



Modeling of the pattern of hydrological phenomena in climate conditions using fractal theory and entropy criterion

Mehdi Komasi^{1✉} , Bahareh Doorbashizadeh² 

1. Corresponding author, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Ayatollah Boroujerdi University, Boroujerd, Iran. E-mail: komasi@abru.ac.ir

2. Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Ayatollah Boroujerdi University, Boroujerd, Iran. E-mail: bahardoorbashizadeh@gmail.com

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:

Received

2024-07-31

Received in revised form

2024-10-28

Accepted

2024-12-01

Available online

2024-12-24

Keywords:

entropy,
Self Similarity,
Trending,
Hurst Index,
Fluctuations

ABSTRACT

Modeling and estimating the amount of runoff in an area is very important in water resources management; Because the river flow is one of the important factors in the hydrological cycle, which depends on various factors such as rainfall. In the current research, entropy and fractal criteria were used to determine the runoff trend of the Silakhor plain during the years 1360-1400. In the first step, the amount of entropy was determined for the time period of 1360-1400 runoff parameters. Then it was compared with the amount of entropy obtained for the rainfall parameter. In the next step, Hurst index values, one of the fractal criteria, were calculated for rainfall and runoff parameters in order to check the range of stability and trends.

The results of the research show that the runoff entropy fluctuates, but these fluctuations have also been observed in the rainfall variable. In contrast, the Hurst index values of runoff and rainfall parameters are in the range of strong stability (0.5 to 1) and the time series have long-term memory. Fluctuations and irregularities observed in runoff entropy values can be caused by the minimal impact of rainfall and the maximal impact of human intervention and over-harvesting, which can lead to water crises.

Cite this article: Komasi, Mehdi., & Doorbashizadeh, Bahareh. (2024). Trending of the pattern of hydrological phenomena using fractal theory and entropy criterion. *Advanced Modeling in Civil Engineering*, 1(2), 47-61.

DOI: 10.22126/amcen.2024.11430.1034



© The Author(s).

DOI: 10.22126/amcen.2024.11430.1034

Publisher: Razi University

Introduction

In water science engineering, pattern finding and modeling are the main tools for analyzing and managing water resources and predicting the behavior of hydrological systems. Various pattern finding methods, including time series analysis method, statistical method, and data-oriented method, have a good performance in trending hidden patterns and complexities in water systems. In statistical methods and time series analysis, they study historical flow data such as rainfall and temperature. In fact, these methods identify trends, fluctuations and recurring patterns according to past information. One of the concepts used in statistical modeling and time series analysis is the concept of entropy, which identifies patterns among various phenomena such as rainfall and temperature, and provides better trends in natural phenomena. In this regard, data-driven methods identify hidden patterns in systems such as water systems by analyzing complex parameters. Concepts such as fractal theory are used in data-driven methods to identify self-similar and non-linear patterns.

Method

In the present research, first, the data of 40 years of runoff and rainfall of Silakhor Plain were adjusted on a monthly scale and introduced to Matlab2016 software as input variables. Due- to the complexity of hydrological processes, the desired time series were divided into several smaller time intervals to facilitate the understanding of their behavior pattern. At first, according to equation (1) entropy for hydrological parameters of rainfall and runoff was calculated:

$$E_j = -K \sum_{i=1}^m P_i \ln P_i \quad (1)$$

And then Hurst index for hydrological parameters of precipitation and runoff was calculated. This is used with the help of the following relationship:

$$\beta = 2H - 2 \leq 0 \quad (2)$$

In the next step, entropy value and The Hurst index was extracted for the time series of runoff and precipitation respectively.

Results

The highest amount of entropy fluctuation of the runoff time series occurs in the period of 1372-1374. This means that there is the highest amount of irregularity and uncertainty in this period. The Hurst index also shows fluctuations in the runoff time series in the period of 1380-1384 and has a decreasing trend. Also, the minimum amount of entropy or irregularity of the runoff time series occurs in the period of 1398-1400 and based on the results of the fractal model, the amount of the Hurst index experiences more. In the sense that it preserves its long-term memory.

Conclusions

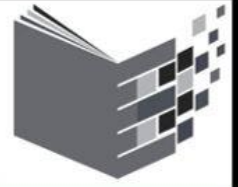
In this study, has used entropy and fractal criteria in order to investigate the trend of runoff in the Silakhor Basin. The results of using these two criteria in the studied basin showed that the amount of Hurst index for the variable of rainfall and runoff was within the range of stability (0.5 to 1). there is an appointment This means that the values have a long memory and tend to return to their long-term average value. In contrast, the amount of entropy obtained for these variables indicates irregularities for rainfall and an increase in irregularities for runoff, and an increase in irregularities for the runoff variable indicates fluctuations for this variable and as a result, a decreasing trend for future periods. As a result, based on the obtained results, rainfall has the least effect on the irregularities in the runoff and the greatest effect is caused by human factors, and this factor provides the basis for the onset of droughts in the future period. It is suggested to develop the entropy criterion and Hurst index for other rivers of the country in order to have a better understanding of the effect of drought on these areas and to predict the necessary measures to manage the crisis caused by it.

Author Contributions

All authors participated in writing and revising the article.

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.



مدلسازی الگوی پدیده‌های هیدرولوژیکی در شرایط تغییر اقلیم با استفاده از نظریه فراکتال و معیار آنتروپی

مهدی کماسی^۱، بهاره دورباشی‌زاده^۲

۱. نویسنده مسئول، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آیت‌الله بروجردی (ره)، بروجرد ایران. رایانامه: komasi@abru.ac.ir
۲. گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آیت‌الله گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آیت‌الله بروجردی (ره)، بروجرد، ایران. رایانامه: bahardoorbashizadeh@gmail.com

چکیده

اطلاعات مقاله

الگویابی و برآورد از میزان رواناب یک منطقه اهمیت به سزایی در مدیریت منابع آب دارد؛ زیرا جریان رودخانه یکی از عوامل مهم در چرخه هیدرولوژی می‌باشد که به عوامل گوناگونی همچون بارش بستگی دارد. در پژوهش حاضر از معیارهای آنتروپی و فراکتال جهت روندیابی رواناب حوضه دشت سیلاخور طی سال‌های ۱۴۰۰-۱۳۶۰ استفاده گردید. در گام نخست میزان آنتروپی برای بازه زمانی ۱۳۶۰-۱۴۰۰ پارامتر رواناب تعیین گردید. سپس با میزان آنتروپی به‌دست‌آمده برای پارامتر بارش مقایسه گردید. در گام بعدی مقادیر شاخص هرست، یکی از سنجش‌های معیار فراکتال، برای پارامترهای بارش و رواناب به‌منظور بررسی محدوده پایداری و روندیابی محاسبه گردید. نتایج حاصل از پژوهش نشان‌دهنده آن است که آنتروپی رواناب دارای نوسانی می‌باشد که این نوسانات در متغیر بارش نیز مشاهده شده است. از سوی دیگر مقادیر شاخص هرست پارامترهای رواناب و بارش در محدوده پایداری قوی (۵/۰ تا ۱) قرار داشته و سری‌های زمانی دارای حافظه بلندمدت می‌باشند. نوسانات و بی‌نظمی‌های مشاهده شده در مقادیر آنتروپی رواناب، می‌تواند ناشی از تاثیر حداقلی بارش و تاثیر حداکثری دخالت عوامل انسانی و برداشت بی‌رویه باشد که این نوسانات می‌تواند بحران‌های آب را در پی داشته باشد.

