

## Regional analysis of hydrological drought of Halil-Rood Watershed using base flow index

Maryam Daemi<sup>1</sup> | Amirreza Keshtkar<sup>1\*</sup>   | Saeed Bazgeer<sup>2</sup>  |  
Ali Afzali<sup>3</sup> | Omid Kavooosi<sup>1,4</sup> 

1. International Desert Research Center, University College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.
  2. Department of Physical Geography, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran.
  3. Vice-Chancellor for Research and Technology, University of Tehran, Tehran, Iran
  4. Crisis Management Directorate, Alborz Governorate, Karaj, Iran
- Email: [keshtkar@ut.ac.ir](mailto:keshtkar@ut.ac.ir)

### Article Info

**Article type:**  
Research Article

**Article history:**  
Received: 25 Jan. 2024  
Revised: 15 Mar. 2024  
Accepted: 14 Apr. 2024  
Published online: 21 Dec. 2024

**Keywords:**  
*Flow regime,*  
*Threshold level method,*  
*Cluster analysis,*  
*Drought zoning.*

### Abstract

The occurrence of drought is one of the natural phenomena and an inseparable part of climate change and natural hazards that can occur anywhere. Hydrological drought is used to indicate the reduction of surface flows and the drop in the levels of underground water reservoirs, lakes, and rivers. The present research was conducted to determine the values of the base flow index and to assess its effectiveness in identifying the type of flow regime and conducting a regional analysis of hydrological drought in the Halil-Rood watershed. For this purpose, three homogeneous hydrological drought zones were established based on the threshold level and cluster analysis. The base flow index was then calculated on a daily scale using daily discharge data from ten hydrometric stations within these homogeneous zones. The results showed that the regional average of the annual base flow index is 0.38, with a standard deviation of 0.193 over the long-term statistical period, and that the range of the base flow index is 0.12–0.29. Based on the 70th, 80th, and 90th percentiles, the river flow regime was divided into four classes, revealing that 100% of the watershed sub-basins in the study area exhibited an unstable regime. Additionally, the results of drought zoning indicated that hydrological drought occurred at a threshold level of 70 in the southeast of the region near the Dehroud hydrometric station, and at levels of 80 and 90 in the northwest near the Baft and Cheshme-Arus stations. The findings of this research can be utilized for assessing underground water supply, managing water supply systems, irrigation management, monitoring hydrological drought, and developing regional models for estimating water resource reserves in areas lacking statistical data.

**Cite this article:** Daemi, M., Keshtkar, A.R., Bazgeer, S., Afzali, A., Kavooosi, O (2024). Regional analysis of hydrological drought of Halil-Rood Watershed using base flow index. *Journal of Range & Watershed Management*, 77 (4), 403-418. DOI: <http://doi.org/10.22059/jrwm.2024.371670.1745>



© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press

## تحلیل منطقه‌ای خشک‌سالی هیدرولوژیک حوزه آبخیز هلیل‌رود با استفاده از شاخص جریان پایه

مریم دائمی<sup>۱</sup> | امیررضا کشتکار<sup>۱\*</sup> | سعید بازگیر<sup>۲</sup> | علی افضلی<sup>۳</sup> | امید کاوسی<sup>۴،۱</sup>

۱. مرکز تحقیقات بین‌المللی بیابان، دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

۲. گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۳. معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه تهران، تهران، ایران

۴. اداره کل مدیریت بحران، استانداری البرز، کرج، ایران

رایانامه: keshtkar@ut.ac.ir

### اطلاعات مقاله

### چکیده

#### نوع مقاله:

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۰۵

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۱۲/۲۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۱/۲۶

تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۱۰/۰۱

وقوع خشک‌سالی به‌عنوان یکی از پدیده‌های محیطی و بخش جدایی‌ناپذیری از تغییرات اقلیمی و مخاطرات طبیعی است که می‌تواند در هر سرزمینی رخ دهد. خشک‌سالی هیدرولوژیک به منظور نمایش کاهش جریان‌های سطحی و افت سطح مخازن آب زیرزمینی، دریاچه‌ها و رودخانه‌ها به کار می‌رود. تحقیق حاضر به منظور تعیین مقادیر شاخص جریان پایه و بررسی کارایی آن در تعیین نوع رژیم جریان و تحلیل منطقه‌ای خشک‌سالی هیدرولوژیک در حوزه آبخیز هلیل‌رود انجام شده است. بدین منظور ابتدا سه منطقه همگن خشک‌سالی هیدرولوژیک بر پایه سطح آستانه و تحلیل خوشه‌ای تعیین و سپس شاخص جریان پایه در مقیاس روزانه با استفاده از داده‌های روزانه دبی در ۱۰ ایستگاه هیدرومتری در مناطق همگن محاسبه شد. نتایج نشان داد میانگین منطقه‌ای شاخص جریان پایه سالانه، با میزان ۰/۳۸ با مقدار انحراف معیار ۰/۱۹۳ در دوره آماری بلند مدت ثابت بوده و محدوده شاخص جریان پایه ۰/۲۹ - ۰/۱۲ می‌باشد. بر پایه صدک‌های ۷۰، ۸۰ و ۹۰ نیز رژیم جریان رودخانه به چهار طبقه تقسیم گردید که مشخص گردید، ۱۰۰ درصد زیرحوزه‌های آبخیز منطقه مطالعاتی دارای رژیم ناپایدار بودند. همچنین نتایج پهنه‌بندی خشک‌سالی نشان داد که در سطح آستانه ۷۰ جنوب شرقی منطقه در محدوده ایستگاه هیدرومتری دهرود و در سطوح ۸۰ و ۹۰، شمال غربی منطقه در محدوده ایستگاه‌های بافت و چشمه‌عروس خشک‌سالی هیدرولوژیک رخ داده است. نتایج تحقیق حاضر می‌تواند در ارزیابی تغذیه آب زیرزمینی، سیستم‌های تامین آب، مدیریت آبیاری، پایش خشک‌سالی هیدرولوژیک و ارائه مدل‌های منطقه‌ای در برآورد ذخیره منابع آب در مناطق فاقد آمار مورد استفاده قرار گیرد.

#### کلیدواژه‌ها:

رژیم جریان،  
روش سطح آستانه،  
تحلیل خوشه‌ای،  
پهنه‌بندی.

**استناد:** دائمی؛ مریم، کشتکار؛ امیررضا، بازگیر؛ سعید، افضلی؛ علی، کاوسی؛ امید (۱۴۰۳). تحلیل منطقه‌ای خشک‌سالی هیدرولوژیک حوزه آبخیز هلیل‌رود با استفاده از شاخص جریان پایه. نشریه

مرتع و آبخیزداری، ۷۷(۴)، ۴۱۸-۴۰۳.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jrwm.2024.371670.1745>



© نویسندگان.

ناشر: انتشارات دانشگاه تهران.

## ۱. مقدمه

خشک‌سالی به‌عنوان پدیده‌ای خاموش جز طبیعی هر اقلیمی محسوب می‌شود که ناشی از کاهش مقدار بارش در یک دوره نسبتاً طولانی مدت نسبت به میانگین نرمال منطقه است (جهانگیر و همکاران، ۱۳۹۴). خشک‌سالی هیدرولوژیکی، به‌عنوان یک پدیده شاخص طبیعی در زمینه تغییرات اقلیمی خشکی‌های زمین، گسترش یافته و متعاقب توسعه خشک‌سالی‌های هواشناسی و کشاورزی رخ می‌دهد؛ این نوع مرحله نهایی و شدید خشک‌سالی است (هی<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۱۸). پایش خشک‌سالی از عوامل مهم و کلیدی در مدیریت آن، به‌ویژه در مناطق مستعد و در معرض خطر این پدیده است (یانگ<sup>۲</sup> و همکاران، ۲۰۲۱).

در همین راستا تعیین شاخص‌های مناسب جهت پایش خشک‌سالی، یکی از اقدامات مهم و اساسی در مطالعه، ارزیابی، برنامه‌ریزی و مبارزه با آن می‌باشد (باروتی و همکاران، ۱۳۹۲؛ لیو<sup>۳</sup> و همکاران، ۲۰۱۶). گرچه این پدیده با کاهش میزان بارندگی شروع، اما در نهایت به خشکی هیدرولوژیکی تبدیل می‌شود که نشان‌دهنده کاهش دسترسی به آب در رودخانه‌ها و منابع آب زیرزمینی است (فریزهندی و همکاران، ۱۳۹۷). بنابراین تجزیه و تحلیل علمی خشک‌سالی هیدرولوژیکی یکی از ضروریات اصلی برای توسعه یک برنامه مدیریت مؤثر می‌باشد (ون لون و ون لاون<sup>۴</sup>، ۲۰۱۲).

