

بررسی آشوبناکی و بازسازی فضای فاز دینامیک تبخیر با استفاده از نظریه آشوب (مطالعه موردی: ایستگاه سینوپتیک سمنان)

فاطمه هوشمندزاده^۱، محمدرضا یزدانی^{۱*} و سید فرهاد موسوی^۲

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱/۸؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۳/۲۶)

چکیده

بررسی رفتار پدیده تبخیر از سطح آب یکی از موارد اساسی در طراحی، بهره‌برداری و مطالعات مربوط به مهندسی آب است. از این‌رو، به‌کارگیری روش‌های نوین همچون نظریه آشوب در هیدرولوژی و منابع آب به‌دلیل نوآوری و قابلیت‌های آن به‌تازگی مورد توجه قرار گرفته است. از آنجا که نوسانات تبخیر از سطوح آزاد آب ماهیتی دینامیک و غیرخطی دارند، بنابراین، هدف از این پژوهش، بررسی امکان وجود رفتار آشوبی در تبخیر از سطح آزاد آب در ایستگاه سینوپتیک سمنان در مقیاس‌های زمانی روزانه و ماهانه در سال‌های ۹۷-۱۳۷۴ با استفاده از مفاهیم نظریه آشوب است. میزان تبخیر روزانه، ماهانه و سالانه این ایستگاه سینوپتیک به ترتیب ۸/۶۸، ۲۰۰ و ۲۶۰۰ میلی‌متر محاسبه شد. برای بازسازی فضای حالت، به دو پارامتر زمان تأخیر و بُعد محاط نیاز است که بدین‌منظور از میانگین اطلاعات متقابل و نزدیکترین همسایگی کاذب برای برآورد این دو پارامتر استفاده شده است. اولین گام جهت مطالعه یک فرآیند با نظریه آشوب، بررسی آشوبناکی آن است که روش بُعد همبستگی از مرسوم‌ترین روش‌هاست. ابتدا، بُعد تعبیه (مُحاط) به روش نزدیکترین همسایگی کاذب برابر با ۳ محاسبه شد. جهت محاسبه زمان تأخیر، نمودارهای متقابل تبخیر در ایستگاه سمنان در مقیاس‌های مختلف زمانی رسم شد. بر اساس این روش، اولین مینیمم محلی در نمودار به‌عنوان زمان تأخیر در نظر گرفته می‌شود که برای تبخیر در مقیاس‌های روزانه و ماهانه به ترتیب ۳۰ و ۳ به‌دست آمد. برخلاف روش‌های پیچیده و محاسباتی مرسوم، این نتایج با مشاهده و در حداقل زمان حاصل می‌شود که به قرار زیر است: داده‌های ماهانه آشوبی‌تر از داده‌های روزانه هستند. پس از محاسبه زمان تأخیر و بازسازی فضای حالت، بُعد محاط و سپس شیب نمودار بُعد همبستگی به ترتیب ۸/۸ و ۸/۹ به‌دست آمدند.

واژه‌های کلیدی: بُعد همبستگی، تئوری آشوب، ماهیت دینامیک، نزدیکترین همسایگی کاذب

۱. گروه بیابان‌زدایی، دانشکده کویرشناسی، دانشگاه سمنان

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

*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: m_yazdani@semnan.ac.ir

مقدمه

با وجود روابط غیرخطی، عدم قطعیت، عدم صراحت و ویژگی‌های متغیر زمانی و مکانی سیستم‌های چرخه هیدرولوژی، هیچ‌یک از مدل‌های آماری و مفهومی پیشنهاد شده نتوانسته‌اند مدل برتر و توانا به منظور الگوسازی دقیق شناخته شوند. امروزه، شبکه‌های غیرخطی به‌عنوان یکی از سیستم‌های فراکاوشی در شبیه‌سازی و پیش‌بینی پدیده‌های پیچیده استفاده می‌شوند. در این میان، توانایی شبکه‌های عصبی مصنوعی به‌عنوان مدل‌های جعبه سیاه، در مدل‌سازی بسیاری از سیستم‌های غیرخطی تبیین روابط پیچیده حاکم بر این فرایندها محرز شده است (۲۰ و ۲۱). در میان سیستم‌های فراکاوشی، به تئوری آشوب به دلیل داشتن خاصیت دینامیک غیرخطی و قطعی بودن، در شبیه‌سازی فرایندهای پیچیده توجه خاصی شده است. تئوری آشوب را اولین بار در سال ۱۹۶۵ دانشمندی به نام ادوارد لورنز در هواشناسی به کار برد. انگاره اصلی تئوری آشوب این است که در هر بی‌نظمی، نظمی نهفته است. در زمینه کارکرد تئوری آشوب، سه مزیت عمده برای تحلیل سیستم‌های هیدرولوژیک وجود دارد: ۱- برای سیستم به‌شدت غیرخطی قابل اجرا است، ۲- به‌طور طبیعی همه دینامیک‌های مهم سیستم را محاسبه می‌کند و ۳- اطلاعات و روابط سیستم را بدون نیاز به کشف قوانین یا روابط تحت دینامیک کشف می‌کند. تحلیل آشوب، یک رابطه برای استخراج مدل متداول تهیه نمی‌کند اما اطلاعات ارزشمندی در باره همه سیستم‌های دینامیک برای کاربرد کلی، از قبیل پیش‌بینی داده‌ها استخراج می‌کند (۱۶). به‌تازگی مطالعات وجود آشوب در فرایندهای هیدرولوژیک مورد توجه بیشتری قرار گرفته، به‌طوری که از این قبیل مطالعات می‌توان به پژوهش‌های (۲، ۶، ۸، ۱۰، ۱۲، ۱۱، ۱۳ و ۱۵) اشاره کرد.

توکلی و بابازاده (۱۷) در پژوهشی تئوری آشوب را برای تخمین تبخیر از سطح آب دریاچه ارومیه مورد استفاده قرار دادند. در بازه ۱۰ ساله ۱۹۹۷ تا ۲۰۰۷ تبخیر برآورد و با مقادیر واقعی مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج حاکی از دقت بالای این

روش بود. در ادامه، تبخیر دریاچه را برای سال‌های ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۷ پیش‌بینی کردند.

