

Linear and Nonlinear Behavior Analysis of
Hydrological Time Series
(Case study: Western Rivers of Lake Urmia)

K. Khalili¹, F. Ahmadi²,
Y. Dinpashoh³ and J. Behmanesh^{4*}

Abstract

Determination the suitable pattern according to the system mechanism is one of the key issues in modeling and forecasting time series. It is common to use linear time series models without investigating linearity or nonlinearity of using system. In this study streamflow processes of Nazlu Chai, Shahar Chai and Baranduz Chai rivers located in the West Azarbaijan province and west of Lake Urmia investigated by BDS test in annual, monthly and daily time scales. Stationarity of series, as the main assumption of this test, has been done by ADF and KPSS methods. It is found that as the timescale decreases, the nonlinearity will increase. So that for annual series (due to the linearity test) linear ARMA models can be used at the acceptable significance. Whereas to increase accuracy of forecasted monthly and daily streamflow series of studied rivers, nonlinear models such as Bilinear, TAR and ARCH should be used. Linear and nonlinear models for each river in the different time scales on the basis of BDS test results proposed.

Keywords: ADF test, BDS test, KPSS test, Nonlinearity, Stationary, Time series.

Received: May 28, 2013
Accepted: March 17, 2014

تحلیل رفتار خطی و غیرخطی سری‌های زمانی
هیدرولوژیک
(مطالعه موردی رودخانه‌های غرب دریاچه ارومیه)

کیوان خلیلی^۱، فرشاد احمدی^۲، یعقوب دین‌پژوه^۳
و جواد بهمنش^{۴*}

چکیده

تعیین الگوی مناسب یکی از مسائل مهم در مدل‌سازی و پیش‌بینی سری‌های زمانی، با توجه به مکانیسم سیستم مورد نظر است. اغلب، بدون بررسی خطی یا غیرخطی بودن سیستم از مدل‌های رایج خطی سری زمانی استفاده می‌شود. در این تحقیق فرآیند جریان رودخانه‌های نازلوچای، شهرچای و باراندوزچای واقع در استان آذربایجان غربی و غرب دریاچه ارومیه با آزمون غیرخطی BDS در سه مقیاس زمانی (سالانه، ماهانه و روزانه) بررسی شده است. ایستای بودن سری‌های زمانی شرط اساسی در این روش بوده که بدین منظور از آزمون‌های ADF و KPSS استفاده شده است. طبق نتایج حاصله هرچه مقیاس زمانی کوچک‌تر می‌شود، درجه غیرخطی بودن افزایش می‌یابد. به طوری که برای سری‌های سالانه (به دلیل خطی بودن نتیجه آزمون) می‌توان از مدل‌های خطی نظیر خانواده ARMA در سطح معنی‌داری قابل قبول استفاده کرد. در حالی که برای افزایش دقت پیش‌بینی سری‌های ماهانه و روزانه جریان رودخانه‌های مورد مطالعه بایستی از مدل‌های غیرخطی مانند Bilinear، TAR و ARCH استفاده کرد. مدل‌های مناسب خطی و غیرخطی برای سری‌های زمانی هر رودخانه در مقاطع زمانی مختلف بر اساس نتایج آزمون BDS تعیین و الگوهای پیشنهادی ارائه شده است.

کلمات کلیدی: آزمون ADF، آزمون BDS، آزمون KPSS، ایستای، سری زمانی، غیرخطی.

تاریخ دریافت مقاله: ۷ خرداد ۱۳۹۲
تاریخ پذیرش مقاله: ۲۶ اسفند ۱۳۹۲

1- Assistant Professor, Water Engineering Department, Urmia University, Urmia, Iran.
2- Msc Student, Water Resources Management, Tabriz University, Tabriz, Iran.
3- Associate Professor, Water Engineering Department, Tabriz University, Tabriz, Iran.
4- Associate Professor, Water Engineering Department, Urmia University, Urmia, Iran. Email: j.behmanesh@urmia.ac.ir
*- Corresponding Author

۱- استادیار گروه مهندسی آب دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران.
۲- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی منابع آب، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.
۳- دانشیار گروه مهندسی آب دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.
۴- دانشیار گروه مهندسی آب دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران.
*- نویسنده مسئول

زمانی بررسی کردند. آنها به این نتیجه رسیدند که هر چه مقیاس زمانی کوچک‌تر می‌شود غیرخطی بودن افزایش می‌یابد، به طوری که دبی‌های روزانه ماهیت غیرخطی بیشتری نسبت به دبی‌های ماهانه نشان دادند. شناخت بیشتر ماهیت غیرخطی جریان رودخانه می‌تواند در مدل‌سازی و تشخیص اینکه آیا فرآیند مورد نظر به صورت خطی یا غیرخطی مدل‌سازی شود، کمک شایانی نماید. روش‌های زیادی برای آزمون خطی یا غیرخطی بودن ارائه شده است. آنها را می‌توان به دو گروه تقسیم کرد. آزمون‌های پورت ماننتو که در ابتدا از الگوهای خطی و بدون تعیین جانشین مشخص نشأت گرفته و دوم آزمون‌هایی که برای جانشینی‌های خاصی طراحی شده‌اند. McLeod (1983) و Salas et al. (1980) مطالعاتی بر روی الگوهای خطی سری‌زمانی هیدرولوژیکی انجام دادند. در حالیکه الگوهای غیرخطی بیشتر در علوم مرتبط با آمار، اقتصاد و ریاضیات مورد بحث قرار گرفته و توسعه یافته‌اند که می‌توان به منابعی نظیر Priestley (1988) و Tong (1990) مراجعه نمود. اکثر این مدل‌ها در زمینه مدل‌سازی و پیش‌بینی سری‌های زمانی اقتصادی کاربرد داشته‌اند (Farnses and Van Dijk, 2002). از بین الگوهای غیرخطی، مدل دوخطی^۴ توسط Garnger and Andersen (1978) معرفی شد. تحقیقات فراوانی بر روی این مدل پس از آن به عمل آمد. الگوی خودهمبستگی آستانه یا حدی^۵ (TAR) توسط Tong (1978) معرفی شد. این الگو به عنوان یک مدل مکمل جهت توصیف یک سری‌زمانی ارائه و توسط Tong (1983 and 1990) و Tsay (1989) توسعه یافت.

