

Monthly flow analysis of Sefidrood River using Chaos theory

Hossein Rezaei¹, Parisa Garebaghi², Zabihollah Khani Temeliyeh^{3*}, Rasoul Mirabbasi-Najafabadi⁴

¹ Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran

² Graduated M.Sc. Student, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran

³ Graduated Ph.D. Student, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran

⁴ Associate professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Shahrkord, Shahrkord, Iran

Abstract

Introduction

Measuring complexity and ways to reduce it in organizations and decision-making processes has become one of the topics of the day. The chaos theory was proposed in the 1960s, and the most effective and most successful effort was made by Edward Lorenz. Towards this, the flow rate of Sefidrood River as the most important river in Guilan Province and the second-longest river in Iran was studied using Chaos theory.

Materials and Methods

The study area in this research is a sub-basin of the Sefidrood River Basin. After collecting the monthly and annual discharge data of Sefidrood River, the following items were investigated:

1- chaotic dynamic systems, 2- phase space reconstruction, 3- determining the time delay, 4- determining the embedding dimension, 5- determining the correlation dimension, and 6- determining the Lyapunov and Hurst exponents.

Results and Discussion

In determining the delay time using the autocorrelation function (ACF) curve, the appropriate lag is where the graph reaches a value close to zero or about 0.1 to 0.2. An appropriate embedding dimension is an embedded dimension in which the number of false neighbors has reached to about zero. For a lag of 1-month, the delay vectors are concentrated around the diagonal axis of space. Therefore, $X(t)$ and $X(t + 1)$ are very close and continuous. Therefore, they will cause the characteristics of the adsorbent structure to be lost. Also in the state (phase) space for the delay time of 100 months, the density of lag vectors is close to the horizontal and vertical axes of the graph and indicates the incoherence and complexity of successive components in the lag vectors and its inadequacy to achieve system dynamics. However, due to the 5 months delay state space obtained from the average actual information (AMI) method, the delay vectors have a better distribution and the state space is well filled with points. The correlation dimension of the monthly time series is 3.37.

Conclusion

The presence of stochastic behavior in the river flow was determined using the correlation dimension test and Hurst exponent. The correlation exponent was saturated after increasing the embedded dimension in an incorrect value equal to 3.37. In addition, the closest correct value to the correlation dimension indicates the minimum variables required to describe the system, which is a value of 4. The obtained Hurst exponent is opposite to 0.5 and according to Hurst studies, it indicates the non-randomness and the presence of chaos in the river. The Hurst exponent obtained in daily scales is between 0.5 and 1 and indicates the existence of long-term memory in this series.

Keywords: Correlation; Delay time; Embedding dimension; Hurst; Phase space.

Article Type: Research Article

*Corresponding Author, E-mail: z.khani1060@yahoo.com

Citation: Rezaei, H., Garebaghi, P., Khani Temeliyeh, Z., & Mirabbasi-Najafabadi, R. (2022). Monthly flow analysis of Sefidrood River using Chaos theory. *Water and Soil Management and Modeling*, 2(1), 27-41.

DOI: 10.22098/MMWS.2021.9431.1043

DOR: 20.1001.1.27832546.1401.2.1.3.8

Received: 22 August 2021, Accepted: 05 October 2021

Water and Soil Management and Modeling, Year 2022, Vol. 2, No. 1, pp. 27-41

Publisher: University of Mohaghegh Ardabil

© Author(s)





تحلیل جریان ماهانه رودخانه سفیدرود با استفاده از تئوری آشوب

حسین رضایی^۱، پریسا قره‌باغی^۲، ذبیح‌الله خانی‌تملیه^{۳*}، رسول میرعباسی نجف‌آبادی^۴

^۱ استاد، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

^۲ دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

^۳ دانش‌آموخته دکتری، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

^۴ دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران

چکیده

بررسی جریان رودخانه از بُعد آشوب یکی از موارد اساسی در طراحی، بهره‌برداری و مطالعات مربوط به مهندسی آب است. از این رو به‌کارگیری روش‌های نوین در هیدرولوژی و منابع آب، اخیراً توجه زیادی به خود جلب کرده است. پدیده آشوب مرتبط با سیستم‌هایی است که دینامیک آن‌ها در برابر تغییر مقادیر اولیه رفتار بسیار حساسی نشان می‌دهد. در مواجهه با سیستم آشوبی که مدل‌سازی تحلیلی به‌علت نامشخص بودن عوامل تأثیرگذار و در دسترس نبودن معادلات دقیق ریاضی حاکم بر آن بسیار دشوار می‌نماید، استفاده از سری‌های زمانی یک‌راه حل مناسب در تحلیل این دستگاه‌هاست. برای بازسازی فضای حالت با استفاده از نظریه آشوب نیاز به برآورد دو پارامتر زمان تأخیر و بُعد محاط است. در این پژوهش با استفاده از آمار ۶۳ ساله جریان ماهانه رودخانه سفیدرود، از روش میانگین اطلاعات متقابل و روش شمارش نزدیک‌ترین همسایه‌های کاذب برای محاسبه این دو پارامتر استفاده شد. برای تعیین آشوب‌پذیری نیز از آزمون بُعد همبستگی و شاخص هارست استفاده شد. نتایج حاکی از بُعد فرکتالی بر اساس بُعد همبستگی برابر با ۳/۳۷ و زمان تأخیر ۵ ماه و بُعد محاط ۶ است که برای بازسازی فضای حالت دینامیکی جریان رودخانه می‌تواند استفاده شود. اهمیت بررسی موازی سری‌های زمانی در مقیاس‌های مختلف (روزانه، هفتگی، ماهانه) به جهت بررسی تأثیر مقیاس زمانی و نوسانات سری زمانی بر تحلیل‌های آشوبی و در نهایت انتخاب چارچوب مدل مناسب است. زمان تأخیرهای به‌دست آمده برای سری‌های روزانه، هفتگی و ماهانه حاکی از وجود وابستگی بیش‌تر بین داده‌های روزانه نسبت به داده‌های هفتگی و ماهانه است؛ که این موضوع در تحلیل جریان‌های سیلابی و استخراج مشخصه‌های آن از اهمیت به‌سزایی برخوردار است. با اثبات وجود آشوب در سری‌های زمانی در جریان رودخانه در مقیاس‌های مختلف، استفاده از روش‌های پیش‌بینی بر پایه بازسازی فضای حالت را امکان‌پذیر نموده که این مورد جهت تحلیل خشکسالی‌ها، جریان‌های سیلابی و تحلیل حجم مخازن ذخیره سدها با روش‌های مختلف بر مبنای سری‌های زمانی، از جنبه‌های کاربردی موضوع است.

واژه‌های کلیدی: بُعد محاط، زمان تأخیر، فضای حالت، هارست، همبستگی

نوع مقاله: پژوهشی

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: z.khani1060@yahoo.com

استناد: رضایی، ح.، قره‌باغی، پ.، خانی‌تملیه، ذ.ا.، و میرعباسی نجف‌آبادی، ر. (۱۴۰۰). تحلیل جریان ماهانه رودخانه سفیدرود با استفاده از تئوری آشوب. *مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک*، ۲(۱)، ۲۷-۴۱.

DOI: 10.22098/MMWS.2021.9431.1043

DOR: 20.1001.1.27832546.1401.2.1.3.8

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۵/۳۱، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۷/۱۲

مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک، سال ۱۴۰۱، دوره ۲، شماره ۱، صفحه ۲۷ تا ۴۱

© نویسندگان

ناشر: دانشگاه محقق اردبیلی



۱- مقدمه

در سالیان اخیر رفتارهای غیرخطی و دینامیک سیستم‌ها به‌طور گسترده مطالعه شده است؛ یعنی رفتارهایی که منجر به پیچیدگی و در نهایت آشوب می‌شوند. مطالعه شیوه رفتارها، منتهی به وضع قوانین جدیدی در طبیعت نشده، اما موجب پیشرفت در درک عمیق‌تر قوانین موجود شده است. یکی از نکات جالب توجه در پیچیدگی این است که به‌رغم تصورات پیشین، قوانین ساده می‌توانند منجر به بروز رفتارهای بسیار پیچیده شوند. این موضوع می‌تواند منجر به شناخت عمیق‌تر عملکرد سامانه‌ها و رفتارهای اجتماعی و سازمانی شود. بنابراین، در حال حاضر اندازه‌گیری پیچیدگی و راه‌های کاهش آن در سازمان‌ها و فرآیندهای تصمیم‌گیری به یکی از مباحث روز تبدیل شده است. تئوری آشوب در دهه ۱۹۶۰ میلادی ارائه شد که مؤثرترین و بیش‌ترین تلاش در این زمینه، توسط ادوارد لورنز صورت گرفت. نظریه آشوب برای اولین بار در سال ۱۹۶۵ در بخش هواشناسی به‌کار گرفته شد و سپس در تمام علوم و مباحث تجربی، ریاضی، رفتاری، مدیریتی و اجتماعی وارد شده است که اساس تغییرات بنیادی در علوم به‌ویژه هواشناسی، نجوم، مکانیک، فیزیک، ریاضی، زیست‌شناسی، اقتصاد و مدیریت را فراهم آورده است (Kocak et al., 2007).

بازسازی فضای حالت رواناب ماهانه، بر حوضه گوتا^۱ واقع در شمال برزیل (Sivakumar (2001) مورد مطالعه قرار گرفت. در این مطالعه، مقادیر شبیه‌سازی شده در مقابل مشاهداتی با ضریب همبستگی (۰/۸۹) و نش-ساتکلیف (۰/۹۴) محاسبه شدند. تحت شرایط استفاده از روش غیرخطی با بُعد فرکتالی ۵/۵ دارای آشوب‌ناکی کم در رودخانه کوآرسی^۲ شبیه‌سازی انجام شد.

Regonda et al. (2004) با استفاده از داده‌های جریان سه رودخانه در مقیاس‌های زمانی مختلف پنج‌روزه و هفت‌روزه آشوب‌پذیری را مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاصل از پژوهش ایشان مشخص نمود که تعدادی از سری داده‌ها دارای رفتار آشوب‌ناک و برخی رفتار تصادفی هستند. (Khan et al. (2005) با استفاده از روش بُعد همبستگی به بررسی رفتار آشوبی در داده‌های هیدرولوژیکی با طول دوره آماری کم پرداختند. نتایج حاکی از اطمینان‌بخش بودن این روش در مطالعه رفتار آشوب‌ناکی سری‌های زمانی بوده است. آن‌ها امکان وجود سیگنال‌های آشوبی در سری‌های زمانی محدود را بررسی کردند و نشان دادند که داده‌های هیدرولوژیکی محدود هم می‌توانند رفتار آشوب‌ناکی از خود نشان دهند.

