نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)
جلد 30، شماره 4، مهر – آبان 1395، ص. 1024-1009

Journal of Water and Soil
Vol. 30, No. 4, Sept.-Oct. 2016, p. 1009-1024

بررسی ایستایی و غیرخطی بودن سری‌های زمانی جریان روزانه رودخانه بر اساس آزمون‌های آماری مختلف (مطالعه موردی: رودخانه‌های حوضه بالادست سد زرینه‌رود)

فرشاد فتحیان[1*] - احمد فاخری فرد[2]- یعقوب دین‌پژوه[3]- سید سعید موسوی ندوشنی[4]

تاریخ دریافت: 1393/12/03
تاریخ پذیرش: 1394/06/08

چکیده

یکی از ابزارهای مهم برای ارزیابی و مدل‌سازی فرآیندهای هیدرولوژیکی، به منظور حل مسائل مرتبط به مدیریت منابع آب، مدل‌های سری زمانی می‌باشد. فرآیند جریان رودخانه معمولاً به صورت مکانیسم غیرخطی در نظر گرفته می‌شوند، در حالی‌که در بسیاری از مطالعات به منظور مدل‌سازی سری‌های زمانی دبی رودخانه از مدل‌های خطی استفاده می‌شوند. در این مطالعه، سری زمانی دبی روزانه 6 ایستگاه آب‌سنجی واقع بر رودخانه‌های حوضه بالادست سد زرینه‌رود برای دوره آماری 2011-1997، به منظور بررسی ایستایی و غیرخطی بودن در نظر گرفته شده‌اند. این 15 سال داده دارای دوره زمانی مشترک (طول داده‌ها 5475 عدد) و دارای صحت و سقم کافی می‌باشند. در این مطالعه، برای بررسی ایستایی از آزمون‌های ADF و KPSS و برای بررسی غیرخطی بودن از آزمون‌های BDS، Keenan و TLRT استفاده شده است. در مورد تحلیل ایستایی، نتایج نشان داد که سری زمانی دبی روزانه همه ایستگاه‌ها به طور معنی‌داری ایستا هستند. بر اساس آزمون BDS، نتایج نشان داد که سری‌های روزانه ماهیت غیرخطی شدیدی دارند، اما بر اساس آزمون Keenan با لگاریتم‌گیری و غیرفصلی کردن می‌توان رفتار خطی را در آنها مشاهده کرد. نتایج آزمون TLRT نیز نشان داد که داده‌ها دارای رفتار غیرخطی بوده و می‌توان مدل‌های غیرخطی خودهمبسته آستانه مناسب را بر آنها برازش داد. بنابراین، به منظور مدل‌سازی سری‌های زمانی دبی روزانه می‌توان مدل‌های خطی و غیرخطی را استفاده کرد و نتایج آنها را مورد ارزیابی قرار داد.

واژه‌های کلیدی: آزمون‌های ایستایی، آزمون‌های غیرخطی بودن، دریاچه ارومیه، فرآیندهای هیدرولوژیکی، مدل‌سازی سری‌های زمانی

مقدمه

در طول دهه‌های اخیر، تحلیل و مدل‌سازی سری‌های زمانی در زمینه علوم هیدرولوژی، منابع آب و اقلیمی، توجه قابل قبولی را برای شبیه‌سازی و پیش‌بینی این متغیرهای هیدرولوژیکی جلب کرده است. یکی از دغدغه‌های اصلی محققان در مدل‌سازی سری‌های زمانی هیدرولوژیکی یا بطور کلی در زمینه علوم طبیعی این است که فرآیند مورد نظر باید به صورت خطی مدل‌سازی شوند یا غیرخطی (16). واضح است که بیشتر سیستم‌های طبیعی نسبت به زمان غیرخطی هستند. هر چند، جنبه‌های مشخصی از این سیستم‌ها ممکن است خطی‌تر از دیگر جنبه‌های آن باشد و طبیعت غیرخطی بودن ممکن است همیشه واضح نباشد. فرآیندهای جریان رودخانه، به عنوان یک مثالی از سیستم‌های طبیعی، معمولاً به صورت یک فرآیند غیرخطی در نظر گرفته می‌شوند. این فرآیندها می‌توانند با استفاده از مکانیزم‌های غیرخطی مختلف بر مقیاس‌های زمانی و مکانی مختلف، مدل‌سازی شوند. بنابراین، داشتن اطلاعات کافی از ماهیت غیرخطی سیستم رودخانه کمک مناسبی در انتخاب نوع مدل‌ها خواهد داشت. به طوری‌که، به فرض مثال، در صورتی که سیستم جریان روزانه رودخانه‌ای به فرآیند خطی نزدیکتر باشد، برازش مدل‌های خطی به واقعیت نزدیکتر بوده و نیازی به برازش مدل‌های پیچیده غیرخطی نمی‌باشد (23).

بررسی‌ها بر غیرخطی بودن فرآیندهای هیدرولوژیکی و کاربرد آنها برای سری زمانی دبی، توجه زیادی را در دو دهه اخیر برای بیشتر محققان جلب کرده است. راجرز و زیا (19) یک روش جدید جهت تعیین میزان غیرخطی بودن حوضه‌های زهکشی با استفاده از داده‌های بارش- رواناب توسعه دادند. رائو و یو (18) با استفاده از آزمون دو طیفی که توسط هینیش (9) بیان شده است، خطی بودن

1، 2 و 3- به ترتیب دانشجوی دکتری، استاد و دانشیار مهندسی منابع آب، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز
(*- نویسنده مسئول: Email: farshad.fathian@tabrizu.ac.ir)
4- استادیار مهندسی منابع آب، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، پردیس فنی و مهندسی شهید عباسپور، دانشگاه شهید بهشتی

ویژگی‌های دبی سالانه، دما و بارش روزانه را بررسی کردند. چن و رائو (2) نیز با استفاده از آزمون هینیش، غیرخطی بودن سری‌های زمانی بارش، دبی رودخانه و دما ماهانه را بررسی کردند. به منظور بررسی غیرخطی بودن فرآیندهای مورد مطالعه، روش‌های پارامتری و ناپارامتری زیادی وجود دارند. به طوری‌که از بین روش‌های موجود، روش ناپارامتری BDS[1] بر اساس نتایج مطالعات دیگران نسبت به روش‌های دیگر، به خصوص در مورد مطالعات هیدرولوژیکی، کارائی بیشتری دارد (13، 17 و 23). از جمله آزمون دیگری که می‌توان در این تحقیق اشاره کرد، آزمون Keenan می‌باشد. این آزمون توسط Keenan (11) به منظور بررسی غیرخطی بودن سری‌های زمانی توسعه داده شده است. در حالی‌که آزمون Keenan برای تشخیص غیرخطی بودن مرتبه دو[2] تعیین شده است، این آزمون ممکن است به غیرخطی بودن آستانه[3] حساس نباشد. بدین منظور در این مطالعه، آزمون نسبت درستنمایی[4] (TLRT) برای بررسی غیرخطی بودن آستانه (3 و 10) در سری‌های زمانی در نظر گرفته شده است.

اما قبل از بکارگیری بررسی خطی یا غیرخطی بودن فرآیندهای هیدرولوژیکی، استفاده از تحلیل ایستایی برای سری‌های زمانی مورد مطالعه امری ضروری و اجتناب ناپذیر است. ایستایی سری‌های زمانی یکی از فرضیات اصلی در مدل‌سازی سری‌های زمانی هیدرولوژیکی است و بیشتر مسایل مهندسی آب، بر مبنای این فرضیه مورد مطالعه قرار می‌گیرند. بیشتر سری‌های زمانی هیدرولوژیکی رفتار غیرایستایی را در مشخصه‌های آماری سری زمانی نشان می‌دهند و از وظایف مهم مدل‌سازی هیدرولوژیکی بررسی ایستایی و غیرایستایی بودن سری‌های زمانی و شناسایی عوامل آنها است. عوامل مهمی نظیر روند، پرش و فصلی بودن در غیرایستا شدن سری‌های زمانی نقش دارند. از طرف دیگر، اثرات احتمالی گرمایش جهانی بر سیستم‌های منابع آب نیز از عواملی است که، بر طبق مطالعات اخیر محققان، ممکن است بر ایستایی فرآیندهای هیدرولوژیکی تأثیر بگذارد (15). بنابراین، داشتن آگاهی و بینش کافی در مورد تحلیل ایستایی و حذف غیرایستایی در سری‌های زمانی می‌تواند مفید و ضروری باشد و ممکن است به ما در درک ارتباط احتمالی بین فرآیندهای هیدرولوژیکی و تغییرات محیط زیست جهانی کمک کند (22). به نظر می‌رسد که در مورد بررسی ایستایی سری‌های زمانی هیدرولوژیکی مطالعات زیادی انجام نشده است. وانگ و همکاران (22) به بررسی ایستایی رودخانه‌های غرب اروپا پرداختند. مدرس و اُواردا (17) ایستایی نوسانات جنوبی ال‌نینو را مورد بررسی قرار دادند. نتایج مطالعات همه آنها نشان داد که سری‌های زمانی مورد مطالعه ایستا هستند. بطور کلی، دو نوع آزمون ایستایی در بیشتر مطالعات هیدرولوژیکی بکار گرفته می‌شوند: یکی آزمون ریشه واحد ADF[5] و دیگری آزمون KPSS[6] که توسط کوویاتکوفسکی و همکاران (14) ارائه شده است.