نوع مقاله:
مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت:
۱۴۰۳/۰۵/۱۰

تاریخ بازنگری:
۱۴۰۳/۰۸/۰۷

تاریخ پذیرش:
۱۴۰۳/۰۹/۱۱

تاریخ انتشار:
۱۴۰۳/۱۰/۰۴

کلیدواژه‌ها:
آنتروپی،
خودتشابهی،
روندیابی،
شاخص هرست،
نوسانات

استناد: کماسی، مهدی؛ و دورباشی‌زاده، بهاره . (۱۴۰۳). روندیابی الگوی پدیده‌های هیدرولوژیکی با استفاده از نظریه فراکتال و معیار آنتروپی. مجله مدلسازی پیشرفته در مهندسی عمران، ۱(۲)، ۶۱-۴۷. DOI: 10.22126/amcen.2024.11430.1034



۱. مقدمه

در مهندسی علوم آب، الگویابی و مدل‌سازی از ابزارهای اصلی جهت تحلیل و مدیریت منابع آب و پیش‌بینی رفتار سیستم‌های هیدرولوژیکی به شمار می‌آیند. روش‌های گوناگون الگویابی از جمله روش تحلیل‌های سری زمانی، روش آماری و روش داده‌محور در مدل‌سازی الگوهای پنهان و پیچیدگی‌های موجود در سیستم‌های آبی عملکرد مناسبی دارند. در روش‌های آماری و تحلیل سری‌های زمانی به مطالعه داده‌های تاریخی جریان همچون بارش و دما می‌پردازند. در واقع این روش‌ها با توجه به اطلاعات گذشته، روندها، نوسانات و الگوهای تکرار شونده را شناسایی می‌کند. از مفاهیمی که در روش‌های الگویابی آماری و تحلیل‌های سری زمانی به کار می‌رود می‌توان به مفهوم آنتروپی اشاره نمود که به شناسایی الگوی میان پدیده‌های گوناگون مانند بارش و دما می‌پردازد و مدل‌سازی بهتری از پدیده‌های طبیعی ارائه می‌دهد. در همین راستا روش‌های داده‌محور نیز با تجزیه و تحلیل پارامترهای پیچیده، الگوهای پنهان در سیستم‌هایی همچون سیستم آب را شناسایی می‌کنند. در روش‌های داده‌محور مفاهیمی همچون نظریه فراکتال کاربرد دارد که به شناسایی الگوهای خود متشابه و غیرخطی می‌پردازد.

رویکرد نوین نخست در پیش‌بینی رواناب رودخانه‌ها، استفاده از تئوری آنتروپی شانون^۱ است. در واقع آنتروپی بی‌نظمی یا عدم قطعیت یک سیستم را بیان می‌کند. منظور از بی‌نظمی، میزان تغییرات و یکنواختی در وقوع یک پدیده است. در همین راستا میرزایی^۲ و همکاران (۲۰۲۴) با استفاده از تئوری آنتروپی شانون و شاخص غلظت بارش روزانه، اقلیم و توپوگرافی متنوع کشور ایران را برای دوره آماری (۱۹۹۶-۲۰۱۸) بررسی نمودند. نتایج نشان داد تاثیر متقابل میان کاهش بارندگی و افزایش آنتروپی یا غیریکنواختی، سیل و خشکسالی را در مناطق جنوبی در پی خواهد داشت [۱۵]. همچنین ساکی مالچی و همکاران (۱۴۰۱) یکنواختی کمبود بارش را با استفاده از تئوری شانون به صورت ۱۲ ماهه بررسی نمودند. نتایج نشان داد در متوسط درازمدت، آنتروپی کمبود بارش و آستانه شروع خشکسالی را به خوبی نشان می‌دهد [۲].

در ادامه ایلانگا^۳ (۲۰۱۹) به بررسی عدم قطعیت میانگین رواناب سالانه با استفاده از تئوری آنتروپی در حوضه رودخانه وال در آفریقای جنوبی پرداخت. نتایج نشان داد تئوری آنتروپی توانایی بالایی جهت پیش‌بینی پدیده‌های هیدرولوژیکی را دارا است [۱۱]. نوازلایب^۴ و همکاران (۲۰۲۳) براساس زمین لغزش دوم و سوم ماه می ۲۰۲۳ در استان غربی رواندا که منجر به فاجعه‌ای ویرانگر شد، احتمال وقوع زمین لغزش در مناطق انگورورو، روبارو، نیابیهو، کارونگی با استفاده از مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی، آنتروپی، نسبت فرکانس بررسی نمودند. نتایج نشان داد مناطق نگرورو و کارونگی بیشترین غلظت زمین لغزش را دارا هستند [۱۹]. ورسینسکی^۵ (۲۰۱۶) عدم قطعیت ویژگی‌های رواناب برای ۲۴۸ رودخانه در لهستان را برای دوره آماری ۲۰۱۰-۱۹۵۱ با استفاده از اصل آنتروپی بررسی نمودند. نتایج نشان داد رواناب در چرخه سالانه با انواع رژیم‌های رودخانه منطبق است [۲۳]. فیشر^۶ و همکاران (۲۰۲۰)، نکونین و همکاران (۱۴۰۱)، اسلام^۷ و همکاران (۲۰۲۲)، جیانلین^۸ و همکاران (۲۰۲۳) با استفاده از اصل آنتروپی، رواناب رودخانه‌های گوناگون را مورد بررسی قرار دادند [۱۰]، [۶]، [۱۲]، [۱۳]. شفیع و همکاران (۱۳۹۸) پتانسیل منابع آب زیرزمینی در حوضه آبریز دشت نورآباد ممسنی را با به‌کارگیری تئوری آنتروپی شانون بررسی نمودند. نتایج نشان داد منابع آب زیرزمینی در محدوده قابل قبول قرار داشته و از یکنواختی مناسبی برخوردار هستند [۳]. همچنین نورانی^۹ و همکاران (۲۰۱۵) با استفاده از مدل‌های هوشمند شبکه عصبی مصنوعی و آنتروپی مدل بارش-رواناب را در فلوریدا بررسی نمودند. نتایج نشان داد افزایش تعداد داده‌های ورودی به مدل شبکه عصبی مصنوعی دقت مدل‌سازی را کاهش می‌دهد و در مقابل، مدل‌های مبتنی بر تئوری آنتروپی ساده‌تر بوده و دقت مدل‌سازی را بالا می‌برند [۱۸].

³ Ilunga

⁴ Nwazelibe

⁵ Wrzesiński

⁶ Fischer

⁷ Islam

⁸ Jianlin

⁹ Nourani

¹ Shanon Entropy

² Mirzaei

(۲۰۲۲) به بررسی اثر خشکسالی در منطقه بلم و مانائوس برزیل در یک دوره ۵۹ ساله (۲۰۱۹-۱۹۶۱) پرداختند. نتایج گویای این واقعیت بود که به دلیل مقادیر غیرمثبت شاخص بارش-تبخیر و تعرق استاندارد شده (SPEI) در منطقه مانائوس، روند خشکسالی‌های گوناگون تقویت می‌گردد [۱۴]. فتحیان و مرید (۱۳۹۱) از شاخص هرست برای بررسی روند فصلی بودن متغیرهای اقلیمی بارش و رواناب در حوضه دریاچه ارومیه استفاده نمودند. نتایج نشان داد سری‌های زمانی مذکور در محدوده پایداری متوسط (۰/۶۵) قرار دارند [۴]. در همین راستا تونگ^{۱۶} و همکاران (۲۰۱۸) با استفاده از شاخص هرست و معیار تبخیر و تعرق، تغییرپذیری خشکسالی مکانی و زمانی در فلات مغولستان را برای دوره آماری ۱۹۸۰ تا ۲۰۱۴ بررسی نمودند [۲۲].

نتایج حاکی از آن بود که عملکرد شاخص هرست و معیار تبخیر و تعرق در کنار یکدیگر قابل قبول بوده و در این منطقه خشکسالی شدیدی پیش‌بینی گردیده است.

