

بررسی آشوبناکی و بازسازی فضای فاز دینامیکی بارش در مقیاس‌های روزانه، هفتگی و ماهانه (مطالعه موردی: حوضه قره‌سو در کرمانشاه)

محمد ذونعمت کرمانی^{۱*}، خاطره امیرخانی^۲، مجید رحیم‌پور^۱

۱. عضو هیات علمی، بخش مهندسی آب، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

۲. کارشناس ارشد مهندسی منابع آب، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۱/۲۹ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۴/۰۳/۰۹)

چکیده

در تحقیق حاضر آشوب‌پذیری سری زمانی بارش در مقیاس‌های روزانه، هفتگی و ماهانه در ایستگاه‌های پل کهنه و قورباغستان واقع در حوضه رودخانه قره‌سو شهر کرمانشاه بررسی شد. در ابتدا به منظور ارزیابی تصادفی نبودن داده‌ها، آزمون روش داده‌های جایگزین مدنظر قرار گرفت. سپس واکاوی غیرتناوبی بودن سری‌های زمانی با استفاده از آنالیز توان طیف انجام گرفت. نتایج بررسی آشوبناکی نشان داد که براساس دو روش توان لیاپانوف و بُعد همبستگی، سری زمانی بارش در مقیاس روزانه آشوبناک نیست و رفتاری کاملاً تصادفی دارد، درحالی که در دو مقیاس هفتگی و ماهانه دارای رفتاری آشوبناک است (وجود بزرگ‌ترین نمای مثبت لیاپانوف و بُعد همبستگی بین ۴ تا ۷). در ادامه، بازسازی فضای فاز با به‌کارگیری شیوه زمان تأخیر و بُعد محاط (تعبیه) صورت پذیرفت (ابعاد محاط بین ۷ تا ۱۰ و زمان تأخیر بین ۲ تا ۴ برای ایستگاه پل کهنه؛ ابعاد محاط بین ۹ تا ۱۹ و زمان تأخیر بین ۲ تا ۳ برای ایستگاه قورباغستان). یافته‌های تحقیق مبین تصادفی بودن سری‌های زمانی بارش در مقیاس کوتاه‌مدت (روزانه) و آشوبناک بودن آنها در مقیاس‌های میان‌مدت (هفتگی و ماهانه) است.

واژه‌های کلیدی: بُعد همبستگی، توان لیاپانوف، حوضه آبریز قره‌سو، سری زمانی بارش، نظریه آشوب.

مقدمه

با وجود روابط غیرخطی، عدم قطعیت و عدم صراحت و ویژگی‌های متغیر زمانی و مکانی سیستم‌های گردش آبی، هیچ‌یک از مدل‌های آماری و مفهومی پیشنهادشده نتوانسته‌اند مدل برتر و توانا به‌منظور الگوسازی دقیق شناخته شوند. امروزه شبکه‌های غیرخطی به‌عنوان یکی از سیستم‌های فراکوشی در شبیه‌سازی و پیش‌بینی پدیده‌های پیچیده، استفاده می‌شوند؛ در این میان توانایی شبکه‌های عصبی مصنوعی به‌عنوان مدل‌های جعبه سیاه، در مدل‌سازی بسیاری از سیستم‌های غیرخطی تبیین روابط پیچیده حاکم بر این فرایندها محرز شده است [۲۲، ۳]. در میان سیستم‌های فراکوشی، به تئوری آشوب به‌دلیل داشتن خاصیت دینامیکی غیرخطی و قطعی بودن، در شبیه‌سازی فرایندهای پیچیده توجه خاصی شده است. تئوری آشوب را اولین بار در سال ۱۹۶۵ دانشمندی به‌نام ادوارد لورنز در هواشناسی به‌کار برد. انگاره اصلی تئوری آشوب این است که در هر بی‌نظمی، نظم نهفته است؛ به این معنا که نباید نظم را تنها در یک مقیاس جست‌وجو کرد، پدیده‌ای که در مقیاس محلی، کاملاً تصادفی و پیش‌بینی‌ناپذیر به‌نظر می‌رسد چه بسا در مقیاس بزرگ‌تر، کاملاً پایا و پیش‌بینی‌پذیر باشد [۱۰]. در زمینه کارکرد تئوری آشوب، سه مزیت عمده برای تحلیل سیستم‌های هیدرولوژیکی وجود دارد: ۱. برای سیستم به‌شدت غیرخطی اجراشدنی است؛ ۲. به‌طور طبیعی همه دینامیک‌های مهم سیستم را محاسبه می‌کند؛ ۳. اطلاعات و روابط سیستم را بدون نیاز به کشف قوانین یا روابط تحت دینامیک کشف می‌کند. تحلیل آشوب، یک رابطه برای استخراج مدل متداول تهیه نمی‌کند، اما اطلاعات ارزشمندی درباره همه سیستم‌های دینامیکی برای کاربرد کلی، از قبیل پیش‌بینی داده‌ها استخراج می‌کند [۱۸].

یکی از مهم‌ترین پدیده‌های مؤثر در فرایندهای هیدرولوژیکی بارش است که شناخت رفتار آن، گام اصلی مدل‌سازی و مدیریت سایر پدیده‌های هیدرولوژیکی است. با توجه به موارد ذکرشده، بررسی وضعیت دینامیکی سری زمانی بارش می‌تواند در انتخاب و گزینش مدل‌های مناسب برای شبیه‌سازی یا پیش‌بینی آن راهگشا باشد. در همین راستا، با بررسی تصادفی یا آشوبناک بودن سری زمانی مورد نظر، که هدف اصلی تحقیق پیش‌رو است،

می‌توان به اطلاعات ارزشمندی درباره نحوه رفتار این پدیده دست یافت. در ادامه پژوهش‌ها و تحقیقات در این زمینه معرفی و بررسی می‌شوند.

جاوایاردنا و لای [۱۰] آشوبناکی بارش و دبی روزانه را به‌ترتیب در سه و دو ایستگاه هیدرومتری در هنگ‌کنگ بررسی کردند. آنها روش‌های بُعد همبستگی، نمای لیپانوف، آنتروپی کولموگروف و روش پیش‌بینی غیرخطی (ARMA) را به‌کار گرفتند. نتایج، وجود آشوب در داده‌های بارش و دبی در هنگ‌کنگ را نشان داد. سیواکومار و همکاران [۱۹] روش بُعد همبستگی را به‌منظور بررسی رفتار آشوبناک در بارش شش ایستگاه در سنگاپور به‌کار گرفتند. نتایج بررسی نشان داد که سری‌های زمانی روزانه بارش در سنگاپور، یک سیستم آشوبی با بُعد کم است. سیواکومار و همکاران [۱۹] آشوبناکی فرایند بارش-رواناب ماهانه در حوضه رودخانه گوتا در سوئد را با استفاده از روش بُعد همبستگی روی سری‌های بارش، رواناب و ضرایب رواناب بررسی کردند. نتایج مبین آشوبناکی فرایند بارش-رواناب حوضه مذکور است. سیواکومار [۲۰] با استفاده از نظریه آشوب به بررسی دینامیک بارش در مقیاس‌های مختلف زمانی پرداخت. وی داده‌های بارش در چهار مقیاس زمانی روزانه، دوروزه، چهارروزه و هشت‌روزه را طی ۲۵ سال در حوضه رودخانه لیف در می‌سی‌سی‌پی تجزیه و تحلیل کرد و به‌منظور نشان دادن رفتار دینامیکی بارش از روش بُعد همبستگی بهره گرفت. بُعد همبستگی محاسبه‌شده، رفتار آشوبی در همه مقیاس‌های بررسی‌شده را تأیید می‌کند. مین و همکاران [۱۱] آشوبناکی بارش ماهانه مناطق تپه‌ای سیچوان در چین را با استفاده از روش بُعد همبستگی و بازسازی فضای فاز و آنتروپی کولموگروف بررسی کردند. آنها با توجه به محاسبه بُعد همبستگی و آنتروپی کولموگروف که به‌ترتیب $4/0.22$ و $0/25$ بود، نتیجه گرفتند که بارش ماهانه در این منطقه رفتاری آشوبناک نشان می‌دهد. دهانیا و کومار [۹] به بررسی آشوبناکی بارش روزانه با استفاده از مجموعه‌های غیرخطی پرداختند. آنها از داده‌های بارش سه منطقه مختلف از کشور هند مربوط به سال‌های ۱۹۵۵-۲۰۰۰ و به‌منظور بررسی آشوبناکی از روش بازسازی فضای فاز و بُعد همبستگی و نمای لیپانوف استفاده کردند. نتایج بیانگر آشوب کم‌بُعد در سری زمانی بارش در هر سه