الگوی واریانس ناهمسان شرطی خودهمبسته^۶ توسط Engle (1982) ارائه شد و هدف الگوسازی واریانس نرخ تورم در انگلیس بود. ایده اصلی الگوهای ARCH از مطالعات اقتصادی نشأت گرفته و برای مدل‌سازی پدیده‌های ناپایدار مانند نرخ بهره و سهام به کار گرفته شده‌است. انواع دیگر الگوهای ARCH ارائه شده‌اند که مهمترین آنها عبارتند از: الگوی واریانس ناهمسان شرطی خودهمبسته تعمیم یافته^۷، الگوی نمایی واریانس ناهمسان شرطی خودهمبسته تعمیم یافته^۸ و الگوی واریانس ناهمسان شرطی خودهمبسته تعمیم یافته غیرخطی^۹ (Bollerselv, 1986; Nelson, 1991; Engle and Ng, 1993)

هدف از این تحقیق بررسی وجود و شدت رفتار غیرخطی رایج در سری‌های زمانی جریان رودخانه در سه مقیاس زمانی سالانه، ماهانه و روزانه با آزمون BDS است. اغلب مطالعات صورت گرفته در داخل و خارج کشور برای مدل‌سازی سری‌های زمانی هیدرولوژیکی بدون در نظر گرفتن ماهیت و رفتار سری مورد نظر و با الگوهای عمومی

تشخیص خطی یا غیرخطی بودن هر فرآیند برای مدل‌سازی در بسیاری از مسائل علمی اهمیت فراوانی دارد. واضح است که فرآیند بسیاری از سیستم‌های طبیعی نسبت به زمان غیرخطی است، هر چند ممکن است جنبه‌های خاصی از این سیستم‌ها نسبت به جنبه‌های دیگر به فرآیند خطی نزدیک‌تر باشند. به هر حال ماهیت غیرخطی بودن آنها کاملاً آشکار نیست (Tsonis, 2001). فرآیند جریان رودخانه یکی از سامانه‌های طبیعی است که در آن، مکانیسم غیر خطی می‌تواند در مقیاس زمانی و مکانی حاکم باشد. مطالعات و تحقیقاتی در طی نیم قرن گذشته در زمینه غیرخطی بودن و کاربرد مدل‌های غیرخطی جریان‌های رودخانه انجام شده است.

Rogres and Zia (1982) یک روش ابتکاری برای تعیین درجه غیرخطی بودن حوضه‌های آبریز با داده‌های بارش - رواناب ارائه نمودند. Rao and Yu (1990) خطی بودن مشخصات سری‌های سالانه جریان رودخانه، بارش روزانه و درجه حرارت را با آزمون چند طیفی (Hinich (1982) بررسی کردند. داده‌های روزانه هواشناسی براساس نتایج حاصله از تحقیق آنها غیرخطی بود. ولی سری‌های سالانه جریان رودخانه ماهیت خطی داشتند. Chen and Rao (2003) نیز غیرخطی بودن سری‌زمانی هیدرولوژیکی را با آزمون Hinich (1982) مطالعه کردند. نتایج تحقیق آنها نشان داد که تمام سری‌های ماهانه درجه حرارت و بارش که ایستا و استاندارد شده بودند ماهیت خطی داشتند و برخی سری‌های استاندارد ماهانه جریان رودخانه غیرخطی بودند. نظریه آشوب^۱ نیز در مساله غیرخطی بودن، در نیم قرن اخیر مورد توجه قرار گرفته است. مکانیسم آشوب در جریان‌های رودخانه بیشتر مورد توجه محققین هیدرولوژی قرار دارد. به عنوان نمونه Wilcox et al. (1991)، Jaywardena and Lai (1994)، Porporato and Ridolfi (1997)، Sivakumar et al. (1999) و Elshorbagy et al. (2002) مطالعاتی در این زمینه انجام داده‌اند. وجود آشفتگی در سری‌های زمانی هیدرولوژی در اکثر این مطالعات مورد تایید قرار گرفته است. Patterson and Ashly (2000) شش روش مختلف آزمون پورت ماننتو^۲ را برای هشت سری غیرخطی شبیه‌سازی شده به کار بردند. آنها به این نتیجه رسیدند که آزمون^۳ BDS بهترین روش است. Kim et al. (2003) توان آزمون BDS و برخی آزمون‌های ناپارامتری دیگر را مقایسه کرده و برای تحلیل باقیمانده‌های مدل‌های برازشی بارش ماهانه به کار بردند. نتایج تحلیل آنها نیز نشان داد که آزمون BDS نسبت به دیگر آزمون‌ها بهتر است. Wang et al. (2005) غیرخطی بودن فرآیند جریان رودخانه را با آزمون BDS و روش همبستگی نمایی در مقیاس‌های

سری زمانی خطی است. این پژوهش پاسخ مناسبی را برای رفتار خطی یا غیرخطی بودن سری زمانی ارائه می‌کند.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- داده‌های مورد استفاده

داده‌های دبی جریان سالانه، ماهانه و روزانه رودخانه‌های نازلوچای، شهرچای و باراندوزچای واقع در استان آذربایجان غربی و غرب دریاچه ارومیه برای تحلیل رفتار غیرخطی استفاده شده‌اند. این سه از رودخانه‌های سیزده‌گانه‌ای هستند که به دریاچه ارومیه واریز می‌شوند. مشخصات ایستگاه‌های آبنجی منتخب به همراه مشخصات آماری سری‌های جریان رودخانه در جدول ۱ آمده است.