بارویداشت به پیشینه پژوهش‌های ذکر شده و باتوجه به کاهش چشمگیر منابع آب و همچنین پدیده تغییرات اقلیمی، تجزیه و تحلیل روند پارامترهای هیدرولوژیکی از اهمیت بالایی برخوردار است. رویکرد نوآورانه در مطالعه حاضر استفاده از اصل آنتروپی و روش فراکتال جهت پیش‌بینی رواناب دشت سیلاخور برای دوره آماری ۱۳۶۰-۱۴۰۰ می‌باشد. بر اساس دانش فعلی نویسنده و با رویداشت به پیشینه پژوهش‌های ذکر شده مطالعه در زمینه پیش‌بینی رواناب در محدوده دشت سیلاخور با استفاده از اصل آنتروپی و تئوری فراکتال وجود ندارد.

۲. مواد و روش‌ها

۲-۱. منطقه مورد مطالعه

دشت سیلاخور یکی از دشت‌های پهناور کشور ایران است که در شمال استان لرستان واقع شده است. مساحت این دشت ۲۵۴۵/۸ کیلومتر مربع می‌باشد. این دشت وسیع در موقعیت عرض جغرافیایی $48^{\circ} 29' - 48^{\circ} 57'$ شمالی و طول جغرافیایی $33^{\circ} 45' - 34^{\circ} 7'$ غربی با میانگین ارتفاع از سطح دریا برابر ۱۵۰۷ متر می‌باشد. به

رویکرد نوین دوم در پیش‌بینی پدیده‌های اقلیمی بهره‌گیری از نظریه‌های جدید همچون فراکتال با در نظر گرفتن ماهیت غیرخطی پدیده‌هاست. فراکتال‌ها ساختارهای پیچیده‌ای هستند که ویژگی اصلی آن‌ها خودتشابهی است؛ به این معنا که بخش‌های کوچک‌تر این ساختارها، به شکلی متشابه و تکرارشونده در کل ساختار دیده می‌شوند. مفهوم فراکتال‌ها نخستین بار توسط مندلبروت (۱۹۶۸) معرفی گردید و بعد از آن در علوم گوناگون از جمله هیدرولوژی، زمین‌شناسی و فیزیک جهت مدل‌سازی پدیده‌هایی با رفتارهای پیچیده و تصادفی به کار گرفته شد. شاخص هرست^{۱۰}، به‌عنوان یکی از سنج‌های مدل فراکتال، حافظه بلندمدت و خودهمبستگی بلندمدت را در سری‌های زمانی بررسی می‌کند. در واقع شاخص هرست الگوی رفتاری سیستم و پدیده‌ها را کشف می‌کند. در همین راستا سومان^{۱۱} و همکاران (۲۰۲۳) روند جریان ۱۷ رودخانه در کشور هند را با استفاده از نمای هرست بررسی نمودند. نتایج دقت بالای نمای هرست و همچنین تطابق خوبی با نمای هرست مشاهده شده را نشان داد [۲۰]. همچنین مصطفی‌زاده و همکاران (۱۴۰۰) قابلیت بالای شاخص هرست در بررسی بارش و رواناب در ایستگاه‌های اردبیل را تأیید نمودند [۵]. از سوی دیگر در مطالعه‌ای که توسط احمدی^{۱۲} و همکاران (۲۰۱۷) صورت گرفت با استفاده از شاخص هرست روند تغییر دمای ۲۴ ایستگاه تبخیرسنجی در استان آذربایجان غربی برای دوره آماری ۱۳۹۲-۱۳۶۰ بررسی گردید. نتایج روند افزایشی دما برای ایستگاه‌های مذکور را نشان داد [۷]. در مطالعه‌ای دیگر بناویدس^{۱۳} و همکاران (۲۰۱۵) امکان ارزیابی همبستگی‌ها و خوشه‌بندی‌های بلندمدت در سری‌های زمانی هیدرولوژیکی با استفاده از شاخص هرست در ایستگاه‌های بارندگی مکزیک را فراهم نمودند [۸]. مانشی^{۱۴} (۲۰۱۷) دما و بارش ماهانه در منطقه‌های ولز و انگلستان با استفاده از معیار شاخص هرست مورد تحلیل قرار دادند. در نهایت هیچ شواهدی مبنی بر تداوم یا حافظه بلند مدت یافت نگردید [۱۶]. همچنین میلان^{۱۵} و همکاران

¹⁰ Hurst Index

¹¹ Suman

¹² Ahmadi

¹³ Benavides

¹⁴ Munshi

¹⁵ Millán

¹⁶ Tong

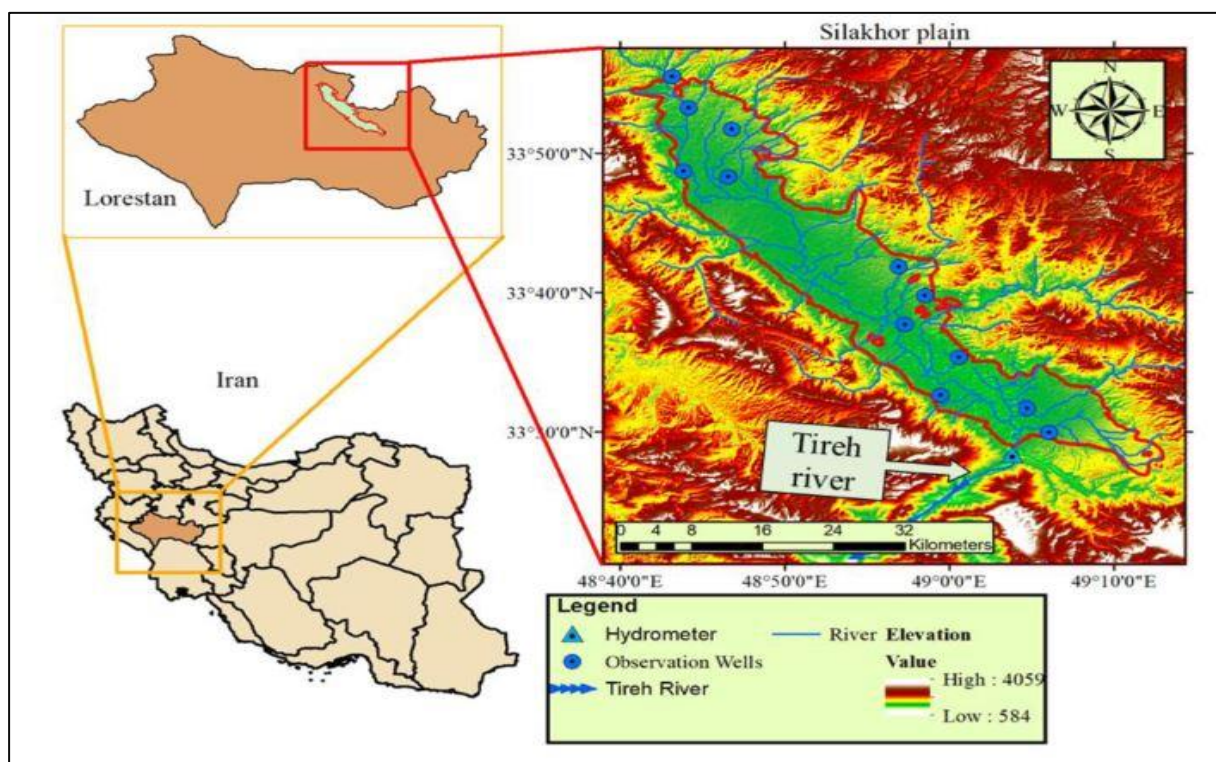
به منطقه مورد مطالعه، در سازمان هواشناسی ایران (<https://data.irimo.ir>) به دست آمده است.

