

بررسی غیرخطی بودن فرآیند جریان رودخانه با استفاده از آزمون BDS

(مطالعه موردی: رودخانه شهرچای ارومیه)

کیوان خلیلی^{1*}، احمد فاخری فرد²، یعقوب دین پژوه³ و محمدعلی قربانی³

تاریخ دریافت: 88/4/14 تاریخ پذیرش: 88/12/21

1- دانشجوی دوره دکترا، مهندسی منابع آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

2 و 3- استاد و دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

*مسئول مکاتبه: E-mail: khalili2006@gmail.com

چکیده

فرآیند جریان رودخانه یکی از سیستم‌هایی است که در مقیاس زمانی و مکانی مکانیسم غیر خطی در آن می‌تواند حاکم باشد. در بسیاری از مدل‌های برازشی بر روی سری‌های جریان رودخانه از مدل‌های خطی 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 رودخانه شهرچای ارومیه با استفاده از آزمون غیرخطی BDS در چهار مقیاس زمانی سالانه، ماهانه، ده روزه و روزانه مورد بررسی قرار گرفته است. ابتدا ایستایی سری‌ها با استفاده از آزمون‌های ADF و KPSS بررسی گردید و سپس آزمون BDS بر روی سری‌های باقیمانده جریان صورت گرفت. طبق نتایج حاصله سری‌های سالانه جریان خطی و سری‌های ماهانه غیرخطی بوده ولی سری‌های ده روزه و روزانه از شدت غیرخطی بیشتری برخوردارند. بطوری که هرچه مقیاس زمانی کوچکتر می‌شود، شدت غیرخطی بودن افزایش می‌یابد. استاندارد کردن داده‌ها نیز نشان می‌دهد که تغییرات فصلی واریانس ممکن است نمایانگر خاصیت غیرخطی در سری‌ها باشد. هم‌چنین برای بررسی غیرخطی بودن سری‌های ماهانه که ماهیت غیرخطی خفیفی داشتند آزمون BDS کارآیی لازم را نداشت و بایستی مطالعات بیشتری در این زمینه صورت گیرد. نتایج این مطالعه نشان داد که برای مدل‌سازی سری‌های زمانی ماهانه، ده روزه و روزانه به دلیل ماهیت غیرخطی جریان رودخانه بایستی از مدل‌های غیرخطی استفاده کرد. در حالی که سری سالانه جریان ماهیت خطی داشته و می‌توان با استفاده از مدل‌های خطی سری زمانی به نتایج معقولی دست یافت.

واژه‌های کلیدی: آزمون ADF، آزمون BDS، آزمون KPSS، ایستایی، جریان رودخانه، غیرخطی، مدل‌های سری زمانی.

Nonlinearity Testing of Stream Flow Processes by BDS Test (Case study: Shaharchi River in Urmia)

K Khalili^{1*}, A Fakheri Fard², Y Dinpajoo³ and MA Ghorbani³

Received: 05 July 2009 Accepted: 13 March 2010

¹ PhD Student, Water Resources Engin., Faculty of Agric., Univ. of Tabriz, Iran.

^{2,3} Assoc. and Assist. Prof., Dept. of Water Engin., Faculty of Agric., Univ. of Tabriz, Iran.

*Corresponding author: E-mail: khalili2006@gmail.com

Abstract

Streamflow processes are commonly accepted as a nonlinear over space and times. In many researches linear time series models have been used for streamflow processes with assumption of linearity. It is better to test nonlinearity of these series before modeling. However, it is not clear what kind of nonlinearity is acting underlying the streamflow processes and how strong the nonlinearity is for the streamflow processes at different time scales. Streamflow data of Shaharchai River in Urmia on four timescales (i.e. yearly, monthly, 10-days and daily) were investigated with BDS test in order to study the character and type of nonlinearity that are present in streamflow dynamics. First stationarity was tested with ADF and KPSS tests then after pre-whitening series with AR models, BDS test was applied to the residuals. All daily and 10 days and monthly streamflow series appeared to be nonlinear but yearly series were linear. It is found that as the timescale increases from a day to a year, the nonlinearity weakens and there are stronger and more complicated nonlinear mechanisms acting at small timescales than at large ones. Standardization with seasonal variance indicated nonlinearity in series. BDS test is not enough powerful for detecting weak nonlinearity like monthly series in the current study and need further investigations. Thus nonlinear time series modeling should be used for daily, 10 days and monthly series. Linear time series models may be applied for yearly series as utilized in this study.

Keywords: ADF unit root test, BDS test, KPSS test, Nonlinearity, Stationarity, Streamflow, Time series

خاصی از این سیستمها ممکن است به فرآیند خطی نزدیکتر باشند. به هر حال ماهیت غیرخطی بودن آنها کاملاً آشکار نیست (تسونیس 2001). در میان سیستمهای طبیعی، فرآیند جریان رودخانه یکی از سیستمهایی است که در آن در مقیاس زمانی و مکانی

مقدمه

در بسیاری از مسائل علمی تشخیص خطی یا غیرخطی بودن فرآیند موردنظر جهت مدل‌سازی اهمیت فراوانی دارد. واضح است که بسیاری از سیستمهای طبیعی نسبت به زمان غیرخطی بوده اگرچه جنبه‌های

