مجله علمی – پژوهشی
عمران مدرس
دوره پانزدهم، شماره سه، پاییز ۱۳۹٤

مقایسه مدل‌های محلی آشوبناک مبتنی بر فضای فاز در پیش‌بینی جریان رودخانه

مسعود انیس‌حسینی[۱]، محمد ذاکرمشفق[۲*]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی جندی‌شاپور دزفول

۲- استادیار مهندسی عمران-آب، دانشگاه صنعتی جندی‌شاپور دزفول

moshfegh@jsu.ac.ir

تاریخ دریافت: [۱۳۹۲/۱۲/۲۷] **تاریخ پذیرش:** [۱۳۹۳/۹/۲۰]

چکیده- از دیدگاه نظریه آشوب، طبیعت پیچیده و رفتار تصادف‌گونه یک سامانه مانند سامانه هیدرولوژیک حاکم بر جریان یک رودخانه می‌تواند از یک تعیّن‌پذیری ساده و پنهان باشد. این تعیّن‌پذیری، در صورت وجود، در فضای فاز سامانه قابل‌مشاهده است و بر مبنای همین الگوی شکل گرفته در فضای فاز، می‌توان مدل‌های مختلف را به کار برد و رفتار سامانه را در آینده پیش‌بینی کرد. بر این اساس، ابتدا رفتار آشوبناک در سری زمانی دبی روزانه رودخانه کشکان ارزیابی شده و برای ارزیابی میزان آشوبناکی سامانه، روش‌های نزدیک‌ترین همسایگان کاذب و توان لیاپانوف مورد استفاده قرار گرفته‌اند. برای تعیین زمان تأخیر بهینه برای بازسازی فضای فاز به روش تأخیرها نیز از روش میانگین اطلاعات متقابل استفاده شده است. در این پژوهش، استفاده از اولین کمینه سراسری تابع اطلاعات متقابل برای انتخاب زمان تأخیر بهینه پیشنهاد شده است. پس از مشاهده نشانه‌های رفتار آشوبناک، مدل‌های مختلف محلی بر اساس الگوی جاذب در فضای فاز اعمال شد و نتایج آن‌ها با یکدیگر مقایسه شد. روش‌های تقریب محلی شامل روش میانگین و چندجمله‌ای از جمله روش‌هایی بودند که در این پژوهش به‌کار گرفته شدند. همچنین در رویکردی جدید، از شبکه عصبی مصنوعی در یک مدل پیوندی برای مدل‌سازی محلی مبتنی بر فضای فاز استفاده شده است. نتایج این روش‌ها، در مجموع، کیفیت مناسب مدل‌سازی محلی مبتنی بر فضای فاز سامانه آشوبناک حاکم بر جریان رودخانه کشکان را نشان می‌دهد.

واژگان کلیدی- نظریه آشوب، فضای فاز، مدل‌های محلی، شبکه‌های عصبی مصنوعی، رودخانه کشکان.

۱- مقدمه

سامانه‌های هیدرولوژیک، مانند سامانه ی حاکم بر جریان یک رودخانه، معمولاً رفتاری پیچیده و تصادفی از خود نشان می‌دهند و سری زمانی رواناب رودخانه با تغییرات گسترده و ناگهانی همراه است. بنابراین تشخیص روش مناسب برای پیش‌بینی بهتر این‌گونه رفتارها، همواره یکی از مسائل پیش روی پژوهشگران در زمینه مهندسی آب و هیدرولوژی است. در دهه‌های گذشته، استفاده از روش‌های داده‌محور هوش مصنوعی به منظور تعیین رفتار سامانه‌های هیدرولوژیک در آینده، توجه بسیاری را به خود جلب نموده است. نظریه آشوب نیز که در مبانی خود با سامانه‌های پیچیده سر و کار دارد، می‌تواند برای چنین سامانه‌هایی مفید واقع شود. در نظریه آشوب، سامانه ی با پیچیدگی زیاد و رفتار تصادف‌گونه، می‌تواند از یک تعیّن‌پذیری ساده ناشی شده باشد که در پسِ پویایی سامانه پنهان است. رفتار آشوبناک، دارای دو ویژگی عمده با عنوان‌های جاذب فراکتالی در فضای فاز و حساسیت به شرایط اولیه است، که برای مدل‌سازی یک سامانه بر مبنای نظریه آشوب، باید ارزیابی و مشاهده شود.

کاربرد مفاهیم نظریه آشوب در سامانه‌های هیدرولوژیک، با پژوهش هنس در سال ۱۹۸۷ آغاز شد. در این پژوهش، هنس رفتار آشوبناک و تعیّن‌پذیر را در سری زمانی بارش مشاهده کرد [۱]. رفتار آشوبناک در سری زمانی رواناب، ابتدا به وسیله‌ی ویلکوکس و همکاران برای دبی ذوب برف حوضه‌ای در آمریکا بررسی شد و نشانه‌های این رفتار در سری زمانی مشاهده نشد [۲]. با این که عدم مشاهده رفتار آشوبناک در سری زمانی دبی رودخانه در مطالعات پژوهشگران دیگری چون پاسترناک نیز ادامه یافت [۴،۳]؛ امّا در همین حال، پژوهشگران دیگر توانستند رفتار آشوبناک را در این نوع سری زمانی مشاهده کنند [۷،۶،۵]. در یکی از این پژوهش‌ها، قربانی و همکاران، سری زمانی دبی روزانه رودخانه کیزیلیرماک در ترکیه را از دیدگاه نظریه آشوب مورد بررسی قرار دادند. نتایج این مطالعه نشان‌دهنده رفتار آشوبناک در سامانه حاکم بر جریان رودخانه بود [۸]. بنابراین نتایج این مطالعات، لزوم استفاده از روش‌های مختلف برای مدل‌سازی مبتنی بر فضای فاز سری زمانی رودخانه را در پژوهش‌های آتی آشکار می‌سازد.

در رابطه با حوضه کشکان که پژوهش حاضر در آن انجام گرفته، اندک پژوهشی می‌توان یافت که با استفاده از روش‌های تحلیل غیرخطی به بررسی سامانه جریان رودخانه در این حوضه پرداخته باشد. در زمینه استفاده از مبانی نظریه آشوب برای تحلیل غیرخطی سری زمانی دبی رودخانه کشکان، انیس‌حسینی و ذاکرمشفق به‌روش توان لیاپانوف، این سری زمانی را مورد مطالعه قرار داده‌اند [۹]. از آن‌جایی که روش توان لیاپانوف برای یک سری زمانی تصادفی نیز ممکن است نتیجه دهد [۱۰]، راه مناسب‌تر آن است که از معیارهای شناسایی رفتار آشوبناک بیشتری استفاده شود. بر این اساس، انیس‌حسینی و ذاکرمشفق شرایط یک سامانه آشوبناک از جمله جاذب فراکتالی و حساسیت به شرایط اولیه را در یک دوره ٦ ساله از سری زمانی دبی رودخانه کشکان مشاهده کردند [۱۱،۱۲]. همچنین این موضوع با استفاده از یک سری زمانی طولانی‌تر نیز مشاهده شده است [۱۳]. از این‌رو شرایط برای پیش‌بینی رفتار سامانه جریان رودخانه در این حوضه با استفاده از روش‌های نظریه آشوب، مناسب تلقی شده است [۱٤].

