

## بررسی تاثیر سد بر الگوی آشوبی انتقال بار معلق رود (مطالعه‌ی موردی: سد کرج)

سارا فهیم فرد<sup>۱</sup>، ابوالفضل شمسایی<sup>۲</sup>، محمد هادی فتاحی<sup>۳\*</sup>، سعید فرزین<sup>۴</sup>

### چکیده

حجم رسوبها یکی از فراسنجهای اساسی در طراحی هر سد به شمار می‌رود، که نه تنها در بالادست بر روی پیکره و ساختار سد موثر است، بلکه به دلیل تبعات منفی ناشی از عملیات رسوب‌زدایی که معضلات زیست محیطی بسیاری را که در پایین دست سد به همراه خواهد داشت، شناختن آن الزامی است. عوامل متعدد تاثیرگذار بر این پدیده، که با روابط غیرخطی به یکدیگر وابسته‌اند، سبب شده‌اند که پدیده‌ی انتقال رسوب، سامانه‌ی تصادفی محسوب شود. نظریه آشوب بیان می‌کند که بسیاری از سامانه‌های پیچیده با تظاهرات تصادفی تنها تحت تاثیر چند فرانسج محدود قرار دارند، و حتی رفتار آنها در کوتاه مدت نیز قابل پیش‌بینی است. در این پژوهش، با استفاده از بازسازی فضای فاز و بعد همبستگی، که یکی از پرکاربردترین روشهای تشخیص آشوب است، به بررسی پویایی انتقال رسوب از دیدگاه آشوبی، و همچنین تاثیر وجود سد بر تغییرات این الگو، پرداخته شده است. نتایج حاکی از آنند که گروه زمانی رسوب دارای الگوی آشوبی کم‌دامنه است، و در بازه‌ی زمانی کوتاه مدت ده روزه، سد بر پویایی آن موثر بوده و آن را از پدیده‌ای آشوبی به تصادفی تبدیل می‌کند، اما در بازه‌های زمانی بلند مدت‌تر مانند ماهانه به دلیل خلق اطلاعات و قطع ارتباط با شرایط اولیه‌ی که در سامانه‌های آشوبی رخ می‌دهند، این تاثیر از بین رفته و گروه زمانی دوباره رفتار آشوبی را به خود می‌گیرد.

**واژه‌های کلیدی:** رسوب، سد، انگاره‌ی آشوب، بعد همبستگی، فضای فاز.

<sup>۱</sup>- کارشناسی ارشد عمران آب، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم تحقیقات فارس

<sup>۲</sup>- استاد گروه آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

<sup>۳</sup>- استادیار گروه آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه آزاد مرودشت

<sup>۴</sup>- استادیار گروه سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

\*- نویسنده مسوول مقاله: Fattahi\_mh@yahoo.com

## مقدمه

استفاده از ویژگیهای قطعی پیش‌بینی کوتاه مدت را با دقت بالاتری انجام داد (وانگ و همکاران، ۲۰۱۰). بطور کلی می‌توان سامانه‌های پویایی آشوبی را به دو دسته‌ی آشوب کم دامنه‌ی و آشوب با دامنه بالا طبقه‌بندی کرد. سامانه‌های با آشوب کم دامنه دارای یک و نیم درجه‌ی آزادی می‌باشند، بدین معنی که رفتار آنها را می‌توان در فضای فاز سه بعدی تشریح کرد. از سوی دیگر، سامانه‌های پویا، که دارای درجه‌ی آزادی فیزیکی دو و یا بیشترند، برای توصیف، نیازمند فضای فاز با بعد چهار و یا بالاترند؛ لذا به آنها سامانه‌های پویایی با دامنه‌ی بالا گفته می‌شود (موزیلاک و موزیلاک).

در بسیاری از علوم تنها ابزار برای بررسی پدیده‌ها، مشاهده‌ی آنان است؛ این مشاهدات می‌توانند شامل یک یا چند گروه زمانی باشد. گروه زمانی آشوبی رفتاری را شبیه به رفتار تصادفی از خود نشان می‌دهد. در چنین شرایطی، توانایی شناسایی دقیق منشا این تظاهرات رفتاری بسیار مهم است. یک راه برای تشخیص گروه زمانی آشوبی از دیگر فرایندهای احتمالی، دستیابی به وجود تعدادی متناهی درجه‌ی آزادی موثر است؛ بنابراین برآورد ابعاد فرایندهای تحت آشوب بسیار حائز اهمیت می‌باشد.

مطابقت ابزار مورد استفاده برای کمی‌سازی رفتارهای آشوبی، و نیز بهره‌وری مدیریت و مهار کردن منابع آب یعنی داده‌های گروه زمانی یک سامانه، سبب شد تا بسیاری از پدیده‌های ژئوفیزیکی، از جمله رسوب، از منظر آشوبی نیز مورد ارزیابی قرار گیرند. تخمین بار رسوب به دلیل وابستگی به عوامل متعدد، که با روابط غیرخطی به یکدیگر وابسته‌اند، باعث شده است که روابط ساده و دقیقی در میان این اجزا مشاهده نشود. از طرفی وجود هرگونه خطا در برآورد این متغیرها، از جمله بده و غلظت ته نشینها سبب افزایش غیرخطی میزان خطا در محاسبات می‌گردند، که با ترسیم در فضای فاز اطلاعات نهفته در رفتارهای به ظاهر تصادفی چنین داده‌هایی رنگ قطعی به خود گرفته و چهره‌ی جدیدی از پدیده را نمایان می‌سازد. در تلاشهای اولیه‌ی ای که برای درک رفتار پویایی پدیده انتقال رسوب انجام شد، سیواکومار و جایاواردنا (۲۰۰۰)، با به کارگیری روش بعد همبستگی، آشوب کم دامنه را در

طبق انگاره‌ی سامانه‌های پویا، تکامل زمانی یک پدیده می‌تواند به وسیله‌ی خط سیرهای<sup>۱</sup> آن در فضای فاز بیان شود. مختصات این فضا به وسیله‌ی متغیرهایی که برای مشخص نمودن تکامل گروه زمانی سامانه لازم است تعیین می‌شود. هر خط سیر در این فضا نمایانگر تکامل زمانی یک مجموعه از شرایط اولیه است. در برخی سامانه‌ها، خط سیرها از نقاط مختلف فضای فاز آغاز، در نهایت همگرا شده، و در یک الگوی مشخص باقی می‌مانند که این حالت جذب همی خط سیرها را به اختصار جاذب<sup>۲</sup> می‌نامند. سامانه‌هایی که به صورت قطعی<sup>۳</sup> توسعه یافته‌اند، جاذبه‌های کم بعد مانند نقطه، چرخه‌ی حدی و توروس<sup>۴</sup> دارند. این گونه سامانه‌ها با بعد صحیح مشخص می‌شوند فهیم فرد (۱۳۹۲). این که خط سیرها با فاصله‌ی ثابت از یکدیگر در حالت همگرا باقی می‌مانند خاصیت مهمی است که سبب پیش‌بینی بلند مدت سامانه‌ی تحت مطالعه می‌شود، در مقابل، سامانه‌های پویایی وجود دارند که جاذبه‌هایشان دارای توپولوژی<sup>۵</sup> نیستند. این دسته از جاذبه‌ها را جاذب عجیب نامیده، و به وسیله‌ی بعد غیر صحیح مشخص می‌شوند. مهمترین مشخصه چنین جاذبه‌ها این است که خط سیرهای نزدیک به هم به صورت نمایی از یکدیگر دور می‌شوند. این حالت بیانگر حساسیت سامانه به شرایط اولیه بوده و متعاقباً پیش‌بینی رفتار بلند مدت آن غیرممکن است. این خصیصه در یک سامانه جزء ویژگیهای بنیادین آن سامانه به شمار رفته و نمی‌توان با جمع آوری اطلاعات بیشتر درباره‌ی سامانه آن را حذف کرد. این وابستگی به شرایط اولیه در سامانه‌هایی که عناصر متعدد با یکدیگر تعامل غیرخطی دارند مشاهده می‌شود. اگر قانون قطعی خاصی در پشت گروههای زمانی به ظاهر تصادفی وجود داشته باشد، ممکن خواهد بود که با استفاده از آنها، در مقایسه با روشهای احتمالی، بتوان دقت پیش‌بینی را افزایش داد، به عبارت دیگر، اگر تظاهرات تصادفی داده‌های گروه زمانی بر اساس سامانه‌ی پویایی آشوبی باشند، این امکان وجود خواهد داشت که با