که دبی‌های روزانه ماهیت غیرخطی بیشتری نسبت به دبی‌های ماهانه نشان دادند. با وجود پیشرفت‌هایی که در مورد مشخصات فرآیند غیرخطی بودن جریان رودخانه شده ولی هنوز تحقیقات بیشتری مورد نیاز است زیرا از یک طرف دانش مشخصی راجع به اینکه چه نوع روند غیرخطی در فرآیند جریان رودخانه حاکم است، وجود نداشته و از طرف دیگر هنوز نحوه تغییر شدت و مولفه‌های غیرخطی فرآیند جریان رودخانه با تغییرات زمان مشخص نیست. داشتن دانش دقیق‌تر به ماهیت غیرخطی جریان رودخانه در مدل‌سازی و تشخیص اینکه آیا فرآیند موردنظر به صورت خطی یا غیرخطی مدل‌سازی شود، کمک شایانی می‌کند. داشتن آگاهی و بینش کامل به انواع روندهای غیرخطی در فرآیند جریان رودخانه امکان‌پذیر نیست. بررسی وجود روند غیرخطی عمومی در فرآیند جریان رودخانه با استفاده از داده‌های سری زمانی یک متغیره از نظر کمی ضروری می‌باشد. اگرچه ابزار اندازه‌گیری مستقیمی برای غیرخطی بودن وجود ندارد اما آزمون غیرخطی بودن بر اساس سنجش خطی بودن یک فرآیند، به عنوان یک گزینه مناسب انجام می‌گیرد. روش‌های زیادی برای آزمون خطی یا غیرخطی بودن ارائه گردیده که به دو گروه تقسیم می‌شوند. آزمون‌های پورت مانتئو که در ابتدا از مدل‌های خطی و بدون تعیین شق مشخص نشات گرفته و دوم آزمون‌هایی که برای شق‌های خاصی طراحی شده‌اند. پاترسون و اشلی (2000) شش روش مختلف آزمون پورت مانتئو را برای هشت سری غیرخطی که به طور مصنوعی تولید شده بودند به کار بردند و به این نتیجه رسیدند که آزمون BDS بهترین روش است. کیم و همکاران (2003) توان آزمون BDS و برخی آزمون‌های غیرپارامتری دیگر را مقایسه کرده و برای آنالیز باقیمانده‌های مدل‌های برازشی بارش ماهانه به کاربرند و نتایج تحلیل آنها نیز نشان داد که آزمون BDS نسبت به دیگر آزمون‌ها کارآتر بود. هدف از این تحقیق، بررسی وجود و شدت غیرخطی رایج در سری‌های زمانی جریان رودخانه در چهار مقیاس زمانی سالانه، ماهانه، ده روزه و روزانه با استفاده از آزمون BDS می‌باشد. اغلب مطالعات صورت گرفته در داخل و

مکانیسم غیر خطی می‌تواند حاکم باشد. در طی نیم قرن گذشته مطالعات و تحقیقاتی در زمینه غیرخطی بودن و کاربرد مدل‌های غیرخطی جریان‌های رودخانه آغاز شده است. روگرس و زیا (1982) یک روش ابتکاری جهت تعیین درجه غیرخطی بودن حوضه‌های زهکشی با استفاده از ارقام بارش - رواناب ارائه نمودند. راثو و یو (1990) با استفاده از آزمون چندطیفی¹ هینیچ (1982) خطی بودن مشخصات سری‌های سالانه جریان رودخانه، بارش روزانه و درجه حرارت را مورد بررسی قرار دادند. بر اساس نتایج حاصله از تحقیق آنها داده‌های روزانه هواشناسی غیرخطی بوده ولی سری‌های سالانه جریان رودخانه ماهیت خطی داشتند. چن و راثو (2003) نیز با استفاده از آزمون هینیچ (1982) غیرخطی بودن سری زمانی هیدرولوژیکی را 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. موضوع آشفتگی² به عنوان یکی از جنبه‌های خاص در مساله غیرخطی بودن نیز در نیم قرن اخیر مورد توجه قرار گرفته و مکانیسم آشفتگی در جریان‌های رودخانه بیشتر مورد توجه محققین هیدرولوژی قرار گرفته است. به عنوان نمونه ویلکوکس و همکاران (1991)، جایاواردنا و لای (1994)، پورپوراتو و ریدولفی (1997)، سیواکومار و همکاران (1999) و النشورباگی و همکاران (2002) مطالعاتی در این زمینه انجام داده‌اند. در اکثر این مطالعات وجود آشفتگی در سری‌های زمانی هیدرولوژیکی مورد تایید قرار گرفته است. وانگ و همکاران (2005) با استفاده از آزمون BDS³ و روش همبستگی نمایی غیرخطی بودن فرآیند جریان رودخانه را در مقیاس‌های زمانی مختلف بررسی کرده و به این نتیجه رسیدند که هر چه مقیاس زمانی کوچکتر می‌شود غیر خطی بودن افزایش می‌یابد بطوری

¹ Multispectrum

² Chaos

³ Brock Dechert Scheinkman test

استان آذربایجان غربی و در غرب دریاچه ارومیه قرار دارد. رودخانه شهرچای یکی از رودخانه‌های 13 گانه‌ای است که به دریاچه ارومیه تخلیه می‌گردد. در این تحقیق از داده‌های روزانه 31 ساله ایستگاه هیدرومتری میرآباد از سال آبی 1352 الی 1382 واقع در بالادست حوضه استفاده گردیده است. مقدار میانگین ده روزه، ماهانه و سالانه از آمار روزانه بدست آمده است. با توجه به اینکه شش ماه از سال 31 روز بوده و اسفند ماه نیز 29 یا 30 روز است، داده‌های میانگین ده روزه دهه‌های اول و دوم هر ماه ده روزه، ولی داده‌های دهه سوم هر ماه بین 9 الی 11 روز در نظر گرفته شده است. در داده‌ها هیچ خلأ آماری وجود ندارد. مشخصات آماری سری‌های جریان رودخانه در جدول 1 به طور خلاصه ارائه گردیده است. هم چنین میانگین دبی روزانه و انحراف معیار سری‌ها در شکل 1 نمایش داده شده است.