بطور کلی، بیشتر تحقیقات صورت گرفته در زمینه مدل‌سازی سری‌های زمانی هیدرولوژیکی بدون بررسی کردن ماهیت سری زمانی نظیر تحلیل ایستایی و خطی یا غیرخطی بودن آنها، با استفاده از مدل‌های عمومی سری زمانی خطی مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. بنابراین هدف این مطالعه، بررسی ایستایی سری زمانی دبی روزانه رودخانه‌های بالادست سد زرینه‌رود با استفاده از آزمون‌های ADF و KPSS می‌باشد. سپس، وجود و شدت غیرخطی بودن سری‌های زمانی مورد مطالعه با استفاده از آزمون‌های BDS، Keenan و TLRT که منشأ در علوم اقتصادی دارند و در زمینه علوم آب کمتر به آنها توجه شده و در ایران به مطالعه از این آزمون‌ها نپرداخته‌اند، مورد بررسی قرار می‌گیرد. برخلاف همه پیشرفت‌ها در زمینه تحقیق بر مشخصه‌های غیرخطی متغیرهای مختلف، بررسی بیشتر در این زمینه برای فرآیندهای هیدرولوژیکی به خصوص دبی امری ضروری می‌باشد. زیرا هیچ دانش عمومی درباره اینکه چه نوع فرآیند غیرخطی در داده دبی روزانه می‌باشد، وجود ندارد، از طرف دیگر، ماهیت ویژگی و شدت غیرخطی بودن فرآیند دبی واضح نمی‌باشد. بنابراین، این مطالعه به منظور بررسی هدف‌های بیان‌شده، پاسخ مناسبی را برای رفتارهای ایستایی، خطی یا غیرخطی بودن سری زمانی دبی ارائه می‌کند.

مواد و روش‌ها

منطقه مطالعاتی و داده‌ها

منطقه مطالعاتی در نظر گرفته شده در این تحقیق، حوضه آبریز بالادست سد زرینه‌رود می‌باشد. حوضه آبریز زرینه‌رود، بزرگترین زیرحوضه درجه 2 از حوضه دریاچه ارومیه است که در بخش جنوب و جنوب شرقی دریاچه ارومیه قرار گرفته است. حوضه بالادست سد زرینه‌رود از چهار زیرحوضه تشکیل شده که مساحت کلی آن حدود 7081 کیلومتر مربع و ارتفاع آنها بین 1746 تا 2121 متر می‌باشد. چهار رودخانه اصلی واقع در چهار زیرحوضه، به ترتیب از غرب به شرق به نام‌های سقزچای، جیغاتوچای، خورخوره‌چای و ساروق‌چای، واقع شده‌اند و جریان آب خود را به درون دریاچه سد زهکش می‌کنند (شکل 1). در این مقاله به منظور بررسی هدف‌های موردنظر، از داده‌های دبی روزانه جریان رودخانه‌های منطقه مطالعاتی که شامل 6 ایستگاه آب‌سنجی می‌باشد، استفاده شده است. موقعیت این ایستگاه‌ها

1- Brock-Dechert-Scheinkman Test
2- Quadratic Nonlinearity
3- Threshold Nonlinearity
4- The Likelihood Ratio Test

5- Augmented Dickey-Fuller
6- Kwiatkowski-Phillips-Schmidt-Shin

در شکل 1 و مشخصات آنها در جدول 1 ارائه شده است.

جدول 1- مشخصات جغرافیایی ایستگاه‌های آب‌سنجی مورد مطالعه

Table 1- Geographical characteristics of hydrometric stations of case study

ایستگاه Station	حوضه رودخانه River basin	عرض جغرافیایی (درجه) Latitude (degree)	طول جغرافیایی (درجه) Longitude (degree)	ارتفاع (متر) Elevation (m)	مساحت حوضه (کیلومتر مربع) Drainage area (km^2)
قبقبلو Ghabghablou	سقزچای Saghez Chai	36.18 N	46.17 E	1500	661
دره پنبه‌دان Darepanbedan	سقزچای Saghez Chai	36.28 N	46.37 E	1470	1041
پل قشلاق Pol Gheshlagh	جیغاتوچای Jighato Chai	36.10 N	46.35 E	1436	1091
پل آنیان Pol Anian	جیغاتوچای Jighato Chai	36.20 N	46.43 E	1460	1328
سنته Sonnateh	خورخوره چای Khorkhoreh Chai	36.17 N	46.55 E	1434	1233
صفاخانه Safakhaneh	ساروق چای Sarogh Chai	36.40 N	46.70 E	1475	2209

همه داده‌های دبی روزانه استفاده شده در این تحقیق از روز اول ماه ژانویه سال 1997 تا روز آخر ماه دسامبر سال 2011 (دوره آماری 2011-1997) می‌باشند. لازم به ذکر است که این مقاله شروع مختصر و ابتدایی یک تحقیق می‌باشد که تحلیل‌های ایستایی و خطی و غیرخطی بودن با استفاده از آزمون‌های آماری مختلف که در بعضی مقالات و نیز کتب علمی علوم اقتصادی آورده شده و در زمینه علوم آب کمتر به آنها توجه می‌شود، را بیان می‌کند. بدین منظور، نویسنده جهت رسیدن به اهداف اصلی تحقیق مجبور به انتخاب حوضه‌ای شده که ایستگاه‌های آب‌سنجی یک شبکه گسترده و پراکنده‌ای را در برداشته باشند و طول دوره آماری آنها برای رسیدن به اهداف دیگر بایستی مشترک باشد. بنابراین، داده‌ها با طول آماری 15 سال روزانه که به عبارتی 5475 داده متوالی برای هر ایستگاه که دارای صحت و سقم کافی نیز می‌باشند، در نظر گرفته شده است. به منظور استفاده از داده‌های دبی برای بحث مدل‌سازی سری‌های زمانی و بکارگیری آنها در تحلیل‌های آماری مختلف، از آزمون ضریب هارست[1] برای بررسی کفایت طول داده‌ها استفاده شده است. نتیجه آزمون، کفایت طول داده‌ها و کنترل حافظه سری زمانی برای اینکه مقادیر حدی را نیز در خود داشته باشد را مناسب بیان کرد.

مشخصات آماری سری زمانی دبی روزانه رودخانه‌های مورد مطالعه در جدول 2 آورده شده است و شکل 2 نمودار میانگین و انحراف استاندارد سری‌های زمانی دبی روزانه 15 ساله را نشان می‌دهد. شکل 2 نشان می‌دهد که روزهایی با مقادیر متوسط دبی بالا، مقادیر انحراف استاندارد آنها نیز بالا می‌باشد، و این یک ویژگی است که به خوبی شناخته شده است. به طوری‌که می‌توان گفت، علت این تغییر یا نوسانات زیاد انحراف استاندارد دبی در این روزها، به دلیل وجود ریزش بارش‌های باران و برف در منطقه مطالعاتی می‌باشد. همانطور که در شکل 2 مشاهده می‌شود، 120 روز اول (ژانویه تا آوریل یا معادل آن اوایل دی تا اردیبهشت ماه) و 60 روز آخر (نوامبر و دسامبر یا معادل آن اوایل آبان تا آذر ماه)، این تغییر واریانس‌ها قابل مشاهده می‌باشد که به طور متعاقب ضریب تغییرات بالای دبی را در این روزها در پی دارد.

آزمون‌های ایستایی

به منظور بررسی تغییرپذیری ویژگی‌های آماری یک سری زمانی نظیر میانگین و واریانس نسبت به زمان، از آزمون‌های ایستایی استفاده می‌شوند. در این بخش به توصیف مختصری از روش‌های تحلیل ایستایی ADF و KPSS پرداخته می‌شود.

آزمون ADF

این آزمون یک نسخه تکمیل شده از آزمون Dickey-Fuller می‌باشد که برای بررسی ریشه واحد[2] از یک نمونه سری زمانی استفاده می‌شود. این آزمون ابتدا توسط دیکی و فولر (1979) ارائه