<sup>1</sup>Trajectory<sup>2</sup>Attraction<sup>3</sup>Deterministically<sup>4</sup>torus<sup>5</sup>Topological

خود قرار می‌دهد. در پایین دست سد نیز، این امر نه تنها اثرات نامطلوبی بر سد و شبکه‌های آبرسانی و نهرهای آبیاری از قبیل انسداد و فرسایش دریاچه‌های سد، ته نشینی و گرفتگی نهرها را در پی داشته، بلکه تبعات منفی و مخرب زیست محیطی را نیز به همراه دارد. مرگ ماهیان و رشد گونه‌های جدید جانوری نیز از دیگر آثار منفی مواد معلق در آب است؛ در صورت آلاینده بودن رسوبها، اهمیت این موضوع دو چندان می‌گردد. به رغم پژوهشهای متعددی که با ایجاد رابطه میان بده، سرعت و تنش برشی برای تخمین انتقال بار معلق صورت گرفته است، هیچ رابطه‌ای که بتوان از آن در تمامی حوضه‌های آبخیز استفاده کرد موجود نیست؛ لذا با توجه به آنچه ذکر گردید برای کاهش اثرات کوتاه و بلند مدتی که انتقال رسوب و تجمع ته نشینها در آبیگرهای سدها در پی خواهند داشت، ضروری است که مطالعات نوینی در این حیطة صورت گیرد تا از ماهیت حقیقی فرایند انتقال رسوبها در مقیاسهای مختلف زمانی و مکانی پرده برداشته شده، و با آگاهی از آن بتوان توانایی پیش بینی انتقال ته نشینها را در مقیاسهای مختلف تعیین، وجود روابطی را بین این پدیده در مقیاسهای متفاوت مطالعه و چارچوب یا شبیه مناسی را برای انتقال داده‌ها بین مقیاسهای مختلف تبیین کرد (شقایان و طالب بیدختی، ۱۳۸۸). لذا، در این پژوهش به بررسی تاثیر سد بر الگوی آشوبی انتقال بار معلق در طی بازه‌های ده روزه و ماهانه‌ی رود کرج پرداخته شده است. به نظر می‌رسد که تاکنون مطالعه‌ای در این زمینه صورت نگرفته باشد.

#### مواد و روشها:

#### فضای فاز:

هر سامانه‌ای که از یک حالت اولیه در زمان تکامل می‌یابد به وسیله مجموعه‌ای از قوانین تعریف می‌شود که به آنها سامانه‌های پویا گویند. هنگامی که این قوانین مجموعه‌ای از معادلات دیفرانسیلی باشد، سامانه را جاری<sup>۱</sup> می‌نامند، زیرا جواب آن در زمان پیوسته است در حالی که اگر این قوانین مجموعه‌ای از معادلات دیفرانسیلی گسسته باشد، به سامانه نقشه<sup>۲</sup> گویند. نمودارهای بر حسب زمان برای

این پدیده مشاهده کردند. برای یافتن مناسبترین روش انتقال اطلاعات از یک مقیاس زمانی به مقیاس دیگر در پدیده‌ی بارش سیواکومار (۲۰۰۱) به بررسی وجود آشوب در ۴ مقیاس زمانی بارش پرداخت و وجود آشوب را در هر ۴ مقیاس زمانی مشاهده کرد. سولماتین و همکاران (۲۰۰۱)، با استفاده از نظریه‌ی آشوب و شبکه‌های عصبی به برآورد سطح آب دریای شمال پرداختند. آنها بیان داشتند که در منطقه‌ی ساحلی نظریه‌ی آشوب نتایج بهتری را نسبت به شبیه‌های خطی مانند خود همبستگی و شبیه ARIMA ارائه می‌دهد. سیواکومار و جایاواردنا (۲۰۰۳) به بررسی درک پویایی انتقال رسوب پرداخته و با استفاده از روش بعد همبستگی آشوب کم دامنه را در این پدیده مشاهده نمودند. استهلک (۲۰۰۳) با استفاده از روش زمان تاخیر به مطالعه‌ی رفتار آشوبگونه در دو گروه از داده‌های رواناب در جمهوری چک پرداخت و وجود الگوهای آشوبی را مورد تحلیل قرار داد. ریگواندا و همکاران (۲۰۰۴) نیز به بررسی داده‌های جریان رود در سه مقیاس مختلف زمانی پرداخته و مشاهده کردند که بعضی از گروههای زمانی دارای رفتار آشوبی بوده، و برخی از رفتار تصادفی تبعیت می‌کنند. در ایران نیز، فتاحی و همکاران (۱۳۸۸) با استفاده از روش تحلیل موجکی به پیش پردازش گروه زمانی جریان رود پرداخته و مشاهده کردند که دقت پیش بینی افزایش می‌یابد. شقایان و طالب بیدختی (۱۳۸۸) به بررسی وجود آشوب در مقیاسهای مختلف زمانی جریان رود پرداخته و مشاهده کردند که بعضی از مقیاسها دارای رفتار آشوبی و برخی دیگر دارای رفتار تصادفی می‌باشند. فهیم فرد و همکاران (۱۳۹۳) به بررسی الگوی آشوبی در مقیاس ده روزه بار بستر رود جاجرود پرداخته و وجود آشوب را در این مقیاس تأیید کردند.

وابستگی شدید فراسنجهای اساسی در طراحی سد به تخمین صحیح رسوب حمل شده به وسیله‌ی رود به آن جایگاه ویژه‌ای می‌بخشد. در بالا دست سد، ته نشین شدن رسوب، حجم مرده‌ی سد را تشکیل می‌دهد که ویژگیهای فیزیکی سد از جمله تعیین ارتفاع مناسب دریاچه‌های تخلیه کننده، محل قرارگیری توربینهای مولد برق، پایداری سد و نیز عمر سودمند سد را تحت الشعاع

<sup>۱</sup> - flow

<sup>۲</sup> - map

می‌کنند تا تاخیر زمانی با دقت انتخاب شود. اگر مقدار  $\tau$  بسیار کم باشد، بنیادهای مجاور  $u_i(x)$  و  $u_i(x+\tau)$  همبستگی زیادی به عنوان مستقل هم پایه خواهند داشت؛ به عبارت دیگر، اگر  $\tau$  بسیار بزرگ انتخاب شود، بنیادهای همسایه بسیار ناهمبسته خواهند بود.