خارج کشور جهت مدلسازی سری‌های زمانی هیدرولوژیکی بدون در نظر گرفتن ماهیت سری مورد نظر و با استفاده از مدل‌های عمومی سری زمانی خطی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. با توجه به این موضوع که در این مطالعات در نظر گرفتن فرض خطی بودن سری تا چه اندازه درست بوده نتایج این تحقیق می‌تواند به این سوال که آیا سری زمانی مورد نظر ماهیت خطی داشته و یا غیرخطی و اینکه چه مدلی می‌تواند جهت برازش با سری زمانی مورد نظر تطابق بیشتری داشته باشد، پاسخ دقیق‌تری داده و راهکارهای مناسبی ارائه دهد.

مواد و روش‌ها

داده‌های مورد استفاده

در این تحقیق از داده‌های جریان رودخانه شهرچای ارومیه استفاده شده است. حوضه شهرچای ارومیه در

جدول 1- مشخصات آماری سری‌های جریان رودخانه شهرچای ارومیه

ایستگاه	دوره زمانی	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	مساحت بالادست (km ²)	مقیاس زمانی	دبی (m ³ /s)	انحراف معیار (m ³ /s)	ضریب چولگی	ACF (I)
					روزانه	5/15	7/54	2/45	0/971
					ده روزه	5/09	7/23	2/31	0/916
میرآباد	1352-82	44-53	37-26	190	ماهانه	5/09	6/89	2/18	0/671
					سالانه	5/09	1/89	0/524	0/219

یافته بر روی تئوری آشفتگی و دینامیک غیرخطی نشات گرفته و فقط برای تشخیص آشفتگی معین مناسب نبوده بلکه می‌تواند به عنوان ابزار تشخیص مناسبی در آزمون نکویی برازش مدل تخمینی نیز بکار رود. به دلیل اینکه در آزمون خطی یا غیرخطی بودن، BDS سری‌ها ایستا فرض می‌شوند و قبل از انجام آزمون بایستی ایستایی سری‌ها بررسی گردد.

آزمون BDS

آزمون BDS توسط براک و همکاران (1991) توسعه یافته و توسط براک و همکاران (1996) به چاپ رسید. این آزمون یک روش غیرپارامتری است که برای آزمون همبستگی متوالی و ساختار غیرخطی موجود در یک سری زمانی بر مبنای مجموع همبستگی مورد استفاده قرار می‌گیرد. آماره BDS از مطالعات انجام

(1984) تصحیح گردید. آزمون ریشه واحد دیکی - فولر از طریق تخمین OLS⁷ یا مدل‌های رگرسیونی با وجود یک روند خطی بوجود آمده است. مدل AR(1) که یک مدل خودهمبسته⁸ با تأخیر یک می‌باشد عبارت است از:

$$x_t = r \cdot x_{t-1} + e_t \quad t=1,2,\dots,N \quad [1]$$

که در آن e_t سری تصادفی نرمال و استاندارد و مستقل با میانگین صفر و واریانس σ^2 می‌باشد. در صورتیکه $|r| < 1$ باشد سری $\{x_t\}$ ایستا بوده و اگر $r=1$ باشد، سری نایستاست. با استفاده از روش حداکثر درست نمایی مقدار \hat{r} به صورت زیر محاسبه می‌گردد.

$$\hat{r} = \left(\sum_{t=2}^N X_{t-1}^2 \right)^{-1} \cdot \sum_{t=2}^N X_{t-1} \cdot X_t \quad [2]$$

$$\hat{t} = \frac{\hat{r} - 1}{\hat{S}_p} \quad [3]$$

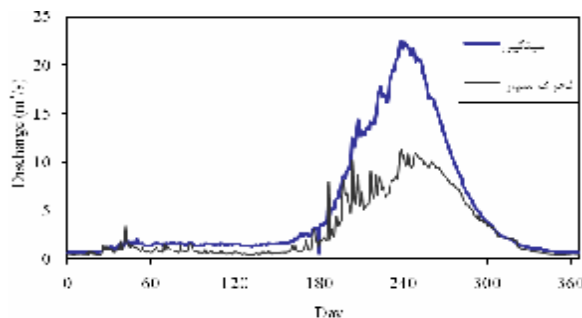
که در آن \hat{S}_p خطای استاندارد OLS برای ضریب \hat{r} می‌باشد. دیکی و فولر (1979) حد توزیع آزمون t را در شرایط فرض H_0 و H_1 مورد بررسی قرار دادند که عبارتند از:

$$\begin{cases} H_0 : r = 1 \\ H_1 : |r| < 1 \end{cases} \quad [4]$$

در صورت احراز شرایط فرض H_0 سری نایستا بوده و در شرایط فرض H_1 سری ایستا خواهد بود. برای آزمون ریشه واحد می‌توان مرتبه خودهمبستگی را افزایش داد تا با مدل‌های عمومی $ARMA(p,q)$ با مرتبه‌های نامعین تطبیق داده شود (سید و دیکی 1984) و (همیلتن 1994).