نصرتی و همکاران (۱۳۹۱)، در حوزه آبخیز سفیدرود به تحلیل منطقه‌ای خشک‌سالی هیدرولوژیک با بهره‌گیری از شاخص جریان پایه پرداختند و دریافتند که بیش از ۵۰ درصد حوزه‌های آبخیز منطقه مورد مطالعه دارای رژیم کم‌پایدار و ناپایدار بودند. تیموری (۱۳۹۳)، با ارزیابی روش‌های تفکیک دبی پایه بر اساس آنالیز شاخه خشکیدگی در آذربایجان غربی بیان نمود که روش فیلتر دیجیتالی با پارامتر ۰/۹۳ دقیق‌ترین روش تفکیک دبی پایه بوده است. کاظم‌زاده و همکاران (۱۳۹۴) به بررسی جریان آب سطحی شش ایستگاه هیدرومتری طی سه دهه گذشته در ایلام پرداختند. نتایج آنها نشان داد که روند دبی رودخانه‌ها در همه ایستگاه‌ها کاهش یافته است. نتایج بررسی کریمی و همکاران (۱۳۹۵) در حوزه آبخیز قره‌سو نشان داد خشک‌سالی هیدرولوژیک با تأخیر زمانی یک تا دو ساله نسبت به خشک‌سالی هواشناسی رخ داده است. فرسادی و همکاران (۱۳۹۷) در بررسی خشک‌سالی نتایج در حوضه کرخه نشان داد که شدت و مدت خشک‌سالی برای تمامی ایستگاه‌های هیدرومتری از توزیع تابع کوپلا خانواده گامبل پیروی می‌کنند و این موضوع می‌تواند در توسعه مدل‌های منطقه‌ای توابع کوپلا استفاده شود. مصباح‌زاده و سلیمانی‌ساردو (۱۳۹۷) در پژوهشی به بررسی روند خشک‌سالی هیدرولوژیک در حوزه آبخیز کرخه پرداختند، نتایج نشان داد رابطه زمانی وقوع خشک‌سالی هواشناسی و هیدرولوژیکی با یکدیگر در سطح ۹۹ درصد معنی دار است و این همبستگی در بازه ۴۸ ماهه حداکثر است.

یاراحمدی و رستمی‌زاده (۱۳۹۸) در پژوهشی به بررسی خشک‌سالی هیدرولوژیک در شمال دریاچه ارومیه پرداختند. نتایج نشان داد در مجموع ۹۱ دوره خشکی هیدرولوژیکی در این رودخانه رخ داده که بیش از ۶۰ درصد آن دارای تداومی بیشتر از ۲۰۰ روز بودند. تحلیل خشک‌سالی هیدرولوژیک رودخانه ارمند در بازه زمانی ۱۳۳۶-۱۳۹۲ توسط قربانی و همکاران (۱۳۹۸) نشان داد که شدت خشک‌سالی با توجه به افزایش حجم کمبود جریان طی سال‌های اخیر افزایش یافته است و در صورت ادامه این روند، در آینده شدت و فراوانی وقوع خشک‌سالی بیش‌تر و جریان کلی رودخانه کاهش خواهد یافت. جهانگیر و همکاران (۱۳۹۸) با ارزیابی خشک‌سالی در استان کرمانشاه، دریافتند که روند خشک‌سالی هیدرولوژیک در بازه انتخابی مورد مطالعه در مناطق مختلف استان با گذشت زمان در حال افزایش است. جان‌بزرگی و همکاران (۱۴۰۰) با استفاده از شاخص خشکی جریان رودخانه‌ای (SDI) خشک‌سالی را برای استان گیلان در مقیاس سالانه و دوره‌های سه، شش، نه و ۱۲ ماهه محاسبه کردند. نتایج نشان داد که از سال ۱۳۵۱ تا ۱۳۹۶ خشک‌سالی با بیش‌ترین درصد احتمالات

<sup>1</sup> He

<sup>2</sup> Yang

<sup>3</sup> Liu

<sup>4</sup> Van Loon & Van Lanen

در مساحت تغییرات مکانی که به صورت مثبت است مشاهده شده است. رضوی زاده و درگاهیان (۱۴۰۰)، به بررسی تغییرات زمانی و مکانی خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیک در سطح حوزه آبخیز زهره-جراحی و در بازه زمانی ۵ دهه پرداختند. نتایج مطالعه بیانگر این مطلب بود که روند تغییرات مکانی خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیک نشان داد که از شرق به غرب و پایین دشت حوضه، غالباً تغییرات به سمت تشدید خشکسالی بوده است. عباسی‌نیا و همکاران (۱۴۰۰)، به منظور آگاهی از وضعیت خشکسالی آب‌های زیرزمینی دشت مهران ایلام از شاخص GRI استفاده نمودند. نتایج تحقیق نشان داد که خشکسالی دشت مهران از سال ۱۳۷۵ تا سال ۱۳۸۸ با یک نوسان شدید، نزدیک نرمال بوده و از سال ۱۳۸۸ تا ۱۳۹۷ دچار خشکی ملایم شده است.

لاکروس<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۱۲)، با تجزیه و تحلیل تغییرپذیری زمانی و مکانی خشکسالی هیدرولوژیک در منطقه پنیسولا اسپانیا، در بازه زمانی ۱۹۴۵ تا ۲۰۰۵ نشان داد که در بیشتر نواحی شدت خشکسالی دارای روندی افزایشی بوده است. یافته‌های پژوهش وادا و همکاران (۲۰۱۳) در بررسی خشکسالی هیدرولوژیک در دنیا نشان داد که مصرف آب یکی از مکانیسم‌های مهم‌تر تشدید خشکسالی هیدرولوژیک است و به عنوان یک عامل اصلی تأثیرگذار بر شدت و فراوانی خشکسالی در دهه‌های آینده باقی خواهد ماند. اوزکایا و زبرگ<sup>۲</sup> (۲۰۱۹) نتایج بررسی خشکسالی هیدرولوژیک حوضه دجله ترکیه نشان داد که مناطق در عرض‌های جغرافیایی پایین‌تر نسبت به مناطق در عرض‌های جغرافیایی بالاتر خشکسالی را زودتر تجربه کردند. سوتانتو و لانن<sup>۳</sup> (۲۰۲۰) در پژوهشی در اروپا نشان دادند که متغیر آب زیرزمینی نسبت به رواناب سطحی در بررسی خشکسالی‌های شدید بهتر عمل می‌کند. نتایج اودنگ<sup>۴</sup> و همکاران (۲۰۲۳) در بررسی خشکسالی هیدرولوژیک در آفریقا نشان داد که شاخص بارش استاندارد شده به همراه دو فاکتور جریان سطحی و رطوبت خاک در بررسی روند خشکسالی هیدرولوژیک موثر است.

از آنجا که کاهش پیامدهای وقوع پدیده خشکسالی نیازمند پیش‌بینی و برنامه‌ریزی می‌باشد، لذا داشتن شناخت کافی از دوره‌های خشکسالی هیدرولوژیک به خصوص در مناطق خشک لازم و ضروری است. ادبیات تحقیق بیاگر این مطلب بود که پژوهش‌های انجام شده در زمینه خشکسالی‌های هیدرولوژیک در ایران در مقایسه با خشکسالی‌های هواشناسی، بسیار کمتر بوده و عمده پژوهش‌های انجام گرفته نیز خشکسالی‌های هیدرولوژیک را در بازه زمانی ماهانه و سالانه مدنظر قرار داده‌اند. در همین راستا، پژوهش حاضر علاوه بر بررسی خشکسالی‌های هیدرولوژیک در مقیاس زمانی روزانه با اهداف شناسایی و پایش خشکسالی‌های هیدرولوژیک، به پهنه‌بندی و تعیین فراوانی وقوع و شدت آن در منطقه مورد مطالعه پرداخته است.

## ۲. مواد و روش‌ها

### ۲-۱. منطقه مطالعاتی

حوزه آبخیز هلیل رود در جنوب شرق ایران و در استان کرمان و در فاصله در حدود ۱۰۰ کیلومتری از شهر کرمان قرار گرفته و یکی از زیر حوزه‌های اصلی حوزه آبخیز جازموریان و از قطب‌های مهم کشاورزی استان و کشور می‌باشد. مساحت حوزه آبخیز این رودخانه تا محل دشت رودبار بالغ بر ۱۸۸۳۲ کیلومتر مربع و بالاترین ارتفاع این حوضه حدود ۴۰۰۰ متر و کمترین آن در منتهی الیه دشت رودبار، حدود ۴۲۰ متر از سطح دریا ارتفاع دارد. از مجموع کل مساحت حوضه، ۱۲۵۳۷ کیلومتر مربع، آبخیزهای کوهستانی و ۶۲۹۵ کیلومتر مربع دشت‌های جیرفت، رودبار و کهنوج را شامل می‌گردد (رستمی، ۱۳۸۲). جهت جریان این سیستم‌ها عموماً از شمال و شمال غربی حوضه به طرف مرکز دشت بوده که در نهایت پس از پراکنده شدن در پهنه دشت رودبار به صورت مخروط افکنه‌ای به نام هلیل‌رود از طریق شمال غربی به تالاب جازموریان می‌ریزد. رودخانه هلیل‌رود در ارتفاعات از آبراهه‌های زیادی سرچشمه گرفته و پس از الحاق شاخه‌های سلطانی،