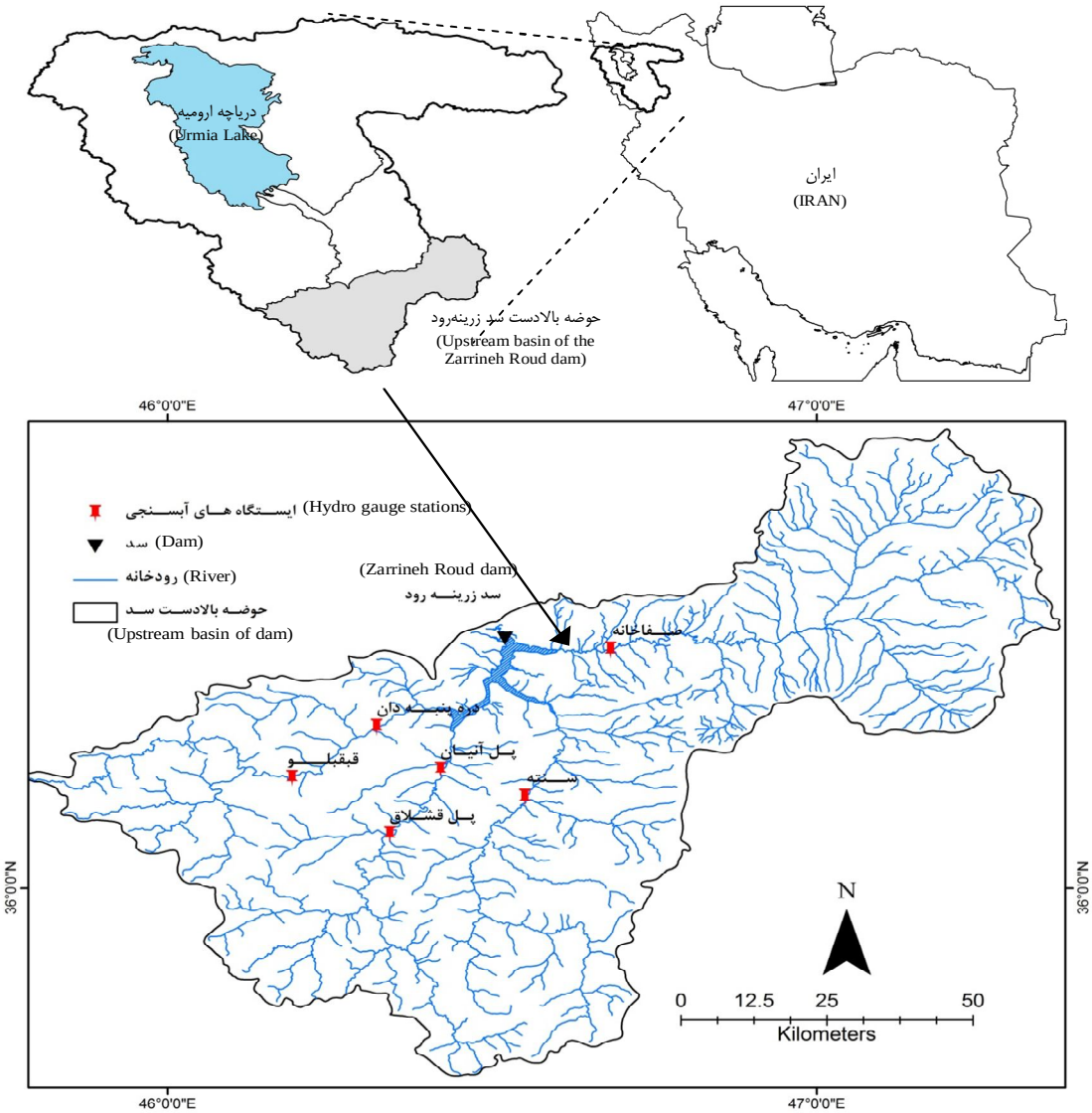
1- Hurst Coefficient

2- Unit Root

گردید سپس، توسط سید و همکاران (1984) تصحیح گردید (4 و 20). آماره این آزمون یک عدد منفی می‌باشد و هر چه این آماره منفی‌تر باشد، احتمال رد فرضیه وجود یک ریشه واحد در سطح اطمینان مختلف قوی‌تر است. آزمون ریشه واحد از طریق برازش مدل‌های رگرسیونی با روش تخمین حداقل مربعات با وجود یک روند خطی به صورت زیر تعریف و محاسبه می‌شود. مدل خود همبسته رگرسیونی با تأخیر یک AR(1) برای آزمون ریشه واحد، به شرح زیر درنظر گرفته شده است (4):

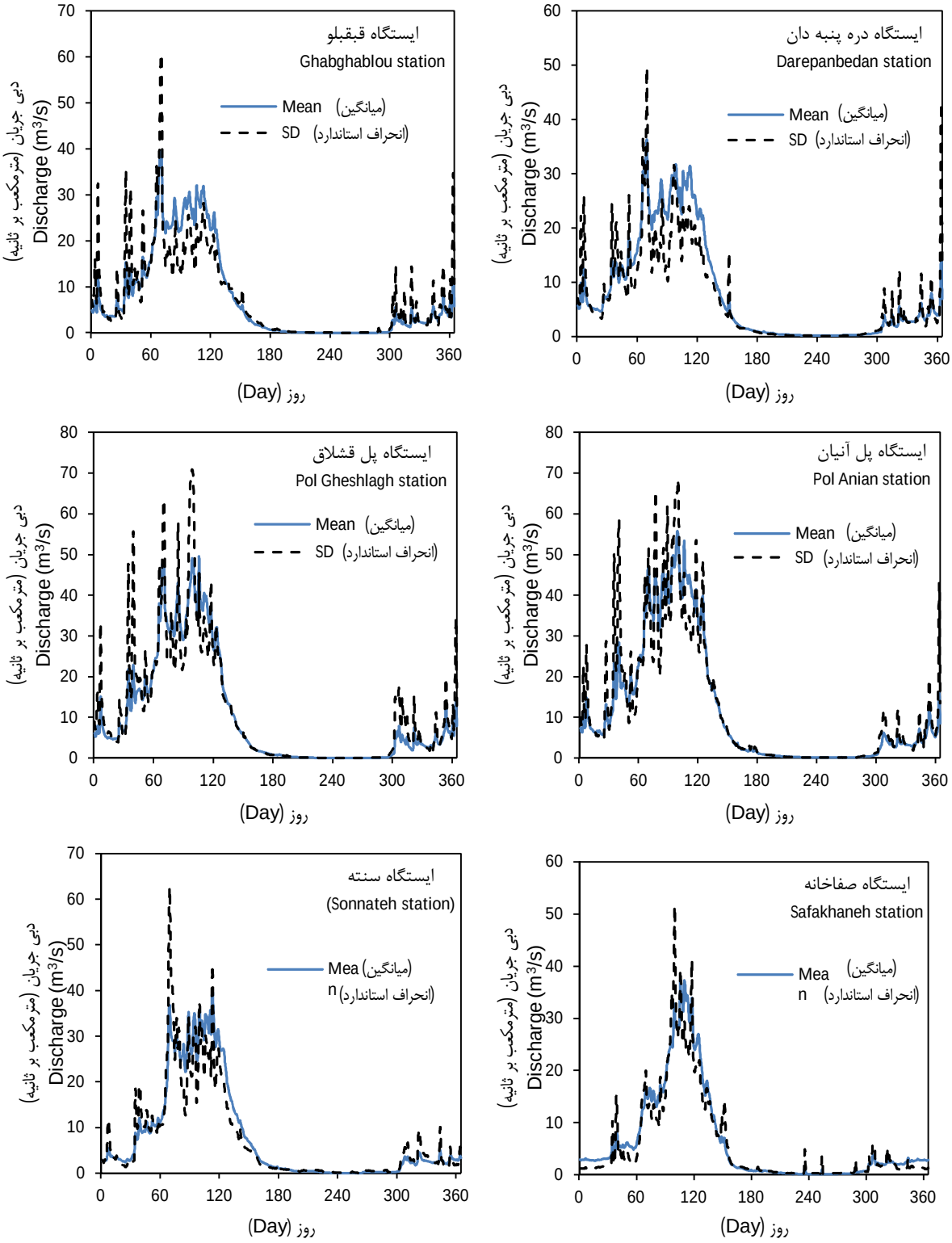
$$x_t = \rho x_{t-1} + \varepsilon_t,\ t = 1, 2, \ldots, N \qquad (1)$$

که در آن N طول سری زمانی، ε_t متغیر تصادفی مستقل با میانگین صفر و واریانس σ_ε^2 می‌باشد. اگر $\rho = 1$ (یعنی ریشه واحد معادله 1 برابر 1 است) باشد، سری زمانی غیرایستا و آن به عنوان یک فرآیند گام تصادفی می‌باشد. در مقابل، چنانچه $|\rho| < 1$ (یعنی ریشه واحد معادله 1 کوچکتر از 1 است)، سری زمانی ایستا است. از آماره آزمون t برای آزمودن فرض صفر (غیرایستا بودن سری زمانی) برای پارامتر ρ استفاده می‌شود. آزمون ریشه واحد خودهمبسته می‌تواند به مدل‌های *ARMA(p,q)* عمومی با مرتبه‌های نامعین تطبیق داده شود (20). به منظور اطلاعات بیشتر در مورد این آزمون می‌توان به مطالعات وانگ و همکاران (22)، خلیلی و همکاران (12) اشاره کرد.