آزمون KPSS

این آزمون توسط کوویاتکوفسکی و همکاران (1992) ارائه گردید که ایستایی حول یک روند معین و ایستایی حول یک سطح ثابت را آزمون می‌کند. این آزمون



شکل 1- میانگین و انحراف معیار دبی روزانه

آزمون ایستایی¹

هدف از آزمون ایستایی مشخص کردن این موضوع است که آیا مقادیر میانگین و واریانس نسبت به زمان تغییر می‌کنند یا خیر. تقریباً در همه روش‌های آنالیز سری‌های زمانی² خطی یا غیرخطی، سری زمانی ایستا فرض می‌شود. در حالی که اغلب سری‌های زمانی بنا به دلایل مختلف نظیر روند، تناوب³ و یا پرش⁴ نایستا هستند که قبل از مدل‌سازی بایستی سری داده‌ها به حالت ایستا تبدیل شده و سپس مدل‌سازی صورت گیرد (سالاس و همکاران 1980). روش‌های زیادی جهت آزمون ایستایی ارائه گردیده‌اند ولی دو روش⁵ ADF و⁶ KPSS که نسبت به سایر روش‌ها کاربرد بیشتری دارند، مورد استفاده قرار گرفته است (وانگ و همکاران 2005). برای تبدیل یک سری نایستا به ایستا، اگر با استفاده از آزمون ریشه واحد سری نایستا باشد بهترین روش استفاده از عمل تفاضل برای حذف نایستایی است ولی اگر نایستایی حاصل از روند باشد، بایستی مولفه روند از سری حذف گردد.

آزمون ADF

آزمون ریشه واحد ADF در ابتدا توسط دیکی و فولر (1979) ارائه گردید سپس توسط سید و دیکی

⁷ Ordinary least square

⁸ Autoregression

¹ Stationary test

² Time series analysis

³ Periodicity

⁴ Shift

⁵ Augmented Dickey Fuller test

⁶ Kwiatkowski Phillips Schmidt Shin test

را می‌توان به صورت یک آزمون ریشه واحد نیز تصحیح کرد که شین و اسمیت (1992) نشان دادند که KPSS جهت آزمون ایستایی طراحی شده و برای آزمون‌های استاندارد دیگر به خوبی آزمون‌های ریشه واحد نمی‌باشد. سری $\{X_t\}$ را که در آن $t=1,2,\dots,N$ در نظر بگیرید. سری موردنظر را به مجموع یک روند معین¹، رندم واک² و یک خطای ایستایی با در نظر گرفتن مدل رگرسیونی خطی زیر تجزیه نمایید.

$$X_t = r_t + b_t + e_t \quad [5]$$

در آزمون KPSS برخلاف دیگر آزمون‌ها فرض صفر به صورت $H_0: r = 1$ می‌باشد که در این شرایط سری ایستاست. مقدار حدی و محاسبات آماری KPSS توسط کوویاتکوفسکی و همکاران (1992) ارائه گردیده است. با توجه به اینکه هر دو روش آزمون ایستایی بر مبنای رگرسیون خطی و توزیع نرمال می‌باشند، بایستی از سری داده‌های واقعی لگاریتم گرفت تا روند نمایی به خطی تبدیل شود (همیلتن 1994 و گیمنو و همکاران 1999). هم چنین به دلیل وجود خاصیت تناوب یا دوره‌ای در سری‌های زمانی بایستی تناوب از داده‌ها حذف شود که این امر با استاندارد کردن داده‌ها یعنی کسر میانگین داده‌ها (روزانه، یک سوم ماه، ماهانه و سالانه) و تقسیم بر انحراف معیار آنها بدست آمده است. یکی از مسائل مهم در آزمون‌های ایستایی تعیین مقدار تأخیر P می‌باشد 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 و اگر P خیلی کوچک باشد، خطای باقیمانده همبستگی باعث خطای آزمون می‌گردد (کوویاتکوفسکی و همکاران 1992). مقدار P بر مبنای برآزش مدل AR و بر اساس معیار آکایک³ (AIC) ، هم چنین رابطه شوارت (1989) و کوویاتکوفسکی و همکاران (1992) به صورت $p = \text{int} \left[X \left(\frac{N}{100} \right)^{\frac{1}{4}} \right]$ که در آن $X=4,12$ بوده، قابل محاسبه می‌باشد که در این تحقیق از این روش استفاده شده است.

تئوری آزمون BDS

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 $X_t = (x_t, x_{t-1}, \dots, x_{t-(m-1)t})$ ، $X_t \in R^m$ می‌توان

که در آن $r_t = r_{t-1} + U_t$ به صورت رندم واک، b_t روند معین و e_t خطای ایستایی باشد. در این آزمون اگر سری X_t دارای یک روند معین باشد، سری‌ها حول یک روند معین ایستا بوده و فرض صفر به صورت $S_{tt}^2 = 0$ خواهد بود. در حالت دیگر، ایستایی حول یک سطح ثابت بوده که در این شرایط فرض صفر به صورت $b = 0$ خواهد بود. بنابراین در حالت ایستایی حول یک روند معین، باقیمانده‌های e_t که در آن $t = 1, 2, \dots, N$ می‌باشد، از رگرسیون X و زمان بوده و $e_t = e_t$ خواهد بود. در حالی که در ایستایی حول یک سطح ثابت، باقیمانده‌های e_t به صورت $e_t = X_t - \bar{X}$ بدست می‌آید. اگر مجموع e_t را به صورت زیر با S نمایش دهیم:

$$S = \sum_{j=1}^t e_j \quad [6]$$

اگر S^2 واریانس e_t باشد، خواهیم داشت:

$$S^2 = \lim N^{-1} E[S_N^2] \quad [7]$$

حال می‌توان S^2 تخمینی را با استفاده از باقیمانده‌ها به صورت زیر محاسبه نمود:

$$\hat{S}^2(P) = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N e_t^2 + \frac{2}{N} \sum_{j=1}^P w_j(P) \cdot \sum_{t=j+1}^N e_t \cdot e_{t-1} \quad [8]$$