جدول ۱. مشخصات آماری سری زمانی دشت سیلاخور

سری زمانی سالانه	میانگین	بیشینه	کمینه
دبی (مترمکعب بر ثانیه)	۱۸۴/۲	۱۹۸/۶	۱۷۰/۲
بارش (میلی متر)	۴۳۰/۳	۶۶۰/۷	۲۰۳/۶
رطوبت نسبی (%)	۴۱/۳	۶۳/۹	۱۴/۴
دما (درجه سانتی گراد)	۱۳/۵	۴۰	-۱۳

لحاظ جغرافیایی این دشت از جنوب به شهرستان‌های دورود و خرم‌آباد، از شمال به شهرستان‌های نهاوند و ملایر واقع در استان همدان و از غرب به شهرستان سلسله واقع در استان لرستان همچنین از شرق به شهرستان اراک واقع در استان مرکزی، محدود می‌شود.

شکل (۱) موقعیت منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد. همچنین جدول (۱) مشخصات آماری شبکه مشاهداتی دشت سیلاخور را نشان می‌دهد. داده‌های ۴۰ سال (۱۳۶۰-۱۴۰۰) از جمله بارش و رواناب از ایستگاه رحیم‌آباد، از نزدیک‌ترین ایستگاه‌های سینوپتیک



شکل ۱. منطقه مورد مطالعه (شرقی و همکاران، ۲۰۲۴) [۲۱]

پدیده‌های غیرخطی، اطلاعات آنتروپی بسیار زیادی لازم است. با به‌کارگیری تئوری آنتروپی، می‌توان میزان عدم آگاهی نسبت به مشخصات یک سیستم یا سامانه را به صورت کمی بیان کرد. در گذشته اغلب روش‌های آزمون و خطا و یا خودهمبستگی در انتخاب ورودی‌های یک سیستم مورد توجه بوده و کمتر به اهمیت

۲-۲. معیار آنتروپی

آنتروپی در یک سیستم پویا، میزان بی‌نظمی را نشان می‌دهد. در واقع هرچه بی‌نظمی در یک پدیده بیشتر باشد، احتمال رخداد و به دنبال آن میزان پیش‌بینی‌پذیر بودن آن پدیده کمتر بوده و در نتیجه آنتروپی آن بیشتر است. به عبارت دیگر جهت بررسی عدم قطعیت

واحد زمانی کوچک همانند با شدت تغییرات آن پارامترها در یک واحد زمانی بزرگ‌تر است. از مهم‌ترین ویژگی‌های فراکتال‌ها، خودتشابهی آنهاست. مفهوم آن این است که در بخش‌هایی با اندازه کوچک‌تر، ویژگی‌های آن تکرار می‌شوند و در بعد زمان و مکان ثابت هستند (ژو^{۱۸} و همکاران، ۲۰۱۱) [۲۴]. پدیده‌های طبیعی همچون رودخانه‌ها از جمله ساختارهای خودمتشابهی هستند که دارای پیچیدگی‌هایی در مقیاس گوناگون هستند که مطالعه و بررسی آنها با روش‌های خطی امکان‌پذیر نیست. به همین جهت با استفاده از نظریه فراکتال و توصیف رفتارهای نوسانی و تکرارشونده، می‌توان نظم موجود در بی‌نظمی این پدیده‌ها را توصیف نمود.

۲-۳-۱. شاخص هرست

شاخص هرست، یکی از سنجش‌های مدل فراکتال است. در سیستم‌های فراکتالی، میزان پیچیدگی و خودهمبستگی این سیستم‌ها بررسی می‌گردد. شاخص هرست نیز معیاری برای توصیف درجه خود همبستگی و پیچیدگی‌ها در یک سیستم را می‌باشد. بدین ترتیب شاخص هرست می‌تواند ابزاری برای تحلیل ویژگی‌های فراکتالی در داده‌ها استفاده گردد. همچنین شاخص هرست معیار آماری است که سری‌های زمانی را به صورت یک سری تصادفی یا سری زمانی دارای حافظه بلندمدت تقسیم‌بندی می‌کند. در واقع شاخص هرست میزان پیش‌بینی‌پذیر بودن سری زمانی را برآورد می‌کند. دامنه تغییرات شاخص هرست در بین محدوده ۰/۵ تا ۱/۵ به صورت زیر تعریف می‌گردد:

(۱) $H < 0.5$: بیانگر تصادفی بودن و غیرقابل پیش‌بینی بودن سری زمانی است. بدین معنا که تمایل مقادیر آتی به بازگشت به یک مقدار متوسط طولانی‌مدت کمتر خواهد بود.

(۲) $H = 0.5$: بیانگر حرکت براونی سری زمانی است. در واقع هیچ ارتباطی میان مؤلفه‌های دوره پایه و دوره آینده وجود ندارد. همچنین سری زمانی دارای فرایند تصادفی مستقل با توزیع نرمال خواهد بود.

وزن داده‌های در دسترس پرداخته می‌شود. از مزایای روش استخراج وزن از طریق روش آنتروپی نسبت به سایر روش‌های در دسترس می‌توان به عینی بودن این روش اشاره نمود؛ بنابراین نظر دانشمندان دیگر، در آن دخالت ندارد و در شرایطی که احتمال خطا در نظرات و قضاوت دانشمندان دیگر وجود داشته باشد، روش حاضر می‌تواند جایگزین قابل‌قبولی باشد (بدناریک^{۱۷} و همکاران، ۲۰۱۰) [۹]. آنتروپی در نظریه اطلاعات توسط توزیع احتمال مشخص P_i بیان می‌گردد. اندازه‌گیری این احتمال توسط شانون (۱۹۴۹) به صورت رابطه (۱) تعریف می‌گردد:

$$E_j = S(P_1, P_2, \dots, P_n) = -K \sum_{i=1}^m P_i \ln P_i \quad (1)$$

که در آن $i = 1, \dots, m$ و K یک مقدار ثابتی است. در صورت برابر بودن P_i آنگاه به صورت رابطه (۲) ارائه می‌گردد:

$$P_i = \frac{1}{n} \quad (2)$$

در یک ماتریس تصمیم‌گیری، P_{ij} می‌تواند برای ارزیابی گزینه‌های گوناگون به کار رود. در یک ماتریس تصمیم‌گیری که از m گزینه و n معیار وجود دارد، آنتروپی از طریق رابطه (۳) محاسبه می‌گردد. همچنین شکل (۲) روندنمای معیار آنتروپی را نشان می‌دهد:

$$E_j = -K \sum_{i=1}^m P_i \ln P_i \quad (3)$$

۲-۳-۳. مدل فراکتال

مدل‌های فراکتالی فرایندهایی هستند که بر پایه مقیاس‌های مکانی و زمانی گوناگون، رفتار یکسانی را از خود نشان می‌دهند. جهت رهیافت بهتر از تغییرات پدیده‌های موردنظر و وابستگی‌های بین آنها

از تحلیل‌های فراکتالی استفاده می‌گردد. با بررسی این تحلیل‌ها می‌توان دریافت که شدت تغییرات پارامترهای موردنظر در یک

برای مقادیر گوناگون از m این فرایند تکرار می‌گردد و در نهایت نمودار لگاریتمی انحراف معیار در مقابل $\log(m)$ ترسیم می‌گردد که شیب خط حاصل از رابطه (۶) محاسبه می‌شود:

$$\beta = 2H - 2 \leq 0 \quad (۶)$$

شیب خط یا همان شاخص هرست از طریق برازش یک خط به نقاط به دست آمده، تخمین زده می‌شود (موانگی^{۱۹}، ۲۰۱۴) [۱۷]. شکل (۳) روند نمای مدل‌سازی شاخص هرست را نمایش می‌دهد.

