبی رودخانه در حوضه آبریز کشکان نموده‌اند (صحرائی و ذاکرمشفق، 1392). به‌طور مشخص، در زمینه استفاده از مبنای نظریه آشوب برای تحلیل غیرخطی سری زمانی دبی رودخانه کشکان، انیس حسینی و ذاکرمشفق با کمک روش توان لیاپانوف، این سری زمانی را مورد مطالعه قرار داده‌اند (انیس حسینی و ذاکرمشفق، 1391). از آنجا که روش توان لیاپانوف برای یک سری زمانی تصادفی نیز ممکن است نتیجه دهد (Khatibi et al, 2012)، راه مناسب‌تر آن است که از معیارهای شناسایی آشوب بیشتری استفاده شود. بر این اساس، انیس حسینی و ذاکرمشفق شرایط یک سیستم آشوبناک از جمله جاذب فراکتالی و حساسیت به شرایط اولیه را در سری زمانی دبی رودخانه کشکان مشاهده کردند (انیس حسینی و ذاکرمشفق، 1392- الف؛ 1392- ب). از این‌رو، شرایط برای پیش‌بینی رفتار سیستم جریان رودخانه در این حوضه با استفاده از روش‌های نظریه

1. Noise
2. Gaussian Kernel Estimation
3. Wavelet Transform
4. Autocorrelation Function
5. Partial Autocorrelation Function
6. Average Mutual Information
7. False Nearest Neighbors
8. Correlation Dimension
9. Lyapunov Exponent
10. Local Approximation Method

است، فضای فاز m بعدی به صورت رابطه (2) ساخته می‌شود (Takens et al., 1981).

$$Y_j = (x_j, x_{j+\tau}, x_{j+2\tau}, \dots, x_{j+(m-1)\tau}) \quad (2)$$

که در آن $j=1, 2, \dots, N-(m-1)\tau$ و m بُعد برداری Y_j است که بعد تعبیه نامیده می‌شود و τ زمان تأخیر مناسب است. Y_j نیز جاذب بازسازی شده سیستم خواهد بود. برای به دست آوردن زمان تأخیر بهینه، کمترین اطلاعات متقابل به معنای وابستگی کم و غیرخطی داده‌ها به یکدیگر و در عین حال، کوتاه‌ترین زمان تأخیر از هدف‌های اساسی محسوب می‌شود (Williams, 1997). در نتیجه، انتخاب اولین کمینه تابع اطلاعات متقابل به عنوان زمان تأخیر بهینه این اهداف را تا حدودی برآورده می‌کند. تابع اطلاعات متقابل به صورت رابطه (3) تعریف می‌شود (Frazer and Swinney, 1986)

$$I(\tau) = \sum_{x(i), x(i+\tau)} P(x(i), x(i+\tau)) \times \log_2 \left[\frac{P(x(i), x(i+\tau))}{P(x(i))P(x(i+\tau))} \right] \quad (3)$$

در این رابطه، $x(i)$ سری زمانی اصلی و $x(i+\tau)$ سری زمانی با زمان تأخیر τ بوده که احتمال‌های $P(x(i))$ و $P(x(i+\tau))$ و $P(x(i), x(i+\tau))$ با توجه به آن‌ها محاسبه می‌شوند و تابع اطلاعات متقابل برای هر زمان تأخیر به دست می‌آید. نحوه محاسبه این احتمال‌ها به این گونه است که ابتدا در صفحه $x(i) - x(i+\tau)$ نقاط سری زمانی رسم شده و سپس روی هر محور، دسته‌بندی بر اساس معیاری مانند طول دسته برابر یا تعداد نقاط برابر در هر دسته، صورت می‌گیرد. به این ترتیب هر یک از دسته‌های افقی و عمودی تعداد نقاطی برابر N_i خواهند داشت. $P(x(i))$ و $P(x(i+\tau))$ ها از نسبت N_i/N به دست می‌آیند که در آن N تعداد کل نقاط در صفحه است. در این بین، با توجه به دسته‌بندی صورت گرفته، صفحه به خانه‌های کوچکتری تقسیم شده که هر یک تعداد نقاطی برابر N_j دارند. نسبت N_j/N احتمال مشترک $x(i)$ و $x(i+\tau)$ را نتیجه می‌دهد. در این تحقیق از دسته‌هایی با احتمال برابر برای

گوسی استفاده کرد. در این روش با استفاده از انتگرال همبستگی هسته گوسی، میزان نوفه با توجه به بعدهای تعبیه مختلف محاسبه می‌شود. در داده‌های دارای نوفه این میزان با افزایش بعد تعبیه به سمت یک مقدار مشخص پیش می‌رود. از ضرب این مقدار مشخص در انحراف معیار سری زمانی اصلی، تخمینی برای انحراف معیار نوفه سری زمانی به دست می‌آید. سپس با استفاده از روشی مانند تبدیل موجک گسسته، سری زمانی در سطوح مختلف تجزیه شده و انحراف معیار نوفه‌ها در هر سطح محاسبه می‌شود. آخرین سطح مجاز برای حذف نوفه‌ها به کمک تبدیل موجک گسسته، سطحی است که در آن، انحراف معیار نوفه از تخمین اولیه این انحراف معیار، کمتر باشد (Yu et al., 2000).

رفتار آماری یک سری زمانی، می‌تواند با استفاده از روش‌های مختلفی مورد تحلیل قرار گیرد. در این تحقیق، تحلیل آماری اولیه داده‌ها با استفاده از توابع خودهمبستگی (ACF) و خودهمبستگی جزئی ($PACF$) صورت می‌گیرد که طی آن، ویژگی‌های تصادفی و تعیین‌پذیری در سری زمانی با توجه به زمان‌های تأخیر مختلف، بررسی می‌شود. تابع خودهمبستگی عبارت است از نسبت کوواریانس سری‌های زمانی x_i و $x_{i+\tau}$ به واریانس x_i و تابع خودهمبستگی جزئی با در نظر گرفتن مقدار خودهمبستگی، به صورت رابطه (1) تعریف می‌شود (Box and Jenkins, 1994).

$$PACF(\tau) = \frac{ACF(\tau) - \sum_{i=1}^{\tau-1} PACF_i(\tau-1)ACF_i(\tau-1)}{1 - \sum_{i=1}^{\tau-1} PACF_i(\tau-1)ACF_i(\tau-1)} \quad (1)$$

که در آن τ زمان تأخیری است که خودهمبستگی جزئی در آن بررسی می‌شود.

برای تشکیل فضای فاز از یک سری زمانی مانند دبی رودخانه از روش تأخیرها¹ استفاده می‌شود که در آن با استفاده از یک سری زمانی مانند x_i که در آن $i=1, 2, \dots, N$

دیگری در فضای فاز است که تابع شمارش گر هوی ساید¹ از لحاظ ریاضی وضعیت آن را نسبت به مرکز کره بررسی می کند و در صورت حضور در فضای داخلی کره، آن را به تعداد نقاط برای محاسبه تابع همبستگی می افزاید. برای r های کم، رفتار تابع همبستگی به صورت توانی با r متناسب است و توان همبستگی با رسم نمودار $\log C(r)$ در برابر $\log r$ به شکل رابطه (5) تعریف می شود.

$$v = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\log C(r)}{\log r} \quad (5)$$

در این رابطه، v شیب این نمودار در قسمت خطی خواهد بود. برای فرایندهای آشوبناک، این مقدار پس از یک بُعد تعبیه معین، به حالتی متعادل و ثابت می رسد، در صورتی که برای فرایندهای تصادفی، v همراه با افزایش m تغییر می کند و به یک مقدار محدود، نخواهد رسید.