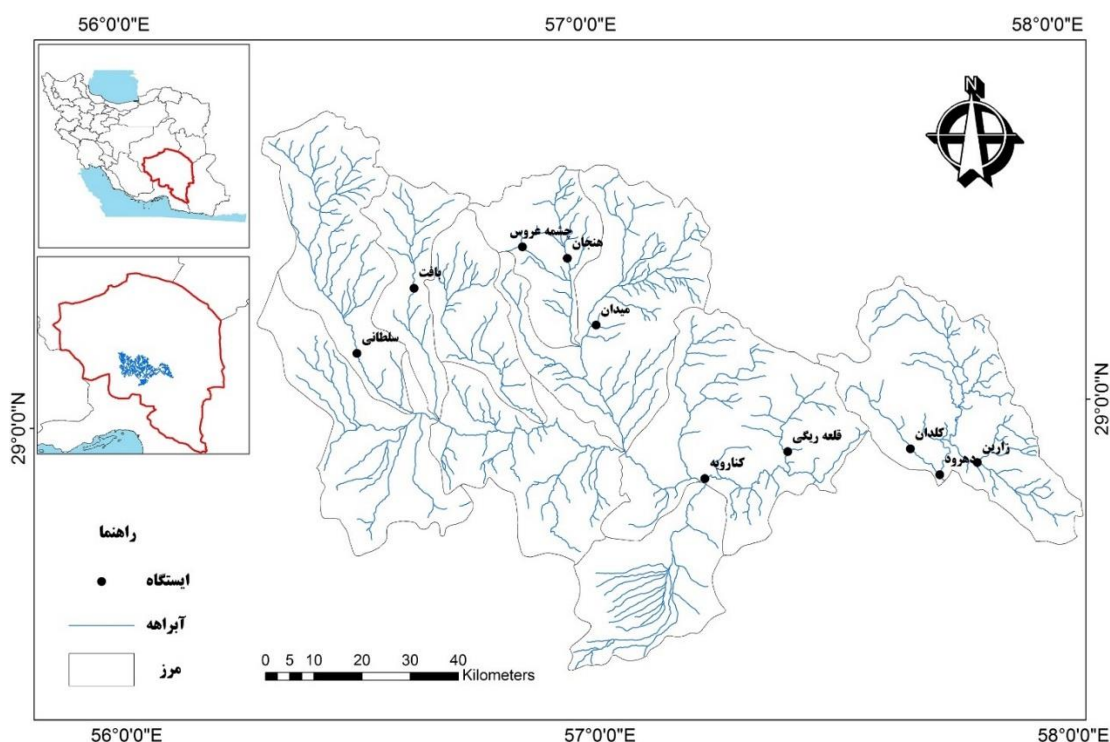
<sup>1</sup> Lacruz

<sup>2</sup> Ozkaya & Zerberg

<sup>3</sup> Sutanto & Lanen

<sup>4</sup> Odongo

بافت، رابر، سید مرتضی، رودر و رودخانه شور در شمال سبزواران و چند مسیل دیگر وارد دشت رودبار شده و از آنجا به داخل هامون جازموریان تخلیه می‌شود. بر روی مسیر آبی از سرشاخه‌ها تا محل خروجی حوضه، چندین ایستگاه هیدرومتری احداث شده است که از مهمترین آنها می‌توان به ایستگاه‌های سلطانی، بافت، هنجان، میدان، کنارویه و چشمه عروس اشاره کرد (نوری، ۱۳۸۶). حوزه آبخیز هلیل رود دارای تنوع آب و هوایی زیادی بوده به نحوی که در ارتفاعات آن اقلیم سرد و خشک و در مناطق دشتی، اقلیم گرم و خشک دیده می‌شود. به طور کلی با توجه به آمار و نقشه‌های موجود حوزه آبخیز رودخانه هلیل رود کم باران ارزیابی شده، ولی در ارتفاعات و سرآب رودخانه، بارش از مرز ۴۰۰ میلی متر در سال فراتر رفته و پوشش برفی نیز دیده می‌شود. نزولات جوی در قسمت اعظم سطح حوضه به استثنای خط‌الراس‌های شمالی و شمال غربی شامل ارتفاعات جبال بارز و لاله‌زار که برف گیر هستند، در بقیه قسمت‌ها به صورت رگبارهای فصلی و از نوع لحظه‌ای و موسمی‌اند (رستمی، ۱۳۸۲). همچنین متوسط درجه حرارت سالیانه در حدود ۱۴ درجه سانتی‌گراد گزارش شده است. موقعیت منطقه مطالعاتی در کشور و نیز ایستگاه‌های هیدرومتری موجود در حوزه آبخیز هلیل رود در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱. موقعیت محدوده مطالعاتی حوزه آبخیز هلیل‌رود در استان و کشور

## ۲-۲. روش تحقیق

تحقیق حاضر با هدف ارزیابی منطقه‌ای خشک‌سالی هیدرولوژیک با استفاده از شاخص جریان پایه در حوزه آبخیز هلیل رود انجام شد. در این تحقیق به منظور ارزیابی خشک‌سالی هیدرولوژیک آمار دبی ایستگاه‌های هیدرومتری موجود در این حوضه استفاده و خشک‌سالی هیدرولوژیک در منطقه مطالعاتی بررسی گردید.

بر اساس آمار دریافت شده از ۱۸ ایستگاه هیدرومتری موجود در حوزه آبخیز هلیل رود از وزارت نیرو (جدول ۱)، تعداد ۱۰ ایستگاه با دوره آماری مشترک ۲۰ ساله برای انجام این پژوهش انتخاب گردیدند که مشخصات ایستگاه‌های منتخب در جدول یک ارائه شده است. در تحقیق حاضر سال آبی ۱۳۷۷-۱۳۷۶ تا سال آبی ۱۳۹۶-۱۳۹۵ به عنوان پایه زمانی مشترک برای بررسی‌های بعدی انتخاب گردید.

جدول ۱. مشخصات ایستگاه‌های منتخب در بررسی خشک‌سالی هیدرولوژیک در حوزه آبخیز هلیل رود

ارتفاع	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی	کد ایستگاه	نام رودخانه	نام ایستگاه
۲۲۷۰	۰۸-۱۴-۲۹	۳۲-۳۷-۵۶	۰۰۱-۴۴	بافت	پل بافت
۲۰۷۰	۰۰-۰۵-۲۹	۰۰-۳۲-۵۶	۰۰۳-۴۴	سلطانی	بافت سلطانی
۱۰۲۰	۴۹-۵۱-۲۸	۰۶-۴۵-۵۷	۰۰۹-۴۴	شور جیرفت	دهرود
۱۴۳۳	۵۶-۵۵-۲۸	۴۵-۴۰-۵۷	۰۲۷-۴۴	دلفارد	کلدان
۱۳۳۶	۳۲-۵۴-۲۸	۳۳-۴۷-۵۷	۰۲۹-۴۴	سغدر	زارین
۲۱۵۰	۵۶-۱۵-۲۹	۵۶-۳۸-۵۷	۰۵۳-۴۴	رودر	هنجان
۲۴۶۰	۴۳-۱۸-۲۹	۱۱-۵۲-۵۶	۱۰۵-۴۴	رابر	چشمه عروس
۱۳۸۰	۵۹-۵۵-۲۸	۴۷-۲۴-۵۷	۱۰۷-۴۴	رمون	قلعه ریگی
۱۹۱۰	۰۰-۱۰-۲۹	۱۲-۰۰-۵۷	۱۱۱-۴۴	سید مرتضی	میدان
۱۴۱۰	۴۴-۵۲-۲۸	۴۲-۱۴-۵۷	۱۱۵-۴۴	هلیل رود	کنارویه

در این پژوهش سطوح آستانه مناسب جهت بررسی خشک‌سالی هیدرولوژیک با استفاده از منحنی تداوم جریان که نشان دهنده رابطه بین دبی‌های ماهانه و احتمال وقوع آن‌ها می‌باشد، انتخاب گردید. بر این اساس، سطوح آستانه ۷۰، ۸۰ و ۹۰ به عنوان مبنا برای استخراج دوره‌های خشک‌سالی هیدرولوژیک در هر سال به صورت جداگانه لحاظ و محاسبه گردیدند. از آنجایی که ممکن است در مناطق خشک و نیمه‌خشک، درصد بیشتری از داده‌های با مقادیر صفر در داده‌های دبی روزانه مشاهده شود، در نظر گرفتن سطح آستانه کمتر مانند صدک ۵۰ یا ۶۰، ممکن است موجب محاسبه سطح آستانه با مقادیر صفر شود، بنابراین سطح آستانه مورد مطالعه با ویژگی‌های منطقه مورد مطالعه برابری می‌کند.

مناطق همگن خشک‌سالی نیز بر پایه سری‌های خشک‌سالی حاصل از شاخص کمبود با استفاده از تحلیل خوشه‌ای تعیین شد. به منظور خوشه‌بندی سلسله مراتبی از الگوریتم روش وارد<sup>۱</sup> استفاده شد که به عنوان روشی مناسب مورد توجه قرار گرفته است (بوور<sup>۲</sup> و همکاران، ۲۰۰۴). در نهایت منطقه مطالعاتی به سه منطقه همگن (بر اساس سطح آستانه ۷۰، ۸۰ و ۹۰) تقسیم شد.