Kocak et al. (2007) نیز با استفاده از مدل پیش‌بینی

موضعی نظریه آشوب، پیش‌بینی جریان ماهانه سد یاملا^۳ را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج حاصل از پژوهش ایشان نشان داد که پیش‌بینی‌های کوتاه‌مدت، نتیجه بهتری نسبت به روش‌های استدلالی و شبکه عصبی دارند. پیش‌بینی حجم سیلاب‌ها با استفاده از نظریه آشوب توسط (Damle and Yalcin (2007) انجام شد. آن‌ها نتیجه گرفتند که مقادیر شبیه‌سازی شده با نظریه آشوب نسبت به مدل سری‌های زمانی دقت بیش‌تری دارد. (Ng et al. (2007) نیز کاربرد روش‌های تحلیلی آشوب‌ناک را بر سری‌های جریان نویزدار روزانه بررسی کردند. آن‌ها در این پژوهش تأثیرگذار، نامنظمی را در پیچیدگی یک سیستم به‌لحاظ کمی بررسی نموده و نشان دادند که وجود نامنظمی باعث افزایش پیچیدگی تحلیل سری‌های زمانی شده است. (Ghorbani et al. (2010) از روش بُعد همبستگی و ماکزیمم نمای لیاپانوف برای بررسی رفتار آشوبی دبی روزانه رودخانه کیزیلیرماک^۴ ترکیه استفاده نمودند که نتایج پژوهش بیان‌گر آشوب‌ناکی سری زمانی مورد مطالعه بوده است. (Pari Zanganeh et al. (2010) نیز از روش هوشمند برای تخمین پارامتر بُعد محاط جهت بازسازی فضای حالت سری‌های زمانی منتج از سیستم دینامیکی آشوبی به کمک شبکه عصبی تأخیر زمانی استفاده کردند که یک روش جدیدی برای محاسبه بُعد محاط پیشنهاد نمودند.

Ghaheri et al. (2012) جریان رودخانه اهر آذربایجان شرقی را با استفاده از نظریه آشوب مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها در این پژوهش با استفاده از روش میانگین اطلاعات متقابل و روش نزدیک‌ترین همسایگی کاذب برای برآورد پارامترها استفاده کردند. جهت تعیین بُعد فرکتالی و بررسی میزان آشوب‌پذیری سری زمانی (جریان روزانه رودخانه) روش بُعد همبستگی استفاده شد. نتایج حاصل از محاسبات بیان‌گر بُعد فرکتالی ۴ (آشوب‌ناکی کم)، با زمان تأخیر ۶۵ روز و بُعد محاط ۱۳ است که برای بازسازی فضای حالت دینامیکی جریان رودخانه می‌تواند استفاده شود. از الگوریتم پیش‌بینی موضعی جهت پیش‌بینی سری زمانی و از معیارهای ارزیابی ضریب همبستگی و نش-ساتکلیف و مجذور مربعات خطا جهت سنجش دقت مدل استفاده شد. نتایج حاصل حاکی از دقت قابل قبول و مناسب نظریه آشوب در پیش‌بینی جریان رودخانه اهرچای است. (Hassanzadeh et al. (2012) به بررسی ماهیت آشوب‌ناکی نوسانات روزانه تراز آب دریاچه ارومیه پرداختند. اولین گام تعیین بُعد همبستگی از مرسوم‌ترین این روش‌هاست. بدین‌منظور پس از محاسبه زمان تأخیر و بازسازی فضای حالت، بُعد محاط با استفاده از توابع خودهمبستگی و الگوریتم نزدیک‌ترین همسایگی کاذب تعیین شده و سپس شیب نمودار بُعد همبستگی

³ Yamula.

⁴ Kizilirmak

¹ Gota

² Quarsi

بنابراین، سیستم دارای نظم است و جزء فرآیندهای تصادفی مطرح نمی‌شود. در چنین سامانه‌ای، نظریه آشوب قابلیت استخراج سری زمانی کوتاه‌مدت از سری زمانی بلندمدت را دارد.

Anishoseini and Zakermoshfegh (2015) مدل‌های

محلی آشوب‌ناک مبتنی بر فضای فاز در پیش‌بینی جریان رودخانه را مورد مقایسه قرار دادند. آن‌ها در این پژوهش، استفاده از اولین کمیته سراسری تابع اطلاعات متقابل برای انتخاب زمان تأخیر بهینه را پیشنهاد دادند. 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 میانگین و چندجمله‌ای از جمله روش‌هایی بودند که در این پژوهش به کار گرفته شدند. هم‌چنین در رویکردی جدید، از شبکه عصبی مصنوعی در یک مدل پیوندی برای مدل‌سازی محلی مبتنی بر فضای فاز استفاده شد. نتایج این روش‌ها، در مجموع، کیفیت مناسب مدل‌سازی محلی مبتنی بر فضای فاز سیستم آشوب‌ناک حاکم بر جریان رودخانه کشکان را نشان داد. Zounemat Kermani and Amirkhani (2015) تعیین پارامترهای دینامیکی تندباد و موج شاخص با استفاده از نظریه آشوب در بندر عسلویه مورد مطالعه قرار دادند. نتایج حاصل از پژوهش آن‌ها حاکی از میزان آشوب‌ناکی موج شاخص با بُعد همبستگی $6/7$ و تصادفی بودن رفتار تندباد است.

Eslami et al. (2016) تأثیر کاهش نویز در تحلیل پویایی

غیرخطی سری زمانی دمای حداکثر روزانه در ایستگاه کرمان را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج حاصل از پژوهش ایشان نشان داد که بُعد نشاننده و زمان تأخیر در سری زمانی بُعد از کاهش نویز به ترتیب ۵ و ۷۶ روز نسبت به قبل از ۷ و ۸۲ روز کاهش یافت. در دو سری زمانی، حداکثر نمای لیاپانف مثبت به ترتیب $0/11$ و $0/19$ و مقادیر پایین بُعد همبستگی $2/78$ و $2/85$ نشان از آشوب‌ناکی آن‌ها داشت. هم‌چنین، Jabbari Gharabgh et al. (2016) فضای حالت بازسازی‌شده و آشوب‌ناکی جریان رودخانه نازلوچای در مقیاس‌های زمانی مختلف را مقایسه کردند. آن‌ها در پژوهش خود وجود رفتار تصادفی یا آشوبی در جریان رودخانه را با استفاده از آزمون بُعد همبستگی و نمای هارست تعیین کردند. نمای همبستگی در هر سه مقیاس پس از افزایش به ازای بُعد محاط در یک مقدار غیرصحیح به حالت اشباع رسید. بنابراین، نشانگر آشوب‌ناک بودن جریان رودخانه در هر سه مقیاس است. این مقدار اشباع برابر با بُعد همبستگی بوده که در مقیاس‌های روزانه، هفتگی و ماهانه به ترتیب برابر با $2/8$ ، $3/62$ و $5/52$ به دست آمد.

Rezaei and Jabbari Gharabgh (2017) تأثیر کاهش

خطا در تحلیل آشوبی جریان رودخانه نازلوچای را مورد مطالعه

محاسبه شده است. مقدار عددی غیرصحیح این شیب، مبین آشوب‌پذیری سیستم است. نمای لیاپانوف و پهنای باند در توان طیفی فوریه نیز دیگر شاخص‌های بررسی ماهیت آشوب‌ناکی هستند که در این مطالعه مورد بررسی قرار گرفته‌اند و نتایج بیان‌گر آشوبی بودن سیستم است.

Moradizadeh Kermani et al. (2013) در پژوهش خود

برای ۳۰ سال داده از سری‌های زمانی دبی رودخانه لیقوان در یکی از زیرحوضه‌های دریاچه ارومیه استفاده نمودند. از ۲۹ سال ابتدای آمار ثبت‌شده برای بازسازی فضای حالت و روش تقریب محلی و پیش‌بینی بر مبنای نظریه آشوب انجام داده‌اند. در زمینه استفاده از مبنای نظریه آشوب برای تحلیل غیرخطی سری زمانی دبی رودخانه کشکان، Anishoseini and Zakermoshfegh (2013) با کمک روش توان لیاپانوف مطالعه نمودند. از آن‌جا که روش توان لیاپانوف برای یک سری زمانی تصادفی نیز ممکن است نتیجه دهد راه مناسب‌تر آن است که از معیارهای دیگر آشوب برای شناسایی استفاده شود که بر این اساس، شرایط یک سیستم آشوب‌ناک از جمله جاذب فراکتالی و حساسیت به شرایط اولیه را در سری زمانی دبی رودخانه کشکان مشاهده کرده‌اند.

Alami and Malekani (2013) بازسازی فضای حالت و

بُعد فرکتالی جریان رودخانه با استفاده از زمان تأخیر و بُعد محاط را مورد مطالعه قرار دادند، نتایج حاصل از پژوهش ایشان نشان داد که زمان تأخیر ۵۵ روز و بُعد محاط ۱۰ روز است که جهت بازسازی فضای حالت دینامیکی جریان رودخانه می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. هم‌چنین نتایج حاصل از بُعد همبستگی و تجزیه و تحلیل انتگرال همبستگی نشان داد که رفتار آشوبی نسبتاً کم بوده است. هم‌چنین، پیش‌بینی‌های نسبتاً دقیقی با استفاده از جریان رودخانه نشان داد که روش دینامیک آشوبی برای شناسایی و پیش‌بینی جریان در حوضه رودخانه نهندچای مناسب است. Farzin et al. (2017) تحلیل سری زمانی فرآیندهای هیدرولوژیک از دیدگاه نظریه آشوب در بارش‌های حوضه دریاچه ارومیه را مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها در این پژوهش، با استفاده از روش بُعد همبستگی (CDM)، سری زمانی بارش ماهانه دریاچه ارومیه را طی دوره آماری ۴۰ ساله (۱۳۸۶-۱۳۴۶) تحلیل کردند. پس از محاسبه زمان تأخیر، با استفاده از روش میانگین اطلاعات متقابل (AMI)، بُعد نهشتن و الگوریتم نزدیک‌ترین همسایگی کاذب (FNN)، فضای حالت بازسازی و بُعد همبستگی محاسبه شد. سپس، با محاسبه شاخص نمای لیاپانوف و طیف توانی فوریه، وجود آشوب بررسی شد. نتایج نشان داد که بُعد همبستگی غیرصحیح ($2/56$)، مقدار مثبت نمای لیاپانوف با حداکثر حدود $2/5$ و پهنای وسیع باند طیف فوریه، شواهدی بر وجود آشوب در سری زمانی بارش ماهانه هستند.