شکل 1- موقعیت حوضه بالادست سد زرینه‌رود و ایستگاه‌های آب‌سنجی

Figure 1- Location of upstream basin of Zarrineh Roud dam and hydro gauge stations



شکل 2- تغییرات میانگین و انحراف استاندارد سری زمانی دبی روزانه رودخانه‌های مورد مطالعه
(اولین روز متعلق به اول ژانویه و آخرین روز متعلق به آخر دسامبر می‌باشد)

Figure 2- Variation in daily mean and standard deviation of streamflow processes of case study
(The first day is corresponding to January, 1 and the latest day is corresponding to December, 31)

جدول 2- مشخصات آماری سری زمانی دبی روزانه ایستگاه‌های مورد مطالعه

Table 2- Statistical characteristics of daily streamflow time series of the case study stations

ایستگاه Station	میانگین (مترمکعب بر ثانیه) Mean (m^3/s)	انحراف استاندارد (مترمکعب بر ثانیه) Standard (m^3/s) deviation	ضریب چولگی Skewness coefficient	ضریب کشیدگی Kurtosis coefficient	ضریب خودهمبستگی مرتبه(1) Lag one autocorrelation coefficient
قبقبلو Ghabghablou	7.58	15.01	4.29	33.51	0.909
دره پنبه‌دان Darepanbedan	7.77	14.05	3.80	22.60	0.917
پل قشلاق Pol Gheshlagh	10.1	21.95	5.15	41.21	0.932
پل آنیان Pol Anian	11.47	24.26	4.51	28.53	0.929
سنته Sonnateh	7.76	16.12	4.61	33.08	0.923
صفاخانه Safakhaneh	6.23	13.34	4.93	37.05	0.954

آزمون KPSS

این آزمون توسط کوویاتکوفسکی (14) پیشنهاد شد و سری زمانی را برای بررسی ایستایی حول یک روند مشخص (ایستایی روند) و ایستایی حول یک سطح ثابت (ایستایی سطح) مورد آزمون قرار می‌دهد. به منظور بدست آوردن ایستایی، اگر یک فرآیند دارای ریشه واحد باشد در اینصورت تدبیر مناسب تفاضل‌گیری از سری زمانی به منظور حذف جزء روند از سری است. فرض کنید که می‌توان سری زمانی را به صورت مجموع یک روند معین (βt)، گام تصادفی (r_t) و یک خطای ایستا (ε_t) با مدل رگرسیونی خطی زیر تعریف کرد (14):

$$x_t = r_t + \beta t + \varepsilon_t \quad (2)$$

$$r_t = r_{t-1} + u_t \quad (3)$$

و u_t یک متغیر تصادفی مستقل با میانگین صفر و واریانس σ_u^2 خواهد بود. تحت فرض صفر، سری زمانی مورد نظر حول یک روند معین ایستا بوده و $\sigma_u^2 = 0$ خواهد بود. اما در حالتی‌که سری زمانی مورد نظر حول یک سطح ثابت ایستا باشد، فرض صفر به صورت $\beta = 0$ خواهد بود. در نهایت، آماره آزمون KPSS به صورت رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$KPSS = \frac{N^{-2}\sum_{t=1}^{N} S_t^2}{\sigma^2(P)} \quad (4)$$

که S_t فرآیند جمع جزئی خطا، σ^2 واریانس خطا و P مقدار تأخیر می‌باشد. نکته مهم برای بکارگیری آزمون‌های ADF و KPSS تشخیص مقدار تأخیر می‌باشد که بر طبق مطالعات کوویاتکوفسکی و همکاران (14) و رابطه زیر را بیان کرده‌اند و Trapletti و Hornik (21) نیز در یکی از بسته‌های نرم افزار آماری R تحت عنوان "*tseries*"، به آن اشاره کرده است:

$$P = \text{int}\left[\frac{X * \sqrt{N}}{C}\right] \quad (5)$$

که در آن X، N و C اعداد ثابت هستند، به طوری‌که، X برابر 3 و 10، و C برابر 13 و 14 به ترتیب حداقل و حداکثر مقدار P و N تعداد داده‌ها را نشان می‌دهند.

بطور کلی، آزمون‌های ایستایی ADF و KPSS از یک طرف بر مبنای روش رگرسیون خطی تعریف شده‌اند که این روش دارای فرض توزیع نرمال است. از طرف دیگر، لگاریتم‌گیری می‌تواند، بر طبق مطالعات گیمنو و همکاران (7)، چنانچه روندی به صورت‌های مختلف نظیر روند نمایی در داده‌ها باشد را به روند خطی تبدیل کند. اکثراً، رفتار سری‌های زمانی داده‌های آب و هواشناسی به دلیل تصادفی بودن این متغیرها و داشتن مقادیر حدی، دارای چولگی می‌باشند. یکی از ابزارهای تبدیل کردن داده‌ها از حالت چولگی زیاد به کم و یا نرمال کردن داده‌ها تا حد نسبتاً زیاد، لگاریتم‌گیری می‌باشد. اساس منطق لگاریتم‌گیری از بُعد علم ریاضی این است که سری زمانی از یک روند نمایی[1] پیروی می‌کند و لگاریتم‌گیری به عنوان یک ابزار تبدیلی می‌تواند سری را به رفتار خطی تبدیل کند. بنابراین، لگاریتم‌گیری از داده‌ها قبل از بکارگیری آزمون‌های ایستایی امری معمولی می‌باشد (22).

1- Exponential

آزمون‌های غیرخطی

آزمون BDS

آزمون ناپارامتری BDS توسط براک و همکاران (1) به منظور بررسی همبستگی متوالی و ساختار غیرخطی موجود در یک سری زمانی بر مبنای مجموع همبستگی توسعه یافت. در این روش، سری زمانی اسکالر x_t که دارای طول N و ابعاد m می‌باشد، در نظر گرفته و سری جدید X_t به صورت $X_t = (x_t, x_{t-\tau}, ..., x_{t-(m-1)\tau}), X_t \in R^m$ تولید می‌شود. در شرایط فرض صفر سری زمانی x_t آماره BDS برای $m>1$ به صورت زیر تعریف می‌گردد:

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

که در آن $M = N - (m-1)$، τ تعداد نقاط محاط در فضای m بعدی، r شعاع کره‌ای به مرکز X_i، $C_m(r)$ مقادیر ثابت که توسط گراسبرگر و پروشیا (5) ارائه شده می‌باشد. به منظور اطلاعات بیشتر در مورد این آزمون به دلیل محدود بودن حجم مقاله، می‌توان به مطالعات وانگ و همکاران (22) و خلیلی و همکاران (12) رجوع کرد.

آزمون Keenan

Keenan در سال 1985 این آزمون را برای بررسی غیرخطی بودن سری‌های زمانی ارائه داده است. این آزمون با تقریب زدن یک سری زمانی ایستا غیرخطی توسط بسط ولترا[1] مرتبه دوم، ایجاد می‌شود (11 و 24).

$$x_t = \mu + \sum_{\mu=-\infty}^{\infty}\theta_\mu \varepsilon_{t-\mu} + \sum_{\nu=-\infty}^{\infty}\sum_{\mu=-\infty}^{\infty}\theta_{\mu\nu}\varepsilon_{t-\mu}\varepsilon_{t-\nu} \qquad (7)$$

که ε_t یک متغیر تصادفی مستقل یکنواخت با میانگین صفر، μ میانگین داده‌های سری زمانی x_t و θ ضرایب معادله می‌باشند. سری زمانی موردنظر خطی است اگر جمع دوگانه طرف راست معادله بالا صفر شود. در نهایت، آماره آزمون Keenan به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$F = \frac{\eta^2(n-2m-2)}{RSS - \eta^2} \qquad (8)$$

که n تعداد کل سری زمانی، m تعداد تأخیرهای سری زمانی، $RSS = \sum \hat{e}_t^2$ مجموع مربعات باقیمانده و η به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\eta = \eta_0 \sqrt{\sum_{t=m+1}^{n} \hat{\xi}_t^2} \qquad (9)$$

که η_0 ضریب رگرسیون می‌باشد. تحت فرض خطی بودن سری زمانی مورد نظر، آماره آزمون F دارای توزیع *F-distribution* با درجات آزادی 1 و *n-2m-2* می‌باشد. اگر آماره آزمون F محاسبه شده از مقدار جدول در سطح معنی‌داری مورد نظر بیشتر باشد، نتیجه حاکی از آنست که سری زمانی مورد نظر غیرخطی است و دارای غیرخطی‌بودن درجه دو[2] می‌باشد. به منظور آگاهی از جزئیات بیشتر در مورد این آزمون، می‌توان به کریر و چان (3) رجوع کرد.

آزمون TLRT

فرض صفر، H_0، آزمون نسبت درستنمایی برای غیر خطی‌بودن آستانه این است که مدل خود همبسته با مرتبه p، AR(p)، به سری زمانی مورد نظر برازش داده می‌شود. در حالی‌که فرض مخالف، H_1، بیان می‌کند که مدل سری زمانی برازش یافته، یک مدل خودهمبسته آستانه دو رژیمی[3]، TAR(2)، با مرتبه p برای هر رژیم می‌باشد (3 و 10). بنابراین، آماره آزمون نسبت درستنمایی غیرخطی‌بودن آستانه (TLRT) به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$T_n = (n-p)\log\left\{\frac{\sigma^2(H_0)}{\sigma^2(H_1)}\right\} \qquad (10)$$

که $(n-p)$ اندازه نمونه مؤثر، $\sigma^2(H_0)$، (برآوردگر حداکثر درستنمایی واریانس خطا از مدل خطی خودهمبسته)، جمع مربعات باقیمانده‌های مدل AR(p) برازش یافته به سری زمانی و $\sigma^2(H_1)$، (برآوردگر حداکثر درستنمایی واریانس خطا از مدل غیرخطی خودهمبسته آستانه)، جمع مربعات باقیمانده‌های مدل TAR(2) برازش داده شده به داده‌ها می‌باشد. به منظور آگاهی از جزئیات بیشتر در مورد این آزمون، می‌توان به کریر و چان (3) رجوع کرد.