از جمله روش های دیگر شناسایی آشوب، به دست آوردن توان لیاپانوف است که در واقع معیاری از حساسیت به شرایط اولیه است. روش های مختلفی برای به دست آوردن توان لیاپانوف وجود دارد. اما طبق نظر وولف و همکاران، به دست آوردن بزرگترین توان لیاپانوف از رابطه (6) برای شناخت آشوبناک بودن سیستم کفایت خواهد کرد (Wolf et al, 1985).

$$\lambda_1 = \frac{1}{t_M - t_0} \sum_{k=1}^M \log \frac{L'(t_k)}{L'(t_{k-1})} \quad (6)$$

در این رابطه t_0 ، زمان نقطه اولیه جاذب در فضای فاز است. در عین حال، روند دینامیکی سیستم در فضای فاز در طول جاذب بارها و بارها از کنار این نقطه گذشته است و نزدیک ترین نقطه در مسیرهای همسایگی مشخص شده و فاصله ی آن با $L(t_0)$ بیان می شود. در زمان مشخص t_1 فاصله اولیه به $L'(t_1)$ تغییر و به نوعی کشیدگی پیدا می کند. نسبت این فاصله نسبت به فاصله قبلی، طبق تعریف، فاکتور کشیدگی² نامیده می شود. همین

محاسبه میانگین اطلاعات متقابل استفاده شده است (Jiang et al, 2010).

برای به دست آوردن بعد تعبیه نیز از روش نزدیک ترین همسایگان کاذب استفاده می شود (Kennel et al, 1992). جاذب های آشوبی فراکتالی اگر در فضای فاز m بعدی از یک سیستم ظاهر شوند، در بعد های پس از آن نیز ساختار خود را حفظ می کنند. در به دست آوردن بعد تعبیه بهینه سیستم، هدف به دست آوردن کمترین بعدی است که در آن ساختار جاذب فراکتالی وجود دارد. بر این اساس، اگر Y_i نقطه ای از جاذب بازسازی شده در فضای فاز m بعدی سیستم باشد و Y_i^{MN} نزدیکترین همسایه Y_i باشد، وضعیت رفتار این نقطه و همسایه اش در فضای فاز $m+1$ بعدی بررسی می شود. اگر Y_i^{MN} با افزایش بعد فضای فاز از Y_i دور شود، نشانه ای از یک نزدیک ترین همسایه کاذب از Y_i است که در این بازه از جاذب در بعد m ظاهر شده است. وقتی درصد این همسایگان کاذب در کل جاذب به صورتی مشخص کاهش یابد، ساختار هندسی جاذب آشوبی آشکار می شود.

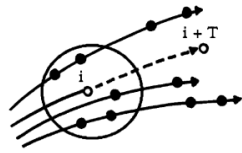
2-1- بُعد فراکتالی و حساسیت به شرایط اولیه: روش های بعد همبستگی و توان لیاپانوف

بعد فراکتالی و حساسیت به شرایط اولیه، از ویژگی های عمده یک سیستم آشوبناک هستند. در روش بعد همبستگی (Grassberger and Procaccia, 1983a)، بعد فراکتالی سیستم تخمین زده می شود تا رفتار آشوبناک سیستم شناسایی شود. به این منظور، ابتدا تابع همبستگی به صورت رابطه (4) تعریف می شود.

$$C(r) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{2}{N(N+1)} \sum_{i,j=1}^N H(r - |X_i - X_j|) \quad (4)$$

در این رابطه، r شعاع کره قرار گیرنده در X_1 ، نقطه ای از جاذب بازسازی شده در فضای فاز و X_j مختصات نقطه

1. Heaviside Function
2. Stretching Factor



شکل 1 روش تقریب محلی

اگر $T=1$ باشد، یعنی برای یک گام زمانی آینده پیش‌بینی انجام شود؛ پیش‌بینی x_{i+1} با توجه به چند جمله‌ای زیر صورت می‌گیرد:

$$x_{i+1} = A \cdot Y_1 \quad (8)$$

که در آن A و Y_1 به صورت رابطه (9) تعریف می‌شوند.

$$A = [a_0, a_1, a_2, \dots, a_m], \quad (9)$$

$$Y_1 = [1, x_i, x_{i-\tau}, \dots, x_{i-(m-1)\tau}]^T$$

ماتریس Y_1 اطلاعات مختصاتی نقطه شروع پیش‌بینی را در خود داشته و مقدار آن معلوم است. ماتریس ضرایب A با استفاده از تقریب‌های حاصل از k همسایه برای گام زمانی بعد محاسبه می‌شود. به این منظور، رابطه ماتریسی $Y_2 A = B_1$ را می‌توان تشکیل داد که در آن Y_2 ماتریسی $k \times 1$ است که به صورت زیر تقریب‌های حاصل از همسایه‌های x_k را شامل می‌شود:

$$Y_2 = [(x_1)_{i+1}, (x_2)_{i+1}, \dots, (x_k)_{i+1}]^T \quad (10)$$

و B_1 ماتریس ژاکوبین با ابعاد $k \times (m+d)!$ است که فرم کلی آن به صورت زیر است:

$$B_1 = \begin{bmatrix} 1 & x_{j_1} & x_{j_1-\tau} & \dots \\ 1 & x_{j_2} & x_{j_2-\tau} & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \\ 1 & x_{j_k} & x_{j_k-\tau} & \dots \\ x_{j_1-(m-1)\tau} & x_{j_1}^2 & \dots & x_{j_1-(m-1)\tau}^d \\ x_{j_2-(m-1)\tau} & x_{j_2}^2 & \dots & x_{j_2-(m-1)\tau}^d \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{j_k-(m-1)\tau} & x_{j_k}^2 & \dots & x_{j_k-(m-1)\tau}^d \end{bmatrix} \quad (11)$$

که در آن m بعد تعبیه و τ زمان تأخیر بوده و برای

روند محاسبه فاکتور کشیدگی برای نقاط دیگر جاذب در فضای فاز، به تعداد M بار، تکرار می‌شود و نمودار لگاریتم فاکتور کشیدگی در برابر تکرارها رسم می‌شود. طبق رابطه (5)، اگر شیب خط راست برازش داده شده به این نمودار به دست آید، توان لیاپانوف سیستم مشخص می‌شود. در این رابطه، فاصله‌ها در فضای فاز مدنظر است، بنابراین ابتدا لازم است تا فضای فاز برای سری زمانی مورد مطالعه، بازسازی شود. در نبود یک بعد تعبیه مشخص برای سیستم، بزرگترین توان لیاپانوف می‌تواند در چند بعد تعبیه مختلف از فضای فاز، محاسبه شده و از میانگین آنها به عنوان توان لیاپانوف دقیق‌تر سیستم می‌توان استفاده کرد (Rosenstein et al., 1993).

2-2- روش تقریب محلی

از روش تقریب محلی برای پیش‌بینی مبتنی بر فضای فاز استفاده می‌شود. یک فضای فاز بازسازی شده بهینه با بعد m این اجازه را در حالت کلی برای تفسیر دینامیک سیستم می‌دهد که نگاشتی m بعدی با نماد f_T برای زمان T در آینده به صورت رابطه (7) موجود باشد.

$$Y_{i+T} = f_T(Y_i) \quad (7)$$

برای به دست آوردن f_T راه‌های مختلفی وجود دارد که هر کدام معایب و مزایای خاص خود را دارند. در تقریب محلی، مطابق شکل 1، از روند دینامیکی سیستم در همسایه‌های نقطه شروع پیش‌بینی در زمان i ، (X_i) استفاده می‌شود. این همسایه‌ها را با $X_{i'}$ نشان داده و شرط $t' < t$ برقرار است. در شکل 1 که مربوط به فضای فاز سیستم است، این همسایه‌ها در ناحیه زمان i با نقاط توپر مشخص شده‌اند و نقطه توخالی بیان‌گر نقطه شروع پیش‌بینی است. سپس تعداد k همسایه با شرط کمینه شدن $\|X_{i'} - X_i\|$ انتخاب می‌شوند. نماد $\| \cdot \|$ در این تعریف فاصله اقلیدسی همسایه تا نقطه شروع پیش‌بینی در فضای فاز است.