تغییرات بُعد همبستگی در برابر بُعد محاط نشان داد که رفتار جریان تصادفی است؛ بنابراین، جریان رودخانه پیش‌بینی نشدنی است. (Boustani et al., 2019). ارتباط بین شاخص‌های نظریه آشوب در رفتارنگاری جریان رودخانه‌ای در مقیاس‌های زمانی کوتاه‌مدت را مورد بررسی قرار دادند. بدین‌منظور، دبی ایستگاه‌های هیدرومتری اسکندری، قلعه شاهرخ، پل زمانخان و پل کله در چهار مقیاس زمانی روزانه، سه، پنج و هفت روزه به کار برده شده است. نتایج حاکی از آن است که دبی جریان در مقیاس پنج روزه در ایستگاه پل زمانخان و هفت روزه در ایستگاه‌های پل زمانخان و اسکندری، رفتار تصادفی دارد و در بقیه مقیاس‌ها، آشوب‌ناک است. بر همین اساس، در این پژوهش روش‌های بررسی آشوب‌ناکی سیستم از قبیل آزمون بُعد همبستگی و نمای هارست سیستم و سایر پارامترهای مرتبط در زمینه آشوب‌ناکی در حوضه سفیدرود برای اولین بار بررسی شد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در این پژوهش زیرحوضه سفیدرود است. سفیدرود مهم‌ترین رودخانه استان گیلان و دومین رود بلند ایران است. این رود از ترکیب دو رود شاهرود و قزل‌اوزن که در شهر منجیل به هم می‌پیوندند تشکیل شده است و تا ریختن به دریای خزر عرض استان گیلان را می‌پیماید. استان گیلان مرطوب‌ترین منطقه از سواحل جنوبی دریای خزر است. ارتفاعات البرز مانند یک سد کوهستانی از انتقال رطوبت دریای خزر به سمت فلات داخلی ایران جلوگیری می‌کنند و موجب افزایش رطوبت و بارندگی در این ناحیه می‌شوند (Janbozorgi et al., 2021). وسعت حوضه آبریز این رود معادل ۵۶۲۰۰ کیلومتر مربع با طول‌های جغرافیایی ۴۶ درجه و ۳۱ دقیقه تا ۵۱ درجه و چهار دقیقه شرقی و عرض‌های جغرافیایی ۳۴ درجه و ۵۴ دقیقه تا ۳۷ درجه و ۴۹ دقیقه شمالی است. اطلاعات مربوط به دبی ماهانه و سالانه رودخانه سفیدرود از ایستگاه هیدرومتری رودبار به‌دست آمده است. ایستگاه رودبار در ارتفاع ۱۴۵۰ متری از سطح آب‌های آزاد با طول و عرض جغرافیایی ۳۷ درجه و ۴۰ دقیقه تا ۴۴ درجه و ۵۴ دقیقه قرار دارد. متوسط دبی سالانه ایستگاه رودبار ۱۳۷/۶ مترمکعب در ثانیه اندازه‌گیری شده است. دوره آماری به مدت ۶۴ سال (۱۳۹۲-۱۳۲۸) است. پس از حذف داده‌های ثبت‌نشده طی سال‌های ۱۳۴۹-۱۳۴۸ دوره آماری ۶۳ سال شده و در نهایت ۷۵۶ داده انتخاب شد. مشخصات آماری دبی ماهانه رودخانه سفیدرود در جدول ۱ و نمودار سری زمانی رودخانه در شکل ۱ و در شکل ۲ موقعیت منطقه مورد مطالعه آمده است.

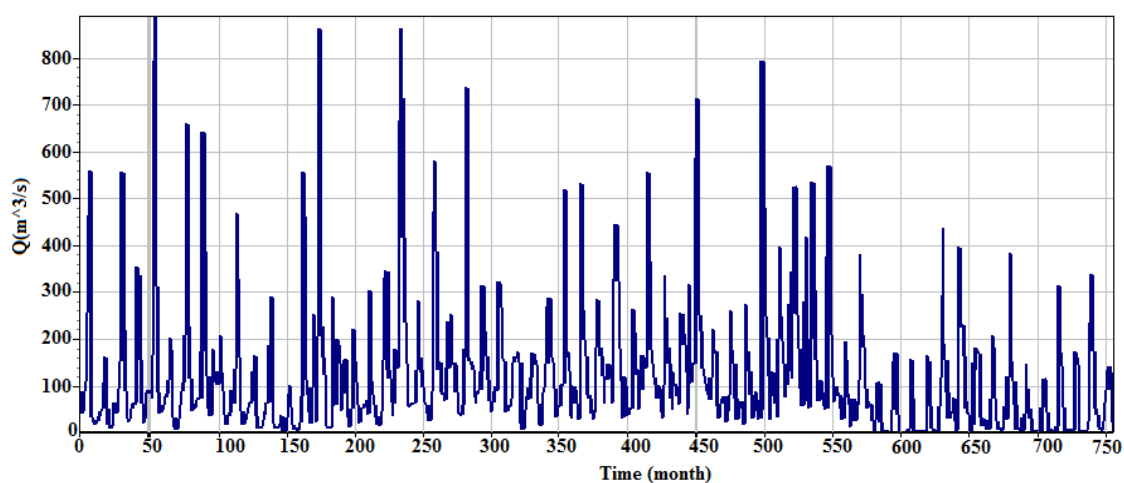
قرار دادند. نتایج حاصل از پژوهش نشان داد که بُعد همبستگی کاهش داشته و افزایش دقت مدل تقریب موضعی برای سری نویززدایی شده نسبت به سری اصلی داده‌ها بوده است. Farzin et al. (2017) کاربرد نظریه آشوب و شبکه عصبی مصنوعی در بررسی و تخمین تبخیر از سطح آب دریاچه‌ها را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج بررسی شاخص‌های تعیین ماهیت آشوب‌ناکی داده‌های تبخیر، نمای لیاپانوف مثبت و مقدار غیرصحیح شیب نمودار بُعد همبستگی در مقابل شعاع همبستگی، همگی نشان‌گر رفتار کاملاً آشوب‌ناک سری زمانی تحت بررسی است. نتایج صحت‌سنجی حاکی از دقت بالای نظریه آشوب و مدل شبکه عصبی مصنوعی، اندکی دقت بالاتر است به طوری که میانگین خطای مطلق (MAE)، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) در شبکه عصبی مصنوعی نسبت به نظریه آشوب به ترتیب ۲/۵۱ و ۲/۲۵ میلی‌متر کاهش یافته‌اند. همچنین نتایج مربوط به ارتفاع تجمعی تبخیر در دوره صحت‌سنجی حاکی از برتری ۳/۸ درصدی شبکه عصبی مصنوعی نسبت به نظریه آشوب دارد.

Mousavi et al. (2018) تحلیل پارامترهای رودخانه با استفاده از شاخص‌های مبتنی بر نظریه آشوب مورد مطالعه قرار دادند. نتایج حاصل از پژوهش ایشان نشان داد که در مقیاس روزانه، برای ایستگاه‌های اسکندری، قلعه شاهرخ، پل زمانخان و پل کله، مقدار غیرصحیح بُعد همبستگی به ترتیب برابر ۳/۳۴، ۳/۶ و ۳/۸۴ است که نشان از آشوبی بودن جریان در این ایستگاه‌ها دارد. با افزایش مقیاس زمانی به ۱۰ روزه، دبی جریان در تمام ایستگاه‌ها رفتاری تصادفی پیدا می‌کند. با استفاده از آزمون نمای لیاپانوف، حساسیت سیستم به شرایط اولیه به‌عنوان یک مشخصه سامانه‌های آشوب‌ناک بررسی شد. بزرگ‌ترین نمای لیاپانوف به‌دست آمده در هر چهار ایستگاه در دو مقیاس روزانه و ۱۰ روزه مثبت به‌دست آمده است. (Adab et al., 2018) تحلیل جریان رودخانه کارون در سه مقیاس روزانه، ماهانه و فصلی با استفاده از شاخص‌های نظریه آشوب را مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها برای تعیین آشوب‌ناکی جریان، سه روش ۱- بازسازی فضای فاز؛ ۲- بُعد همبستگی؛ ۳- بزرگ‌ترین نمای لیاپانوف به کار بردند. به‌منظور برآورد دو پارامتر زمان تأخیر و بُعد محاط، از روش میانگین اطلاعات متقابل و روش نزدیک‌ترین همسایه کاذب استفاده کردند. نتایج حاصل از پژوهش ایشان نشان داد که در مقیاس ماهانه، به دلیل بُعد همبستگی غیرصحیح (۲/۷۰۴)، دبی جریان رودخانه آشوب‌ناک و پیش‌بینی شدنی است. مقادیر بزرگ‌ترین نمای لیاپانوف برای مقیاس‌های روزانه، ماهانه و فصلی به ترتیب ۰/۰۰۱۷، ۰/۰۰۹۳ و ۰/۰۳۳۴ به‌دست آمده است. مثبت بودن این مقادیر نیز نشان‌دهنده آشوب و حساسیت نسبت به شرایط اولیه سیستم است. در مقیاس‌های روزانه و فصلی، روند