برای هر گروه زمانی اندازه‌گیری شده  $u_i(x)$  ( $i=1,2,\dots,l$ ) مقدار برداری بنیادهای  $q$  به صورت زیر ساخته می‌شوند:

$$u_i(x) = \{u_i(x), u_i(x+\tau), \dots, u_i(x+(q-1)\tau)\} \quad (2)$$

که  $\tau$  زمان تاخیر می‌باشد. از آنجا که  $l$  گروه زمانی وجود دارد، می‌توان برداری با  $m \equiv ql$  بنیاد ساخت. بنابراین:

$$T(x) = \{u_1(x), u_2(x), \dots, u_l(x) \\ = \{u_1(x), u_1(x+\tau), \dots, u_1[x+(q-1)\tau], u_2(x), u_2(x+\tau), \dots, u_2[x+(q-1)\tau], \dots, u_l(x), u_l(x+\tau), \dots, u_l[x+(q-1)\tau]\}$$

که  $m$  بعد نهشتن می‌باشد.

#### بعد نهشتن:

ویژگیهای جاذب عجیب یک سامانه‌ی آشوبی را می‌توان به وسیله نمونه‌گیری بخشی از خروجیهای گروه زمانی تحلیل کرد. انگاره‌ی تاکنر اثبات می‌کند که می‌توان مدار تناوبی پایدار (جاذب عجیب) را در فضای نهشتن تشکیل داد هرگاه که بعد نهشتن مناسب  $m \geq 2d+1$  (که  $d$  بعد سامانه‌ی آشوبی است) مشخص شده باشد (هنگ گوانگ و چونگ ژو، ۲۰۰۶).

برای داشتن یک نماینده‌ی پایدار از یک سامانه‌ی پویایی واقعی، بعد نهشتن، بایستی به اندازه‌ی کافی بزرگ باشد. در نهایت، بازسازی زمان تاخیر در فضای  $m$  بعدی با بردارهای  $u_i(x)$  به صورت زیر خواهد بود:

$$u_i(x) = \{u_i(x), u_i(x+\tau), \dots, u_i(x+(q-1)\tau)\} \quad (4)$$

دقت  $\tau$  و  $m$  بطور مستقیم به دقت ویژگیهای توصیف شده ثابت جاذبهای عجیب در بازسازی فضای فاز وابسته است.

#### بعد همبستگی:

تعیین وجود رفتار آشوبی یکی از مراحل مهم در تحلیل گروههای زمانی تلقی می‌گردد. بعد همبستگی با توانایی آشکارسازی مشخصه‌های چند فراکتالی مجموعه‌ی تحت آشوب و نیز نمایاندن درجه‌ی ناهنجاری یک جاذب عجیب در فضای فاز، یکی از فراسنجهای مهم سامانه‌ی آشوبی به شمار می‌رود.

برخی سامانه‌های پویا کارآمد نبوده و تکامل پدیده‌ی تحت بررسی را به خوبی نمایان نمی‌سازند. از این رو، بهتر است چنین سامانه‌هایی را در فضای فاز مورد تحلیل قرار دهیم. فضای فاز سامانه پویایی، فضایی ریاضی با محورهای مختصات متعامد است که محورهایش ارائه دهنده‌ی تمامی متغیرهای مورد نیاز برای تعیین حالت لحظه‌ای سامانه (تمامی متغیرهایی که در معادله‌ی ریاضی سامانه است) می‌باشند. برای مثال، اگر سامانه‌ی پویا تنها حرکت ذره‌ای به جرم  $m$  در یک بعد باشد، حالت آن در هر لحظه به وسیله‌ی موقعیت مکان  $x$  و سرعت آن  $v$  تعیین می‌شود. بنابراین، فضای فاز دارای دو بعد یا یک صفحه است. به عبارت دیگر حرکت ذره در سه بعد دارای فضای فاز ۶ بعدی، با سه محور مکان و سه محور سرعت می‌باشد (ولیکوف، ۲۰۰۶)؛ بنابراین فضای فاز تمامی متغیرهای ورودی به سامانه را در بر داشته، و هر حالت ممکن سامانه را به یک نقطه در فضای فاز منطبق می‌سازد. از این رو، می‌تواند تمامی حالات سامانه را در هر لحظه‌ی زمانی توصیف کند. به مجموعه‌ی این تمامی این نقاط در فضای فاز که می‌تواند تکامل سامانه پویا را بطور کامل شرح دهد، خط سیر گویند، مجموعه‌ی حدی را که خط سیرها در آن جمع می‌گردند جاذب نامند.

بعد مورد نیاز برای بازسازی فضای فاز از طریق کمترین تعداد درجه‌ی آزادی تعیین می‌شود. تعداد درجه‌ی آزادی یک سامانه‌ی پویا به وسیله‌ی تعداد متغیرهای مستقل مورد نیاز برای توصیف حالات لحظه‌ی سامانه تعریف می‌شود؛ بنابراین، تعداد درجات آزادی مورد نیاز برای شرح کامل سامانه‌ی پویایی، با تعدادی شرایط اولیه‌ی که برای مشخص کردن سامانه مورد نیاز است برابر می‌باشد.

#### زمان تاخیر:

در بیشتر مواقع، گروه زمانی دنباله‌ی ای از اعداد شماره‌واره<sup>۱</sup> اندازه‌گیری شده از بعضی کمیت‌های وابسته به وضعیت کنونی سامانه است که از تقسیم بر مضربی ثابت از زمان نمونه‌برداری به دست می‌آید:

$$u_l = u(x(l\Delta t) + \eta_l) \quad (1)$$

به منظور تعیین فاصله‌ی زمانی میان بنیادهای<sup>۲</sup>  $u_i(x+j\tau)$  ( $j=1,2,\dots,q-1$ ) از متغیرهای مستقل استفاده

<sup>1</sup>- scalar

<sup>2</sup>- element

دست می‌آورد. برای گروه‌های زمانی نامتناهی و بدون اغتشاش<sup>۱</sup>، مقدار آستانه بعد نهشتن  $m$  که در آن نمودار به اشباع می‌رسد برابر با  $m = \text{Ceil}(D_2)$  می‌باشد، که  $\text{Ceil}(D_2)$  کوچکترین مقدار صحیح بزرگتر یا برابر با  $D_2$  است. اگرچه برای داده‌های متناهی و اغتشاشی گروه‌های زمانی  $m$  بطور قابل توجهی از  $\text{Ceil}(D_2)$  بزرگتر است. (لای و لنر، ۱۹۹۸).

برای مقادیر  $m < D_2$ ، بعد فضای فاز بازسازی شده برای حل کردن ساختار جاذب عجیب، به اندازه‌ی کافی بزرگ نیست، با این وجود، می‌توان با محاسبه‌ی شیب مقدار بعد نهشتن را تقریب زد. با افزایش  $m$ ، نتایج جاذب در فضای فاز بازسازی شده کاملتر می‌گردد.