کومار گویال و همکاران (۹) در پژوهشی به بررسی مدل‌سازی تبخیر روزانه تحت تبخیر در حوضه‌های جنوب گرمسیری در هند با استفاده از ANN، LS-SVR، Logic Fuzzy و ANFIS پرداختند. در این پژوهش، از داده‌های هواشناسی حوضه کارسو در هند (شامل ۳۸۰۱ داده روزانه ثبت شده از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۰) برای توسعه و آزمایش مدل‌های برآورد تبخیر روزانه از تحت استفاده شد. روش‌های تجربی هارگریوز-سامانی و استیفنز-استوارت برای مقایسه با روش‌های ماشین بردار استفاده شد. بر اساس مقایسه دریافتند که رویکردهای فازی و LS-SVR را می‌توان با موفقیت در مدل‌سازی فرایند تبخیر روزانه از داده‌های اقلیمی موجود استفاده کرد. علاوه بر این، نتایج نشان داد که مدل‌های یادگیری ماشین بردار بهتر از روش‌های سنتی و تجربی است.

در پژوهشی، فرزین و همکاران (۳) کاربرد نظریه آشوب و شبکه عصبی مصنوعی در تخمین تبخیر از سطح آب دریاچه‌ها در یک دوره آماری ۴۰ ساله مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج بررسی شاخص‌های تعیین ماهیت آشوبناکی داده‌های تبخیر شامل نمای لیپانوف مثبت و مقدار غیرصحیح شیب نمودار بُعد همبستگی در مقابل شعاع همبستگی، همگی نشانگر رفتار آشوبناک سری زمانی تحت بررسی بودند. نتایج صحت‌سنجی حاکی از دقت بالای نظریه آشوب بود و مدل شبکه عصبی مصنوعی اندکی دقت بیشتر داشت. به‌طوری که میانگین خطای مطلق (MAE) و جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) در شبکه عصبی مصنوعی نسبت به آشوب به ترتیب ۲/۵۱ و ۲/۲۵ میلی‌متر کاهش یافتند. همچنین، نتایج مربوط به ارتفاع جمععی تبخیر در دوره صحت‌سنجی حاکی از برتری ۳/۸ درصدی شبکه عصبی مصنوعی نسبت به آشوب می‌باشد.

فریرا و همکاران (۵) در پژوهشی در برزیل، به برآورد تبخیر و تعرق مرجع با داده‌های هواشناسی محدود با استفاده از ANN و SVM پرداختند. این مطالعه برای اولین بار عملکرد

یکی از مهم‌ترین پدیده‌های مؤثر در فرایندهای هیدرولوژیک، تبخیر آب از سطح است. با توجه به تأثیرگذاری عوامل مختلف بر پدیده تبخیر، می‌توان این سیستم را به‌عنوان یک سیستم دینامیک مطرح نمود. از آنجایی که نظریه آشوب به مطالعه سیستم‌های دینامیک می‌پردازد، بنابراین در بررسی حاضر، با هدف استفاده از روش بازسازی فضای فاز و بُعد همبستگی، الگوی آشوبناکی رفتار پدیده تبخیر از سطح آب در ایستگاه سینوپتیک شهر سمنان که تا کنون بررسی نشده است مورد ارزیابی قرار گرفت. با توجه به موارد ذکر شده، از آنجایی که پیش‌بینی و مدل‌سازی پارامترهای هواشناسی به خصوص هیدرولوژیک به برنامه‌ریزی‌های طولانی‌مدت و بهره‌برداری و مدیریت کمی و کیفی این منابع کمک می‌کند و با توجه به شرایط جغرافیایی و اقلیمی کشور ما بررسی وضعیت دینامیک سری زمانی تبخیر می‌تواند در انتخاب و گزینش مدل‌های مناسب برای شبیه‌سازی یا پیش‌بینی آن راهگشا باشد. بنابراین، در این پژوهش، مقایسه آشوبناکی سیستم در مقیاس‌های زمانی روزانه و ماهانه با هدف تعیین آشوبناکی تبخیر انجام شد.

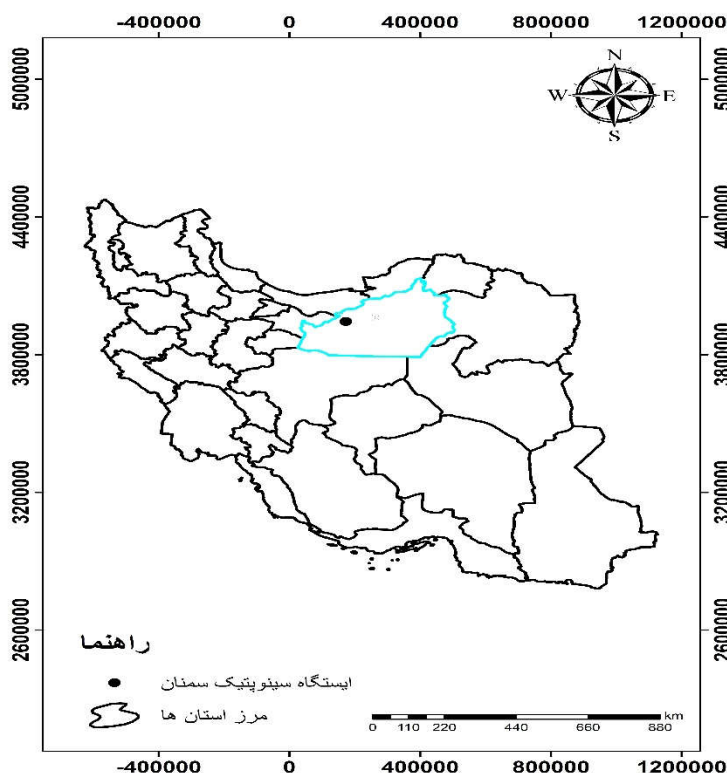
مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

محل انجام پژوهش، ضلع شمالی دانشکده عمران دانشگاه سمنان در شهر سمنان دارای مختصات جغرافیایی به طول $36^{\circ}00'00''$ عرض $53^{\circ}26'00''$ و ارتفاع ۱۱۴۹ متری از سطح دریا واقع شده است. در شکل ۱ موقعیت ایستگاه سینوپتیک و محل انجام آزمایش و همچنین فاصله این دو محل نشان داده شده است. به لحاظ اقلیمی استان سمنان دارای میانگین بارندگی ۱۴۰ میلی‌متر و میانگین درجه حرارت سالیانه ۱۷ درجه سانتی‌گراد است. متوسط حجم بارش در استان سمنان ۱۱/۵ میلیارد متر مکعب برآورد شده است که ۹/۲ میلیارد متر مکعب آن (حدود ۸۰ درصد) به‌طورمستقیم از طریق تبخیر از دسترس خارج می‌شود و در نتیجه به منابع آب زیرزمینی نفوذ نکرده و در تعادل‌بخشی نیز مؤثر نیستند که جزو مشکلات منابع