جدول ۱- مشخصات آماری جریان ماهانه رودخانه سفیدرود

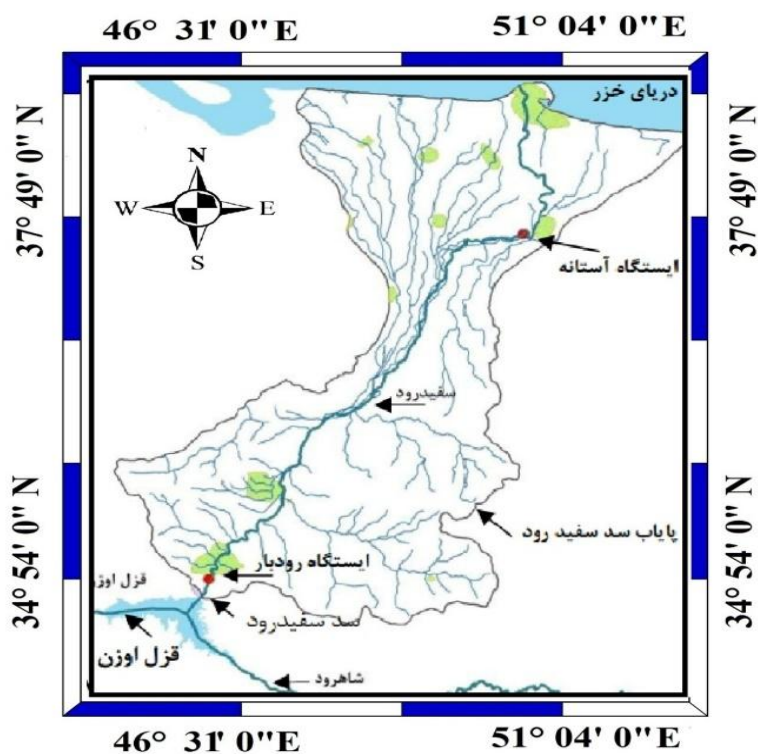
Table 1- Statistical characteristics of monthly flow of Sefidrood River

مشخصات آماری	دبی سفیدرود (مترمکعب در ثانیه)
تعداد نمونه	756
میانگین	123.00
انحراف معیار	134.54
ضریب تغییرات	109.38
حداکثر	899.61
حداقل	0.23
ضریب چولگی	2.49



شکل ۱- سری زمانی جریان رودخانه سفیدرود

Figure 1- Sefidrood River flow time series



شکل ۲- موقعیت منطقه مورد مطالعه

Figure 2- Location of the study area

بازسازی فضای حالت دینامیکی سیستم نیاز به تعیین دو مؤلفه زمان تأخیر و بُعد محاط است.

جدول ۲- ساختار فضای حالت بازسازی شده از روی داده‌های سری زمانی

Table 2 - Structure of the reconstructed state space from time series events

	1	2	...	m-1	M
1	X_1	$X_{1+\tau}$	...	$X_{1+(m-2)\tau}$	$X_{1+(m-1)\tau}$
2	X_2	$X_{2+\tau}$	...	$X_{2+(m-2)\tau}$	$X_{2+(m-1)\tau}$
⋮	⋮	⋮	...	⋮	⋮
K	X_k	$X_{k+\tau}$	...	$X_{k+(m-2)\tau}$	$X_{k+(m-1)\tau}$
⋮	⋮	⋮	...	⋮	⋮
$K+\tau-1$	$X_{K+\tau-1}$	$X_{2K+\tau-1}$	...	$X_{K-1+(m-1)\tau}$	$X_{K+\tau-1+(m-1)\tau}$
⋮	⋮	⋮	...	⋮	⋮
$n-\tau(m-1)$	$X_{n-K+\tau-1}$	$X_{n-\tau(m-2)}$	...	$X_{n-\tau}$	X_n

۴-۲- تعیین زمان تأخیر

برای تقریب زمان تأخیر معمولاً از دو روش میانگین اطلاعات متقابل و تابع خودهمبستگی استفاده می‌شود. در روش تابع خودهمبستگی، زمان تأخیری که در آن مقدار تابع خودهمبسته برابر صفر یا کم‌تر از مقدار کوچکی (مانند ۰/۱ یا ۰/۲) به دست آید، به‌عنوان زمان تأخیر مناسب انتخاب می‌شود (Kantz and Schreiber, 1997). در روش میانگین اطلاعات متقابل زمان رخ دادن اولین حداقل در تابع میانگین اطلاعات متقابل (AMI) به‌عنوان زمان تأخیر مناسب انتخاب می‌شود. در این مطالعه از روش دوم بدین منظور استفاده شد. این روش برگرفته از تئوری اطلاعات شانون است (Shannon, 1948). مفهوم اطلاعات در آزمایش‌های تصادفی این است که از وقوع یک پیشامد خاص چه میزان اطلاع از آزمایش کسب خواهد شد. به‌عبارتی چه میزان از عدم یقین نسبت به نتیجه‌های ممکن کاسته شده است. برای اندازه‌گیری میزان عدم اطمینان یک متغیر تصادفی از مفهوم آنتروپی استفاده می‌شود. به‌طور مثال، برای متغیر تصادفی X تابع آنتروپی به شکل رابطه ۱ خواهد بود که در آن p(x) برابر با تابع چگالی احتمال است.

$$H(X) = - \sum p(x) \log p(x) \quad (1)$$

به‌عبارتی تابع آنتروپی و میزان اطلاعی که از یک آزمایش تصادفی به‌دست می‌آید تابعی از احتمال بوده و با آن نسبت عکس دارد. هرگاه دو متغیر تصادفی X و Y وجود داشته باشد که لزوماً از هم مستقل نیستند، تابع آنتروپی به شکل رابطه ۲ خواهد بود.

$$H(X,Y) = - \sum p(x,y) \log p(x,y) \quad (2)$$

۲-۲- سیستم‌های دینامیکی آشوبی

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. به‌طوری‌که هر نقطه بیان‌گر رفتار سیستم در زمان مشخص است. در نمودار فضای حالت سیر تکامل سیستم توسط مسیرهای حالت و یا مدارهایی نمایش داده می‌شود (Elshorbagy et al., 2002). اگر مسیرهای حالت با صرف‌نظر از شرایط اولیه، به یک زیرفضا همگرایی داشته باشند به آن‌ها جاذب دوره‌ای^۱ گفته می‌شود. یک جاذب می‌تواند در یک فضای m بعدی قرار داشته باشد. سیستم‌های معین که در آن‌ها پیش‌بینی درازمدت امکان‌پذیر است، یک جاذب با بُعد صحیح دارند (1994 Embrechts). اما وقتی یک سیستم دینامیکی به شرایط اولیه حساس باشد، جاذب دارای بُعد غیرصحیح یا فراکتال است. به این جاذب‌ها، جاذب‌های غریب و به این سیستم‌ها، سیستم‌های دینامیکی آشوبی گفته می‌شود. در جاذب‌های غریب مدارها به هیچ نقطه‌ای همگرا نمی‌شوند، ولی از حد معینی هم خارج نمی‌شوند و در همسایگی نقاط خاصی باقی می‌مانند. نکته دیگر عدم برخورد مسیرها با خودشان است. جاذب‌های غریب یافتن نظم در بی‌نظمی را یادآور می‌شوند (ABarbanel et al., 1993).

۳-۲- بازسازی فضای حالت

در راستای مطالعه خواص هندسی و دینامیکی یک سیستم معین می‌توان از توصیف فضای حالت استفاده نمود، اما در بسیاری از فرآیندهای عملی به‌ندرت می‌توان تمام متغیرهای دینامیکی سیستم را اندازه‌گیری نمود و تنها سری اسکالر از مشاهدات سیستم در دسترس است. دینامیک حاکم بر این فرآیندها از این سری داده‌ها به‌طور مستقیم مشخص نیست. بنابراین، یکی از اساسی‌ترین گام‌ها در تحلیل سری‌های زمانی حاصل از یک فرآیند غیرخطی، بازسازی فضای حالت با ابعاد محدود با استفاده از این سری‌هاست، به‌طوری‌که با فضای حالت فرآیند مولد داده‌ها معادل باشد (Pari Zanganeh et al., 2010). روش متداولی که به‌منظور بازسازی فضای حالت استفاده می‌شود توسط تاکنز ارائه شده است (Takens, 1981) تئوری تاکنز بیان می‌کند اگر سری زمانی از یک سیستم دینامیکی معین به‌دست آمده باشد، آنگاه بازسازی فضای حالت این سیستم، به کمک همین سری زمانی $x_t = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ و با ایجاد تأخیرهای زمانی به اندازه τ بُعد محاط بهینه m امکان‌پذیر است. ساختار فضای حالت در جدول ۲ نمایش داده شده است. بنابراین، به‌منظور

¹ Periodic Attractor

$$R_m^2 = \sum_{i=0}^{m-1} [y(t-i\tau) - y(t_r-i\tau)]^2 \quad (8)$$

اگر بردار $Y_r^{NN}(t)$ یک همسایه‌ی واقعی برای بردار $Y_i(t)$ باشد، این همسایگی ناشی از ماهیت دینامیکی 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 همسایه‌های کاذب از همسایگی بردار $Y_i(t)$ خارج می‌شوند. با افزایش بُعد m به $m+1$ ، مؤلفه‌های اضافه‌شده به بردارهای تأخیر $Y_i(t)$ و $Y_r^{NN}(t)$ ، به ترتیب $y(t-m\tau)$ و $y(t_r-m\tau)$ خواهند بود. بنابراین فاصله بین دو بردار بر اساس نرم اقلیدسی در فضای $m+1$ بُعدی به‌طور مشابه به‌صورت رابطه ۹ خواهد بود.

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

بنابراین، فاصله اضافه‌شده در فضای $m+1$ بُعدی را نسبت به فاصله دو بردار در فضای m بُعدی به‌صورت رابطه ۱۰ خواهد بود.

$$\sqrt{\frac{R_{m+1}^2 - R_m^2}{R_m^2}} = \frac{|y(t-m\tau) - y(t_r-m\tau)|}{R_m} \quad (10)$$

هرگاه کمیت فوق‌الذکر از یک مقدار آستانه فراتر برود (حدود ۱۰ تا ۱۵) همسایه تحت بررسی، کاذب در نظر گرفته می‌شود (Sivakumar and Berndtsson, 2010).