۳. بحث و نتایج

در پژوهش حاضر ابتدا داده‌های ۴۰ سال رواناب و بارش دشت سیلاخور در مقیاس ماهانه تنظیم شد. سپس هر پارامتر هواشناسی به صورت ۲۰ گروه آماری با گام‌های دوساله جهت محاسبه معیار آنتروپی و در گام بعدی همان تعداد گروه نیز با گام‌های زمانی دوساله برای محاسبه شاخص هرست به نرم‌افزار Matlab2016 به عنوان متغیرهای ورودی معرفی گردید. به دلیل پیچیدگی در فرایندهای هیدرولوژیکی، سری‌های زمانی مورد نظر به چند بازه زمانی کوچک‌تر تقسیم شدند تا درک الگوی رفتاری آن‌ها تسهیل شود. در ابتدا مطابق رابطه (۳) آنتروپی سپس مطابق رابطه (۶) شاخص هرست برای پارامترهای هیدرولوژیکی بارش و رواناب محاسبه گردید. جدول (۲) مقدار آنتروپی و شاخص هرست را برای سری زمانی رواناب و جدول (۳) مقدار آنتروپی و شاخص هرست را برای سری زمانی بارش، نمایش می‌دهند. عوامل گوناگونی مانند شیب زمین، پوشش گیاهی، میزان بارش، نوع خاک بر رواناب منطقه تاثیر دارند. بر اساس پژوهش ابراهیمی و همکاران (۱۳۸۸)، که به تاثیر میزان بارش بر رواناب حوضه آبخیز سد برنجستانک پرداختند، بارش بر رواناب منطقه موثر است و رابطه میان آن‌ها از نوع خطی است؛ بدین معنا که بارش در هرماه، میزان رواناب را در همان ماه مشخص می‌نماید [۱]. در نتیجه تغییرات آنتروپی و شاخص هرست سری زمانی بارش بر تغییرات آنتروپی و شاخص هرست سری زمانی رواناب موثر است. از آنجایی که آنتروپی معیاری جهت سنجش رفتار سری زمانی و شاخص هرست معیاری جهت

(۳) $0/5 < H \leq 1$: بیانگر رفتار پایدار سری زمانی می‌باشد. در افزایش یا کاهش مؤلفه‌ها در دوره پایه به ترتیب افزایش یا کاهش مؤلفه‌های متناظر در دوره آینده را در پی خواهد داشت. بدین معنا که سری زمانی دارای حافظه بلندمدت است و مقادیر آتی تمایل بیشتری جهت بازگشت به یک مقدار متوسط طولانی‌مدت را دارا هستند (موانگی، ۲۰۱۴) [۱۷].

(۴) $1/5 \leq H \leq 1$: برای شاخص هرست برابر ۱، سری‌های زمانی ناپایدار است و روش‌های پیش‌بینی کارآمد نیستند. برای شاخص هرست برابر ۱/۵ سری زمانی دارای گام‌های تصادفی است.

۲-۳-۲. محاسبه شاخص هرست

در مطالعه حاضر جهت محاسبه شاخص هرست از روش واریانس تجمعی استفاده گردیده است. از مزایای این روش پیچیدگی کمتر محاسبه شاخص هرست و قابلیت برنامه‌نویسی آسان‌تر آن است. این روش در اکثر موارد تجربی به خوبی پاسخ می‌دهد. در این روش نخست سری‌های زمانی اصلی x_1, x_2, \dots, x_n بصورت $\frac{N}{m}$ گروه‌هایی با اندازه m بخش‌بندی می‌شود و برای هر گروه میانگین آن به صورت سری‌های تجمعی از طریق رابطه (۴) محاسبه می‌گردد:

$$x^{(m)}(k) \quad k = 1, 2, \dots, \frac{N}{m} \quad (۴)$$

که در آن k شاخصی است که به صورت برچسب مربوط به هر گروه در نظر گرفته می‌شود. همچنین در ادامه بر اساس رابطه (۵) واریانس ساده محاسبه می‌گردد:

$$\begin{aligned} \text{var}(x^m) &= \frac{1}{N} \sum_{k=1}^{N/m} (x^m(k))^2 \\ &- \left(\frac{1}{N} \sum_{k=1}^{N/m} (x(k))^2 \right)^2 \end{aligned} \quad (۵)$$

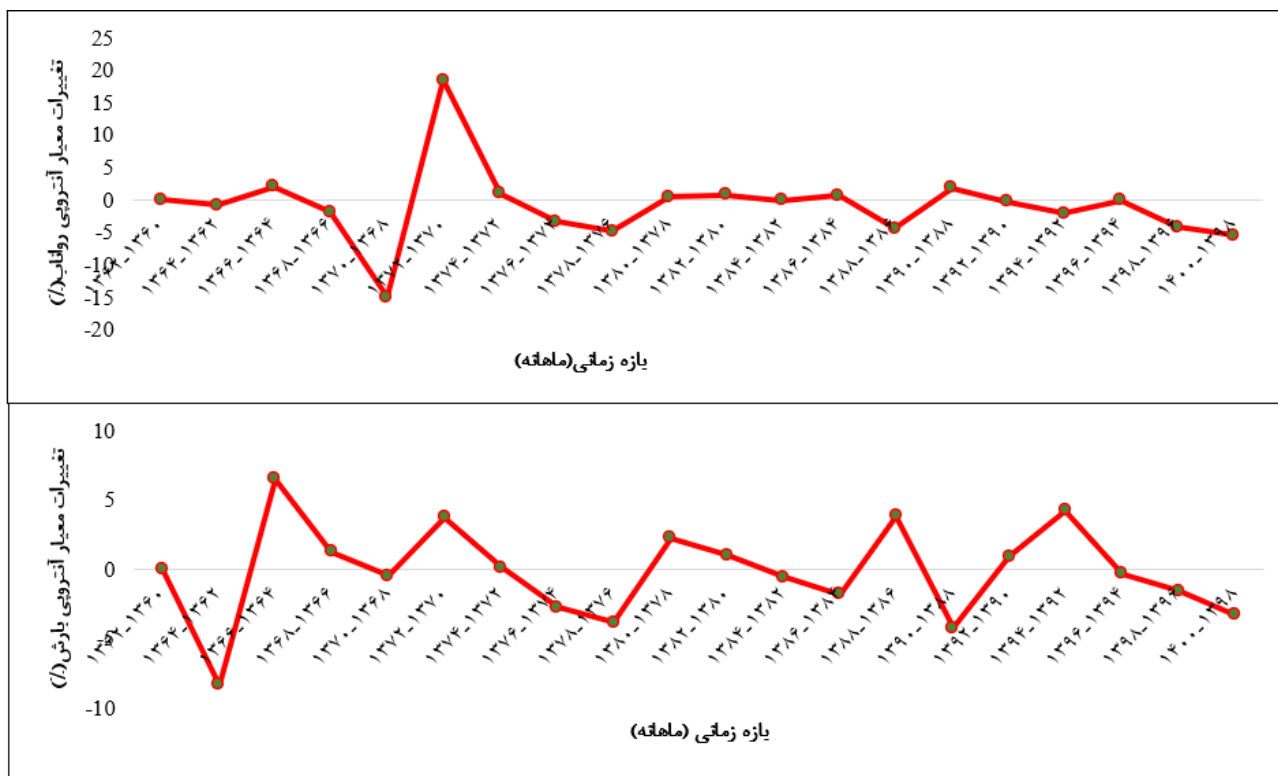
بررسی پایداری بلند مدت سری زمانی است، می‌توان دریافت هرچه میزان آنتروپی سری زمانی نوسان کمتری داشته باشد، شاخص پایداری، تمایل بازگشت به مقدار میانگین در طولانی‌مدت می‌باشد. هرست آن به عدد ۱ نزدیک‌تر بوده و پایدارتر است. منظور از



شکل ۲. روندنمای مدل‌سازی معیار آنتروپی (منبع: نگارندگان)

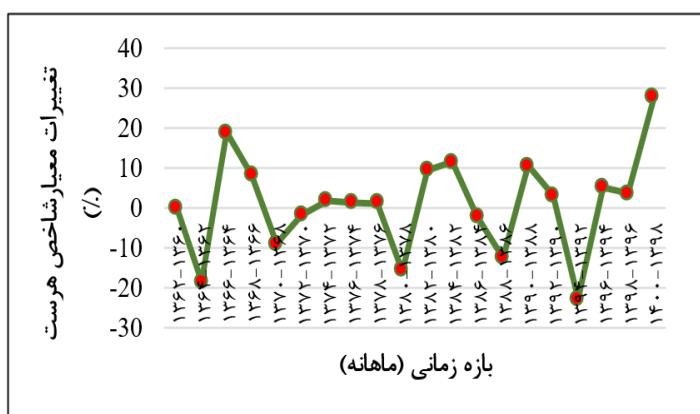


شکل ۳. روند نمای مدل‌سازی معیار شاخص هرست (منبع: نگارندگان)



شکل ۴. تغییرات معیار آنژیروپی سری زمانی بارش و رواناب

سری زمانی ۱۳۸۰-۱۳۸۶ رخ داده است. همچنین در بازه زمانی ۱۳۹۶-۱۴۰۰ تغییرات آنژیروپی به حداقل مقدار خود می‌رسد.