معادلات جایگزین ANN و SVM برای ارزیابی تبخیر- تعرق پتانسیل روزانه در کل برزیل را با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده دما و رطوبت نسبی یا تنها دما بررسی کرده است. نتایج نشان داد که مدل‌های ANN و SVM عملکرد بهتری از معادلات مورد مطالعه نشان دادند. بوستانی و همکاران (۱) به تحلیل پارامترهای رودخانه با استفاده از شاخص‌های مبتنی بر نظریه آشوب (مطالعه موردی: دبی رودخانه زاینده‌رود) پرداختند. در این پژوهش، با به‌کارگیری شاخص‌های آشوبی، وضعیت دینامیک سری زمانی جریان و تأثیر مقیاس زمانی بر رفتار جریان رودخانه زاینده‌رود طی ۴۳ سال (۹۲-۱۳۵۰) ارزیابی شده است. داده‌های ۴ ایستگاه هیدرومتری در دو مقیاس زمانی روزانه و ۱۰ روزه مورد بررسی قرار گرفتند و با استفاده از شاخص بُعد همبستگی، امکان وجود آشوب در دبی رودخانه بررسی شد. نتایج در مقیاس روزانه نشان‌دهنده مقدار غیر صحیح بعد همبستگی نشان از آشوبناکی سیستم داشت اما با افزایش مقیاس زمانی به ۱۰ روزه، دبی جریان در تمام ایستگاه‌ها رفتاری تصادفی نشان دادند. در این بررسی نمای لیاپانوف نیز به‌عنوان یک مشخصه از سیستم‌های آشوبناک مورد ارزیابی قرار گرفت که بزرگترین نمای لیاپانوف در هر دو مقیاس زمانی مثبت بدست آمد و مبین آشوبناکی بود.

در پژوهش حاضر فرض بر آشوبی بودن داده‌های تبخیر ایستگاه سینوپتیک سمنان است. تئوری آشوب دارای ابزار مفیدی است که به کمک آنها می‌توان امکان وجود مکانیزم‌های آشوبی را در یک سیستم مشخص تشخیص داد. امکان وجود رفتارهای آشوبی در یک پدیده به معنای امکان یافتن الگوهای رفتاری مذکور می‌باشد که این خود احتمال موفقیت در پیش‌بینی فرایند را افزایش می‌دهد. سیستم‌های منابع آب به‌عنوان فرایندهای پویا، غیرخطی، حساس نسبت به تغییرات در شرایط اولیه، قابل پیش‌بینی و متأثر از الگوهای ذاتی و طبیعی هستند چنین سیستم‌هایی همراه با فرایندهای آشوب می‌باشند که شناخت الگوهای آشوبی آنها به مدیریت این سیستم‌ها کمک خواهد کرد.



شکل ۱. موقعیت ایستگاه سینوپتیک سمنان در سیستم مختصات جغرافیایی

با استفاده از مفاهیمی همچون زمان تأخیر، بُعد محاط، بُعد همبستگی، نمای لیاپانوف، پیش‌بینی و نمای هرست رفتار سیستم را بدون نیاز به معادلات شبیه‌سازی می‌کند. در این راستا پس از برآورد زمان تأخیر بهینه و بُعد محاط، امکان وجود آشوب در پارامتر تبخیر توسط شاخص بعد همبستگی با استفاده از زیربرنامه‌های TISEAN بررسی شد.

بازسازی فضای حالت

مفهوم فضای حالت، ابزاری سودمند برای مطالعه سیستم‌های دینامیک است. مطابق این مفهوم، یک سیستم دینامیک می‌تواند توسط نمودار فضای حالت تمامی متغیرهای مؤثر شرایط سیستم را در هر لحظه توصیف کند. به طوری که هر نقطه بیانگر رفتار سیستم در زمان مشخص می‌باشد.

تکنیک متداولی که توسط تاکنز (۱۸) ارائه شده از روش

آب استان سمنان است. در این بخش به معرفی مؤلفه‌های مربوط به بررسی آشوبناکی و ابزارهای مورد نظر برای شناخت سیستم آشوبی پدیده تبخیر شامل بازسازی فضای فاز و برآورد بعد همبستگی پرداخته می‌شود. جهت بررسی آشوبناکی تبخیر از اطلاعات اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری شهر سمنان طی یک دوره آماری از سال ۱۳۷۴-۱۳۹۷ در دو مقیاس زمانی روزانه و ماهانه استفاده شد.

نظریه آشوب

از مشخصه‌های یک سیستم آشوبناک، می‌توان به غیر پریودیک بودن، حساسیت به شرایط اولیه و غیر خطی بودن اشاره کرد. رسیدن به این مشخصه‌ها به راحتی میسر نبوده و مستلزم استخراج معادلات دیفرانسیلی است. نظریه آشوب

می‌شود. در این تحقیق، از روش AMI استفاده شده است. اساس تصور وجود اطلاعات در میان اندازه‌های اسکالر، مربوط به ایده شانون یعنی ایده اطلاعات متقابل است. اطلاعات متقابل بین اندازه $y(t)$ و اندازه $y(t+\tau)$ عبارت است از میزان فراگیری در مورد اندازه‌گیری $y(t+\tau)$ با استفاده از اندازه‌گیری $y(t)$ به صورت معادله (۴) قابل بیان است:

$$I(\tau) = \sum_{y(t), y(t+\tau)} P(y(t), y(t+\tau)) \cdot \log_2 \left[\frac{P(y(t), y(t+\tau))}{P(y(t)) \cdot P(y(t+\tau))} \right] \quad (4)$$

برای محاسبه میانگین اطلاعات متقابل $I(\tau)$ لازم است که احتمال‌های مجزای $P(y(t))$ ، $P(y(t+\tau))$ در رابطه (۴) تخمین زده شود. برای محاسبه آنها، هیستوگرام مربوط به $y(t)$ و $y(t+\tau)$ را در نظر گرفته و برای محاسبه احتمال مشترک $P(y(t), y(t+\tau))$ از هیستوگرام بردار $P(y(t))$ و $P(y(t+\tau))$ استفاده می‌شود (۱۹).

