Archive of SID

تحقیقات منابع آب ایران
Iran-Water Resources Research

سال سیزدهم، شماره ۲، تابستان ۱۳۹۶
Volume 13, No. 2, Summer 2017 (IR-WRR)
۲۲۱-۲۲۵

یادداشت فنی

رفتارنگاری آشوبی رودخانه به کمک روش توسعه‌ی فضای فاز

محمد هادی فتاحی[۱*] و محسن تراهی[۲]

چکیده

مطالعات اخیر اهمیت روش توسعه فضای فاز (PSR) به روش تأخیر زمانی را به عنوان روشی برای شناسایی آشوب (Chaos) به اثبات رسانده است. هدف از این مطالعه بررسی روش توسعه فضای فاز و تفسیر آنچه که در دیاگرام فضای فاز ترسیم می‌شود، می‌باشد. در این پژوهش دبی روزانه، هفتگی و ماهانه بند بهمن، واقع بر رودخانه قره‌آغاج در بین سال‌های ۱۳۴۸ تا ۱۳۸۵ مورد بررسی قرار گرفته است. ابتدا بعد تعبیه به روش هندسه سیمپلکتیک (Symplectic Geometry) برابر با ۳ محاسبه گردید. سپس فضای فاز به روش تأخیر زمانی ترسیم گردید. برخلاف روش‌های پیچیده و محاسباتی مرسوم، همه ی این نتایج با مشاهده و در حداقل زمان حاصل می‌شود که به قرار زیر است: داده‌های ماهانه آشوبی‌تر از داده‌های هفتگی و روزانه می‌باشد که نشان می‌دهد زمان بهینه به یک ماه نزدیکتر است. محل قرارگیری بارندگی‌های شدید قابل تشخیص است. جریان ثابت رودخانه به‌صورت روزانه بین دبی ۰ تا ۱۴۰، هفتگی بین دبی ۱٫۵ تا ۶۰ و ماهانه بین دبی ۱ تا ۲۳ متر مکعب بر ثانیه قرار گرفته است. نوع جریان رودخانه، ثابت یا فصلی، قابل شناسایی است.

کلمات کلیدی: تئوری آشوب، فضای فاز، بعد نهشتن، رودخانه قره‌آغاج، بند بهمن.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۵/۱/۲۴
تاریخ پذیرش مقاله: ۹۵/۷/۲۶

۱- استادیار گروه مهندسی عمران، واحد مرودشت ، دانشگاه آزاد اسلامی، مرودشت، ایران.
۲- دانشجوی دکتری سازه هیدرولیکی، واحد استهبان، ، دانشگاه آزاد اسلامی، استهبان، ایران.
*- نویسنده مسئول
بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان پاییز ۱۳۹۶ امکانپذیر است.

Technical Note

Chaotic Monitoring of River Flow Using Phase Space Reconstruction Method

M.H. Fattahi[1] and M. Tarahi[2]*

Abstract

Recent studies have proven the importance and functionality of phase space reconstruction model based on the delay time approach. The main scope in this research was to develop the phase space in order to analyze and describe the event inside it. The flow discharge has been considered for Band-e-Bahman station in daily, weekly and monthly scale in period of 1348 and 1385; Iranian calendar (1969 – 2006). Firstly the embedding dimension has been calculated as 3 based on the simplistic method. Then the phase space have been developed using the time delay approach. Results indicated less chaotic manner for daily data according to cloudy trajectories of the phase space. Monthly and weekly flow time series indicated more chaotic manner. According to phase space analysis; 5 very heavy one day raining at Band-e-Bahman station and 12 very heavy one day raining at basin could be distinguished. Besides, 6 and 11 intensive heavy raining with one week durability were pointed at the station and the basin, respectively. The river flow discharge varied between 0 to 140 cubic meter per second for daily scale, 1.5 to 60 cubic meter per second for weekly scale, and 1 to 23 cubic meter per second for monthly scale.