شکل ۵. تغییرات معیار شاخص هرست سری زمانی رواناب

براساس جدول (۲)، بیشترین مقدار نوسان آنژیروپی سری زمانی رواناب، در بازه زمانی ۱۳۷۲-۱۳۷۴ رخ می‌دهد. بدین مفهوم که بیشترین میزان بی‌نظمی و عدم قطعیت در این بازه وجود دارد. در جدول (۳) نیز آنژیروپی در بازه زمانی ۱۳۷۲-۱۳۷۴ سری زمانی بارش نوساناتی را نشان می‌دهد و براساس جدول (۳) شاخص هرست در بازه زمانی ۱۳۷۲-۱۳۷۴ با کاهش پایداری برای پارامترهای بارش و رواناب مواجه بوده است. همچنین کمترین میزان آنژیروپی یا بی‌نظمی سری زمانی رواناب در بازه زمانی ۱۴۰۰-۱۳۹۸ رخ می‌دهد و براساس جدول (۳) میزان شاخص هرست بیشتری را تجربه می‌نماید. بدین مفهوم که حافظه بلند مدت خود را حفظ می‌کند. شکل‌های (۴) و (۵) به ترتیب درصد تغییرات آنژیروپی برای سری زمانی بارش و رواناب و شاخص هرست را برای سری زمانی رواناب را نمایش می‌دهند. براساس شکل (۴)، درصد تغییرات معیار آنژیروپی سری زمانی رواناب، نوسانات فراوانی را نمایش می‌دهد. براساس نمودار، بیشترین مقدار مثبت تغییرات آنژیروپی در

همچنین در بازه زمانی ۱۴۰۰-۱۳۹۸ افزایش پایداری یا کاهش درصد تغییرات مشاهده می‌گردد.

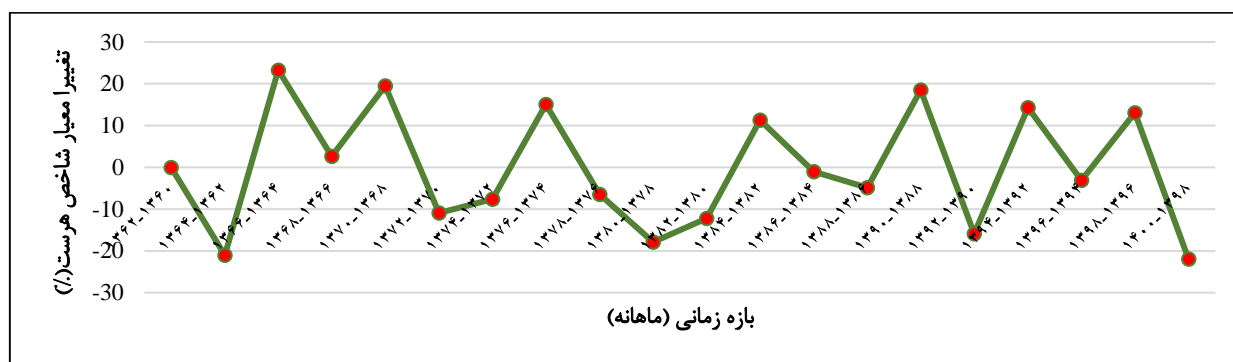
جدول ۳. میزان معیار آنتروپی و شاخص هرست سری زمانی بارش

سری زمانی	آنتروپی	درصد تغییرات (%)	شاخص هرست	درصد تغییرات (%)
۱۳۶۲-۱۳۶۲	۱/۴۲۶۹	-	۰/۹۲۷۸	-
۱۳۶۲-۱۳۶۴	۱/۴۱۵۲	-۰/۸۲	۰/۷۵۵۷	-۱۸/۵۵
۱۳۶۴-۱۳۶۶	۱/۴۴۳۰	+۱/۹۷	۰/۸۹۸۰	+۱۸/۸۳
۱۳۶۶-۱۳۶۸	۱/۴۱۵۹	-۱/۸۸	۰/۹۷۲۳	+۸/۲۷
۱۳۶۸-۱۳۷۰	۱/۲۰۳۰	-۱۵/۰۴	۰/۸۸۴۱	-۹/۰۷
۱۳۷۰-۱۳۷۲	۱/۴۲۴۵	+۱۸/۴۱	۰/۸۶۸۷	-۱/۷۴
۱۳۷۲-۱۳۷۴	۱/۴۳۷۴	+۰/۹۱	۰/۸۸۴۸	+۱/۸۵
۱۳۷۴-۱۳۷۶	۱/۳۸۹۳	-۳/۳۵	۰/۸۹۶۲	+۱/۲۹
۱۳۷۶-۱۳۷۸	۱/۳۲۱۷	-۴/۸۷	۰/۹۰۶۳	+۱/۱۳
۱۳۷۸-۱۳۸۰	۱/۳۲۷۵	+۰/۴۴	۰/۷۶۳۴	-۱۵/۷۷
۱۳۸۰-۱۳۸۲	۱/۴۰۴۳	+۰/۷۹	۰/۸۳۵۹	+۹/۵۰
۱۳۸۲-۱۳۸۴	۱/۴۰۳۵	-۰/۰۶	۰/۹۳۱۶	+۱۱/۴۵
۱۳۸۴-۱۳۸۶	۱/۴۱۳۱	+۰/۶۸	۰/۹۰۹۸	-۲/۳۴
۱۳۸۶-۱۳۸۸	۱/۳۴۹۸	-۴/۴۸	۰/۷۹۵	-۱۲/۶۲
۱۳۸۸-۱۳۹۰	۱/۳۷۴۰	+۱/۷۹	۰/۸۷۹۱	+۱۰/۵۸
۱۳۹۰-۱۳۹۲	۱/۳۶۸۹	-۰/۳۷	۰/۹۰۷۴	+۳/۲۲
۱۳۹۲-۱۳۹۴	۱/۳۴۰۲	-۲/۱۰	۰/۷۰۰۳	-۲۲/۸۲
۱۳۹۴-۱۳۹۶	۱/۳۳۸۳	-۰/۱۴	۰/۷۳۶۸	+۵/۲۱
۱۳۹۶-۱۳۹۸	۱/۲۸۱۷	-۴/۲۳	۰/۷۶۳۱	+۳/۵۷
۱۳۹۸-۱۴۰۰	۱/۲۱۱۳	-۵/۴۹	۰/۹۷۳۱	+۲۷/۵۲

برهمن اساس با توجه به شکل (۵)، بیشترین میزات تغییرات شاخص هرست در جهت افزایش ناپایداری‌ها، در بازه زمانی ۱۳۸۴-۱۳۸۰ رخ داده است..