کشکان 373,75 کیلومتر و مساحت حوضه آبریز آن معادل 9560 کیلومتر مربع است. در این تحقیق از سری زمانی دبی در ایستگاه پلدختر استفاده شده که مربوط به شش سال آبی متوالی می‌باشد و سری زمانی مربوطه در شکل 3 نشان داده شده است. در پژوهش حاضر با توجه به سیستم رودخانه‌ای و ویژگی‌های منطقه، نقش مواردی مانند برداشت آب از رودخانه، بر روی سری زمانی ناچیز فرض شده است.

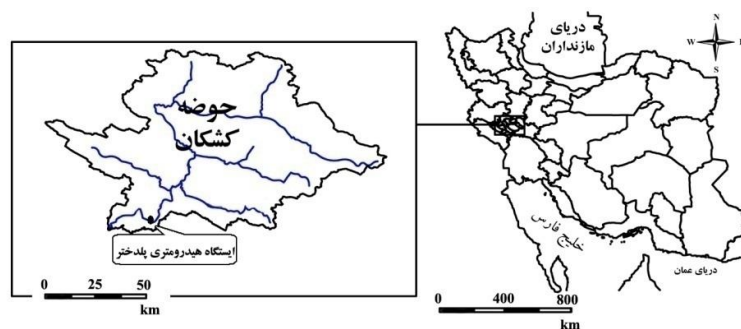
3- نتایج و بحث

در گام نخست، مطابق شکل 4، با استفاده از روش تخمین هسته گوسی، میزان نوفه در سری زمانی دبی روزانه رودخانه کشکان محاسبه شده است.

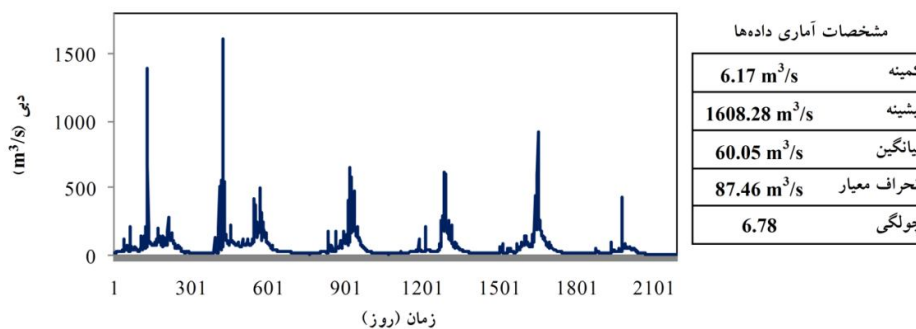
بازسازی فضای فاز سری زمانی x_t مورد استفاده قرار گرفته‌اند. k ، تعداد همسایه‌ها و d نیز درجه چندجمله‌ای است. در این تحقیق از چندجمله‌ای درجه یک استفاده شده و تعداد همسایه‌های به‌کار رفته در پیش‌بینی نیز از طریق سعی و خطا تعیین می‌شود (Meng and Peng, 2007).

2-3- مطالعه موردی و داده‌های مورد استفاده

منطقه مورد مطالعه مطابق شکل 2، حوضه رودخانه کشکان در استان لرستان می‌باشد. رودخانه کشکان به همراه رودخانه‌های سیمره، قره سو، گاماسیاب و چرداول سرشاخه‌های اصلی تشکیل دهنده رودخانه کرخه هستند. حوضه آبریز کشکان یکی از سرشاخه‌های مهم رودخانه کرخه محسوب می‌شود که در مجموع 22/4 درصد حوضه آبریز کرخه را تشکیل می‌دهد. طول رودخانه



شکل 2 موقعیت حوضه کشکان



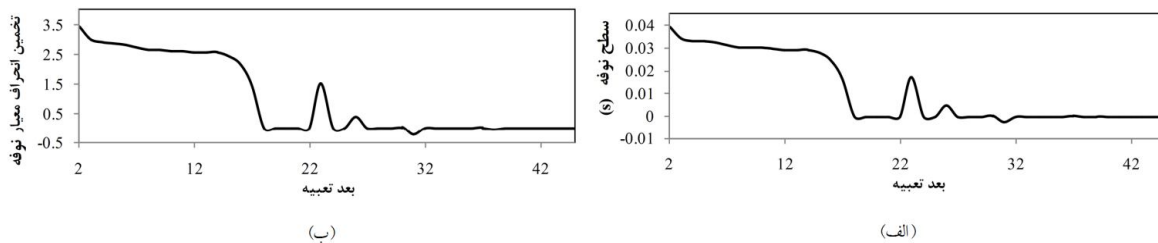
شکل 3 سری زمانی دبی روزانه رودخانه کشکان

کرد. در ادامه، تحلیل آماری اولیه داده‌ها با استفاده از توابع خودهمبستگی و خودهمبستگی جزئی صورت گرفته است.

این توابع در واقع، آزمونی برای تعیین سطح ایستایی در یک سری زمانی هستند. در بررسی تغییرات رفتار آماری در یک سری زمانی، یک هدف اساسی شناسایی نشانه‌هایی از تعیین‌پذیری در آن است. اگر سری زمانی در خود تعیین‌پذیری نداشته باشد؛ ارتباط متقابلی بین اجزای آن وجود نداشته و به تعبیری این اجزا مستقل از همدیگر اتفاق می‌افتند. چنین سری زمانی، تصادفی نامیده می‌شود. اما همان‌طور که در شکل 6 می‌توان ملاحظه کرد، روند نمودارهای خودهمبستگی و خود همبستگی جزئی در سری زمانی دبی روزانه رودخانه کشکان، چنین چیزی را نشان نمی‌دهد.

ملاحظه می‌شود که میزان نوفه با افزایش بُعد تعبیه به صفر نزدیک می‌شود و متعاقب آن، تخمین اولیه انحراف معیار نوفه در سری زمانی بسیار کوچک می‌شود. از طرفی، همان‌طور که در جدول 1 نشان داده شده است، در سطوح مختلف از تبدیل موجک گسسته، انحراف معیار محاسبه شده برای سری زمانی نوفه، بزرگ‌تر از تخمین اولیه (0/00002) به دست آمده است. بر این اساس، داده‌های سری زمانی دبی رودخانه کشکان دارای نوفه پایینی بوده و می‌توانند با اطمینان در تحلیل آشوبناکی استفاده شوند. این موضوع در سطح نخست از تبدیل موجک گسسته که در شکل 5 نشان داده شده است، نیز مشخص است.

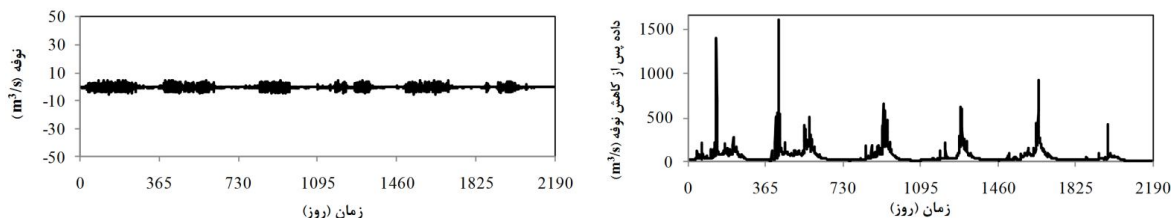
در این شکل، مشاهده می‌شود که میزان نوفه در مقایسه با مقادیر واقعی سری زمانی، ناچیز است و از این رو می‌توان در تحلیل مبتنی بر نظریه آشوب به این سری زمانی اعتماد



شکل 4 الف- تغییرات سطح نوفه سری زمانی در بُعدهای تعبیه مختلف و ب- انحراف معیار تخمین زده شده مطابق با آن