۲-۲- آزمون BDS

آزمون BDS توسط Brock et al., (1991 and 1996) توسعه و معرفی شد. این آزمون یک روش ناپارامتری است که برای آزمون همبستگی متوالی و کشف ساختار غیرخطی موجود در یک سری زمانی، بر مبنای مجموع همبستگی استفاده می‌شود. آماره BDS از مطالعات انجام یافته بر روی نظریه آشوب و دینامیک غیرخطی نشأت گرفته و فقط برای تشخیص آشوب معین مناسب نبوده، بلکه می‌تواند به عنوان ابزار تشخیص در آزمون نکویی برازش مدل تخمینی نیز به کار رود. سری زمانی اسکالر $\{x_t\}$ را که دارای طول N و ابعاد m می‌باشد، در نظر گرفته و سری جدید $\{X_t\}$ را به صورت $X_t = (x_t, x_{t-\tau}, \dots, x_{t-(m-1)\tau})$, $X_t \in R^m$ می‌توان ایجاد کرد. که در آن τ تعداد نقاط محاط در فضای m بعدی است. سپس مجموع همبستگی $C_{m,M}(r)$ با رابطه ۱ محاسبه می‌شود (Grassberger and Procaccia, 1983).

$$C_{m,M}(r) = \left(\frac{M}{2}\right)^{-1} \sum_{1 \leq i \leq j \leq M} H(r - \|X_i - X_j\|) \quad (1)$$

که در آن $M=N-(m-1)$ شعاع یک کره به مرکز X_i و $H(u)$ تابع هوی‌ساید (برای $u > 0$ مقدار $H(u) = 1$ و برای $u \leq 0$ مقدار $H(u) = 0$) است. $C_{m,M}(r)$ تعداد نقاط را در فضای m بعدی که در کره فوق قرار می‌گیرد، محاسبه می‌نماید. فرض صفر Brock et al. (1996) در این آزمون این است که سری زمانی نمونه از یک فرآیند مشخص مستقل تبعیت می‌کند. Brock et al. (1996) فرض نرمال بودن $C_{m,M}(r)$ را تحت شرایط فرض صفر به کار بردند که در آن $\{x_t\}$ سری تحت آزمون بوده که به نرمال استاندارد تمایل دارد. اگر سری‌های تولید شده فرآیندهای ایستایی داشته باشند، در این صورت حد $C_{m,M}(r)$ به

صورت $C_m(r) = \lim_{N \rightarrow \infty} C_{m,M}(r)$ مطابق رابطه ۲ وجود دارد.

$$C_{m,M}(r) = \iint H(r - \|X - Y\|) dF_m(X) dF_m(Y) \quad (2)$$

که در آن F_m تابع توزیع غالب بر سری زمانی $\{x_t\}$ را نشان می‌دهد. در صورتی که فرآیند مستقل بوده و رابطه $H(r - \|X_i - Y_j\|) = \prod_{k=1}^m H(r - |X_{i,k} - Y_{j,k}|)$ برقرار باشد، رابطه ۲ به معنای $C_m(r) = C_1^m(r)$ خواهد بود. همچنین توزیع عبارت $C_m(r) - C_1^m(r)$ نرمال با میانگین صفر و واریانس مطابق با رابطه ۳ است.

$$\frac{1}{4} \sigma_{m,M}^2(r) = m(m-2)C^{2m-2}(K-C^2) + K^m - C^{2m} + 2 \sum_{j=1}^{m-1} [C^{2j}(K^{m-j} - C^{2m-2j}) - mC^{2m-2}(K-C^2)] \quad (3)$$

مقادیر ثابت C و K در رابطه (۳) را می‌توان به صورت روابط ۴ و ۵ برآورد نمود.

$$C_M(r) = \frac{1}{M^2} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M H(r - \|X_i - X_j\|) \quad (4)$$

(۵)

$$K_M(r) = \frac{1}{M^3} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^M H(r - \|X_i - X_j\|) H(r - \|X_j - X_k\|)$$

و در شرایط فرض صفر برای سری $\{x_t\}$ آماره BDS برای $m > 1$ مطابق رابطه ۶ است.

