

## بررسی رفتار مقیاسی و چندفرکتالی سری زمانی جریان روزانه رودخانه کشکان

حمید میرهاشمی\*<sup>۱</sup>، داریوش یاراحمدی<sup>۲</sup>

تاریخ دریافت: ۹۹/۰۲/۱۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۷/۲۴

۱- استادیار آب و هواشناسی گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه لرستان

۲- دانشیار آب و هواشناسی گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه لرستان

\*مسئول مکاتبات؛ پست الکترونیکی: mirhashemi.h@lu.ac.ir

### چکیده

جریان‌های رودخانه حاوی نوسان‌هایی با افت‌وخیزهای بسیار شدیدی هستند که به صورت فرایندهای ناپایستا و آشوبی رفتار می‌کنند. پیچیدگی رفتار چنین جریان‌هایی از طریق نمایه هرست استاندارد و نمایه هرست تعمیم‌یافته یا نمایه‌های مقیاس، قابل‌کشف و شناسایی هستند. در این مطالعه به منظور شناسایی خصوصیات چندفرکتالی رفتارهای مقیاسی و دینامیک پیچیده جریان رودخانه کشکان که از نوسان‌های بسیار شدیدی برخوردار است از تحلیل فرکتالی (DFA) و چندفرکتالی نوسان‌های روندزایی شده (MF-DFA) استفاده شد. نتایج حاصل از تحلیل نوسان‌های روندزایی شده (DFA)، نشان از وجود یک نقطه تلاقی با مقیاس زمانی ۳۴۸-۴۰۵ روز در سیگنال جریان روزانه رودخانه کشکان دارد که این فرایند وجود ساختار فرکتالی و رفتار متفاوت سری زمانی جریان این رودخانه را در مقیاس‌های زمانی متفاوت نشان می‌دهد. چنانکه، نمایه هرست ( $h=2$ ) مقیاس‌های زمانی کمتر از این مقیاس به مقدار  $1/12$  بدست آمد که بیانگر حافظه کوتاه‌مدت و ساختار ناپایدار این مقیاس‌های زمانی است در صورتی که سری‌های زمانی با مقیاسی بالاتر از این مقیاس، ساختار نسبتاً پایدار و ایستایی را نشان می‌دهند. وابستگی شدید و کاهش تدریجی نمایه هرست تعمیم‌یافته  $h(q)$  نسبت به درجه‌های گشتاور نوسان در بازه  $-5$  تا  $5$ ، از یک سو ماهیت چندفرکتالی و دینامیک پیچیده و از سوی دیگر، حافظه غیرخطی سیگنال جریان رودخانه کشکان را نشان می‌دهد. افزون بر این، ماهیت چندفرکتالی و مقیاس‌های چندگانه جریان این رودخانه برحسب رابطه غیرخطی بین نمایه جرم  $\tau(q)$  با درجه‌های گشتاور، نیز تأیید شد. پهنای زیاد و عدم تقارن طیف تکینگی، ضمن بیان شدت ساختار چندفرکتالی و دینامیک‌های متفاوت در سیگنال جریان رودخانه، نشان از عدم ترازمنندی وزن تأثیر نوسان‌های بزرگ و کوچک بر سیگنال جریان رودخانه دارد. بطوریکه کشیدگی دُم راست این طیف، اثر غالب نوسان‌های محلی با مقادیر کوچک را بر ساختار سری زمانی جریان رودخانه کشکان مشخص می‌کند.

واژه‌های کلیدی: کشکان، چندفرکتالی، طیف تکینگی، نمایه هرست، نوسان

## Analysis the Scale and Multi-fractal Behavior of Flow Daily Time Series in the Kashkan River

H Mirhasemi<sup>1\*</sup>, D Yarahmadi<sup>2</sup>

Received: April 29, 2020

Accepted: October 16, 2021

1- Assist. Prof. of Climatology, Geography Sciences Department, Lorestan University

2- Assoc. Prof. of Climatology, Geography Sciences Department, Lorestan University

\*Corresponding Author, Email: mirhashemi.h@lu.ac.ir

### Abstract

River flow contain fluctuations with very sharp ups and downs that act as unstable and chaos processes. The complexity of the behavior of such flow can be discovered and identified through the standard Hurst exponent and the generalized Hurst exponent or scale exponent. In this study, in order to identify the multi-fractal characteristics of large-scale and complex dynamics of Kashkan river flow, which has very strong fluctuations, multi-fractal detrended fluctuation analysis (MF-DFA) was used. The results of the detrended fluctuation analysis (DFA) show that there is one crossover with a time scale of 348-405 days in the daily signal of Kashkan river flow, which indicates the existence of fractal structure and different behavior of the time series of the river flow in different time scales. The Hurst exponent ( $h = 2$ ) of small scales was 1.12, which indicates short-term memory and unstable structure of these time scales, while time series with a scale higher than this scale have a relatively stable structure. The strong dependence and gradual decrease of the generalized Hurst exponent on the degrees of fluctuation ( $q$ -order RMS) in the range of -5 to 5, on the one hand, shows the complex multi-fractal nature and dynamics, and on the other hand, the nonlinear memory of the Kashkan river flow signal. In addition, the multi-fractal nature and multiple scales of the river flow were confirmed in terms of the nonlinear relationship between mass exponent ( $tq$ ) and  $q$ -order. The large width and asymmetry of the singularity spectrum, while expressing the intensity of the multi-fractal structure and different dynamics in the river flow signal, indicate the weight imbalance of the effect of large and small fluctuations on the river flow signal. The right tail elongation of this spectrum indicates the predominant effect of local fluctuations with small values on the structure of the Kashkan river flow time series.

**Keywords:** Fluctuation, Hurst exponent, Kashkan river, Multi-fractal, Singularity spectrum

### مقدمه

الگوهای مقیاسی از جریان رودخانه می‌تواند کمک شایانی به مدل‌سازی (رودریگز و رینالدو ۲۰۰۱) و انتخاب روش مناسب برای پیش‌بینی رفتار آبی رودخانه و پایستگی اکو - هیدرولوژی باشد (ژانگ و همکاران ۲۰۰۹). همچنین، خصوصیات مقیاسی می‌توانند مکانیزم‌های فیزیکی و دینامیکی پدیده‌های هیدرولوژی را به خوبی منعکس کنند (کستندر و ارنندو ۲۰۰۸). به طوری که تبیین مکانیزم‌های درون سری زمانی جریان رودخانه، به‌عنوان مهمترین مسیر برای درک دینامیک پیچیده جریان

سری‌های زمانی جریان رودخانه هم به سبب ماهیت درهم‌تنیده حوضه آبخیزی که در آن جریان دارد و هم به سبب تأثیرپذیری از فرایندهای هیدرو - اقلیمی گوناگونی که هرکدام در مقیاس زمانی متفاوتی عمل می‌کنند، اغلب از ساختار دینامیکی بسیار پیچیده‌ای برخوردارند. چنانکه سیگنال جریان رودخانه ممکن است در یک سطح از مقیاس زمانی، فرایند کاملاً تصادفی را نشان دهد و در مقیاس زمانی دیگر، به‌صورت منظم و کاملاً غیرتصادفی رفتار کند. بنابراین، شناخت چنین

از روندها تشخیص دهد (مونتانری ۲۰۰۳، کانتل هادرت و همکاران، ۲۰۰۶، لدسشر و همکاران، ۲۰۱۱). برحسب موارد یادشده، پنگ و همکاران (۱۹۹۸) روش تحلیل نوسان‌های روندزادایی شده تک‌فرکتالی را برای سنجش وابستگی‌های بلندمدت و ارزیابی ویژگی‌های مقیاسی، حتی در صورت وجود روند در سیگنال‌ها، ارائه دادند. این رویکرد، باهدف بررسی خصوصیات مقیاس فرکتالی و همبستگی‌های بلندمدت جریان رودخانه به‌طور وسیعی بکار گرفته شده است (ماتسیوکاس و همکاران ۲۰۰۰، کسلینی و همکاران ۲۰۰۰، کانتل هادرت ۲۰۰۶، لیوینا و همکاران ۲۰۱۱، حکمت‌زاده و همکاران ۲۰۲۰). اگرچه این روش برای تبیین بسیاری از سیگنال‌ها مناسب بوده اما این روش نمی‌تواند برای ارزیابی رفتار مقیاسی توزیع احتمال در سری‌های زمانی استفاده شود زیرا با محدودیت ارزیابی اطلاعات تکراری مواجه‌اند. به این عنوان که این مدل‌ها فقط یک نمای کلی از فرایند را ارائه می‌دهند بدون اینکه ویژگی‌های جزئی را در نظر بگیرند (اعلمی و همکاران ۲۰۱۵). همچنین، در برخورد با سیگنال‌های پیچیده که از ساختاری نایستا و غیرخطی برخوردارند، دقت و اطلاعات چندان سودمندی را نشان نمی‌دهد. به طوری که این روش در برخورد با سیگنال‌هایی که دارای حافظه کوتاه‌مدت هستند ممکن است از دقت کمتری نسبت به زمانی برخوردار باشد که سیگنال‌ها دارای حافظه بلندمدت و یا بدون حافظه‌اند (کانتل هادرت و همکاران ۲۰۰۳، خی و همکاران ۲۰۰۵). از سویی، این روش برای سنجش رفتار مقیاسی سری‌های زمانی، تنها از یک نمایه منفرد (گشتاور دوم) استفاده می‌کند که برای تشریح کامل رفتار مقیاسی و کشف خصوصیات چندفرکتالی سری‌های زمانی جریان رودخانه که از نوسان‌های کوچک و بزرگ برخوردارند ناکافی است (کسلینی و همکاران ۲۰۰۶): بنابراین ضرورت داشت تا سایر گشتاورها نیز محاسبه شوند. بنابراین برای آگاهی کامل به رفتار مقیاسی و دینامیک پیچیده جریان رودخانه، کنتل هادرت و همکاران (۲۰۰۲) با