***Keywords*:** Chaos theory, Phase space, Embedding dimension, Ghare Aghaj River, Band-e-Bahman station.

Received: April 12, 2016
Accepted: October 17, 2016

1-Assistant Professor, Civil Eng. Department, Marvdasht Branch, Islamic Azad University, Marvdasht, Iran, Email: fattahi.mh@miau.ac.ir
2- PhD Candidate, Civil Eng. Department, Estahban Branch, Islamic Azad University, Estahban, Iran
*- Corresponding Author

www.SID.ir

Archive of SID

۱- مقدمه

یکی از جنبه‌هایی که هیدرولوژیست‌ها به‌صورت گسترده روی آن کار می‌کنند، ساختار فرآیندهای هیدرولوژیکی است، مانند باران و رواناب. با اینکه، در طول چند دهه‌ی گذشته، تعدادی از مدل‌های ریاضیاتی برای مدل-سازی فرآیندهای هیدرولوژیکی پیشنهاد شده است، با این حال، روش ریاضیاتی یکپارچه و واحدی وجود ندارد. در بخشی، این مشکل ناشی از این واقعیت است که فرآیندهای هیدرولوژیکی تنوع قابل توجه مکانی و زمانی از خود نشان می‌دهند. با این حال، بخش دیگری از این مشکل با توجه به محدودیت در دسترس-بودن ابزارهای ریاضیاتی مناسب برای بهره برداری کردن از ساختار اساسی فرآیندهای هیدرولوژیکی است.

اخیراً مطالعات وجود آشوب در فرآیندهای هیدرولوژیکی مورد توجه بیشتری قرار گرفته است (مثلاً: Hense (1987) ؛ Sharifi et al. (1990) ؛ Rodriguez-Iturbe et al. (1989) ؛ Jayawardena and Lai (1994) ؛ Tsonis et al. (1993) ؛ Koutsoyiannis and Pachakis (1996) ؛ Porporato and Ridolfi (1996) ؛ Sivakumar et al. (1998)). نتایج بدست آمده از این مطالعات، بسیار دلگرم کننده است. این تحقیقات شواهد مربوط به وجود آشوب کم‌بعد (LDC) را ارائه کردند، که بر امکان پیش‌بینی‌های دقیق کوتاه مدت دلالت دارد. با این حال، چنین مطالعاتی و نتایج گزارش شده آن‌ها اغلب به دلیل محدودیت‌های ذاتی در به کارگیری روش‌های شناسایی آشوب در معرض مناظره‌های پر تنشی برای فرآیندهای هیدرولوژیکی بوده است (به عنوان مثال Ghilardi and Rosso (1990)؛ Koutsoyiannis and Pachakis (1996)).

در این مطالعه فضای فاز بازسازی شده به روش تأخیر زمانی به عنوان روشی برای شناسایی آشوب مورد بررسی قرار گرفته است. در ابتدا سعی شده که بعد همبستگی (correlation dimension) برای سری زمانی رودخانه قره‌آغاج بدست آورده شود. سپس دیاگرام فضای فاز ترسیم و چگونگی حرکت خطوط سیر و تعابیر آن در فضای تحول مورد تحلیل واقع شده است.

۲- مواد و روش‌ها

در این بررسی از داده‌های هیدرومتری بند بهمن واقع بر رودخانه قره‌آغاج به صورت داده‌های روزانه، هفتگی و ماهانه استفاده شده است. داده‌ها در بین سال‌های ۱۳۴۸ تا ۱۳۸۵ جمع آوری شده‌اند. داده‌های پرت حذف شده و مقادیری که در داده‌ها موجود نبوده است بازسازی شده‌اند.

رودخانه قره‌آغاج نام یکی از رودخانه‌های استان فارس می‌باشد. این رودخانه از (ارتفاعات بن رود) دامنه کوه تاسک از روستای زنگنه بن‌رود (حدود ۳۰ کیلومتری شمال شرقی شهرستان کازرون) در دهستان دشت ارژن در بخش ارژن شیراز سرچشمه می‌گیرد و پس از گذر از کنار شهر خان زنیان وارد دهستان کوهمره سرخی می‌شود و سپس از بخش ارژن شیراز خارج و وارد شهرستان کوار می‌شود. رودخانه قره‌آغاج در مسیر خود همراه چند رود و چشمه، پس از عبور از اراضی زراعی خفر، کوار، جهرم، قیر و کارزین از طریق استان بوشهر به نام رود مُند وارد خلیج فارس می‌شود.