$$BDS_{m,M}(r) = \sqrt{M} \frac{C_m(r) - C_1^m(r)}{\sigma_{m,M}(r)} \quad (6)$$

آماره BDS یا $M \rightarrow \infty$ مشروط بر اینکه نمونه‌های بزرگ‌تری با ابعاد m بزرگ‌تر از ۲ و کوچک‌تر از ۵ داشته باشیم به توزیع نرمال استاندارد گرایش دارد (Brock et al., 1991). مقدار پیشنهادی r بین $\frac{1}{2}$ تا $\frac{2}{3}$ انحراف معیار داده‌ها ست. Wang et al. (2005) به این نتیجه رسیدند که اگر r یک دوم انحراف معیار در نظر گرفته شود، در این صورت تعداد نقاط موجود در فضای m بعدی (زمانی که m بزرگ باشد، مثلاً $m=5$) بسیار کم خواهد بود؛ به ویژه برای سری‌هایی که داده‌های کمتری دارند (به عنوان مثال کمتر از ۱۰۰ داده). از طرف دیگر در حالتی که r برابر سه دوم انحراف معیار در نظر گرفته شود، تعداد نقاط موجود در فضای m بعدی (زمانی که m کوچک باشد، مانند $m=2$) بسیار زیاد و به هم نزدیک هستند که محاسبه $C_{m,M}(r)$ را تحت تأثیر قرار خواهد داد. بنابراین مقدار r برابر با انحراف معیار پیشنهاد شده است.

جدول ۱- مشخصات آماری سری‌های زمانی جریان رودخانه‌های مورد مطالعه

رودخانه	ایستگاه	دوره آماری	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	مساحت بالادست (Km ²)	مقیاس زمانی	میانگین دبی (m ³ /s)
شهرچای	میرآباد	۱۳۵۲-۸۲	۵۳-۴۴	۲۶-۳۷	۱۹۰	روزانه	۵/۲
						ماهانه	۵/۱
						سالانه	۵/۱
باراندوزچای	دیزج	۱۳۵۲-۸۶	۴۵-۴۰	۳۷-۲۳	۶۶۰/۷۱	روزانه	۷/۹
						ماهانه	۷/۹
						سالانه	۷/۹۹
نازلوچای	تپیک	۱۳۵۲-۸۶	۴۴-۵۴	۳۷-۴۰	۱۷۹۹/۸	روزانه	۱۱/۸
						ماهانه	۱۱/۷
						سالانه	۱۱/۷

۳-۲- آزمون ایستایی^۹

سری‌ها در آزمون BDS ایستا فرض می‌شوند. لذا بایستی ایستایی سری‌ها قبل از انجام آزمون، بررسی شود. هدف از آزمون ایستایی پاسخ به این سوال است که آیا مقادیر میانگین و واریانس نسبت به زمان تغییر می‌کنند یا خیر. سری‌زمانی تقریباً در همه روش‌های تحلیل سری‌های زمانی خطی یا غیرخطی، ایستا فرض می‌شود. اغلب سری‌های زمانی بنا به دلایل مختلف (نظیر روند، تناوب یا پرش) نایستا هستند. بایستی سری داده‌ها قبل از مدل‌سازی ایستا شوند. سپس مدل‌سازی صورت گیرد (Salas et al., 1980). روش‌های زیادی برای آزمون ایستایی ارائه شده‌اند. دو روش ADF^{۱۰} و KPSS^{۱۱} نسبت به سایر روش‌ها کاربرد بیشتری دارند (Wang et al., 2005). روابط ریاضی و روش استفاده از این دو آزمون توسط خلیلی و همکاران (۱۳۸۹ و ۱۳۹۰) ارائه شده است.

یکی از مسائل مهم در آزمون‌های ایستایی تعیین مقدار تأخیر^{۱۲} P است، زیرا این روش‌ها به ویژه آزمون KPSS حساسیت زیادی نسبت به مقدار انتخابی P دارند. به طوری که مقدار آماره آزمون با افزایش P کاهش می‌یابد. اگر P خیلی کوچک باشد، خطای باقیمانده همبستگی باعث خطای آزمون می‌شود (Kawiatkowski et al., 1992). مقدار P بر مبنای برآزش مدل AR و بر اساس معیار آکائیک، و رابطه Schwert (1989) و Kawiatkowski et al. (1992) به صورت $P = \text{int} \left[X \left(\frac{N}{100} \right)^{\frac{1}{4}} \right]$ که در آن $X=4,12$ است، که در مطالعه حاضر مقدار P بر مبنای برآزش مدل AR^{۱۳} محاسبه شده است.

۳-۱- نتایج و بحث

۳-۱-۱- نتایج آزمون ایستایی

داده‌ها قبل از انجام آزمون ایستایی، باید حذف روند شوند که این امر با استاندارد کردن داده‌ها یعنی کسر میانگین داده‌ها (روزانه، ماهانه و سالانه) و تقسیم بر انحراف معیار آنها بدست آمده است. نتایج آزمون ایستایی با استفاده از روش ADF و KPSS در جدول ۲ آمده است. با توجه به نتایج به دست آمده از جدول ۲، مشاهده می‌شود که تقریباً همه سری‌های سالانه و ماهانه ایستا هستند. اما نمی‌توان فرض آزمون ریشه واحد را برای سری سالانه رودخانه شهرچای به روش ADF در سطح معنی‌داری یک درصد پذیرفت. معنی‌دار بودن آزمون ایستایی حول روند ثابت در سری‌های سالانه و ماهانه هر سه رودخانه مورد مطالعه بدین معنی است که سری‌ها حول یک روند ثابتی ایستا بوده و به عبارت دیگر در میانگین داده‌ها تغییرات معنی‌داری وجود ندارد. اما برای سری‌های روزانه قبل از انجام آزمون، داده‌ها استاندارد نشده و فقط سری‌های لگاریتمی مورد استفاده قرار گرفت. زیرا با این عمل مشاهده شد که نایستایی داده‌های روزانه بیشتر می‌شود که این موضوع ممکن است به دلایل مختلفی نظیر تأثیر همبستگی متوالی در سری‌های زمانی کوتاه‌مدت و یا اثر مقادیر پرت در روند داده‌ها به ویژه در آزمون ایستایی روند باشد. بنابراین سری‌های سالانه و ماهانه استاندارد و سری‌های روزانه لگاریتمی ایستا فرض می‌شوند.