که در آن P مقدار تأخیر و $w_j(P)$ تابع وزنی مؤلفه‌ای بوده که بارتلت (1950) به صورت

¹Deterministic trend

²Random walk

³Akaike information criterion

مقادیر ثابت C و K در رابطه [12] را می‌توان به صورت زیر برآورد نمود:

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

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

در شرایط فرض صفر برای سری $\{x_t\}$ آماره BDS برای $m > 1$ به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$BDS_{m,M}(r) = \sqrt{M} \frac{C_m(r) - C_1^m(r)}{S_{m,M}(r)} \quad [13]$$

زمانی که $M \rightarrow \infty$ آماره BDS به توزیع نرمال واحد متمایل می‌گردد مشروط بر اینکه نمونه‌های بزرگ‌تری با ابعاد m بزرگ‌تر از 2 و کوچک‌تر از 5 داشته باشیم (براک و همکاران 1991). برای مقدار τ پیشنهاد شده بین یک دوم تا دو سوم انحراف معیار S داده‌ها در نظر گرفته شود. وانگ و همکاران (2005) به این نتیجه رسیدند که اگر τ یک دوم انحراف معیار در نظر گرفته شود، در این صورت تعداد نقاط موجود در فضای m بعدی زمانی که m بزرگ باشد (مثلا $m=5$) بسیار کم خواهد بود به ویژه برای سری‌هایی که داده‌های کمتری دارند (به عنوان مثال کمتر از 100 داده). از طرف دیگر در حالتی که τ برابر سه دوم انحراف معیار در نظر گرفته شود، تعداد نقاط موجود در فضای m زمانی که m کوچک باشد (مانند $m=2$) بسیار زیاد و به هم نزدیک می‌باشد که محاسبه $C_{m,M}(r)$ را تحت تاثیر قرار خواهد داد، بنابراین مقدار τ برابر با انحراف معیار پیشنهاد شده است.

نتایج

نتایج آزمون ایستایی

قبل از انجام آزمون ایستایی، لازم است روند از داده‌ها حذف گردد که با استاندارد کردن داده‌ها و با توجه به روشی که در بخش روش تحقیق ذکر گردید روند میانگین و انحراف معیار از داده‌ها حذف شد. نتایج آزمون ایستایی با استفاده از روش ADF و KPSS در جدول 2 ارائه شده است.

ایجاد نمود. که در آن t تعداد نقاط محاط در فضای m بعدی است. سپس مجموع همبستگی $C_{m,M}(r)$ که توسط گراسبرگر و پروساشیا (1983) ارائه شده محاسبه می‌شود.

$$C_{m,M}(r) = \left(\frac{M}{2}\right)^{-1} \sum_{1 \leq i < j \leq M} H(r - \|X_i - X_j\|) \quad [10]$$

که در آن $M=N-(m-1)$ بوده و r عبارتست از شعاع یک کره به مرکز X_i و $H(u)$ تابع هویساید¹ بوده که در آن برای $u > 0$ مقدار $H(u) = 1$ و برای $u \leq 0$ مقدار $H(u) = 0$ می‌باشد. $C_{m,M}(r)$ تعداد نقاط را در فضای m بعدی که در کره به شعاع r قرار می‌گیرد، محاسبه می‌نماید. در این آزمون فرض صفر براک و همکاران (1996) برای دستیابی به H_0 این است که سری زمانی نمونه از یک فرآیند مشخص مستقل تبعیت نماید. براک و همکاران (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 واحد متمایل می‌گردد. اگر سری‌های تولید شده فرآیندهای ایستایی داشته باشند، در این صورت حد $C_{m,M}(r)$ به صورت $C_m(r) = \lim_{M \rightarrow \infty} C_{m,M}(r)$ وجود خواهد داشت. در این حالت حد عبارت فوق به صورت زیر می‌باشد:

$$C_{m,M}(r) = \iint H(r - \|X - Y\|) dF_m(X) dF_m(Y) \quad [11]$$

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 [11] به معنای $C_m(r) = C_1^m(r)$ خواهد بود. هم چنین عبارت $C_m(r) - C_1^m(r)$ دارای توزیع نرمال با میانگین صفر و واریانس به صورت زیر خواهد بود:

$$\frac{1}{4} S_{m,M}^2(r) = m(m-2)C^{2m-2}(K - C^2) + K^m - C^{2m} + 2 \sum_{j=1}^{m-1} [C^{2j}(K^{m-j} - C^{2m-2j}) - mC^{2m-2}(K - C^2)] \quad [12]$$

¹ Heaviside function

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 تاثیر همبستگی متوالی در سری‌های زمانی کوتاه‌مدت و یا اثر مقادیر پرت در روند داده‌ها به ویژه در آزمون ایستایی روند باشد. نتایج نشان داد که آزمون KPSS به روش آزمون حول محور ثابت در سطح 2/5 درصد معنی‌دار بوده و به روش آزمون روند در سطح بیش از 5 درصد سری‌های روزانه ایستا بودند. بنابراین سری‌های سالانه، ماهانه و ده روزه استاندارد و سری‌های روزانه لگاریتمی ایستا فرض می‌شوند.