نتایج و بحث

نتایج آزمون‌های ایستایی

در این بخش نتایج حاصل از بررسی ایستایی سری‌های زمانی دبی جریان رودخانه‌های حوضه بالادست سد زرینه‌رود بر اساس روش‌های ایستایی ADF و KPSS آورده شده است. جدول 3 نتایج آزمون‌های ایستایی سری‌های زمانی استاندارد شده برای منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهند. نتایج جدول 3 نشان می‌دهد که داده‌های سری دبی روزانه همه ایستگاه‌های مورد مطالعه با روش ADF ایستا هستند و به عبارت دیگر، سری‌های زمانی دبی روزانه دارای ریشه واحد نمی‌باشند (رد فرض صفر آزمون ایستایی ADF). در مورد آزمون KPSS، معنی‌دار بودن آزمون ایستایی در سری‌های زمانی دبی در سطح 5% و 1% مشاهده می‌شوند (پذیرش فرض صفر). بدین معنی

1- Volterra

2- Quadratic nonlinearity

3- Two-regime threshold autoregressive (TAR) model

که همه ایستگاه‌های مورد مطالعه حول یک سطح ثابت ایستا هستند و هیچ تغییر معنی‌داری در میانگین سری‌های دبی روزانه وجود ندارد (قبول فرض صفر آزمون ایستایی حول یک سطح ثابت). در مورد آزمون ایستایی حول یک روند معین، همه ایستگاه‌ها ایستایی روند را در تاخیر حدبالا معنی‌دار نشان داده‌اند. در مورد آزمون ایستایی روند، زمانی‌که نتایج حاصل از این آماره رد فرض صفر را بیان کند، به این معنی است که بر اساس رابطه 2، سری‌ها حول یک روند معین ایستا نیستند. بالعکس، پذیرش فرض صفر نشان دهنده این است که سری زمانی حول یک روند معین ایستا است و واریانس جزء تصادفی در فرآیند گام تصادفی صفر می‌باشد.

جدول 3- نتایج آزمون ایستایی دبی روزانه استاندارد شده ایستگاه‌های مورد مطالعه

Table 3- Results of stationary test for the standardized daily streamflow of the case study stations

ایستگاه Station	تأخیر Lag (P)	آزمون ADF ADF test		آزمون ایستایی روند KPSS KPSS trend stationary test		آزمون ایستایی سطح ثابت KPSS KPSS level stationary test	
		آماره Statistic	مقدار احتمال	آماره Statistic	مقدار احتمال p-value	آماره Statistic	مقدار احتمال p-value
قبقبلو	17	-5.097	< 0.01	0.294	< 0.01	0.292	> 0.1
Ghabghablou	52	-7.112	< 0.01	0.112	> 0.1	0.111	> 0.1
دره پنبه‌دان	17	-5.058	< 0.01	0.235	< 0.01	0.234	> 0.1
Darepanbedan	52	-7.214	< 0.01	0.089	> 0.1	0.089	> 0.1
پل قشلاق	17	-4.688	< 0.01	0.277	< 0.01	0.318	> 0.1
Pol Gheshlagh	52	-7.113	< 0.01	0.105	> 0.1	0.120	> 0.1
پل آنیان	17	-5.133	< 0.01	0.194	> 0.01	0.208	> 0.1
Pol Anian	52	-7.155	< 0.01	0.074	> 0.1	0.079	> 0.1
سنته	17	-5.073	< 0.01	0.350	< 0.01	0.351	> 0.05
Sonnateh	52	-6.991	< 0.01	0.133	> 0.05	0.134	> 0.1
صفاخانه	17	-5.310	< 0.01	0.247	< 0.01	0.267	> 0.1
Safakhaneh	52	-6.773	< 0.01	0.094	> 0.1	0.102	> 0.1

مقادیر بحرانی توزیع KPSS برای آزمون ایستایی سطح ثابت 1%~0.739، 5%~0.463، 10%~0.347 و برای آزمون ایستایی روند معین 1%~0.216، 5%~0.146، 10%~0.119 می‌باشد

The critival values of the KPSS test for level stationary test are 1%~0.739, 5%~0.463, 10%~0.347 and for trend stationary test are 1%~0.216, 5%~0.146, 10%~0.119

اما تعدادی از ایستگاه‌ها، معنی‌داری آزمون ایستایی حول یک روند معین را در تاخیر حدپائین (p=17) نشان نمی‌دهند. بر طبق نتایج مطالعات وانگ و همکاران (23)، بخشی از دلایل احتمالی آن می‌تواند به دلیل اثر وجود خودهمبستگی در تأخیرهای کوتاه‌مدت سری زمانی روزانه و بخشی از آن اثر مقادیر پرت در داده‌های روزانه به ویژه در آزمون ایستایی روند باشد (22 و 23). هر چند، برای تأخیرهای بزرگ یا حد بالا (p=52)، همه سری‌های زمانی مورد مطالعه دارای روندی ایستا هستند. بنابراین، همه سری‌های زمانی به طور اساسی ایستا هستند. اگرچه دبی‌های روزانه در اکثر ایستگاه‌ها در مقدار تاخیر کوتاه مدت، غیرایستا بودن را نشان می‌دهند که این شاید می‌تواند به دلایل احتمالی مداخلات انسانی، برداشت از جریان رودخانه و غیره باشد (22 و 23). در حالی‌که، هدف از آزمون ایستایی تعیین این نکته می‌باشد که آیا مقادیر میانگین و واریانس سری زمانی دبی با زمان تغییر می‌کند یا خیر؟!، هدف از آزمون‌های تحلیل روند که در بیشتر مطالعات برای تشخیص روند سری‌های زمانی هیدرولوژیکی استفاده می‌شود این است که مقادیر یک سری زمانی آیا دارای یک روند افزایشی است یا کاهشی؟!. در این خصوص، فتحیان و همکاران (5 و 6) با بکارگیری آزمون‌های تحلیل روند نظیر من-کندال[1]، اسپیرمن[2] و سنس‌تی[3] نشان دادند که سری‌های زمانی دبی ماهانه و سالانه ایستگاه‌های واقع شده در بالا دست سد زرینه‌رود دارای روند معنی‌داری نمی‌باشند. نتایج مطالعات آنها نشان داد که تنها ایستگاه‌هایی که در پائین‌دست حوضه آبریز دریاچه ارومیه هستند دارای روند معنی‌دار کاهش دبی می‌باشند. بنابراین، عدم وجود روند کاهشی یا افزایشی دبی در ایستگاه‌های منطقه مورد مطالعه دلالت بر تأیید نتایج آزمون ایستایی روند KPSS را در این تحقیق دارد.

1- Mann-Kendall test
2- Spearman test
3- Sen's T test

جدول 4- مدل AR برازش یافته بر دبی روزانه لگاریتمی و استاندارد شده ایستگاه‌های مورد مطالعه

Table 4- AR model fitted to the logarithmized and standardized daily streamflow of the case study stations

ایستگاه Station	Model parameters پارامترهای مدل	Logarithmic series سری لگاریتمی (Log)	Logarithmic and deseasonality series سری لگاریتمی و غیرفصلی (Log-DS)
قبقبلو Ghabghablou	معیار آکائیکه AIC	-8755.43	1691.63
	مرتبه مدل (p) Model order	19	8
دره پنبه‌دان Darepanbedan	معیار آکائیکه AIC	-11584.79	712.82
	مرتبه مدل (p) Model order	19	4
پل قشلاق Pol Gheshlagh	معیار آکائیکه AIC	-9105.11	242.56
	مرتبه مدل (p) Model order	19	16
پل آنیان Pol Anian	معیار آکائیکه AIC	-9669.09	724.60
	مرتبه مدل (p) Model order	20	20
سنته Sonnateh	معیار آکائیکه AIC	-11650.78	966.79
	مرتبه مدل (p) Model order	20	16
صفاخانه Safakhaneh	معیار آکائیکه AIC	-11821.73	1278.61
	مرتبه مدل (p) Model order	19	20

نتایج آزمون‌های غیرخطی

در این بخش، نتایج آزمون‌های BDS و Keenan که به بررسی خطی یا غیرخطی بودن سری‌های زمانی دبی روزانه رودخانه‌های بالادست حوضه زرینه‌رود می‌پردازند، از دو نگرش مختلف بیان می‌شوند. در نگرش اول، آزمون BDS نیاز به استخراج یک ساختار خطی از داده‌های اصلی سری زمانی دبی دارد. این ساختار خطی با استفاده از یک فیلتر خطی تخمین زده شده (نظیر مدل AR[1])، بدست می‌آید.

از آنجائی‌که فرآیندهای جریان رودخانه (به جزء سری سالانه)، معمولاً خاصیت تناوبی قوی را نشان می‌دهند، بنابراین به منظور تحلیل نقش فصلی بودن در آزمون غیرخطی، داده‌های دبی جریان به دو طریق پیش پردازش می‌شوند. روش اول لگاریتم‌گیری (Log) از داده‌های اصلی سری زمانی می‌باشد و در روش دوم، پس از لگاریتم‌گیری، داده‌ها غیرفصلی (Log-DS) می‌شوند. جدول 4 نتایج مدل‌های AR برازش یافته بر دو سری زمانی Log و Log-DS ذکر شده را بر طبق مرتبه تعیین شده (p) و معیار آکائیکه (AIC) نشان می‌دهد.

برازش مدل‌های AR انتخاب شده بر سری‌های دبی روزانه لگاریتمی و استاندارد شده ایستگاه‌های مورد مطالعه باعث می‌شود که عمل مکانیسم خطی از داده‌ها حذف شوند و سری باقیمانده‌ها دارای مکانیسم غیرخطی خواهند بود (1). بنابراین، با برازش این مدل‌ها به داده‌های سری‌های باقیمانده بدست می‌آیند و آزمون BDS بر روی آنها اعمال می‌گردد. نتایج آزمون BDS بر سری‌های Log و Log-DS در جدول 5 نشان داده شده است.