آب و سیر زمانی آن به شمار می‌رود. تاکنون، برای آگاهی و درک رفتار مقیاسی و تغییرپذیری دینامیکی بسیاری از پدیده‌های ژئو-فیزیکی، هیدرو-اقلیمی (نوری قیداری و همکاران ۲۰۱۲ و ۲۰۱۵، اعلمی و همکاران ۲۰۱۵، ادرش و همکاران ۲۰۱۹، کالامارس و همکاران ۲۰۱۹، لوسادو و همکاران ۲۰۲۰)، پزشکی (باربی و همکاران ۱۹۹۸، ایوانو و همکاران ۲۰۰۱، اهلن ۲۰۱۴، فن و همکاران ۲۰۱۹) و اجتماعی-اقتصادی (دی‌متتو و همکاران ۲۰۰۳، شانگ و همکاران، ۲۰۰۸، گاؤ و همکاران ۲۰۱۶، تیواری و همکاران ۲۰۱۹)، مطالعه‌های گسترده‌ای انجام شده است. این مطالعه‌ها، همگی تأکید بر رفتار مقیاسی و ماهیت فرکتالی سیگنال‌های تحت‌بررسی داشته‌اند و نتیجه گرفته‌اند که اغلب این سیگنال‌ها دارای ساختار فرکتالی - چندفرکتالی هستند.

تبیین رفتارهای مقیاسی، با مطالعه حافظه بلندمدت جریان رودخانه نیل توسط هرست (۱۹۵۱) شروع شده است. برای نخستین بار، هرست (۱۹۵۱) با تحلیل دامنه - مقیاس، رفتار مقیاسی و حافظه بلندمدت جریان رودخانه نیل را تبیین و نمایه هرست را به‌عنوان شاخصی برای مطالعه رفتار مقیاسی معرفی کرد. مطالعه هرست، اولین گام در راستای شناسایی رفتار مقیاسی سیگنال‌هایی بود که اصولاً از هندسی ناقلیدوسی پیروی می‌کنند. یافته‌های هرست به عنوان اولین نمونه رفتار فرکتالی در سری‌های زمانی پذیرفته شده است (فیدر ۲۰۱۳). البته بسیاری از مطالعه‌ها نشان داده‌اند که کاربرد رویکرد هرست در صورت وجود روند در سری‌های زمانی، منجر به نتایج کاذبی خواهد شد (باتچری و همکاران ۱۹۸۳، مسا و پودا ۱۹۹۳). به عبارتی، این نمایه ممکن است یک همبستگی بلندمدت کاذب را برای سری‌های زمانی ناهمبسته‌ایی که تحت تأثیر روندهای یکنواخت قرار دارند، نشان دهد (باتچری و همکاران ۱۹۸۳، هیو و همکاران ۲۰۰۱). رویکرد هرست، باتوجه به محدودیت پوشش زمانی سیگنال‌های جریان رودخانه، به سختی می‌تواند حافظه سری زمانی را

۱- شناسایی رفتار مقیاسی و کشف دینامیک ساختار جریان روزانه رودخانه کشکان، ۲- کشف رژیم‌های مقیاسی متفاوت جریان روزانه رودخانه کشکان، ۳- شناسایی اثر نوسان‌های بزرگ و کوچک بر ساختار سری زمانی جریان روزانه رودخانه کشکان، ۴- شناسایی ماهیت چندفرکتالی سری زمانی جریان رودخانه کشکان.

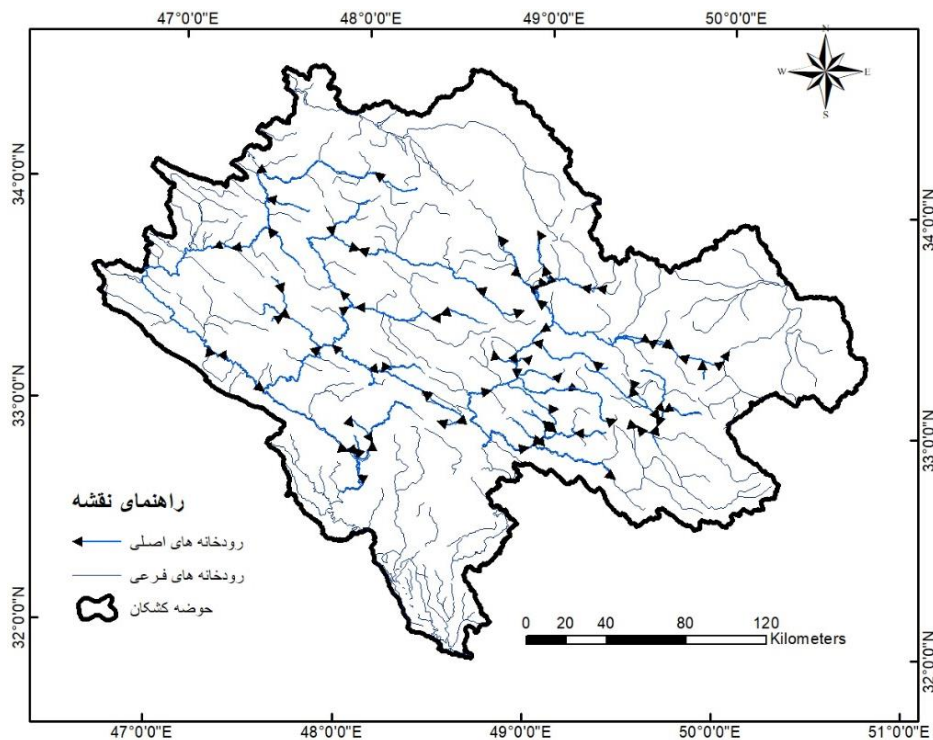
### مواد و روش‌ها

#### خصوصیات اقلیمی منطقه

موقعیت مطلق، نسبی (شکل ۱) و توپوگرافی متنوع حوضه آبریز رودخانه کشکان موجب شده تا شرایط آب و هوایی متنوعی در این حوضه شکل بگیرد چنانکه عناصر اقلیمی این حوضه از تغییرپذیری زمانی - مکانی نسبتاً شدیدی برخوردارند. بارش با میانگین ۴۰۴ میلی‌متر به عنوان متغیرترین عنصر هواشناختی در سطح حوضه به شمار می‌رود. در این خصوص کمترین مقدار بارش سالانه حوضه در مناطق غربی (۳۱۰ میلی‌متر) و جنوبی (۳۶۹ میلی‌متر) و بیشترین بارش در مناطق شمالی (۴۷۳ میلی‌متر) و میانی (۴۶۳ میلی‌متر) حوضه اتفاق می‌افتند. بررسی توزیع زمانی بارش حوضه کشکان نیز حاکی از تمرکز بارش این حوضه به ترتیب در فصل‌های زمستان، پاییز و بهار بوده و در فصل تابستان، بارش به ندرت رخ می‌دهد. میانگین دما حوضه برابر با ۱۹ درجه سانتی‌گراد حساب شد.

بسط گشتاور دوم به  $q$  آمین درجه گشتاور (گشتاورهای کوچک تا بزرگ)، نسخه چندفرکتالی این رویکرد را تحت‌عنوان تحلیل چندفرکتالی نوسان‌های روندزدایی‌شده، پیاده کردند. به عبارتی در این نسخه، نمایه هرست را به نمایه هرست تعمیم‌یافته گسترش دادند. این رویکرد، تعمیمی از روش تحلیل نوسان‌های روندزدایی‌شده استاندارد است که گشتاورهای  $q$  آمین درجه سری زمانی را اگر نالیستا هم باشد شناسایی می‌کند (کنترل هاردت و همکاران ۲۰۰۲). همچنین، این روش به طور سیستماتیک قادر است بین همبستگی‌های بلندمدت و روندها، تمایز قائل شود (کسیلینی و همکاران ۲۰۰۶ و کنترل هاردت و همکاران ۲۰۰۶). بنابراین این روش حاوی اطلاعات بسیار بیشتری در مورد سری‌های زمانی بوده و در تشریح فرایندهای ناهمگن از موفقیت بیشتری برخوردار است (یان و همکاران ۲۰۱۹).