جدول 1 میزان انحراف معیار نوفه سری زمانی در سطوح مختلف با استفاده از تبدیل موجک گسسته

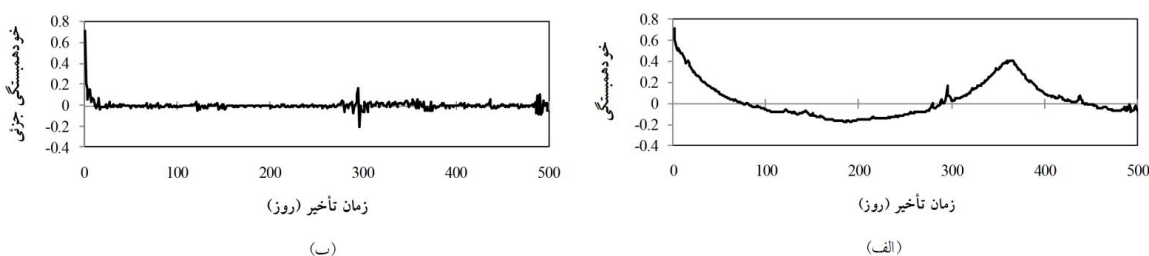
سطح حذف نوفه	1	2	3	4	5	6	7
انحراف معیار نوفه‌ها	2/566	1/525	2/028	2/03	2/467	2/566	2/62



ب- تغییرات مقادیر نوفه در طول مورد مطالعه

الف- سری زمانی پس از حذف نوفه

شکل 5 تجزیه سری زمانی در سطح نخست با استفاده از تبدیل موجک؛



شکل 6 الف - خودهمبستگی و ب - خودهمبستگی جزئی در سری زمانی دبی رودخانه کشکان با توجه به زمان‌های تأخیر مختلف

از روش‌های میانگین اطلاعات متقابل و نزدیک‌ترین همسایگان کاذب به دست می‌آیند. روش میانگین اطلاعات متقابل، سطح وابستگی بین داده‌ها را در نظر می‌گیرد و روش نزدیک‌ترین همسایگان کاذب، ساختار فراکتالی جاذب را مدنظر قرار می‌دهد.

متغیرهایی که در فضای فاز یک سیستم آشوبناک استفاده می‌شوند، بین استقلال کامل و وابستگی کامل نسبت به هم، حالتی بینابینی دارند. در بازسازی فضای فاز برای یک سیستم طبیعی برای تحلیل آشوبناکی آن، که از سری زمانی با زمان تأخیر τ به جای متغیرهای سیستم استفاده می‌شود؛ هدف رسیدن به چنین حالتی بین سری‌های زمانی $X(i)$ و $X(i+\tau)$ است. از طرفی، اگر تأخیر زمانی برای بازسازی فضای فاز، بزرگ انتخاب شود، ساختار فراکتالی جاذب سیستم محو می‌شود. بنابراین، اولین کمینه تابع اطلاعات متقابل می‌تواند این موارد را برآورده کند. روش‌هایی مانند تابع خودهمبستگی، استقلال خطی بین نقاط در سری زمانی را در نظر می‌گیرند، در حالی که روش میانگین اطلاعات متقابل، استقلال غیرخطی بین نقاط را منظور می‌کند و از این جهت در کاربرد برای سیستم‌های غیرخطی آشوبناک، مزیت دارد (Khatibi et al., 2012).

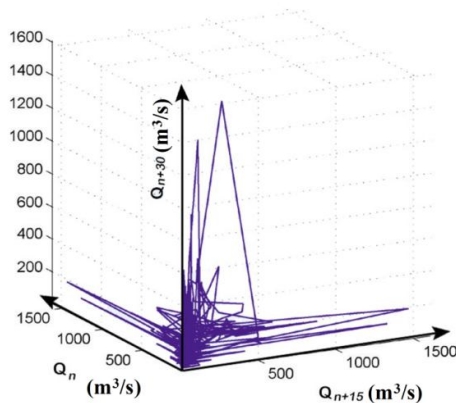
در این پژوهش، در کاربرد روش میانگین اطلاعات متقابل از تقسیم سری زمانی به 30 دسته با احتمال‌های برابر استفاده شده است که اولین کمینه آن مطابق شکل 7، برای سری زمانی دبی، 15 روز به دست آمده است و این

تابع خودهمبستگی، گرچه با نوسان‌های موضعی همراه است و این موضوع در نمودار خودهمبستگی جزئی قابل مشاهده است، ولی در حالت کلی تنابلی پیدا کرده است و نوعی تعیین‌پذیری را در سیستم حاکم بر جریان رودخانه کشکان نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که در مرز 365 روز، تناوب تابع خودهمبستگی تکرار شده و بنابراین سیکل هیدرولوژیک نهفته در سری زمانی دبی، خود را آشکار کرده است. همین موضوع در مورد خودهمبستگی جزئی بین داده‌های سری زمانی دبی نیز مشاهده می‌شود. در سیستم‌های با عملکرد اتفاقی، خودهمبستگی جزئی بین داده‌های سری زمانی با زمان تأخیرهای مختلف، به سمت صفر میل خواهد کرد. این در حالی است که نمودار خودهمبستگی جزئی در سری زمانی دبی روزانه رودخانه کشکان با افزایش زمان تأخیر، نوسان‌های زیادی از خود نشان می‌دهد و تغییرات جزئی زیادی در خودهمبستگی مشاهده می‌شود. از این رو، می‌توان گفت که سیستم حاکم بر جریان رودخانه کشکان، با این که در ظاهر و در قالب سری زمانی دبی روزانه، رفتاری پیچیده و تصادف‌گونه از خود نشان می‌دهد، می‌تواند از یک تعیین‌پذیری نهفته برای رفتار خود، بهره‌مند باشد. این تعیین‌پذیری در ادامه از دیدگاه نظریه آشوب بررسی شده است.

در تحلیل آشوبناکی سیستم‌های طبیعی، یکی از هدف‌های اساسی این است که در یک فضای فاز بهینه، بهترین نمایش آشوبی از سیستم ایجاد شود. پارامترهای مورد نیاز برای این منظور τ و m هستند که در این تحقیق به ترتیب

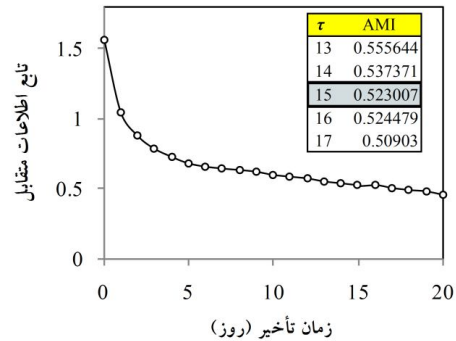
همان‌طور که در شکل 8 نیز پیداست، درصد همسایگان کاذب سیستم در بعدهای 2 و 3 کاهش داشته و سپس روند این کاهش، آهسته‌تر شده است. بنابراین، بعد تعبیه بهینه‌ای بین 3 تا 8 را می‌توان برای سری زمانی دبی انتظار داشت؛ زیرا در این ابعاد ثابت نسبی در ساختار هر جاذب دیده می‌شود.