شد و در پایان، فضای فاز دینامیکی سری زمانی با توجه به روش زمان تأخیر و بُعد محاط بازسازی شد.

مواد و روش‌ها

منطقه تحقیق

استان کرمانشاه با مساحت ۲۴۳۶۱ کیلومتر مربع در حدود ۱/۵ درصد از کل مساحت ایران را در بر گرفته است. میانگین بارش سالانه استان کرمانشاه ۴۸۵ میلی‌متر است. حوضه آبریز قره‌سو به مختصات جغرافیایی ۳۴ درجه و ۲۴ ثانیه تا ۳۴ درجه و ۵۵ دقیقه و ۸ ثانیه عرض شمالی و ۴۶ درجه و ۲۲ دقیقه و ۲۶ ثانیه تا ۴۷ درجه و ۲۲ دقیقه و ۵ ثانیه ۷ طول شرقی با مساحت ۵۴۴۲/۷ کیلومتر مربع از حوضه‌های داخلی استان کرمانشاه و زیرمجموعه حوضه آبخیز کرخه است. این حوضه از حوضه‌های سرشاخه کرخه است و از جنوب استان کردستان آغاز می‌شود و تا جنوب شرقی استان کرمانشاه ادامه می‌یابد [۴].

به‌منظور بررسی سری زمانی بارش حوضه قره‌سو، اطلاعات لازم از سازمان آب منطقه‌ای غرب در استان کرمانشاه برای دو ایستگاه پل کهنه (داده‌های روزانه از تاریخ ۱ مهر ۱۳۶۷ تا ۳۱ شهریور ۱۳۷۴) و قورباغستان (داده‌های روزانه از تاریخ ۱ مهر ۱۳۷۱ تا ۳۱ شهریور ۱۳۸۴) گرفته شد. مشخصات ایستگاه‌های مورد نظر در جدول ۱ آورده شده است. موقعیت جغرافیایی حوضه قره‌سو و ایستگاه‌های مورد نظر در شکل ۱ و مشخصات آماری سری زمانی بارش برای دو ایستگاه مورد نظر در جدول ۲ آورده شده است. به‌منظور درک و شناخت اولیه از چگونگی رفتار بارش در شکل ۲ نمودارهای تغییرات بارش در دو ایستگاه پل کهنه و قورباغستان برای مقیاس‌های زمانی ماهانه نشان داده شده است.

منطقه است. ذونعمت کرمانی و کیشی [۲۳] به بررسی خصوصیات امواج دریایی با استفاده از نظریه آشوب پرداختند. بررسی‌ها، آشوبناکی امواج بادالقایی را نشان می‌دهد.

پژوهشگران کشورمان نیز تحقیقاتی را با استفاده از نظریه آشوب درباره پدیده‌های مختلف هیدرولوژیکی انجام داده‌اند که از آن جمله می‌توان به تحقیقات فرزین و همکاران [۵]، قربانی و همکاران [۶]، حسن‌زاده و همکاران [۲]، مرادی‌زاده و همکاران [۸]، لطف‌اللهی و همکاران [۷] و انیس حسینی و همکاران [۱۱] اشاره کرد. در این میان، فرزین و همکاران [۵] آشوب‌پذیری سری زمانی بارش را با استفاده از ترسیم فضای فاز و روش بُعد همبستگی بر روی بارش ماهانه در دریاچه ارومیه تحلیل کردند. آنها با استفاده از الگوریتم گراسبرگر- پروکاشیا، بُعد همبستگی سری زمانی بارش را محاسبه کردند که مقدار غیر صحیح این کمیت حاکی از رفتار آشوبناک این سری زمانی در دریاچه ارومیه است. کین و همکاران [۱۴] به پیش‌بینی سالانه رواناب رودخانه یانگ‌تسه چین با استفاده از روش نزدیک‌ترین همسایگی بر مبنای مفاهیم نظریه آشوب پرداختند. نتایج بیانگر قابلیت زیاد این روش در پیش‌بینی سالانه رواناب است.

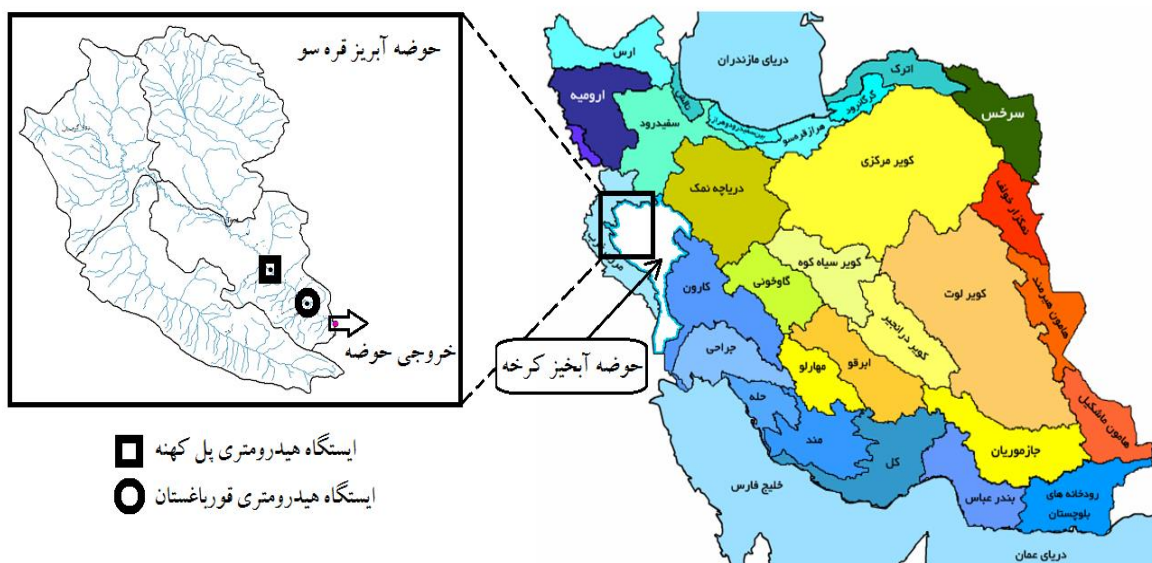
مقاله حاضر به بررسی رفتار دینامیکی سری زمانی بارش از دیدگاه تئوری آشوب می‌پردازد. در ابتدا تصادفی نبودن سری زمانی بارش در دو ایستگاه پل کهنه و قورباغستان واقع در حوضه آبریز قره‌سو با استفاده از روش داده‌های جایگزین بررسی شد. در ادامه قطعی نبودن سری زمانی با توجه به تناوبی نبودن آنها و با به‌کارگیری روش آنالیز توان طیفی بررسی شد. سپس آشوبناکی سری زمانی بارش در مقیاس‌های زمانی روزانه، هفتگی و ماهانه ارزیابی