متداول‌ترین روش تعیین بُعد محاط بهینه (m) از سری‌های زمانی آشوبی، روش شمارش نزدیک‌ترین همسایگی 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. در این روش، ابتدا با در نظر گرفتن m مؤلفه برای هر بردار تأخیر، می‌توان بردارهای تأخیر $Y_i(t)$ را مطابق معادله (۵) در فضای محاط تشکیل داد:

$$Y_i(t) = [y(t), y(t-\tau), \dots, y(t-(m-1)\tau)]^T \quad (5)$$

که τ امین همسایه هر بردار تأخیر، $Y_i(t)$ ، به شکل زیر است (۱۴):

$$Y_r^{NN}(t) = [y(t_r), y(t_r - (m-1)\tau)]^T \quad (6)$$

و فاصله بین دو بردار همسایه بر اساس نرم اقلیدسی به صورت زیر محاسبه می‌شود:

زمان تأخیر برای نگاشتن یک سری زمانی واحد در یک فضای d_e بعدی استفاده می‌کند. روش تاکن به بیان ساده به این صورت است که شبکه‌ای به طول m از روی سری زمانی عبور داده می‌شود و به این ترتیب یک ماتریس با تعداد سطرها برابر m تشکیل می‌یابد. برای سری زمانی معادله (۱)، خط سیر ماتریس بازسازی به شکل معادله (۲) است:

$$x(t) = (x_0, x_1, x_2, x_3, \dots, x_{m-1}, \dots) \quad (1)$$

$$x = \begin{matrix} x_0 & x_1 & x_2 & \dots & x_{m-1} \\ x_1 & x_1 & x_2 & \dots & x_m \\ x_2 & x_1 & x_2 & \dots & x_{m+1} \end{matrix} \quad (2)$$

تاکنز (۱۸) نشان داد که چنین ماتریسی کلیه ویژگی‌های هندسی سیستم دینامیک اولیه را بدون آنکه با خودش برخوردی داشته باشد بیان می‌کند. فضای حالت می‌تواند با استفاده از تأخیرهای سری زمانی اسکالر در $t=1, 2, 3, \dots$ ایجاد شود. زمان تأخیر بر اساس ایده ارزیابی اثر متقابل متغیرها بر یکدیگر محاسبه می‌شود. در واقع، طبق این ایده، حداکثر فاصله متغیرها که دارای اثر بر یکدیگر هستند به عنوان تأخیر زمانی محاسبه و معرفی می‌شود. از این رو، اطلاعات هر متغیر وابسته در تاریخچه هر متغیر مستقل دیگر سیستم وجود خواهد داشت. بر مبنای چنین معادل‌سازی، فضای حالت می‌تواند با استفاده از متغیر x_t در سری‌های زمانی ایجاد شود و تأخیر آن مطابق با سری زمانی جدید خواهد بود.

$$Y_t = \{x_t, x_{t-\tau}, x_{t-2\tau}, \dots, x_{t-(m-1)\tau}\} \quad (3)$$

که τ نشان‌دهنده زمان تأخیر بوده و m اندازه بُعد محاط شده را نشان می‌دهد (۷).

برای تقریب زمان تأخیر (τ) معمولاً از دو روش میانگین اطلاعات متقابل و تابع خودهمبستگی استفاده می‌شود. در روش اول، زمان رخ دادن اولین مینیمم در تابع میانگین اطلاعات (AMI) متقابل به عنوان زمان تأخیر مناسب و در روش دوم محلی که در آن اولین مقدار ACF به صفر یا کمتر از مقدار کوچکی (مانند ۰/۱ یا ۰/۲) می‌رسد برابر زمان تأخیر انتخاب

ایستگاه سینوپتیک سمنان رفته رفته از سال‌های ابتدای سری زمانی (۱۳۷۴) با نزدیک شدن به سال‌های انتهایی سری زمانی مورد بررسی (۱۳۹۷) روند افزایشی نشان داد. نمودارهای سری زمانی تبخیر روزانه و ماهانه در زیر نمایش داده شده است که ابتدای نمودار از فروردین ماه است.

با توجه به مقادیر به دست آمده، زمان تأخیر از روش میانگین اطلاعات متقابل نمودارهای فضای حالت دوتبعی تبخیر در مقیاس‌های روزانه و ماهانه در شکل ۴ رسم شده است. در این شکل، با تغییر مقیاس زمانی روزانه به ماهانه، تفکیک پذیری خط سیرها به طور واضح تری قابل مشاهده است. با توجه به وضعیت قرارگیری مسیرهای شکل گرفته در فضای دوبعدی فضای فاز می‌توان دریافت که جاذب‌های مربوط به سیستم دینامیک از یک روند مشخص تبعیت کرده و بنابراین، تشخیص آشوبناک و تصادفی بودن سیستم راحت تر است اما باز هم نیاز به بررسی بیشتر دارد که یکی از معمول ترین روش‌ها بعد همبستگی است.

برای بازسازی فضای حالت دینامیک و تعیین ابعاد معادلات دیفرانسیلی وابسته به زمان، نخستین مرحله تخمین پارامترهای زمان تأخیر (τ) و بُعد محاط (m) است. در این پژوهش، سری داده‌های تبخیر روزانه و ماهانه طی ۲۳ سال جهت ایجاد فضای حالت (تخمین زمان تأخیر با میانگین اطلاعات متقابل و بُعد محاط با نزدیکترین همسایگی کاذب) به کار گرفته شده است. استفاده از تابع اطلاعات متقابل (AMI)، اولین گام در جهت بازسازی فضای حالت به شمار می‌رود. بدین منظور، زمان مربوط به اولین حداقل این تابع به عنوان مناسب ترین زمان تأخیر (τ) در بازسازی فضای حالت پیش بینی شده است. همانطور که از شکل‌های ۵ و ۶ مشخص است، اولین نقاط حداقل روزانه و ماهانه به ترتیب مربوط به زمان تأخیر برای تبخیر روزانه $\tau=30$ و ماهانه $\tau=3$ است.

