

ارزیابی قابلیت مدل‌های سری زمانی و تئوری آشوب در برآورد تبخیر تعرق گیاه مرجع (ایستگاه سینوپتیک تربت حیدریه، خراسان رضوی)

علیرضا توکلی^۱ و حسین بابازاده^{۲*}

چکیده

برآورد تبخیر تعرق گیاه مرجع (ET₀) برای طراحی سیستم‌های آبیاری، مدیریت منابع آب، تولید محصول و ارزیابی‌های زیست‌محیطی ضروری است. روش‌ها و مدل‌های مختلفی برای پیش‌بینی ET₀ با استفاده از سری‌های زمانی ارائه شده‌اند که از آن جمله می‌توان مدل‌های سری زمانی AR، MA و ARIMA را برشمرد. اما تاکنون از تئوری آشوب برای برآورد ET₀ استفاده نشده است. در این پژوهش عملکرد هر یک از مدل‌های سری زمانی یاد شده در برآورد و تخمین تبخیر و تعرق گیاه مرجع به روش فائو- پنمن- مانتیس به صورت روزانه در ایستگاه سینوپتیک تربت حیدریه واقع در استان خراسان رضوی در دوره آماری ۱۹۹۱ تا ۲۰۰۰ میلادی بررسی شده است. نتایج نشان داد که مدل سری زمانی ARIMA و تئوری آشوب هر دو با دقتی نزدیک به یکدیگر تبخیر تعرق گیاه مرجع را برآورد می‌کنند. به طوری که ضریب تبیین بین مقادیر مشاهده شده و تخمین زده شده برای تبخیر تعرق گیاه مرجع از دو روش ARIMA و تئوری آشوب به ترتیب برابر ۰/۸۰۲ و ۰/۷۹۹ و مقدار RMSE برابر ۰/۵۸۵ و ۰/۶۱۱ میلی‌متر در روز است.

واژه‌های کلیدی: تبخیر تعرق مرجع، تئوری آشوب، مدل‌های سری زمانی، ARIMA.

ارجاع: توکلی ع. ر. و بابازاده ح. ۱۳۹۴. ارزیابی قابلیت مدل‌های سری زمانی و تئوری آشوب در برآورد تبخیر تعرق گیاه مرجع (ایستگاه سینوپتیک تربت حیدریه، خراسان رضوی). مجله پژوهش آب ایران. ۱۷: ۱۱۱-۱۲۰.

۱- دانشجوی دکتری آبیاری و زهکشی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران.

۲- دانشیار دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران.

* نویسنده مسئول: h.babazadeh@hotmail.com

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۰۷/۲۸

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۱۰/۰۲

مقدمه

تبخیر تعرق پتانسیل گیاه برابر نیاز آبی گیاه در نظر گرفته می‌شود که برآورد آن در کلیه طرح‌های آبیاری ضروری است. بدین منظور روش‌های محاسباتی زیادی برای تخمین تبخیر تعرق گیاه مرجع در نقاط مختلف دنیا ارائه شده است (علیزاده، ۱۳۸۰). در چند دهه اخیر پژوهش‌گران از روش‌های مختلفی شامل تحلیل سری‌های زمانی، شبکه عصبی مصنوعی، منطق فازی، عصبی فازی، الگوریتم ژنتیک برای برآورد آن استفاده کرده‌اند.

الف) سری‌های زمانی

سری زمانی مجموعه‌ای از مشاهده‌ها است که بر حسب زمان مرتب شده باشد و چنانچه این مشاهده‌ها به طور منظم و در فاصله‌های مساوی ثبت و یا اندازه‌گیری شده باشد، یک سری زمانی گسسته به دست می‌آید (نیرومند و بزرگ‌نیا، ۱۳۸۷). آذر و مؤمنی (۱۳۷۷)، روش‌های مختلف پیش‌بینی سری زمانی را به دو دسته کمی و کیفی تفکیک کردند. روش‌های کمی شامل مدل‌های میانگین متحرک ساده و موزون، هموارسازی نمایی ساده و حالت وینترز، باکس جنکینز، خود همبستگی میانگین متحرک تلفیقی (ARIMA) و مدل‌های اقتصادسنجی و روش‌های کیفی شامل روش‌های دلفی، طوفان مغزی و گروه اسمی هستند. سامانی و همکاران (۱۹۹۴) با استفاده از تحلیل خود همبستگی، چگالی طیفی، همبستگی متقابل و طیف متقابل، سری‌های زمانی بارندگی، تبخیر و سطح آب زیرزمینی در چند چاه مشاهده‌های در سفره آب آبرفتی دشت بهشهر- نکا واقع در سواحل دریای خزر را تحلیل کردند و توانمندی این مدل‌ها را نشان دادند. پادبلا و همکاران (۱۹۹۶) مدل‌های استوکاستیکی ARMA را برای تحلیل سری‌های زمانی دبی سه چشمه کارستی، اسپانیا و فرانسه به کار گرفتند. نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد که می‌توان از مدل‌های استوکاستیکی ARMA برای پیش‌بینی دبی استفاده کرد. شیرغلامی و قهرمان (۱۳۸۴)، آشگر طوسی و همکاران (۱۳۸۴)، احمدی و همکاران (۱۳۸۴)، جلالی و خنجر (۱۳۸۸) و خورشید دوست و همکاران (۱۳۸۸) نیز با استفاده از سری‌های زمانی به پیش‌بینی متغیرهای هواشناسی مثل دما و بارندگی در نقاط مختلف ایران پرداختند. در زمینه استفاده از سری‌های زمانی برای پیش‌بینی تبخیر تعرق پژوهش‌های