بر این اساس، ابتدا به کمک روش میانگین اطلاعات متقابل[1]، زمان تأخیر بهینه برای بازسازی فضای فاز سری زمانی دبی رودخانه کشکان محاسبه شده و در رویکردی جدید، به‌منظور ایجاد شرایط بهتر برای جاذب در فضای فاز، از کمینه سراسری تابع اطلاعات متقابل[2] برای انتخاب زمان تأخیر بهینه استفاده شده است. سپس به‌ترتیب ویژگی‌های رفتار آشوبناک، شامل جاذب فراکتالی و حساسیت به شرایط اولیه با استفاده از روش‌های نزدیک‌ترین همسایگان کاذب[3] و توان لیاپانوف[4] بررسی شده است. پس از مشاهده رفتار آشوبناک در این سری زمانی، روش‌های مختلف مدل‌سازی محلی مبتنی بر الگوی جاذب در فضای فاز مورد استفاده قرار گرفته‌اند

به شکل کلی از دو روش محلی[5] و سراسری[6] می‌توان برای مدل‌سازی جاذب سامانه‌های آشوبناک طبیعی استفاده کرد که در این میان، روش‌های محلی به‌دلیل انعطاف‌پذیری متناسب با هر ناحیه از فضای فاز، کاربرد بیشتری پیدا کرده‌اند [۱۷،۱۵،۱٦]. روش‌های تقریب میانگین و چند جمله‌ای، از جمله روش‌هایی بوده‌اند که در این پژوهش به‌کار گرفته شده‌اند. همچنین، به عنوان رویکردی جدید از شبکه عصبی مصنوعی در یک رویکرد پیوندی[7] برای مدل‌سازی محلی مبتنی بر فضای فاز استفاده شده است.

۲- مواد و روش‌ها

دو ویژگی عمده سیستم‌های آشوبناک، حساسیت به شرایط اولیه و الگوهای فراکتالی جاذب است که هر دو در فضای فاز قابل‌شناسایی است. بازسازی این فضای فاز برای سیستم‌های طبیعی با داده‌های یک سری زمانی به کمک دو پارامتر زمان تأخیر و بعد تعبیه صورت می‌گیرد که باید به شکل بهینه‌ای برای نمایش رفتار آشوبناک سیستم انتخاب شود. در این پژوهش، از روش میانگین اطلاعات متقابل برای تعیین زمان

1 Average Mutual Information Method
2 Mutual Information Function
3 False nearest neighbors method
4 Lyapunov Exponent Method
5 Local Method
6 Global Method
7 Hybrid Approach

تأخیر بهینه و از روش نزدیک‌ترین همسایگان کاذب برای تخمین بُعد فراکتالی سیستم استفاده شده است.

۲- ۱- زمان تأخیر بهینه: روش میانگین اطلاعات متقابل

برای تشکیل فضای فاز از یک سری زمانی مانند دبی رودخانه، از روش تأخیرها استفاده می‌شود که در آن با استفاده از یک سری زمانی با N نقطه، مانند x_i، که در آن $i=1,2,\ldots,N$ است، فضای فاز m بعدی به صورت زیر ساخته می‌شود [۱۸]:

$$Y_j = (x_j, x_{j+\tau}, x_{j+2\tau}, \ldots, x_{j+(m-1)\tau}) \quad (۱)$$

که در آن $j=1, 2, \ldots, N-(m-1)\tau$ و m بُعد برداری Y_j است که بعد تعبیه نامیده شده و τ زمان تأخیر مناسب است. به‌عبارت دیگر، بعد تعبیه تعداد محورهای فضای فاز را مشخص می‌کند و زمان تأخیر τ، فاصله زمانی بین محورهای آن است. در این حالت، Y_j جاذب بازسازی شده سامانه خواهد بود.

در بازسازی فضای فاز برای تعیین τ بهینه، روش‌های مختلفی ارائه شده است [۱۹،۲۰،۲۱]. روش میانگین اطلاعات متقابل از جمله روش‌هایی است که وابستگی غیرخطی را مبنای کار خود قرار داده و از این نظر نسبت به روش‌های دیگر برتری دارد [۲۲]. از این‌رو برای به‌دست آوردن زمان تأخیر از روش میانگین اطلاعات متقابل استفاده می‌شود [۲۰]. در تعیین زمان تأخیر بهینه، مواردی مانند کمترین اطلاعات متقابل و در نتیجه، وابستگی اندک و غیرخطی داده‌ها نسبت به هم و کوتاه بودن زمان تأخیر را در اولین کمینه تابع اطلاعات متقابل می‌توان یافت. این تابع به‌صورت زیر تعریف می‌شود [۲۳]:

$$I(\tau) = \sum_{x(i),\,x(i+\tau)} P(x(i), x(i+\tau)) \log_2 \left[\frac{P(x(i), x(i+\tau))}{P(x(i))\,P(x(i+\tau))} \right] \quad (۲)$$

در این رابطه $x(i)$ سری زمانی اصلی و $x(i+\tau)$ سری زمانی با زمان تأخیر τ است که احتمال‌های $P(x(i))$ ، $P(x(i+\tau))$ و $P(x(i), x(i+\tau))$ با توجه به آن‌ها محاسبه می‌شود و تابع اطلاعات متقابل برای هر زمان تأخیر به دست می‌آید[۲٤]. در پایان، اولین کمینه تابع اطلاعات متقابل، به عنوان زمان تأخیر بهینه برای بازسازی فضای فاز سامانه مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این‌پژوهش، با توجه به شرایط سامانه هیدرولوژیک مورد مطالعه، از اولین کمینه سراسری تابع اطلاعات متقابل استفاده شده است.

۲-۲- تخمین بُعد فراکتالی: روش نزدیک‌ترین همسایگان کاذب

روش نزدیک‌ترین همسایگان کاذب روشی است که برای تخمین غیرمستقیم بعد فراکتالی جاذب سامانه‌های آشوبناک استفاده می‌شود[۲۵]. در به دست آوردن بعد تعبیه بهینه سامانه، هدف به‌دست‌آوردن کمترین بعدی است که در آن، ساختار جاذب فراکتالی وجود دارد. بر این اساس، اگر Y_j نقطه‌ای از جاذب بازسازی شده در فضای فاز m بُعدی سامانه باشد و Y_j^{NN} نزدیک‌ترین همسایه Y_j باشد، وضعیت رفتار این نقطه و همسایه‌اش در فضای فاز m+1 بعدی بررسی می‌شود. اگر Y_j^{NN} با افزایش بعد فضای فاز از Y_j دور شود، نشانه‌ای از یک نزدیک‌ترین همسایه کاذب از Y_j است که در این بازه از جاذب در بُعد m ظاهر شده است. در یک فضای فاز با بعد مشخص m، وقتی درصد این همسایگان کاذب در کل جاذب به‌صورتی مشخص کاهش یابد؛ ساختار هندسی جاذب آشوبی آشکار می‌شود و این بُعد به‌عنوان بعد تعبیه بهینه برای جاذب سامانه درنظر گرفته می‌شود.