رودخانه کشکان یکی از مهمترین رودخانه‌های واقع در غرب ایران است که به عنوان یکی از شاخه‌های اصلی رودخانه بزرگ کرخه به شمار می‌رود. سیگنال سری زمانی این رودخانه، نوسان‌های روزانه بسیار بزرگ تا بسیار کوچکی را تجربه کرده است. چنانکه در برخی زمان‌ها حاوی طغیان‌های بسیار شدیدی بوده (بیش از ۴۰۰۰ متر مکعب بر ثانیه) که خسارات جانی - مالی فراوانی را موجب شده و در زمان‌های دیگر تا مرز خشک‌شدن (کمتر از یک متر مکعب بر ثانیه) پیش رفته است. بنابراین هدف از انجام این مطالعه عبارت است از:



شکل ۱- نقشه موقعیت و محدوده حوضه آبریز رودخانه کشکان (ایستگاه هیدرومتری کشکان - پلدختر).

که باید از نوسان‌های ذاتی - طبیعی سری زمانی، تمییز داده شوند. در بسیاری از موارد، این نوسان‌ها به صورت فرایندهای نالیستا عمل می‌کنند. در نتیجه، روش‌های معمول تحلیل داده‌ها، نتایج غیرواقعی و کاذبی را ارائه می‌دهند (حاجیان و موحد ۲۰۱۰). از سویی، تحلیل چندفرکتالی نوسان‌های روندزدایی شده به عنوان یکی از شناخته‌شده‌ترین روش‌های مورداستفاده در تحلیل چنین سری‌های زمانی محسوب می‌شود (پنگ و همکاران ۱۹۹۵، کانتل‌هاردت و همکاران ۲۰۰۲). چنانکه فرکتال یک ساختار مناسب را برای مدل‌سازی دقیق‌تر آشفتگی‌ها و تغییرات دوره‌ای مهیا می‌کند. بنابراین در این مطالعه به‌منظور شناسایی رفتار مقیاسی و دینامیک ساختار سری زمانی جریان روزانه رودخانه کشکان از روش تحلیل چندفرکتالی نوسان‌های روندزدایی‌شده استفاده شد. بنابراین با در نظرگیری سری زمانی جریان روزانه رودخانه کشکان به صورت:  $x(k)$  که  $k = 1, 2, \dots, N$  (طول سری زمانی جریان رودخانه) اجرای این رویکرد

توزیع مکانی دمای هوا در سطح حوضه به ترتیبی است که دمای هوا به تدریج از شمال به جنوب حوضه افزایش پیدا می‌کند چنانکه مقدار دمای سالانه بخش‌های جنوبی حوضه به طور میانگین ۱۰ درجه سانتی‌گراد بالاتر از بخش‌های شمالی آن است. در این راستا متوسط فراوانی روزهای یخبندان در بخش‌های شمالی حوضه به ۱۱۰ روز در سال می‌رسد، در حالی که بخش‌های جنوبی حوضه به طور متوسط سالانه تنها یک روز همراه با یخبندان را تجربه می‌کنند.

داده‌های مورداستفاده در این مطالعه شامل مقادیر دبی روزانه رودخانه کشکان با پوشش زمانی ۱۳۶۱-۱۳۹۳ هستند که در ایستگاه آب‌سنجی پلدختر - کشکان واقع در پایاب این رودخانه اندازه‌گیری شده‌اند. این داده‌ها از شرکت سهامی آب منطقه‌ای استان لرستان اخذ شدند.

معمولاً سری‌های زمانی اندازه‌گیری‌شده طبیعی، تحت تأثیر نالیستایی، روند و نویز مصنوعی قرار دارند

لگاریتم بر مبنای ۲ پیدا کرده‌اند که مناسب روش فرکتالی و چندفرکتالی است.

گام سوم: محاسبه روند محلی هرکدام از زیرسیگنال‌های  $N_s$ ، از طریق برازش حداقل مربعات  $Y_v$  (خط برازش در بخش  $v$  است) به سری‌های زمانی و آنگاه با کسر داده‌ها از این روندهای محلی، نیمرخ  $Y(i)$  روندزایی شد و در ادامه نوسان محلی  $F^2(s, v)$  هر بخش  $v = 1, \dots, N_s$  با استفاده از رابطه ۳ تعیین شد.

$$F^2(s, v) = \frac{1}{s} \sum_{i=1}^s \{Y[(v-1)s+i] - y_v(i)\}^2 \quad [۳]$$

در فرایند برازش چندجمله‌ای به هر زیرسیگنال، مرتبه چندجمله‌ای باتوجه به توان رفع روند مشخص می‌شود. در این گام: رابطه قانون توانی بین نوسان کلی و مقیاس‌های زمانی  $s$  از طریق تحلیل تکفرکتالی نوسان‌های روندزایی شده تعریف شده که نمایه هرست  $H$  نامیده می‌شود. ازسویی، تحلیل چندفرکتالی نوسان‌های روندزایی از طریق بسط  $q$  آمین درجه گشتاور تابع نوسان کلی بدست می‌آید. به ترتیبی که تابع نوسان محلی  $q$  آمین درجه گشتاور، بخش‌هایی با نوسان کوچک را از بخش‌هایی با نوسان بزرگ تمییز می‌دهد. بنابراین رابطه قانون توانی بین نوسان محلی  $q$  آمین درجه به‌عنوان نمایه هرست تعمیم یافته  $h(q)$  تعریف می‌شود.

در گام چهارم: بامیانگین‌گیری تابع نوسان بر روی همه بخش‌ها، تابع نوسان مرتبه  $q$  آمد بدست آمد (رابطه ۴).

$$F_q(s) = \left\{ \frac{1}{N_s} \sum_{v=1}^{N_s} [F^2(s, v)]^{q/2} \right\}^{1/q} \quad [۴]$$

ازسویی، کمیت  $q$  را می‌توان با هر مقدار حقیقی (غیرموهومی) به غیر از صفر مقداردهی کرد (موحد و همکاران ۲۰۰۶). بنابراین در این مطالعه،  $q$  با مقادیر ۵ تا ۵- با گام افزایشی ۰/۱ مقداردهی شد. شایان ذکر است که  $q = 2$  همان نمایه تحلیل تکفرکتالی نوسان‌های روندزایی شده است. برای تعیین رابطه بین میانگین

در ۵ گام به ترتیب زیر انجام گرفت. گام اول: تعیین انحراف تجمعی سری زمانی با استفاده از رابطه ۱ به‌صورت نیمرخ  $Y(i)$  که  $\langle X \rangle$  میانگین سری زمانی  $X_k$  برحسب مترمکعب بر ثانیه است (کنترل‌هاردت و همکاران ۲۰۰۶).

$$Y(i) = \sum_{k=1}^i (x_k - \langle X \rangle), \quad i = 1, \dots, N \quad [۱]$$

گام دوم: تقسیم نیمرخ  $Y(i)$  به تعداد  $N_s = \text{int}(N/S)$  زیرسیگنال ناهمپوشان که هرکدام دارای مقیاس  $S$  روز هستند که در آن  $S$ : از رابطه ۲ محاسبه شد. بدین ترتیب سیگنال جریان آب رودخانه کشکان به ۳۰ زیرسیگنال با مقیاس‌های زمانی متفاوت (از ۲۰ روز تا ۲۰۰۰ روز) تقسیم بندی شد.

$$S_j = [S_1^{i_1}, S_2^{i_1+0.229}, S_3^{i_1+0.229}, \dots, S_n^{i_1+0.229}], \quad [۲]$$

$$i = (4.322), S_{1:n} = 2$$

در رابطه ۲، متغیرهای  $S$  اندازه سری زمانی ناهمپوشان هستند که اندیس پایین (عدد) نشان‌دهنده شماره مقیاس زمانی و اندیس بالا یا رونویس معرف مقدار توان است. این سری‌های زمانی بدین ترتیب محاسبه شده‌اند که مقدار پایه، همواره برابر با عدد ۲ است ولی مقدار توان که به صورت  $i$  اندیس‌دار معرفی شده به تدریج افزایش پیدا می‌کند که به عبارتی نشان‌دهنده افزایش تدریجی اندازه سری‌های زمانی است. بنابراین اندازه اولین مقیاس از سری زمانی برابر با  $S_1^{i_1} \rightarrow 2^{4.322} = 20$  و مقدار توان دومین  $(i_1)$ ، سومین  $(i_2)$ ، چهارمین  $(i_3)$  و... مقیاس زمانی به صورت:

بدست  $i_1 = i, \quad i_2 = i_1 + 0.229, \quad i_3 = i_2 + 0.229$  آمده‌اند که دومین، سومین، چهارمین و... آخرین مقیاس زمانی به ترتیب برابر با:

$S_2^{4.55} \rightarrow 27, S_3^{4.78} \rightarrow 32, S_3^5 \rightarrow 38, \dots, S_{30}^{10.966} \rightarrow 2000$  حساب شدند. در نتیجه مقیاس‌های زمانی که به این ترتیب و با چنین فاصله توانی تولید شده‌اند، آرایشی به صورت

برای سری‌های زمانی تک فرکتالی،  $h(q)$  مستقل از  $q$  بوده، چراکه رفتار مقیاسی واریانس  $F_q(s)$  برای همه بخش‌های  $v$  یکسان است. در صورتی که اگر مقیاس نوسان‌های کوچک و بزرگ، متفاوت باشد، آنگاه  $h(q)$  به  $q$  وابسته خواهد شد (شانگ و همکاران ۲۰۰۸)، بنابراین اگر مقادیر مثبت  $q$  بررسی شوند، بخش‌های  $v$  با نوسان بزرگ، مقدار میانگین  $F_q(s)$  را تعیین خواهند کرد. به این ترتیب، نمایه  $h(q)$  مقادیر مثبت  $q$ ، رفتار مقیاسی بخش‌های با نوسان‌های بزرگ را تبیین می‌کند. برای مقادیر منفی  $q$ ، بخش‌های با نوسان کوچک، مقدار میانگین  $F_q(s)$  را مشخص می‌کنند. بنابراین نمایه  $F_q(s)$  مقادیر منفی  $q$ ، رفتار مقیاسی بخش‌های با نوسان کوچک را تبیین می‌کند (کنترل‌هاردت ۲۰۰۱، و موحد و همکاران ۲۰۰۶). اگر نمودار لگاریتمی در مقابل  $s$  برازش داده شود، شیب خط حاصله، نمایه هرست تعمیم‌یافته نام دارد که در صورت وابسته‌بودن این نمایه هرست تعمیم‌یافته به  $q$ ، سری زمانی موردنظر از ماهیت چندفرکتالی برخوردار بوده و در غیر این صورت دلالت به ماهیت تکفرکتالی سری زمانی مربوطه دارد.

نمایه هرست تعمیم‌یافته  $h(q)$  تنها یکی از چندین نمایه مقیاس برای پارامترسازی ساختار چندفرکتالی سری‌های زمانی به شمار می‌رود. چندین نمایه مقیاس دیگر شامل نمایه جرم  $\tau(q)$ :  $q$  اُمین درجه (رابطه ۶)، نمایه تکینگی  $\alpha$  (رابطه ۷) و بُعد تکینگی  $f(\alpha)$ ،  $q$  اُمین درجه (رابطه ۸) و طیف تکینگی را می‌توان در این خصوص برشمرد که برای شناسایی و کشف خصوصیات چندفرکتالی سری‌های زمانی جریان رودخانه بسیار سودمنداند. محاسبه این نمایه‌ها به این ترتیب است که نخست نمایه هرست تعمیم‌یافته  $h(q)$  به نمایه جرم  $\tau(q)$ :  $q$  اُمین درجه تبدیل شده (رابطه ۵) و آنگاه  $\tau(q)$  به نمایه تکینگی  $\alpha$  (رابطه ۶) و بُعد تکینگی  $f(\alpha)$  (رابطه ۷)  $q$  اُمین درجه تبدیل خواهد شد

نوسان و اندازه سری زمانی، گام‌های ۲ تا ۳ برای تمامی مقیاس‌های زمانی تکرار می‌شوند. معمولاً تابع توان با افزایش مقیاس، افزایش می‌یابد. رابطه خطی بین این دو، حضور مقیاس قانون توانی و فرکتال را نشان می‌دهد (لیبت و همکاران ۲۰۱۱).

برای مشخص کردن رابطه بین  $F_q(s)$  با  $s$ ، رابطه ۳ برای تمامی مقیاس‌های زمانی  $s$  محاسبه شد. در گام ۵: با ترسیم نمودار لگاریتمی  $F_q(s)$  هر  $q$  مرتبه در مقابل مقیاس  $s$ ، رفتار مقیاسی توابع نوسان تعیین شد. در این خصوص، اگر سری‌های زمانی  $x_i$  به صورت قانون توانی همبسته باشند آنگاه  $F_q(s)$  به پیروی از قانون توانی با افزایش  $s$  افزایش پیدا می‌کند (کنترل هاردت و همکاران ۲۰۰۶، لی و همکاران ۲۰۱۵ و یان و همکاران ۲۰۱۹).

$$F_q(s) \propto s^{h(q)} \quad [5]$$

برای سری‌های زمانی ایستا، نمایه  $h(2)$  به صورت  $0 < h(2) < 1$  بوده در این صورت  $h(2)$  متناظر با نمایه شناخته شده هرست  $H$  است (تاکو و همکاران ۱۹۹۵ فیدر ۲۰۱۳). در حالی که در سیگنال‌های نایستا، نمایه  $h(2)$  به صورت  $h(2) > 1$  بوده (ایک و همکاران ۲۰۰۲) که بدین ترتیب رابطه آن با نمایه هرست، به صورت  $H = h(2) - 1$  معین می‌شود (هیو و همکاران ۲۰۰۱ و موحد و همکاران ۲۰۰۶). به طور کلی تابع  $h(q)$  به عنوان نمایه هرست تعمیم یافته نامیده می‌شود (کنترل‌هاردت و همکاران ۲۰۰۲).

در سری‌های زمانی مقیاس کوچک که اثر روند سینوسی قابل توجه نیست،  $h(2) > 1$  نایستایی سری زمانی را نشان می‌دهد (موحد و همکاران ۲۰۰۶). از سویی، مشخص شده که نمایه هرست برابر با  $0.5$  مبین ناهمبسته‌بودن سری زمانی، مقادیر  $0 < H < 0.5$  حافظه کوتاه‌مدت یا ناپایداری سری زمانی و  $0.5 < H < 1$  حافظه بلندمدت یا پایداری سری زمانی را نشان می‌دهند (زانگ و همکاران ۲۰۰۹).

آمد (جدول ۱). این ویژگی، نشان از جابه جای جرم احتمال داده‌ها به سمت دم‌های منحنی توزیع دارد. چنین الگوی در جریان رودخانه کشکان، مبین رخداد جریان‌های نادر است. به طور کلی، سیگنال جریان رودخانه کشکان افزون بر نوسان شدید، انحراف شدیدی نسبت به توزیع نرمال داشته و توزیعی نامتقارن با دم‌های کلفت را پدید می‌آورد. از آنجاکه، پدید آمدن دم‌های کلفت در توزیع داده‌ها و همبستگی بلندمدت و یا همبستگی‌های متفاوت در نوسان‌های مقیاس کوچک و مقیاس بزرگ به‌عنوان دو منبع رفتار فرکتالی در سیگنال‌های سری زمانی قلمداد شده‌اند (کنترل‌هاردت و همکاران ۲۰۰۲، موحد و همکاران ۲۰۰۶)، در ادامه، به شناسایی و کشف رفتارهای فرکتالی و چندفرکتالی سری زمانی جریان رودخانه کشکان پرداخته می‌شود.

نمایش نیمرخ تجمعی انحراف جریان از مقدار میانگین بلندمدت (رابطه ۱) به همراه تابع روند محلی نشان از وجود دو روند کلی در جریان رودخانه کشکان دارد. هرچندکه، آهنگ تغییر در قالب این دو روند کلی، از نوسان‌ها و شدت‌های محلی متفاوتی برخوردارند. در نیمه اول دوره زمانی مورد مطالعه، جریان رودخانه با برخورداری از روند صعودی، نوسان محلی بیشتری نسبت به نیمه دوم (دوره کاهش) نشان می‌دهد (شکل ۲).