جدول ۱. مشخصات ایستگاه‌های هیدرومتری پل کهنه و قورباغستان

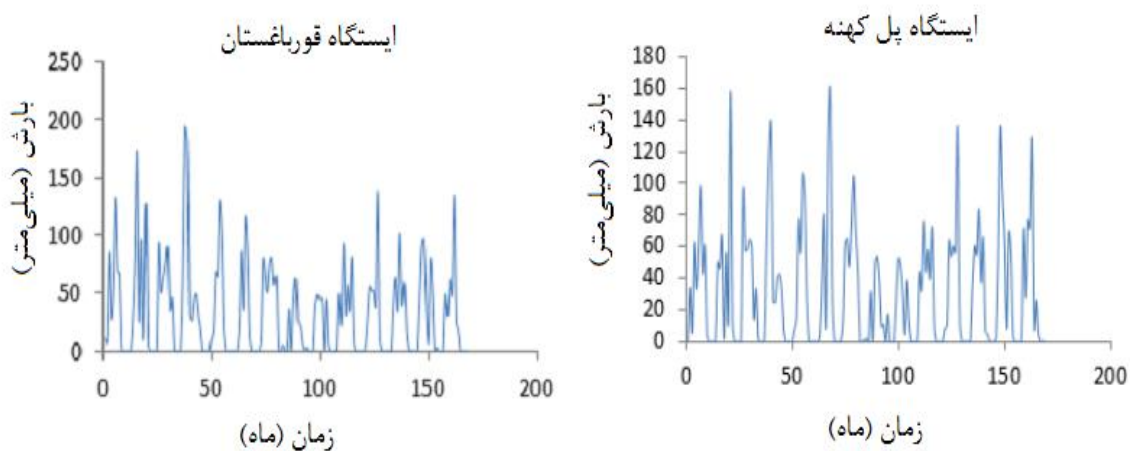
سال تأسیس	مختصات جغرافیایی			رودخانه	ایستگاه
	ارتفاع از سطح دریا (متر)	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی		
۱۳۳۴	۱۲۸۳	M۲۱D ۳۴	M۰۷D ۴۷	قره‌سو	پل کهنه
۱۳۳۲	۱۳۸۰	M۱۴D ۳۴	M۱۵D ۴۷	قره‌سو	قورباغستان

جدول ۲. مشخصات آماری سری‌های زمانی بارش در دو ایستگاه پل کهنه و قورباغستان (همه واحدها بر حسب میلی‌متر است)

سری زمانی	مقیاس زمانی	پل کهنه			قورباغستان		
		انحراف معیار	حداکثر مقدار	حداقل مقدار	انحراف معیار	حداکثر مقدار	حداقل مقدار
روزانه	۱/۰۶	۴/۲۹	۸۷/۴۰	۰	۴/۵۶	۸۶/۵۰	۰
هفتگی	۷/۴۲	۱۳/۶۰	۱۱۱/۵۰	۰	۱۵/۰۹	۱۶۰/۵۰	۰
ماهانه	۳۲/۱۶	۳۷/۴۰	۱۵۹/۲۰	۰	۴۰/۶۱	۱۹۳/۰۰	۰



شکل ۱. موقعیت حوضه آبریز قره‌سو و ایستگاه‌های هیدرومتری پل کهنه و قورباغستان



شکل ۲. نمودار سری زمانی بارش برای ایستگاه‌های پل کهنه (از مهر ۱۳۶۷ تا شهریور ۱۳۷۴) و قورباغستان (از مهر ۱۳۷۱ تا شهریور ۱۳۸۴) در مقیاس ماهانه

روش داده‌های جایگزین

به‌منظور اطمینان از تصادفی نبودن فرایند شکل‌گیری مسیرهای حاصل از سری زمانی درون فضای فاز، می‌توان از روش داده‌های جایگزین بهره گرفت. داده‌های جایگزین، منتج از تبدیل فوریه داده‌های اصلی و با دامنه یکسان است. در روش داده‌های جایگزین فرض صفر مبتنی بر خطی بودن (تصادفی) داده‌هاست. در بررسی آشوبناکی داده‌ها، هدف اصلی رد کردن فرض صفر برای داده‌های اصلی است. برای این منظور، مقایسه رفتار انتگرال همبستگی سری زمانی اصلی در برابر سری زمانی داده‌های جایگزین مدنظر قرار می‌گیرد. در صورت تفاوت محرز رفتار دو سری، فرض صفر رد شده و تصادفی نبودن داده‌های اصلی اثبات می‌شود. در این مقاله از روش تبدیل فوریه با دامنه همسان استفاده شده است [۱۳، ۲۳].

آنالیز توان طیف

با استفاده از تبدیل فوریه، یک سری زمانی می‌تواند به چندین موج سینوسی شکل تجزیه شود. تبدیل فوریه تابع خودهمبستگی، به ایجاد توان همبستگی سری زمانی مربوط منجر می‌شود. تناوبی بودن یک سری زمانی می‌تواند نشانه‌ای از قطعی بودن آن باشد که در این صورت آشوبناک بودن آن سری نقض می‌شود [۱۳].

بازسازی فضای فاز

شالوده یک سیستم دینامیک طبیعی می‌تواند تصادفی، قطعی یا آشوبناک باشد. با توجه به بازسازی فضای فاز سیستم دینامیک، می‌توان تا حدودی به وضعیت رفتار پدیده پی برد. متداول‌ترین روش برای بازسازی فضای فاز یک سری زمانی استفاده از روش زمان تأخیر و بُعد محاط معرفی شده توسط تاکنز است [۱۸].

برای سری زمانی اسکالر X_i که در آن $i = 1, 2, 3, \dots, N$ فضای فاز را می‌توان با استفاده از روش زمان تأخیر به دست آورد. در روش زمان تأخیر X_i و زمان‌های بعدی آن با هم ترکیب می‌شوند و مختصات یک سری زمانی برداری را تعیین می‌کنند [۱۸]:

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

که در آن $j = 1, 2, 3, \dots, N - (m-1)\tau / \Delta t$ بُعد m بعدی از بردار Y_j است که بُعد محاط نام دارد و τ به‌عنوان

پارامتر زمان تأخیر بیان می‌شود. به‌منظور تعیین زمان تأخیر یک سری زمانی می‌توان از روش‌های ۱۰ میانگین اطلاعات متقابل؛ ۲. تابع خودهمبستگی و ۳. انتگرال همبستگی استفاده کرد. در این بین، روش میانگین اطلاعات متقابل، مناسب‌ترین روش برای تعیین زمان تأخیر شناخته شده است؛ چراکه بر خلاف روش تابع خودهمبستگی خصوصیات خطی سری زمانی را در نظر نمی‌گیرد و به‌علاوه برعکس روش انتگرال همبستگی به داده‌های فراوان برای تعیین زمان تأخیر نیاز ندارد.