جدول ۲. میزان معیار آنتروپی و شاخص هرست سری زمانی رواناب

سری زمانی	آنتروپی	درصد تغییرات (%)	شاخص هرست	درصد تغییرات (%)
۱۳۶۰-۱۳۶۲	۱/۲۶	-	۰/۸۷۹۷	-
۱۳۶۲-۱۳۶۴	۱/۱۵۵۱	-۸/۳۳	۰/۶۹۴۶	-۲۱/۰۴
۱۳۶۴-۱۳۶۶	۱/۲۲۹۸	+۶/۴۷	۰/۸۵۶۲	+۲۳/۲۷
۱۳۶۶-۱۳۶۸	۱/۲۴۵۱	+۱/۲۴	۰/۸۷۸۹	+۲/۶۵
۱۳۶۸-۱۳۷۰	۱/۲۳۹۲	-۰/۴۷	۱/۰۵	+۱۹/۴۷
۱۳۷۰-۱۳۷۲	۱/۲۸۵۱	+۳/۷	۰/۹۳۵۵	-۱۰/۹۰
۱۳۷۲-۱۳۷۴	۱/۲۸۶۷	+۰/۱۲	۰/۸۶۴۶	-۷/۶۰
۱۳۷۴-۱۳۷۶	۱/۲۵۱۰	-۲/۷۷	۰/۹۹۴۳	+۱۵/۰۳
۱۳۷۶-۱۳۷۸	۱/۲۰۳۱	-۳/۸۳	۰/۹۲۹۷	-۶/۵۰
۱۳۷۸-۱۳۸۰	۱/۲۳۰	+۲/۲۴	۰/۷۶۳۱	-۱۷/۹۲
۱۳۸۰-۱۳۸۲	۱/۲۴۲۳	+۱/۰۰	۰/۶۷	-۱۲/۲۰
۱۳۸۲-۱۳۸۴	۱/۲۳۵۴	-۰/۵۶	۰/۷۴۵۷	+۱۱/۳۰
۱۳۸۴-۱۳۸۶	۱/۲۱۲۹	-۱/۸۲	۰/۷۳۷۹	-۱/۰۵
۱۳۸۶-۱۳۸۸	۱/۲۵۹۳	+۳/۸۳	۰/۷۰۱۹	-۴/۸۸
۱۳۸۸-۱۳۹۰	۱/۲۰۵۷	-۴/۲۶	۰/۸۳۱۷	+۱۸/۴۹
۱۳۹۰-۱۳۹۲	۱/۲۱۶۵	+۰/۹۰	۰/۶۹۹۸	-۱۵/۸۶
۱۳۹۲-۱۳۹۴	۱/۲۶۷۶	+۴/۲۰	۰/۸۰	+۱۴/۲
۱۳۹۴-۱۳۹۶	۱/۲۶۳۵	-۰/۳۲	۰/۷۷۵۲	-۳/۱۰
۱۳۹۶-۱۳۹۸	۱/۲۴۳۸	-۱/۵۶	۰/۸۷۶۲	+۱۳/۰۳
۱۳۹۸-۱۴۰۰	۱/۲۰۲۵	-۳/۳۲	۰/۶۸۴۱	-۲۱/۹۲



شکل ۶. تغییرات معیار شاخص هرست سری زمانی بارش

۴. نتیجه‌گیری

به نوسان در اقلیم جهانی زمین یا در اقلیم منطقه‌ای در طول زمان باتوجه به شرایط میانگین جوی یا آب‌وهوایی، تغییر اقلیم گفته می‌شود. از جمله پیامدهای تغییر اقلیم می‌توان به پدیده خشکسالی اشاره نمود. عوامل گوناگونی بر پدیده تغییر اقلیم خشکسالی دخالت دارند که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به بارش و رواناب اشاره نمود. به همین دلیل روندیابی این دو پدیده اهمیت داشته و می‌تواند در مدیریت بحران و مدیریت منابع آب بسیار سودمند باشد. مطالعه حاضر در راستای بررسی روندیابی رواناب در حوضه دشت سیلاخور از معیارهای آنتروپی و فراکتال بهره گرفته است. مدل‌های فراکتالی، در واقع ساختارهایی خود متشابه هستند که در مقیاس‌های گوناگون تکرار می‌شوند. در واقع این تکرار می‌تواند میزان پیچیدگی و بی‌نظمی یک سیستم را نشان دهد. یکی از سنج‌های مدل فراکتال شاخص هرست می‌باشد که میزان پیچیدگی‌ها در یک سیستم را بررسی می‌کند. از سوی دیگر معیار آنتروپی شانون میزان بی‌نظمی و پیچیدگی در یک سیستم را بررسی می‌کند. در واقع آنتروپی میزان اطلاعات جدیدی که در یک سیستم وجود دارد را بیان می‌کند. در نتیجه معیار آنتروپی و نظریه شاخص هرست دو ابزار مهم جهت تحلیل و درک پیچیدگی و الگوهای رفتاری پدیده‌ها در دوره‌های آتی می‌باشند که به‌صورت مکمل یکدیگر به کار می‌روند. نتایج استفاده از این دو معیار در حوضه مورد مطالعه بیان داشت که میزان شاخص هرست برای متغیر بارش و رواناب در محدوده پایداری (۰/۵ تا ۱) قرار دارد. بدین معنا که مقادیر دارای حافظه بلندمدت هستند و تمایل بازگشت به مقدار میانگین بلند مدت خود را دارند هرچند که نوساناتی را تجربه می‌کند. از سوی دیگر میزان آنتروپی به دست آمده برای این متغیرها بیانگر وجود بی‌نظمی‌ها برای بارش و رواناب است. افزایش بی‌نظمی‌ها برای

در نهایت نمودار روند یا حفظ پایداری‌ها و کاهش تغییرات خود را حفظ نموده علی‌رغم اینکه در میانه مسیر نوساناتی وجود دارد. براساس جدول (۳) تغییرات شاخص هرست سری زمانی بارش، در بازه ۱۳۹۰-۱۴۰۰ بانوسانات زیادی در جهت کاهش پایداری مواجه است که این امر در شکل (۶) که نشان‌دهنده تغییرات شاخص هرست سری زمانی بارش می‌باشد، مشهود است. باتوجه به اینکه در بازه ۱۳۹۰-۱۴۰۰ شاخص هرست بارش نوسانات زیادی را تجربه می‌کند، این نوسانات نیز بر دبی منطقه نیز تا حدودی تاثیرگذار است و سبب ایجاد بی‌نظمی در الگوی رواناب منطقه شده است. براساس اطلاعات موجود از ایستگاه رحیم‌آباد در محدوده دشت سیلاخور، فاقد سد بزرگ و رسمی برای کنترل سیلاب است. این موضوع بیانگر وجود سیلاب‌ها به‌صورت طبیعی می‌باشد. باتوجه به موقعیت جغرافیایی دشت سیلاخور که یکی از دشت‌های آبرفتی و حاصلخیز می‌باشد و به عنوان یک منطقه کشاورزی شناخته می‌شود، از بین رفتن پوشش گیاهی و برداشت بیش از حد از منابع آب زیرزمینی ناشی از عوامل انسانی می‌تواند سبب تغییر در رژیم هیدرولوژیکی منطقه شود و رواناب منطقه را کاهش دهد. براساس جدول (۳) بیشترین نوسان معیار شاخص هرست در بازه زمانی ۱۳۹۰-۱۴۰۰ رخ می‌دهد و سطح پایداری تا حدی کاهش می‌یابد. براساس پژوهش شرقی^{۲۰} و همکاران (۲۰۲۴) این ناحیه تحت تاثیر تغییرات اقلیمی نیز قرار دارد [۲۱]. در نتیجه تغییرات اقلیمی نظیر کاهش بارش‌ها و یا افزایش گرمای جهانی و به‌دنبال آن کاهش بارش برف نیز بر رواناب منطقه تاثیر دارد. همچنین تغییر اقلیم سبب ذوب برف‌ها در فصول دیگری از سال می‌شود که به رواناب منطقه وارد شده و بی‌نظمی‌ها و نوسانات را بر رواناب منطقه افزایش می‌دهد.