$$R_M^2 = \sum_{i=0}^{M-1} [y(t-it) - y(t_r - it)]^T \quad (7)$$

اگر بردار $Y_i^{NN}(t)$ یک همسایه واقعی برای بردار $Y_i(t)$ باشد، این همسایگی نشأت گرفته از ماهیت دینامیک سیستم است. ولی اگر این همسایگی در اثر تصویر از یک فضای با بُعد بالاتر به فضایی با بُعد پایین صورت گرفته باشد، در این صورت با رفتن از بُعد m به $m+1$ این همسایگی کاذب از همسایگی بردار $Y_i(t)$ خارج می‌شود. با افزایش بُعد m به $m+1$ ، مؤلفه‌های اضافه شده به بردارهای تأخیر $Y_i(t)$ و $Y_i^{NN}(t)$ 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 زیر است:

$$R_{M+1}^2 = R_M^2 + [y(t-m\tau) - y(t_r - m\tau)]^2 \quad (8)$$

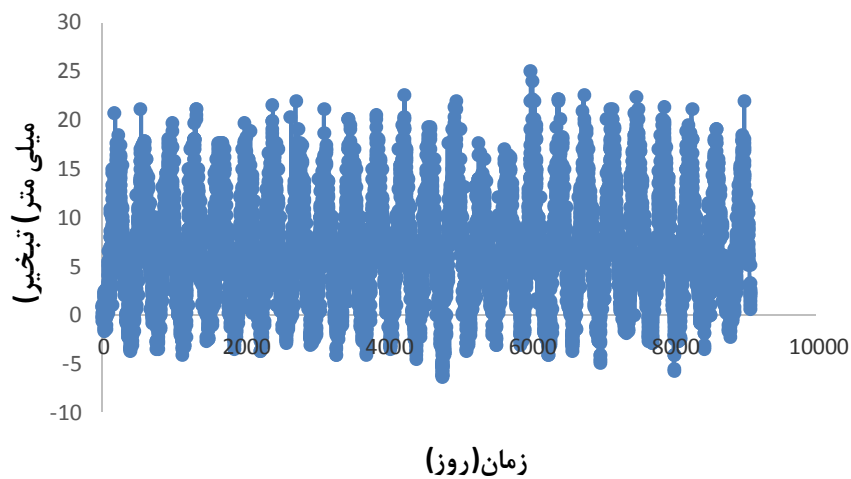
بنابراین، فاصله اضافه شده در فضای $m+1$ بُعدی را نسبت به فاصله دو بردار در فضای m بُعدی به صورت زیر خواهیم داشت:

$$\sqrt{\frac{R_{m+1}^2 - R_m^2}{R_m^2}} = \frac{|y(t-m\tau) - y(t_r - m\tau)|}{R_m} \quad (9)$$

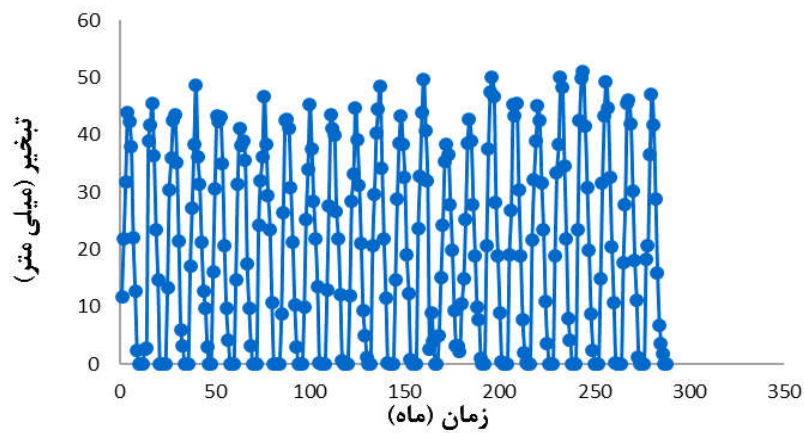
هر گاه کمیت فوق‌الذکر از یک مقدار آستانه (حدود ۱۵-۱۰) فراتر رود، همسایه تحت بررسی کاذب در نظر گرفته می‌شود (۱۴).

نتایج و بحث

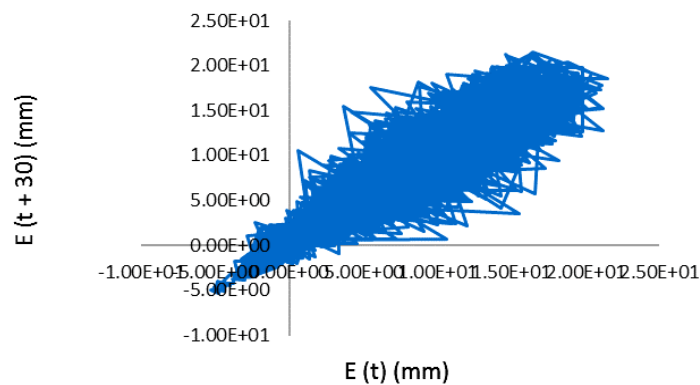
در این مطالعه، از ۲۳ سال (۱۳۷۴-۹۷) اطلاعات روزانه و ماهانه تبخیر از تشت تبخیر کلاس A ایستگاه سینوپتیک سمنان استفاده شده که نمودار سری زمانی آنها در شکل‌های ۲ و ۳ نشان داده شده است. میزان تبخیر روزانه، ماهانه و سالانه این ایستگاه سینوپتیک به ترتیب ۸/۶۸، ۲۰۰ و ۲۶۰۰ میلی‌متر محاسبه شد. که بیشترین و کمترین میزان تبخیر ماهانه به ترتیب مربوط به خرداد و بهمن ماه بود. و به طور کلی پدیده تبخیر در