کنترل‌هاردت و همکاران (۲۰۰۲). شایان توجه است که شکل منحنی طیف تکینگی نیز حاوی اطلاعات سودمندی در مورد خصوصیات توزیع و محتوای تکینگی سری زمانی است.

$$\tau(q) = qh \times (q) - 1 \quad [6]$$

$$\alpha = \frac{d\tau(q)}{dq} \quad [7]$$

$$f(\alpha) = q\alpha - \tau(q) \quad [8]$$

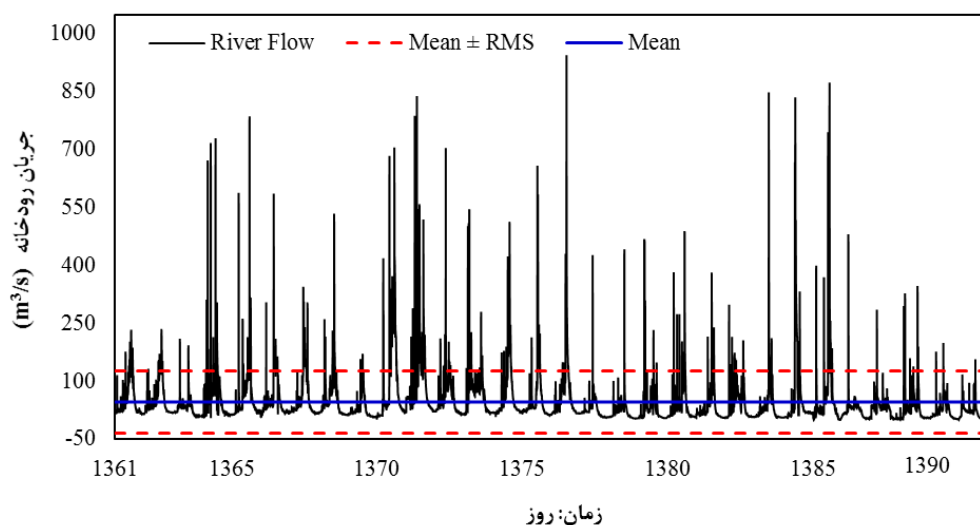
### نتایج و بحث

ارزیابی سری زمانی جریان روزانه رودخانه کشکان نشان از افت و خیز شدید جریان این رودخانه با میانگین نوسان  $80 \text{ m}^3 \text{ day}^{-1}$  دارد. در این خصوص،  $85/75$  و  $14/25$  درصد از تعداد روزهای آماری، به ترتیب مقدار جریانی کمتر و بیشتر از میانگین نوسان کلی (RMS) که  $(RMS = \sqrt{\text{Mean}(\text{Rain flow})^2})$  داشته‌اند (شکل ۲). نگاشت سیگنال سری زمانی جریان رودخانه ضمن پراکندگی شدید، چولگی شدیدی به مقدار  $4/9$  را برای جریان رودخانه نشان می‌دهد. بدین ترتیب، احتمال رخداد جهش‌های بزرگ جریان آب در این سیگنال فراتر از مقادیری است که توزیع نرمال نشان می‌دهد. همچنین، کشیدگی سری زمانی جریان رودخانه، به مقدار  $36$  بدست

جدول ۱- ویژگی‌های آماری جریان روزانه رودخانه کشکان. ایستگاه آب‌سنجی کشکان - پلدختر (۱۳۹۳-۱۳۶۱).

کشیدگی	چولگی	بیشینه ( $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$ )	کمینه ( $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$ )	ضریب تغییرات (بدون بُعد)	انحراف معیار ( $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$ )	میانگین ( $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$ )	دامنه تغییرات ( $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$ )
۳۶	۴/۹	۹۴۵	۰/۰۱	۱۴۲/۷	۶۵/۷	۴۶	۹۴۴/۹۹





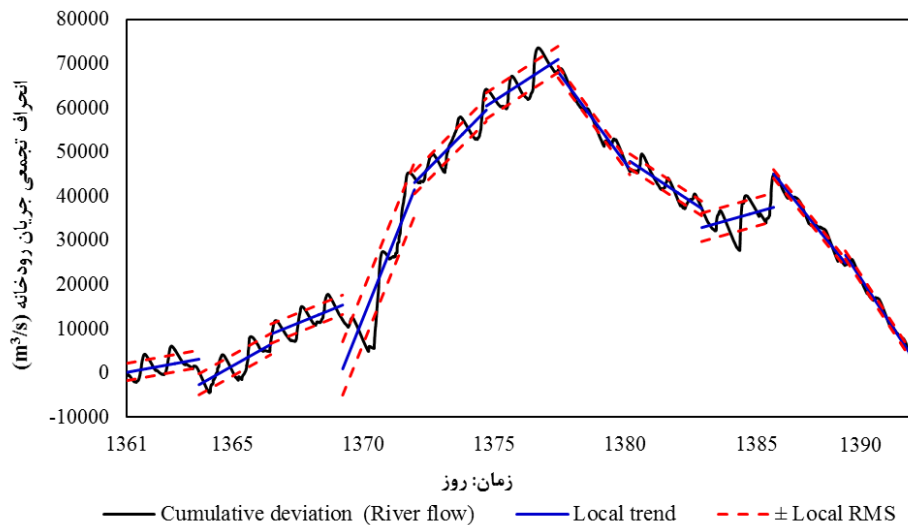
شکل ۲- سری زمانی جریان روزانه رودخانه کشکان، ایستگاه آبسنجی کشکان - پلدختر (۱۳۹۳-۱۳۶۱).

نوسان‌های روندزادایی شده (DFA) بر روی این زیرسیگنال‌ها اجرا شد. ترسیم نمودار لگاریتمی نوسان کلی حاصل از این روش در مقابل مقیاس سری زمانی نشان می‌دهد که نوسان محلی جریان رودخانه، هم‌گام با افزایش مقیاس سری زمانی، افزایش پیدا می‌کند. این فرایند، رفتار مقیاسی جریان رودخانه کشکان را نشان می‌دهد (شکل ۴). نمایه هرست (H) که به‌عنوان رابطه قانون توانی بین نوسان محلی در مقیاس‌های چندگانه محسوب می‌شود به مقدار  $0.95$  بدست آمد که به وجود حافظه بلندمدت در سری زمانی جریان رودخانه کشکان دلالت دارد. در این خصوص، یاراحمدی و میرهاشمی (۲۰۱۷) در مطالعه‌ای با ارزیابی سیگنال جریان رودخانه کشکان بر وجود حافظه بلندمدت این رودخانه نیز تأکید داشته‌اند. فرزین و همکاران (۲۰۱۹) نیز به وجوه دینامیکی و حافظه بلندمدت سیگنال جریان رودخانه خرم‌آباد که یکی از سرشاخه‌های مهم رودخانه کشکان است اشاره کرده‌اند. البته در این دو مطالعه، از روش مرسوم هرست به نام دامنه مقیاس و سیگنال‌های با مقدار میانه  $500$  و گام افزایشی  $10$  روز استفاده شده بود. به طور کلی، وجود حافظه و همبستگی‌های بلندمدت به‌عنوان عاملی مهمی در پدیدآمدن ساختار فرکتالی جریان رودخانه کشکان به

میانگین نوسان کلی برای دوره اول و دوم به ترتیب برابر با  $91$  و  $65$  متر مکعب برآورد شد. به طور کلی، جریان رودخانه کشکان از نوسان‌های محلی متفاوتی برخوردار بوده که آهنگ تغییر این نوسان‌ها نیز بسیار متفاوت است. به عبارتی، شیب تابع روند نوسان‌ها نشان می‌دهد رودخانه کشکان از نوسان‌های سریع و کندی برخوردار بوده که ممکن است مقدار این نوسان‌ها به سبب میانگین‌گیری، به‌طور بهینه‌ای در نوسان کلی انعکاس پیدا نکنند. بنابراین شناخت کامل رفتار جریان این رودخانه مستلزم کشف و استخراج این نوسان‌ها است که این فرایند با بخش‌بندی سری‌زمانی به بخش‌های ناهمپوشان با مقیاس‌های زمانی متفاوت می‌تواند به‌عنوان یک روش مناسب برای دستیابی به رفتار مقیاسی جریان رودخانه باشد.

شایان ذکر است، نوسان‌هایی که با سرعت تغییر می‌کنند، میانگین نوسان کلی را در سری‌های زمانی کوچک و نوسان‌هایی که به آهستگی تغییر می‌کنند، میانگین نوسان کلی را در سری‌های زمانی بزرگ تحت تاثیر قرار می‌دهند. بنابراین با استفاده از رابطه ۲، سیگنال جریان روزانه رودخانه کشکان به  $30$  سری زمانی با مقیاس‌های کوچک - بزرگ تقسیم شد آنگاه تحلیل

شمار می‌روند.

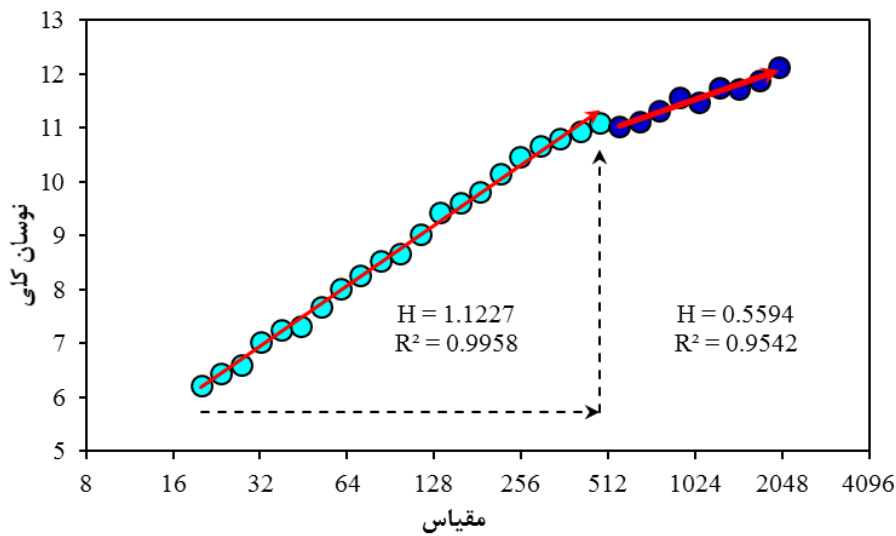


شکل ۳- سیگنال انحراف تجمعی به همراه نوسان و تابع خط روند محلی جریان رودخانه کشکان. (۱۳۶۱-۱۳۹۳)

مقیاسی گوناگونی هستند. به عبارتی، نقطه تلاقی از تغییر در خصوصیات همبستگی سیگنال سری زمانی در مقیاس‌های زمانی مختلف پدید می‌آید. بنابراین، بررسی رفتار مقیاسی پیچیده جریان رودخانه کشکان مستلزم محاسبه سایر گشتاورهای سری زمانی است.