۳-۱-۲- نتایج آزمون BDS

خاصیت تناوبی یا فصلی در فرآیندهای جریان رودخانه وجود دارد. ابتدا باید این پدیده حذف شود. این کار در دو مرحله انجام شد. ابتدا از داده‌ها لگاریتم گرفته شد و سپس با استاندارد کردن، خاصیت دوره‌ای بودن از داده‌ها حذف شد.

جدول ۲- نتایج آزمون ایستایی برای سری‌های استاندارد شده جریان رودخانه‌های مورد مطالعه

آزمون‌های ایستایی			پارامترهای آزمون	سری	رودخانه
KPSS trend stationary test	KPSS level stationary test	ADF test			
۱	۱	۱	lag	سالانه	شهرچای
۰/۳۵	۰/۴۵	۰/۸۸	p-values		
۰/۱۲	۰/۲۴	-۰/۴۵	Statistic		
۱۶	۱۶	۱۶	lag	ماهانه	
۰/۰۹	۰/۰۲	۰/۰۷	p-values		
۰/۱۲	۰/۵۱	-۲/۷۲	Statistic		
۲۱	۲۱	۲۱	lag	روزانه	
۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۰۱	p-values		
۰/۲۲	۰/۹۴	-۳/۴۵	Statistic		
۱	۱	۱	lag	سالانه	باراندوزچای
۰/۹۵	۱/۰۰	۰/۰۸	p-values		
۰/۱۰	۰/۳۵	-۲/۷۹	Statistic		
۸	۸	۸	lag	ماهانه	
۰/۰۰	۱/۰۰	۰/۱۰	p-values		
۰/۲۵	۱/۱۲	-۲/۶۰	Statistic		
۲۳	۲۳	۲۳	lag	روزانه	
۰/۰۰	۱/۰۰	۰/۰۰	p-values		
۱/۷۲	۹/۰۳	-۸/۳۷	Statistic		
۱	۱	۱	lag	سالانه	نازلوچای
۰/۱۵	۱/۰۰	۰/۱۷	p-values		
۰/۱۳	۰/۳۰	-۲/۳۱	Statistic		
۱۳	۱۳	۱۳	lag	ماهانه	
۰/۱۱	۱	۰/۰۴	p-values		
۰/۱۴	۰/۳۰	-۳/۱۴	Statistic		
۱۳	۱۳	۱۳	lag	روزانه	
۰/۰۰	۱	۰/۰۰	p-values		
۲/۷۳	۵/۴۵	-۹/۶۲	Statistic		

توجه: مقادیر بحرانی توزیع KPSS برای آزمون level stationary $1\% \sim 0.739$; $5\% \sim 0.463$; $10\% \sim 0.347$ بوده و برای trend stationary مقادیر بحرانی برای $1\% \sim 0.216$; $5\% \sim 0.146$; $10\% \sim 0.119$ می باشد.

نتایج آزمون BDS برای رودخانه‌های شهرچای، باراندوزچای و نازلوچای به ترتیب در جداول ۴، ۵ و ۶ ارائه شده است. نتایج حاصل نشان می‌دهد که سری‌های سالانه جریان هر سه رودخانه مورد مطالعه، خطی بوده و با توجه به اینکه خاصیت فصلی یا تناوب در سری‌های سالانه وجود ندارد در این سری نیازی به عمل استاندارد کردن نیست (Wang et al. 2005). برای سری لگاریتمی ماهانه جریان رودخانه شهرچای، آزمون BDS به سختی در سطح معنی داری ۵ درصد قبول شد. در حالی که برای سری لگاریتمی و استاندارد ماهانه حتی در سطح یک درصد هم در آزمون قبول نشد. سری‌های ماهانه لگاریتمی و لگاریتمی استاندارد رودخانه‌های باراندوزچای و نازلوچای نیز حتی در سطح یک درصد هم نتوانستند در آزمون پذیرفته شوند. برای سایر سری‌های روزانه هر سه رودخانه

سری‌های تغییر یافته لگاریتمی و استاندارد را به ترتیب سری‌های log-DS و log می‌نامیم. سری‌های log-DS از تفاضل میانگین لگاریتمی فصل یا دوره (مانند روزانه یا ماهانه) از داده لگاریتمی مورد نظر تقسیم بر انحراف معیار سری لگاریتمی به دست می‌آید. همبستگی متوالی خطی از همه سری‌های ماهانه و روزانه با استفاده از مدل AR حذف می‌شود. پس از این عمل مکانیسم خطی حذف شده و سری باقیمانده دارای مکانیسم غیرخطی خواهد بود (Brock et al. 1996). رسته یا مرتبه مدل‌های AR با استفاده از روش آکائیک اصلاح شده (AICC) تعیین شد. نتایج در جدول ۳ ارائه شده است. سری باقیمانده‌ها با استفاده از این الگوها بدست آمده، سپس آزمون BDS بر روی آنها اعمال می‌شود.

می‌شود، شدت غیرخطی بودن افزایش می‌یابد. همچنین با توجه به نتایج آزمون BDS برای هر رودخانه، مدل‌های مناسب از بین مدل‌های رایج خطی و غیرخطی سری‌زمانی پیشنهاد شده است. نتایج حاصل در جدول ۷ ارائه گردیده است.