بر اساس این نتایج، آماره آزمون BDS سری‌های زمانی دبی روزانه لگاریتمی و استاندارد شده ایستگاه‌های قبقبلو و صفاخانه در سطح 1% معنی‌دار می‌باشند. اما برای ایستگاه‌های دیگر، سری‌های دبی روزانه لگاریتمی، آماره آزمون BDS را معنی‌دار نشان نداده است. می‌توان نتیجه گرفت که آزمون BDS وجود ماهیت غیرخطی شدید را برای سری‌های دبی روزانه همه ایستگاه‌ها (به جزء ایستگاه صفاخانه) پس از حذف اثر فصلی بودن نشان می‌دهد. نتیجه این بخش از مقاله در تطابق با مطالعات وانگ و همکاران (30) و خلیلی و همکاران (12) می‌باشد. آنها نشان دادند که داده‌ها با مقیاس زمانی کوچک در مقایسه با داده‌ها با مقیاس زمانی بزرگ، دارای مکانیسم پیچیده‌تری

1- Auto-Regressive

هستند. به طوری‌که چنانچه مقیاس زمانی از روز به سال افزایش یابد، غیرخطی بودن کاسته می‌شود. به عبارت دیگر، هرچه مقیاس زمانی کوچکتر می‌شود، شدت غیرخطی بودن افزایش می‌یابد و فصلی‌زدایی نیز ممکن است شدت غیرخطی بودن را افزایش یا کاهش دهد. زیرا غیرخطی بودن داده‌های فصلی نظیر داده‌های ماهانه، هفتگی و ده روزه ممکن است تحت اثرات واریانس فصلی بر سری‌های زمانی ذکر شده غالب شود. وانگ و همکاران (23) نشان دادند که اگرچه باقیمانده‌ها به طور متوالی غیرهمبسته هستند، اما ممکن است در واریانس سری باقیمانده‌ها خاصیت فصلی بودن وجود داشته باشد و احتمالاً یک منبع غالب از غیرخطی بودن در سری زمانی داده است. بطور کلی، تحلیل‌های نتایج مقاله حاضر و مطالعات دیگران بیان می‌کند که مکانیزم‌های قوی‌تر و پیچیده‌تری در سری‌های زمانی با مقیاس کوچکتر نسبت به سری‌های زمانی با مقیاس بزرگتر، وجود دارد.

جدول 5- نتایج آزمون BDS برای سری‌های زمانی دبی روزانه لگاریتمی و استاندارد شده ایستگاه‌های مورد مطالعه

Table 5- Results of BDS test for the logarithmized and standardized daily streamflow time series of the case study stations

ایستگاه Station	سری زمانی Time series	لگاریتمی (Log) Lorathitmic (Log)				لگاریتمی و غیرفصلی (Log-DS) Lodarithmic and desesonality (Log-DS)			
	ابعاد (m) Dimension (m)	2	3	4	5	2	3	4	5
قبقبلو Ghabghablou	آماره Statistic	10.21	9.22	8.40	9.49	8.96	10.08	10.11	9.77
	مقدار احتمال p-value	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
دره پنبه‌دان Darepanbedan	آماره Statistic	0.064	0.102	0.107	0.098	13.17	12.76	11.74	10.76
	مقدار احتمال p-value	0.948	0.918	0.914	0.921	0.000	0.000	0.000	0.000
پل قشلاق Pol Gheshlagh	آماره Statistic	1.040	1.009	1.187	2.913	8.48	10.21	10.53	10.21
	مقدار احتمال p-value	0.298	0.312	0.234	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000
پل آنیان Pol Anian	آماره Statistic	0.020	0.136	0.216	0.224	6.50	8.30	9.24	9.27
	مقدار احتمال p-value	0.983	0.891	0.828	0.822	0.000	0.000	0.000	0.000
سنته Sonnateh	آماره Statistic	0.578	0.580	0.543	0.506	14.00	15.23	15.86	15.71
	مقدار احتمال p-value	0.563	0.561	0.586	0.612	0.000	0.000	0.000	0.000
صفاخانه Safakhaneh	آماره Statistic	23.25	20.79	18.63	16.97	12.39	11.20	10.84	10.46
	مقدار احتمال p-value	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

منظور از 0/000 این است که مقدار *p*-value آماره کمتر از 0/0001 می‌باشد

0.000 value means that the p-value of statistics is less than 0.0001

نگرش دوم در مورد تحلیل غیرخطی بودن سری‌های زمانی دبی روزانه مربوط به آزمون Keenan می‌باشد که نتایج آن برای سری‌های زمانی اصلی، لگاریتمی و استاندارد شده در جدول 6 ارائه شده است. برخلاف آزمون BDS که بر سری‌های زمانی باقیمانده‌ها مدل‌های AR اعمال می‌شود، آزمون Keenan بر خود سری‌های زمانی اعمال می‌شود. نتایج این آزمون بر سری‌های زمانی اصلی، لگاریتمی و استاندارد شده نشان داد که سری‌های زمانی اصلی ایستگاه‌های مورد مطالعه ماهیت غیرخطی شدید دارند و فرض صفر خطی بودن آنها در سطح معنی‌داری 1% پذیرفته نمی‌شود. در مورد سری‌های لگاریتمی دبی روزانه، تمام ایستگاه‌ها نیز دارای رفتار غیرخطی معنی‌داری در سطح 1% می‌باشند اما شدت غیرخطی بودن آنها بر اساس آماره آزمون محاسبه شده کمتر می‌باشد. اما در مورد

سری‌های زمانی لگاریتم‌گیری و غیرفصلی شده، نتایج پذیرش فرض صفر خطی بودن آزمون Keenan برای همه ایستگاه‌ها (به جزء سنته) را در سطح معنی‌داری 1% نشان می‌دهند. جاراس و گیشانی (10) در مطالعه خود به منظور مدل‌سازی سری‌های زمانی دبی روزانه رودخانه‌های Enler و Oykel اسکاتلند و ایرلند، از آزمون Keenan برای بررسی غیرخطی بودن آنها استفاده کردند. نتایج نشان داد که داده‌های رودخانه‌ها دارای رفتار غیرخطی در سطح معنی‌داری 5% هستند و این آزمون وجود رابطه غیرخطی مرتبه 2 در این داده‌ها را تأیید می‌کند.

جدول 6- نتایج آزمون Keenan برای سری‌های زمانی دبی روزانه لگاریتمی و استاندارد شده ایستگاه‌های مورد مطالعه

Table 6- Results of Keenan test for the logarithmized and standardized daily streamflow of the case study stations

ایستگاه Station	آماره‌ها Statistics	سری اصلی Original series	لگاریتمی (Log) Lorathitmic (Log)	لگاریتمی و غیرفصلی (Log-DS) Lodarithmic and desesonality (Log-DS)
قبقبلو Ghabghablou	آماره Statistic	96.34	7.87	1.57
	مقدار احتمال p-value	0.000	0.005	0.208
دره پنبه‌دان Darepanbedan	آماره Statistic	303.90	27.36	0.497
	مقدار احتمال p-value	0.000	0.000	0.480
پل قشلاق Pol Gheshlagh	آماره Statistic	19.84	12.26	0.281
	مقدار احتمال p-value	0.000	0.000	0.595
پل آنیان Pol Anian	آماره Statistic	57.71	19.92	1.24
	مقدار احتمال p-value	0.000	0.000	0.263
سنته Sonnateh	آماره Statistic	103.09	23.91	7.62
	مقدار احتمال p-value	0.000	0.000	0.005
صفاخانه Safakhaneh	آماره Statistic	65.54	5.72	4.16
	مقدار احتمال p-value	0.000	0.016	0.041

نگرش سوم در مورد تحلیل غیرخطی بودن سری‌های زمانی دبی روزانه مربوط به آزمون TLRT می‌باشد که نتایج آن برای سری‌های زمانی اصلی، لگاریتمی و استاندارد شده در جدول 7 ارائه شده است. نتایج این آزمون بر سری‌های زمانی اصلی و لگاریتمی نشان داد که سری‌های زمانی دبی روزانه همه ایستگاه‌های مورد مطالعه ماهیت غیرخطی دارند و فرض صفر برازش یک مدل خودهمبسته، AR(1)، بر آنها در سطح معنی‌داری 1% پذیرفته نمی‌شود. در مورد سری‌های لگاریتمی استاندارد شده دبی روزانه، تمام ایستگاه‌ها (به جزء پل قشلاق) نیز دارای رفتار غیرخطی معنی‌داری در سطح 5% می‌باشند. به عبارت دیگر، آزمون نسبت درستنمایی غیرخطی بودن آستانه نشان می‌دهد که سری‌های زمانی دبی روزانه ایستگاه‌های بالادست سد زرینه‌رود از مدل خطی پیروی نمی‌کنند و آزمون TLRT بیان می‌کند که یک مدل TAR می‌تواند به داده‌ها برازش داده شود. کریر و چان (3) از این آزمون برای سری زمانی لکه خورشیدی استفاده کردند و نتایج آنها نشان داد که سری زمانی غیرخطی بوده و استفاده از مدل خودهمبسته آستانه پیشنهاد می‌شود. جاراس و گیشانی (10) در مطالعه خود به منظور مدل‌سازی سری‌های زمانی دبی روزانه رودخانه‌های Enler و Oykel اسکاتلند و ایرلند، از آزمون TLRT برای بررسی غیرخطی بودن آنها استفاده کردند. نتایج مطالعه آنها نشان داد که استفاده از مدل خطی خودهمبسته برای این رودخانه‌ها مفید نمی‌باشد و داده‌ها دارای رفتار غیرخطی در سطح معنی‌داری 1% هستند. همچنین، آنها نشان دادند که مدل‌های آستانه ممکن است برای مدل‌سازی و تحلیل این دو رودخانه مناسب باشد و وجود محتمل مقادیر آستانه در این داده‌ها را تأیید می‌کنند.