زیادی در ایران انجام نشده است. گلکار حمزی یزد و همکاران (۱۳۸۶) با استفاده از آمار هواشناسی سال‌های ۱۹۶۰ تا ۲۰۰۲ روند تغییرات سری زمانی ET₀ ماهانه را برای ۳۳ ایستگاه سینوپتیک کل کشور بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که روند تغییرات ET₀ در ۳۸ درصد ایستگاه‌ها مثبت و در ۶۲ درصد ایستگاه‌ها منفی است. فولادمند (۱۳۸۹) با استفاده از سری‌های زمانی در استان فارس تبخیر تعرق پتانسیل گیاه مرجع را تعیین کرد. همچنین قهرمان و قره‌خانی (۱۳۹۰) بهترین مدل تصادفی سری زمانی را برای برآورد تبخیر از تشت در ایستگاه شیراز تعیین کردند. در سایر مناطق دنیا نیز پژوهش‌های کمی برای پیش‌بینی ET₀ انجام شده است که از آن جمله می‌توان به پژوهش‌های هولم و همکاران (۱۹۹۴) و توماس (۲۰۰۰) در چین، چاتوپاهایی و هولم (۱۹۹۷) بر روی داده‌های اندازه‌گیری شده تبخیر از تشت کلاس A در هند، سزیلاگی (۲۰۰۱) و پترسون (۲۰۰۲) در آمریکا اشاره کرد. بیشتر پژوهش‌های انجام شده براساس این مدل شامل مواردی همچون تعیین مدل مناسب، تخمین پارامترهای مدل استخراج شده با حداکثر صحت و شبیه‌سازی متغیرهای مورد نظر با کمترین خطا بوده است.

ب) تئوری آشوب (Chaos Theory)

این روش جدید، تئوری پیچیدگی یا پویایی‌های غیرخطی نامیده شده و جنبه‌ای از آن که توجه همگان را به خود جلب کرده است، تئوری آشوب یا نظم در بی‌نظمی نامیده می‌شود. چنین سیستم‌هایی به شرایط اولیه بسیار حساس هستند، یعنی تغییرات بسیار جزئی در سیستم، می‌تواند موجب تغییرات کیفی و کمی عمده‌ای در رفتار آن سیستم شود (الوانی و دانایی‌فرد، ۱۳۸۱). تئوری آشوب برای اولین بار توسط دانشمندی به نام ادوارد لورنز (۱۹۶۳) در هواشناسی به کار برده شد. سپس در حیطه تمام علوم و مباحث تجربی، ریاضی، رفتاری، مدیریتی و اجتماعی وارد شده و اساس تغییرات بنیادی در علوم به خصوص هواشناسی، نجوم، مکانیک، فیزیک، ریاضی، زیست‌شناسی، اقتصاد و مدیریت را فراهم آورده است (کوکاک و همکاران، ۲۰۰۰). مطالعات زیادی در سال‌های اخیر توسط افراد مختلف در مورد نظریه آشوب و انواع پدیده‌های فیزیکی انجام شده که در اینجا به برخی از

به صورت ماهانه و فصلی بررسی شده است. نوآوری دیگر این مقاله برآورد تبخیر تعرق گیاه مرجع به وسیله تئوری آشوب است، که تاکنون انجام نشده است. همچنین در ادامه نتایج دو روش با یکدیگر مقایسه می شود.

مواد و روش ها

ایستگاه هواشناسی تربت حیدریه در عرض جغرافیایی ۱۶°۳۵' و طول جغرافیایی ۱۳°۵۹' و در ارتفاع ۱۴۵۰/۸ متر از سطح دریا قرار گرفته است. داده های هواشناسی این ایستگاه شامل دمای حداکثر و حداقل، رطوبت نسبی، سرعت باد و ساعات آفتابی به صورت روزانه بین سال های ۱۹۹۱ تا ۲۰۰۰ میلادی از سازمان هواشناسی استان خراسان رضوی دریافت و با آزمون های صحت سنجی، ارزیابی شد.

در این پژوهش ابتدا با استفاده از مدل های سری زمانی و تئوری آشوب پارامترهای مورد نیاز روش فائو- پنمن-مانتیس (به عنوان روش استاندارد محاسبه تبخیر تعرق گیاه مرجع-PM) پیش بینی شد، سپس تبخیر تعرق گیاه مرجع با داده های برآورد شده از دو روش با مقادیر واقعی در نرم افزار CROPWAT 8.0 محاسبه شده و مقایسه شدند.

الف) سری های زمانی

مهم ترین هدف از تجزیه و تحلیل یک سری زمانی، یافتن مدلی است که بتوان براساس مشاهده های موجود، اندازه کمیت را در آینده پیش بینی کرد.

- انواع مدل های سری زمانی

از جمله پرکاربردترین های آن ها، مدل های AR (خود همبسته)، MA (میانگین متحرک) و ARMA (خود همبسته میانگین متحرک) هستند. هرگاه دو مدل AR(p) و MA(q) در یکدیگر ترکیب شوند، مدل ARMA با مرتبه p و q تصادفی مربوط به زمان های قبل از t برآورد می شود (معادله ۱).

$$Z_t = u + \sum_{i=1}^p (Z_{t-i} - u) - \sum_{i=1}^q \theta_i \alpha_{t-i} + \alpha_t \quad (1)$$

که در آن Z_t مقدار پیش بینی شده، Z_{t-i} اطلاعات مربوط به گذشته سری، u میانگین سری، θ و α ضرایب های مدل و α_t و α_{t-i} به ترتیب اغتشاش در حال و گذشته است. از آنجا که برای استفاده از مدل های بالا باید فرآیند

آن ها اشاره می شود. سیواکومار (۲۰۰۱) رفتار دینامیکی رسوبات معلق و بستر در حوضه رودخانه می سی سی پی را بررسی کرده و نشان داد که بار رسوبی دارای خصوصیات آشوبناکی است. سیواکومار (۲۰۰۲) همچنین براساس بازسازی فضای حالت، الگوریتم نزدیکترین همسایگی کاذب و پیش بینی موضعی غلظت رسوب معلق روزانه را در حوضه سنت لوییس تخمین زد. نتایج نشان از مناسب بودن روش های ذکر شده در بررسی و درک فرایند انتقال رسوب معلق داشت. سولوماتین و همکاران (۲۰۰۳)، تخمین سطح آب دریای شمال را با استفاده از نظریه آشوب و شبکه های عصبی مصنوعی انجام دادند. نتایج، برتری روش های غیرخطی را برای سری های زمانی تک متغیره نسبت به مدل های خطی همچون خود همبستگی و مدل ARIMA، در تخمین سطح موج آب در منطقه ساحلی نشان داد. خان و همکاران (۲۰۰۵) امکان وجود سیگنال های آشوبی در سری های زمانی محدود را بررسی و نشان دادند که داده های هیدرولوژیکی محدود هم می توانند رفتار آشوبناکی از خود نشان دهند. شانگ و همکاران (۲۰۰۹) روش های مدل سازی سری زمانی غیرخطی را برای تحلیل داده های رسوبات معلق بکار گرفتند. نتایج نشان داد که خصوصیات آشوبناک در پدیده انتقال رسوب وجود دارد و روش های بر پایه دینامیک فضای حالت می تواند برای تحلیل و پیش بینی غلظت رسوبات معلق استفاده شود. قربانی و همکاران (۲۰۱۰) دو شاخص آشوبناکی، بعد همبستگی و نمای لیاپانف را برای تحلیل داده های جریان روزانه رودخانه کیزلیریماک به کار گرفتند. نتایج نشان داد که خصوصیات آشوبناک در پدیده جریان رودخانه وجود دارد و روش های بر پایه دینامیک فضای حالت می تواند برای تحلیل میزان جریان رودخانه استفاده شود. فرزین و همکاران (۲۰۱۲) از تئوری آشوب برای تخمین تبخیر از سطح آب دریاچه ارومیه استفاده کردند. آن ها در بازه ۱۰ ساله ۱۹۹۷ تا ۲۰۰۷ تبخیر را برآورد و آن را با مقادیر واقعی مقایسه کردند. نتایج حکایت از دقت بالای این روش داشت. در ادامه برای سال های ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۷ تبخیر دریاچه را پیش بینی کردند.