به این ترتیب فضای فاز سیستم حاکم بر جریان رودخانه کشکان بر مبنای روش‌های نظریه آشوب به‌صورت بهینه، بازسازی می‌شود. در شکل 9، نمونه فضای فاز در سه بُعد رسم شده است. در فضای فاز، جاذب به‌عنوان مشخصه هندسی رفتار بلندمدت سیستم، برای تشخیص پیچیدگی در سیستم به‌کار می‌رود و اطلاعات کیفی مفیدی را در این زمینه ارائه می‌دهد. در نگاه اول ممکن است الگوی خاصی در روند سیستم در فضای فاز مشاهده نشود. از دیدگاه نظریه آشوب، می‌توان چنین برداشت کرد که بعد سیستم بالاتر از $m=3$ است و الگوی جاذب سیستم در فضای فاز با بعد تعبیه بالاتر خود را نشان خواهد داد. با این وجود و صرف‌نظر از این‌که چگونه تصویری از فضاهای فاز بالاتر از سه بعد نمایش داده شود، نباید نقش عوامل خارجی مانند خطای اندازه‌گیری داده‌ها را نادیده گرفت. این عوامل، در الگوی فراکتالی جاذب سیستم، آشفتگی ایجاد می‌کند و مانع از تشخیص روند دینامیکی سیستم به صورت قابل مشاهده بودن می‌شوند.

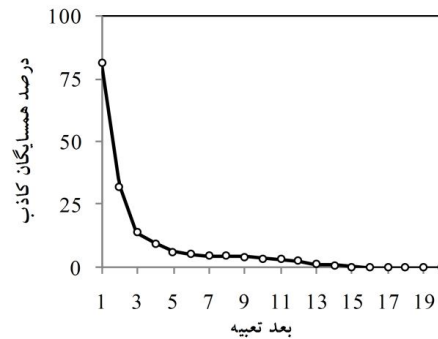


شکل 9 فضای فاز بازسازی شده برای سیستم حاکم بر جریان رودخانه کشکان

به معنای آن است که اگر سری زمانی با تأخیر 15 روز از سری زمانی اولیه تشکیل داده شود، می‌توان انتظار داشت که رفتار آشوبناک سیستم در قالب جاذب فراکتالی در یک فضای فاز که بر اساس این زمان تأخیر بازسازی می‌شود، خود را نشان دهد. همچنین، مطابق شکل 8، از روش نزدیک‌ترین همسایگان کاذب برای تعیین بعد تعبیه بهینه سیستم استفاده شده است. این روش، ثابت ساختار فراکتالی جاذب را مدنظر قرار می‌دهد. ساختار فراکتالی جاذب در سیستم‌های آشوبی، هرگاه در یک بُعد از فضای فاز ظاهر شود، در بُعدهای بعد از آن، وضعیت پایداری پیدا می‌کند. این وضعیت پایدار در کاهش قابل‌توجه درصد همسایگان کاذب و یا به صفر رسیدن آن‌ها، خود را نشان می‌دهد.



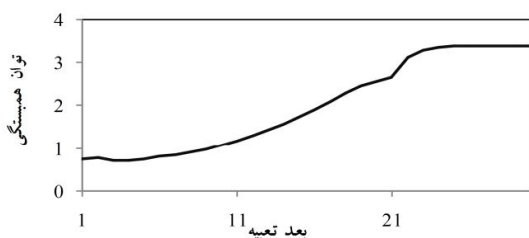
شکل 7 تابع اطلاعات متقابل در زمان‌های تأخیر مختلف در سری زمانی دبی رودخانه کشکان



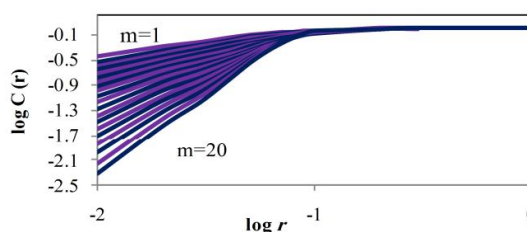
شکل 8 تغییرات درصد همسایگان کاذب در فضای فاز بازسازی شده با بُعدهای تعبیه مختلف

استفاده شده است. مشاهده می‌شود که در بُعدهای تعبیه بالاتر، شیب قسمت خطی این نمودارها به هم نزدیک می‌شوند. تغییرات این شیب و یا به عبارت دیگر، توان همبستگی در بُعدهای مختلف در شکل 10- ب به تصویر کشیده شده است که در آن بعد همبستگی 3/38 برای سیستم به دست آمده است. این بعد همبستگی، نشانه‌ای از آشوب تعین‌پذیر در سیستم حاکم بر جریان رودخانه کشکان است. در ادامه، حساسیت به شرایط اولیه سیستم با استفاده از روش توان لیاپانوف آزموده شده است. با توجه به عدم قطعیت موجود برای تعیین بعد تعبیه بهینه سیستم، از چند بعد تعبیه مختلف برای به دست آوردن توان لیاپانوف دقیق‌تر استفاده شده است. بر این اساس برای سری زمانی دبی روزانه رودخانه کشکان، مطابق شکل 11، در بُعدهای بین 2 تا 5، مسیرهای جاذب سیستم بررسی و میانگین فاکتور کشیدگی محاسبه شده است.

بر این اساس، از فضای فاز بازسازی‌شده سیستم برای مدل‌سازی سیستم حاکم بر جریان رودخانه کشکان بر مبنای نظریه آشوب استفاده شده است. تخمین بعد فراکتالی جاذب به صورت مستقیم، با استفاده از روش بعد همبستگی انجام شده است. روش بعد همبستگی یکی از روش‌های مهم در شناسایی آشوب محسوب می‌شود. در صورت وجود چنین بعدی می‌توان نتیجه گرفت که سیستم دارای یک جاذب فراکتالی و در نتیجه آشوبناک است. بدین منظور، ابتدا نمودار انتگرال همبستگی در برابر شعاع‌های r ، برای بُعدهای 1 تا 20 به صورت لگاریتمی مطابق شکل 10- الف رسم شده و سپس تغییرات شیب قسمت خطی انتگرال همبستگی همراه با افزایش بعد تعبیه بررسی می‌شود. برای بازسازی فضای فاز در محاسبه انتگرال همبستگی از زمان تأخیر به دست آمده از روش میانگین اطلاعات متقابل (15 روز)

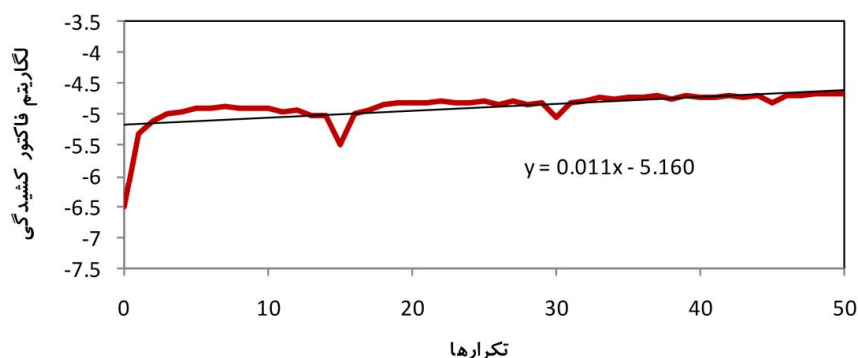


ب- تغییرات توان همبستگی در پی افزایش بُعد تعبیه



الف- تغییرات انتگرال همبستگی در بُعدهای تعبیه مختلف با توجه به اندازه شعاع r در فضای فاز

شکل 10 استفاده از روش بعد همبستگی برای سری زمانی دبی روزانه رودخانه کشکان



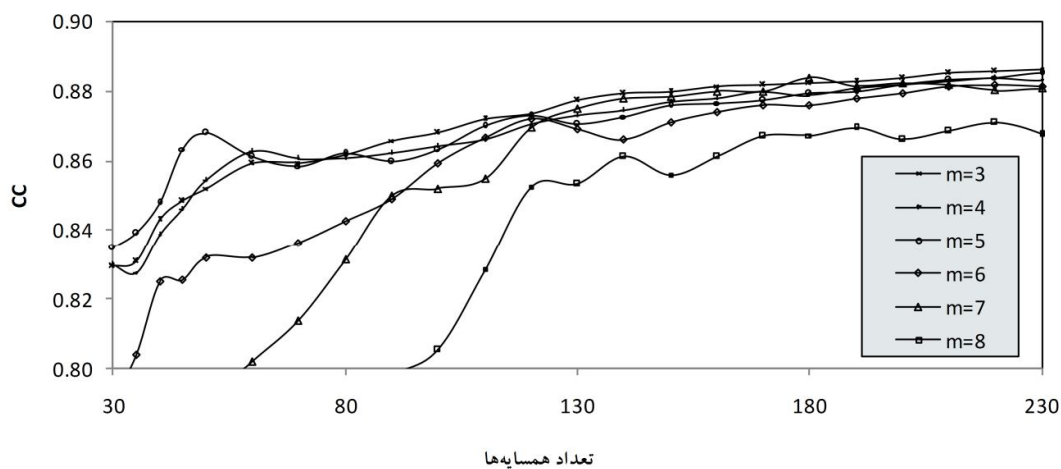
شکل 11 محاسبه توان لیاپانوف با توجه به فاکتور کشیدگی برای سری زمانی دبی