## ۲-۲-۱. شاخص جریان پایه

به منظور محاسبه شاخص جریان پایه ابتدا مقدار حداقل دبی در ماه به عنوان نقطه عطف یا بازگشت مشخص و سپس نمودار نقاط عطف از طریق درون‌یابی خطی (بین نقاط عطف) ترسیم شد تا مقدار جریان پایه ماهانه مشخص شود. در مرحله بعد حجم آب جریان پایه (سطح زیر منحنی جریان پایه) و حجم کل آب (سطح زیر منحنی هیدروگراف) بر پایه مقیاس زمانی سالانه محاسبه و بر پایه روابط ۱ و ۲ شاخص جریان پایه و میانگین سالانه آن در هر یک از ایستگاه‌ها محاسبه شد (گوستارد<sup>۳</sup> و همکاران، ۱۹۹۲؛ تالاکسن و لنن<sup>۴</sup>، ۲۰۰۴).

$$BFI = \frac{\sum_i b_i}{\sum_i d_i} \quad (\text{رابطه ۱})$$

که  $BFI$  شاخص جریان پایه،  $b_i$  مقادیر جریان پایه و  $d_i$  مقادیر کل جریان برای کل سری داده در مقیاس زمانی مورد نظر می‌باشد.

$$MBFI = \frac{\sum_a BFI_a}{n} \quad (\text{رابطه ۲})$$

ه  $MBFI$  میانگین سالانه شاخص جریان پایه،  $BFI_a$  شاخص جریان پایه سالانه،  $a$  نشان‌دهنده سال و  $n$  تعداد کل سال می‌باشد.

<sup>1</sup> Ward

<sup>2</sup> Bower

<sup>3</sup> Gustard

<sup>4</sup> Tallaksen and Lanen

فراوانی میانگین سالانه شاخص جریان پایه در دوره آماری بلند مدت در ایستگاه‌های مورد مطالعه محاسبه و منطقه مطالعاتی بر پایه رژیم جریان رودخانه به چهار دسته تقسیم بندی شد (جدول ۲).

جدول ۲. طبقه‌بندی و دامنه تغییرات شاخص جریان پایه

نماد	توصیف وضعیت حوزه آبخیز	طبقات شاخص
EP	نفوذپذیر (تراوا) با رژیم جریان پایدار	بیشتر از ۰/۷۹
SP	نیمه نفوذپذیر (نیمه تراوا) با رژیم شبه پایدار	۰/۷۴ تا ۰/۷۸
MP	نفوذپذیر کم (کم تراوا) با رژیم کم پایدار	۰/۷۳ تا ۰/۵۴
IP	غیر قابل نفوذ (ناتراوا) با رژیم جریان زودگذر	کمتر از ۰/۵۳

درون‌یابی یکی از مهم‌ترین روش‌هایی می‌باشد که اقلیم‌شناسان در مطالعات پهنه‌بندی از آن استفاده می‌کنند. بدین منظور برای تعیین الگوی توزیع مکانی کمبود حجم جریان از روش درون‌یابی استفاده شد. روش‌های مختلفی برای درون‌یابی وجود دارد. در تحقیق حاضر از چهار روش‌های کریجینگ (Indicator, Universal, Simple, ordinary) و کوکریجینگ استفاده شد. برای انتخاب بهترین درون‌یابی از روش ارزیابی متقابل استفاده شد. برای این کار از شاخص‌های میانگین خطای مطلق<sup>۱</sup>، میانگین خطای اریب یا انحراف<sup>۲</sup> و ریشه دوم میانگین مربع خطا<sup>۳</sup> استفاده شد. معادله‌های مربوط به محاسبه آنها به ترتیب در رابطه‌های ۳، ۴ و ۵ نشان داده شده است.

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n [z^*(x_i) - z(x_i)]}{n} \quad (\text{رابطه ۳})$$

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n |z^*(x_i) - z(x_i)|}{n} \quad (\text{رابطه ۴})$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [z^*(x_i) - z(x_i)]^2}{n}} \quad (\text{رابطه ۵})$$

که در آن‌ها  $n$  = تعداد نقاط مشاهده‌ای،  $Z^*(x_i)$  = مقدار برآوردی بر نقطه  $i$ ام و  $Z(x_i)$  = مقدار مشاهده‌ای برای نقطه  $i$ ام

### ۳. نتایج و بحث

#### ۳-۱. میانگین سالانه شاخص جریان پایه

سری‌های زمانی جریان پایه به عنوان معیاری مناسب در تعیین رفتار دینامیک منابع آب‌های زیرزمینی شناخته شده است. دامنه نوسانات کلی این شاخص بین صفر و یک بوده و چنانچه شاخص به عدد یک نزدیک‌تر باشد، جریان، پایدار و حوضه، نفوذپذیرتر خواهد بود. نتایج نشان داد محدوده شاخص جریان پایه در منطقه مطالعاتی صفر تا ۰/۸۹ بوده (جدول ۳) و انحراف معیار شاخص جریان پایه ۰/۲۹ - ۰/۱۵ بوده است (جدول ۴). بنابر رابطه ۱ و ۲ شاخص جریان پایه و میانگین سالانه شاخص جریان پایه در ایستگاه‌های منطقه در جدول ۳ نشان داده شده است. بنابراین مشاهده شد که کمترین و بیشترین میزان میانگین سالانه شاخص جریان پایه به ترتیب متعلق به ایستگاه دهرود و چشمه عروس بوده است.

<sup>1</sup> Mean Absolute Error (MAE)

<sup>2</sup> Mean Bias Error (MBE)

<sup>3</sup> Root Mean Square Error (RMSE)

جدول ۳. شاخص جریان پایه در هر سال و میانگین ۲۰ ساله شاخص جریان پایه در ایستگاه‌های منطقه مطالعاتی

ایستگاه	سال آبی									
	بافت	سلطانی	دهرود	کلدان	زارین	هنجان	چشمه عروس	قلعه ریگی	میدان	کنارویه
۷۶	۰/۴۳	۰/۳۱	۰/۵۸	۰/۵۹	۰/۷۹	۰/۲۳	۰/۲۸	۰/۵۳	۰/۴۰	۰/۴۳
۷۷	۰/۳۲	۰/۳۸	۰/۱۲	۰/۲۰	۰/۳۶	۰/۳۴	۰/۴۰	۰/۱۶	۰/۲۷	۰/۳۲
۷۸	۰/۴۲	۰/۳۲	۰/۳۵	۰/۳۶	۰/۵۳	۰/۱۵	۰/۴۶	۰/۲۷	۰/۳۴	۰/۴۲
۷۹	۰/۷۳	۰/۴۹	۰/۲۸	۰/۷۵	۰/۳۹	۰/۵۵	۰/۸۳	۰/۶۸	۰/۷۱	۰/۵۳
۸۰	۰/۴۹	۰/۴۲	۰/۴۳	۰/۵۵	۰/۲۷	۰/۱۷	۰/۶۲	۰/۳۹	۰/۵۶	۰/۴۲
۸۱	۰/۰۶	۰/۰۷	۰/۳۲	۰/۴۵	۰/۲۶	۰/۲۳	۰/۵۱	۰/۳۷	۰/۳۸	۰/۳۹
۸۲	۰/۴۱	۰/۴۹	۰/۲۹	۰/۵۰	۰/۵۶	۰/۳۱	۰/۷۰	۰/۴۸	۰/۴۰	۰/۴۷
۸۳	۰/۷۹	۰/۸۶	۰/۵۴	۰/۳۸	۰/۳۹	۰/۷۳	۰/۸۶	۰/۷۶	۰/۳۵	۰/۳۳
۸۴	۰/۱۰	۰/۱۵	۰/۲۲	۰/۵۸	۰/۵۰	۰/۷۷	۰/۵۵	۰/۳۴	۰/۲۷	۰/۲۶
۸۵	۰/۲۲	۰/۳۰	۰/۲۳	۰/۴۶	۰/۳۰	۰/۲۸	۰/۳۴	۰/۳۹	۰/۱۹	۰/۰۹
۸۶	۰/۳۰	۰/۴۹	۰/۱۸	۰/۲۹	۰/۲۹	۰/۸۸	۰/۳۲	۰/۴۲	۰/۲۳	۰/۳۲
۸۷	۰/۴۶	۰/۴۴	۰/۱۵	۰/۴۱	۰/۳۷	۰/۳۸	۰/۵۰	۰/۵۹	۰/۴۴	۰/۵۰
۸۸	۰/۶۱	۰/۱۵	۰/۲۴	۰/۲۰	۰/۱۶	۰/۸۷	۰/۸۷	۰/۷۷	۰/۷۱	۰/۴۹
۸۹	۰/۵۰	۰/۲۹	۰/۲۴	۰/۱۹	۰/۰۹	۰/۷۷	۰/۷۳	۰/۶۷	۰/۵۸	۰/۳۰
۹۰	۰/۵۵	۰/۵۲	۰/۵۸	۰/۳۹	۰/۲۰	۰/۰۰	۰/۴۶	۰/۵۸	۰/۳۴	۰/۵۸
۹۱	۰/۰۰	۰/۲۸	۰/۰۸	۰/۰۱	۰/۱۱	۰/۳۷	۰/۳۴	۰/۰۶	۰/۲۰	۰/۲۰
۹۲	۰/۵۴	۰/۰۲	۰/۱۸	۰/۱۵	۰/۱۵	۰/۱۲	۰/۲۸	۰/۱۸	۰/۳۵	۰/۳۱
۹۳	۰/۰۳	۰/۰۸	۰/۲۵	۰/۱۵	۰/۲۷	۰/۵۰	۰/۲۵	۰/۶۱	۰/۳۳	۰/۲۶
۹۴	۰/۰۰	۰/۳۳	۰/۱۸	۰/۲۱	۰/۱۵	۰/۸۹	۰/۲۶	۰/۴۲	۰/۴۰	۰/۴۳
میانگین شاخص جریان پایه سالانه	۰/۳۷	۰/۳۳	۰/۲۹	۰/۳۶	۰/۳۲	۰/۴۴	۰/۵۰	۰/۴۶	۰/۳۹	۰/۳۷