- (Case Study: West Azarbayjan Province). *Water and Soil*, 31(3), 985-1000.
- [8] Benavides-Bravo, F. G., Almaguer, F., Soto-Villalobos, R., Tercero-Gómez, V., & Morales-Castillo, J. (2015). Clustering of Rainfall Stations in RH-24 Mexico Region Using the Hurst Exponent in Semivariograms. *Mathematical Problems in Engineering*, 2015.
- [9] Bednarik, M., Magulová, B., Matys, M., & Marschalko, M. (2010). Landslide susceptibility assessment of the Kral'ovany–Liptovský Mikuláš railway case study. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 35(3-5), 162-171.
- [10] Fischer, S., Bühler, P., Büttner, U., & Schumann, A. (2020). The use of maximum entropy to increase the informational content of hydrological networks by additional gauges. *Hydrological Sciences Journal*, 65(13), 2274-2285.
- [11] Ilunga, M. (2019). Shannon entropy for measuring spatial complexity associated with mean annual runoff of tertiary catchments of the Middle Vaal basin in South Africa. *Entropy*, 21(4), 366.
- [12] Islam, S., Tahir, M., & Parveen, S. (2022). GIS-based flood susceptibility mapping of the lower Bagmati basin in Bihar, using Shannon's entropy model. *Modeling Earth Systems and Environment*, 8(3), 3005-3019.
- [13] Jianlin, L. I., Shuwei, W. A. N. G., Xinyi, W. A. N. G., & Xiongxiang, W. A. N. G. (2023). Analysis on Runoff Characteristics of Recurrence Plot Theory Under Different Time Scales. *Journal of Basic Science and Engineering*, 31(3), 569-583.
- [14] Millán, H., Macías, I., & Rabelo-Lima, J. (2022). Hurst scaling with crossover of a drought indicator: a case study in Belem and Manaus, Brazil. *Natural Hazards*, 110(1), 69-93.
- [15] Mirzaei Hassanlu, A., Erfanian, M., Javan, K., & Najafi, M. R. (2024). Daily precipitation concentration and Shannon's entropy characteristics: spatial and temporal variability in Iran, 1966–2018. *Theoretical and Applied Climatology*, 155(1), 489-511.
- [16] Munshi, J. (2017). The Hurst exponent of precipitation: England and Wales 1766-2016. Available at SSRN 2931893.
- [17] MWANGI, A. W. (2014). Features affecting hurst exponent estimation on time series (Doctoral dissertation).
- [18] Nourani, V., Khanghah, T. R., & Baghanam, A. H. (2015). Application of Entropy Concept for Input Selection of Wavelet-ANN Based Rainfall-
- متغیر رواناب بیانگر روند کاهشی برای دوره‌های آتی می‌باشد. در نتیجه براساس نتایج به دست آمده، نوسانات بارش نیز تاثیر حداقلی را در بی‌نظمی‌های موجود در رواناب داشته و بیشترین تاثیر ناشی از عوامل انسانی می‌باشد و این عامل زمینه را برای شروع بحران‌های آب در دوره آینده فراهم می‌آورد.
- از محدودیت‌های مدل‌های مورد استفاده در پژوهش حاضر می‌توان به حساسیت مدل‌ها به داده‌های ورودی، طول داده‌ها و گسستگی آن‌ها اشاره نمود؛ همچنین محدودیت‌های محیطی مانند در نظر نگرفتن عوامل انسانی نیز از محدودیت‌های این مدل‌ها می‌باشد. پیشنهاد می‌گردد از معیار آنتروپی و شاخص هرست را برای سایر رودخانه‌های کشور توسعه داده شود؛ همچنین از مدل‌ها برای بررسی اثر تغییرات کاربری زمین، مطالعا در ترکیب با شاخص‌های آماری دیگر و یادگیری ماشین تا درک بهتری از تاثیر خشکسالی و بحران‌های آب بر این مناطق داشته باشیم و تمهیدات لازم برای مدیریت بحران ناشی از آن پیش‌بینی گردد.
- ### مراجع
- [۱] ابراهیمی، هدی، نصر آزادانی، آزاده، رضانی، بهمن، و جدی مصطفی لو، آرش. (۱۳۸۸). بررسی رابطه بارش و رواناب در حوضه آبخیز سد برنجستانک. همایش ملی علوم و مهندسی آبخیزداری ایران (مدیریت پایدار بلاای طبیعی).
- [۲] ساکی مالچی، ا. غفوری، ح. ر. اشرفی، س. م. (۱۴۰۱). پهنه بندی آستانه کمبود بارش بر اساس آنتروپی شانون در حوضه آبریز کرخه، مجله تحقیقات منابع آب ایران، ۱۸(۲)، ۱۹-۴۰.
- [۳] شفيعی، ن. امیراحمدی، ا. ق. و رحمانی، ا. (۱۳۹۸). پتانسیل یابی منابع آب زیرزمینی با مدل آنتروپی شانون حوضه آبریز دشت نورآباد ممسنی. فضای جغرافیایی، ۱۹(۶۶)، ۲۹۱-۳۰۴.
- [۴] فتحیان، ف. مرید، س. (۱۳۹۱). بررسی روند متغیرهای هواشناسی و هیدرولوژیکی حوضه دریاچه ارومیه با استفاده از روش‌های غیرپارامتری. تحقیقات آب و خاک ایران (علوم کشاورزی ایران)، ۴۳(۳)، ۲۵۹-۲۶۹.
- [۵] مصطفی‌زاده، ر. مراد زاده، و. علایی، نازیلا. حزباوی، ز. (۱۴۰۰). کاربرد شاخص هرست در تعیین حافظه طولانی‌مدت سری‌های زمانی بارش و دبی ایستگاه‌های منتخب استان اردبیل. حفاظت منابع آب‌و خاک (علمی - پژوهشی)، ۱۱(۲)، ۱۱۳-۱۳۱.
- [۶] نکوئیان، م. ا. رادمنش، ف. احمدی، ف. (۱۴۰۱). پیش‌بینی جریان ماهانه رودخانه با استفاده از رویکردهای آنتروپی شانون و موجک (مطالعه موردی: رودخانه مارون)، مجله مدیریت آب و آبیاری، ۱۲(۱)، ۱۵-۳۱.
- [7] Ahmadi, F., Nazeri Tahroudi, M., & Mirabbasi Najaf Abadi, R. (2017). Temperature Trend Analysis by Considering the Hurst Coefficient

- Runoff Modeling. *Journal of Environmental Informatics*, 26(1).
- [19] Nwazelibe, V. E., Egbueri, J. C., Unigwe, C. O., Agbasi, J. C., Ayejoto, D. A., & Abba, S. I. (2023). GIS-based landslide susceptibility mapping of Western Rwanda: an integrated artificial neural network, frequency ratio, and Shannon entropy approach. *Environmental Earth Sciences*, 82(19), 439.
- [20] Suman, A., Devarajan Sindhu, A., Nayak, A. K., Sankaran Namboothiri, A., & Biswal, B. (2023). Unveiling the climatic origin of streamflow persistence through multifractal analysis of hydro-meteorological datasets of India. *Hydrological Sciences Journal*, 68(2), 290-306.
- [21] Sharghi, A., Komasi, M., & Ahmadi, M. (2024). Variable sensitivity analysis in groundwater level projections under climate change adopting a hybrid machine learning algorithm. *Environmental Modelling & Software*, 106264.
- [22] Tong, S., Lai, Q., Zhang, J., Bao, Y., Lusi, A., Ma, Q., ... & Zhang, F. (2018). Spatiotemporal drought variability on the Mongolian Plateau from 1980–2014 based on the SPEI-PM, intensity analysis and Hurst exponent. *Science of the Total Environment*, 615, 1557-1565.
- [23] Wrzesiński, D. (2016). Use of entropy in the assessment of uncertainty of river runoff regime in Poland. *Acta Geophysica*, 64, 1825-1839.
- [24] Zhou, X. (2011). Fractal and multi fractal analysis of runoff time series and stream networks in agricultural watersheds. PhD Thesis, 122 pages.