که برای رسیدن به حداکثر دقت پیش‌بینی لازم است؛ این نتایج ارزیابی شوند باید به بُعد کمتر فضای فاز و تعداد کمتر همسایه‌های مورد استفاده به‌عنوان یک مزیت نگاه کرد. از این‌رو، در شکل 12، نمودار ضریب همبستگی نشان می‌دهد که در فضای فاز با بعد تعبیه $m=3$ ، دقت پیش‌بینی زودتر از همه به حداکثر خود نزدیک می‌شود. بر این اساس، تعداد همسایگان مورد نیاز برای یک تقریب بهینه محلی بین 130 تا 180 همسایه تشخیص داده می‌شود.

در بررسی بیشتر نتایج پیش‌بینی بر اساس تعداد همسایگان، تعداد 158 همسایه به‌عنوان تعداد بهینه همسایه مورد نیاز برای تقریب محلی به‌دست آمد. بنابراین در فضای فاز سه‌بعدی و بهره‌گیری از اطلاعات مختصاتی 158 همسایه در آن، با کمترین حجم محاسبات ممکن و به‌صورت بهینه، می‌توان به حداکثر دقت پیش‌بینی رسید. دقت این پیش‌بینی به‌صورت ضریب همبستگی (CC) برابر 0/88، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) برابر 33/14 و میانگین خطای نسبی (ARE) برابر 0/12 ارزیابی شد که دقت بالای مدل‌سازی بر مبنای نظریه آشوب را می‌رساند.

با توجه به شیب خط برازش داده شده بر این نمودار، توان لیاپانوف 0/011 به‌دست آمده است. توان لیاپانوف مثبت محاسبه شده، نشانه‌ای از حساسیت به شرایط اولیه و وجود رفتار آشوبناک در سری زمانی دبی است. سطح تعیین‌پذیری و قابلیت پیش‌بینی سری زمانی دبی در ادامه با استفاده از مدل پیش‌بینی تقریب محلی، بیشتر مورد بررسی قرار گرفته است.

در نظریه آشوب، بر اساس فضای فاز بازسازی شده برای سیستم، مدل پیش‌بینی ارائه می‌شود. در این تحقیق، پیش‌بینی با استفاده از روش تقریب محلی در فضای فاز انجام شده است. بر این اساس، از بین شش سال داده سری زمانی دبی، دو سال آخر (730 داده از مجموع 2191 داده) برای آزمون مدل پیش‌بینی رواناب بر اساس نظریه آشوب استفاده شده است. به‌علت عدم قطعیتی که در بازسازی فضای فاز بهینه برای این سری زمانی وجود دارد؛ روش تقریب محلی در بعدهای تعبیه بین 3 تا 8 اعمال شده و با استفاده از ضریب همبستگی (CC)، مطابق شکل 12، دقت پیش‌بینی در بعدهای تعبیه مختلف بررسی شد. همان‌گونه در این شکل پیداست، دقت پیش‌بینی در بعدهای مختلف با افزایش تعداد همسایگان در روش تقریب محلی افزایش می‌یابد. اگر از نظر حجم محاسباتی



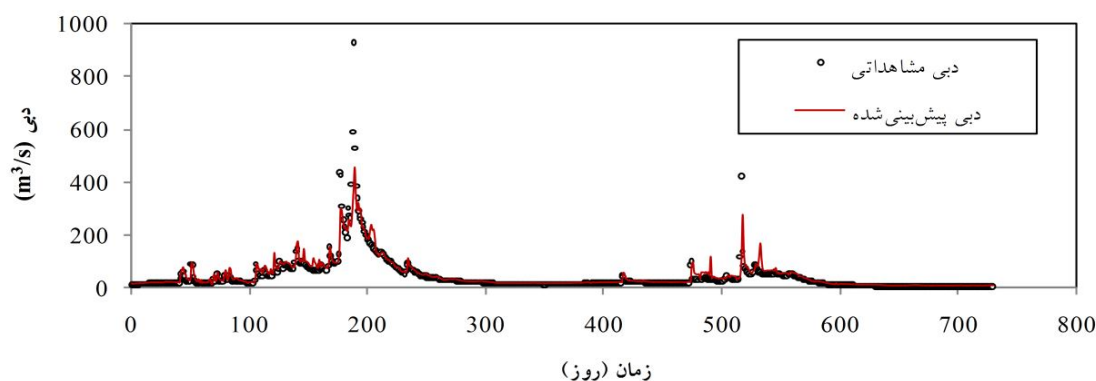
شکل 12 دقت‌های پیش‌بینی در بعدهای تعبیه مختلف برای سری‌های زمانی دبی

ایستگاه باران‌سنج حوضه، مجموع بارش پنج روز پیش و رواناب یک و دو روز پیش) استفاده کرده است؛ لذا پیچیدگی بیشتری داشته و شاید در مقام مقایسه، انتظار این باشد که نتایج بهتری ارائه کند. در شکل 14، نمودار مقایسه دبی مشاهداتی در برابر دبی پیش‌بینی شده از هر دو روش تقریب محلی مبتنی بر نظریه آشوب و برنامه‌سازی ژنتیک نشان داده شده است.

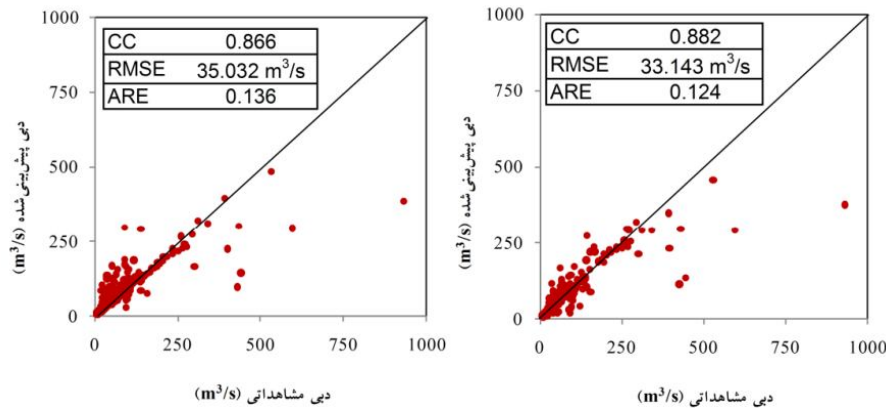
همان‌طور که ملاحظه می‌شود، کیفیت پیش‌بینی نسبتاً بهتری در تقریب موضعی مبتنی بر نظریه آشوب به دست آمده است. بر این اساس، کارایی بهتر روش تقریب محلی مبتنی بر نظریه آشوب بیش از پیش، مشخص می‌شود. در عین حال، روش برنامه‌سازی ژنتیک از متغیرهای زیادی مانند بارش در ایستگاه‌های مختلف حوضه استفاده کرده است و این در حالی است که در روش تقریب محلی تنها یک متغیر از حوضه استفاده شده و آن هم سری زمانی رواناب بوده است و از این جهت نسبت به روش برنامه‌سازی ژنتیک، برتری دارد. از طرف دیگر، همچنان که در شکل 15 نیز می‌توان دید، با این که توزیع خطای مطلق پیش‌بینی برای روش تقریب محلی نوسان‌های کمتری دارد، ولی در هر دو روش، مقادیر پیش‌بینی از دبی‌های اوج، فاصله نسبی بیشتری دارند.