با توجه به نتایج بدست آمده از جدول 2، مشاهده می‌گردد که همه سری‌های سالانه، ماهانه و ده روزه ایستا بوده با وجود اینکه برای سری‌های ده روزه و به روش ADF فرض آزمون ریشه واحد را در سطح معنی‌داری 1 درصد نمی‌توان پذیرفت. معنی‌دار بودن آزمون ایستایی روند در سری‌های سالانه، ماهانه و ده روزه بدین مفهوم است که با حذف روند از داده‌ها به روش استاندارد کردن ایستایی حاصل شده و روندی در داده‌ها وجود ندارد. و معنی‌دار بودن آزمون ایستایی حول محور ثابت در سری‌های سالانه و ماهانه بدین معنی است که سری‌ها حول یک سطح ثابتی ایستا بوده و به عبارت دیگر در میانگین داده‌ها تغییرات معنی‌داری وجود ندارد. اما برای سری‌های روزانه قبل از انجام

جدول 2- نتایج آزمون ایستایی برای سری‌های استاندارد شده جریان رودخانه

روش آزمون ایستایی			پارامترهای آزمون	سری
KPSS trend stationary test	KPSS level stationary test	ADF test		
8	8	8	log	
>0/1	>0/1	0/882	p-values	سالانه
0/116	0/241	-0/451	statistic	
16	16	16	log	
>0/08	>0/025	0/0722	p-values	ماهانه
0/124	0/512	-2/716	statistic	
21	21	21	log	
>0/01	<0/01	0/0097	p-values	ده روزه
0/215	0/940	-3/446	statistic	
39	39	39	log	
<0/01	<0/01	0/0000	p-values	روزانه
0/582	2/133	-8/377	statistic	

مقادیر بحرانی توزیع KPSS برای آزمون level stationarity 1% ~0.739; 5% ~0.463; 10% ~0.347 بوده و برای trend stationarity مقادیر بحرانی برای 1% ~0.216; 5% ~0.146; 10% می‌باشد.

و سپس با استاندارد کردن، خاصیت دوره‌ای بودن از داده‌ها حذف گردید. سری‌های تغییر یافته لگاریتمی و استاندارد را به ترتیب سری‌های Log و Log-DS می‌نامیم. سری‌های Log-DS از تفاضل میانگین لگاریتمی فصل یا دوره (مانند روزانه یا ماهانه) از داده لگاریتمی

نتایج آزمون BDS

به دلیل وجود خاصیت تناوبی یا فصلی در فرآیندهای جریان رودخانه، جهت آنالیز نقش فصلی یا دوره‌ای بودن در آزمون غیرخطی در سری‌های جریان رودخانه در دو مرحله ابتدا از داده‌ها لگاریتم گرفته شد

سری ماهانه ماهیت غیرخطی شدیدی نداشته و سری سالانه جریان خطی می‌باشد. به عبارت دیگر هرچه مقیاس زمانی کوچکتر می‌شود، شدت غیرخطی بودن افزایش می‌یابد.

بحث

فرآیندهای جریان رودخانه اساساً تحت تاثیر عوامل اقلیمی بوده و به دلیل اینکه معمولاً سری‌های کوتاه مدت اقلیمی مانند سری‌های روزانه منشأ غیرخطی دارند، انتظار می‌رود که فرآیند جریان‌های کوتاه مدت رودخانه نیز غیرخطی باشند (رائو و یو 1990). بنابراین احتمالاً منبع اصلی غیرخطی بودن فرآیند جریان‌های کوتاه مدت نظیر روزانه از غیرخطی بودن فرآیندهای کوتاه مدت اقلیمی نظیر بارش و درجه حرارت منشعب شده و غیرخطی بودن واکنش بارش رواناب نیز باعث پیچیده‌تر شدن فرآیند غیرخطی رودخانه می‌گردد. در تحقیقات محققانی نظیر مینشال و همکاران (1960) و وانگ و همکاران (1981) وجود وابستگی غیرخطی بین فرآیند روزانه جریان رودخانه و مجموع بارش روزانه مورد تاکید قرار گرفته است. مطلب دیگری که در مطالعات مرتبط با فرآیندهای غیرخطی ارائه گردیده رابطه بین مقیاس زمانی و شدت غیرخطی بودن فرآیند است. به طوری که هر چه مقیاس زمانی کوچکتر می‌شود، شدت غیرخطی بودن فرآیندهای اقلیمی افزایش پیدا می‌کند. این مطلب به عنوان نمونه در مطالعه چن و رائو (2003) و بر روی سری‌های ماهانه بارش و درجه حرارت مشاهده می‌گردد. اگرچه به دلیل تفاوت‌های اقلیمی، جغرافیایی و محیطی شاخص و شدت غیرخطی بودن در سیستم‌های مختلف رودخانه متفاوت است ولی می‌توان این موضوع را برای همه سیستم‌های رودخانه عمومیت داد. به عنوان مثال وانگ و همکاران (2005) نشان دادند که درجه حرارت به عنوان یک عامل وابسته به کل دینامیک فرآیند جریان رودخانه زرد واقع در چین تاثیر زیادی در بارندگی و پوشش برف داشته و سبب شده که این رودخانه نسبت به دیگر رودخانه‌های مورد مطالعه واکنش کمتری نشان داده و با افزایش مقیاس زمانی واکنش کندتری داشته باشد.