۲-۶- بُعد همبستگی

بُعد همبستگی یکی از روش‌های مرسوم تعیین آشوب‌ناکی سیستم و هم‌چنین بُعد آشوبی است. یک فرآیند تصادفی دارای ابعاد پیوسته (بی‌نهایت) است؛ اما، یک فرآیند آشوبی ابعاد محدودتری دارد؛ یعنی دارای یک مجموعه از نقاطی است که مسیر زمانی به آن محدود می‌شود. بنابراین، می‌توان از روی محاسبه ابعاد یک سری به فرآیند ایجادکننده آن پی برد. مطابق این روش، اگر دامنه سری بالا بود، حاکی از یک فرآیند تصادفی است، در غیر این صورت، یک فرآیند آشوبی خواهد بود (Moshiri, 2002). روش بُعد همبستگی که توسط Embrechts (1994) تشریح شده است، عبارت است از تشکیل یک کره حول نقطه‌ای در فضای حالت به نحوی که شعاع کره تا جایی که تمام نقاط در فضای مزبور محصور شوند، افزایش یابد. در نهایت برای یک فضای حالت m بُعدی انتگرال همبستگی برابر است با:

$$C(r) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{2}{N(N-1)} \sum_{i,j} H(r - |Y_i - Y_j|) \quad (11)$$

اطلاعات متقابل بیان می‌دارد که چه مقدار اطلاعات در مورد متغیر تصادفی X می‌توان از متغیر تصادفی Y به‌دست آورد. طبق رابطه ۳ و ۴ مقدار اطلاعات متقابل قابل محاسبه است (Thomas et al., 1991).

$$I(X;Y) = H(Y) - H(Y|X) \quad (3)$$

$$I(X;Y) = \sum P(X,Y) \log \frac{P(X,Y)}{P(X)P(Y)} \quad (4)$$

برای جای‌گذاری این تعریف در زمینه مشاهدات از یک مجموعه فیزیکی معین، مجموعه اندازه‌گیری‌های $x(t)$ به‌عنوان مشاهدات X و اندازه‌گیری‌های $X(t+\tau)$ به‌عنوان مشاهدات Y در نظر گرفته می‌شود. میانگین اطلاعات متقابل بین مشاهدات در زمان t و $t+\tau$ به‌صورت رابطه ۵ است.

$$I = \sum P(X(t), X(t+\tau)) \log \frac{P(X(t), X(t+\tau))}{P(t)P(t+\tau)} \quad (5)$$

اندازه‌گیری اطلاعات متقابل دو متغیر نیازمند دانستن تابع چگالی احتمالی توأم این دو متغیر است. از روش‌های متداول برای تخمین این مقدار می‌توان به روش‌های مبتنی بر کرنل و هیستوگرام شامل محاسبات در محیط نرم‌افزارهای Matlab یا R (RRCHAOS)، نرم‌افزار TISEAN شامل بسته‌های fNonlinear، tseriesChaos و Tisean اشاره کرد (1992, Scott).

۲-۵- تعیین بُعد محاط

حداقل بُعد بازسازی برای آشکار شدن سیستم، بُعد محاط نامیده می‌شود. متداول‌ترین روش تعیین بُعد محاط بهینه از سری‌های زمانی آشوبی، روش شمارش نزدیک‌ترین همسایه‌های کاذب است (Kennel and Brown, 1992). این روش بر پایه این ویژگی جاذب‌های غریب استوار است که مسیرهای حالت هم‌دیگر را قطع نمی‌کنند. به شرط این‌که در بُعد مناسب محاط شده باشند. در این روش بررسی می‌شود که چه موقع انقطاع کاذب در مسیرهای حالت که از تصویر نمودن جاذب در یک فضا با بُعد پایین ناشی شده است، متوقف می‌شود. ابتدا با در نظر گرفتن m مؤلفه برای هر بردار تأخیر، می‌توان بردارهای تأخیر $Y_i(t)$ را مطابق رابطه ۶ در فضای محاط تشکیل داد.

$$I = \sum P(X(t), X(t+\tau)) \log \frac{P(X(t), X(t+\tau))}{P(t)P(t+\tau)} Y_i(t) \quad (6)$$

$$= y(t), y(t-\tau), \dots, y(t-(m-1)\tau)^T$$

R امین همسایه هر بردار تأخیر $Y_i(t)$ به شکل رابطه ۷ است.

$$Y_i^{NN}(t) = [y(t_r), y(t_r-\tau), \dots, y(t_r-\tau), \dots, y(t_r-(m-1)\tau)] \quad (7)$$

فاصله بین دو بردار همسایه بر اساس نرم اقلیدسی به‌صورت رابطه ۸ محاسبه می‌شود.

۲. برای سری‌های زمانی به طول n مقدار میانگین به دست می‌آید (m) .
 ۳. محاسبه مقدار نرمال شده داده‌ها.

$$Y_i = (X_i - m). \quad (14)$$

۴. محاسبه سری زمانی تجمعی Z_t .

$$(Z_t = \sum_{i=1}^t Y_i, t=1, 2, \dots, n) \quad (15)$$

۵. مشخص نمودن دامنه تعدیل شده R_m .

$$(R_m = \max Z_t - \min Z_t) \quad (16)$$

۶. با محاسبه انحراف معیار داده‌ها (S_m) ، دامنه تعدیل مقیاس داده شده با رابطه R_m/S_m به دست می‌آید.

مراحل ذکر شده برای تمام سری‌های زمانی کوچک‌تر انجام می‌شود. در نهایت هارست با استفاده از قاعده نصف در آمار رابطه ۱۷ را تعریف کرد:

$$C n^H = \frac{R(n)}{S(n)} \quad (17)$$

که در آن $R(n)/S(n)$ دامنه تعدیل مقیاس شده، C عدد ثابت، n تعداد مشاهدات و H نمای هارست است. در عمل می‌توان با رسم نمودار لگاریتم $R(n)/S(n)$ به ازای لگاریتم n و برازش خط مناسب، شیب خط را به دست آورد که برابر با مقدار H خواهد بود. در نهایت با توجه به مقدار H می‌توان به نوع فرآیند اعم از تصادفی و غیرتصادفی پی برد.

یکی از ویژگی‌های قابل توجه سیستم‌های قطعی آشوبی، پیش‌بینی‌پذیری محدود سیستم است. پیش‌بینی‌ناپذیری سیستم، ناشی از ناپایداری ذاتی سیستم و بازتاب ویژگی حساسیت به شرایط اولیه در سیستم‌های آشوبی است. پایداری سیستم ارتباط بسیار نزدیکی با متغیر دینامیکی سیستم با عنوان نمای لیاپانوف دارد. نمای لیاپانوف نشان‌گر مقدار متوسط واگرایی و همگرایی مسیرهای حالت نزدیک به هم در فضای حالت است. هم‌چنین بیان می‌دارد تا چه اندازه یک سیستم دینامیکی قابل پیش‌بینی یا غیرقابل پیش‌بینی است. این متغیر دینامیکی به‌طور معمول با واحد معکوس زمان بیان می‌شود. برای یک سیستم دینامیکی می‌توان نماهای لیاپانوف متفاوتی را برآورد کرد (رابطه ۱۸). اما در عمل از بزرگ‌ترین نمای لیاپانوف برای دسته‌بندی نوع رفتار یک سیستم استفاده می‌شود. دسته‌بندی نوع رفتار سیستم بسته به مقدار بزرگ‌ترین نمای لیاپانوف به‌صورت زیر است:

$\lambda < 0$ رفتار سیستم به‌صورت یک نقطه است، $\lambda = 0$ حلقه محدود پایدار، $0 < \lambda < \infty$ آشوبی قطعی و $\lambda = \infty$ رفتار تصادفی یا نویز است (Kantz and Schreiber, 1997).

$$\lambda = \frac{1}{t_m - t_0} \sum_{k=1}^m \log \frac{L'(t_k)}{L(t_{k-1})} \quad (18)$$

که در آن H ، یک تابع هویساید پله‌ای با $u \geq 0$ برای $H(u)=1$ و $H(u)=0$ برای $u \leq 0$ بوده و $N, u=r-|Y_1-Y_r|$ تعداد نقاط در فضای مزبور، r شعاع کره ساخته‌شده به مرکز Y_1 یا Y_r است. برای مقادیر مثبت r تابع همبستگی $C(r)$ با رابطه (۱۲) به r مرتبط می‌شود:

$$C(r) \underset{N \rightarrow \infty}{r \rightarrow 0} \approx ar^{D_2} \quad (12)$$

که در این رابطه α ، یک ضریب ثابت بوده و D_2 توان همبستگی است که از رابطه (۱۳) به دست می‌آید:

$$D_2 = \lim_{\substack{r \rightarrow 0 \\ N \rightarrow \infty}} \frac{\log C(r)}{\log(r)} \quad (13)$$

از آنجایی که مجموعه داده‌ها پیوسته نخواهد بود، نمی‌تواند مقادیر نزدیک به صفر داشته باشد، در نتیجه $\log C(r)$ بر $\log(r)$ تقسیم شده و مقدار حدی آن محاسبه می‌شود و سپس قسمت خطی نمودار حاصل از آن انتخاب می‌شود. در نتیجه این کار، مقدار D_2 حاصل می‌شود. با استفاده از D_2 در مقابل m می‌توان نوع فرآیند از نظر قطعی و تصادفی بودن را مشخص کرد. بدین‌صورت که در فرآیندهای تصادفی، D_2 بدون رسیدن به یک مقدار اشباع با افزایش m تغییر می‌نماید. در حالی که برای فرآیندهای قطعی مقدار D_2 بعد m معین اشباع می‌شود. مقدار اشباع بعد فراکتالی یا بعد همبستگی سری زمانی نامیده می‌شود (Elshorbagy et al., 2002).

۲-۷- نمایه‌های هارست و لیاپانوف

نمای هارست، پارامتری برای اندازه‌گیری خاصیت خودتشابهی و وابستگی دور برد در سری‌های زمانی است. هم‌چنین معیاری برای بررسی تغییرات غیرخطی طولانی‌مدت را فراهم می‌کند (Lange, 1999). این آزمون برای نخستین بار توسط هیدرولوژیست بریتانیایی (Hurst (1951) طی مطالعاتی که برای تشخیص فرآیند ورودی جریان آب در سدی بر رودخانه نیل انجام گرفت، ارائه شد. جریان ورودی آب در سدها معمولاً تصادفی فرض می‌شدند، ولی هارست با مطالعه داده‌های دوره‌های گذشته به وجود دوره‌های نامتناوبی در جریان ورودی آب پی برد. وی نشان داد که اگر مقدار نمای هارست برابر با 0.5 شد دلالت بر یک فرآیند مستقل و کاملاً تصادفی دارد. اگر $0.5 < H < 1$ باشد، دلالت بر یک سری زمانی دوام‌دار با حافظه بسیار طولانی دارد. در نهایت اگر $0 < H < 0.5$ باشد دلالت بر بی‌دوام بودن فرآیند دارد (Jones et al., 1996). برای محاسبه نمای هارست، هارست از روش دامنه مجزا استفاده کرده است. مراحل این روش به‌ترتیب زیر است:

۱. سری زمانی X به طول N را به تعدادی سری زمانی کوتاه‌تر با طول $n = N, N/2, N/4, \dots$ تبدیل می‌شود.