### تحلیل نتایج و بحث

در این پژوهش، از داده‌های بار معلق ایستگاه‌های آبسنجی سیرا واقع بر بالادست سد کرج و بیلقان واقع بر پایین دست سد در استان البرز، طی سالهای ۱۳۴۷-۱۳۹۱ استفاده شد. رود کرج یکی از مهمترین رودهای حوضه‌ی مرکزی و از پر آب ترین رودهای دامنه‌ی جنوبی البرز محسوب می‌شود. مساحت حوضه‌ی آبخیز این رود حدود ۸۵۰ کیلومتر مربع بوده و محیطی بالغ بر ۱۴۶ کیلومتر را دارد. بیشترین بلندای حوضه‌ی آبخیز کرج حدود ۴۲۰۰ متر و کمترین ارتفاع آن در محل سد در حدود ۱۶۰۰ متر نسبت به سطح دریا می‌باشد. بار رسوبی غالب در رود کرج، بار معلق است. موقعیت این ایستگاهها بر روی رودخانه‌ی کرج در شکل (۱) نشان داده شده است. خلاصه‌ای از ویژگیهای آماری داده‌های مورد بررسی نیز در جدول (۱) ارائه شده اند.

نخستین مرحله برای شناسایی گروه آشوبی از سایر گروه‌های زمانی، ترسیم آن در صفحه‌ی  $\{x_i, x_{i+1}\}$  می‌باشد. این نمودار با نمایاندن تکامل گروه زمانی، در صورت وجود، طرح جاذب را نیز مشخص می‌نماید. بازسازی فضای فاز نیازمند دو فراسنج زمان تاخیر ( $\tau$ ) و بعد نهشتن ( $m$ ) می‌باشد. دقت  $\tau$  و  $m$  بطور مستقیم به صحت ویژگیهای ثابت توصیف شده جاذب عجیب در بازسازی فضای فاز مربوط می‌شود. زمان تاخیر

برای محاسبه این فراسنج آشوبی باید در نظر داشت که با داشتن گروه زمانی  $\{x_i\}_{i=1}^n$  بعد نهشتن  $m$  و زمان تاخیر  $\tau$  می‌توان هم ارز سامانه‌ی پویا را در فضای فاز  $R^m$  بازسازی کرد. در این صورت، گروه زمانی به صورت مجموعه‌ی نقاط خواهد بود:

$$P_{i,m} = \{x_i, x_{i+\tau}, x_{i+2\tau}, \dots, x_{i+(m-1)\tau}\} \quad (5)$$

با انتخاب  $N$  نقطه از خط سیر و برای هر نقطه‌ی  $i$  از این  $N$  نقطه، تعداد نقاطی از خط سیر را که در فاصله‌ی  $R$  از نقطه‌ی  $i$  قرار دارند، به جز نقطه‌ی  $i$  را انتخاب می‌کنیم. اهمیت این نکته در آن است که بسته به در حالت قبض و یا بسط بودن خط سیر، شمار این نقاط متفاوت خواهد بود. این نقاط را  $N_i(R)$  می‌نامیم. می‌توان  $P_i(R)$  را نسبت تعداد نقاط درون فاصله  $R$  به  $N-I$  نقطه تعریف کرد:

$$P_i(R) = \frac{N_i}{N-1} \quad (6)$$

بنابراین خواهیم داشت:

$$C(R) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_i(R) \quad (7)$$

که  $C(R)$  مجموع همبستگی می‌باشد. اگر تمام  $N$  نقطه درون فاصله‌ی  $R$  قرار گیرند  $C(R)=I$  و اگر  $R$  از کوچکترین فاصله‌ی میان نقاط خط سیر کوچکتر باشد  $P_i=0$  بوده و  $C(R)=0$  خواهد شد. از این رو، تابع مجموع همبستگی به شکل زیر می‌باشد:

$$C(R) = \frac{1}{N^2} \sum_{j=1, j \neq i}^N \Theta(R - |P_i - P_j|) \quad (8)$$

که  $|P_i - P_j|$  فاصله‌ی اقلیدسی بین  $x_i$  و  $x_j$  است. برای مقادیر مثبت  $R$ ، مجموع همبستگی  $C(R)$  با رابطه‌ی زیر به  $R$  مرتبط می‌شود:

$$C(R) \approx a R D_2 \quad (9)$$

گراسبرگر و پروکاشیا بیان کردند که بعد همبستگی به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$D_2 = \lim_{R \rightarrow 0} \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{\log C(R)}{\log(R)} \quad (10)$$

معمولاً با برآورد شیب نمودار  $\log C(R)$  برحسب  $\log(R)$  ناحیه‌ی مقیاس گروه زمانی با افزایش بعد نهشتن خطی می‌شود که تخمینی از بعد همبستگی را به

<sup>1</sup> - noise

این ایستگاه، خط سیرها کراندار بوده و طرح جاذب مشاهده می‌شود. برای دستیابی به نتایج دقیقتر روش بعد همبستگی نیز به کار برده شد. بعد همبستگی، میزان پیچیدگی و بی‌نظمی نهفته را در یک سامانه بیان می‌کند. در ابتدا برای محاسبه‌ی این بعد بایستی مجموع همبستگی  $C_N(R)$  بر حسب شعاع همبستگی  $R$  ترسیم گردد. قسمتی از نمودار حاصل، دارای شیب یکنواختی خواهد بود. هر قدر طول این ناحیه بیشتر باشد، اطلاعات آشوبی آن نیز غنیتر است، در واقع این ناحیه گویای آن است که هر خاصیت و مشخصه کل سامانه در اجزای متشکل از آن نیز وجود دارد و بالعکس. شیب این ناحیه برآورد نسبتاً دقیقی را از بعد همبستگی را ارائه می‌دهد.

در گام آخر، برای تعیین دامنه‌ی آشوبی بایستی بعد همبستگی در مقابل بعد نهشتن ترسیم گردد. اگر بعد همبستگی بعد از یک مقدار مشخص بعد نهشتن به اشباع رسیده و مقدار آن افزایش نیابد، این مقدار به عنوان بعد همبستگی جاذب تعریف شده، بعد نهشتن به دست آمده و حداقل تعداد متغیرهای لازم را برای شبیه‌سازی پویایی جاذب تعیین می‌کند. نتایج ترسیم بعد همبستگی در مقابل بعد نهشتن در شکل ۱۴ آورده شده‌اند. بعد همبستگی گروه زمانی ده روزه و ماهانه بار معلق سیرا به ترتیب برابر با  $2/9168$  و  $2/9397$  و بعد همبستگی گروه زمانی ماهانه‌ی بار معلق بیلقان برابر با  $3/177$  تخمین زده شد. از این نتایج استنباط می‌شود که گروه زمانی بار معلق دارای الگوی آشوبناک کم دامنه‌ای است که تحت تاثیر سد، در مقیاس زمانی کوتاه مدت پویایی آشوبی خود را از دست داده و از رفتار تصادفی پیروی می‌کند، اما به دلیل این که در سامانه‌های آشوبی خلق اطلاعات وجود دارد، و سامانه‌ی ارتباط خود را با شرایط اولیه از دست می‌دهد، بعد از سپری شدن مدتی دوباره سامانه‌ی انتقال رسوب بار معلق به رفتار آشوبی بر می‌گردد. لذا، برای تحلیل بار معلق در پایین دست سد توصیه می‌شود که از گروه زمانی بیش از ده روزه و نزدیک به ماهانه استفاده شود.