شکل ۲. سری زمانی تبخیر روزانه ایستگاه سینوپتیک سمنان در دوره آماری مورد مطالعه

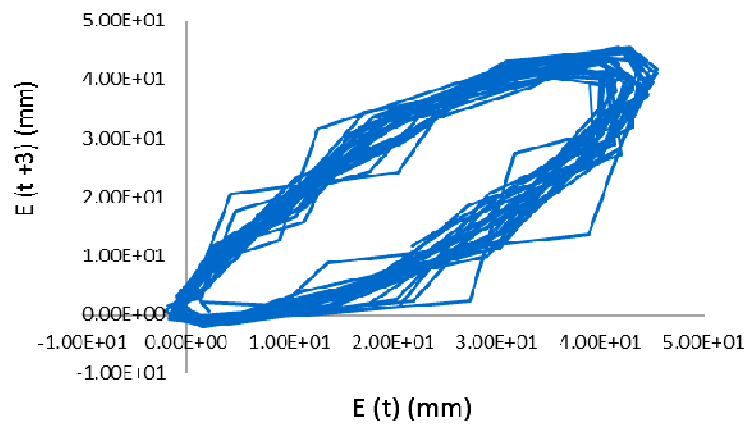


شکل ۳. سری زمانی تبخیر ماهانه ایستگاه سینوپتیک سمنان در دوره آماری مورد مطالعه

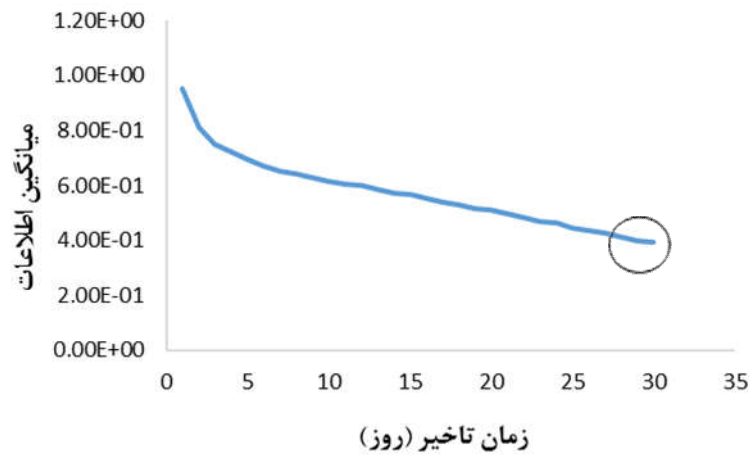


الف) دیاگرام فضای فاز داده‌های روزانه

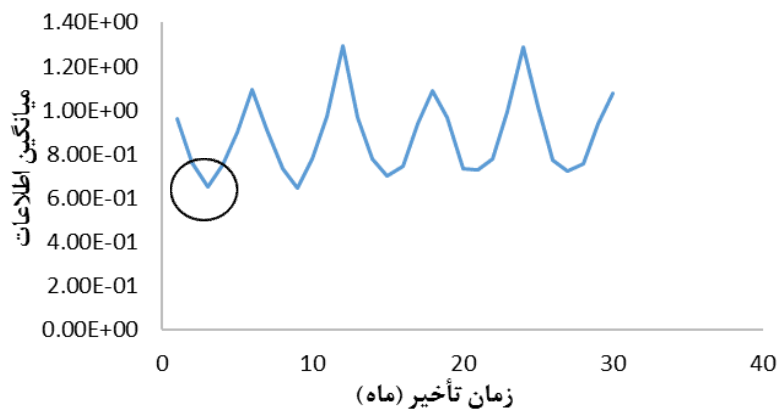
شکل ۴. دیاگرام فضای فاز تبخیر در ایستگاه هواشناسی سمنان در دوره آماری مورد مطالعه؛ الف) داده‌های روزانه؛ ب) داده‌های ماهانه



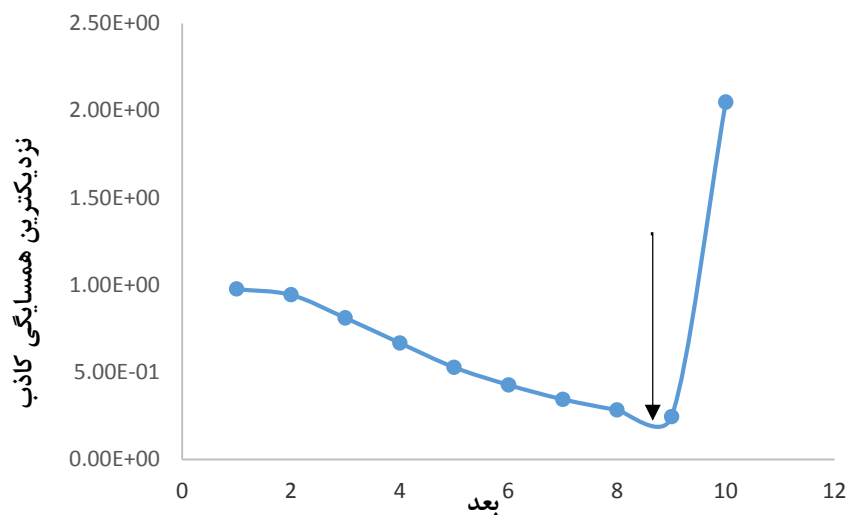
ب) دیاگرام فضای فاز داده‌های ماهانه
ادامه شکل ۴



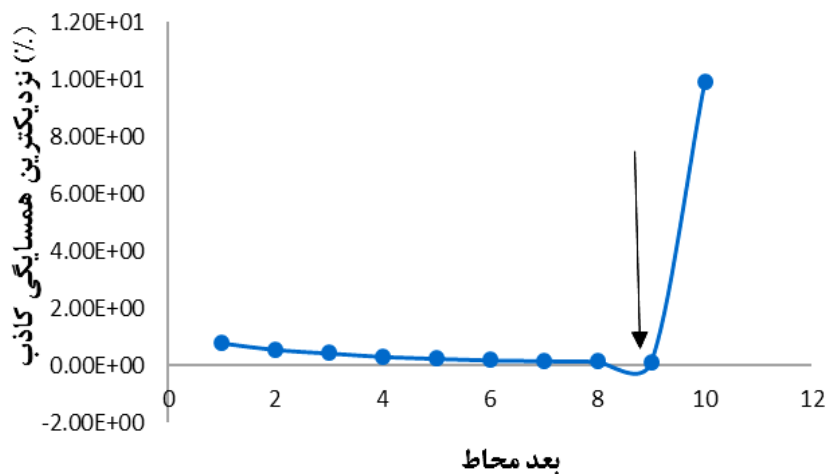
شکل ۵. تغییرات زمان تأخیر بر حسب روز در مقابل میانگین اطلاعات متقابل (AMI) و تعیین نقطه حداقل برای تبخیر



شکل ۶. تغییرات ماهانه زمان تأخیر در مقابل میانگین اطلاعات متقابل (AMI) و تعیین نقطه حداقل برای تبخیر



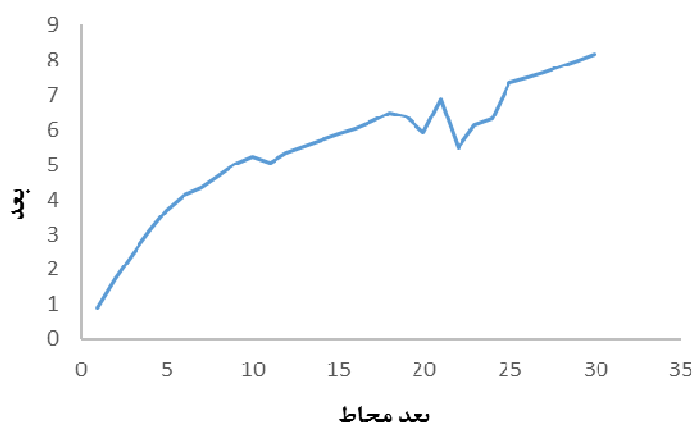
شکل ۷. تغییرات دانسیته FNN در مقابل بُعد محاط m برای تبخیر روزانه