در این بررسی با استفاده از روش بازسازی فضای فاز و بعد همبستگی الگوی آشوبی رودخانه مورد بررسی قرار گرفته است.

۲-۱- فضای فاز

F. Takens (1981) استخراج اطلاعات بر روی دینامیک آشوب توسط بازسازی فضای فاز (فضای حالت) از یک سری زمانی با یک متغیر منفرد $\{X(t), t = 1,2,3, \dots, N\}$ را پیشنهاد کرد. یک بردار در زمان t در این فضای فاز به کمک یک تأخیر زمانی t_l ساخته می‌شود که بشرح زیر است:

$$X^{\{m\}} = (X(t), X(t, t_1), \dots, X(t + (m - 1)t_1)) \qquad (۱)$$

این ساختار یک مسیر در فضای m بعدی تولید می‌کند. حداقل ابعاد بازسازی برای آشکار شدن سیستم را بعد تعبیه شده می‌نامند که با m نشان داده می‌شود. اگر دینامیک غالب به‌صورت تصادفی باشد، ابری از نقاط به‌صورت تصادفی در فضای فاز نمایش داده خواهد شد. اگر آشوب وجود داشته باشد، جاذب می‌تواند در یک فضای فاز با بعد پایین‌تر نشان داده شود.

۲-۲- برآورد بعد تعبیه بر اساس روش هندسه‌ی سیمپلکتیک (SG):

در این بخش، نظریه‌ی SG برای یافتن راهی جهت محاسبه‌ی بعد تعبیه یک سیستم مطالعاتی از سری زمانی آن مورد استفاده قرار می‌گیرد. اثبات اینکه H یک ماتریس یکتاست، کار راحتی است و H می‌تواند از ماتریس واقعی ساخته شود. این ماتریس تسهیلاتی را برای مطالعه‌ی یک سیستم واقعی از سری زمانی نمونه‌برداری‌شده‌ی آن فراهم می‌آورد.

www.SID.ir

Archive of SID

قضیه ی ۱: فرض کنید که ماتریس سرپرست H به‌صورت زیر است:

$$H = H(k,\omega) = \begin{pmatrix} P & 0 \\ 0 & P \end{pmatrix}, P = I_n - \frac{2\bar{\omega}\bar{\omega}^*}{\bar{\omega}^*\bar{\omega}}, \bar{\omega} = (0,\dots,0;\omega_k,\dots,\omega_n)^T \neq 0 \quad (۲)$$

بنابراین H یک ماتریس یکتای سیمپلکتیک است. $\bar{\omega}^*$ هم مزدوج جابجایی $\bar{\omega}$ می‌باشد.

۳- تحلیل نتایج و بحث

برای رسم فضای فاز لازم است مقدار m تعیین گردد، که این مقدار پس از اندازه‌گیری بعد تعبیه (Embedding Dimension) توسط روش SG برابر با ۳ به‌دست آمده است. در مرحله رسم فضای فاز، معادله (۱) نشان می‌دهد که خطوط سیر (trajectory) در صفحه و یا فضای سه بعدی واقع می‌شوند که پس از رسم فضای فاز می‌توان نتیجه گرفت که صفحه $\{X_i, X_{i+1}\}$ می‌تواند تمام خصوصیات جاذب (attractor) و مسیر سیر جاذب را به‌صورت نسبتاً کاملی نمایان سازد. پس فضای فاز در صفحه (دو بعد) رسم می‌گردد. در ابتدا دیاگرام فضای فاز بازسازی شده‌ی داده‌های روزانه و هفتگی را ترسیم می‌نماییم.