این پیش‌بینی که از دو سال آخر سری زمانی به‌عنوان داده آزمون استفاده کرده، در شکل 13 به‌تصویر کشیده شده است. این شکل نشان‌دهنده توانایی بالای مدل پیش‌بینی بر مبنای نظریه آشوب در پیش‌بینی جریان رودخانه، به‌ویژه دبی‌های پایین رودخانه است. در حالی که این توانایی در مورد دبی‌های اوج به‌طور نسبی کاهش می‌یابد که با توجه به داده‌های نسبتاً کم و کم بودن دبی‌های اوج در داده‌های مورد استفاده، این امر منطقی به‌نظر می‌رسد و انتظار می‌رود با به‌خدمت گرفتن داده‌های بیشتر، نتایج بهتری به‌دست آید.

در ادامه، مقایسه‌ای میان نتایج این پژوهش با نتایج تحقیق والی‌پور و ذاکر مشفق (والی‌پور و ذاکر مشفق، 1392-الف) انجام گرفته است. در تحقیق ذاکر مشفق و والی‌پور، با رویکرد برنامه‌سازی ژنتیک، فرایند بارش-رواناب حوضه کشکان شبیه‌سازی شده و بر مبنای آن دبی رودخانه کشکان پیش‌بینی شده است. دوره آزمون مدل نیز مشابه تحقیق کنونی 2 سال آخر دوره شش ساله سری زمانی بوده است. برنامه‌سازی ژنتیک با الگوبرداری از نظریه تکامل تدریجی داروین به دنبال یافتن رابطه‌ای بهینه برای ایجاد بهترین نگاشت غیرخطی میان دو فضای ورودی و خروجی است. ذکر این نکته ضروری است که روش پیشنهادی در مقاله حاضر، فقط از یک متغیر ورودی (رواناب روز پیش) بهره می‌برد، ولی روش برنامه‌سازی ژنتیک از 16 متغیر ورودی (شامل بارندگی روزانه در 13



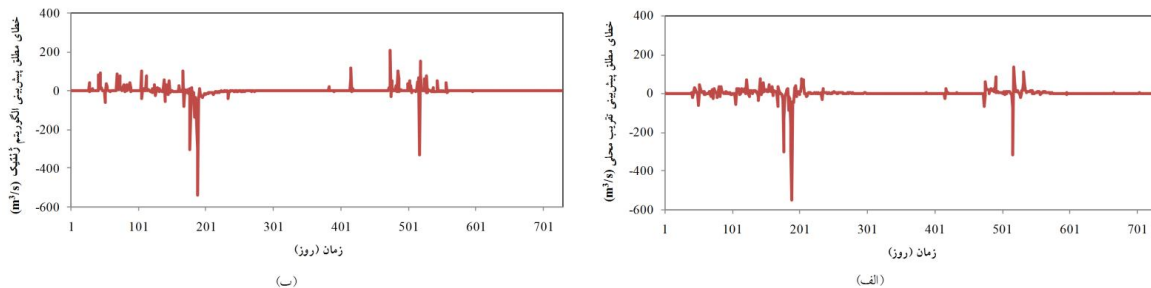
شکل 13 سری زمانی دبی پیش‌بینی شده و مشاهداتی در روش تقریب موضعی



ب- روش برنامه‌سازی ژنتیک

الف- تقریب موضعی مبتنی بر نظریه آشوب

شکل 14 مقایسه دبی مشاهداتی و پیش‌بینی شده



شکل 15 توزیع خطای مطلق پیش‌بینی در روش‌های الف- تقریب محلی مبتنی بر نظریه آشوب و ب- روش برنامه‌سازی ژنتیک

4- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، ابتدا سطح نوفه داده‌های سری زمانی دبی روزانه رودخانه کشکان به کمک روش تخمین هسته گوسی ارزیابی شد و پایین بودن میزان نوفه در سری زمانی مشاهده شد. سپس رفتار آماری داده‌ها با استفاده از توابع خودهمبستگی و خودهمبستگی جزئی بررسی شد که نشان‌دهنده نوعی تعین‌پذیری در سری زمانی دبی رودخانه کشکان بود. بر این اساس، رفتار هیدرولوژیک حوضه رودخانه کشکان با توجه به سری زمانی دبی روزانه آن از دیدگاه نظریه آشوب مورد بررسی قرار گرفت. فضای فاز برای سری زمانی دبی بازسازی شد و سپس بعد فراکتالی جاذب و حساسیت به شرایط اولیه سیستم مورد بررسی قرار گرفتند. برای بازسازی فضای

در مجموع، پیش‌بینی نسبتاً خوب انجام شده بر مبنای نظریه آشوب، کارایی این روش را برای سری زمانی دبی رودخانه کشکان نشان می‌دهد. در حالی که در مرحله شناسایی رفتار آشوبناک، جاذب فراکتالی در فضای فاز بازسازی شده، تشخیص داده شد و بعد فراکتالی آن در روش بعد همبستگی 3/38 به دست آمد، توان لیاپانوف مثبت، حساسیت به شرایط به اولیه را نیز در سیستم نشان داد.

این نتیجه مکمل تحلیل مبتنی بر نظریه آشوب است که در این تحقیق صورت گرفته و به این ترتیب، نظریه آشوب و روش‌های مبتنی بر آن، می‌توانند ابزاری مناسب برای تحلیل و پیش‌بینی جریان رودخانه در حوضه آبریز کشکان باشند.

P	احتمال
x	نقطه سری زمانی
Y	نقطه فضای فاز
λ_l	توان لیاپانوف
τ	زمان تأخیر

7- منابع

انیس حسینی م. و ذاکرمشفق، م. (1391). "تحلیل آشوبناکی سری زمانی دبی رودخانه با روش توان لیاپانوف"، نهمین سمینار بین‌المللی مهندسی رودخانه، دانشگاه شهید چمران، اهواز، ایران.

انیس حسینی م.، و ذاکرمشفق، م. (1392- الف). "کاربرد نظریه آشوب در تحلیل فرایند بارش - رواناب"، هفتمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه زاهدان، زاهدان، ایران.

انیس حسینی م.، و ذاکرمشفق، م. (1392- ب). "آیا سری زمانی جریان رودخانه آشوبناک است؟ (مطالعه موردی: رودخانه کشکان)", دوازدهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، تهران، ایران.

ذاکرمشفق، م. و والی‌پور، م. (1391). "پیش‌بینی جریان رودخانه با رویکرد برنامه‌سازی ژنتیک"، یازدهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران.

زارع اندلانی، س. و ذاکرمشفق، م. (1391). "رویکرد درخت‌تصمیم در پیش‌بینی جریان رودخانه: مطالعه موردی رودخانه کشکان"، یازدهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران.

صحرايي، ش. و ذاکرمشفق، م. (1392). "پیش‌بینی دبی رودخانه با استفاده از ماشین بردار پشتیبان (مطالعه موردی)", هفتمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه زاهدان، زاهدان، ایران.

قاهری، ع.، قربانی، م.، دل‌افروز، ه. و ملکانی، ل. (1391). "ارزیابی جریان رودخانه با استفاده از نظریه آشوب"، مجله پژوهش آب ایران، سال ششم، شماره دهم، ص.ص. 177-186.