هدف از این پژوهش، ارزیابی توانمندی مدل های سری زمانی در برآورد تبخیر تعرق گیاه مرجع به روش فائو- پنمن-مانتیس به صورت روزانه است، که در اکثر مطالعات

از روش‌های متداول برای بازسازی فضای حالت روش ارائه شده توسط تاکنز (۱۹۸۱) است، که در آن سری‌های زمانی فرضی با سیستم دینامیک غیرخطی با درجه آزادی m ساخته می‌شوند. بنابراین لازم است تا سری‌های مناسب از بردارهای حالت Y_t با مختصات تأخیری در فضای حالت m بعدی ساخته شود:

$$Y_t = (X_t, X_{t-\tau}, X_{t-2\tau}, \dots, X_{t-(m-1)\tau}) \quad (4)$$

که در آن τ ، زمان تأخیر و $2D_2 > m$ بعد محاط را نشان می‌دهد (کالین، ۱۹۸۲) (D_2 توان همبستگی می باشد). روش‌های زیادی برای تخمین مقادیر بهینه τ و m پیشنهاد شده است. در این پژوهش، از حداقل شدن در روش نزدیک‌ترین همسایه‌های کاذب (FNN^A) برای برآورد m و میانگین اطلاعات متقابل (AMI^B) برای برآورد τ استفاده شده است (سلوکسی و همکاران، ۲۰۰۳). میانگین اطلاعات متقابل (AMI) به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$I(\tau) = - \sum_{\bar{y}} p_{\bar{y}}(\tau) \ln \frac{p_{\bar{y}}(\tau)}{p_i(\tau)p_j(\tau)} \quad (5)$$

در این رابطه $P_i(\tau)$ و $P_j(\tau)$ احتمال تعیین $x_{i+\tau}$ در فاصله i ام و $x_{j+\tau}$ در فاصله j ام و $P_{ij}(\tau)$ احتمال اتصال آن‌ها است (سولوماتین و همکاران، ۲۰۰۳). اولین حداقل موضعی ($I(\tau)$) زمان تأخیر بهینه را جهت بازسازی فضای حالت برآورد می‌کند.

- بعد همبستگی

این روش یکی از بهترین روش‌ها برای تعیین وقوع آشوب است. برای فضای حالت m بعدی، تابع همبستگی $C(r)$ به صورت زیر تعریف می‌شود (فراسر و سوئینی، ۱۹۸۶ و نیدزلسکی و کوسک، ۲۰۱۰):

$$C_m(r) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{2}{(N-w)(N-w-1)} \sum_{i=1}^N \sum_{j=i+r}^N H(r - |\bar{Y}_i - \bar{Y}_j|) \quad (6)$$

که در آن H یک تابع هویساید پله‌ای با $H(u)=1$ برای $u \geq 0$ و $H(u)=0$ برای $u \leq 0$ در جایی که $u = r - |Y_i - Y_j|$ است، N تعداد نقاط در بازسازی جاذب و r شعاع کره به مرکز Y_i یا Y_j است. برای مقادیر مثبت r ، تابع همبستگی $C(r)$ با رابطه زیر به r مرتبط می‌شود:

$$C_m(r) \propto ar^{D_2} \quad (7)$$

در این رابطه a یک ضریب ثابت بوده و D_2 توان همبستگی است که از رابطه زیر به دست می‌آید (سیوا

ایستایی برقرار باشد، از این رو، مدل $ARIMA(p,d,q)$ در نظر گرفتن مرتبه تفاضلی d در شرایط نایستایی ارائه شد (باکس و همکاران، ۱۹۹۴).

- انتخاب الگو

ملاک‌های بی‌شماری برای انتخاب الگوی مناسب معرفی شده اند که برخی از این ملاک‌ها بر مبنای آماره‌های خلاصه شده از باقیمانده‌ها تعیین می‌شوند. در مورد اول می‌توان به محک AIC^1 (آیک، ۱۹۷۴)، BIC^2 (شوارتز، ۱۹۷۸)، SBC^3 و در مورد انتخاب الگو بر مبنای خطای پیش‌بینی، می‌توان به روش‌های ریشه میانگین مربعات خطا ($RMSE$)، میانگین قدرمطلق خطا (MAE)، میانگین قدرمطلق درصد خطا ($MAPE$) و معیار NS (ناش-سانتکلیف، ۱۹۷۰) اشاره کرد. در این مقاله مدلی که آماره BIC در آن کمتر باشد، به عنوان مدل مناسب انتخاب شده است. در این پژوهش از آماره‌های BIC و $RMSE$ به صورت زیر استفاده شد (رابطه‌های ۲ و ۳).

$$BIC \equiv -2 \ln \mathcal{L}_{\max} + k \ln N \quad (2)$$

که در آن \mathcal{L}_{\max} بیشینه درست نمایی دست یافتنی با مدل، k تعداد پارامترهای مدل و N تعداد نقاط مورد استفاده است.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2} \quad (3)$$

که N تعداد نمونه، P_i مقادیر پیش‌بینی شده با مدل و O_i مقادیر واقعی است.