۲- ۳- حساسیت به شرایط اولیه: روش توان لیاپانوف

از جمله روش‌های شناسایی آشوب، به‌دست آوردن توان لیاپانوف است که در واقع معیاری از بی‌نظمی ظاهری و حساسیت به شرایط اولیه است. داشتن توان مثبت لیاپانوف یکی از نشانه‌های آشوبناک بودن رفتار سامانه خواهد بود. روش‌های مختلفی برای به‌دست آوردن توان لیاپانوف وجود دارد. امّا طبق نظر وولف و همکاران، به‌دست آوردن بزرگترین توان لیاپانوف از رابطه‌ی زیر برای شناخت آشوبی بودن سامانه کفایت خواهد کرد [۲٦].

$$\lambda_1 = \frac{1}{t_M - t_0}\sum_{k=1}^{M} \log \frac{L'(t_k)}{L(t_{k-1})} \qquad (۳)$$

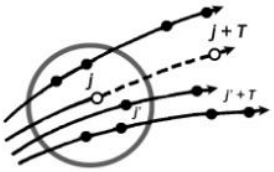
در این رابطه t_0 زمان شروع سری زمانی و t_M زمان آخرین داده‌ی آن است. در این روش، نزدیک‌ترین نقطه در سری زمانی به شرایط اولیه، مشخص شده و فاصله‌ی آن در فضای فاز با $L(t_0)$ بیان می شود. در زمان t_1 فاصله‌ی اولیه به $L'(t_0)$ تغییر پیدا می‌کند. نسبت $\frac{L'(t_k)}{L(t_{k-1})}$ طبق تعریف فاکتور کشیدگی[1] نامیده می‌شود. M نیز تعداد گام‌هایی است که لازم است انجام شود تا تمام سری زمانی در به‌دست آوردن توان لیاپانوف مشارکت کند. در این رابطه، فاصله در فضای‌فاز مدّنظر است، بنابراین ابتدا لازم است تا فضای فاز برای سری زمانی مورد مطالعه بازسازی شود. در نبود یک بعد تعبیه بهینه برای سامانه، بزرگترین توان لیاپانوف می‌تواند در چند بعد تعبیه مختلف از فضای فاز، محاسبه شده و از میانگین آن‌ها به عنوان توان لیاپانوف دقیق‌تر سامانه استفاده کرد [۲۷].

۲- ٤- مدل‌های محلی مبتنی بر فضای فاز

در مدل‌سازی به این روش، از اطلاعات یک ناحیه خاص در فضای فاز استفاده می‌شود. اگر نقطه‌ای در فضای فاز سامانه در زمان حال (j) و به‌عبارت دیگر، نقطه شروع پیش‌بینی باشد و پیش‌بینی در زمان $j+T$ مدّنظر باشد، به صورت زیر تابعی از است:

$$Y_{j+T} = f_T(Y_j) \qquad (٤)$$

هدف اصلی در این روش، تقریب f_T است که با استفاده از همسایه‌های در فضای فاز مشخص می‌شود. این همسایه‌ها با $Y_{j'}$ نشان داده می‌شوند. سپس k عدد از این همسایه‌ها با شرط کمینه‌شدن انتخاب می‌شوند. جاذبی که برای سامانه بازسازی شده، در طی مدت‌زمان فعالیت سامانه از نقطه شروع جاذب در فضای فاز، از همسایه‌های نقطه j در فضای فاز، گذشته و نقطه با توجه به هر همسایه در دسترس است. به این ترتیب مطابق شکل ۱، از k همسایه از Y_j در فضای فاز، تقریب محلی نقطه Y_{j+T} به‌دست می‌آید. در این شکل، نقاط توپر درون دایره، همسایه‌های Y_jو نقاط توپر خارج از دایره، مقدار $Y_{j'+T}$ برای هر همسایه هستند. نقطه توخالی خارج از دایره، مقداری است که از تقریب محلی به‌دست می‌آید.



شکل (۱) نمای شماتیک از روش محاسبه در مدل محلی مبتنی بر فضای فاز

در این پژوهش در ارتباط با چگونگی محاسبه تابع f روش‌های مختلفی استفاده شده که در زیر به آن‌ها اشاره می‌شود.

۲- ٤- ۱- تقریب میانگین

در این روش، از تقریب‌های حاصل از نزدیک‌ترین همسایه‌های نقطه شروع پیش‌بینی در فضای فاز، میانگین گرفته می‌شود. در این پژوهش، از بین انواع مختلف میانگین‌گیری، میانگین وزنی‌نمایی انتخاب شده‌است. بنابراین تقریب نهایی برای گام بعدی سری زمانی از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$x_{j+T} = \frac{\sum_{i=1}^{k} w_i (x_{j'+T})_i}{\sum_{i=1}^{k} w_i} \qquad (۵)$$

که در آن w_i ها ضرایب وزنی هر کدام از همسایه‌ها بسته به فاصله‌شان از نقطه شروع پیش‌بینی j هستند. همچنین، j' زمان مربوط به هر کدام از همسایه‌ها، T زمان مربوط به پیش‌بینی در آینده و k تعداد همسایگان نزدیک مورد استفاده است که با سعی‌وخطا و بنابر بهترین دقت پیش‌بینی به‌دست می‌آید[۲۸].