مورد نظر تقسیم بر انحراف معیار سری لگاریتمی بدست می‌آید. همبستگی متوالی خطی از همه سری‌های ماهانه، ده روزه 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 (براک و همکاران 1996). رسته یا مرتبه مدل‌های AR که با استفاده از روش آکایک اصلاح شده (AICC) در جدول 3 ارائه گردیده است.

با استفاده از این مدل‌ها سری باقیمانده‌ها بدست آمده، سپس آزمون BDS بر روی آنها اعمال می‌گردد. نتایج آزمون BDS در جدول 4 ارائه گردیده است. نتایج حاصل نشان می‌دهد که سری سالانه جریان، خطی بوده و با توجه به اینکه خاصیت فصلی یا تناوب در سری‌های سالانه وجود ندارد در این سری نیازی

جدول 3- مدل‌های AR برازشی بر روی سری‌های جریان

سری	پارامترهای مدل	سری Log	سری Log-DS
سالانه	AICC	44/85	86/79
	رسته مدل	2	1
ماهانه	AICC	388/15	779/99
	رسته مدل	26	4
ده روزه	AICC	842/71	1994/18
	رسته مدل	26	11
روزانه	AICC	-4362/17	18681/75
	رسته مدل	25	26

به عمل استاندارد کردن نمی‌باشد (وانگ و همکاران 2005). برای سری ماهانه جریان و برای سری لگاریتمی، آزمون BDS به سختی در سطح معنی‌داری 5 درصد مورد قبول قرار گرفت در حالی که برای سری لگاریتمی و استاندارد ماهانه حتی در سطح 1 درصد هم آزمون قبول نشد. برای سایر سری‌های ده روزه و روزانه نیز آزمون مورد قبول واقع نشد. می‌توان نتیجه گرفت که نتایج آزمون BDS نشان دهنده وجود ماهیت غیرخطی شدید برای سری‌های روزانه و ده روزه حتی پس از حذف اثر تناوب یا فصلی از سری‌ها بوده و

آنها نداشته به عبارت دیگر رابطه آشکاری بین مساحت حوضه و شدت غیرخطی بودنشان مشاهده نگردید. بنابراین بررسی رابطه بین خصوصیات حوضه با شدت غیرخطی بودن سیستم جریان رودخانه موضوعی است که می‌تواند مدنظر تحقیقات آتی قرار گیرد. برای رودخانه شهرچای ارومیه در محل ایستگاه میرآباد که مساحت کوچکی دارد، شدت غیرخطی بودن بالا بوده به طوری که حتی سری‌های ماهانه را نیز می‌توان غیرخطی در نظر گرفت و سری‌های ده روزه و روزانه به شدت خاصیت غیرخطی از خود نشان دادند. البته وانگ و همکاران (2005) در تحقیق خود نشان دادند که آزمون BDS برای غیرخطی‌های خفیف از توانایی و کارایی کافی برخوردار نیست.

جنبه دیگری که بایستی مدنظر قرار گیرد، واکنش غیرخطی رودخانه با توجه به خصوصیات حوضه نظیر مساحت، توپوگرافی و سیستم جریان آب زیرزمینی است. تعداد زیادی از مطالعات نظیر مینشال (1960)، وانگ و همکاران (1981) و رایبسون و همکاران (1995) نشان داده که غیرخطی بودن با افزایش مساحت حوضه کاهش می‌یابد گرچه غیرخطی بودن به دلیل هیدرودینامیک شبکه آبراهه حوضه که منبع مهمی در غیرخطی بودن مساحت‌های بزرگ است، با افزایش مساحت ناپدید نمی‌گردد. در تحقیق دیگری که توسط وانگ و همکاران (2005) انجام شده مشاهده گردید که بزرگ بودن مساحت حوضه رودخانه‌های راین در اروپا و زرد در چین تاثیر زیادی در غیرخطی بودن

جدول 4- نتایج آزمون BDS برای سری جریان رودخانه در مقیاس‌های زمانی مختلف

مقیاس زمانی	سری تغییر یافته	ابعاد	2	3	5	4	6
سالانه	لگاریتمی (log)	BDS Statistic	0/0169	-0/0333	-0/0002	0/0015	-0/0591
		p-value	0/2303	0/1454	0/9936	0/9853	0/0459
ماهانه	لگاریتمی و استاندارد (log-DS)	BDS Statistic	0/0439	0/0632	0/0417	0/0539	0/0061
		p-value	0/0019	0/0061	0/1663	0/0553	0/8367
ده روزه	لگاریتمی (log)	BDS Statistic	0/0125	0/0169	0/0140	0/0153	0/0125
		p-value	0/0015	0/0069	0/0701	0/0400	0/0933
روزانه	لگاریتمی و استاندارد (log-DS)	BDS Statistic	0/0348	0/0501	0/0536	0/0526	0/0496
		p-value	0/0000	0/0000	0/0000	0/0000	0/0000
روزانه	لگاریتمی (log)	BDS Statistic	0/0228	0/0399	0/0568	0/0527	0/0542
		p-value	0/0000	0/0000	0/0000	0/0000	0/0000
روزانه	لگاریتمی و استاندارد (log-DS)	BDS Statistic	0/0413	0/0754	0/1091	0/0970	0/1135
		p-value	0/0000	0/0000	0/0000	0/0000	0/0000
روزانه	لگاریتمی و استاندارد (log-DS)	BDS Statistic	0/0561	0/1034	0/1558	0/1360	0/1658
		p-value	0/0000	0/0000	0/0000	0/0000	0/0000