نیز آزمون مورد قبول واقع نشد. می‌توان نتیجه گرفت که نتایج آزمون BDS نشان دهنده وجود ماهیت غیرخطی شدید برای سری‌های روزانه حتی پس از حذف اثر تناوب یا فصلی از سری‌ها بوده و سری ماهانه ماهیت غیرخطی شدیدی نداشته و سری سالانه جریان خطی است. به عبارت دیگر هرچه مقیاس زمانی کوچکتر

جدول ۳- مدل‌های AR برازشی بر روی سری‌های زمانی جریان رودخانه‌های مورد مطالعه

سری Log-DS	سری Log	پارامترهای مدل	سری	رودخانه
۸۶/۷	۴۴/۸	AICC	سالانه	شهرچای
۱	۲	رسته مدل		
۷۷۹/۹۹	۳۸۸/۱۵	AICC	ماهانه	
۴	۲۶	رسته مدل		
۱۸۶۸۱/۷	-۴۳۶۲/۱	AICC	روزانه	
۲۶	۲۵	رسته مدل		
۹۳/۷	۳۷/۵	AICC	سالانه	باراندوز چای
۱	۱	رسته مدل		
۸۲۳/۹	۶۰۰/۴	AICC	ماهانه	
۸	۲۶	رسته مدل		
۹۰۶۰/۳	۲۳۸۰/۷	AICC	روزانه	
۲۳	۲۵	رسته مدل		
۹۵/۹	۴۷/۱	AICC	سالانه	نازلوچای
۱	۱	رسته مدل		
۱۷۷۶/۷	۶۹۴/۸	AICC	ماهانه	
۱۳	۲۶	رسته مدل		
۶۸۱۴/۸	۱۰۴۹۴/۵	AICC	روزانه	
۱۳	۲۴	رسته مدل		

جدول ۴- نتایج آزمون BDS برای سری جریان رودخانه شهرچای در مقیاس‌های زمانی مختلف

رودخانه	مقیاس	سری تغییر یافته	ابعاد	۲	۳	۴	۵
شهرچای	سالانه	لگاریتمی	BDS Statistic	۰/۰۱۷	-۰/۰۳۳	۰/۰۰۲	۰/۰۰۰
			p-value	۰/۲۳۰	۰/۱۴۵	۰/۹۸۵	۰/۹۹۴
		استاندارد	BDS Statistic	۰/۰۴۴	۰/۰۶۲	۰/۰۵۴	۰/۰۴۲
	ماهانه	لگاریتمی	p-value	۰/۰۰۲	۰/۰۰۶	۰/۰۵۵	۰/۱۶۶
			BDS Statistic	۰/۰۱۲	۰/۰۱۷	۰/۰۱۵	۰/۰۱۴
		استاندارد	p-value	۰/۰۰۲	۰/۰۰۷	۰/۰۴۰	۰/۰۷۰
روزانه	لگاریتمی	BDS Statistic	۰/۰۳۵	۰/۰۵۰	۰/۰۵۳	۰/۰۵۴	
		p-value	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	
		BDS Statistic	۰/۰۴۱	۰/۰۷۵	۰/۰۹۷	۰/۱۰۹	
	استاندارد	p-value	۰/۰۵۶	۰/۱۰۳	۰/۱۳۶	۰/۱۵۶	
		BDS Statistic	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	
		p-value	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	

جدول ۵- نتایج آزمون BDS برای سری جریان رودخانه باراندوزچای در مقیاس‌های زمانی مختلف

رودخانه	مقیاس	سری تغییر یافته	ابعاد	۲	۳	۴	۵	
باراندوزچای	سالانه	لگاریتمی	BDS Statistic	-۰/۰۰۶	۰/۰۱۴	۰/۰۴۰	۰/۰۴۶	
			p-value	۰/۶۴۷	۰/۴۹۱	۰/۱۱۶	۰/۰۹۱	
		استاندارد	BDS Statistic	-۰/۰۰۶	۰/۰۱۴	۰/۰۴۰	۰/۰۴۶	
			p-value	۰/۶۴۷	۰/۴۹۱	۰/۱۱۶	۰/۰۹۱	
		ماهانه	لگاریتمی	BDS Statistic	۰/۰۵۱	۰/۰۷۸	۰/۰۹۰	۰/۰۹۴
				p-value	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰
	استاندارد		BDS Statistic	۰/۰۲۱	۰/۰۳۵	۰/۰۴۳	۰/۰۴۵	
			p-value	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	
	روزانه		لگاریتمی	BDS Statistic	۰/۰۶۱	۰/۱۰۵	۰/۱۳۱	۰/۱۴۴
				p-value	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰
		استاندارد	BDS Statistic	۰/۰۵۳	۰/۰۹۳	۰/۱۱۹	۰/۱۳۲	
			p-value	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	

جدول ۶- نتایج آزمون BDS برای سری جریان رودخانه نازلوچای در مقیاس‌های زمانی مختلف

رودخانه	مقیاس	سری تغییر یافته	ابعاد	۲	۳	۴	۵	
نازلوچای	سالانه	لگاریتمی	BDS Statistic	-۰/۰۰۳	۰/۰۰۹	۰/۰۱۱	-۰/۰۰۹	
			p-value	۰/۷۴۶	۰/۵۲۲	۰/۵۲۰	۰/۶۲۶	
		استاندارد	BDS Statistic	-۰/۰۰۳	۰/۰۰۹	۰/۰۱۱	-۰/۰۰۹	
			p-value	۰/۷۴۶	۰/۵۲۲	۰/۵۲۰	۰/۶۲۶	
		ماهانه	لگاریتمی	BDS Statistic	۰/۰۱۶	۰/۰۰۳	۰/۰۴۲	۰/۰۴۵
				p-value	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰
	استاندارد		BDS Statistic	۰/۰۶۶	۰/۰۹۶	۰/۰۹۷	۰/۰۸۱	
			p-value	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	
	روزانه		لگاریتمی	BDS Statistic	۰/۰۶۳	۰/۱۱۲	۰/۱۴۲	۰/۱۵۷
				p-value	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰
		استاندارد	BDS Statistic	۰/۰۴۲	۰/۰۷۸	۰/۱۰۲	۰/۱۱۴	
			p-value	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	