1Stretching Factor

۲- ٤- ۲- تقریب چندجمله‌ای

در این روش، پیش‌بینی با استفاده از برازش یک چندجمله‌ای به روش کمترین مربعات خطی[1]، به k جفت از نقاط $(Y_{j'}, Y_{j'+T})$ در فضای فاز، به‌دست می‌آید [۲۹]. اگر T=1 باشد، یعنی برای یک گام زمانی آینده پیش‌بینی انجام شود، پیش‌بینی x_{i+1} باتوجه به چندجمله‌ای زیر صورت می‌گیرد:

$$x_{i+1} = A.Y_1 \qquad (۶)$$

که در آن A و Y_1 به صورت زیر تعریف می‌گردند:

$$A = [a_0, a_1, a_2, \dots, a_m] \quad , Y_1 = [1, x_i, x_{i-\tau}, \dots, x_{i-(m-1)\tau}]^T \qquad (۷)$$

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 $k\times1$ است که به‌صورت زیر تقریب‌های حاصل از همسایه‌های x_k را شامل می‌شود:

$$Y_2 = [(x_1)_{i+1}, (x_2)_{i+1}, \dots, (x_k)_{i+1}]^T \qquad (۸)$$

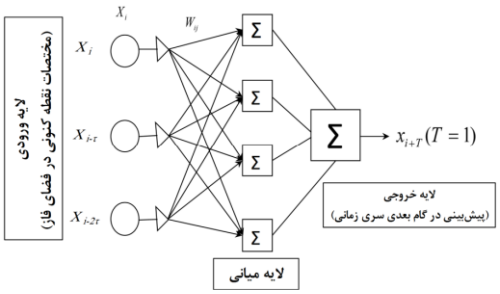
و B_1 ماتریس ژاکوبین با ابعاد $\frac{k\times(m+d)!}{(m!d!)}$ است که فرم کلی آن به صورت زیر است:

$$B_1 = \begin{bmatrix} 1 & x_{j_1} & x_{j_1-\tau} & \cdots & x_{j_1-(m-1)\tau} & x_{j_1}^2 & \cdots & x_{j_1-(m-1)\tau}^d \\ 1 & x_{j_2} & x_{j_2-\tau} & \cdots & x_{j_2-(m-1)\tau} & x_{j_2}^2 & \cdots & x_{j_2-(m-1)\tau}^d \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_{j_k} & x_{j_k-\tau} & \cdots & x_{j_k-(m-1)\tau} & x_{j_k}^2 & \cdots & x_{j_k-(m-1)\tau}^d \end{bmatrix} \qquad (۹)$$

که در آن m بعد تعبیه و τ زمان تأخیر هستند و برای بازسازی فضای فاز سری زمانی x_i مورد استفاده قرار گرفته‌اند. k تعداد همسایگان و d نیز درجه چندجمله‌ای است. حتی اگر از چندجمله‌ای درجه یک استفاده شود، با توجه به مراحل این روش، پیش‌بینی از نوع غیرخطی خواهد بود. تعداد همسایگان به کار رفته در این روش، معمولاً به صورت سعی‌وخطا تعیین می‌شود [۳۰].

۲- ٤- ۳- مدل پیوندی با استفاده از شبکه عصبی

شبکه‌های عصبی مصنوعی در زمره روش‌های داده‌محور هستند که در امر ذخیره و پردازش اطلاعات، از ساختار سلول‌های عصبی زیستی الهام گرفته‌اند. ساختار کلی شبکه پرسپترون چند لایه مورد استفاده در شکل ۲ نشان داده شده است. در لایه ورودی، مختصات نقاط فضای فاز وارد می‌شود و لایه خروجی نیز، نتیجه عملکرد شبکه عصبی در پیش‌بینی گام بعدی سری زمانی خواهد بود.



شکل (۲) نمایی کلی از شبکه عصبی پرسپترون چندلایه مورد استفاده

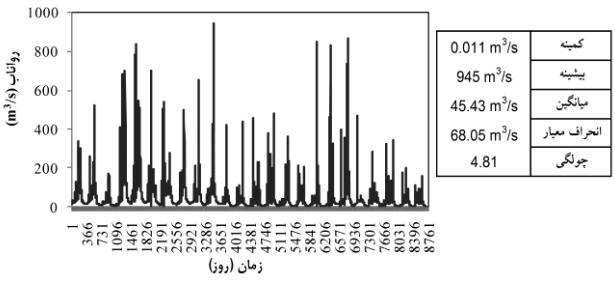
که در آن x_i عنصر سری زمانی اصلی، X_{min} کمینه سری زمانی، x_{max} بیشینه سری زمانی و α و β، کران‌های نرمال‌سازی هستند که در این پژوهش بین ۱- و ۱ انتخاب شده است. رویکرد پیوندی در این پژوهش، به این صورت است که پس از مشخص‌شدن نزدیک‌ترین همسایگان نقطه کنونی در فضای فاز، این نقاط به صورت یک بردار m بُعدی در لایه ورودی و تخمین حاصل از آن‌ها به صورت داده خروجی، برای آموزش شبکه عصبی مورداستفاده قرار می‌گیرند. سپس مختصات نقطه

1LinearLeast Squares Method

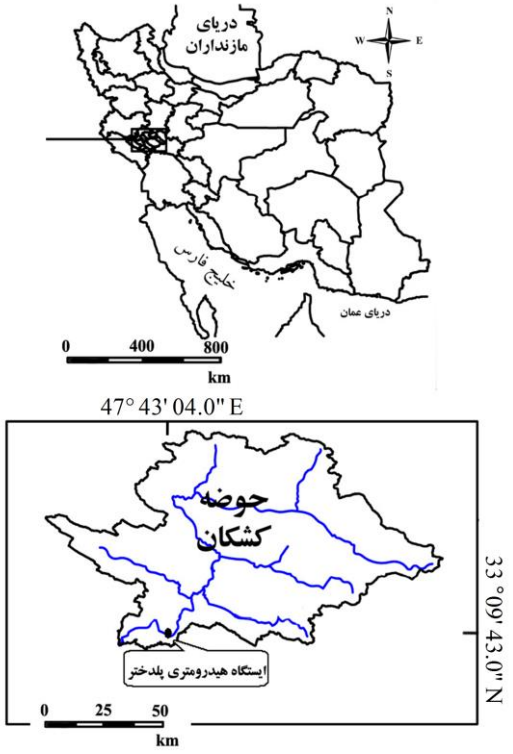
کنونی در فضای فاز که پیش‌بینی برای گام زمانی بعد از آن مدّنظر است، به شبکه عصبی وارد می‌شود و خروجی شبکه عصبی به‌عنوان پیش‌بینی محلی استفاده می‌شود. این روند برای تمام داده‌های سری آزمون، تکرار می‌شود.

۲- ۵- مطالعه موردی و داده‌های مورد استفاده

منطقه مورد مطالعه، حوضه آبریز رودخانه کشکان در جنوب غرب ایران می‌باشد که تحلیل آشوبناکی بر روی سری زمانی دبی روزانه آن در یک دوره ۲٤ ساله از مهر سال ۱۳٦۷ تا پایان شهریور ۱۳۹۱ انجام گرفته است. شکل ۳ هیدروگراف مربوطه را نمایش داده است.