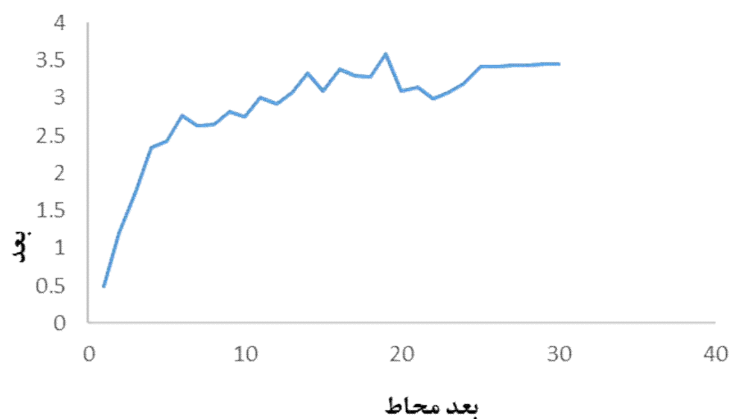
شکل ۸. تغییرات دانسیته FNN در مقابل بُعد محاط m برای تبخیر ماهانه

رسم شده است. نقطه متناظر با اولین مینیمم موضعی به عنوان بُعد محاط بهینه انتخاب می‌شود. تغییرات دانسیته FNN در مقابل بُعد محاط m برای سری زمانی تبخیر در شکل‌های ۹ و ۱۰ نشان داده شده است. همانطور که از شکل‌ها مشخص است، مقدار بهینه بُعد محاط

شیوه تعیین بُعد محاط، مبتنی بر محاسبه درصد نزدیکترین همسایگی کاذب برای سری زمانی است. بدین منظور، مقادیر درصد نزدیکترین همسایگی کاذب به ازای مقادیر مختلف بُعد محاط برای ایستگاه سینوپتیک سمنان در مقیاس‌های مختلف روزانه و ماهانه در شکل‌های ۷ و ۸



شکل ۹. بُعد همبستگی به ازای ابعاد محاط مختلف تبخیر در ایستگاه سینوپتیک سمنان و سری زمانی روزانه



شکل ۱۰. بُعد همبستگی به ازای ابعاد محاط مختلف تبخیر در ایستگاه سینوپتیک سمنان و سری زمانی ماهانه

حساسیت آن به شرایط اولیه است. تعیین ماهیت پدیده‌ها در جهت پیش‌بینی، برنامه‌ریزی‌های آبی برای پدیده مورد نظر و ... مفید می‌باشد.

نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که داده‌های ماهانه آشوبی‌تر از داده‌های روزانه می‌باشد که با نتایج فتاحی و تراهی (۴) که به بررسی رفتارنگاری آشوبی رودخانه به کمک روش توسعه فضای فاز پرداختند و نتایج بیانگر آشوبی‌تر بودن داده‌های ماهانه از داده‌های هفتگی و روزانه بود مطابق می‌باشد. یافته‌ها پژوهش حاضر با نتایج تحقیقی که آشوبناکی تبخیر از سطح آب دریاچه ارومیه را در طی یک دوره ۴۰ ساله ارزیابی آشوبی بودن سیستم را گزارش کردند مطابق می‌باشد (۳).

(m) برابر ۳ است. تبخیر از سطح آب مهمترین عامل خروج آب از سطح دریاچه‌ها، استخرها و ... می‌باشد. در این پژوهش مقادیر ماهانه و روزانه آن در طی یک دوره زمانی ۲۳ ساله مورد بررسی قرار گرفت. برای استفاده از قضیه ابعاد نشاننده مقدار تأخیر زمانی (τ)، برابر با اولین مینیمم تابع اطلاعات متقابل در نظر گرفته می‌شود (شکل ۶)، زمان تأخیر روزانه داده‌ها برابر با ۳۰ روز و زمان تأخیر ماهانه داده‌ها برابر با ۳ ماه بدست آمد. برای بررسی آشوبناک بودن سیستم در ادامه بُعد همبستگی (شکل ۱۰) آورده شده است. مقادیر غیر صحیح شیب نمودار بُعد همبستگی در مقابل شعاع همبستگی به وضوح نشان‌دهنده آشوبی بودن سیستم و

نتیجه گیری

در این پژوهش، با به کارگیری شاخص‌ها و تحلیل‌های غیر خطی و آشوبی و ارزیابی آنها، وضعیت دینامیک سری زمانی تبخیر و تأثیر مقیاس زمانی بر تبخیر در ایستگاه سینوپتیک سمنان به‌عنوان یکی از ایستگاه‌های معرف مناطق خشک و نیمه‌خشک در دو مقیاس زمانی روزانه و ماهانه طول دوره آماری ۹۷-۱۳۷۴ مورد بررسی قرار گرفت. از نتایج بدست آمده در این پژوهش می‌توان چنین جمع‌بندی کرد که: - ابتدا بعد تعیبه به روش نزدیکترین همسایگی کاذب برابر با ۳ محاسبه شد. جهت محاسبه زمان تأخیر، نمودارهای متقابل تبخیر در ایستگاه سمنان در مقیاس‌های زمانی مختلف، رسم شد. براساس این روش، اولین مینیمم محلی در نمودار

به‌عنوان زمان تأخیر در نظر گرفته می‌شود که این مقادیر برای تبخیر در مقیاس‌های زمانی روزانه و ماهانه به ترتیب ۳۰ و ۳ به‌دست آمد.

- برآورد بُعد همبستگی در ایستگاه سینوپتیک سمنان در دو مقیاس روزانه و ماهانه به ترتیب ۸/۸ و ۸/۹ بدست آمدند که مقادیر غیر صحیح این پارامتر مبین آشوبی بودن تبخیر در این ایستگاه است. برخلاف روش‌های پیچیده و محاسباتی مرسوم، همه‌ی این نتایج با مشاهده و در حداقل زمان حاصل می‌شود. پیشنهاد می‌شود که در پژوهش‌های آتی معیارهای دیگر تعیین‌کننده آشوبی مورد بررسی قرار گیرد. همچنین عوامل مؤثر بر روند آشوبی ارزیابی شود و پیش‌بینی سیستم بر اساس آشوب و دیگر مدل‌ها و مقایسه نیز مورد بررسی قرار گیرد.