جدول ۴. انحراف معیار شاخص جریان پایه

نام ایستگاه	انحراف معیار	ضریب تغییرات
بافت	۰/۳۴	۰/۶۶
سلطانی	۰/۲۰	۰/۶۲
دهرود	۰/۱۵	۰/۵۲
کلدان	۰/۱۹	۰/۵۳
زارین	۰/۱۸	۰/۵۶
هنجان	۰/۲۹	۰/۶۶
چشمه عروس	۰/۲۱	۰/۴۲
قلعه ریگی	۰/۲۰	۰/۴۴
میدان	۰/۱۵	۰/۳۸
کنارویه	۰/۱۲	۰/۳۳

### ۳-۲. تقسیم بندی منطقه مطالعاتی بر پایه رژیم جریان رودخانه در منطقه

بر اساس نتایج بدست آمده مشخص گردید که ۱۰۰ درصد ایستگاه‌های منطقه مطالعاتی دارای حوزه آبخیز غیرقابل نفوذ (ناتراوا) با رژیم جریان زودگذر می‌باشند (شکل ۲). بنابراین تامین آب رودخانه در دوره‌های خشک‌سالی، محدود می‌باشد. البته باید توجه کرد تغییر کاربری اراضی می‌تواند با تغییر میزان نفوذپذیری سطح حوزه آبخیز، نقش بسزایی در کاهش شاخص جریان پایه داشته باشد (نصرتی، ۱۳۹۰).

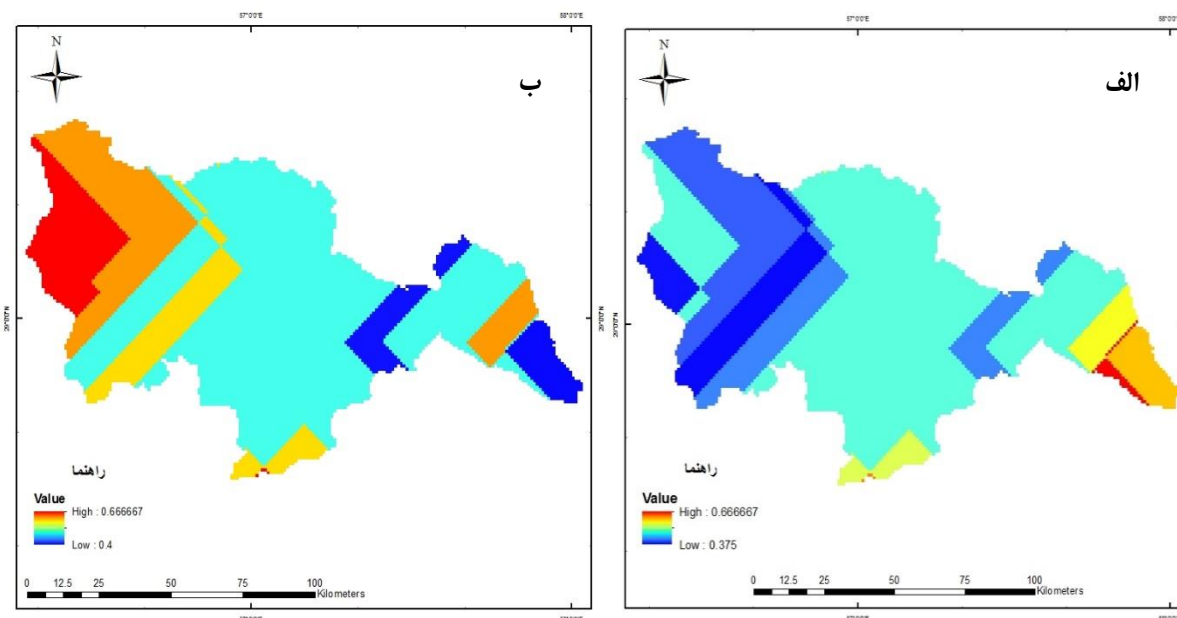




شکل ۲. فراوانی طبقات شاخص جریان پایه در منطقه مطالعاتی (نماد طبقات در جدول ۲ معرفی شده اند)

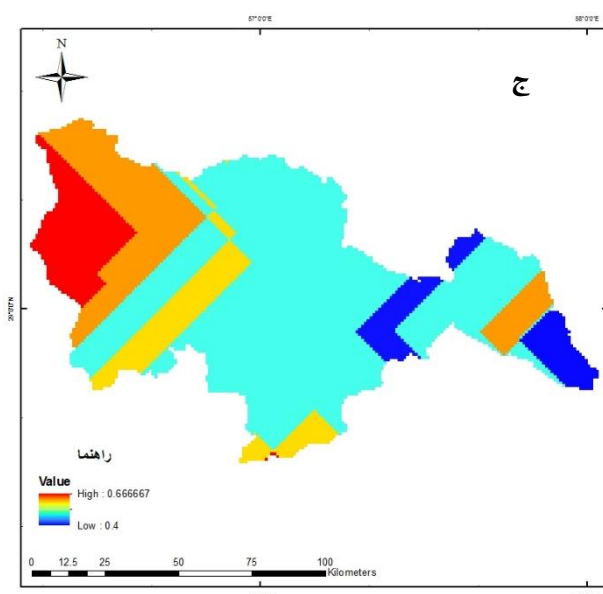
### ۳-۳. پهنه‌بندی خشک‌سالی با استفاده از سطح آستانه ۷۰، ۸۰ و ۹۰ درصد

با استفاده از نرم افزار ArcGIS 10.2.1 نقشه‌های پهنه‌بندی با روش‌های کریجینگ، کو کریجینگ، تخمین موضعی و معکوس فاصله وزنی تهیه گردید. که بهترین روش بر اساس کمترین خطا روش کریجینگ، ایندیکتور<sup>۱</sup> بود. در ادامه پهنه‌بندی بر اساس سطح آستانه ۷۰، ۸۰ و ۹۰ در حوزه آبخیز هلیل رود نشان داده شده است (شکل ۳).  
 با توجه به اینکه محدوده مطالعاتی در منطقه خشک قرار دارد، لذا بررسی سطوح آستانه بالا کاملاً قابل توجیه است زیرا با بالاتر رفتن سطح آستانه از ۷۰ به ۸۰، احتمال عدم بررسی خشک‌سالی و ایجاد موقعیت‌های اضطراری کمتر می‌شود.



شکل ۳. پهنه‌بندی به روش کریجینگ، ایندیکتور، الف) با سطح آستانه ۷۰ ب) با سطح آستانه ۸۰ ج) با سطح آستانه ۹۰

<sup>1</sup> Indicator



ادامه شکل ۳.

### ۳-۴. انتخاب بهترین روش درونیابی در منطقه

در جداول ۵، ۶ و ۷ مقادیر MAE، MBE و RMSE به ترتیب برای سطوح آستانه ۷۰، ۸۰ و ۹۰ آورده شده است. بر اساس نتایج فوق مشاهده شد که هیچ کدام از مقادیر در یک روش کمترین مقدار نبوده، بنابراین برای انتخاب بهترین روش از RMSE استفاده گردید. نتایج بررسی‌ها در سطوح آستانه ۷۰، ۸۰ و ۹۰ نیز نشان داد که در روش کریجینگ، indicator کمترین میزان خطا وجود داشت. بنابراین این روش برای پهنه‌بندی حوزه آبخیز هلیل‌رود مناسب‌ترین روش تشخیص داده شد. به منظور بررسی نقش و اثر کاربری اراضی بر پدیده خشک‌سالی هیدرولوژیک، نقشه کاربری اراضی تهیه گردید (شکل ۴).

جدول ۵. مقادیر MAE، MBE و RMSE برای سطح آستانه ۷۰

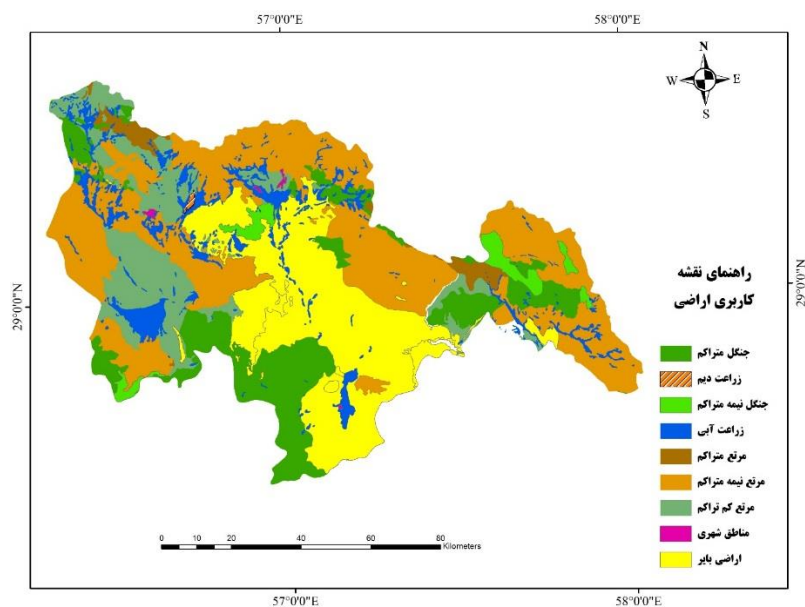
روش پهنه‌بندی	MAE	MBE	RMSE
کریجینگ-ordinary	۱/۹۳۱	-۰/۱۷۵	۲/۴۲۰
کریجینگ-simple	۱/۵۵۳	۰/۰۴۷	۲/۰۳۶
کریجینگ-indicator	۱/۵۰۷	۱/۵۰۷	-۰/۵۵۵
کریجینگ-universal	۱/۹۳۱	-۰/۱۷۵	۲/۴۲۴
کوکرکریجینگ-ارتفاع	۸۷/۱۳۶	۲/۲۶	۲/۴۸
کوکرکریجینگ-مساحت	۱۲۷۹/۸۶	۳۶/۶۶	۲/۱۹
LPI	۱/۶۶۵	-۰/۲۴۵	۲/۳۴۰
IDW	۱/۹۹۹	۰/۰۵۸	۲/۶۴۰
حداقل	۱/۵۰۷	-۰/۱۷۵	-۰/۵۵۵