شکل(۳) سری زمانی دبی روزانه رودخانه کشکان

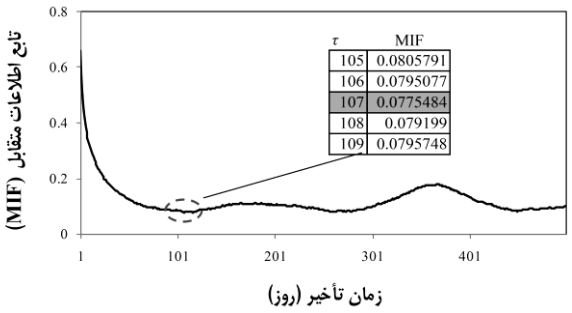


شکل(٤) موقعیت حوضه آبریز رودخانه کشکان

طول رودخانه کشکان ۳۷۳٫۷۵ کیلومتر و مساحت حوضه آبریز آن معادل ۹۵٦۰ کیلومتر مربع است. داده‌ها از ایستگاه هیدورمتری پلدختر جمع‌آوری شده‌اند که این ایستگاه در موقعیتی مطابق آن‌چه که در شکل ٤ نشان داده شده، قرار گرفته است. حوضه آبریز کشکان یکی از زیرحوضه‌های مهم حوضه آبریز کرخه، یکی از سه رودخانه پرآب ایران، محسوب می‌شود.

۳- نتایج و بحث

رفتار موجود در سری زمانی متغیری از یک سامانه هیدرولوژیک، معمولاً به صورت پیچیده و تصادف‌گونه تعبیر شده است و سری زمانی دبی روزانه رودخانه کشکان نیز از این امر مستثنی نیست. این سری زمانی، در مواقعی تغییرات ناگهانی از خود نشان داده و شرایط ناپایداری داشته است. در دیدگاه نظریه آشوب، فرض می‌شود که چنین رفتاری از یک تعیّن‌پذیری نهفته ناشی شده است. برای بررسی ویژگی‌های یک رفتار آشوبناک، ابتدا نیاز به یک زمان تأخیر بهینه برای بازسازی فضای فاز است. به دلیل مطابقت روش میانگین اطلاعات متقابل بر ماهیت غیرخطی سامانه حاکم بر جریان رودخانه کشکان، از این روش برای بازسازی فضای فاز استفاده شده است. مطابق شکل ۵، در زمان‌های تأخیر مختلف، تابع اطلاعات متقابل برای این سامانه محاسبه شده است.

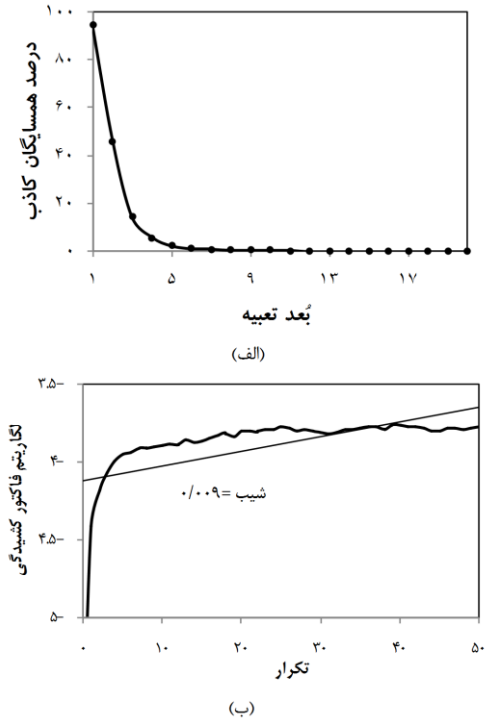


شکل (۵) محاسبه تابع اطلاعات متقابل در زمان تأخیرهای مختلف

در پژوهش های گذشته، از اولین کمینه موضعی تابع اطلاعات متقابل برای انتخاب زمان تأخیر بهینه در بازسازی فضای فاز استفاده شده است[۱۲،۱۳،۱۵]. همان‌طور که در شکل ۵ می‌توان مشاهده کرد، این تابع می‌تواند دارای کمینه‌های

موضعی متعدد در زمان‌های تأخیر مختلف باشد. در این پژوهش با توجه به شرایط این سامانه طبیعی، کمینه سراسری تابع اطلاعات متقابل برای انتخاب زمان تأخیر بهینه پیشنهاد شد و بر این اساس، زمان تأخیر ۱۰۷ روز برای بازسازی فضای فاز مورد استفاده قرار می‌گیرد.

پس از انتخاب زمان تأخیر بهینه، نوبت به آزمودن شرایط رفتار آشوبناک در فضای فاز است. بُعد فراکتالی جاذب سامانه به صورت غیرمستقیم از روش نزدیک‌ترین همسایگان کاذب تخمین زده می‌شود. همان‌گونه که در شکل ٦- الف می‌توان دید، درصد همسایگان کاذب در فضاهای فاز ۲ و ۳ بُعدی، بیشترین کاهش را داشته و پس از آن این روند کاهش آهسته‌تر شده است. این افت کاهش، نشان‌دهنده‌ی وجود جاذب فراکتالی در فضای فاز سامانه خواهد بود و در همین‌حال، m=۳ اولین گزینه برای بعد تعبیه فضای فاز بهینه است. بدیهی است برای اطمینان کامل از فضای فاز بهینه سامانه، باید در مرحله پیش‌بینی، از بین بهترین دقت‌های پیش‌بینی که در بُعدهای مختلف به‌دست می‌آید، انتخاب صورت گیرد. بر این اساس، بعد تعبیه بهینه‌ای بین ۳ تا ۵ را می‌توان برای سامانه متصور شد.

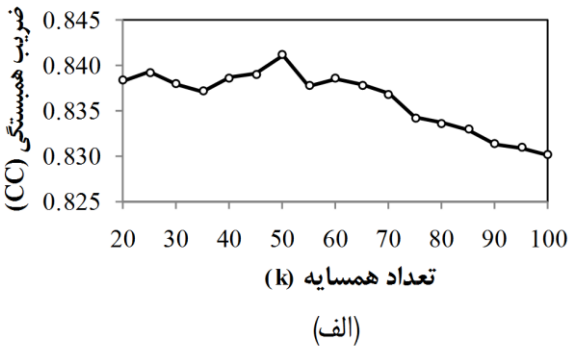


شکل (٦) بررسی رفتار آشوبناک در سری زمانی (الف) روش نزدیک‌ترین همسایگان کاذب (ب) روش توان لیاپانوف

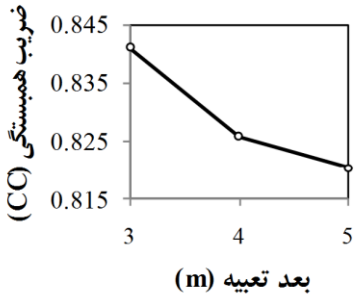
در مجموع، شرایط ویژگی دیگری که در تحلیل رفتار سامانه حاکم بر جریان رودخانه کشکان، مورد ارزیابی قرار گرفته، حساسیت به شرایط اولیه است. حساسیت به شرایط اولیه، یکی از عواملی است که در سامانه‌های آشوبناک باعث بروز رفتارهای تصادف‌گونه می‌شود. در این پژوهش، از روش توان لیاپانوف برای بررسی این موضوع استفاده شده است. در شکل ٦- ب نمودار فاکتور کشیدگی در مقابل تکرارها نمایش داده شده است. برای محاسبه دقیق‌تر توان لیاپانوف و با توجه به عدم‌قطعیت در بعد تعبیه بهینه به‌دست‌آمده برای فضای فاز در روش نزدیک‌ترین همسایگان کاذب، فاکتور کشیدگی برای بعدهای ۳ تا ۵ محاسبه شده و سپس میانگین آن‌ها در این نمودار منظور شده است. مطابق این شکل، شیب خط برازش داده شده به نمودار فاکتور کشیدگی و یا به‌عبارتی توان لیاپانوف، دارای مقدار مثبت λ_1= ۰/۰۰۹ است و بنابراین سامانه حاکم بر جریان رودخانه کشکان، حساس به شرایط اولیه است.