بهینه‌ترین حالت واگرایی خط سیرها را درون فضای نهشتن ارائه می‌دهد. علاوه بر آن، برآورد نامناسب زمان تاخیر می‌تواند به تخمین کمتر و یا بیشتر بعد همبستگی منجر شود؛ از این رو، در مطالعه حاضر به منظور برآورد زمان تاخیر بهینه از روش میانگین اطلاعات متقابل استفاده شد. زمان تاخیر بهینه برای دو دوره‌ی زمانی ده روزه و ماهانه محاسبه گردید. همان طور که از شکل‌های (۲) تا (۵) به دست می‌آید، زمان تاخیر بهینه برای بار معلق ده روزه و ماهانه ایستگاه آسنجی سیرا در بالادست سد به ترتیب ۹ و ۳ و برای ایستگاه آسنجی بیلقان، در پایین دست سد ۱۴ و ۳ برآورد گردید. فضای زمان-تأخیر یافته<sup>۱</sup> برای نهشتن<sup>۲</sup> داده‌ها باید ابعاد مناسبی داشته باشد. اگر این بعد خیلی کوچک انتخاب گردد، فاصله‌ی نقاط بر روی جاذب برهم منطبق خواهند شد، یا با همپوشانی فضای نهشتن نادرستی را ارائه می‌دهد. از سوی دیگر، چنانچه این فراسنج بیشتر تخمین زده شود، ممکن است فضای فاز نمونه‌ی نامناسب مغشوشی شود که نیازمند به محاسبات پیچیده‌تری است. از این رو، با بهره‌گیری از الگوریتم نزدیکترین همسایگی کاذب بعد نهشتن محاسبه گردید. نمودارهای (۶) تا (۹) مقادیر این بعد را برای تمامی دوره‌های زمانی نشان می‌دهند. همان طور که نمایان است مقدار بعد نهشتن برای ایستگاه آسنجی سیرا در دوره‌ی زمانی ده روزه، ۸ و برای دوره‌ی زمانی ماهانه ۵ می‌باشد. همچنین مقدار این بعد برای ایستگاه آسنجی بیلقان به ترتیب برابر با ۲۰ و ۷ است.

در شکل‌های (۱۰) تا (۱۳) نمودار فضای فاز بازسازی شده، در هر دوره‌ی زمانی، با توجه به دو فراسنج زمان تاخیر و بعد نهشتن مرحله‌ی قبل برای هر دو ایستگاه آسنجی سیرا و بیلقان ترسیم گردیده‌اند. همان طور که قابل مشاهده است، خط سیرهای بار معلق در هر دو مقیاس ۱۰ روزه و ماهانه ایستگاه آسنجی سیرا که در بالادست سد قرار دارد، کراندار بوده و طرح جاذب در هر دو مقیاس زمانی قابل مشاهده است، اما در پایین دست سد، در مقیاس ده روزه بار معلق، خط سیرها تمام صفحه  $\{X_j, X_{j+1}\}$  را می‌پوشانند، در حالی که در بازه‌ی ماهانه،

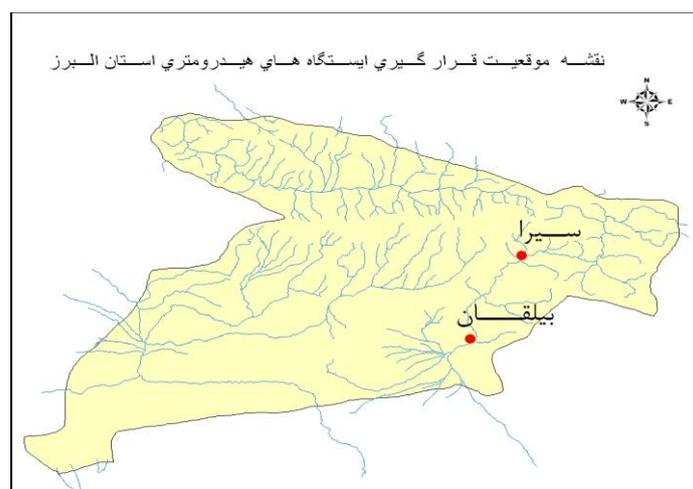
<sup>1</sup> Time-delay space

<sup>2</sup> Embed

## نتیجه‌گیری

در طول دو دهه‌ی گذشته، مطالعات در مورد کاربرد مفاهیم پویاهای غیر خطی و آشوب در سامانه‌های آبشناسی در حال افزایش بوده‌اند. نتایج این مطالعات، بالاخص در مرحله‌ی اکتشاف مفاهیم در علوم آب دلگرم کننده‌اند. با ملاحظه این که هیچ یک از روشهای شبیه‌سازی حاضر قادر به حل مشکلات آبشناسی که با آن مواجهیم نیستند، نیاز برای یافتن راه حلی که به تنهایی و یا با استفاده از دیگر روشها، بتواند شبیه‌هایی ساده‌تر و در عین حال کاراتری را ایجاد کند، بیش از پیش احساس می‌شود. لذا این مقاله به بررسی رفتار آشوبی انتقال سامانه‌ی بار معلق، و تاثیر وجود سد بر این سامانه‌ی انتقال پرداخته است، به دلیل این که آشوبی و غیر خطی بودن فقط درباره‌ی تغییرات کوچک که منجر به تاثیرات بزرگ و خروجی به ظاهر پیچیده از یک سامانه‌ی ساده می‌شود نیست و بالعکس، در مورد تغییرات بزرگ که منجر به تاثیرات کوچک و خروجی به ظاهر ساده‌ی سامانه‌های پیچیده می‌شود نیز می‌باشد، روش بازسازی فضای فاز می‌تواند برای هر دو حالت کارا باشد. از طرفی، جاذب عجیب یک مجموعه‌ی آشوبی دارای ساختار فراکتالی است. بعد همبستگی میزان گستردگی یک مجموعه آشوبی را ارائه می‌دهد. در این راستا، گروه زمانی غلظت رسوب معلق ۴۴ ساله‌ی رود کرچ در ایستگاههای