به‌منظور محاسبه بُعد محاط مناسب نیز روش‌های مختلفی ارائه شده است. از آن جمله می‌توان به استفاده از شیوه شمارش نزدیک‌ترین همسایه‌های کاذب، استفاده از توان همبستگی و تعیین بُعد محاط با توجه به ارزیابی نتایج پیش‌بینی موضعی اشاره کرد [۱۲، ۱۳]. در این تحقیق شیوه شمارش نزدیک‌ترین همسایه‌های کاذب به‌عنوان روشی کارآمد استفاده شده است [۱۳، ۲۰].

الگوریتم بُعد همبستگی گراسبرگر-پروکاشیا

آنالیز تابع همبستگی که روش بُعد همبستگی نیز شناخته می‌شود یکی از شیوه‌هایی است که به‌طور گسترده برای بررسی وجود یا نبود آشوب در سری‌های زمانی استفاده می‌شود. از میان تعداد زیادی الگوریتم‌های موجود برای محاسبه تابع همبستگی، الگوریتم گراسبرگر-پروکاشیا به‌طور معمول بیش از دیگر روش‌ها استفاده می‌شود [۱۳]. الگوریتم مذکور با استفاده از بازسازی فضای فاز سری زمانی مقدار بُعد همبستگی را تعیین می‌کند. برای فضای فاز m بُعدی تابع همبستگی $C(r)$ به‌صورت زیر است:

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

که در آن H تابع هویساید پله‌ای با $H(u) = 1$ برای $u > 0$ و $H(u) = 0$ برای $u \leq 0$ بوده و $u = r - |Y_i - Y_j|$ ، N تعداد نقاط در فضای مزبور، و r شعاع کره به مرکز Y_i یا Y_j است. $|Y_i - Y_j|$ فاصله بین بردار تأخیر m بُعدی به‌دست‌آمده از معادله ۱ است. چنانچه سری زمانی به‌وسیله یک جاذب توصیف شود، انتگرال همبستگی $C(r)$ با شعاع r به‌صورت زیر وابسته می‌شود:

$$C(r)_{r \rightarrow \infty} \approx ar^v \quad (3)$$

خواهد داد که این منحنی در ابتدا به صورت خطی آغاز می شود و دارای یک ناحیه مسطح در امتداد آن است. شیب این نمودار نشان دهنده تقریب بزرگترین نمای لیاپانوف است. همچنین با توجه به بزرگترین نمای لیاپانوف به دست آمده، مقدار افق پیش بینی (Δt) به صورت زیر محاسبه می شود:

$$\Delta t = \frac{1}{\lambda} \quad (۶)$$

که در این رابطه λ بزرگترین نمای لیاپانوف است [۱۶، ۱۷].

یافته‌ها و نتایج

نخست تصادفی نبودن سری‌های زمانی بارش با توجه به روش داده‌های جایگزین انجام پذیرفت. شکل ۳ مقایسه نتایج مربوط به محاسبه بُعد همبستگی در برابر بُعد محاط را برای بارش ماهانه در ایستگاه پل کهنه نشان می‌دهد. همان گونه که از شکل ۳ برمی‌آید، بر خلاف نمودار مربوط به داده‌های اصلی، داده‌های جایگزین به حد اشباع نرسیده‌اند که بیانگر تصادفی بودن داده‌های جایگزین است. در نتیجه فرض صفر رد شده و تصادفی نبودن داده‌های اصلی مشخص می‌شود. در اینجا تنها به ترسیم نتایج بارش ماهانه ایستگاه پل کهنه بسنده شده است. با این حال نتایج مشابه نیز برای مقیاس ماهانه ایستگاه قورباغستان و مقیاس هفتگی برای هر دو ایستگاه به دست آمد، در حالی که فرض صفر درباره مقیاس روزانه برای هر دو ایستگاه رد نمی‌شود که مبین تصادفی بودن داده‌های بارش در مقیاس روزانه است.

در صورتی که یک سری زمانی رفتار تناوبی داشته باشد (مثلاً ماهانه یا فصلی) مقادیر اختلاف فاز و فرکانس متقارن با آن بر روی نمودار به صورت بالارفتگی یا پایین افتادگی‌های مجزا نمایان می‌شود و در صورت تناوبی نبودن رفتار نمودار بدون نظم است. از آنجا که در هیچ یک از نمودارهای توان طیفی نشانه‌ای از تناوبی بودن سری زمانی داده‌ها یافت نشد (شکل ۴)، می‌توان نسبت به عدم قطعیت سری‌های زمانی بارش آگاهی پیدا کرد.

در این رابطه α ، یک مقدار ثابت بوده و ν توان همبستگی یا شیب منحنی $\log C(r)$ در مقابل $\log(r)$ است که نشان دهنده میزان انحراف یک سری زمانی از حالت تصادفی است و به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\nu = \lim_{\substack{r \rightarrow \infty \\ N \rightarrow \infty}} \frac{\log C(r)}{\log(r)} \quad (۴)$$

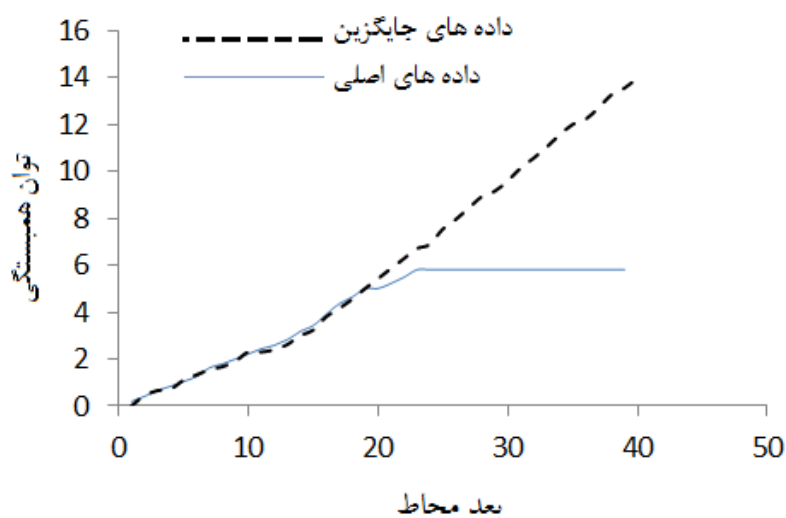
به طور کلی شیب به وسیله برازش یک خط مستقیم با روش حداقل مربعات داخل یک ناحیه معین به نام ناحیه مقیاس گذاری برآورد می‌شود. اگر توان همبستگی با افزایش بُعد محاط به مقدار اشباعی برسد، پس به طور کلی سیستم دارای دینامیک آشوبناک است. مقدار اشباع از توان همبستگی به عنوان بُعد همبستگی (d) از جاذب تعریف می‌شود [۹، ۱۱، ۱۷].