رفتار آشوبناک در این سامانه مشاهده شده و استفاده از مدل‌های پیش‌بینی مبتنی بر نظریه آشوب، برای آن، مناسب تشخیص داده می‌شود. بر این اساس، روش‌های مختلف پیش‌بینی تقریب محلی، شامل میانگین،چندجمله‌ای و مدل پیوندی شبکه عصبی مصنوعی پرسپترون چندلایه، به این منظور به‌کار گرفته شده‌اند و در انتها، دو سال آخر سری زمانی دوره ۲٤ ساله برای ارزیابی عملکرد مدل‌ها مورد استفاده قرار گرفته‌اند. برای انجام پیش‌بینی به روش‌های ذکر شده، ابتدا باید تعداد همسایگان و همچنین بعد تعبیه به صورت بهینه مطابق با بهترین دقت پیش‌بینی به‌دست آید. در مدل پیوندی، شبکه عصبی پرسپترون چندلایه برای هر گام پیش‌بینی به صورت جداگانه و مطابق با نقطه‌ای از فضای فاز که در آن قرار می‌گیرد، از اطلاعات ۵۰ همسایه برای آموزش استفاده کرده و دبی روز بعد را نتیجه می‌دهد. .بر این اساس، بررسی‌های لازم در مورد روش‌های محلی میانگین، چندجمله‌ای و رویکرد پیوندی با استفاده از شبکه عصبی انجام گرفته و همان‌طور که در شکل ۷ قابل مشاهده است، در همه این روش‌ها، با توجه به حداکثر شدن ضریب همبستگی بین مقادیر دبی مشاهداتی و

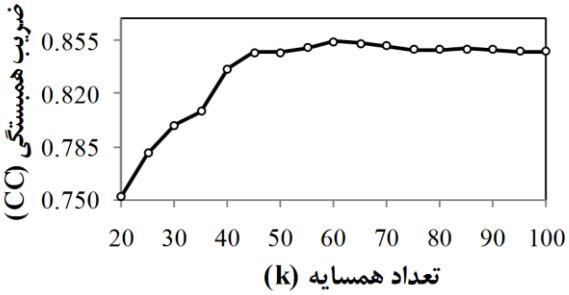
دبی پیش‌بینی شده، بعد تعبیه بهینه برای پیش‌بینی m=۳ به‌دست‌آمده است. همچنین تعداد همسایگان بهینه برای انجام پیش‌بینی به روش محلی میانگین ۵۰، برای روش چندجمله‌ای ۶۰ و برای رویکرد پیوندی با استفاده از شبکه عصبی ۵۰ مشاهده شده که اختلاف چندانی با یکدیگر ندارند. در این میان، در تحلیل حساسیت روش‌های مختلف تقریب محلی مورد استفاده، مشاهده می‌شود که مدل پیوندی با استفاده شبکه عصبی مصنوعی تغییرات بیشتری را نسبت به تعداد همسایه‌ها داشته که نشان‌دهنده حساسیت بیشتر این روش نسبت به شرایط مختلف در فضای فاز است.



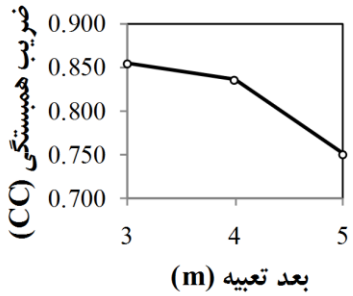
(الف)



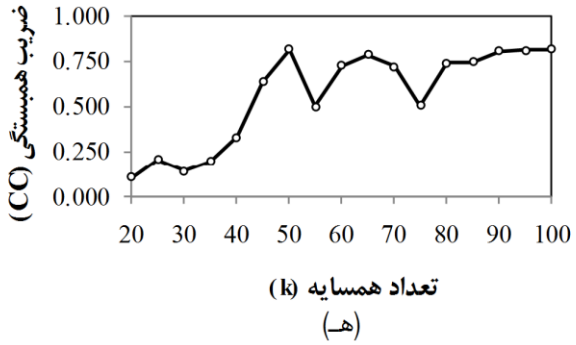
(ب)



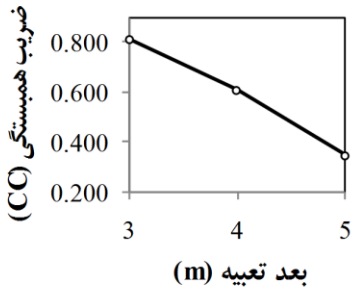
(ج)



(د)

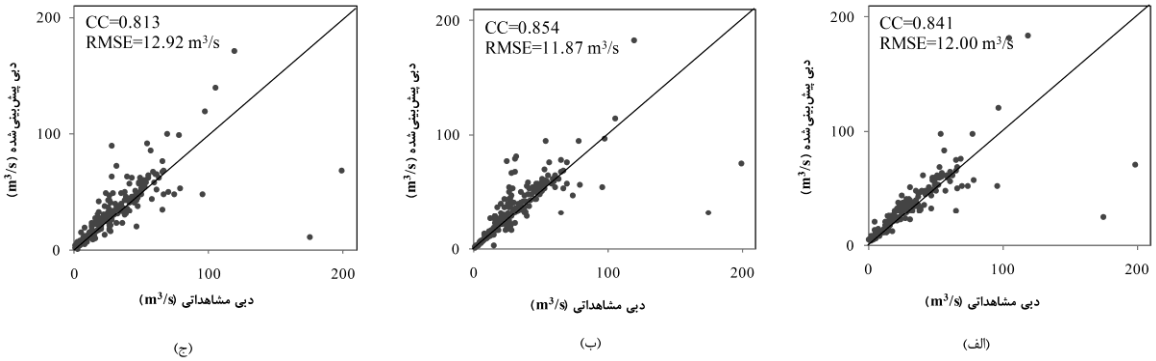


(هـ)