فاز، روش میانگین اطلاعات متقابل، زمان تأخیر 15 روز را به‌عنوان بعد بهینه سیستم معرفی کرد و روش نزدیک‌ترین همسایگان کاذب نیز بعد تعبیه‌ای بین 3 تا 8 را برای بازسازی فضای فاز بهینه متصور شد. به این ترتیب، کاهش درصد همسایگان کاذب در اثر افزایش بعد تعبیه، وجود جاذب فراکتالی را تأیید کرد و در روش بعد همبستگی، بعد این جاذب، 3/38 به‌دست آمد. در کنار این نتایج، در آزمون حساسیت به شرایط اولیه، توان لیاپانوف مثبت برابر با 0/011 نیز محاسبه شد تا شواهد رفتار آشوبناک در سری زمانی دبی رودخانه کشکان کامل شود. با توجه به این شرایط، مدل پیش‌بینی بر اساس روش تقریب محلی در فضای فاز 3 تا 8 بعدی اعمال شد که فضای فاز سه بعدی نتایج بهتری نسبت به دیگر بعدها تعبیه نشان داد. این پیش‌بینی با استفاده از اطلاعات 158 همسایه در فضای فاز و با ضریب همبستگی 0/88، جذر میانگین مربعات خطای 33/14 متر مکعب بر ثانیه و میانگین خطای نسبی 0/12 (12 درصد) به‌دست آمد. بنابراین، کاربرد روش‌های نظریه آشوب، چه در مرحله بازسازی فضای فاز بهینه و چه در مرحله پیش‌بینی، کارآیی مناسبی را در مورد جریان رودخانه کشکان نشان می‌دهد. انتظار می‌رود که با استفاده از سری زمانی طولانی‌تر، نتایج و دقت پیش‌بینی بهبود یابد و تحقیقات آتی می‌تواند در این مسیر حرکت کند.

5- فهرست علائم

a	ضریب
f_i	تابع پیش‌بینی
I	اطلاعات متقابل
i, j	شمارنده نقاط
k	تعداد همسایه
L	فاصله در فضای فاز
m	بعد تعبیه
N	تعداد نقاط

- Jiang, A. H., Huang, X. C., Zhang, Z. H., Li, J., Zhang, Z. Y. and Hua, H. X. (2010). "Mutual information algorithms", *Mech. Syst. Signal Process*, 24, pp. 2947-2960.
- Kennel M. B., Brown R., and Abarbanel H. D. I. (1992). "Determining embedding dimension for phase-space reconstruction using a geometrical construction", *Phys. Rev. A* 45, pp. 3403-3411.
- Khatibi R., Sivakumar B., Ghorbani M.A., Kisi O., Kocak K. and Farsadizadeh D. (2012). "Investigating chaos in river stage and discharge time series", *J. Hydrol* 414-415, pp. 108-117.
- Krasovskaia I., Gottschalk L. and Kundzewicz Z.W. (1999). "Dimensionality of Scandinavian river flow regimes", *Hydrol. Sci. J.*, 44(5), pp. 705-23.
- Liu Q., Islam S., Rodriguez-Iturbe I. and Le Y. (1998). "Phase-space analysis of daily streamflow: characterization and prediction", *Adv Water Resource*, 21, pp. 463-75.
- Lorenz, E. N. (1993). *The essence of chaos*, University of Washington Press, Seattle
- Meng, Q. and Peng, Y. (2007). "A new local linear prediction model for chaotic time series", *Phys. Lett. A* 370, pp. 465-470.
- Pasternack GB. (1999). "Does the river run wild? Assessing chaos in hydrological systems", *Adv. Water Resour.*, 23(3), pp. 253-60.
- Pasternack GB. (2001). "Reply to Comment on _Does river run wild? Assessing chaos in hydrological systems", by Pasternack, *Adv. Water Resource*, 24(5), pp. 578-80.
- Porporato A. and Ridolfi L. (1996). "Clues to the existence of deterministic chaos in river flow", *Int. J. Mod. Phys. B*, 10, pp. 1821-62.
- Rosenstein M. T., Collins., J. J. and De Luca C. J. (1993). "A practical method for calculating largest Lyapunov exponents from small data sets", *Physica D*. 65, p. 117.
- Sivakumar B. (2004). "Chaos theory in geophysics: past, present and future", *Chaos Soliton Fractal*. 19, pp. 441-462.
- Sivakumar B. (2009). "Nonlinear dynamics and chaos in hydrologic systems: latest developments and a look forward", *Stoch. Environ. Res. Risk Assess.*, 23, pp. 1027-1036.
- Takens, F., Rand, D.A. and Young, L.S. (1981). "Detecting strange attractors in turbulence", In: (Eds.), *Dynamical Systems and Turbulence*, Lecture Notes in Mathematics, 898, pp. 366-381.
- مرادی‌زاده کرمانی، ف.، قربانی، م.، دین‌پژوه، ی. و فرسادی‌زاده، د. (1391). "مدل تخمین جریان رودخانه بر اساس بازسازی فضای حالت آشوبی"، نشریه دانش آب و خاک، جلد 22، شماره 4.
- والی‌پور، م. و ذاکر مشفق، م. (1392- الف). "کاربرد برنامه‌سازی ژنتیک در شبیه‌سازی فرایند بارش- رواناب"، هفتمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه زاهدان، زاهدان، ایران.
- والی‌پور، م. و ذاکر مشفق، م. (1392- ب). "مقایسه روش‌های هوشمند برنامه‌سازی ژنتیک و درخت تصمیم در تحلیل و پیش‌بینی جریان رودخانه کشکان"، دوازدهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، تهران، ایران.
- Box, G.E.P., Jenkins, G.M., and Reinsel, G.C. (1994). *Time series analysis: forecasting and control*, Prentice-Hall, Third Edition, New Jersey, USA
- Farmer, J.D. and Sidorwich, J.J. (1987). "Predicting chaotic time series", *Phys. Rev. Lett.* 59, pp. 845-848.
- Fattahi, M. H., Talebbidokhti, N., Moradkhani, H. and Nikooee, E. (2013). "Revealing the chaotic nature of river flow", *IJST, Transactions of Civil Engineering*, Vol. 37, No. C+, pp. 437-456.
- Frazer A. M. and Swinney H. L. (1986). "Independent coordinates for strange attractors from mutual information", *Phys Rev A* 1986; 33(2), pp. 1134-40.
- Ghorbani M.A., Jabbari Khamnei H., Asadi H. and Yousefi P. (2012). "Application of chaos theory and genetic programming in runoff time series", *International Journal of Structural and Civil Engineering*. Volume 1, Issue 2, pp. 26-34.
- Hense, A. (1987). "On the possible existence of a strange attractor for the southern oscillation", *Beitr. Phys. Atmos.* 60 (1), pp. 34-47.
- Islam M.N. and Sivakumar B. (2002). "Characterization and prediction of runoff dynamics: a nonlinear dynamical view", *Adv. Water Resource*, 25, pp. 179-190.
- Jayawardena AW and Lai F (1994). "Analysis and prediction of chaos in rainfall and stream flow time series", *J. Hydrol*; 153, pp. 23-52.

Williams G. P. (1997). *Chaos theory tamed*, Joseph Henry Press, Washington, D.C, USA

Wolf, A., Swift, J.B., Swinney, H.L. and Vastano, A. (1985) "Determining Lyapunov exponents from a time series", *Physica D*, 16, pp. 285-317.

Yu, D., Small, M., Harrison, R.G. and Diks, C. (2000). "Efficient implementation in estimating invariance and noise level from time series data", *Phys. Rev. E*, Vol. 61, No. 4, pp. 3750-3756.

Wang Q. and Gan T.Y. (1998). "Biases of correlation dimension estimates of streamflow data in the Canadian prairies", *Water Resour. Res.*, 34 (9), pp. 2329-39.

Wilcox B.P., Seyfried M.S., Blackburn W.H. and Matison T.H. (1990). "Chaotic characteristics of snowmelt runoff: a preliminary study", In: *Symposium on Watershed Management*. Durango, CO: American Society of Civil Engineering.