منابع مورد استفاده

1. Bostani, M., S. F. Mousavi, H. Karami and S. Farzin. 2019. Analysis of river parameters using indicators based on turbulence theory (Case study: Zayandehrood river discharge). *Iranian Water Resources Research* 14 (4): 276-280 (In Farsi).
2. Dhanya, C. T. and D. N. Kumar. 2010. Nonlinear ensemble prediction of chaotic daily rainfall. *Advances in Water Resources* 33: 327-347 (In Farsi).
3. Farzin, S., R. Hajiabadi and M. H. Ahmadi. 2018. Application of turbulence theory and artificial neural network in the study and estimation of the water level of lakes. *Journal of Water and Soil (Agricultural Sciences and Industries)* 31(1): 61-74 (In Farsi).
4. Fatahi, M. and H. M. Tarahi. 2018. Chaotic behavior of the river with the help of phase space development method. *Water Resources Science and Engineering Association* 13(2): 221-225 (In Farsi).
5. Ferreira, L. B., F. Feranca Da Cunha, R. Alves De Olivera and Fernandes and E. I. Filho. 2019. Estimation of reference evapotranspiration in Brazil with limited meteorological data using ANN and SVM- A new approach. *Journal of Hydrology* 527: 556-570.
6. Jayawardena, A. W. and F. Lai. 1994. Analysis and prediction of chaos in rainfall and stream flow time series. *Journal of Hydrology* 153: 23-52.
7. Kennel M., Brown R. and H. D. I. Abarbanel 1992. Determining embedding dimension for phase- space reconstruction using a geometrical construction. *Physical Review A*. 45(6): 3403-3411.
8. Kocak, K., A. Bali and B. Bektasoglu. 2007. Prediction of monthly flows by using chaotic approach. In: International Congress on River Basin Management, Antalya, Turkey.
9. Kumar Goyal, M., B. Birendra, J. Quilty, J. Adamowksi and A. Pandey. 2017. Modeling of daily pan evaporation in sub-tropical climates using ANN, LS-SVR, Fuzzy Logic, and ANFIS. *Expert Systems with Applications* 41: 5267-5276.
10. Men, B., X. Zhao and C. Liang. 2004. Chaotic Analysis on Monthly Precipitation on Hills Region in Middle Sichuan of China. *Nature and Science* 2(2): 45-51.
11. Ng, W.W., U. S. Panu and W.C. Lennox. 2007. Chaos based Analytical techniques for daily extreme hydrological observations. *Journal of Hydrology* 342: 17-41.
12. Shang, P., X. Na and S. Kamae. 2009. Chaotic Analysis of time series in the sediment transport phenomenon. *Chaos Solitons and Fractals* 41(1): 368-379.
13. Sivakumar, B., R. Berndtsson, J. Olsson, K. Jinno and A. Kawamura. 2000. Dynamics of monthly rainfall-runoff process at the Gota basin: A search for chaos. *Hydrology and Earth System Sciences* 4(3): 407-417.
14. Sivakumar, B. 2001. Rainfall dynamics at different temporal scales: a chaotic perspective. *Hydrology and Earth System Sciences* 5(4): 645-651.

15. Sivakumar B. and R. Brendsston 2010. Advances in Data-based Approaches for Hydrologic Modeling and Forecasting. World Scientific, Singapore.
16. Sivakumar, B., S. Y. Liong and C.Y. Lia. 1998. Evidence of chaotic behavior in Singapore rainfall. *Journal of the American Water Resources Association* 34(2): 301-310.
17. Tavakoli, A. and H. Babazadeh. 2016. Evaluation of the capability of time series models and chaos theory in estimating the transpiration evaporation of the reference plant (Torbat Heydariyeh synoptic station, Khorasan Razavi). *Iranian Journal of Water Research* 2(9): 111-120 (In Farsi).
18. Takens, F. 1981. Detecting strange attractors in turbulence. PP. 366-381. *In: D. A. Rand and L.S. Young. Dynamical Systems and Turbulence. Lecture Notes in Mathematics.*
19. Zanganeh P., M. Ataiee and P. Moalem. 2008. Estimation of the enclosed dimension of time series resulting from high-dimensional chaotic systems by time-delayed and distributed neural networks. *In: The Second Joint Congress of Iranian Fuzzy and Intelligent Systems. University of Esfahan, Esfahan, Iran.*
20. Zonemat Kermani, M., Kh. Amirkhani and M. Rahimpour. 2016. Investigation of turbulence and reconstruction of dynamic phase atmosphere of precipitation on daily, weekly and monthly scales (Case study: Gharasoo basin in Kermanshah). *Echohydrology* 2(1): 79-90 (In Farsi).
21. Zonemat Kermani, M., and Y. R. Bay. 2014. Evaluation of the effectiveness of methods based on artificial neural networks and multivariate linear regression in prediction. *Oceanography* 13: 1-10 (In Farsi).

Chaotic Study and Reconstruction of the Dynamic Phase Space of Evaporation Using Chaos Theory (Case Study: Semnan Synoptic Station)

F. Hoshmandzadeh¹, M. R. Yazdani^{1*} and S. F. Mousavi²

(Received: March 28-2021; Accepted: June 16-2021)

Abstract

Investigating the behavior of water surface evaporation is one of the basic issues in design, operation, and studies related to water engineering. Therefore, the application of new methods such as chaos theory in hydrology and water resources has recently been considered due to its innovation and capabilities. Since the fluctuations of evaporation from free water surfaces are dynamic and non-linear in nature, the aim of this study was to investigate the possibility of chaotic behavior in evaporation from the free water surface in the Semnan synoptic station on daily and monthly time scales in 1995-2018 using the concepts of chaos theory. The daily, monthly, and annual evaporation rates of this synoptic station were calculated to be 68.8, 200, and 2600 mm, respectively. To reconstruct the state space, two parameters of delay time and embedding dimension are needed. The mean of mutual information and false nearest neighborhood has been used to estimate these two parameters. The first step to study a process with chaos theory is to investigate the chaotic nature of the correlation dimension method as one of the most common methods. First, the embedded dimension was calculated by the nearest neighborhood method equal to 3. To calculate the delay time, cross-evaporation diagrams were drawn at Semnan station at different time scales. According to this method, the first local minimum in the diagram is considered the latency, which was obtained for evaporation at daily and monthly scales of 30 and 3, respectively. Unlike complicated and conventional computational methods, these results are obtained by observation and in the least amount of time, as follows: monthly data are more chaotic than daily data. The enclosed dimension and the slope of the correlation dimension diagram were obtained at 8.8 and 9.8, respectively, after calculating the latency and reconstruction of the state space.

Keywords: Correlation dimension, Chaos theory, Dynamic nature, Nearest False Neighborhood

1. Department of Combat Desertification, Faculty of Desert Studies, Semnan University, Semnan, Iran.

2. Department of Water Engineering and Hydraulic Structures, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran.

*: Corresponding author, m_yazdani@semnan.ac.ir