به‌منظور شناسایی خصوصیات آماری نوسان‌های جریان رودخانه در رابطه با این نقطه تلاقی، گشتاور دوم مقیاس‌های زمانی کوچک یعنی پایین‌تر از نقطه تلاقی و مقیاس‌های زمانی بالاتر از نقطه تلاقی محاسبه شد. مقدار این آماره برای مقیاس‌های کوچک به مقدار  $1/12$  و برای مقیاس‌های زمانی بزرگ‌تر به مقدار  $0/56$  بدست آمد (شکل ۴). این مقادیر، دلالت بر نایستایی سیگنال جریان رودخانه در مقیاس‌های کوچک دارد. بنابراین باتکیه بر رابطه بین نمایه هرست و گشتاور دوم برای مقیاس‌های زمانی کوچک، نمایه هرست به مقدار  $0/12$  محاسبه شد که نشان از حافظه کوتاه‌مدت و ناپایداری شدید نوسان‌ها در مقیاس کوچک دارد. بنابراین، نوسان‌های کوچک مقیاس، افزون بر نایستایی از حافظه کوتاه‌مدت نیز برخوردارند. برحسب نتایج یادشده، قابل‌درک است که نوسان‌های محلی با مقادیر حدی کوچک و بزرگ در

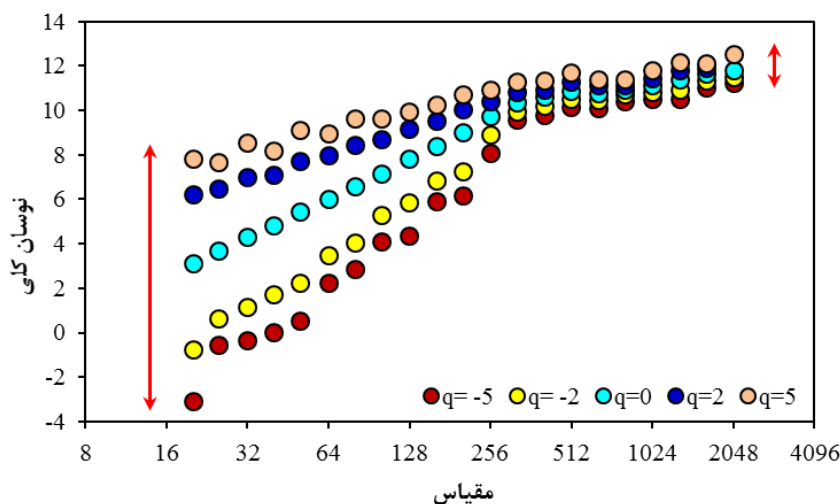
نمودار لگاریتمی مبتنی بر قانون توانی، یک نقطه تلاقی را بین مقیاس زمانی ۳۴۸ تا ۴۰۸ روز نشان می‌دهد. این نقطه تلاقی، به دوره سالانه جریان رودخانه و وجود رژیم‌های مقیاسی متفاوت در جریان رودخانه اشاره دارد. ژانگ و همکاران (۲۰۰۸) و (۲۰۰۹)، لیبت و همکاران (۲۰۱۱)، لی و همکاران (۲۰۱۵) و ریسیسک و همکاران (۲۰۱۱) نیز با بررسی رفتار مقیاسی جریان روزانه رودخانه در ۴۲ ایستگاه آب‌سنجی در سراسر کره زمین دریافتند که در زیر نقاط تلاقی، همبستگی‌های کوتاه‌مدت اتفاق می‌افتد. به این مفهوم که سری زمانی در این مقیاس‌های زمانی کوچک از حافظه کوتاه‌مدت برخوردار بوده‌اند. در صورتی که در مقیاس‌های زمانی بلندتر رفتار کاملاً متفاوتی را نشان می‌دهند. چنین نقاط تلاقی به‌عنوان جداکننده رژیم‌های با نمایه‌های مقیاسی متفاوت به شمار می‌روند (هیو و همکاران ۲۰۰۱ و کنتل‌هاردت و همکاران ۲۰۰۱). موحد و همکاران (۲۰۰۶) چنین نقاط تلاقی را ناشی از تغییرات در خصوصیات همبستگی سیگنال در مقیاس‌های زمانی متفاوت می‌دانند. به طوری که وجود این نقاط، دلالت بر رفتار مقیاسی سری زمانی بسیار پیچیده‌ای دارد که بخش‌های مختلف آن دارای نمایه‌های



شکل ۴- نمودار لگاریتمی رابطه قانون توانی بین نوسان کلی برای مقیاس‌های زمانی مختلف (نمایه هرست).

مقادیر نوسان‌های محلی (مبتنی بر گشتاورهای مختلف) با مقیاس‌های سری زمانی مشخص می‌کند که اختلاف بین نوسان‌های مرتبط با گشتاورهای مثبت و منفی، در سری‌های زمانی کوچک مقیاس بسیار بیشتر از سری‌های زمانی بزرگ مقیاس است (شکل ۵). بنابراین در سری‌های زمانی کوچک مقیاس، دوره‌هایی با نوسان بزرگ به‌روشنی از دوره‌های با نوسان کوچک تمییز داده می‌شوند همچنین، نقطه تلاقی در تمامی گشتاورها نیز وجود داشته و تنها منحصر به گشتاور دوم نیست. البته با افزایش درجه گشتاور به سمت مقادیر مثبت، زمان رخداد

در سیگنال جریان رودخانه کشکان وجود دارند که موجب رفتار مقیاسی و ساختار پیچیده سری زمانی آن شده‌اند. بنابراین، تنها با استفاده از گشتاور درجه ۲ نمی‌توان نوسان این سیگنال را تشریح کرد بلکه شناسایی کامل نوسان این سیگنال مستلزم محاسبه سایر گشتاورهای آماری است. به همین سبب، گشتاورهای ۵- تا ۵ با گام افزایشی ۱/۰ واحد نیز برای هر یک از سری‌های زمانی محاسبه شدند. به‌ترتیبی که گشتاورهای درجه منفی معرف نوسان‌های کوچک و گشتاورهای مثبت مبین نوسان‌های بزرگ هستند. محاسبه رابطه قانون توانی بین

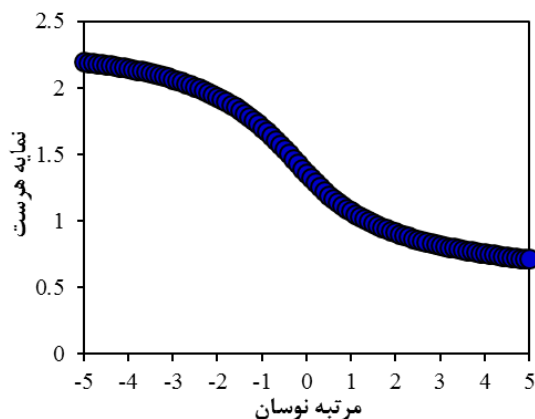


شکل ۵- نمودار لگاریتمی نوسان  $q$  امین درجه در مقابل مقیاس‌های متفاوت سری زمانی جریان رودخانه کشکان.

حالت غیرخطی نمایه جرم، وجود مقیاس چندگانه و ساختار چندفرکتالی سیگنال جریان رودخانه کشکان را به طریقی دیگر بیان می‌کند (کنتل‌هاردت و همکاران ۲۰۰۲) به عبارتی این مؤلفه نیز نشان می‌دهد که نوسان رودخانه کشکان دارای چند رژیم مقیاسی متفاوت است.

ترسیم لگاریتمی نمایه هرست تعمیم‌یافته در مقابل درجه گشتاور، نشان از رابطه قوی بین این دو مؤلفه دارد (شکل ۷). بنابراین بر حسب وابستگی این نمایه به درجه گشتاور می‌توان نتیجه گرفت که سیگنال جریان رودخانه کشکان از ساختار چندفرکتالی برخوردار است. همچنین کاهش تدریجی نمایه هرست تعمیم‌یافته، ضمن افزایش تدریجی درجه گشتاور و تأکید بر ساختار چندفرکتالی سیگنال جریان رودخانه کشکان بر وجود دوره‌هایی با نوسان بزرگ و کوچک در سیگنال جریان این رودخانه نیز اشاره دارد.