در شکل ۱ (سمت چپ) تعدادی از نقاط با اشکال دایره و مربع بر روی شکل مشخص و شماره‌گذاری شده است. مربع‌ها مربوط به جهش‌های خیلی بزرگ در خطوط سیر و نقاطی که با دایره مشخص شده‌اند مربوط به جهش‌های کوچکتر خطوط سیر می‌باشد. پنج جهش خیلی بزرگ و ۱۵ جهش کوچکتر قابل مشاهده می‌باشد. جهش‌های بزرگ مربوط به بارندگی‌های با شدت زیاد در نزدیکی بند بهمن بوده، و فاصله بارندگی تا ایستگاه هیدرومتری به نحوی است که این فاصله باعث افت زیادی در دبی نمی‌شود. پس می‌توان نتیجه گرفت که طی این ۳۷ سال (از سال ۱۳۴۸ تا ۱۳۸۵) پنج بارندگی بزرگ در یک روز و با شدت زیاد در نزدیکی بند بهمن اتفاق افتاده است. جهش‌های کوچکتر مربوط به بارندگی‌های شدید در حوضه‌ی آبریز رودخانه قره‌آغاج و یا در مسیر ابتدایی رودخانه است، و فاصله‌ی مرکز بارندگی تا بند بهمن به نحوی است که افت زیادی در دبی اتفاق افتاده است، بطوری که میزان دبی آن‌ها از ۴۵۰ متر مکعب بر ثانیه تجاوز نمی‌کند. تمرکز خطوط سیر یا جاذب بین بازه‌ی دبی صفر تا ۱۴۰ متر مکعب بر ثانیه است که جریان ثابت روزانه‌ی رودخانه در بند بهمن را نشان می‌دهد.

مربع‌های نشان داده شده در شکل ۱ (سمت راست) مربوط به جهش‌های خیلی بزرگ در خطوط سیر و نقاطی که با دایره مشخص شده‌اند مربوط به جهش‌های کوچکتر می‌باشد. تعداد جهش‌های بزرگ ۶ عدد است که مربوط به دبی‌های بین ۱۷۰ تا ۲۳۰ متر مکعب بر ثانیه می‌شود. دلیل این جهش‌ها باران‌های شدید در نزدیکی بند بهمن است که باعث می‌شوند سطح آب رودخانه بشدت و در مدت زمان کوتاه افزایش قابل ملاحظه‌ای بیابد.

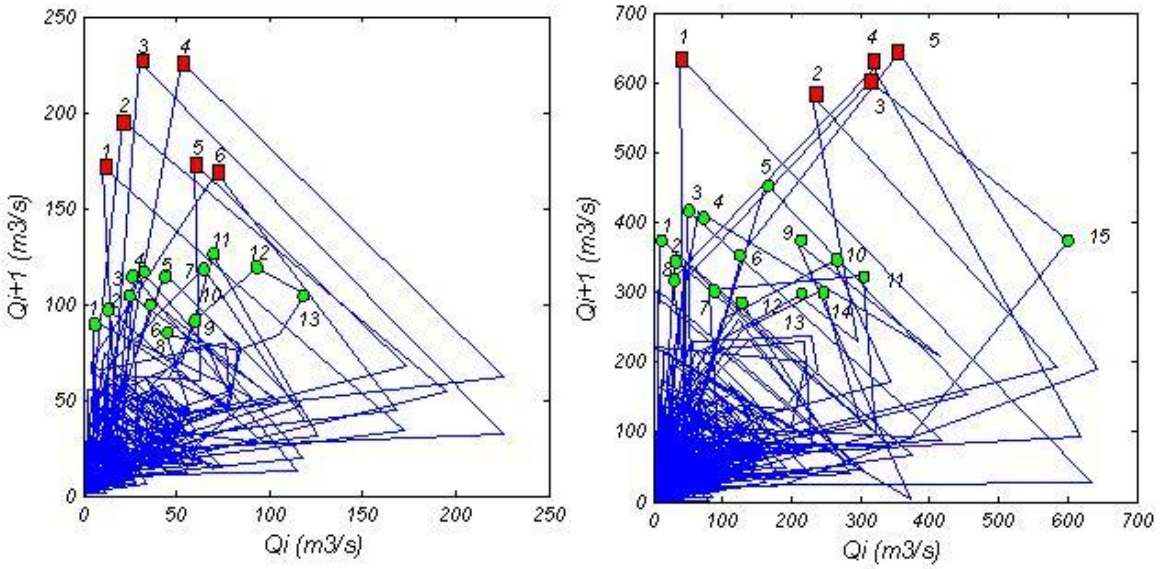

Fig. 1- Phase space diagram for discharge in Bahman dam from 1969 to 2006; for daily (right) and weekly (left) data