جدول 7- نتایج آزمون TLRT برای سری‌های زمانی دبی روزانه لگاریتمی و استاندارد شده ایستگاه‌های مورد مطالعه

Table 7- Results of TLRT test for the logarithmized and deseasonalized daily streamflow of the case study stations

ایستگاه Station	آماره‌ها Statistics	سری اصلی Original series	لگاریتمی (Log) Lorathitmic (Log)	لگاریتمی و غیرفصلی (Log-DS) Lodarithmic and desesonality (Log-DS)
قبقبلو Ghabghablou	آماره Statistic	177.15	39.90	16.62
	مقدار احتمال p-value	0.000	0.000	0.005
دره پنبه‌دان Darepanbedan	آماره Statistic	207.45	43.47	10.87
	مقدار احتمال p-value	0.000	0.000	0.050
پل قشلاق Pol Gheshlagh	آماره Statistic	92.78	32.94	8.40
	مقدار احتمال p-value	0.000	0.000	0.134
پل آنیان Pol Anian	آماره Statistic	108.75	31.78	17.97
	مقدار احتمال p-value	0.000	0.000	0.003
سنته Sonnateh	آماره Statistic	161.06	44.22	31.34
	مقدار احتمال p-value	0.000	0.000	0.000
صفاخانه Safakhaneh	آماره Statistic	58.31	13.26	19.98
	مقدار احتمال p-value	0.000	0.000	0.001

بر اساس نتایج بدست آمده از آزمون‌های بالا، می‌توان نتیجه گرفت که با لگاریتم‌گیری می‌توان روند نمایی احتمالی موجود در داده‌ها را به روند خطی تبدیل کرد و این عمل انتقال تا حد بسیار زیادی از غیرخطی بودن داده‌ها می‌کاهد. از طرف دیگر، با حذف اثر فصلیت از داده‌ها بر میزان قابل توجهی از ماهیت غیرخطی بودن داده‌ها کاسته شده و بیشتر سری‌های زمانی ماهیت رفتار خطی را بر اساس این آزمون نشان می‌دهند. بر اساس نتایج گرفته شده از این مطالعه و مطالعات دیگران، سری‌های زمانی دبی روزانه جریان رودخانه‌ها منشأ رفتار غیرخطی را بیشتر از رفتار خطی نشان دادند و این غیرخطی بودن اساساً تحت تأثیر متغیرهای اقلیمی (نظیر بارش، دما، برف و...) می‌باشد که خود منشأ رفتار احتمالی غیرخطی هستند.

نتیجه‌گیری

تحقیق حاضر تلاشی بود برای بررسی ایستایی یا غیرایستایی، خطی یا غیرخطی‌بودن سری‌های زمانی دبی رودخانه‌های حوضه بالادست سد زرینه‌رود، و این بررسی‌ها با استفاده از آزمون‌های ADF و KPSS برای ایستایی و BDS و Keenan برای غیرخطی بودن بر روی 6 ایستگاه آب‌سنجی مورد مطالعه انجام گرفت. نتایج این تحقیق به طور خلاصه به صورت زیر ارائه می‌شوند:

بطور کلی در بیشتر برنامه‌های کاربردی مدل‌سازی هیدرولوژیکی، آزمودن ایستایی سری‌های زمانی ضروری است. از طرف دیگر، گاهی اوقات بررسی غیرایستایی ممکن است بینش‌هایی را از مکانیزم فیزیکی اساسی، به خصوص در زمینه تغییرات جهانی، به ما بدهد. بنابراین، در این مطالعه آزمودن معیار ایستایی دبی روزانه رودخانه‌های بالادست سد زرینه‌رود یک موضوع اساسی است. نتایج کلی این پژوهش نشان داد که دبی روزانه استاندارد شده همه ایستگاه‌های آب‌سنجی مورد مطالعه بر اساس آزمون ADF دارای ایستایی می‌باشند (معنی‌دار بودن آزمون در سطح 1% و در نتیجه رد فرض صفر وجود ریشه واحد). بر اساس آزمون ایستایی KPSS، دبی روزانه لگاریتم‌گیری شده همه ایستگاه‌ها حول یک سطح ثابت ایستا هستند، اما حول یک روند معین در مقدار تأخیر حد پائین، سری‌های زمانی دارای ایستایی روند نیستند.

لازم به ذکر است که نویسنده جهت رسیدن به اهداف اصلی تحقیق بایستی حوضه‌ای را انتخاب می‌کرد که ایستگاه‌های آب‌سنجی یک شبکه گسترده و پراکنده‌ای را در برداشته باشند و طول دوره آماری آنها برای رسیدن به اهداف دیگر مشترک باشد. بنابراین، داده‌ها با طول آماری 15 سال روزانه که به عبارتی 5475 داده متوالی برای هر ایستگاه که دارای صحت و سقم کافی نیز می‌باشند، در نظر گرفته شده است. به طوری‌که، آزمون ضریب هارست کفایت طول داده‌ها و کنترل حافظه سری زمانی برای اینکه مقادیر حدی را نیز در خود داشته باشد را مناسب بیان کرد. البته به عقیده برخی کارشناسان، کوتاه بودن طول دوره آماری 15 سال دبی روزانه شاید ممکن باشد در نتایج تحلیل ایستایی سری روزانه تأثیرگذار باشد که تأیید صحت این ادعا به مطالعات و بررسی‌های بیشتر نیاز دارد.

در این مطالعه، با برازش مدل‌های AR مناسب بر روی سری‌های لگاریتمی و استاندارد شده، همبستگی‌های متوالی خطی حذف شدند و آزمون BDS بر روی سری باقیمانده‌ها اعمال شد. بر اساس نتایج حاصله سری‌های روزانه استاندارد شده نسبت به سری‌های لگاریتم‌گیری شده از شدت غیرخطی بیشتری برخوردار هستند. به عبارت دیگر، تغییرات فصلی واریانس ممکن است خاصیت غیرخطی در داده‌ها را بیشتر کند و ماهیت غیرخطی بودن سری‌های زمانی دبی روزانه بیشتر پدیدار شود. از طرف دیگر، به دلیل وجود ذوب برف در منطقه کوهستانی مورد مطالعه، حافظه‌ای قوی در سیستم دیده می‌شود که این عامل باعث شده تا مرتبه مدل AR برای حذف اثر همبستگی متوالی در سری‌های زمانی دبی روزانه افزایش یابد.

نتایج حاصله از آزمون Keenan بر سری‌های زمانی اصلی، لگاریتمی و استاندارد شده نشان داد که سری‌های زمانی اصلی و لگاریتمی دبی روزانه ایستگاه‌های مورد مطالعه ماهیت غیرخطی شدید دارند. اما سری‌های زمانی لگاریتم‌گیری و غیرفصلی شده، ماهیت خطی بودن ایستگاه‌ها را بر اساس آزمون Keenan نشان می‌دهند. علاوه بر این، نتایج آزمون TLRT نشان داد که داده‌های دبی روزانه منطقه مطالعه علاوه بر داشتن رفتار غیرخطی، می‌توان مدل‌های سری زمانی خودهمبسته آستانه را به آنها برازش داد. لازم به ذکر است که با تبدیل داده‌های اصلی سری زمانی به سری‌های لگاریتمی و فصلی شده از میزان شدت غیرخطی بودن آنها کاسته می‌شود.

بطور کلی، فرآیندهای جریان رودخانه‌ها به صورت ماهیت غیرخطی در نظر گرفته می‌شوند. اما، نوع معیار سنجش غیرخطی بودن و میزان شدت آنها در مقیاس‌های زمانی مختلف، به دلیل وجود روش‌های متعدد ارزیابی، به صورت واضح مشخص نشده است که این نیازمند بررسی‌های بیشتر و دقیق‌تری می‌باشد. فرآیندهای دبی رودخانه‌ها به طور اساسی توسط فرآیندهای هواشناسی اشتقاق می‌شوند، زیرا سری‌های هواشناسی روزانه معمولاً غیرخطی هستند (به طور مثال در مطالعه رائو و یو، 18) و فرآیند دبی روزانه معمولاً به صورت غیرخطی وابسته به بزرگی بارش می‌باشند. بنابراین، منبع اصلی غیرخطی بودن فرآیند دبی احتمالاً از رفتار غیرخطی بودن فرآیندهای بارش و دما نشات گرفته می‌شود.

علاوه بر این، جهت برازش مدل‌های سری زمانی به منظور مدل‌سازی و پیش‌بینی دبی روزانه رودخانه‌های بالادست حوضه زرینه‌رود، به دلیل اینکه بیشتر ایستگاه‌ها ماهیت غیرخطی بودن را نشان دادند، از مدل‌های غیرخطی سری زمانی بایستی استفاده شود. البته لازم به ذکر است که بر اساس نتایج یافته شده از تحقیق می‌توان با لگاریتم‌گیری و استاندارد کردن داده‌ها از مدل‌های خطی سری‌های زمانی به منظور مدل‌سازی استفاده نمود. بدین منظور، ارزیابی عملکرد مدل‌های خطی و غیرخطی دبی روزانه رودخانه‌های مورد مطالعه به عنوان یکی از اهداف بعدی تحقیقات نویسندگان در حال انجام می‌باشد.