بزرگترین نمای لیاپانوف

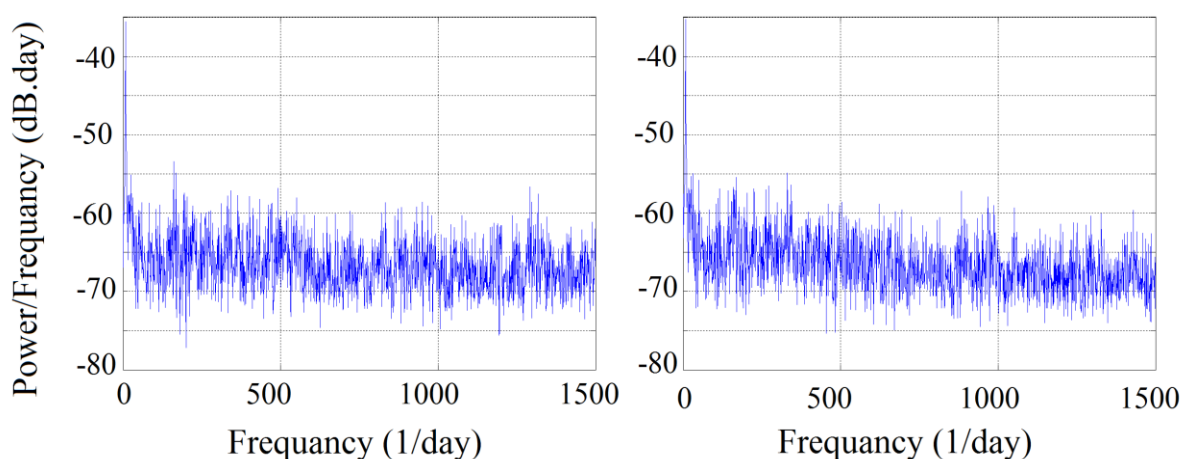
نماهای لیاپانوف، مقدار نماهای متوسط از واگرایی یا همگرایی مدارها در فضای فازند. برخی محققان [۱۵] بیان کرده‌اند که وجود یک نمای لیاپانوف مثبت حاکی از حضور آشوب در سیستم است؛ اما به زعم برخی محققان این شرط لازم است، اما کافی نیست [۲۱]. با وجود این در اغلب موارد، یک سیستم با حداقل یک نمای لیاپانوف مثبت، آشوبناک در نظر گرفته می‌شود [۱۲]. به منظور محاسبه بزرگترین توان لیاپانوف، بُعد از بازسازی فضای فاز مناسب با استفاده از مقادیر τ و m ، یک نقطه Y_{n_0} را انتخاب و تمام نقاط همسایه Y_n با فاصله‌ای نزدیک‌تر از یک فاصله r از آن را پیدا کرده و متوسط فاصله آنها از آن نقطه را محاسبه می‌کند. این روند برای محاسبه یک مقدار متوسط S به نام فاکتور کشش، برای N نقطه در طول مسیر تکرار می‌شود [۱۶، ۱۷]:

$$S = \frac{1}{N} \sum_{r=1}^N \ln \left[\frac{1}{|u_{Y_{n_0}}|} \sum |Y_{n_0} - Y_n| \right] \quad (۵)$$

$|u_{Y_{n_0}}|$ ، تعداد همسایه‌های یافت شده در اطراف نقطه Y_{n_0} است. در سیستم‌های دارای رفتار بی‌نظم، طرح فاکتور کشش S در برابر تعداد نقاط N یا زمان $t = N \cdot \Delta t$ ، یعنی نمودار S بر حسب N یا t نشان



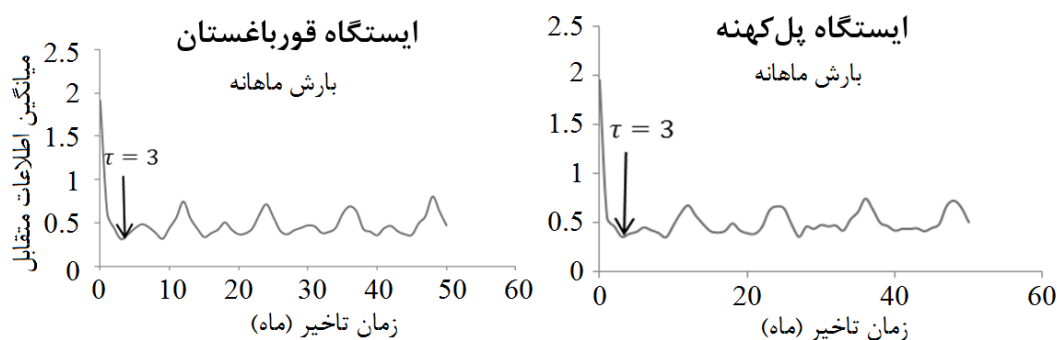
شکل ۳. بررسی رفتار نمودارهای توان همبستگی در روش داده‌های جایگزین داده‌ها برای بارش ماهانه ایستگاه پل کهنه



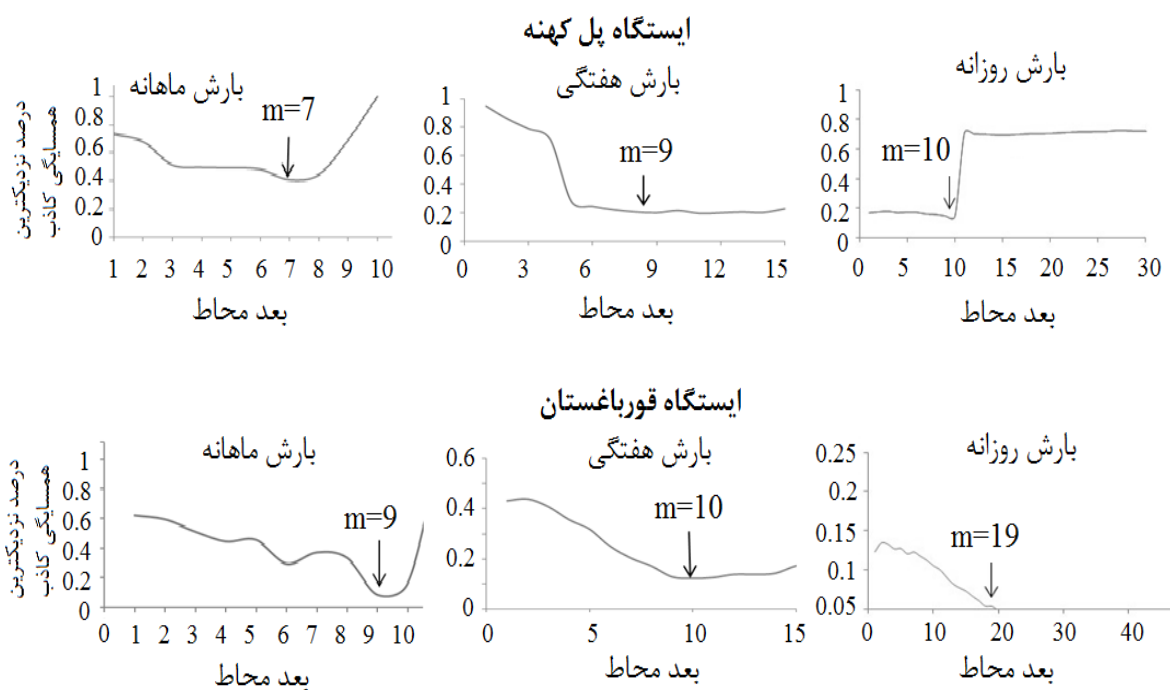
شکل ۴. نمودارهای توان طیفی مربوط به داده‌های اصلی در ایستگاه‌های پل کهنه و قورباغستان

در برابر زمان‌های تأخیر متفاوت برای ایستگاه‌های پل کهنه و قورباغستان در مقیاس‌های زمانی ماهانه رسم شده است (شکل ۵). همچنین مقادیر درصد خطای نزدیک‌ترین همسایگی کاذب به‌ازای مقادیر مختلف بُعد محاط برای ایستگاه‌های پل کهنه و قورباغستان برای هر یک از مقیاس‌های روزانه، هفتگی و ماهانه رسم و محلی که نمودار به صفر رسیده یا به کمترین مقدار خود (کمینه موضعی) می‌رسد، به‌عنوان بُعد محاط مناسب انتخاب شده است (شکل ۶).