شدند. با استفاده از مدل‌های AR برازشی بر روی سری‌ها و حذف همبستگی متوالی خطی، سری‌های باقیمانده بدست آمدند. آزمون BDS بر روی سری‌های باقیمانده صورت گرفت. طبق نتایج حاصله سری‌های سالانه جریان خطی و سری‌های ماهانه غیرخطی بوده ولی سری‌های ده روزه و روزانه از شدت غیرخطی بیشتری برخوردارند. استاندارد کردن داده‌ها نیز سبب می‌شود که ماهیت غیرخطی سری‌های جریان رودخانه بیشتر پدیدار گردد. به عبارت دیگر تغییرات فصلی واریانس ممکن است خاصیت غیرخطی در سری‌ها را نشان دهد. هم چنین برای بررسی غیرخطی بودن سری‌های ماهانه که ماهیت غیرخطی خفیفی داشتند آزمون BDS کارآیی لازم را نداشته و بایستی مطالعات بیشتری در این زمینه صورت گیرد. جهت برازش مدل‌های سری زمانی به منظور پیش‌بینی یا تولید آمار در سری‌های ماهانه، ده روزه و روزانه رودخانه شهرچای ارومیه بایستی از مدل‌های غیرخطی سری زمانی استفاده شود و تنها بر روی سری سالانه جریان می‌توان از برازش مدل‌های خطی سری زمانی سود جست.

بنابراین در سری سالانه جریان رودخانه شهرچای ارومیه می‌توان از برازش مدل‌های خطی استفاده کرد. در سری‌های ماهانه بایستی تحقیق بیشتری صورت گیرد در حالی که برای سری‌های ده روزه و روزانه جریان استفاده از مدل‌های غیرخطی توصیه می‌گردد.

نتیجه گیری

در بسیاری از مدل‌های برازشی بر روی سری‌های جریان رودخانه از مدل‌های خطی 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 رودخانه شهرچای ارومیه با استفاده از آزمون غیرخطی BDS (براک و همکاران 1996) در چهار مقیاس زمانی سالانه، ماهانه، ده روزه و روزانه بررسی شد. ابتدا ایستایی سری‌ها با استفاده از آزمون‌های ADF و KPSS مورد بررسی قرار گرفته که طبق نتایج حاصله سری‌های سالانه، ماهانه و ده روزه استاندارد و سری‌های روزانه لگاریتمی ایستا فرض می‌شوند. سپس از سری‌ها لگاریتم گرفته و سری Log نامیده شده و سری‌های استاندارد نیز سری Log-DS نامگذاری

منابع مورد استفاده

- Bartlett MS, 1950. Periodogram analysis and continuous spectra. *Biometrika* 37: 1-16.
- 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.
- Dickey DA and Fuller WA, 1979. Distribution of the estimators for autoregressive time series with a unit root. *J Am Statis Assoc* 74: 423-431.

- Elshorbagy A, Simonovic SP and Panu US, 2002. Estimation of missing stream flow data using principles of chaos theory. *J Hydro* 255: 125-133.
- Gimeno R, Manchado B, and Mingues R, 1999. Stationarity tests for financial time series, *Phys A* 269: 72-78.
- 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.
- Hamilton JD, 1994. *Time series analysis*. Princeton University Press, Princeton.
- 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 Econo* 54: 159-178.
- Minshall NE, 1960. Predicting storm runoff on small experimental watershed. *J Hydraul Div Am Soc Civ Eng* 86: 17-38.
- 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.
- Rao, AR, Yu, GH, 1990. Gaussianity and linearity tests of hydrologic time series. *Stoch Hydrol* 4: 121-134.
- Robinson JS, Sivapalan M and Snell JD, 1995. On the relative roles of hillslope processes, channel routing and network geomorphology in the hydrologic response of natural catchments. *Water Resour Res* 31 (12): 3089-3101.
- Rogres WF and Zia HA, 1982. Linear and nonlinear runoff from large drain basins, *J Hydrol* 55: 267-278.
- Said SE and Dickey D, 1984. Testing for unit roots in autoregressive moving-average models with unknown order. *Biometrika* 71: 599-607.
- Salas JD, Delleur JW, Yevjevich V and Lane WL, 1980. *Applied modeling of hydrologic time series*. Water Resources Publications, Littleton, Colorado.
- Shin Y, Schmidt P, 1992. The KPSS Stationarity test as a unit root test. *Economic Letters* 38: 387-392.

Schwert GW, 1989. Test for unit roots: a Monte Carlo investigation. *J Bus and Econ Statis* 7: 147-159.

Sivakumar B, Liong SY, Liaw CY and Phoon KK, 1999. Singapore rainfall behavior: chaotic? *J Hydrol Eng* 4 (1): 38-48.

Tsonis AA, 2001. Probing the linearity and nonlinearity in the transitions of the atmospheric circulation. *Nonlinear Processes Geophysics* 8: 341-345.

Wang CT, Gupta VK and Waymire E, 1981. A geomorphologic synthesis of nonlinearity in surface runoff. *Water Resour Res* 19 (3): 545-554.

Wang Wen, Vrijling JK, Pieter HAJM, Van Gelder and Jun Ma, 2005. Testing for nonlinearity streamflow processes at different timescales. *J Hydrol* 1-22.

Wilcox BP, Seyfried MS and Matison TH, 1991. Searching for chaotic dynamics in snowmelt runoff. *Water Resour Res* 27 (6): 1005-1010.