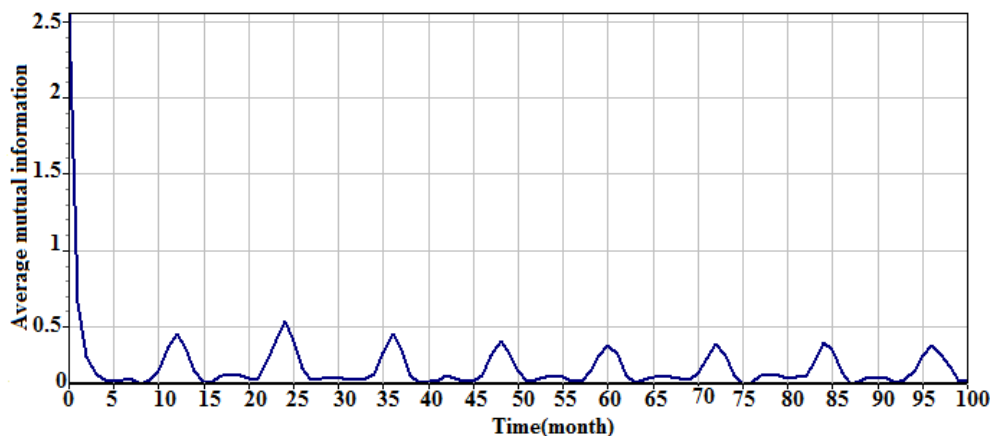
توجه به شکل ۳ مقدار بهینه زمان تأخیر به روش میانگین اطلاعات متقابل برابر با پنج ماه تعیین شده است. همچنین با توجه به شکل ۴ مقدار زمان تأخیر با روش تابع خودهمبسته تعیین شده است. از مقایسه مقدار زمان تأخیر حاصل شده از دو منحنی می‌توان دریافت که هر دو روش برای تعیین زمان تأخیر مناسب هستند. در تعیین زمان تأخیر با استفاده از منحنی ACF زمان تأخیر مناسب جایی است که نمودار به یک مقدار نزدیک صفر یا حدود $0/1$ تا $0/2$ می‌رسد. بُعد محاط مناسب، بُعد محاطی است که در آن تعداد همسایه‌های کاذب به حدود صفر رسیده باشد که با توجه به نمودار رسم شده حدود پنج حاصل شده است. همچنین مقدار بُعد محاط مناسب با استفاده از روش نزدیک‌ترین همسایه‌های کاذب برابر با شش محاسبه شد (شکل ۵).

در این رابطه t_0 زمان شروع سری زمانی و t_m زمان آخرین داده آن است. در این روش نزدیک‌ترین نقطه در سری زمانی به شرایط اولیه، مشخص شده و فاصله آن در فضای فاز با $L(t_0)$ بیان می‌شود و در زمان t_1 فاصله اولیه به $L'(t_0)$ تغییر پیدا می‌کند، نسبت $\frac{L'(t_k)}{L(t_{k-1})}$ طبق تعریف فاکتور کشیدگی نامیده می‌شود و M نیز تعداد گام‌هایی است که لازم است انجام شود تا تمام سری زمانی در به‌دست آوردن توان لیاپانوف شرکت کند (Rosenstein et al., 1993; Wolf et al., 1985).

۳- نتایج و بحث

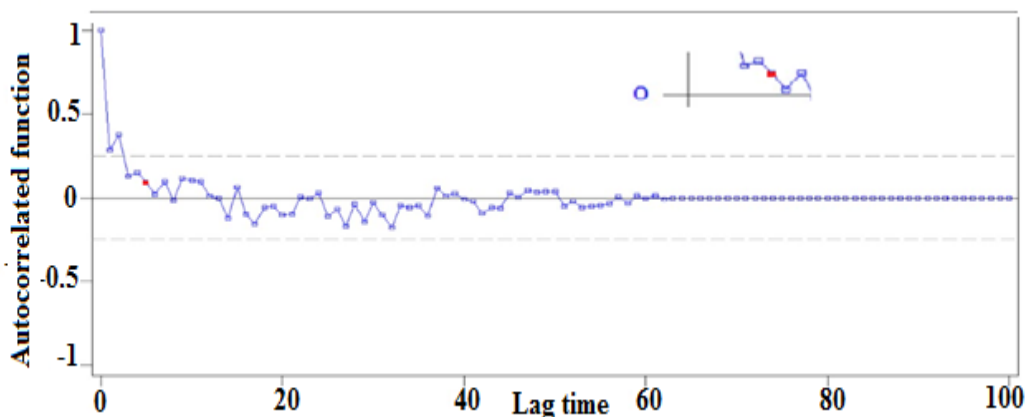
۳-۱- تعیین زمان تأخیر و بُعد محاط

همان‌گونه که در بخش‌های قبل ذکر شد برای بازسازی فضای حالت نیاز به تعیین دو مؤلفه زمان تأخیر و بُعد محاط است. با



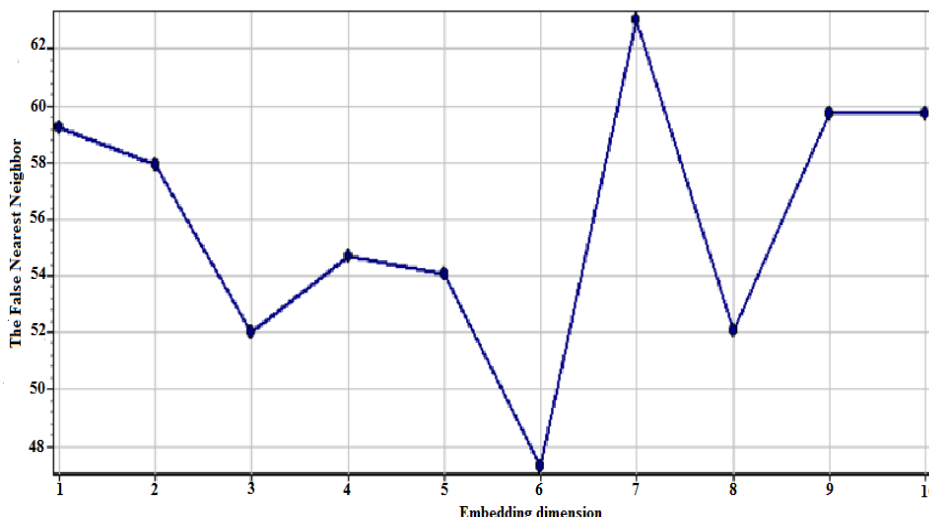
شکل ۳- تابع میانگین اطلاعات متقابل به ازای زمان‌های تأخیر متفاوت

Figure 3- Average function of mutual information for different lag



شکل ۴- تابع خودهمبسته به ازای زمان تأخیرهای متفاوت

Figure 4- Autocorrelated function for different lag times

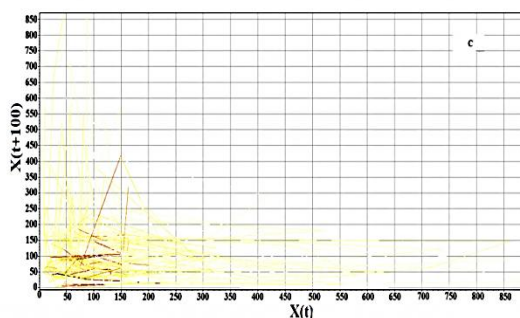
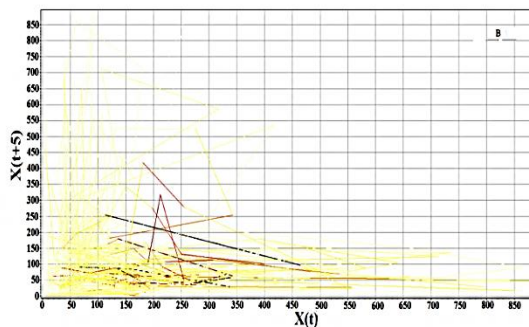
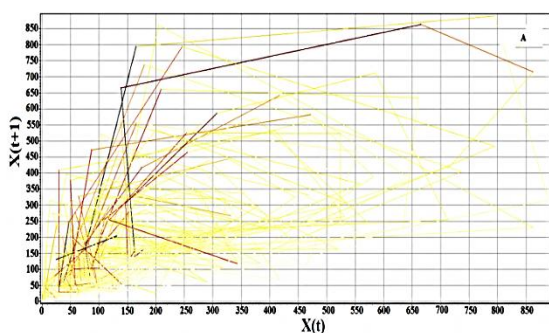


شکل ۵- مقادیر نزدیک‌ترین همسایگی کاذب برای ابعاد محاط مختلف
Figure 5- Values of the nearest false neighborhood for different enclosed dimensions

بسیار به هم نزدیک و پیوسته هستند. بنابراین، باعث از بین رفتن مشخصات ساختار جاذب خواهند شد. هم‌چنین در فضای حالت به ازای زمان تأخیر ۱۰۰ ماه، تراکم بردارهای تأخیر نزدیک به محورهای افقی و عمودی نمودار بوده و نشانگر نا همبسته و پیچیده بودن مؤلفه‌های متوالی در بردارهای تأخیر و نامناسب بودن آن جهت دستیابی به دینامیک سیستم است، اما با توجه به فضای حالت با زمان تأخیر ۵ ماه، به‌دست‌آمده از روش *AMI* بردارهای تأخیر توزیع مناسب‌تری دارند و فضای حالت به‌خوبی با نقاط پر شده است.