ب) تئوری آشوب

اولین مرحله در فرآیند تئوری آشوب، بازسازی دینامیکی در فضای حالت است. برعکس سایر مدل‌های هوشمند که هدف اصلی آن‌ها بر پایه پیش‌بینی بنا نهاده شده، نظریه آشوب بیشتر تأکید بر بازسازی فضای حالت دارد و با بازسازی دقیق‌تر، بستر مناسب جهت انجام سایر مطالعات از جمله پیش‌بینی را فراهم خواهد کرد.

- بازسازی فضای حالت

فضای حالت ابزاری سودمند برای مطالعه سیستم‌های دینامیک است. مطابق این مفهوم، یک سیستم دینامیک می‌تواند توسط یک نمودار فضای حالت توصیف شود. یکی

4- False nearest neighbors

5- Average Mutual Information

1- Akaike information criterion

2- Bayesian information criterion or Schwarz criterion

3- Schwarz Bayesian criterion

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \left\{ \frac{900}{T + 273} \right\} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (9)$$

که در آن ET_0 تبخیر تعرق گیاه مرجع (mm/day)، R_n تابش خالص در سطح پوشش گیاهی ($\text{MJm}^{-2}\text{d}^{-1}$)، T متوسط دمای هوا در ارتفاع ۲ متری از سطح زمین ($^{\circ}\text{C}$)، U_2 سرعت باد در ارتفاع ۲ متری از سطح زمین (ms^{-1})، $e_s - e_a$ کمبود فشار بخار در ارتفاع ۲ متری (KPa)، Δ شیب منحنی فشاربخار ($\text{KPa}^{\circ}\text{C}^{-1}$)، γ ضریب رطوبتی ($\text{KPa}^{\circ}\text{C}^{-1}$)، G شار گرما به داخل خاک ($\text{MJm}^{-2}\text{d}^{-1}$) است.

نتایج و بحث

در ابتدا روند منطقی کلیه داده‌ها بررسی شد و سپس مراحل مدل‌سازی بر روی آن‌ها انجام شد، که خصوصیات آماری آن‌ها در جدول ۱ آمده است.

کومار، ۲۰۰۱):

$$D_2 = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\ln C_m(r)}{\ln r} \quad (8)$$

ج) تبخیر تعرق گیاه مرجع

روش‌های زیادی برای محاسبه تبخیر تعرق گیاه مرجع ارائه شده است. معتبرترین آن‌ها، روش فائو-نمن-مانتیس است (ونتورا و همکاران، ۱۹۹۹ و کاشیپ و پاندا، ۲۰۰۱) که به‌عنوان روش استاندارد انتخاب شده است. روش فائو-نمن-مانتیس (FPM):

در این روش گیاه مرجع یک پوشش چمن فرضی است که ارتفاع آن ۱۲ سانتی‌متر و ضریب آلبیدو در آن ۲۳ درصد است. معادله فائو-نمن-مانتیس به‌صورت زیر است (آلن و همکاران، ۱۹۹۸):

جدول ۱ خصوصیات آماری داده‌های هواشناسی

مشخصه آماری	دمای حداکثر ($^{\circ}\text{C}$)	دمای حداقل ($^{\circ}\text{C}$)	رطوبت نسبی (%)	سرعت باد (m/s)	ساعات آفتابی (hr)
میانگین	۲۰/۲	۷/۴	۴۷/۵۴	۲/۱۹	۸/۸۵
انحراف معیار	۱۰/۰۹	۸/۸۹	۱۹/۴۴	۱/۷۷	۳/۵۹
واریانس	۱۰۱/۷۹	۷۹/۱۳	۳۷۸/۰۹	۳/۱۶	۱۲/۹۰۸
حداکثر مقدار	۴۰	۲۷/۶	۹۸/۹	۱۳/۶۵	۱۳/۸
حداقل مقدار	-۴/۶	-۱۸	۱۱	۰	۰
تعداد داده‌ها	۳۶۵۳	۳۶۵۳	۳۶۵۳	۳۶۵۳	۳۶۵۳

نتایج این مدل‌های سری زمانی و معیارهای ارزیابی آن‌ها در جدول ۲ آمده است.

با توجه به معیار BIC که در قبل اشاره شد، بهترین مدل برای برآورد دمای حداکثر روزانه، دمای حداقل روزانه، رطوبت نسبی، ساعات آفتابی و سرعت باد انتخاب شد که

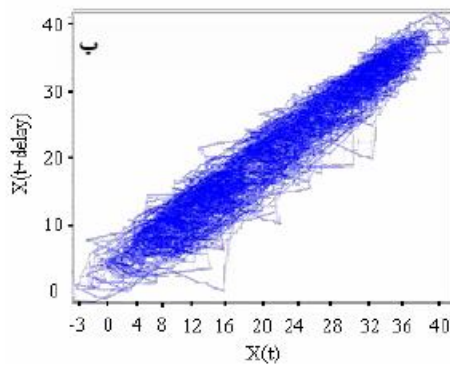
جدول ۲ بهترین مدل سری زمانی برای پیش‌بینی دمای حداکثر در ایستگاه سینوپتیک تریب حیدریه

پارامتر	مدل	p	D	q	BIC	RMSE	MAE	MAPE	NS	R^2
دمای حداکثر	ARIMA(2,1,1)	۱	۱	۲	۱/۷۴	۲/۳۷	۱/۷۸	۱۹/۸۶	۰/۸۷	۰/۹۴
دمای حداقل	ARIMA(2,1,2)	۲	۱	۲	۲/۰۷	۲/۸۰	۲/۱۹	۷۴/۶۵	۰/۷۲	۰/۹۰
رطوبت نسبی	ARIMA(1,1,2)	۲	۱	۱	۴/۴۵	۲/۹۴	۶/۷۴	۱۴/۵۷	۰/۶۳	۰/۷۷
ساعات آفتابی	ARIMA(1,1,1)	۱	۱	۱	۱/۹۱	۲/۵۹	۱/۸۵	۷۴/۴۵	۰/۳۵	۰/۴۹
سرعت باد	ARIMA(1,0,3)	۳	۰	۱	۰/۶۰	۱/۳۴	۱/۰۳	۷۹/۲۵	۰/۳۲	۰/۴۳