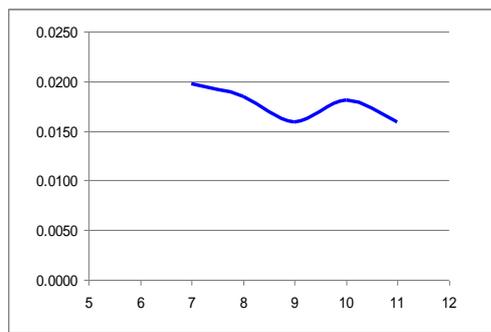
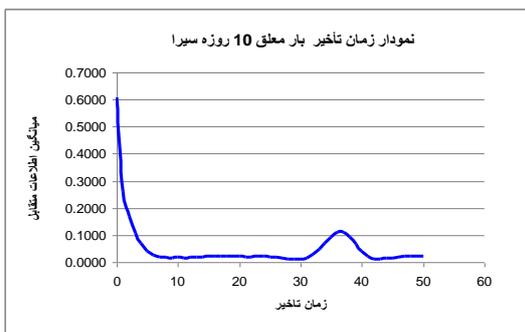
آبسنجی سیرا و بیلقان با استفاده از روشهای بازسازی فضای فاز و روش بعد همبستگی مورد تحلیل قرار گرفت. نتایج، ویژگیهای آشوب کم دامنه را در انتقال رسوبات در هر دو بازه‌ی زمانی در بالادست سد نشان می‌دهند، اما در مقیاس ده روزه در پایین دست سد، رفتار آشوبی مشاهده نگردید، در صورتی که در مقیاس ماهانه، آشوب کم دامنه دوباره قابل مشاهده بود. این مشاهده حاکی از آن است که سامانه‌ی انتقال بار معلق پدیده‌ی آشوبی تحت تاثیر ۳ یا ۴ عامل می‌باشد، که عوامل خارجی مانند سد می‌توانند در مقیاس زمانی کوتاه مدت، اختلال را در چنین الگویی ایجاد کنند. یکی از مسائل مهم ولی بی پاسخ در انتقال بار معلق تعیین همین عوامل است. عواملی که شرایط اولیه‌ی آنها تعیین کننده‌ی مسیر پدیده به سمت آشوب یا تصادف است. با توجه به این که احداث سد نحوه‌ی انتقال ته نشینها را در رودخانه دستخوش تغییر ساخته، و عواملی که تاثیر آنها بر میزان رسوبها در آبراهه‌ها در بالادست و پایین دست سد متفاوت است، گمان می‌رود که با مقایسه‌ی الگوهای آشوبی انتقال بار رسوبات در این دو گروه زمانی که به یک پدیده می‌پردازد بتوان مجموعه‌ی عوامل موثر را محدودتر ساخت، لکن پیشنهاد می‌شود که برای مطالعات بار معلق پایین دست سد از داده‌هایی با بازه‌ی زمانی نزدیک به ماهانه استفاده شود.



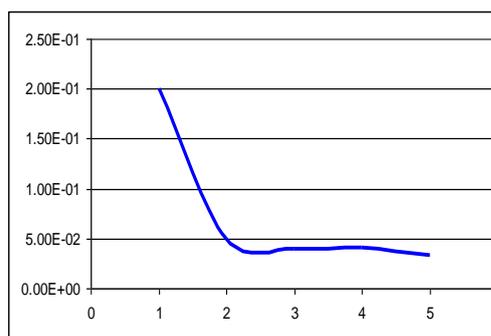
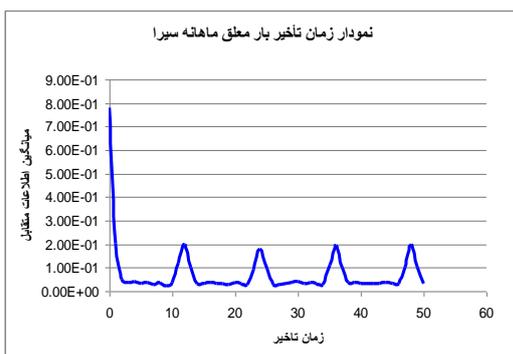
شکل ۱- موقعیت قرارگیری ایستگاههای آبسنجی واقع بر رودخانه کرچ.

جدول ۱- مشخصات آماری ایستگاههای آبسنجی

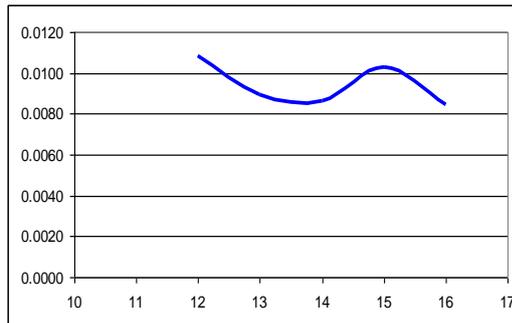
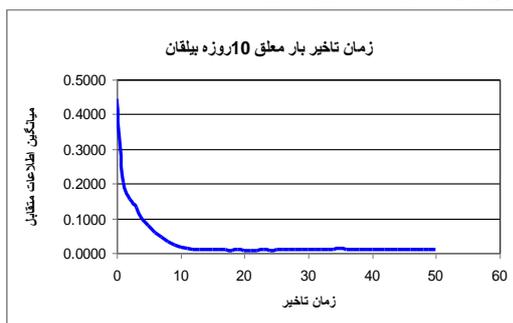
نام ایستگاه	مولفه	میانگین	انحراف معیار	مقدار حداکثر	مقدار حداقل	چولگی
سیرا	بار معلق ۱۰ روزه	۵۹۶۳۶.۶	۱۵۵۰۹۳.۹	۱۹۲۷۲۵۲	۳۹۸.۹۹۸۶	۵.۹۱۳
	بار معلق ماهانه	۱۸۱۱۸۶.۶	۴۱۶۳۴۵.۱	۴۳۶۷۲۹۱	۱۲۵۲.۳۱۹	۴.۹۸۸
بیلقان	بار معلق ۱۰ روزه	۲۹۸۱۸.۳	۸۴۷۲۸.۹۷	۱۳۸۲۵۱۲	۸۰.۴۴۰	۷.۴۸۱
	بار معلق ماهانه	۲۷۰۲۷.۲۵	۴۲۴۴۴.۰۶	۴۵۹۴۰.۵	۶۶۳.۳۳۸	۴.۴۳۷



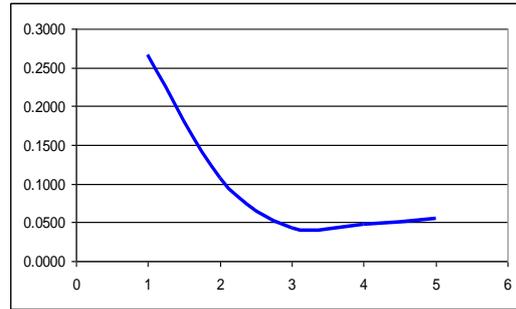
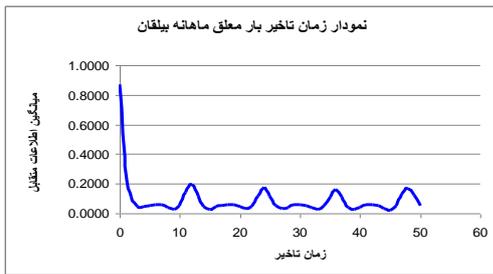
شکل ۲- نمودار زمان تاخیر بهینه‌ی گروه زمانی بار معلق ۱۰ روزه‌ی سیرا.