۳-۲- ترسیم فضای حالت سری‌های زمانی

چنانکه ذکر شد انتخاب زمان تأخیر در تحلیل‌های آشوبی سری‌های زمانی بسیار مؤثر بوده و انتخاب دلخواه آن در استخراج دینامیک داده‌ها مناسب نیست. به‌منظور مقایسه فضای حالت سری زمانی دبی ماهانه رودخانه سفیدرود به ازای زمان تأخیرهای مختلف، نمودار فضای حالت دو بُعدی به ازای زمان تأخیر ۱ ماه (زمان تأخیر کوچک)، ۵ ماه (به‌دست آمده از میانگین اطلاعات متقابل) و ۱۰۰ ماه (زمان تأخیر بزرگ) در شکل ۶ آورده شده است. در فضای حالت به ازای زمان تأخیر ۱ ماه، بردارهای تأخیر در حوالی محور قطری فضا متمرکز شده‌اند. لذا $X(t)$ و $X(t+1)$

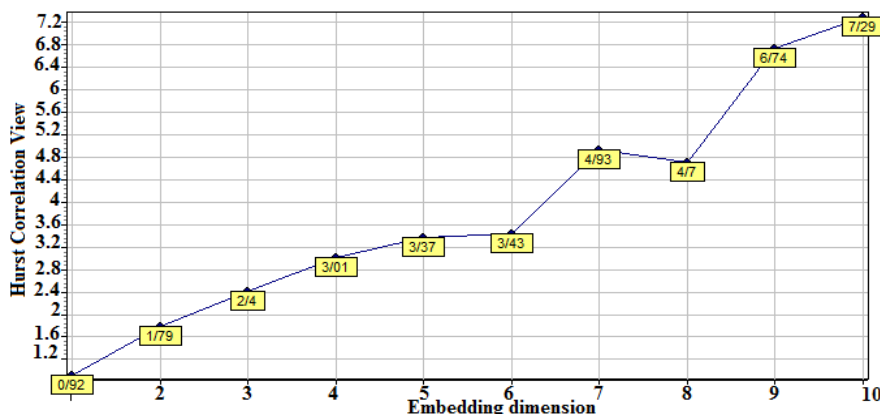


شکل ۶- نمودار فضای حالت دوبعدی به ازای زمان تأخیرهای مختلف
Figure 6 - Two-dimensional (2D) state space diagram for different lag times

۳-۳- تعیین بُعد همبستگی

شدن نمای همبستگی و مقدار غیرصحيح به دست آمده آن نشان از رفتار دینامیکی معین با بُعد کم در جریان رودخانه سفیدرود و آشوبناک بودن سری زمانی جریان رودخانه دارد.

در شکل ۷ رابطه بین بُعد محاط و نمای همبستگی ارائه شده است. با توجه به شکل نمای همبستگی بُعد از یک روند صعودی به حالت اشباع در آمده است. این مقدار برابر با بُعد همبستگی است. بُعد همبستگی برای سری زمانی ماهانه ۳/۳۷ به دست آمده است. اشباع



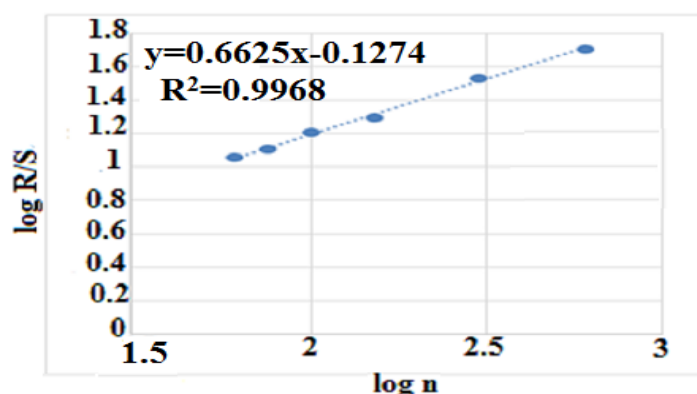
شکل ۷- نمودار بُعد همبستگی به ازای ابعاد محاط مختلف

Figure 7- Correlation dimension diagram for different embedding dimensions

برد. بدین منظور از روش تجدید مقیاس دامنه، استفاده شده است. نتایج حاصل از روش نمای هارست در شکل ۸ نشان داده شده است. همچنین آشوبناکی جریان رودخانه سفیدرود با نمای لیاپانوف بررسی شد که توان لیاپانوف $\lambda = 0.0083$ به دست آمد که این موضوع نیز آشوبناکی جریان در رودخانه را تأیید می کند.

۳-۴- تعیین نمایه های هارست و لیاپانوف

چنانچه قبلاً ذکر شد می توان با رسم نمودار $\log[R(n)/S(n)]$ (متوسط دامنه تجدید مقیاس شده) به ازای لگاریتم n (طول زیرسری ها) و برازش خط مناسب، شیب خط را به دست آورد که برابر با مقدار نمای هارست H خواهد بود. در نهایت با توجه به مقدار H می توان به نوع فرآیند اعم از تصادفی و غیرتصادفی پی



شکل ۸- نمودار محاسبه نمای هارست (H)

Figure 8 - Harst index calculation diagram (H)

پرداخته شده است، نتایج حاکی از آشوبناکی جریان در رودخانه سفیدرود است. در این پژوهش با استفاده از روش میانگین اطلاعات متقابل زمان تأخیر روزانه پنج ماه محاسبه شد. همچنین بعد محاط مناسب از روش شمارش نزدیک ترین همسایه های کاذب برابر دو محاسبه شده است. تعیین وجود رفتار تصادفی یا آشوبی در جریان رودخانه با استفاده از آزمون بُعد همبستگی و

۴- نتیجه گیری

نظریه آشوب در کنار نظریه کوانتم و نسبیت یکی از مهم ترین اکتشافات قرن اخیر است. با بررسی سری های زمانی حاصل از سیستم های دینامیکی همچون جریان رودخانه به کمک نظریه آشوب می توان به پیش بینی رفتار سیستم پرداخت. در این پژوهش که به بررسی دبی جریان رودخانه سفیدرود با این نظریه

به طوری که هرچه اطلاعات موجود بیش تر و به روز باشند فضای بازسازی شده از دقت بیش تری برخوردار بوده و می تواند اطلاعات مفیدی را در اختیار پژوهشگران قرار دهد. تغییرات در سطوح اساس محلی در چاله های حوضه، انحراف در زیرحوضه ها، تغییر در ساختارهای مخروطه افکنه، تغییر در انرژی سطح اساس در بالاترین سطوح آبراهه و انتقال آن به آبراهه های سطح یک، تغییر در ساختار زمین شناسی و بالآمدگی برون زد گنبد های نمکی، تحلیل جریان های سیلابی، آب شستگی در پایه پل ها، تحلیل خشکسالی های هیدرولوژیک و تحلیل حجم ذخیره مخازن سدها، از جمله جنبه های کاربردی تئوری آشوب است که می تواند مورد مطالعه قرار گیرند.

نمای هارست صورت گرفت. نمای همبستگی پس از افزایش به ازای بُعد محاط در یک مقدار غیرصحیح برابر با $3/37$ به حالت اشباع رسید. بنابراین، نشان از آشوبناک بودن جریان رودخانه دارد. همچنین نزدیک ترین مقدار صحیح به بُعد همبستگی نشانگر حداقل متغیرهای مورد نیاز برای توصیف سیستم است که این مقدار چهار به دست آمد. نمای هارست به دست آمده مخالف $0/5$ بوده و بنا به مطالعات هارست نشان از غیرتصادفی بودن و وجود آشوب در جریان رودخانه دارد. همچنین نمای هارست به دست آمده در مقیاس های روزانه بین $0/5$ تا یک بوده و نشانگر وجود حافظه طولانی مدت این سری دارد. با بازسازی فضای حالت می توان جهت پیش بینی های کوتاه مدت اقدام نمود.

منابع

- ادب، ف.، کرمی، ح.، موسوی، س.ف.، و فرزین، س. (۱۳۹۷). تحلیل جریان رودخانه کارون در سه مقیاس روزانه، ماهانه، و فصلی با استفاده از شاخص های نظریه آشوب. *پژوهش های جغرافیایی طبیعی*، ۵۰(۳)، ۴۴۳-۴۵۷.
- اسلامی، آ.، قهرمان، ب.، ضیایی، ع.ن.، و اسلامی، پ. (۱۳۹۵). تأثیر کاهش نوفه در تحلیل پویایی غیرخطی سری زمانی دمای حداکثر روزانه در ایستگاه کرمان. *تحقیقات منابع آب ایران*، ۱۲(۱)، ۱۷۱-۱۸۵.
- اعلمی، م.ت.، و ملکانی، ل. (۱۳۹۲). بازسازی فضای حالت و بعد فرکتالی جریان رودخانه با استفاده از زمان تأخیر و بعد محاط. *مهندسی عمران و محیط زیست*، ۱(۷۰)، ۱۵-۲۱.
- انیس حسینی، م.، و ذاکر مشفق، م. (۱۳۹۱). تحلیل و پیش بینی جریان رودخانه کشکان با استفاده از نظریه آشوب. *هیدرولیک ایران*، ۳(۳)، ۴۵-۶۱.
- انیس حسینی، م.، و ذاکر مشفق، م. (۱۳۹۴). مقایسه مدل های محلی آشوبناک مبتنی بر فضای فاز در پیش بینی جریان رودخانه. *مهندسی عمران مدرس*، ۱۵(۳)، ۱۳-۲۴.
- بوستانی، م.، کرمی، ح.، موسوی، س.ف.، و فرزین، س. (۱۳۹۸). بررسی ارتباط بین شاخص های نظریه آشوب در رفتارنگاری جریان رودخانه های در مقیاس های زمانی کوتاه مدت. *مهندسی آبیاری و آب ایران*، ۴(۹)، ۹۸-۱۱۶.
- پری زنگنه، م.، عطائی، م.، و معلم، پ. (۱۳۸۸). بازسازی فضای حالت سری های زمانی آشوبی با استفاده از یک روش هوشمند. *الکترونیک و قدرت*، ۱(۲)، ۳-۱۰.
- جان بزرگی، م.، حنیفه پور، م.، و خسروی، ح. (۱۴۰۰). تغییرات زمانی خشکسالی هواشناسی - هیدرولوژیکی (مطالعه موردی: استان گیلان). *مدل سازی و مدیریت آب و خاک*، ۱(۲)، ۱-۱۴.
- جباری قره باغ، ث.، رضایی، ح.، و محمدنژاد، ب. (۱۳۹۴). مقایسه فضای حالت بازسازی شده و آشوبناکی جریان رودخانه نازلو چای در مقیاس های زمانی مختلف. *پژوهش های حفاظت آب و خاک*، ۲۲(۵)، ۱۳۵-۱۵۱.
- حسن زاده، ی.، اعلمی، م. ت.، فرزین، س.، شیخ الاسلامی، س. ر.، و حسن زاده، ا. (۱۳۹۱). بررسی ماهیت آشوبناکی نوسانات روزانه تراز آب دریاچه ارومیه. *مهندسی عمران و محیط زیست*، ۴۲(۶۶)، ۹-۲۰.
- ذونعمت کرمانی، م.، و امیرخانی، خ. (۱۳۹۴). تعیین پارامترهای دینامیکی تندباد و موج شاخص با استفاده از نظریه آشوب. *مورد مطالعاتی بندر عسلویه. علوم و فناوری دریا*، ۱۹(۷۳)، ۳۷-۴۵.
- رضایی، ح.، و جباری قره باغ، ث. (۱۳۹۶). تأثیر کاهش نویز در تحلیل آشوبی جریان رودخانه نازلو چای. *دانش آب و خاک*، ۳(۳)، ۲۳۹-۲۵۰.
- فرزین، س.، حاجی آبادی، ر.، و احمدی، م.ح. (۱۳۹۶). کاربرد نظریه آشوب و شبکه عصبی مصنوعی در بررسی و تخمین تبخیر از سطح آب دریاچه ها. *آب و خاک*، ۱(۳۱)، ۶۱-۷۴.
- فرزین، س.، حسینی، خ.، کرمی، ح.، و موسوی، س.ف. (۱۳۹۶). تحلیل سری زمانی فرایندهای هیدرولوژیک از دیدگاه نظریه آشوب (مطالعه موردی: بارش ماهانه دریاچه ارومیه). *مهندسی عمران*، ۱۷(۲)، ۲۲۵-۲۳۴.
- قاهری، ع.، قربانی، م.، دل افروز، ه.، و ملکانی، ل. (۱۳۹۱). ارزیابی جریان رودخانه با استفاده از نظریه آشوب. *مجله آب ایران*، ۶(۱۰)، ۱۷۷-۱۸۶.
- مرادی زاد، ف.، قربانی، م.، دین پژوه، ی.، و فرسادی زاده، د. (۱۳۹۱). مدل تخمین جریان رودخانه بر اساس بازسازی، فضای حالت آشوبی. *دانش آب و خاک*، ۴(۲)، ۱-۱۶.
- مشیری، س. (۱۳۸۱). مروری بر نظریه آشوب و کاربردهای آن در اقتصاد. *پژوهش های اقتصادی ایران*، ۱۲، ۲۹-۶۸.
- موسوی، س.ف.، بوستانی، م.، کرمی، ح.، و فرزین، س. (۱۳۹۷). تحلیل ۲۲۳ رودخانه با استفاده از شاخص های مبتنی بر نظریه آشوب (مطالعه موردی: دبی جریان رودخانه زاینده رود). *تحقیقات منابع آب ایران*، ۱۴(۴)، ۲۵۳-۲۵۶.