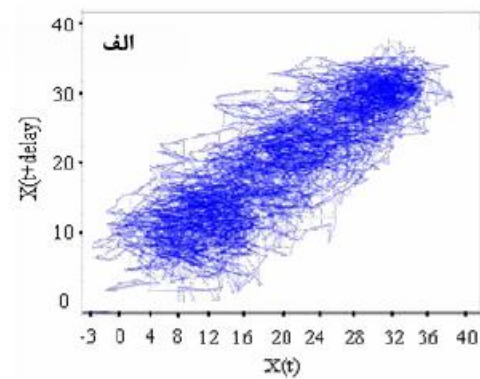
(m) است. کل داده‌های ۱۰ ساله به دو دسته تقسیم شدند، دسته اول شامل ۳۵۰۰ داده و دسته دوم شامل

برای بازسازی فضای حالت دینامیکی، نخستین مرحله تخمین پارامترهای زمان تأخیر (T) و بعد محاط شدگی

انجام شده است. تصویرهای دو بعدی از فضای حالت بازسازی شده برای دمای حداکثر در زمان تأخیرهای $\tau=1$ و $\tau=10$ در شکل ۱ نشان داده شده است (که محور x مقدار پارامتر در زمان t (برحسب روز) محور y مقدار پارامتر در زمان $t+\tau$ است).



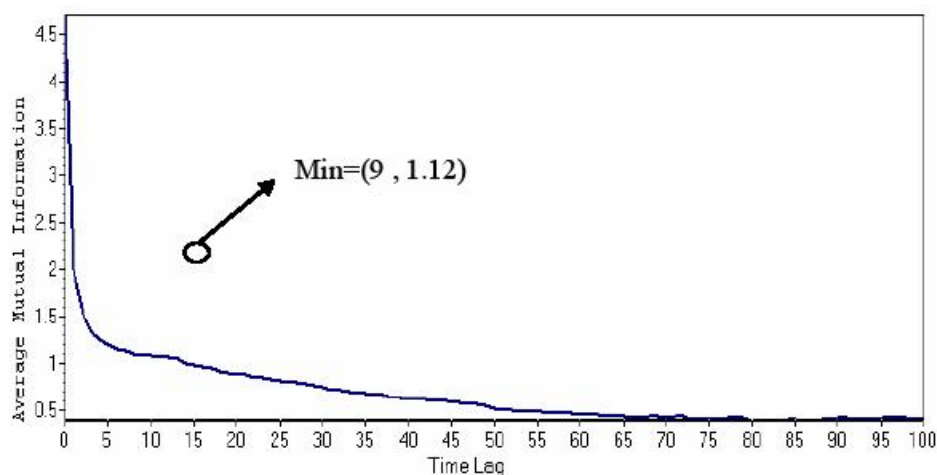
۱۰۰ داده که داده‌های دسته اول جهت بازسازی فضای حالت برای تخمین زمان تأخیر و بعد محاط استفاده شدند و داده‌های دسته دوم برای بازسازی فضای حالت برای مقایسه مقادیر مشاهده‌ای و سری زمانی بازسازی شده به کار رفتند. کلیه تحلیل‌های زیر به وسیله مدل Visual Recurrence Analysis v4.2 (VRA) (کونف، ۲۰۰۵)



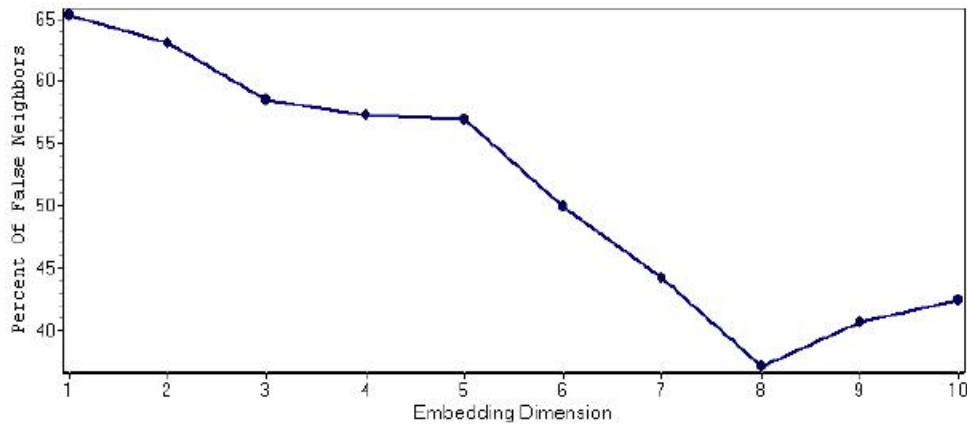
شکل ۱ فضای حالت دمای حداکثر براساس زمان تأخیرهای $\tau=1$ و $\tau=10$ به ترتیب شکل الف و ب

برای سایر پارامترهای هواشناسی مناسبترین زمان تأخیر عبارتست از دمای حداقل $\tau=20$ روز، رطوبت نسبی $\tau=10$ روز، ساعات آفتابی $\tau=6$ روز و سرعت باد $\tau=6$ روز. تغییرات دانسیته FNN در مقابل بعد محاط m برای سری زمانی دمای حداکثر در شکل ۳ نشان داده شده است. مقدار بهینه بعد محاط (m) همان‌طور که از شکل مشخص است مقدار ۸ است.

برآورد زمان تأخیر با استفاده از تابع اطلاعات متقابل (AMI)، اولین گام در جهت بازسازی فضای حالت به شمار می‌رود و بدین منظور، زمان مربوط به اولین حداقل این تابع به‌عنوان مناسب‌ترین زمان تأخیر (τ) در بازسازی فضای حالت پیشنهاد شده است. همان‌طور که از شکل ۲ مشخص است اولین نقطه حداقل مربوط به زمان تأخیر برای دمای حداکثر $\tau=9$ روز است.