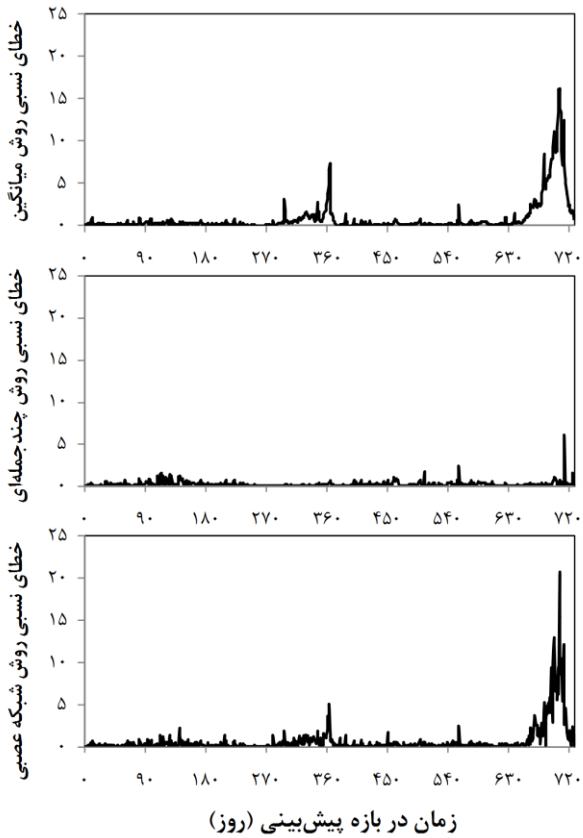


(و)

شکل (۷) بررسی دقت پیش‌بینی در روش محلی میانگین، الف- نسبت به افزایش تعداد همسایه‌ها و ب- نسبت به افزایش بعد فضای فاز، دقت پیش‌بینی در روش محلی چند جمله‌ای، ج- نسبت به افزایش تعداد همسایه‌ها و د- نسبت به افزایش بعد فضای فاز و دقت پیش‌بینی در رویکرد پیوندی با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی، هـ - نسبت به افزایش تعداد همسایه‌ها و و- نسبت به افزایش بعد فضای فاز



شکل (۸) نتایج پیش‌بینی به روش محلی مبتنی بر فضای فاز سری زمانی دبی رودخانه کشکان: (الف) روش تقریب میانگین، (ب) روش تقریب چندجمله‌ای و (ج) مدل هیبریدی شبکه عصبی مصنوعی



زمان در باز پیش‌بینی (روز)

شکل (۹) خطای نسبی روش‌های مختلف پیش‌بینی محلی مبتنی بر فضای فاز در مرحله صحت‌سنجی

همان‌طور که در شکل ۸ می‌توان دید، هر سه روش از نظر دقت پیش‌بینی وضعیت مناسب و مشابهی دارند و دقت پیش‌بینی بهتری که با استفاده از تقریب محلی به روش چندجمله‌ای به‌دست‌آمده نیز تفاوت چندانی با دیگر روش‌ها ندارد. نمودار خطای نسبی پیش‌بینی به روش‌های مختلف، مطابق شکل ۹، تفاوت کیفی این پیش‌بینی‌ها را بهتر نشان می‌دهد. موضوعی که در این شکل مشاهده می‌شود، خطای نسبی پایین‌تر تقریب محلی به روش چندجمله‌ای است که نشان‌دهنده عملکرد بهتر این روش در پیش‌بینی دبی‌های پایین است. در سری زمانی دوره آزمون که در دو سال آبی متوالی واقع‌شده، در بازه‌های منتهی به انتهای تابستان، دبی به اندازه قابل‌ملاحظه‌ای کاهش یافته و این مقادیر در سال‌های گذشته سابقه نداشته است. بنابراین، روش‌میانگین که به‌صورت مستقیم از تقریب‌های نزدیک‌ترین همسایگان در فضای فاز استفاده می‌کند، نتوانسته برای این بازه‌های زمانی، عملکردی مناسب از خود نشان دهد. در مقابل، روش چندجمله‌ای که تقریب‌هایش حاصل از برازش یک چندجمله‌ای در نواحی مختلف فضای فاز هستند، می‌تواند مقادیر کم دبی در پایان تابستان را با خطای نسبی بهتری پیش‌بینی کند.

٤- خلاصه و نتیجه‌گیری

دیدگاه نظریه آشوب، رفتارهای پیچیده و تصادف‌گونه سامانه‌ها را ناشی از یک تعیّن‌پذیری ساده و نهفته در پسِ پویایی سامانه می‌داند و بر این اساس، سامانه حاکم بر جریان رودخانه کشکان بررسی شده است. به‌این‌منظور، ابتدا به کمک روش میانگین اطلاعات متقابل، زمان تأخیر بهینه برای بازسازی فضای فاز محاسبه شده است. در این روش، کمینه سراسری تابع اطلاعات متقابل در زمان تأخیر ۱۰۷ روز رخ داده و این زمان تأخیر برای بازسازی فضای فاز استفاده شده است. سپس

دو ویژگی عمده سامانه‌های آشوبناک، شامل جاذب فراکتالی و حساسیت به شرایط اولیه در جاذب موجود در فضای فاز بازسازی‌شده سری زمانی دبی روزانه رودخانه کشکان، به‌ترتیب با کمک روش‌های نزدیک‌ترین همسایگان کاذب و توان لیاپانوف بررسی شده‌اند. روند کاهش درصد همسایگان کاذب در روش نزدیک‌ترین همسایگان کاذب و همچنین توان لیاپانوف مثبت به‌دست‌آمده به مقدار $\lambda_1=$ ۰٫۰۰۹ ، وجود رفتار آشوبناک را در سامانه تأیید می‌کند و از این‌رو استفاده از مدل‌های محلی مبتنی بر نظریه آشوب، منطقی به‌نظر می‌رسد. در این پژوهش، علاوه بر روش‌های تقریب میانگین و چندجمله‌ای، از رویکرد جدید مدل پیوندی شبکه عصبی پرسپترون چندلایه برای مدل‌سازی محلی نیز استفاده شده است.نتایج پیش‌بینی در این روش‌ها، نشان می‌دهد که استفاده از مدل پیوندی شبکه عصبی برای مدل‌سازی محلی مبتنی بر فضای فاز، تفاوت چندانی با روش‌های موجود، شامل میانگین و چندجمله‌ای نداشته است. همچنین روش محلی چندجمله‌ای، نسبت به سایر روش‌های به‌کار رفته، اندکی بهتر بوده است. در مجموع، مدل‌های مختلف محلی مورداستفاده، کیفیت مناسبی را در پیش‌بینی ارائه داده‌اند و استفاده از آن‌ها برای مدل‌سازی مبتنی بر نظریه آشوب در مورد سری زمانی دبی رودخانه کشکان، مناسب تشخیص داده می‌شود. مطابق نتایج این پژوهش، سیستم حاکم بر جریان رودخانه کشکان از الگوی رفتار آشوبناک تبعیت می‌کند. بنابراین با دانستن این موضوع، می‌توان فضای فاز را بازسازی و اقدام به پیش‌بینی‌های کوتاه‌مدت در آینده نمود. بدیهی است هر چه اطلاعات بیشتر و به‌روز تر در اختیار محقق باشد، فضای فاز بازسازی شده از دقت بیشتری برخوردار بوده و می‌تواند در دقت بیشتر پیش‌بینی‌ها مؤثر باشد.