جدول ۶. مقادیر MAE، MBE و RMSE برای سطح آستانه ۸۰

روش پهنه‌بندی	MAE	MBE	RMSE
کریجینگ-ordinary	۳/۳۰	-۰/۳۲	۴/۰۲
کریجینگ-simple	۲/۶۵	-۰/۰۴	۳/۳۶
کریجینگ-indicator	۲/۷۸	۲/۷۸	-۰/۵۷
کریجینگ-universal	۳/۳۰	-۰/۳۲	۴/۰۲
کو کریجینگ-ارتفاع	۲/۹۷	-۰/۱۵	۳/۷۱
کو کریجینگ-مساحت	۳/۰۴	-۰/۳۷	۳/۶۵
LPI	۲/۸۰	۰/۴۱	۳/۸۸
IDW	۳/۴۱	-۰/۱۰	۴/۴۱
حداقل	۲/۶۵	-۰/۳۲	-۰/۵۷

جدول ۷. مقادیر MAE، MBE و RMSE برای سطح آستانه ۹۰

روش پهنه‌بندی	MAE	MBE	RMSE
کریجینگ-ordinary	۵/۶۴	-۰/۶۱	۶/۷۶
کریجینگ-simple	۴/۵۵	-۰/۰۸	۵/۶۵
کریجینگ-indicator	۵/۲۴	۵/۲۴	-۰/۵۷۲
کریجینگ-universal	۵/۶۴	-۰/۶۱	۶/۷۶
کو کریجینگ-ارتفاع	۵/۰۵	-۰/۳۹	۶/۱۸۵
کو کریجینگ-مساحت	۵/۲۰	-۰/۵۱	۵/۱۶
LPI	۴/۸۹	۰/۶۵	۶/۵۷
IDW	۵/۹۳	۰/۰۸	۷/۵۳
حداقل	۴/۵۵	-۰/۶۱	-۰/۵۷۲



شکل ۴. نقشه کاربری اراضی حوزه آبخیز هلیل رود

### ۳-۵. بحث

نتایج نشان داد که در حوزه آبخیز مورد مطالعه عمده بارندگی‌ها در ماه‌های بهمن تا اردیبهشت رخ داده است، بنابراین نفوذپذیری می‌تواند نقش مهمی در تأمین آب پایه در ماه‌های بدون بارش سال ایفا نموده و باعث افزایش منابع آب زیرزمینی شده و دبی رودخانه را در ماه‌های بدون بارش سال تأمین کند. در منابع علمی گوناگون عوامل مختلفی در بررسی شرایط کمبود جریان مورد بررسی قرار گرفته است. در این میان اسماختین<sup>۱</sup> زمین‌شناسی را به عنوان یکی از مهم‌ترین عوامل طبیعی مؤثر بر پدیده‌ی کمبود جریان برشمرده است. در واقع در شرایط کمبود جریان یکی از مهم‌ترین اجزا، جریان پایه است که به زمین‌شناسی منطقه و به‌ویژه قابلیت نفوذ لایه‌های زیرین وابسته است. آب‌گذر بودن لایه‌های زیرین از دیگر عواملی است که به تغذیه آب‌های زیرزمینی کمک کرده و در نهایت در دوره‌های بدون بارش دبی رودخانه‌ها را تأمین می‌کند.

### ۳-۵-۱. بررسی خشک‌سالی هیدرولوژیک با استفاده از اعمال حد آستانه

انتخاب سطح آستانه مناسب بستگی به هدف بررسی و ویژگی‌های جریان دارد (فلیگ و همکاران، ۲۰۰۶). در تحقیق حاضر سه حد آستانه ۷۰، ۸۰ و ۹۰ انتخاب گردید که به دلیل دقت بالاتر در حد آستانه ۹۰، این حد مینا برای بررسی‌های بعدی انتخاب گردید. زیرا در مناطق خشک و نیمه خشک انتخاب حدود آستانه کمتر ممکن است موجب محاسبه سطح آستانه صفر گردد (نصرتی و همکاران، ۱۳۸۳).

مقادیر حداکثر شدت کمبود جریان ماهانه در ماه‌های مختلف در ایستگاه‌های مختلف، متفاوت بوده است چنانکه در ایستگاه کنارویه در طول ۲۰ سال، از بین ۱۹۰ ماه دارای کمبود جریان، بیشترین تعداد ماه دارای کمبود جریان مربوط به ماه مهر، مرداد و شهریور و با ۱۹ مورد بوده است. شدیدترین کمبود جریان اتفاق افتاده با میزان ۹۲ متر مکعب در ماه مربوط به ماه‌های مهر، آبان، مرداد و شهریور بود که در ایستگاه میدان از ۱۹۱ ماه خشک، بیشترین رخداد کمبود جریان متعلق به ماه مهر، مرداد و شهریور مهر با ۱۹ مورد بوده و حداکثر شدت کمبود جریان در ماه مهر و آبان با میزان ۴۲ متر مکعب می‌باشد. در ایستگاه قلعه‌ریگی از ۱۹۰ ماه دارای کمبود جریان، ماه مهر، مرداد و شهریور با ۱۹ مورد کمبود جریان، خشک‌ترین ماه بوده و شدیدترین کمبود جریان اتفاق افتاده در ماه مهر به میزان ۸ متر مکعب در ماه بوده است. در ایستگاه چشمه‌عروس از بین ۱۹۰ ماه دارای کمبود جریان، ماه مهر، مرداد و شهریور با ۱۹ ماه دارای کمبود جریان بیشترین ماه خشک را دارا بوده و شدیدترین کمبود جریان در ماه مهر، مرداد و شهریور با میزان ۱۳ متر مکعب می‌باشد. در ایستگاه هنجان از بین ۱۹۰ ماه دارای کمبود جریان، بیشترین تعداد ماه دارای کمبود جریان مربوط به ماه مهر، آبان، مرداد و شهریور با ۱۹ مورد بوده و شدیدترین کمبود جریان اتفاق افتاده در این ایستگاه با میزان ۱۶ متر مکعب در ماه مربوط به ماه مهر می‌باشد.

در سایر ایستگاه‌ها از جمله در ایستگاه زارین از ۱۹۰ ماه کم آب، بیشترین رخداد کمبود جریان متعلق به ماه مهر، مرداد و شهریور با ۱۹ مورد بوده و حداکثر شدت کمبود جریان در ماه مهر با میزان ۱۲ متر مکعب می‌باشد. در ایستگاه کلدان از ۱۹۰ ماه دارای کمبود جریان، ماه‌های مهر، مرداد و شهریور با ۱۹ مورد کمبود جریان، خشک‌ترین ماه‌ها بوده و شدیدترین کمبود جریان اتفاق افتاده در ماه مهر به میزان ۸ متر مکعب در ماه بوده است. در ایستگاه دهرود از بین ۱۹۰ ماه دارای کمبود جریان، ماه تیر، مرداد، شهریور و مهر با ۱۹ ماه دارای کمبود جریان بیشترین ماه خشک را دارا می‌باشند و شدیدترین کمبود جریان در مهر ماه با میزان ۵۰ متر مکعب می‌باشد. در ایستگاه سلطانی از بین ۱۹۰ ماه دارای کمبود جریان، ماه مهر با ۱۹ ماه دارای کمبود جریان بیشترین ماه خشک را دارا می‌باشد و شدیدترین کمبود جریان در آبان ماه با میزان ۱۰ متر مکعب می‌باشد.