شکل ۲ تغییرات زمان تأخیر برحسب روز در مقابل میانگین اطلاعات متقابل (AMI) و تعیین نقطه حداقل برای دمای حداکثر



شکل ۳ تغییرات دانسیته FNN در مقابل بعد محاط m برای دمای حداقل

روز است که این مقادیر در این مقاله به ترتیب برابر ۸۹ درصد و ۰/۵۸۵ میلی‌متر در روز است. نتایج ارائه شده توسط دومنیکو و همکاران (۲۰۱۲) نیز با نتایج این مقاله همخوانی دارد. این پژوهش‌گران به بررسی دو روش بالا در برآورد سطح آب دریا در جزیره کوکوس واقع در اقیانوس هند برای بازه‌های زمانی روزانه، هفتگی، ده روزه و ماهانه، پرداختند و به این نتیجه رسیدند که هر دو مدل در حالت روزانه با دقت بالایی عمل می‌کنند، به طوری که ضریب همبستگی بین مقادیر مشاهده‌ای و مدل ARIMA برابر ۰/۷۴ و تئوری آشوب برابر ۰/۶۵ است. آن‌ها همچنین گزارش کردند که روش‌های ARIMA و تئوری آشوب هر دو با دقتی نزدیک به یکدیگر برآورد را انجام داده‌اند، هر چند دقت ARIMA کمی بیشتر بوده است. شاخص‌های آماری، برای مقایسه بهتر نتایج به دست آمده از ۲ روش در جدول ۳ ارائه شده است.

نتیجه‌گیری

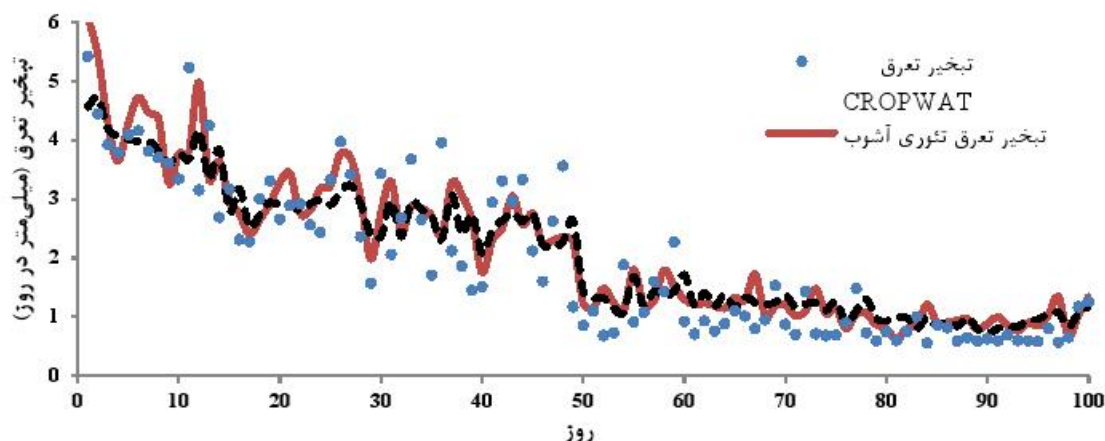
برآورد تبخیر تعرق گیاه مرجع (ET_0) برای طراحی سیستم‌های آبیاری، مدیریت منابع آب، تولید محصول و ارزیابی‌های زیست‌محیطی ضروری است. روش‌ها و مدل‌های مختلفی برای پیش‌بینی ET_0 با استفاده از سری‌های زمانی ارائه شده‌اند که از آن جمله می‌توان مدل‌های سری زمانی MA، AR و ARIMA را برشمرد. اما بیشتر مطالعات مدل‌های استوکاستیک و ARIMA برای سری‌های زمانی فصلی و ماهانه بوده است و کمتر بر روی سری‌های زمانی روزانه متمرکز شده است در حالیکه برای مدیریت و برنامه‌ریزی آبیاری نیاز است که میزان تبخیر تعرق به صورت روزانه محاسبه شود. همچنین تاکنون از

پس از برآورد پارامترهای هواشناسی به دو روش تئوری آشوب و ARIMA و استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده ایستگاه هواشناسی تربت حیدریه، تبخیر تعرق گیاه مرجع به روش فائو-پنمن-مانتیس با نرم‌افزار CROPWAT 8.0 (ET_{0c})، داده‌های تخمینی به روش تئوری آشوب (ET_{0t}) و روش ARIMA (ET_{0a}) محاسبه شد. این محاسبات در بازه ۱۰۰ روز آخر سال ۲۰۰۰ میلادی انجام شده و نتایج به دست آمده از ۳ روش در شکل‌های ۴ و ۵ ترسیم شده است. همان‌طور که از شکل ۴ پیداست، در بیشتر اوقات دو مدل با دقت به نسبت برابری عمل می‌کنند. همچنین نتایج بیانگر آنست که هر دو مدل مقدار واقعی را کمتر برآورد می‌کنند. ولی روش ARIMA نسبت به تئوری آشوب بیشتر کم برآورد دارد (شکل ۵).

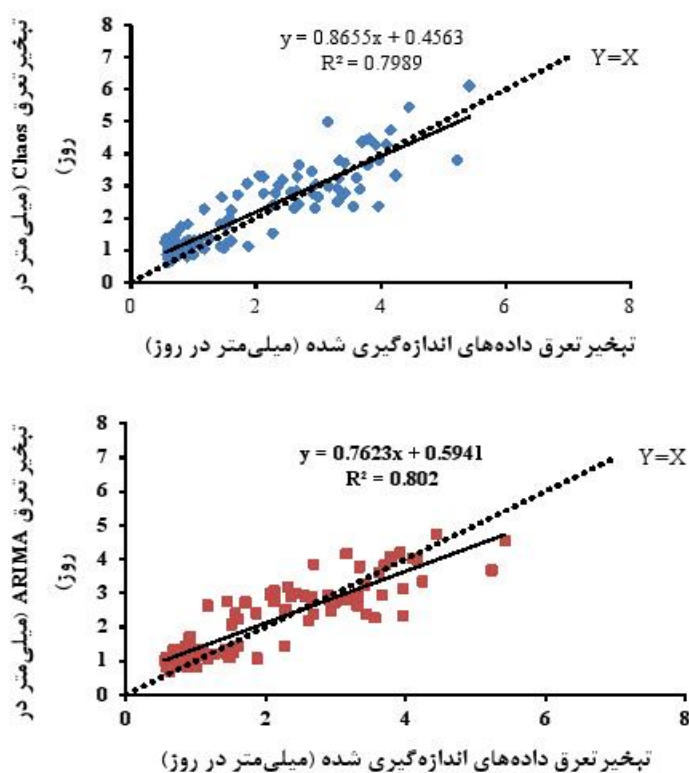
مقایسه نتایج به دست آمده از روش تئوری آشوب و مقادیر اندازه‌گیری شده در این مقاله، با نتایج به دست آمده توسط قربانی و همکاران (۲۰۱۲) هماهنگی خوبی دارد. این پژوهش‌گران با این روش دبی رودخانه کارون را پیش‌بینی کردند و به این نتیجه رسیدند که ضریب همبستگی (CC) بین روش تئوری آشوب و مقادیر مشاهده‌ای حدود ۹۳ درصد است، که در این مقاله ۸۹ درصد است. همچنین مقایسه نتایج به دست آمده از روش ARIMA و مقادیر محاسبه شده با CROPWAT در مقاله حاضر، با نتایج به دست آمده توسط قهرمان و همکاران (۱۳۹۰) مطابقت مطلوبی دارد. این پژوهش‌گران با استفاده از سری زمانی ARIMA تبخیر از تشت را در ایستگاه سینوپتیک شیراز برآورد کردند که تحلیل آماری نشان داد، ضریب همبستگی بین مقادیر مشاهده‌ای و تخمینی برابر ۹۲ درصد و RMSE برابر ۱/۶۴ میلی‌متر در