۵- مراجع

[1] Hense, A. "On the possible existence of a strange attractor for the southern oscillation" Beitr. Phys. Atmos. 1987, 60 (1), 34–47.

[2] Wilcox, B. P., Seyfried, M. S., Matison, T. H. "Searching for chaotic dynamics in snowmelt runoff" Water Resources Res., 1991, 27(6), 1005-1010.

[3] Pasternack G.B. "Does the river run wild? Assessing chaos in hydrological systems" Adv. Water Resour. 1999; 23(3):253–60.

[4] Pasternack G. B. (2001)." Reply to ‘‘Comment on _Does river run wild? Assessing chaos in hydrological systems’’ by Pasternack" Adv. Water Resource, 2001; 24(5):578–80.

[5] Porporato A., Ridolfi L. "Clues to the existence of deterministic chaos in river flow" Int J. Mod. Phys. B. 1996;10:1821–62.

[6] Liu Q., Islam S., Rodriguez-Iturbe I., Le Y. "Phase-space analysis of daily streamflow: characterization and prediction" Adv. Water Resource. 1998; 21:463–75.

[7] Lambrakis, N., Andreou, A. S., Polydoropoulos, P., Georgopoulos, E., Bountis, T. "Nonlinear analysis and forecasting of a brackish karstic spring" Water Resources Res., 2000, 36(4), 875-884.

[8] Ghorbani, M. A., Kisi, O., & Aalinezhad, M. "A probe into the chaotic nature of daily streamflow time series by correlation dimension and largest Lyapunov methods" Appl. Mathematical Model., 2010, 34(12), 4050-4057.

[۹] انیس‌حسینی، م. ذاکرمشفق، م.، "تحلیل آشوبناکی سری زمانی دبی رودخانه با روش توان لیاپانوف" نهمین سمینار بین‌المللی مهندسی رودخانه، دانشگاه شهید چمران، اهواز، ایران، بهمن ماه ۱۳۹۱.

[10] Khatibi, R., Sivakumar, B., Ghorbani, M. A., Kisi, O., Koçak, K., & Farsadi Zadeh, D. "Investigating chaos in river stage and discharge time series" J. Hydrol., 2012, 414, 108-117.

[۱۱] انیس‌حسینی، م.، ذاکرمشفق، م."کاربرد نظریه آشوب در تحلیل فرآیند بارش- رواناب" هفتمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه زهدان، زاهدان، ایران، اردیبهشت ماه ۱۳۹۲.

[۱۲] انیس‌حسینی، م.، ذاکرمشفق، م. "آیا سری زمانی جریان رودخانه آشوبناک است؟ (مطالعه موردی: رودخانه کشکان)" دوازدهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشگاه تهران، تهران، ایران، آبان‌ماه ۱۳۹۲.

[۱۳] انیس‌حسینی، م.، ذاکرمشفق، م. "تحلیل و پیش‌بینی جریان رودخانه کشکان با استفاده از نظریه آشوب" مجله هیدرولیک، دوره ۸، شماره ۳، پاییز ۱۳۹۲، ٤٥-٦١.

[١٤] انیس‌حسینی، م.، ذاکرمشفق، م. "رویکرد نظریه آشوب در تحلیل سری زمانی دبی رودخانه (مطالعه موردی: رودخانه کشکان)" مجله پژوهش آب ایران، ۱۳۹۳، پذیرفته شده.

[15] Islam M. N., Sivakumar B."Characterization and prediction of runoff dynamics: a nonlinear dynamical view" Adv. Water Resources.,2002, 25 (2002), 179–190.

[16] Regonda, S. K., Sivakumar, B., Jain, A. "Temporal

scaling in river flow: can it be chaotic?/L'invariance d'échelle de l'écoulement fluvial peut-elle être chaotique?"*Hydrological sciences journal*,2004,*49*(3).
[17] Martins, O. Y., Sadeeq, M. A., Ahaneku, I. E. "Nonlinear Deterministic Chaos in Benue River Flow Daily Time Sequence" J. Water Resource Prot., 2011, 3(10), 747-757.
[18] Takens, F. "Detecting strange attractors in turbulence. In Dynamical systems and turbulence" Warwick 1980 (pp. 366-381). Springer Berlin Heidelberg.
[19] Holzfuss, J., Mayer-Kress, G. "An approach to error-estimation in the application of dimension algorithms" In: Mayer-Kress G, editor. Dimensions and entropies in chaotic systems. New York: Springer; 1986. p. 114–22.
[20] Fraser, A. M., Swinney, H. L. "Independent coordinates for strange attractors from mutual information" Physical review A, 1986, 33(2), 1134.
[21] Liebert, W., Schuster, H. G." Proper choice of the time delay for the analysis of chaotic time series" Phys. Lett. A, 1989, 142(2), 107-111.
[22] Tsonis A. A., Elsner J. B., Georgakakos K.P. "Estimating the dimension of weather and climate attractors: important issues about the procedure and interpretation" J. Atmos Sci 1993;50: 2549–55.
[23] Williams G. P. "Chaos Theory Tamed" Joseph Henry Press, 1997, Washington, D.C, USA.
[24] Jiang, A. H., Huang, X. C., Zhang, Z. H., Li, J., Zhang, Z. Y., Hua, H. X. "Mutual information algorithms" Mech. Sys. Sig. Proc., 2010, 24(8), 2947-2960.
[25] Kennel, M. B., Brown, R., Abarbanel, H. D. "Determining embedding dimension for phase-space reconstruction using a geometrical construction" Physical rev. A,1992, 45(6), 3403.
[26] Wolf A., Swift J.B., Swinney H.L., Vastano A. "Determining Lyapunov exponents from a time series" Physica D, 1985, 16, 285–317.
[27] Rosenstein, M. T., Collins, J. J., De Luca, C. J. "A practical method for calculating largest Lyapunov exponents from small data sets" Physica D: Nonlin. Phen., 1993, 65(1), 117-134.
[28]Casdagli, M. "Nonlinear prediction of chaotic time series"Physica D: Nonlin. Phen., 1989,*35*(3), 335-356.
[29] Wilkinson, J. H., Reinsch, C. "Handbookfor Automatic Computation" 1971, Vol. II: Linear Algebra.
[30] Meng, Q., Peng, Y. "A new local linear prediction model for chaotic time series" Phys Lett A 370 (2007) 465–470.
[31] Beale, M. H., Hagan M. T., Demuth, H. B., "Neural network toolbox" Neural Network Toolbox,
The Math works, 2013, (2): 5-25.
[32] Haykin, S. "Neural networks: a comprehensive foundation" 1994, Prentice Hall PTR.