شکل ۱- دیاگرام فضای فاز دبی عبوری بند بهمن، از سال ۱۳۴۸ تا ۱۳۸۵؛ (سمت راست) داده‌های روزانه؛ (سمت چپ) داده‌های هفتگی

www.SID.ir

Archive of SID

جهش‌های کوچکتر که تعداد آن‌ها ۱۱ عدد و بین دبی‌های ۹۰ تا ۱۳۰ متر مکعب بر ثانیه واقع شده‌اند مربوط به بارش‌های شدید واقع در حوضه‌ی آبریز رودخانه و یا باران‌هایی با شدت کمتر در نزدیکی بند بهمن می‌باشد. نظم خطوط سیر بیشتر از حالت قبل و مربوط به داده‌های روزانه است، پس داده‌ها آشفتگی بیشتری را نشان می‌دهند. تمرکز خطوط سیر یا جریان ثابت رودخانه نیز بین دبی ۱/۵ تا ۶۰ متر مکعب بر ثانیه در حال گذار است.

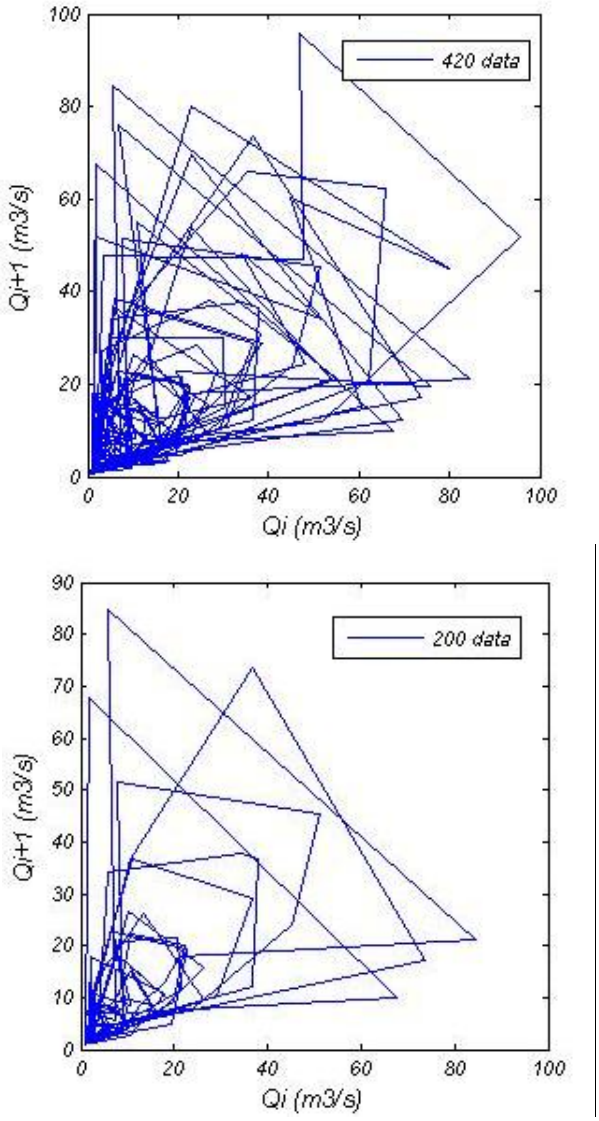

Fig. 2- Phase space diagram for monthly data in Bahman dam; 200 months (right) and 420 months (left)

شکل ۲- دیاگرام‌های فضای فاز داده‌های ماهانه بند بهمن: (سمت راست) ۲۰۰ ماه ؛ (سمت چپ) ۴۲۰ ماه