References

- ABarbanel, H.D., Brown, R., Sidorowich, J.J., & Tsimring, L.S. (1993). The analysis of observed chaotic data in physical systems. *Reviews of Modern Physics*, 65(4), 1331.
- Adab, F., Karami, H., Mousavi, S., & Farzin, S. (2018). Application of Chaos theory in modeling and analysis of river discharge under different time scales (Case Study: Karun River). *Physical Geography Research Quarterly*, 50(3), 443-457 (in Persian).
- Alami, M., & Malekani, L. (2013). Phase space reconstruction and fractal dimension using of lag time and embedding dimension. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 43.1(70), 15-21 (in Persian).
- Anishosseini, M., & Zakermoshfegh, M. (2015). Comparison between phase space-based local chaotic models for river flow forecasting. *IJBQ*; 15(3), 13-24 (in Persian).
- Anishosseini, M., & Zakermoshfegh, M. (2013). Analysis and prediction of the Kashkan river flow using chaos theory. *Journal of Hydraulics*, 8(3), 45-61 (in Persian).
- Boustani, M., Karami, H., Mousavi, S., & Farzin, S. (2019). Relationship between chaos theory indicators in monitoring of river flow at short-term time scales. *Irrigation and Water Engineering*, 9(4), 98-116 (in Persian).
- Damle, C., & Yalcin, A. (2007). Flood prediction using time series data mining. *Journal of Hydrology*, 333, 305-316.
- Elshorbagy, A., Simonovic, S.P., & Panu, U.S. (2002). Estimation of missing streamflow data using principles of chaos theory. *Journal of Hydrology*, 255(1-4), 123-133.
- Embrechts, M. (1994). Basic concepts of nonlinear dynamics and chaos theory. *Trading on the Edge: Neural, Genetic, and Fuzzy Systems for Chaotic Financial Markets*, Wiley, New York, 265-279.
- Eslami, A., Ghahraman, B., Ziaee, A., & Eslami, P. (2016). Effect of Noise reduction in nonlinear dynamic analysis of maximum daily temperature series in Kerman station. *Iran-Water Resources Research*, 12(1), 171-185 (in Persian).
- Farzin, S., Hajiabadi, R., & Ahmadi, M. (2017). Application of chaos theory and artificial neural networks to evaluate evaporation from lake's water surface. *Water and Soil*, 31(1), 61-74 (in Persian).
- Farzin, S., Hosseini, Kh., Karami, H., & Mousavi S. (2017). Analysis of time series in hydrological processes using chaos theory (Case study: Monthly rainfall of Urmia lake). *Civil Engineering Journal*, 17(2), 213-223 (in Persian).
- Ghaheri, A., Ghorbani, M.A., Delafrouz, H., & Malekani, L. (2012). Evaluation of river flow using turbulence theory. *Iranian Journal of Water Research*, 6(10), 177-186 (in Persian).
- Ghorbani, M.A., Kisi, O., & Aalinezhad, M., (2010). A probe into the chaotic nature of daily streamflow time series by correlation dimension and largest Lyapunov methods. *Applied Mathematical Modelling*, 34(12), 4050-4057.
- Hassanzadeh, Y., Aalami, M., Farzin, S., Sheikholeslami, S., & Hassanzadeh, E. (2012). Study of Chaotic Nature of daily water level fluctuations in Urmia lake. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 42.1(66), 9-20 (in Persian).
- Hurst, H.E. (1951). Long-term storage capacity of reservoirs. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 116, 770-808.
- Jabbari Gharabagh, S., Rezaie, H., & Mohammadnezhad, B. (2016). Comparison of reconstructed phase space and chaotic behavior of Nazloochay river flow at different temporal scales. *Journal of Water and Soil Conservation*, 22(5), 135-151 (in Persian).
- Janbozorgi, M., Hanifepour, M., & Khosravi, H. (2021). Temporal changes in meteorological-hydrological drought (Case study: Guilan Province). *Water and Soil Management and Modelling*, 1(2), 1-14 (in Persian).
- Jones, C.L., Lonergan, G.T., & Mainwaring, D.E. (1996). Wavelet packet computation of the Hurst exponent. *Journal of Physics A: Mathematical and General*, 29(10), 2509.
- Kantz, H., & Schreiber, T. (1997). *Nonlinear Time Series Analysis*. Cambridge University Press, 369 pages.
- Kennel, N., & Brown, R. (1992). Determining embedding dimension for phase space reconstruction using a geometrical construction. *Physica Review A*, 45(6), 3403-3411.
- Khan, S., Ganguly, A.R., & Saigal, S. (2005). Detection and predictive modeling of chaos in finite hydrological time series. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 12(1), 41-53.
- Kocak, K., Bali, A., & Bektasoglu, B. (2007). Prediction of monthly flows by using chaotic approach. *International Congress on river Basin Management*. Antalya, Turkey. Pp. 553-559.
- Lange, H. (1999). Time series analysis of ecosystem variables with complexity measures. *Interantional Journal of Complex Systems*, 250, 1-9.
- Moradzadeh Kermani, F., Ghorbani, M. A., Dinpashoh, Y., & Farsadizadeh, D. (2013). Predicting model of river Stream flow based on chaotic phase space reconstruction. *Water and Soil Science*, 22(4), 1-16 (in Persian).
- Moshiri, S. (2002). A review on chaos and its applications in economic. *Iranian Journal of Economic Research*, 4(12), 29-68 (in Persian).

- Mousavi, S., Boustani, M., Karami, H., & Farzin, S. (2018). Analysis of river parameters using chaos-theory based indices (Case study: Zayandehrud river flow). *Iran-Water Resources Research*, 14(4), 253-256 (in Persian).
- Ng, W.W., Panu, U.S., & Lennox, W.C. (2007). Chaos based analytical techniques for daily extreme hydrological observations. *Journal of Hydrology*, 342(1-2), 17-41.
- Pari Zanganeh, M., Ataee, M., & Moalam, P. (2009). Reconstruct the chaotic time series space using an intelligent method. *Electronic Journal and Power*, 1(2), 3-10 (in Persian).
- Regonda, S.K., Sivakumar, B., & Jain A. (2004). Temporal scaling in river flow: can it be chaotic? *Hydrological Sciences Journal- des Sciences Hydrologiques*, 49(3), 373-385.
- Rezaei, H., & Jabbari Gharabagh, S. (2017). Noise reduction effect on chaotic analysis of Nazluchay river flow. *Water and Soil Science*, 27(3), 239-250 (in Persian).
- Rosenstein, M.T., Collins, J.J., & De Luca, C.J. (1993). A practical method for calculating largest Lyapunov exponents from small data sets. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 65(1-2), 117-134.
- Scott, D.W. (1992). *Multivariable density estimation: Theory, practice, and visualization*. Wiley, New York, 336 pages.
- Shannon, C.E. (1948). A Mathematical theory of communication. *Bell System Technical Journal*, 27(3), 379-423.
- Sivakumar, B., & Berndtsson, R. (2010). *Advances in data-based approaches for hydrologic modeling and forecasting*. World Scientific, Singapore, 441 pages.
- Sivakumar, B. (2001). Rainfall dynamics at different temporal scales: A chaotic perspective. *Hydrology and Earth System Sciences*, 5(4), 645-652.
- Takens F. (1981) Detecting strange attractors in turbulence. Pp. 366-381, In: Rand D., Young LS. (eds), *Dynamical Systems and Turbulence*, Warwick 1980, Lecture Notes in Mathematics, vol 898. Springer, Berlin, Heidelberg.
- Thomas, M. Cover., J., & Thomas, A. (1991). *Elements of Information Theory*. John Wiley & Sons, Inc, New York, 776 pages.
- Wolf, A., Swift, J.B., Swinney, H.L., & Vastano, J.A. (1985). Determining Lyapunov exponents from a time series. *Physica D: nonlinear phenomena*, 16(3), 285-317.
- Zounemat Kermani, M., & Amirkhani, K. (2015). Determining of dynamic parameters of strong breeze and significant wave using chaos theory (Case study: Asaluyeh port). *Iranian Journal of Marine Science and Technology*, 19(73), 37-45 (in Persian).