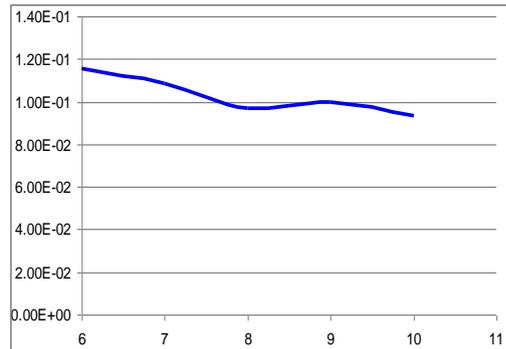
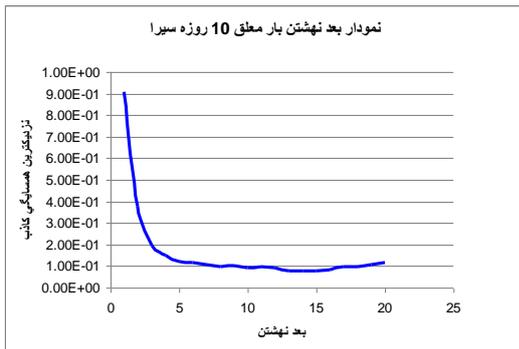
شکل ۳- نمودار زمان تاخیر بهینه‌ی گروه زمانی بار معلق ماهانه‌ی سیرا.



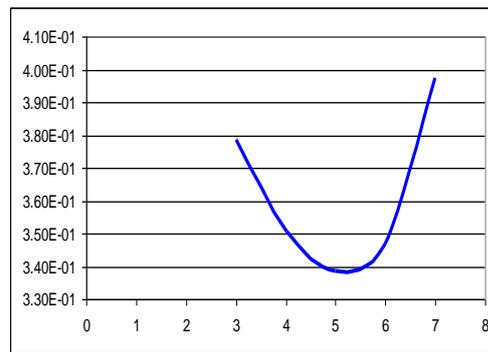
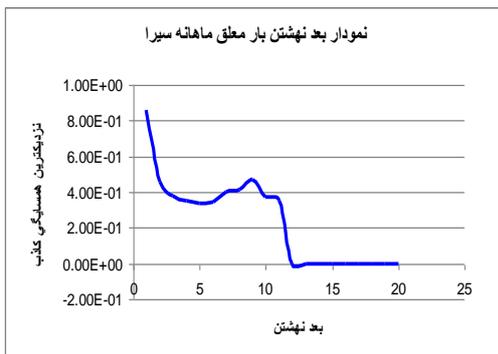
شکل ۴- نمودار زمان تاخیر بهینه‌ی گروه زمانی بار معلق ۱۰ روزه‌ی بیلقان.



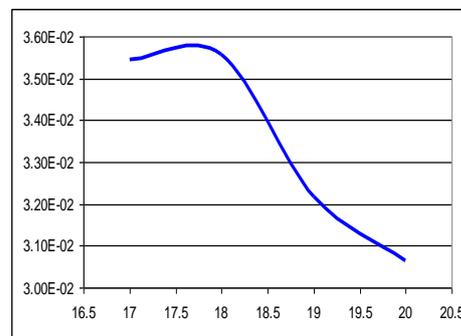
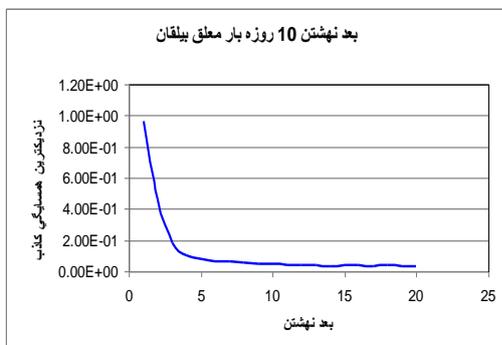
شکل ۵- نمودار زمان تاخیر بهینه‌ی گروه زمانی بار معلق ماهانه‌ی بیلقان.



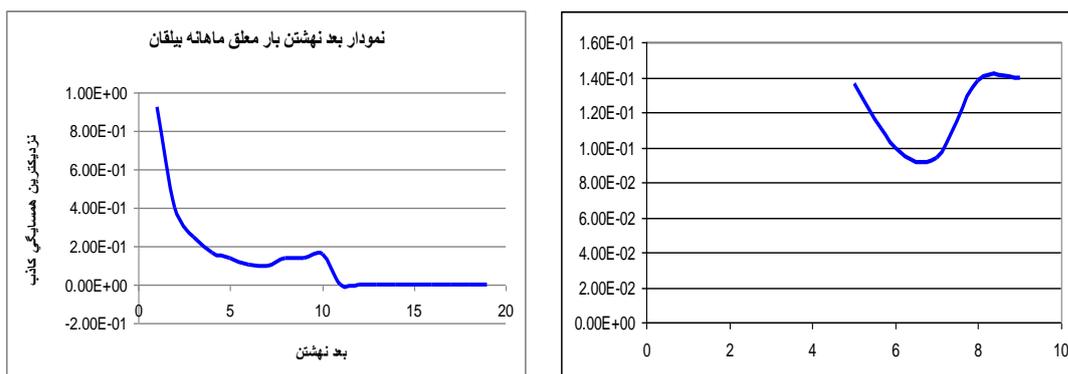
شکل ۶- بعد نهشتن گروه زمانی ۱۰ روزه‌ی بار معلق سیرا.



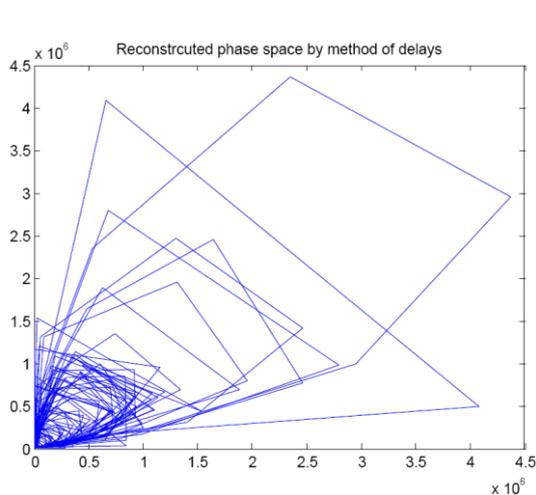
شکل ۷- بعد نهشتن گروه زمانی ماهانه‌ی بار معلق سیرا.



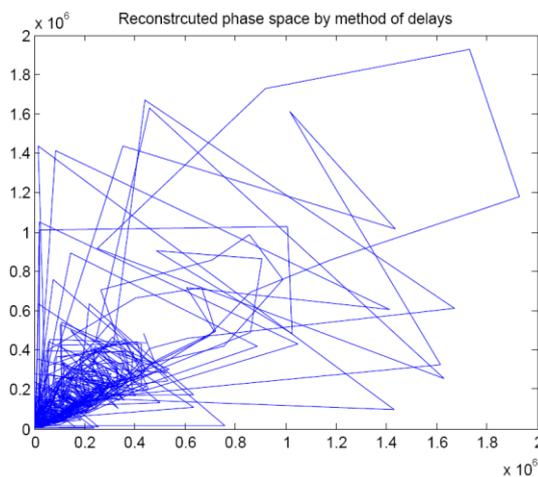
شکل ۸- بعد نهشتن گروه زمانی ۱۰ روزه‌ی بار معلق بیلقان.