جدول ۷- مدل‌های مناسب خطی و غیر خطی سری‌های زمانی پیشنهادی براساس نتایج آزمون BDS

رودخانه	سری	نتیجه آزمون BDS	مدل‌های مناسب پیشنهادی
شهرچای	سالانه	خطی	خانواده ARMA
	ماهانه	غیر خطی شدید	TAR, BL, ARCH
	روزانه	غیر خطی بسیار شدید	TAR, BL, ARCH, Nonlinear GARCH, GARCH
باراندوزچای	سالانه	خطی	خانواده ARMA
	ماهانه	غیر خطی شدید	TAR, BL, ARCH
	روزانه	غیر خطی بسیار شدید	TAR, BL, ARCH, Nonlinear GARCH, GARCH
نازلوچای	سالانه	خطی	خانواده ARMA
	ماهانه	غیر خطی شدید	TAR, BL, ARCH
	روزانه	غیر خطی بسیار شدید	TAR, BL, ARCH, Nonlinear GARCH, GARCH

۴- نتیجه گیری

با توجه به نتایج به دست آمده از آزمون‌های ایستایی ADF و KPSS، سری‌های سالانه و ماهانه استاندارد و سری‌های روزانه لگاریتمی ایستا هستند. آزمون غیرخطی BDS، برای بررسی شدت غیرخطی بودن جریان سه رودخانه مورد مطالعه، پس از حصول اطمینان از ایستایی سری‌ها در مقاطع زمانی سالانه، ماهانه و روزانه استفاده شد.

مدل‌های خطی در بسیاری از تحلیل‌های سری‌های جریان رودخانه استفاده می‌شود. در حالی که معمولاً فرآیند حاکم بر جریان رودخانه بیشتر ماهیت غیرخطی دارد. با این وجود نوع غیرخطی حاکم بر فرآیند سیستم رودخانه و شدت آن در مقیاس‌های زمانی مختلف مشخص نیست. فرآیند جریان رودخانه‌های شهرچای، باراندوزچای و نازلوچای ارومیه با استفاده از آزمون غیرخطی BDS در سه مقیاس زمانی سالانه، ماهانه و روزانه بررسی شد. طبق نتایج حاصله از آزمون BDS سری‌های سالانه جریان خطی و سری‌های ماهانه غیرخطی بوده ولی سری‌های روزانه از شدت غیرخطی بیشتری برخوردارند. به طوری که هرچه مقیاس زمانی کوچک‌تر می‌شود، شدت غیرخطی بودن افزایش می‌یابد. استاندارد کردن داده‌ها نیز سبب می‌شود که ماهیت غیرخطی سری‌های جریان رودخانه بیشتر پدیدار شود. به عبارت دیگر تغییرات فصلی واریانس می‌تواند خاصیت غیرخطی در سری‌ها را نشان دهد. همچنین آزمون BDS برای بررسی غیرخطی بودن سری‌های ماهانه که رفتار غیرخطی خفیفی دارند کارایی لازم را نداشته و بایستی مطالعات بیشتری در این زمینه صورت گیرد.

نتایج این تحقیق نشان داد که در سری سالانه جریان رودخانه‌های مورد مطالعه که درجه غیرخطی بودن بسیار کم است، می‌توان از برازش مدل‌های خطی استفاده کرد. در حالی که برای سری‌های ماهانه و روزانه جریان استفاده از مدل‌های غیرخطی توصیه می‌شود. مدل‌های مناسب خطی و غیرخطی رایج برای هر رودخانه بر اساس نتایج آزمون BDS در جدول ۷ پیشنهاد شده است. نتایج این تحقیق می‌تواند در انتخاب مدل‌های مناسب پیش‌بینی جریان رودخانه مورد استفاده قرار گیرد. هم‌چنین مدل‌های غیرخطی پیشنهادی مدل‌هایی هستند که کمتر در پژوهش‌های مرتبط با منابع آب مورد استفاده قرار گرفته و می‌تواند به عنوان موضوع تحقیقات آتی مد نظر قرار گیرد.

پی‌نوشت‌ها

- 1- Chaos Theory
- 2- Port Manteo
- 3- Brock Dechert Scheinkman Test (BDS)
- 4- Bilinear

- 5- Threshold Autoregressive Model (TAR)
- 6- Autoregressive Conditional Heteroskedastic Model (ARCH)
- 7- Generalized Autoregressive Conditional Heteroskedastic Model (GARCH)
- 8- Exponential GARCH
- 9- Stationary Test
- 10- Augmented Dickey - Fuller
- 11- Kwiatkowski Phillips Schmidt Shin Test
- 12- Lag
- 13- Autoregressive

۵- مراجع

خلیلی ک، فاخری فرد ا، دین‌پژوه ی، قربانی م ق (۱۳۸۹) تحلیل روند و ایستایی جریان رودخانه به منظور مدل‌سازی سری‌های زمانی هیدرولوژیکی. مجله دانش آب و خاک دانشگاه تبریز، جلد ۲۰، شماره ۱: ۶۱-۷۲.