طوری که ضریب تبیین مقادیر مشاهده شده و تخمین زده شده برای تبخیر تعرق گیاه مرجع از دو روش ARIMA و تئوری آشوب به ترتیب برابر $0/۷۹۹$ و $0/۸۰۲$ و مقدار RMSE برابر $0/۵۸۵$ و $0/۶۱۱$ میلی‌متر در روز است. لازم به ذکر است که به دلیل عدم وجود داده‌های لایسیمیتری نتایج فقط با روش FPM مقایسه شده است.

تئوری آشوب برای برآورد ET_0 استفاده نشده است. در این پژوهش عملکرد هر یک از مدل‌های یاد شده در برآورد و تخمین مقادیر ET_0 به صورت روزانه در ایستگاه سینوپتیک تربت حیدریه ارزیابی شد. نتایج نشان داد که مدل سری زمانی ARIMA و تئوری آشوب هر دو با دقتی نزدیک به یکدیگر تبخیر تعرق گیاه مرجع را برآورد می‌کنند. به



شکل ۴ تغییرات تبخیر تعرق محاسبه شده به وسیله CROPWAT، داده‌های تخمینی به روش تئوری آشوب و ARIMA در ۱۰۰ روز آخر سال ۲۰۰۰ میلادی



شکل ۵ تغییرات تبخیر تعرق محاسبه شده با CROPWAT، داده‌های تخمینی به روش تئوری آشوب و ARIMA در مقایسه با یکدیگر، در کنار خط یک به یک برای ۱۰۰ روز آخر سال ۲۰۰۰ میلادی

۸. علیزاده ا. ۱۳۸۰. رابطه آب و خاک و گیاه. انتشارات آستان قدس رضوی. چاپ دوم.

۹. فولادمند ح. ر. ۱۳۸۹. پیش‌بینی ماهانه تبخیر تعرق پتانسیل گیاه مرجع در استان فارس. دانش آب و خاک، ۲۰(۴): ۱۵۷-۱۶۹.

۱۰. قهرمان ن. و قره‌خانی ا. ۱۳۹۰. ارزیابی مدل‌های تصادفی سری زمانی در برآورد تبخیر از تشت (مطالعه موردی: ایستگاه شیراز). پژوهش آب در کشاورزی. ۲۵(۱): ۷۵-۸۱.

۱۱. گل کار حمزیه یزد ح. ر. کاوه ف. قهرمان ب. و صدقی ح. ۱۳۸۶. بررسی روند تغییرات سری زمانی تبخیر-تعرق ماهیانه گیاه مرجع با استفاده از روش پیشنهادی فائو پنمن-مانتیس. علوم کشاورزی. ۱۳(۲): ۴۱۷-۴۳۳.

۱۲. نیرومند ح. و بزرگ‌نیا ا. ۱۳۸۷. تجزیه و تحلیل سری‌های زمانی. چاپ اول. انتشارات مشهد. ۲۹۰ ص.

13. Akaike H. 1974. A new look at the statistical model identification, Automatic Control, IEEE Transactions on. 19(6):716-723.

14. Allen R. G. Pereira L. S. Raes D. and Smith M. 1998. Crop Evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 56. Food and Agric. Org. of the United Nations, Rome, Italy. 300 p.

15. Box G. Jenkins G. and Reinsel G. 1994. Time series analysis: Forecasting and control. Third Edition, Holden-Day. 781 p.

16. Cellucci C. J. Albano A. M. and Rapp P. E. 2003. Comparative study of embedding methods, Physical Review. E 67(6):660-680.

17. Chattopahyay N. and Hulme M. 1997. Evaporation and potential evapotranspiration in India under conditions of recent and future climate change, Agricultural and Forest Meteorology. 87(1):55-73.

18. Domenico M. D. Ghorbani M. A. Makarynsky O. Makarynska D. and Asadi H. 2013. Chaos and reproduction in sea level. Applied Mathematical Modelling. 37(6):3687-3697.

19. Farzin S. Ifaei P. Farzin N. Hassanzadeh Y. and Aalami M. T. 2012. An Investigation on Changes and Prediction of Urmia Lake water Surface Evaporation by Chaos Theory, International Journal of Environmental Research. 6(3):815-824.

20. Fraser A. M. and Swinney H. L. 1986. Independent coordinates for strange attractors from mutual information, Physical Review. A. 33(2):1134-1140.

21. Ghorbani M. A. Kisi O. and Aalinezhad M. 2010. A probe into the chaotic nature of daily

جدول ۳ مقایسه تبخیر تعرق محاسبه شده با داده‌های تخمینی از دو روش ARIMA و تئوری آشوب و مقادیر اندازه‌گیری شده

شاخص آماری	مدل	
	تئوری آشوب	ARIMA
RMSE	۰/۶۱۱	۰/۵۸۵
NRMSE	۰/۱۲۵	۰/۱۲۰
MAE	۰/۴۸۶	۰/۴۶۸
SEE	۰/۶۱۵	۰/۵۸۸
NS	۰/۷۷	۰/۷۹
R ²	۰/۷۹۹	۰/۸۰۲
CC	۰/۸۹۴	۰/۸۹۵

RMSE جذر میانگین مربعات خطا، NRMSE جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده، MAE میانگین خطای مطلق، SEE خطای استاندارد برآورد، NS ضریب ناش-سانکلیف، R² ضریب تبیین و CC ضریب همبستگی.