در ادامه به‌منظور بررسی وجود آشوب در سری زمانی بارش، ابتدا زمان تأخیر هر یک از مقیاس‌های روزانه، هفتگی و ماهانه در دو ایستگاه پل کهنه و قورباغستان با استفاده از روش میانگین اطلاعات متقابل (AMI) به‌دست آمد که در این روش اولین کمینه محلی از میانگین اطلاعات متقابل به‌عنوان زمان تأخیر در نظر گرفته شده و مقدار بُعد محاط با استفاده از روش نزدیک‌ترین همسایگی کاذب با استفاده از زیربرنامه‌های TISEAN محاسبه شده است. نمودار تغییرات اطلاعات متقابل سری زمانی بارش



شکل ۵. نمودار تابع اطلاعات متقابل در مقیاس‌های ماهانه سری زمانی بارش



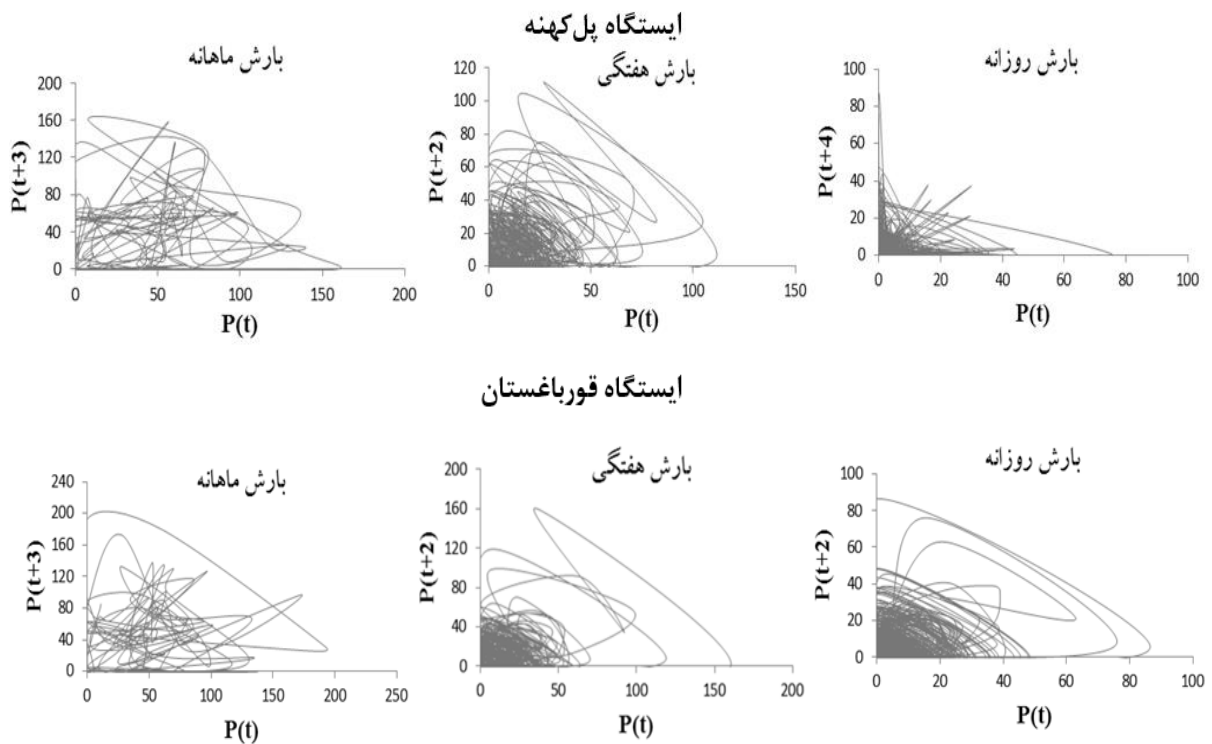
شکل ۶. مقادیر نزدیک‌ترین همسایگی کاذب به‌ازای ابعاد محاط مختلف در سری زمانی بارش در دو ایستگاه پل کهنه و قورباغستان

سیرها به‌طور واضح‌تری مشاهده می‌شود. همچنین $P(t)$ بارش در زمان t و $P(t+n)$ بارش در زمان $t+n$ و n مقدار زمان تأخیر است. در ادامه به‌منظور محاسبه تابع همبستگی بارش در مقیاس‌های زمانی مختلف ابتدا نمودار تغییرات $\log C(r)$ در مقابل $\log(r)$ ترسیم می‌شود. در شکل ۸ به‌صورت نمونه نمودار بارش روزانه نشان داده شده است، بخش مسطحی در محدوده $\log(r)$ مشاهده می‌شود که در آن نسبت $\log C(r)/\log(r)$ به مقدار ثابتی می‌رسد؛ بنابراین ناحیه مقیاس‌گذاری را می‌توان در این محدوده انتخاب و مقدار بُعد همبستگی موجود را محاسبه کرد.

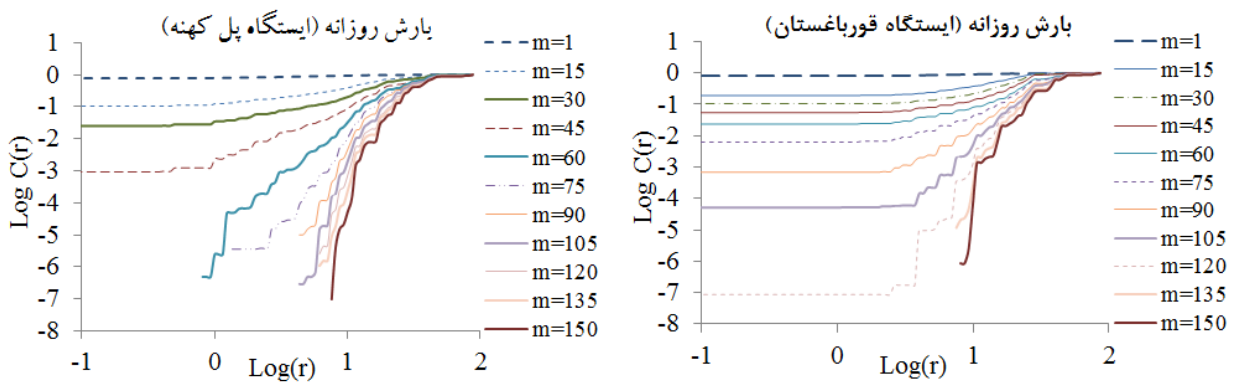
خلاصه نتایج حاصل از محاسبات زمان تأخیر و بُعد محاط در جدول ۳ درج شده است. ترسیم داده‌های سری زمانی داخل فضای فاز، نمایش سری‌های زمانی را در یک حالت مکانی امکان‌پذیر می‌کند. در نهایت با توجه به مقادیر زمان تأخیر به‌دست‌آمده از روش تابع اطلاعات متقابل در شکل ۷ نمودارهای فضای فاز دو بُعدی سری زمانی بارش در مقیاس‌های زمانی مختلف برای ایستگاه‌های پل کهنه و قورباغستان ترسیم شده است. همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، با افزایش مقیاس زمانی از روزانه تا ماهانه تفکیک‌پذیری خط