در ایستگاه بافت نیز از بین ۱۸۰ ماه دارای کمبود جریان، ماه مرداد و شهریور با ۱۹ ماه دارای کمبود جریان بیشترین ماه خشک را دارا می‌باشند و شدیدترین کمبود جریان در مهر ماه با میزان ۶ متر مکعب می‌باشد. بیشترین تعداد ماه‌های دارای کمبود جریان به ترتیب در ماه مهر مربوط به همه ۱۰ ایستگاه با ۱۹ ماه، در ماه آبان ایستگاه‌های بافت، زارین، قلعه‌ریگی، میدان و کنارویه با ۱۹ ماه، در ماه آذر ایستگاه‌های دهرود، کلدان، قلعه‌ریگی با ۱۹ ماه، در ماه دی ایستگاه چشمه‌عروس با ۱۶ ماه، در ماه بهمن ایستگاه‌های میدان و چشمه‌عروس با ۱۴ ماه،

<sup>1</sup> Smakhtin

در ماه اسفند ایستگاه کلدان با ۱۰ ماه، در ماه فروردین ایستگاه‌های کلدان، دهرود با ۱۱ ماه، در ماه اردیبهشت ایستگاه سلطانی، دهرود با ۱۸ ماه، در ماه خرداد ایستگاه سلطانی، زارین، هنجان، چشمه‌عروس، قلعه‌ریگی، میدان و کنارویه با ۱۹ ماه، در ماه تیر ایستگاه‌های دهرود، کلدان، هنجان، قلعه‌ریگی و میدان با ۱۹ ماه، در ماه مرداد ایستگاه‌های بافت، سلطانی، دهرود، کلدان، زارین، چشمه‌عروس، قلعه‌ریگی و کنارویه با ۱۹ ماه و در ماه شهریور ایستگاه سلطانی، دهرود، زارین، هنجان، چشمه‌عروس، قلعه‌ریگی و کنارویه با ۱۹ ماه می‌باشد.

در تحقیق حاضر با تعیین شدت خشک‌سالی، تداوم و حجم کمبود جریان منطقه مطالعاتی پرداخته شد، که نتایج نشان داد بیشترین حجم کمبود در ایستگاه کنارویه به رخ داده بود. ایستگاه کنارویه به دلیل قرار گرفتن در پایین دست منطقه کشاورزی و مناطق مناسب برای جنگل‌کاری، مستعد پدیده خشک‌سالی بوده است، زیرا با وجود حوزه آبخیز وسیع ولی به دلیل برداشت آب در مسیر، کاهش چشمگیر خواهد یافت. همچنین هر سه سطح مبنا در محل ایستگاه هنجان دارای بیشترین تداوم خشک‌سالی بود. بررسی کاربری اراضی در محدوده این ایستگاه نیز بیانگر فقر پوشش گیاهی و در نتیجه تاثیر احتمالی آن بر کاهش نفوذپذیری، افزایش میزان رواناب سطحی و در نتیجه افزایش جریان رودخانه بوده است که با نتایج پژوهش ژو و همکاران (۲۰۱۹) و ژانگ و همکاران (۲۰۲۲) همخوانی دارد.

### ۳-۵-۲. بررسی منطقه با روش منطقه همگن

حوزه آبخیز هلیل رود به سه منطقه همگن تقسیم و سپس برای هر منطقه و هر سه سطح مبنا، دبی ویژه محاسبه گردید. نتایج بررسی‌ها نشان داد که در محل ایستگاه دهرود (منطقه همگن ۳) دبی ویژه در سطح آستانه ۷۰ بوده است.

جدول ۸. متوسط دبی ویژه در مناطق همگن با استفاده از سطح آستانه ۷۰

منطقه همگن	نام ایستگاه	کد ایستگاه	متوسط دبی ویژه
۱	کنارویه	۱۱۵-۴۴	۰/۰۸۳
۲	هشت ایستگاه دیگر	-	۰/۳۹۸
۳	دهرود	۰۰۹-۴۴	۰/۴۱۴

همچنین دبی ویژه در سطح آستانه ۸۰ ایستگاه دهرود و میدان (منطقه همگن ۲) بوده است.

جدول ۹. متوسط دبی ویژه در مناطق همگن با استفاده از سطح آستانه ۸۰

منطقه همگن	نام ایستگاه	کد ایستگاه	متوسط دبی ویژه
۱	کنارویه	۱۱۵-۴۴	۰/۰۸۳
۲	میدان، دهرود	۰۰۹-۴۴ / ۱۱۱-۴۴	۰/۴۱۶
۳	هفت ایستگاه دیگر		۰/۳۹۵

همچنین دبی ویژه در سطح آستانه ۹۰ ایستگاه دهرود و میدان (منطقه همگن ۲) بوده است.

جدول ۱۰. متوسط دبی ویژه در مناطق همگن با استفاده از سطح آستانه ۹۰

منطقه همگن	نام ایستگاه	کد ایستگاه	متوسط دبی ویژه
۱	کنارویه	۱۱۵-۴۴	۰/۰۸۳
۲	میدان، دهرود	۰۰۹-۴۴ / ۱۱۱-۴۴	۰/۴۱۶
۳	هفت ایستگاه دیگر		۰/۳۹۵

### ۳-۵-۳. بررسی خشک‌سالی هیدرولوژیک با استفاده از شاخص جریان پایه

در این پژوهش به بررسی تغییرات سطح جریان رودخانه در حوزه آبخیز هلیل رود با استفاده از شاخص جریان پایه و بررسی حجم کمبود با استفاده از سطح آستانه ۷۰، ۸۰ و ۹۰ پرداخته شد. به این منظور آمار ماهانه و روزانه دبی رودخانه هلیل رود در ده ایستگاه هیدرومتری به مدت ۲۰ سال آبی بررسی گردید.

بر اساس پژوهش‌ها، از عوامل موثر بر کمبود جریان می‌توان به زمین‌شناسی منطقه که بر روی قابلیت نفوذ آب به لایه‌های زیرین تاثیر گذار است اشاره کرد، زیرا در شرایط کمبود جریان یکی از مهمترین اجزاء، جریان آب پایه است، که این مسئله به زمین‌شناسی و قابلیت نفوذ لایه‌های زیرین وابسته می‌باشد (اسماختین، ۲۰۰۱). با توجه به اینکه تامین آب از طریق آب‌های زیرزمینی و ذوب برف صورت می‌گیرد، آب گذر بودن لایه‌های زیرین از طریق تاثیر در تغذیه آب‌های زیرزمینی و تامین جریان رودخانه‌ها در دوره‌های بدون بارش بر کمبود جریان تاثیر دارد. نوع کاربری اراضی نیز از سایر عوامل موثر بر کمبود جریان است. بررسی نقشه کاربری اراضی محدوده مطالعاتی نشان داد که شامل کاربری جنگل و بیشه‌زار ۰/۲۳٪، باغ و کشاورزی ۱/۶۵٪، محدوده خوب ۰/۷۲٪، محدوده میانه ۴۹/۱۸٪، محدوده فقیر ۲۹/۱۹٪، منطقه شهری ۰/۰۵۳٪ و بقیه منطقه شامل مسیل، زمین لخت، سنگ و آب بودند. بر اساس نتایج بدست آمده از بررسی داده‌های ماهانه و روزانه دبی در ده ایستگاه هیدرومتری مشخص شد که تمامی ایستگاه‌ها در منطقه نفوذ ناپذیر با رژیم جریان کم پایدار قرار داشتند، که با در نظر گرفتن کاربری و ارتفاع ایستگاه‌ها و حوضه آن‌ها این مسئله توجیه پذیر است و با بررسی اسماختین همخوانی داشته و نشان از کمبود جریان ناشی از موقعیت زمین‌شناسی منطقه می‌دهد. این نتیجه گیری با تحقیق (نصرتی، ۱۳۹۱)، نیز همخوانی داشت.

نتایج پژوهش حاضر نشان داد که ایستگاه‌هایی که در مناطقی با کاربری جنگل یا مرتع واقع شده‌اند متوسط تداوم کمبود جریان کمتر بوده است. پوشش درختی و عرصه‌های مرتعی به دلیل ریشه متراکم باعث افزایش آبگذری و به همین دلیل دبی پایه حتی در دوره‌های بدون بارش در رودخانه جریان داشته است. در نواحی با پوشش درختی سیستم ریشه، ماده آلی و لاشبرگ میزان نفوذ آب و ظرفیت نگهداری آب در خاک را افزایش داده است. بنابراین رولناب روی زمین کمتر، زمان رولناب طولانی‌تر و تداوم کمبود جریان در کاربری جنگل نسبت به سایر کاربری‌ها کم‌تر می‌باشد (بنگاس<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۱۴). نتایج به دست آمده با نتایج گراندری<sup>۲</sup> در حوزه آبخیز والونیا بلژیک مطابقت دارد.

### ۳-۵-۴. پراکنش مکانی خشک‌سالی

طبق نقشه‌های پهنه‌بندی بدست آمده، مناطق حداکثر خشک‌سالی در مناطق شمال غربی حوضه مورد مطالعه منطبق بر ایستگاه‌های بافت با مساحت ۲۳۵ کیلومتر مربع و ۱/۹٪ از منطقه مطالعاتی، سلطانی با مساحت ۹۳۵ کیلومتر مربع و ۷/۸٪ از منطقه و چشمه‌عروس با مساحت ۱۰۰ کیلومتر مربع و ۰/۸٪ از حوضه هلیل رود را شامل شده و با نقشه کاربری اراضی بدست آمده مشخص شد که این مناطق از نظر پوشش گیاهی طبیعی جزو مناطق فقیر بوده و از نظر میزان نفوذ آب ورودی به حوضه ضعیف عمل می‌کنند. در این منطقه بیشترین خشک‌سالی در مناطق شمال-غربی و جنوب بوده و به سمت مرکز و شرق منطقه، از میزان شدت خشک‌سالی کاسته شده است که با نتایج تحقیق اسلامیان (۱۳۹۱)، هماهنگی دارد.