منابع

۱. آذر ع. مؤمنی م. ۱۳۷۷. آمار و کاربرد آن در مدیریت. چاپ اول. انتشارات سمت. ۲۱۴ ص.

۲. آشگر طوسی ش. علیزاده ا. و شیرمحمدی ر. ۱۳۸۴. مدل‌سازی SARIMA بارندگی‌های فصلی (مطالعه موردی: الگوسازی و پیش‌بینی بارندگی در استان خراسان). تحقیقات منابع آب ایران. ۱(۳): ۴۱-۵۳.

۳. احمدی ف. قهرمان ب. داوری ک. و نیرومند ح. ع. ۱۳۸۴. کاربرد مدل سری‌های زمانی در پیش‌بینی بارندگی ماهیانه و سالانه مشهد. علوم و صنایع کشاورزی. ویژه خاک، آب و هوا. ۲۱(۲): ۲۱-۳۲.

۴. الوانی س. م. و دانایی‌فرد ح. ۱۳۸۱. تئوری نظم در بی‌نظمی و مدیریت. انتشارات صفار اشراقی. چاپ اول.

۵. جلالی ا. و خنجر س. ۱۳۸۸. بررسی نوسانات دمایی با استفاده از مدل سری‌های زمانی و توزیع احتمالاتی (مطالعه موردی شهرستان کرمانشاه). فضای جغرافیایی. ۹(۲۷): ۱۱۵-۱۳۲.

۶. خورشید دوست ع. م. صنیعی ر. و قویدل رحیمی ی. ۱۳۸۸. پیش‌بینی دماهای کرانگین اصفهان با استفاده از روش سری‌های زمانی. فضای جغرافیایی. ۹(۲۶): ۳۱-۴۸.

۷. شیرغلامی ه. و قهرمان ب. ۱۳۸۴. بررسی روند تغییرات دمای متوسط سالانه در ایران. علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی. ۹(۱): ۹-۲۴.

37. Sivakumar B. 2002. A phase-space reconstruction approach to prediction of suspended sediment concentration in rivers, *Journal of Hydrology*, 258(1):149-162
38. Solomatine D. P. Velickov S. and Wust J. C. 2003. Prediction Water Levels And Currents In The North Sea Using Chaos Theory And Neural Networks: In Proceedings of the Congress-International Association for Hydraulic Research, 353-359.
39. Sparrow C. 1982. The Lorenz equations: bifurcations, chaos, and strange attractors, Vol. 41. New York: Springer-Verlag.
40. Szilagyi J. 2001. Modeled area evaporation trend over the conterminous United States. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 127(4):196-200.
41. Takens F. 1981. Detecting strange attractors in turbulence. In: Rand D. A. Young L. S. (Eds.), *Lectures Notes in Mathematics*, 898, Springer-Verlag, New York, pp. 366-381.
42. Thomas A. 2000. Spatial and temporal characteristics of potential evapotranspiration trends over China. *International Journal of Climatology*, 20(4):381-396.
43. Ventura F. Spano D. Duce P. and Snyder R. L. 1999. An evaluation of common evapotranspiration equations. *Irrigation Science*, 18(4):163-170.
- streamflow time series by correlation dimension and largest Lyapunov methods, *Journal Applied Mathematica Modelling*, 34(12):4050-4057.
22. Ghorbani M. A. Shfaraz R. D. Arvanagi H. Pourzangbar A. Saghebian S. M. and Kaveh Kar S. 2012. Local Prediction in River Discharge Time Series, *Journal Civil Engineering and Urbanism*, 2(2):51-55.
23. Hulme M. Z. Zhao C. and Jiang T. 1994. Recent and future climate change in east Asia. *International Journal of Climatology*, 14(6):637-658.
24. Kashyap P. S. and Panda R. K. 2001. Evaluation of evapotranspiration estimation methods and development of crop-coefficients for potato crop in a sub-humid region. *Agricultural Water Management*, 50(1):9-25.
25. Khan S. Ganguly A. R. and Saigal S. 2005. Detection And Predictive Modeling Of Chaos In Finite Hydrological Time Series., *Nonlinear Processes in Geophysics*, 12(1):41-53.
26. Kocak K. Saylan L. and Sen O. 2000. Nonlinear Time Series Prediction Of O3 Concentration In Istanbul, *Atmosphere Environment*, 34(8):1267-1271.
27. Kononov E. 2005. [Http://www1.maths.leeds.ac.uk/applied/news.dir/issue19.dir/news/news.html](http://www1.maths.leeds.ac.uk/applied/news.dir/issue19.dir/news/news.html)
28. Lorenz N. E. 1963. Deterministic non-periodic flows: *Journal of Atmospheric Science*, 20(2):130-141.
29. Nash J. E. and Sutcliffe J. V. 1970. River flow forecasting through conceptual models part I -A discussion of principles, *Journal of Hydrology*, 10(3):282-290
30. Niedzielski T. and Kosek W. 2010. An application of low-order ARMA and GARCH models for sea level fluctuations, *Artif. Satellites*, 45(1):27-39.
31. Padilla A. Puldo Bosch A. Cavache M. and Vallejos A. 1996. The ARMA model applied to the flow of Karst Spiring. *Water resources bulletin*, 32(3):917-928.
32. Peterson T. C. 2002. Analysis of trends in US and the former USSR pan evaporation. National Climate Data Center, NOAA. 15 p.
33. Samani N. Raeissi E. and Soltani A. 1994. Modeling the stochastic behavior of the Fars river. *Journal of Sciences Iran*, 5(1):49-58.
34. Schwarz G. 1978. Estimating the dimension of a model. *Annals Statistics*, 6(2):461-464.
35. Shang P. Na X. and Kamae S. 2009. Chaotic analysis of time series in the sediment transport Phenomenon, *Chaos, Solitons and Fractals*, 41(1):368-379.
36. Sivakumar B. 2001. Rainfall Dynamics At Different Temporal Scales: A Chaotic Perspective: *Hydrology and Earth System Sciences*, 5(4):645-651.