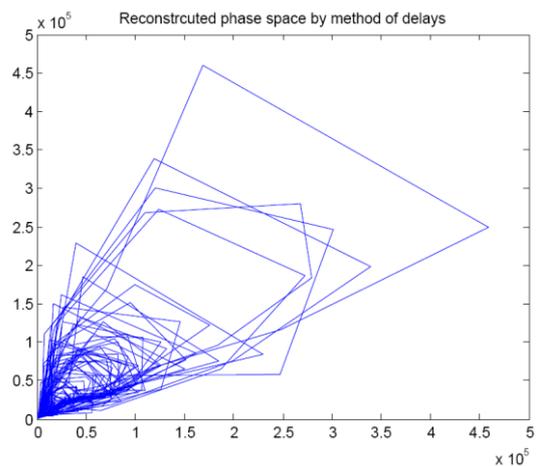
شکل ۹- بعد نهشتن گروه زمانی ماهانه بار معلق بیلقان.



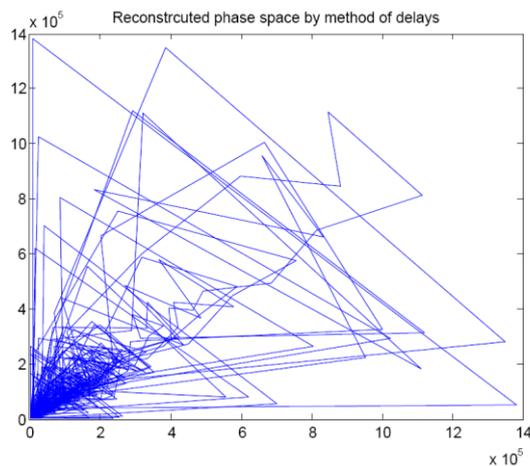
شکل ۱۱- بازسازی فضای فاز بار معلق ماهانه سیرا.



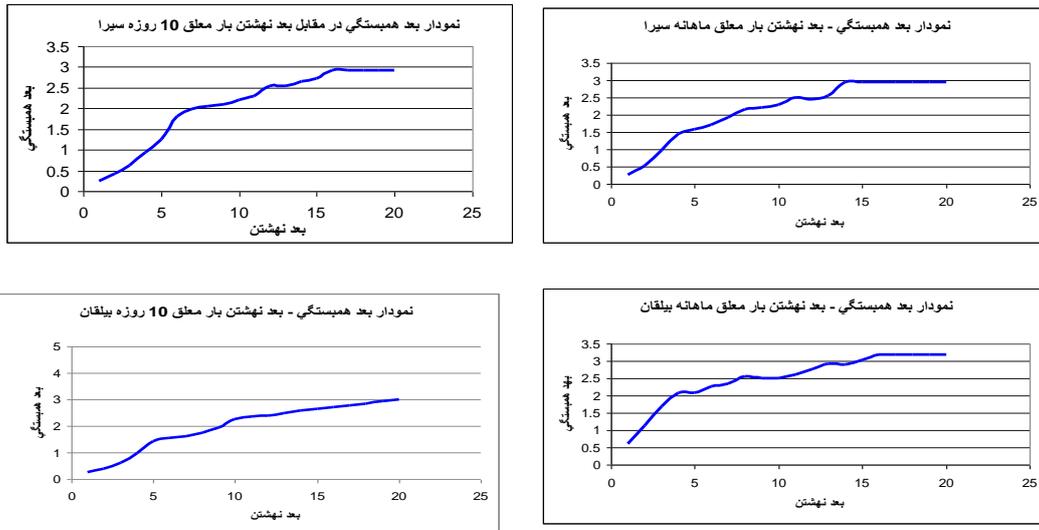
شکل ۱۰- بازسازی فضای فاز بار معلق ده روزهی سیرا.



شکل ۱۳- بازسازی فضای فاز بار معلق ماهانهی بیلقان.



شکل ۱۲- بازسازی فضای فاز بار معلق ده روزهی بیلقان.



شکل ۱۴- نمودار بعد همبستگی بازه‌های زمانی ایستگاههای آبرسانی سیرا و بیلقان.

- perspective. Hydrol Earth Sys. Sci. 5: 645-651.
12. Sivakumar, B, A. W, Jayawardena. 2003. Sediment transport phenomenon in rivers: An alternative perspective, Enviromen Model. Softw. 18:831-838.
  13. Sivakumar, B. 2000. Chaos theory in hydrology: Important issues and interpretations. J. Hydrol. 227:120.
  14. Sivakumar, B. 2009. Nonlinear dynamics and chaos in hydrological system: Last developments and a look forwards. Stoch Environ Res Risk Access. 23:1027-1036.
  15. Solomatine, D. P., S. Velickov, and J. C. Wust. 2001. Predicting water levels and currents in the North Sea using chaos theory and neural networks Proc. 29 th Jahr Congr. Beijing, China: 1-11.
  16. Stehlik, J. 2003. Deterministic chaos in runoff series. Hydrometeorological Institute, Dept. of Experimental Hydrology, 143, 06 Prague.
  17. Velickov. S. 2006. Nonlinear dynamics and chaos with applications to hydrodynamics and hydrological modeling. Taylor and Francis e-library.
  18. Wang, Y.Z, X, Rong, B. Li, J. Su, and R.Q. Wang, 2010. Chaotic dynamics in ecological time series: 22 year study of a natural population. Int. J. Nonlin. Sciences and Numerical Simul. 11:511-518.
- منابع**
۱. امامی، ا. ۱۳۸۹. انتقال رسوب، انتشارات جهاد دانشگاهی واحد صنعتی امیر کبیر.
  ۲. شقاقیان، م ر، و ن. طالب بیدختی. ۱۳۸۸. بررسی وجود آشوب در جریان رود در مقیاسهای زمانی گوناگون، مجله مهندسی آب.
  ۳. فتاحی م ه، ن، طالب بیدختی، غ، رخشنده رو، و ا. شمسایی. ۱۳۸۸. پیش پردازش موجکی و فراکتالی گروه زمانی جریان رودخانه برای شبیه پیش بینی شبکه عصبی. همایش ملی بحران آب. دانشگاه آزاد اسلامی واحد مرودشت، اسفند.
  ۴. فهیم فرد، س. ۱۳۹۲. بررسی وجود الگوهای آشوبناک در سامانه انتقال رسوبات رودخانه (مطالعه موردی: رودخانه کرج).
  ۵. فهیم فرد، س. ا. شمسایی، م. ه، فتاحی، س. فرزین. ۱۳۹۳. بررسی وجود الگوی آشوبی در گروه زمانی بار بستر رودخانه (مطالعه موردی رودخانه جاجرود). سیزدهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشگاه تبریز، تبریز، آبان.
  6. Hang guang, M. A. and H. Chong zho 2006. Selection of embedding dimension and delay time in phase space reconstruction. Front, Electr., Election, Eng, China. 1:111-114.
  7. Lai, Y. and D. Lener 1998. Effective scaling reigme for computing the correlation dimension from chaotic time series. Physica D, 115.
  8. Musielak, Z.E. and D.E. Musielak, High dimensional chaos in dissipative and driven dynamical systems. Department of Physics the University of Texas at Arlington.
  9. Regonda, S K, B. Sivakumar, and A. Jain. 2004. Temporal scaling in river flow: Can it be chaotic? Hydrol. Sci.– Journal- des Science Hydrologiques. 49.
  10. Saha, L.M. 2011. Measuring chaos: Topological entropy and correlation dimension in discrete map.
  11. Sivakumar, B. 2001. Rainfall dynamics at different temporal scales: A chaotic