همانطوری که در شکل ۲ (سمت راست) مشاهده می‌شود دیاگرام فضای فاز بازسازی شده به روش تأخیر زمانی ماهانه، برای ۲۰۰ داده‌ی ماهانه‌ی رودخانه قره‌آغاج که در بین سال‌های ۱۳۴۸ تا ۱۳۶۴ جمع‌آوری شده به تصویر کشیده شده است. در صورتی که به دقت حلقه‌ها شمرده شود، تعداد آن‌ها ۱۶ عدد می‌باشد که نشان دهنده‌ی داده‌های ۱۶ سال است. فضای حرکت خطوط سیر محدود و بین دبی ۱ تا ۸۴ متر مکعب در ثانیه قرار دارد، که این فضای محدود آشوب را بخوبی به نمایش می‌گذارد. همچنین تراکم خطوط سیر به صورت دو خط می‌باشد که از نقطه‌ی ۱و۱ آغاز می‌شود و در دو سمت محورها به‌صورت خطی امتداد می‌یابد. این‌گونه جاذب‌ها بیانگر رفتار آشوبی سیستم هستند. در شکل ۲ (سمت چپ) دیاگرام فضای فاز برای تمامی‌داده‌های جمع‌آوری شده‌ی ماهانه بین سال‌های ۱۳۴۸ تا ۱۳۸۳ به نمایش گذاشته شده است. فضای حرکت خطوط سیر محدود و بین دبی ۱ تا ۹۶ متر مکعب بر ثانیه واقع شده است. تمرکز تراژکتوری‌ها نشان می‌دهد جریان ثابت ماهانه‌ی رودخانه در طول این ۳۵ سال مقداری بین دبی ۱ تا ۲۳ متر مکعب بر ثانیه دارد. نسبت به دیاگرام‌های روزانه و هفتگی خطوط سیر نظم بیشتری را نشان می‌دهند که نشان می‌دهد زمان بهینه آشوبی به یک ماه نزدیکتر است.

با مقایسه دیاگرام‌های شکل ۱ و شکل ۲ (سمت راست) می‌توان به نتایجی به شرح زیر دست یافت:

به‌صورت منطقی دبی متوسط ماهانه کمتر از دبی متوسط هفتگی و دبی متوسط هفتگی نیز کمتر از دبی متوسط ماهانه می‌باشد. دلیل این اتفاق تقسیم‌شدن دبی بین روزهای بیشتری در دبی متوسط ماهانه نسبت به هفتگی است و همینطور برای دبی متوسط هفتگی نسبت به روزانه. دبی ماهانه در طول ۳۵ سال در شکل۳- ب از دبی ۱ تا ۹۶ متر مکعب بر ثانیه است. دبی هفتگی در طول ۳۷ سال در شکل۱- ب از دبی ۱/۵ تا ۲۳۰ متر مکعب بر ثانیه واقع شده است و دبی روزانه در شکل ۱ (سمت چپ) از دبی صفر تا ۶۵۰ متر مکعب بر ثانیه قرار گرفته است. پس همانطور که مشاهده می‌شود بازه‌ی دبی‌ها از ماهانه به روزانه افزایش یافته است.

با مقایسه‌ی این سه دیاگرام می‌توان به وضوح دید که برای دیاگرام روزانه، جاذب به‌صورت ابر گون، نامنظم، ظاهر می‌شود که دلیلی بر تصادفی شدن سری زمانی می‌باشد. در حالی که در دیاگرام هفتگی این جاذب ابری شکل به سمت دو خطی بودن پیش می‌رود، ولی باز هم شکل مبهمی را به نمایش می‌گذارد. حال آنکه در دیاگرام ماهانه

www.SID.ir

Archive of SID

جاذب کاملاً خود را به شکل دو خط مجزا از یکدیگر نشان می‌دهد که بهترین حالت برای نشان دادن جاذب آشوبی در فضای فاز است. این تفاوت‌ها در شکل جاذب، به‌دلیل انتخاب زمان تأخیر متفاوت است که هر چه به زمان تأخیر بهینه و مناسب نزدیکتر باشد، جاذب رفتار خطی و آشوبی‌تری از خود نشان می‌دهد و نظم بیشتری را به نمایش می‌گذارد. ولی هرچه از زمان مناسب دورتر شویم رفتار جاذب نظم خود را از دست داده و به‌صورت توده‌ای ظاهر می‌شود.