جدول ۳. مقادیر زمان تأخیر و بُعد محاط مربوط به سری زمانی بارش در مقیاس‌های روزانه، هفتگی و ماهانه

مقیاس زمانی	ایستگاه پل کهنه		ایستگاه قورباغستان	
	زمان تأخیر	بُعد محاط	زمان تأخیر	بُعد محاط
روزانه	۴	۱۰	۲	۱۹
هفتگی	۲	۹	۲	۱۰
ماهانه	۳	۷	۳	۹



شکل ۷. فضای فاز دُبعدهی سری زمانی بارش در مقیاس‌های روزانه، هفتگی و ماهانه در دو ایستگاه پل کهنه و قورباغستان

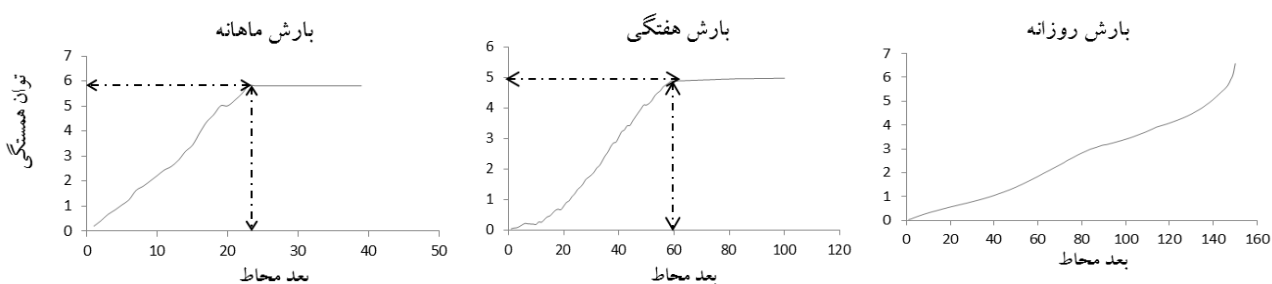


شکل ۸. نمودار ارتباط میان تابع همبستگی $C(r)$ و شعاع r با افزایش بُعد محاط (m) در سری زمانی بارش روزانه

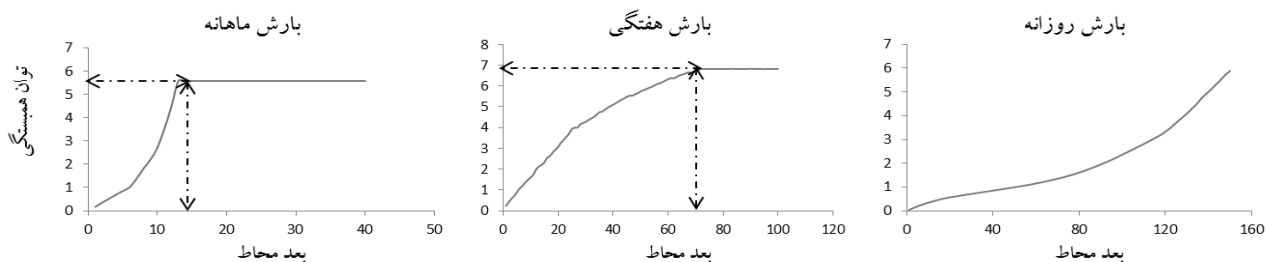
روزانه سری زمانی بارش است. درحالی که در دو مقیاس هفتگی و ماهانه، نمودار توان همبستگی به مقدار اشباع رسیده است، بنابراین می توان نتیجه گرفت که سری زمانی بارش در این دو مقیاس دارای رفتار آشوبناک است.

شکل ۱۰ منحنی های پارامتر فاکتور کشش (S) در مقابل تعداد نقاط (N) را نشان می دهد. مقدار بزرگ ترین نمای لیاپانوف (λ) از برازش خط بر روی این منحنی ها براساس روش حداقل مربعات و تعیین شیب آن صورت می پذیرد.

در ادامه به منظور تعیین بُعد همبستگی، نمودار توان همبستگی رسم شد (شکل ۹). همان طور که در شکل ۹ مشاهده می شود مقادیر توان همبستگی به ازای سری زمانی بارش روزانه در هر دو ایستگاه پل کهنه و قورباغستان با افزایش بُعد محاط زیاد شده و در هیچ نقطه ای به مقدار اشباع نرسیده است. اشباع توان همبستگی در مقدار معینی از بُعد محاط، نشان دهنده وجود دینامیک قطعی و رفتار آشوبناک در سیستم است؛ بنابراین عدم اشباع توان همبستگی نشان دهنده نبود دینامیک قطعی در مقیاس های

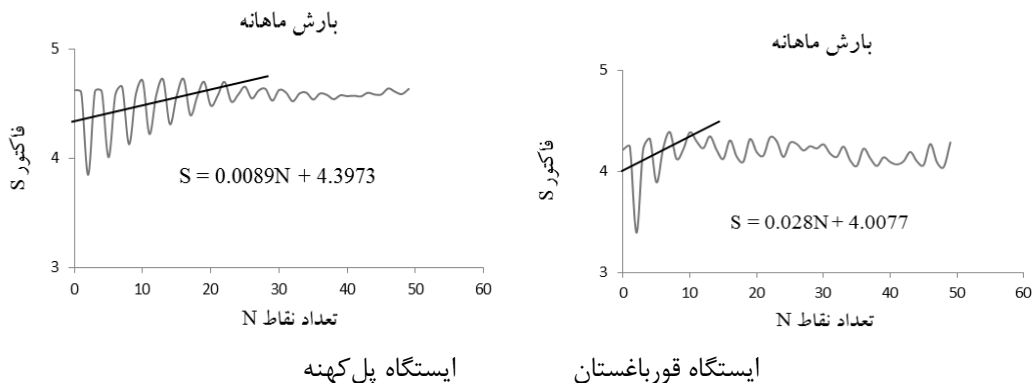


الف) ایستگاه پل کهنه



ب) ایستگاه قورباغستان

شکل ۹. نمودار تغییرات توان همبستگی با افزایش بُعد محاط سری زمانی بارش در مقیاس های مختلف



شکل ۱۰. نمودار ماکزیمم نمای لیاپانوف سری زمانی بارش در مقیاس های زمانی ماهانه

جدول ۴. مقادیر افق پیش‌بینی در مقیاس‌های زمانی مختلف سری زمانی بارش در ایستگاه‌های پل کهنه و قورباغستان

قورباغستان		پل کهنه		مقیاس
بزرگ‌ترین نمای لیاپانوف	افق پیش‌بینی	بزرگ‌ترین نمای لیاپانوف	افق پیش‌بینی	
۰/۰۴۷۶	-	۰/۰۱۱۱	-	روزانه
۰/۰۲۵۶	۳۴	۰/۰۲۹۴	۳۴	هفتگی
۰/۰۲۸	۱۱۲	۰/۰۰۸۹	۱۱۲	ماهانه