### ۴. نتیجه‌گیری

با توجه با نتایج تحقیق مشخص گردید که حوزه آبخیز هلیل رود با تداوم حداکثر ۱۴ ماهه خشک‌سالی و حداکثر خشک‌سالی در منطقه شمال غرب و جنوب غربی، دارای شاخص جریان پایه طولانی مدت ۰/۳۸۳ دارای ۱۰۰ درصد منطقه غیر قابل نفوذ با رژیم جریان ناپایدار

<sup>۱</sup> Benegas

<sup>۲</sup> Grandry

بوده است. ایستگاه‌های بافت، سلطانی و چشمه‌عروس مستقر در محدوده‌های با پوشش گیاهی ضعیف و با نفوذ پذیری حداقل آب ورودی به حوضه و با جریان ناپایدار رودخانه، در معرض خشک‌سالی هیدرولوژیک قرار داشته و در صورت بروز این پدیده از نظر تامین آب مورد نیاز برای مناطق کشاورزی، باغی و مسکونی منطقه دچار کمبود خواهند شد. همچنین می‌توان چنین نتیجه گرفت که شاخص جریان پایه رودخانه دارای کارایی مطلوب برای بررسی خشک‌سالی هیدرولوژیک بوده است.

## References

- Abbasinia, A., Morshedi, J., Zohorayan, M., & Ghorbaniyan, J. (2021). Analysis and Comparison of SPI and GRI Indices in Assessing Meteorological Drought and Groundwater, Case Study: Mehran Plain, Ilam Province. *Physical Geography Quarterly*, 14, 95-114. (In Persian)
- Baruti, H., Zulfiqari, M., & Sulaimanpour, S. (2012). Comparison of PNPI and SPI indices in monitoring and zoning the drought process in Qazvin province, 5th Iran Water Resources Management Conference, Ayaran Water Resources Science and Engineering Association. February 29-30. (In Persian)
- Benegas, L., Ilstedt, U., Roupsard, O., Jones, J., & Malmer, A. (2014). Effects of trees on infiltrability and preferential flow in two contrasting agroecosystems in Central America. *Agriculture, ecosystems & environment*, 183, 185-196.
- Eskandari Damaneh, H., Zehtabian, G. R., Khosravi, H., & Azareh, A. (2016). Investigation and Analysis of Temporal and Spatial Relationship between Meteorological and Hydrological Drought in Tehran Province. *Scientific- Research Quarterly of Geographical Data (SEPEHR)*, 24(96), 113-120. (In Persian)
- Eslamian, S. S., Ghasemi, M., & Gerdefaramarzi, S. S. (2012). Computation and regionalization of low flow indices and determination of hydrological drought durations in Karkhe Watershed. *JWSS-Isfahan University of Technology*, 16(59), 1-14. (In Persian)
- Farsadnia, F., Ghahreman, B., Modarres, R., & Moghaddam Nia, A. (2018). Hydrologic Drought Frequency Analysis in Karkhe Basin Based on Bivariate Statistical Analysis. *JWSS-Isfahan University of Technology*, 22(3), 339-355. (In Persian)
- Fleig, A. K., Tallaksen, L. M., Hisdal, H., & Demuth, S. (2006). A global evaluation of streamflow drought characteristics. *Hydrology and Earth System Sciences*, 10(4), 535-552.
- Ghorbani, M., Mozayyan, M., & Zarei, H. (2019). Hydrological Drought Investigation of Armand River Using Low Flows Analysis. *Journal of Water and Soil Conservation*, 26(3), 247-263. (In Persian)
- Grandry, M., Gailliez, S., Brostaux, Y., & Degré, A. (2020). Looking at trends in high flows at a local scale: The case study of Wallonia (Belgium). *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 31, 100729.
- He, Z., Liang, H., Yang, C., Huang, F. & Zeng, X., (2018), Temporal-spatial evolution of the hydrologic drought characteristics of the karst drainage basins in South China. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 64, 22-30.
- Jahangir, M. H., Babaei, S., & Norozi, E. (2019). Drought condition assessment of Kermanshah province using River flow Drought Index (SDI). *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 13(1), 190-202. (In Persian)
- Jahangir, M. H., Khoshmashraban, M., & Yousefi, H. (2015). Drought monitoring with Standard Precipitation Index (SPI) and drought forecasting with multi-layers perceptron (Case study: Tehran and Alborz Provinces). *Iranian journal of Ecohydrology*, 2(4), 417-428. (In Persian)
- Janbozorgi, M., Hanifeh Pour, M., & Khosravi, H. (2021). Temporal changes in meteorological-hydrological drought (Case study: Guilan Province). *Water and Soil Management and Modeling*, 1(2), 1-13. (In Persian)
- Karami, M., SHahedi, K., & KHosravi, K. (2016). Investigation of meteorological and Hydrological Drought using Drought Indices in Qarehsou river basin. *Journal of the Earth and Space Physics* 42(1), 159-170. (In Persian)
- Kazemzadeh, M., Noori, Z., Moghadamnia, A. R., & Malekian, A. (2016). Clustering and Analyzing of Surface Water Droughts Severity and Duration (Case Study: Ilam Province). *Journal of Watershed Management Research*, 6(12), 127-138. (In Persian)
- Liu, X., Xu, X., Yu, M., & Lu, J. (2016). Hydrological drought forecasting and assessment based on the standardized stream index in the Southwest China. *Procedia Engineering*, 154, 733-737.
- Lorenzo-Lacruz, J., Morán-Tejeda, E., Vicente-Serrano, S. M., & López-Moreno, J. I. (2013). Streamflow droughts in the Iberian Peninsula between 1945 and 2005: spatial and temporal patterns. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17(1), 119-134.

- MesbahZadeh, T., & SoleimaniSardoo, F. (2018). Temporal trend study of hydrological and meteorological drought in Karkheh watershed. *Iranian Journal of Watershed Management Science and Engineering*, 12(40), 105-114. (In Persian)
- Mortezaii, G, Ioffi, J, Khalighi Sigarodi, Sh, Saravi, M, & Nazari Samini, A. (2020). Analysis and evaluation of hydrological drought indicators in Kurdistan Province. *Watershed Engineering and Managment*, 12(2), 441-453. (In Persian)
- Nosrati, K. (2012). Regional Analysis of Hydrological Drought in Sefidrood Drainage Basin Using Base Flow Index. *Journal of Range and Watershed Management*, 65(2), 257-267. (In Persian)
- Nosrati, K., Mohseni, S. M., Eslamian, S., Sharifi, F., & Mahdavi, M. (2004). Identification of Homogenous Regions for Low Flow Frequency Analysis. *Journal of Range and Watershed Management*, 57(1), 45-58. (In Persian)
- Odongo, R. A., De Moel, H., & Van Loon, A. F. (2023). Propagation from meteorological to hydrological drought in the Horn of Africa using both standardized and threshold-based indices. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 23(6), 2365-2386.
- Ozkaya, A., & Zerberg, Y. (2019). A 40-year analysis of the hydrological drought index for the Tigris Basin, Turkey. *Water*, 11(4), 657.
- Razavizadeh, S., & Dargahian, F. (2021). Analysis of temporal and spatial relationship between meteorological and hydrological drought in Zohreh-Jarahi basin. *Iran Nature*, 6(5), 45-53. (In Persian)
- Smakhtin, V. U. (2001). Low flow hydrology: a review. *Journal of hydrology*, 240(3-4), 147-186.
- Soleimani Sardou, F., & Bahremand, A. (2013). Hydrological drought analysis using SDI index in Halilroud basin of Iran. *The International Journal of Environmental Resources Research*, 1(3), 279-288. (In Persian)
- Staudinger, M., Stahl, K., Seibert, J., Clark, M. P., & Tallaksen, L. M. (2011). Comparison of hydrological model structures based on recession and low flow simulations. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(11), 3447-3459.
- Sutanto, S. J., & Van Lanen, H. A. (2020). Hydrological drought characteristics based on groundwater and runoff across Europe. *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*, 383, 281-290.
- Teimouri M. (2015) Evaluation of Base Flow Separation Methods Based on Recession Analysis. *GeoResearch*, 29 (4), 57-66. (In Persian)
- Van Loon, A. F., & Van Lanen, H. A. (2012). A process-based typology of hydrological drought. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(7), 1915-1946.
- Wada, Y., Van Beek, L. P., Wanders, N., & Bierkens, M. F. (2013). Human water consumption intensifies hydrological drought worldwide. *Environmental Research Letters*, 8(3), 034036.
- Xu, Y., Zhang, X., Wang, X., Hao, Z., Singh, V. P., & Hao, F. (2019). Propagation from meteorological drought to hydrological drought under the impact of human activities: A case study in northern China. *Journal of Hydrology*, 579, 124147.
- Yang, F., Yue, S., & Sheng, X. (2021). Comprehensive evaluation of hydrological drought and the effects of large reservoir on drought resistance in the Hun River basin, NE 2 China 3. *Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions*, 1-22.
- Yarahmadi, J., & Rostamizad, G. (2019). The Analysis of the Hydrological Droughts in the Northern Part of Lake Urmia. *Hydrogeomorphology*, 6(19), 79-100. (In Persian)
- Zhang, T., Su, X., Zhang, G., Wu, H., Guanzhi W, & Jiangdong C. (2022). Evaluation of the impacts of human activities on propagation from meteorological drought to hydrological drought in the Weihe River Basin, China. *Science of the Total Environment*, 819, 153030.