۴- نتیجه‌گیری

هدف از این پژوهش بررسی روش فضای فاز بازسازی شده به روش تأخیر زمانی در شناسایی آشوب می‌باشد. هدف دیگر، تفسیر دیاگرام‌های ترسیمی‌و مقایسه‌ی دیاگرام‌ها با یکدیگر و تجزیه و تحلیل آن‌ها بمنظور شناخت بیشتر و همچنین یافتن نکاتی در این دیاگرام‌هاست که شاید در گذشته کمتر به آن‌ها توجه شده است. نتایج بدست آمده به قرار زیر است: دیاگرام‌های محدود حالت آشوبی را به تصویر می‌کشند. گرچه شرط محدود بودن تراژکتوری‌ها برای آشوبی بودن کافی نیست، بلکه شکل جاذب‌ها نیز می‌باید به‌صورت منظم باشند و هر چه به شکل ابری و مبهم نزدیک شوند، رفتار آشوبی آن‌ها کاهش می‌یابد. با این استدلال می‌توان گفت که تأخیر زمانی ماهانه به زمان تأخیر بهینه نزدیک‌تر است و داده‌های ماهانه آشوبی‌تر هستند. با استفاده از این دیاگرام‌ها حد فاصل محل بارندگی تا ایستگاه هیدرومتری و همچنین نوع منبع تأمین‌کننده‌ی جریان رودخانه، برف یا باران، قابل تعیین است. جریان ثابت رودخانه در هر سه حالت روزانه، هفتگی و ماهانه قابل اندازه‌گیری می‌باشد و نشان می‌دهند در طول سال‌های ۱۳۴۸ تا ۱۳۸۵ وضعیت ثابت دبی عبوری رودخانه به چه نحوی بوده است. تعداد بارندگی‌های شدید و محل قرار گیری آن‌ها نیز قابل تشخیص است، به این نحو که جهش‌های خیلی بزرگ مربوط به بارندگی‌های شدید نزدیک به ایستگاه هیدرومتری و جهش‌های کوچکتر مربوط به بارندگی شدید در حوضه آبریز رودخانه می‌باشد. در دیاگرام‌های ماهانه، با شمارش تعداد حلقه‌ها، تعداد سال‌هایی که داده‌ها مورد بررسی قرار گرفته‌اند قابل حصول است.

۵- مراجع

Alvani M (1999) Reflection of effects of chaos theory in management. Quarterly (in Persian)

Ghilardi P, Rosso R (1990) Comment on chaos in rainfall. Water Resour, Res, 26 (8), 1837–1839

Ghorbani MA, 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, 4050–4057

Henon, M (1976) A two-dimensional mapping with a strange attractor. Common Math. Physic, 50, 69–77

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

Jayawardena, AW, Lai, F (1994) Analysis and prediction of chaos in rainfall and stream flow time series. J. Hydrol, 153, 23–52

Koutsoyiannis, D, Pachakis, D (1996) Deterministic chaos versus stochasticity in analysis and modeling of point rainfall series. J. Geophys, Res, 101 (D21), 26 441–26 451

Porporato, A, Ridolfi, L (1996) Clues to the existence of deterministic chaos in river flow. Int. J. Mod, Phys. B 10, 1821–1862

Sivakumar, B, Liong, S-Y, Liaw, C-Y (1998) Evidence of chaotic behavior in Singapore rainfall. J. Am. Water Resour, Assoc, 34 (2), 301–310

Takens F (1981) Detecting strange attractors in turbulence. In D. A. Rand and L.-S. Young. Dynamical Systems and Turbulence. Lecture Notes in Mathematics, vol. 898, Springer-Verlag, pp, 366–381

Tsonis, AA, Elsner, JB, Georgakakos, KP (1993) Estimating the dimension of weather and climate attractors: important issues about the procedure and interpretation, J. Atmos, Sci. 50, 2549– 2555

www.SID.ir