بحث و نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر وضعیت آشوبناکی و بازسازی فضای فاز بارش با استفاده از نظریه آشوب در سه مقیاس روزانه، هفتگی و ماهانه در دو ایستگاه پل کهنه و قورباغستان واقع در حوضه قره‌سو بررسی شد. پس از آن تناوبی نبودن داده‌های سری زمانی با استفاده از روش آنالیز توان طیف مشخص شد. ارزیابی نتایج حاصل از روش داده‌های جایگزین، تصادفی بودن داده‌ها در مقیاس روزانه را محرز ساخت. در ادامه نشانه‌هایی از حضور آشوب در بارش مثبت) و بارش روزانه هر دو ایستگاه پل کهنه و قورباغستان در روش بُعد همبستگی (عدم اشباع توان همبستگی) مشاهده نشد، اما در دیگر مقیاس‌ها در هر دو ایستگاه مذکور امکان وجود آشوب با استفاده از هر دو روش بُعد همبستگی (بین ۴ تا ۷) و نمای لیاپانوف (وجود نمای مثبت) مشاهده شد که این نتایج با مطالعات دیگر محققان همسوست (جایاواردنا و لای [۱۰]، سیواکومار و همکاران [۱۸]، من و همکاران [۱۱]، فرزین و همکاران [۵]). شایان ذکر است که نتایج به‌دست‌آمده، حاصل داده‌های بارش حوضه قره‌سو است و نمی‌توان آن را به‌صورت کلی و بدون بررسی به موارد مشابه تعمیم داد.

منابع

- [۳]. ذونعمت کرمانی، محمد؛ بای، یارمحمد، ۱۳۹۲، واکاوی کارایی روش‌های مبتنی بر شبکه‌های عصبی مصنوعی و رگرسیون خطی چندمتغیره در پیش‌بینی کشند، اقیانوس‌شناسی، ۱۳: ۱۰-۱.
- [۴]. سازمان آب منطقه‌ای غرب. ۱۳۸۵. گزارش زمین‌شناسی مطالعات ساماندهی رودخانه قره‌سو.
- [۵]. فرزین، سعید؛ شیخ‌الاسلامی، سیدرضی؛ حسن‌زاده، یوسف، ۱۳۹۰، تحلیل آشوب‌پذیری سری زمانی با استفاده از ترسیم فضای فاز و روش بُعد همبستگی (مطالعه موردی: بارش ماهانه در دریاچه ارومیه). چهارمین کنفرانس مدیریت منابع آب ایران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر تهران.
- [۶]. قربانی، محمدعلی؛ اعلمی، محمدتقی؛ یوسفی، پیمان؛ اسدی، حکیمه؛ زینالی، صبا، ۱۳۹۰، کارایی نظریه آشوب در پیش‌بینی میزان رسوبات معلق رودخانه‌ها (مطالعه موردی: رودخانه لیقوان). نشریه مهندسی عمران و محیط زیست. ۱(۴۱): ۶۶-۵۹.
- [۷]. لطف‌اللهی یقین، محمدعلی؛ بیک‌لریان، مرتضی؛ مجتهدی، علیرضا؛ سیدی، ناصر، ۱۳۹۱، مقایسه‌سازی و پیش‌بینی ارتفاع موج شاخص دریای خزر با نظریه آشوب. دهمین همایش بین‌المللی سواحل، بنادر و سازه‌های دریایی. تهران، ایران.
- [۸]. مرادی‌زاده کرمانی، فرنوش؛ قربانی، محمدعلی؛ دین‌پژوه، یعقوب؛ فرسادی‌زاده، داود، ۱۳۹۱، مدل تخمین جریان رودخانه براساس بازسازی فضای حالت آشوبی. نشریه دانش آب و خاک، ۴(۲۲): ۱۶-۱.
- [9]. Dhanya, C.T. and Kumar, D.N., 2010, Nonlinear ensemble prediction of chaotic daily rainfall. *Advances in Water Resources*. 33: 327-347.

- [۱]. انیس حسینی، مسعود؛ ذاکر مشفق، محمد، ۱۳۹۲، کاربرد نظریه آشوب در تحلیل فرایند بارش-رواناب. هفتمین کنگره ملی مهندسی عمران، زاهدان.
- [۲]. حسن‌زاده یوسف؛ لطف‌اللهی، محمدعلی؛ شاهوردی، سجاد؛ فرزین، سعید؛ فرزین، نیما، ۱۳۹۱، نوپرزدایی و پیش‌بینی سری زمانی بر پایه الگوریتم موجک و نظریه آشوب (مطالعه موردی: شاخص پایش خشکسالی SPI شهر تبریز). مجله تحقیقات منابع آب ایران. ۸(۳): ۱-۱۳.

- [10]. Jayawardena, A.W. and Lai, F., 1994, Analysis and prediction of chaos in rainfall and stream flow time series. *Journal of Hydrology*. 153: 23–52.
- [11]. Men, B., Zhao, X. and Liang, C., 2004, Chaotic Analysis on Monthly Precipitation on Hills Region in Middle Sichuan of China. *Nature and Science*. 2(2): 45-51.
- [12]. McCue, L. and Troesch, A., 2011, Use of Lyapunov Exponents to Predict Chaotic Vessel Motions. *Physica D*. 65: 156-171.
- [13]. Ng, W.W., Panu, U.S. and Lennox, W.C., 2007, Chaos based Analytical techniques for daily extreme hydrological observations. *Journal of Hydrology*. 342: 17– 41.
- [14]. Qin, G., Li, H., Wang, X., He, Q., Li, S., 2015, Annual runoff prediction using a nearest-neighbor method based on cosine angle distance for similarity estimation, *Remote Sensing and GIS for Hydrology and Water Resources*, 368: 204-208.
- [15]. Rodriguez-Iturbe, I., De Power, B.F., Sharifi, M.B. and Georgakakos, K.P., 1989, Chaos in Rainfall. *Water Resources Research* 25(7): 1667.1675.
- [16]. Rosenstein, M.T., Collins, J.J. and De Luca, C.J., 1993, A practical method for calculating largest Lyapunov exponents from small data sets. *Physica D*. 65: 117-134.
- [17]. Shang, P., Li, X. and Kamae, S., 2005, Chaotic analysis of traffic time series. *Chaos, Solitons and Fractals*. 25: 121–128.
- [18]. Sivakumar, B., Liong, S.Y. and Liaw, C.Y., 1998, Evidence of chaotic behavior in Singapore rainfall. *Journal of the American Water Resources Association*. 34(2): 301-310.
- [19]. Sivakumar, B., Berndtsson, R., Olsson, J., Jinno, K. and Kawamura, A., 2000, Dynamics of monthly rainfall-runoff process at the Gota basin: A search for chaos. *Hydrology & Earth System Sciences*. 4(3): 407-417.
- [20]. Sivakumar, B., 2001, Rainfall dynamics at different temporal scales: a chaotic perspective. *Hydrology and Earth System Sciences*. 5(4): 645-651.
- [21]. Wolff, R.C.L., 1992, Local Lyapunov exponents: looking closely at chaos. *J. Royal Stat*. 54(2): 353 371.
- [22]. Zounemat-Kermani, M., 2014, Principal Component Analysis (PCA) for estimating chlorophyll concentration using forward and generalized Regression Neural Networks, *Applied artificial intelligence*. 28(1): 16-29.
- [23]. Zounemat-Kermani, M. and Kisi, O., 2015, Time series analysis on marine wind-wave characteristics using chaos theory, *Ocean Engineering*. 100: 46-53.