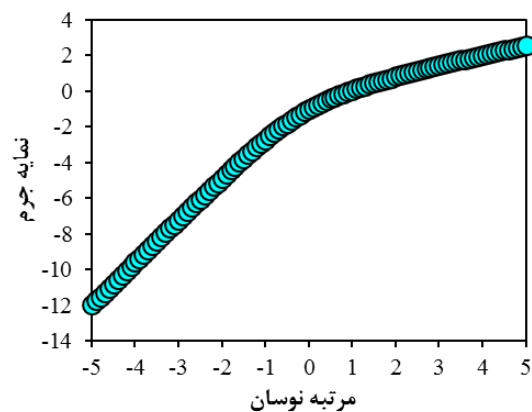
توزیع طیف تکینگی در مقابل نمایه تکینگی جریان رودخانه به صورت سهمی نامتقارن بوده که این عدم تقارن طیف، نشان از عدم ترازمندی وزن تأثیر نوسان‌های بزرگ و کوچک بر سیگنال جریان رودخانه دارد (شکل ۸). چنانکه کشیدگی دُم راست این طیف، اثر غالب نوسان‌های محلی با مقادیر کوچک را بر ساختار سری زمانی جریان رودخانه کشکان معین می‌کند. به عبارتی، سری زمانی جریان رودخانه کشکان دارای ساختار چندفرکتالی است که به مقادیر کوچک نوسان محلی بسیار حساس بوده،



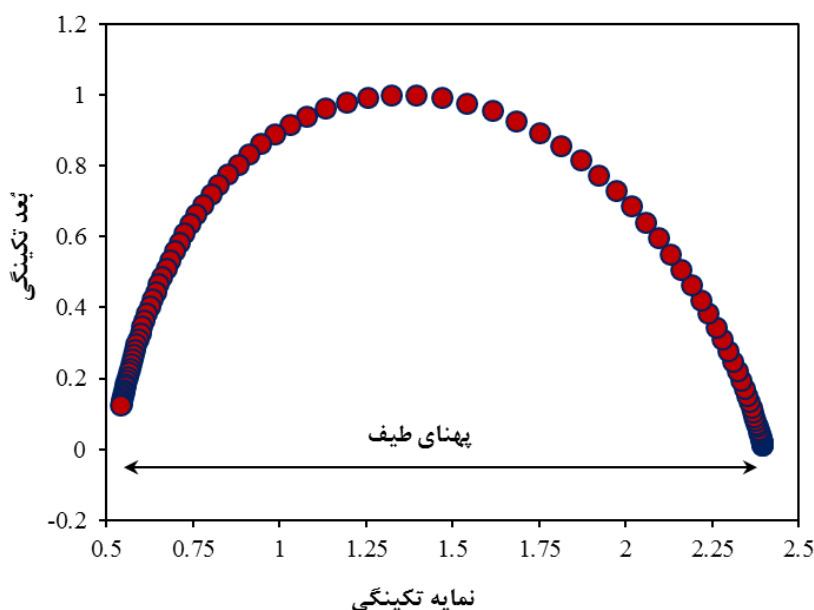
شکل ۷- رابطه نمایه هرست تعمیم‌یافته و  $q$  اُمین درجه.

نقطه تلاقی نیز افزایش می‌یابد. به‌طورکلی کاهش تدریجی نمایه هرست تعمیم‌یافته ضمن افزایش تدریجی اندازه سری زمانی نشان می‌دهد که بخش‌های با نوسان‌های کوچک دارای ساختارهای مشابه با گام تصادفی‌اند در صورتی که بخش‌های با نوسان بزرگ دارای ساختار نویزی هستند؛ بنابراین رابطه معناداری بین درجه نوسان محلی و اندازه نمونه وجود دارد که این فرایند بر ساختار چندفرکتالی سیگنال سری زمانی جریان رودخانه کشکان دلالت دارد.

چنانکه ذکر شد، طیف تکینگی از جمله مؤلفه‌های بسیار مهم برای پارامترسازی و شناسایی ساختار و شدت چندفرکتالی در سیگنال‌های سری زمانی به شمار می‌رود. به این ترتیب با محاسبه نمایه جرم برای هر یک از مقادیر نمایه هرست تعمیم‌یافته، مشخص می‌شود که رابطه بین این مؤلفه و درجه گشتاور، به صورت غیرخطی است (شکل ۶). به این عنوان که رفتارهای متفاوتی بین نمایه مقیاس و گشتاور مثبت و منفی وجود دارد. چنانکه شیب نمایه جرم مثبتی بر گشتاورهای منفی و مثبت به ترتیب به مقدار  $2/3$  و  $0/77$  حساب شدند. از آنجایی‌که در ساختارهای چند فرکتالی، رابطه بین نمایه جرم و درجه‌های گشتاور به صورت منحنی بوده، از این فرایند نیز می‌توان ساختار چند فرکتالی جریان رودخانه کشکان با رژیم مقیاسی متفاوت را پذیرفت. از سویی، این فرایند باعث روند کاهشی نمایه تکینگی می‌شود. به طورکلی،



شکل ۶- رابطه نمایه جرم و  $q$  اُمین درجه.



شکل ۸- رابطه نمایه تکینگی و طیف تکینگی جریان رودخانه کشکان.

سری زمانی جریان آن به سبب حضور فرایندهای نایستا و روندهای محلی، بسیار پیچیده است. در این مطالعه، خصوصیات چندفرکتالی و ماهیت رفتار مقیاسی جریان روزانه رودخانه کشکان که از افت و خیزهای بسیار شدیدی برخوردار است با استفاده از روش‌های تحلیل چندفرکتالی نوسان‌های روندزدایی شده (MF-DFA) شناسایی شد. نتایج بدست آمده از تحلیل DFA نشان می‌دهد که اگرچه سیگنال جریان رودخانه در حالت کلی با نمایه هرست  $0.95$  دارای حافظه بلندمدت و ساختار پایدار بوده ولی بررسی رفتارهای مقیاسی نشان می‌دهند که حافظه جریان رودخانه غیرخطی است، به‌ترتیبی که سیگنال جریان رودخانه در مقیاس‌های زمانی کوچک‌تر از یک نقطه تلاقی سالانه، دارای حافظه کوتاه‌مدت و ساختار نایستا ولی در مقیاس‌های زمانی بزرگ‌تر، از ساختار ایستا و پایدار برخوردار است. این دستاورد، وجود رژیم‌های متفاوت و ماهیت فرکتالی سیگنال جریان این رودخانه را نشان می‌دهد، به‌ترتیبی که این سیگنال از طریق روش‌های مبتنی بر هندسه اقلیدوسی قابل‌شناسایی نیست، بنابراین برای آگاهی به دینامیک رفتاری این رودخانه، پارامترهای مبتنی بر مقیاس‌های زمانی مختلف

به‌ترتیبی که داده‌هایی با مقادیر کمتر، از توزیع ناهمگن‌تری برخوردارند. ازسویی، پهنای طیف تکینگی که به‌عنوان برآیند فاصله بین بیشینه و کمینه نمایه تکینگی و شدت چندفرکتالی به حساب می‌آید، ساختار پیچیده و چند- فرکتالی بسیار شدید نوسان‌های جریان رودخانه کشکان را به‌روشنی نشان می‌دهد. به‌واقع پهنای طیف چندفرکتالی نشان‌دهنده انحراف از میانگین ساختار فرکتالی برای بخش‌های با نوسان بزرگ و کوچک است. پهنای طیف چندفرکتالی دلالت بر انحراف از میانگین ساختار فرکتالی دارد. بنابراین با توجه به پهنای زیاد، طیف جریان رودخانه کشکان، مشخص می‌شود که بخش‌های با نوسان بزرگ و کوچک از حالت میانگین ساختار فرکتالی انحراف دارند و ساختار متفاوتی را به صورت چندفرکتالی در سیگنال جریان رودخانه کشکان پدید می‌آورند.

### نتیجه‌گیری کلی

جریان رودخانه به‌عنوان یکی از مهمترین مؤلفه - های چرخه آب به شمار می‌رود که از ساختار و الگوهای رفتاری بسیار پیچیده‌ایی برخوردار است. چنانکه تحلیل

جرم با درجه گشتاور نوسان و پهنای بسیار زیاد طیف تکینگی نشان دادند که سیگنال جریان رودخانه کشکان از آنچنان دینامیک پیچیده‌ای با ماهیت چندفرکتالی برخوردار است که نه تنها روش‌های خطی - غیرخطی بلکه روش‌های مبتنی بر فرکتال ساده نیز قادر به شناسایی کامل رژیم رفتاری و پارامترهای دینامیکی آن نیستند. چه بسا کاربرد این روش‌ها، منتهی به نتایج غیرواقعی و کاذب خواهد شد.