منابع

1- Brock W.A., Dechert W.D., Scheinkman J.A., and LeBaron B. 1996. A test for independence based on the correlation dimension, Econ Rev, 15 (3): 197- 235.
2- Chen H.L., and Rao A.R. 2003. Linearity analysis on stationarity segments of hydrologic time series, Journal Hydro, 277: 89- 99.
3- Cryer J.D., and Chan K.S. 2008. Time series analysis: with applications in R. Springer.
4- Dickey D.A., and Fuller W.A. 1979. Distribution of the estimators for autoregressive time series with a unit root, Journal Am. Stat. Assoc., 74: 423– 431.
5- Fathian F., Dehghan Z., Bazrkar M.H., and Eslamian S. 2014. Trends in hydrologic and climatic variables affected by four variations of Mann-Kendall approach in Urmia Lake basin, Iran, Hydrological Sciences Journal, doi: 10.1080/02626667. 2014.932911
6- Fathian F., Morid S., and Kahya E. 2015. Identification of trends in hydrological and climatic variables in Urmia Lake basin, Iran, Theoretical and Applied Climatology, 119(3-4): 443- 464.
7- Gimeno R., Manchado B., and Minguez R. 1999. Stationary tests for financial time series, Phys. A, 269: 72-78.

8- Grassberger P., and Procaccia I. 1983. Measuring the strangeness of strange attractors, Phys D, 9: 189- 208.
9- Hinich M.J. 1982. Testing for Gaussianity and linearity of a stationary time series, J Time Ser Anal, 3(3): 169-176.
10- Järas J., and Gishani A.M. 2010. Threshold Detection in Autoregressive Non-linear Models. Doctoral dissertation, Master Thesis: 15 ECTS, Lund University Department of Statistics.
11- Keenan D. 1985. A Tukey nonlinear type test for time series nonlinearities, Biometrika, 72: 39– 44.
12- Khalili K., Fakheri-Fard A., Dinpashoh Y., and Ghorbani M.A. 2011. Nonlinearity Testing of Stream Flow Processes by BDS Test (Case study: Shaharchi River in Urmia), Journal of Soil and Water, 21(2): 26-37. (In Persian)
13- Kim H.S., Kang D.S., and Kim J.H. 2003. The BDS statistic and residual test, Stochast Environ Res Risk Assess, 17: 104- 115.
14- Kwiatkowski D., Phillips P.C.B., Schmidt P., and Shin Y. 1992. Testing the null of stationarity against the alternative of a unit root: How sure are we that economic time series have a unit root? J. Econometrics, 54: 159–178.
15- Lettenmaier D.P., Wood A.W., Palmer R.N., Wood E.F., and Stakhiv E.Z. 1999. Water resources implications of global warming: A U.S. regional perspective, Clim. Change, 43: 537- 579.
16- Modarres R., and Ouarda T.B.M.J. 2012. Generalized autoregressive conditional heteroscedasticity modelling of hydrologic time series, Hydrological Processes, 27(22): 3174- 3191.
17- Modarres R., and Ouarda T.B.M.J. 2013. Testing and Modelling the Volatility Change in ENSO, Atmosphere-Ocean, 51(5): 561- 570.
18- Rao A.R., and Yu G.H. 1990. Gaussianity and linearity tests of hydrologic time series, Stoch Hydrol, 4: 121- 134.
19- Rogres W.F., and Zia H.A. 1982. Linear and nonlinear runoff from large drain basins, J Hydrol, 55: 267- 278.
20- Said S.E., and Dickey D. 1984. Testing for unit roots in autoregressive moving-average models with unknown order, Biometrika, 71: 599- 607.
21- Trapletti A., and Hornik K. 2014. tseries: Time series analysis and computational finance. R package version 0.10-32.
22- Wang W., Van Gelder P.H.A.J.M., and Vrijling J.K. 2005. Trend and stationarity analysis for streamflow processes of rivers in Western Europe in the 20th century, In Proceedings: IWA International Conference on Water Economics, Statistics, and Finance Rethymno, Greece (pp. 8-10).
23- Wang W., Vrijling J.K., Van Gelder P.H.A.J.M, and Ma J. 2006. Testing for nonlinearity of streamflow processes at different timescales, Journal of Hydrology, 322(1): 247- 268.
24- Wiener N. 1958. Nonlinear Problems in Random Theory, Cambridge, MA: MIT Press.

Journal of Water and Soil
Vol. 30, No. 4, Sept.-Oct. 2016, p. 1009-1024

نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)
جلد 30، شماره 4، مهر – آبان 1395، ص. 1024-1009

Testing for Stationarity and Nonlinearity of Daily Streamflow Time Series Based on Different Statistical Tests (Case Study: Upstream Basin Rivers of Zarrineh Roud Dam)

F. Fathian[1*]- A. Fakheri Fard[2]- Y. Dinpashoh[3]- S. S. Mousavi Nadoshani[4]

Received: 22-02-2015
Accepted: 30-08-2015

Introduction: Time series models are one of the most important tools for investigating and modeling hydrological processes in order to solve problems related to water resources management. Many hydrological time series shows nonstationary and nonlinear behaviors. One of the important hydrological modeling tasks is determining the existence of nonstationarity and the way through which we can access the stationarity accordingly. On the other hand, streamflow processes are usually considered as nonlinear mechanisms while in many studies linear time series models are used to model streamflow time series. However, it is not clear what kind of nonlinearity is acting underlying the streamflowprocesses and how intensive it is.

Materials and Methods: Streamflow time series of 6 hydro-gauge stations located in the upstream basin rivers of ZarrinehRoud dam (located in the southern part of Urmia Lake basin) have been considered to investigate stationarity and nonlinearity. All data series used here to startfrom January 1, 1997, and end on December 31, 2011. In this study, stationarity is tested by ADF and KPSS tests and nonlinearity is tested by BDS, Keenan and TLRT tests. The stationarity test is carried out with two methods. Thefirst one method is the augmented Dickey-Fuller (ADF) unit root test first proposed by Dickey and Fuller (1979) and modified by Said and Dickey (1984), which examinsthe presence of unit roots in time series.The second onemethod is KPSS test, proposed by Kwiatkowski et al. (1992), which examinesthestationarity around a deterministic trend (trend stationarity) and the stationarity around a fixed level (level stationarity). The BDS test (Brock et al., 1996) is a nonparametric method for testing the serial independence and nonlinear structure in time series based on the correlation integral of the series. The null hypothesis is the time series sample comes from an independent identically distributed (i.i.d.) process. The alternative hypothesis arenot specified. Keenan test has also been proposed for assessing the linearity or nonlinearitybehavior of a time series in time series analysis. Keenan (1985) derived a test for nonlinearity analogous to Tukey's degree of freedom for nonadditivity test. Keenan's test is motivated by approximation a nonlinear stationary time series by a second-order Volterra expansion. While Keenan's test for nonlinearity is designed for detecting quadratic nonlinearity, it may not be sensitive to threshold nonlinearity. Here, we applied the likelihood ratio test (TLRT) with the threshold model as the specific alternative.The null hypothesis of the TLRT approach for threshold nonlinearity is the fitted model to the series is an AR (p) model, and the alternative hypothesis is the fitted model to the series is a threshold autoregressive (TAR) model with autoregressive order p in each regime.

Results and Discussion: Because both the ADF and KPSS tests are based on linear regression, which has the normal distribution assumption, logarithmization can convert exponential trend possibly present in the data into a linear trend. In the case of stationary analysis, the results showed the standardized daily streamflow time series of all stations are significantly stationary. According to KPSS stationary test, the daily standardized streamflow time series are stationary around a fixed level, but they are not stationary around a trend stationaryin low lag values. Based on the BDS test, the results showed the daily streamflowseries have strong nonlinear structure, but based on the Keenan test, it can be seen the linear structure in thembyusing logarithmization and deseasonalization operators, and it means the coefficients of the double sum part are zero. It should be considered the Keenan test is used to detect quadratic nonlinearity, and it cannot be adequatelyfor threshold autoregressive models since they are linear in each regime.

1, 2 and 3- Ph.D. Student, Professor and Associate Professor of Water Resources Engineering, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Respectively
(*- Corresponding Author Email: farshad.fathian@tabrizu.ac.ir)
4- Assistant Professor of Water Resources Engineering, Faculty of Water and Environmental Engineering, Abbaspour School of Engineering, Shahid Beheshti University, Kerman

.

Conclusion: Streamflow processes of main rivers at 6 stations located in the southern partof Urmia Lake basin were investigated for testingthenonstationarity and nonlinearity behaviors. In general, streamflowprocesses have been considered as nonlinear behaviors. But, the type and intensity of nonlinearity have not been detected at different time scale due to the existence of several evaluation tests. In this study, all daily streamflow series appear to be significantly stationary and have the nonlinearity behavior. Therefore, to model the daily streamflow time series, linear and nonlinear models can be used and their results can be evaluated.

Keywords: Hydrological processes, Nonlinearity tests, Stationary tests, Time series modeling, Urmia Lake