خلیلی ک، فاخری فرد ا، دین‌پژوه ی، قربانی م ق (۱۳۹۰) بررسی غیرخطی بودن فرآیند جریان رودخانه با استفاده از آزمون BDS. مجله دانش آب و خاک دانشگاه تبریز، جلد ۲۱، شماره ۲: ۳۷-۲۵.

Bollerslev, T (1986) Generalized autoregressive conditional heteroskedasticity. *Journal of Econometrics* 31: 307-327.

Brock, WA, Hsieh, DA and LeBaron, B (1991) *Nonlinear Dynamics, Chaos and Instability: Statistical Theory and Economic Evidence*. The MIT Press, Cambridge, MA.

Brock, WA, Dechert, WD, Scheinkman, JA and LeBaron, B (1996) A test for independence based on the correlation dimension. *Econ. Rev* 15 (3): 197-235.

Chen, HL and Rao, AR (2003) Linearity analysis on stationarity segments of hydrologic time series. *J. Hydro.* 277: 89-99.

Elshorbagy, A, Simonovic, SP and Panu, US (2002) Estimation of missing stream flow data using principles of chaos theory. *J. Hydro.* 255: 125-133.

Engle, RF (1982) Autoregressive conditional heteroscedasticity with estimates of the variance of United Kingdom inflations. *Econometrica* 50: 987-1007.

Engle, RF and Ng, VK (1993) Measuring and testing the impact of news on volatility. *Journal of Finance* 48 (5): 1749-1778.

Franses, PH and Van Dijk, D (2002) *Non-linear time series models in empirical finance*, Cambridge University Press, 297p.

- Rogres, WF and Zia, HA (1982) Linear and nonlinear runoff from large drain basins. *J. Hydrol.* 55: 267-278.
- Salas, JD, Delleur, JW, Yevjevich, V and Lane, WL (1980) Applied modeling of hydrologic time series, Water Resources Publications, Littleton, Colorado, 484p.
- Schwert GW (1989) Test for unit roots: a Monte Carlo investigation. *Journal of Business and Economics Statistics* 7: 147-159.
- Sivakumar, B, Liong, SY, Liaw, CY and Phoon, KK (1999) Singapore rainfall behavior: chaotic? *J. Hydrol. Eng.* 4 (1): 38-48.
- Tong, H (1978) On a threshold model. In *Pattern Recognition and Signal Processing*. ed. C.H. Chen, Sijhoff and Noordhoff, Netherlands, Amsterdam. 575-586.
- Tong, H (1983) Threshold models in nonlinear time series analysis, *Lecture Notes in Statistics*, Springer-Verlag: New York, 336p.
- Tong, H (1990) Non-linear time series: A dynamical system approach, Oxford University Press, 564p.
- Tsay, RS (1989) Testing and modeling threshold autoregressive processes. *Journal of the American Statistical Association.* 84: 231-240.
- Tsonis, AA (2001) Probing the linearity and nonlinearity in the transitions of the atmospheric circulation. *Nonlinear Processes Geophysics.* 8: 341-345.
- Wang, Wen, Vrijling, JK, Pieter, HA, JM Van Gelder, and Jun, Ma (2005) Testing for nonlinearity streamflow processes at different timescales. *Journal of Hydrology* 322(1): 247-268.
- Wilcox, BP Seyfried, MS and Matison, TH (1991) Searching for chaotic dynamics in snowmelt runoff. *Water Resour. Res.* 27 (6): 1005-1010.
- Granger, CWJ and Andersen, AP (1978) An introduction to bilinear time series models, Vandenhoeck and Ruprecht: Gottingen, 94p.
- Grassberger, P and Procaccia, I (1983) Measuring the strangeness of strange attractors. *Phys. D* 9: 189-208.
- Hinich, MJ (1982) Testing for gaussianity and linearity of a stationary time series. *J. Time ser. Anal.* 3 (3): 169-176.
- Jayawardena, AW and Lai, F (1994) Analysis and prediction of chaos in rainfall and stream flow time series. *J. Hydrol.* 153: 23-52.
- Kim, HS, Kang, DS and Kim, JH (2003) The BDS statistic and residual test. *Stochast. Environ. Res. Risk Assess.* 17: 104-115.
- Kwiatkowski, D, Phillips, PCB, Schmidt, P and Shin, Y (1992) Testing the null of stationarity against the alternative of a unit root: How sure are we the economic time series have a unit root? *J. Economics* 54: 159-178.
- McLeod, AI and Li, WK (1983) Diagnostic checking ARMA time series models using residual autocorrelations. *J. Time Series Anal.* 4: 269-273.
- Nelson, DB (1991) Conditional heteroskedasticity in asset returns: A new approach. *Econometrica*, 59: 347-370.
- Patterson, DM and Ashley, RA (2000) A nonlinear time series workshop: A toolkit for detecting and identifying nonlinear serial dependence. Kluwer Academic, Boston.
- Porporato, A and Ridolfi, L (1997) Nonlinear analysis of river flow time sequences. *Water Resour. Res.* 33 (6): 1353-1367.
- Priestley, MB (1988) Non-linear and non-stationary time series analysis, Academic Press: London, 227p.
- Rao, AR and Yu, GH (1990) Gaussianity and linearity tests of hydrologic time series. *Stochast. Hydraul.* 4: 121-134.