نیز محاسبه شدند. به طوری که برای نیل به این هدف، چندین پارامتر از جمله نمایه هرست تعمیم‌یافته، نمایه جرم، طیف تکینگی و بُعد تکینگی سیگنال جریان رودخانه کشکان محاسبه شد. این پارامترها، ماهیت چندفرکتالی و ساختار پیچیده جریان این رودخانه را نشان دادند. به‌ترتیبی که نوسان‌ها در مقیاس‌های زمانی کوچک، از نمایه‌های همبستگی بسیار متفاوتی نسبت به مقیاس‌های بزرگ برخوردارند. در این خصوص، وابسته‌بودن نمایه هرست تعمیم‌یافته به درجه گشتاور نوسان، رابطه غیرخطی نمایه

#### منابع مورد استفاده

- Adarsh S, Dharan DS, Anuja P and Suman A, 2019. Unravelling the scaling characteristics of daily streamflows of Brahmani river basin, India, using arbitrary-order Hilbert spectral and detrended fluctuation analyses. *SN Applied Sciences*. 1(1): 58.
- Alami MT, Ghorbani MA and Naghipour L, 2015. Multifractal detrended fluctuation analysis of Sofichia river flow. In 10th International Congress on Civil Engineering. University of Tabriz. Tabriz. Iran.
- Barbi M, Chillemi S, Di Garbo A, Balocchi R, Carpeggiani C, Emdin M, Michelassi C and Santarcangelo E, 1998. Predictability and nonlinearity of the heart rhythm. *Chaos, Solitons & Fractals*. 9(3): 507-515.
- Bhattacharya RN, Gupta VK and Waymire E, 1983. The Hurst effect under trends. *Journal of Applied Probability* 20(3): 649-662.
- Cao G and Xu W, 2016. Multifractal features of EUA and CER futures markets by using multifractal detrended fluctuation analysis based on empirical model decomposition. *Chaos, Solitons & Fractals*. 83: 212-222.
- Di Matteo T, Aste T and Dacorogna MM, 2003. Scaling behaviors in differently developed markets. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* 324(1-2): 183-188.
- Eke A, Herman P, Kocsis L and Kozak L, 2002. Fractal characterization of complexity in temporal physiological signals. *Physiological Measurement*. 23(1): R1.
- Fan Q, Liu S and Wang K, 2019. Multiscale multifractal detrended fluctuation analysis of multivariate time series. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. 532:121864.
- Feder J, *Fractals*. 2013: Springer Science & Business Media.
- Hajian S and Movahed MS, 2010. Multifractal detrended cross-correlation analysis of sunspot numbers and river flow fluctuations. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. 389(21): 4942-4957.
- Hekmatzadeh AA, Torabi Haghghi A, Hosseini Guyomi K, Amiri SM and Kløve B, 2020. The effects of extremes and temporal scale on multifractal properties of river flow time series. *River Research and Applications*. 36(1): 171-182.
- Hu K, Ivanov PC, Chen Z, Carpena P and Stanley HE, 2001. Effect of trends on detrended fluctuation analysis. *Physical Review* 64(1), 011114.
- Hurst HE, 1951. Long-term storage capacity of reservoirs. *Transaction of America Society of Civil Engineering* 116: 770-799.
- Ihlen EA, 2014. Multifractal analyses of human response time: potential pitfalls in the interpretation of results. *Frontiers in Human Neuroscience*. 8: 523.
- Ivanov PC, Nunes Amaral LsA, Goldberger AL, Havlin S, Rosenblum MG, Stanley HE and Struzik ZR, 2001. From 1/f noise to multifractal cascades in heartbeat dynamics. *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science* 11(3): 641-652.
- Kalamaras N, Tzanis CG, Deligiorgi D, Philippopoulos K and Koutsogiannis I, 2019. Distribution of air temperature multifractal characteristics over Greece. *Atmosphere* 45(2):10.
- Kantelhardt JW, Koscielny-Bunde E, Rego HH, Havlin S and Bunde A, 2001. Detecting long-range correlations with detrended fluctuation analysis. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. 295(3-4): 441-454.

- Kantelhardt JW, Koscielny-Bunde E, Rybski D, Braun P, Bunde A and Havlin S, 2006. Long-term persistence and multifractality of precipitation and river runoff records. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 111(D1.)
- Kantelhardt JW, Rybski D, Zschiegner SA, Braun P, Koscielny-Bunde E, Livina V, Havlin S and Bunde A, 2003. Multifractality of river runoff and precipitation: comparison of fluctuation analysis and wavelet methods. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. 330(1-2): 240-245.
- Kantelhardt JW, Zschiegner SA, Koscielny-Bunde E, Havlin S, Bunde A and Stanley HE, 2002. Multifractal detrended fluctuation analysis of nonstationary time series. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. 316(1-4): 87-114.
- Kestener P and Arneodo A, 2008. A multifractal formalism for vector-valued random fields based on wavelet analysis: application to turbulent velocity and vorticity 3D numerical data. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*. 22(3): 421-435.
- Koscielny-Bunde E, Kantelhardt JW, Braun P, Bunde A and Havlin S, 2006. Long-term persistence and multifractality of river runoff records: Detrended fluctuation studies. *Journal of Hydrology*. 322(1-4): 120-137.
- Labat D, Masbou J, Beaulieu E and Mangin A, 2011. Scaling behavior of the fluctuations in stream flow at the outlet of karstic watersheds, France. *Journal of hydrology*. 410(3-4): 162-168.
- Li E, Mu X, Zhao G and Gao P, 2015. Multifractal detrended fluctuation analysis of streamflow in the Yellow River Basin, China. *Water*. 7(4): 1670-1686.
- Livina VN, Ashkenazy Y, Bunde A and Havlin S, 2011. Seasonality effects on nonlinear properties of hydrometeorological records, Pp. 266-284, In: *In Extremis*. Springer.
- Losada M, Seoane R, de la Barra A and Caram L, 2020. Fractional Brownian Motions and their multifractal analysis applied to Parana river flow. *arXiv preprint arXiv:2002.04532*.
- Matsoukas C, Islam S and Rodriguez-Iturbe I, 2000. Detrended fluctuation analysis of rainfall and streamflow time series. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 105(D23): 29165-29172.
- Mesa OJ and Poveda G, 1993. The Hurst effect: The scale of fluctuation approach. *Water Resources Research*. 29(12): 3995-4002.
- Montanari A, 2003. Long-range dependence in hydrology. *Theory and Applications of Long-Range Dependence*. 461-472.
- Movahed MS, Jafari G, Ghasemi F, Rahvar S and Tabar MRR, 2006. Multifractal detrended fluctuation analysis of sunspot time series. *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*. 2006(02): P02003.
- Noorigheidari M, 2012. Estimation of design storm using multifractal theory in Ghotvan Dam Site. *Water and Soil Science*. 22(1): 145-154 (In Persian with English abstract).
- Nouri Gheidari M, Danko A and Shahraki M, 2015. Application of Power Law in Flood Frequency Analysis of Sarbaz River. *Water and Soil Science*. 24(4): 45-59 (In Persian with English abstract).
- Peng CK, Havlin S, Stanley HE and Goldberger AL, 1995. Quantification of scaling exponents and crossover phenomena in nonstationary heartbeat time series. *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*. 5(1): 82-87.
- Rodríguez-Iturbe I and Rinaldo A, 2001. *Fractal river basins: chance and self-organization*. Cambridge University Press.
- Rybski D, Bunde A, Havlin S, Kantelhardt JW and Koscielny-Bunde E, 2011. Detrended fluctuation studies of long-term persistence and multifractality of precipitation and river runoff records, Pp.216-248, In: *In Extremis*. Springer.
- Shang P, Lu Y and Kamae S, 2008. Detecting long-range correlations of traffic time series with multifractal detrended fluctuation analysis. *Chaos, Solitons & Fractals*. 36(1): 82-90.
- Taqqu MS, Teverovsky V and Willinger W, 1995. Estimators for long-range dependence: An Empirical Study. *Fractals* 3(04): 785-798.
- Tiwari AK, Aye GC and Gupta R, 2019. Stock market efficiency analysis using long spans of Data: A multifractal detrended fluctuation approach. *Finance Research Letters* 28: 398-411.
- Xu L, Ivanov PC, Hu K, Chen Z, Carbone A and Stanley HE, 2005. Quantifying signals with power-law correlations: A comparative study of detrended fluctuation analysis and detrended moving average techniques. *Physical Review* 71(5): 051101.

- Yan B, Zhou A and Song S, 2019. Multi-fractal characteristics of daily runoff series of Weihe River Watershed. *Journal of Water Resource and Protection* 11(9): 1146-1160.
- Zhang Q, Xu C-Y and Yang T, 2009. Scaling properties of the runoff variations in the arid and semi-arid regions of China: a case study of the Yellow River basin. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*. 23(8): 1103-1111.
- Zhang Q, Xu C-Y, Yu Z, Liu C-L and Chen YD, 2009. Multifractal analysis of streamflow records of the East River basin (Pearl River), China. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. 388(6): 927-934.
- Zhang Q, Xu CY, Chen YD and Yu Z, 2008. Multifractal detrended fluctuation analysis of streamflow series of the Yangtze River basin, China. *Hydrological Processes* 22(26): 4997-5003.