



Print ISSN: 2251-7480
Online ISSN: 2251-7400

Journal of
**Water and Soil
Resources Conservation
(WSRCJ)**

Web site:

<https://wsrcj.srbiau.ac.ir>

Email:

iauwsrcj@srbiau.ac.ir
iauwsrcj@gmail.com

**Vol. 13
No. 1 (49)**

**Received:
2022-12-03**

**Accepted:
2023-02-06**

Pages: 53-67



Determining Hydrological Drought Characteristics Using Severity-Duration-Frequency Curves and Flow Thresholds Levels in Ardabil Province Rivers

Hamed Amini¹, Abazar Esmali Ouri², Raof Mostafazadeh^{3*}, Meraj Sharari⁴
and Mohsen Zabih⁵

- 1) M.Sc. in Watershed Management Engineering, Department of Natural Resources, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.
- 2) Professor, Department of Natural Resources, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.
- 3) Associate Professor, Department of Natural Resources, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.
- 4) Associate Professor, Department of Natural Resources, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.
- 5) Ph.D. of Watershed Management Sciences and Engineering, Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

*Corresponding author email: raoofmostafazadeh@uma.ac.ir

Abstract:

Background and Aim: Drought is a global phenomenon that can occur anywhere and cause significant damage to humans and natural ecosystems. Therefore, the issue of hydrological drought and reduction of river flow in Ardabil province is also an important issue that requires a comprehensive study.

Method: In this study, hydrological drought characteristics are using Severity-Duration-Frequency (SDF) curves considering four different threshold levels (constant, annual average, seasonal, and environmental flow) in 33 hydrometric stations in Ardabil province. The severities of drought events are calculated using Easy-Fit software in different return periods. In this regard, drought magnitude-duration-frequency curves are calculated and based on that, the values of drought events in different return periods are calculated and analyzed.

Results: The highest drought event is determined for constant, seasonal, yearly, E-flow threshold levels in Samina, Mashiran, Booran, and Samian stations, respectively. Also, the lowest occurrence of drought is associated with the Vildaragh station. The majority of drought events in all four aforementioned thresholds are mostly observed in shorter durations, especially within one-month periods. The Jonson_SB and General Extreme Value distributions were the most suitable statistical distributions. The highest intensity of drought increases with longer return periods associated with the average annual threshold level, and the lowest intensity of hydrological drought is linked to the threshold of environmental flow. The SDF curves for all stations demonstrate an increasing trend, indicating that with prolonged hydrological drought duration in all studied thresholds, the severity of hydrological drought occurrences also increases. The greatest intensity of hydrological drought is sequentially related to the annual threshold, followed by the seasonal threshold and the fixed threshold, with the threshold of environmental flow being the lowest and least. Consequently, for shorter return periods, the fixed threshold indicates greater intensity or magnitude compared to the seasonal threshold in all four stations, and for longer return periods, the seasonal threshold demonstrates higher intensity of drought events compared to the fixed threshold.

Conclusion: Furthermore, it can be concluded that the magnitude of hydrological drought at a fixed threshold shows less variability in all four selected stations compared to the other thresholds. It should be noted that in defining drought based on fixed, annual, and seasonal thresholds, events will have a higher number and greater intensity compared to the environmental flow threshold. The spatial changes in drought intensity are depicted on the map, indicating that most droughts have occurred in stations located in the northern and north-western regions (Borran and Dostbiglou). Separating the effects of human and climatic factors in drought assessment is a suggestion from this study that could be considered in future research.

Key words: Threshold level, Mean seasonal flow, Environmental flow, Drought severity, Drought duration



شاپا چاپی: ۲۲۵۱-۷۴۸۰
شاپا الکترونیکی: ۲۲۵۰-۷۴۰۰

نشریه حفاظت منابع آب و خاک

آدرس تارنما:

<https://wsrcj.srbiau.ac.ir>

پست الکترونیک:

iauwsrcj@srbiau.ac.ir
iauwsrcj@gmail.com

سال سیزدهم

شماره ۱ (۴۹)

تاریخ دریافت:

۱۴۰۱/۰۹/۱۲

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۱/۱۱/۱۷

صفحات: ۶۷-۵۳

تعیین ویژگی‌های خشکسالی هیدرولوژیک بر اساس منحنی‌های بزرگی-مدت-فرآوانی و آستانه‌های مختلف جریان رودخانه‌های استان اردبیل

حامد امینی^۱، اباذر اسمعیلی عوری^۲، رؤف مصطفی زاده^{۳*}، معراج شرری^۴ و محسن ذبیحی^۵

(۱) دانش‌آموخته کارشناسی‌ارشد مهندسی آبخیزداری، گروه منابع طبیعی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

(۲) استاد گروه منابع طبیعی و عضو پژوهشکده مدیریت آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

(۳) دانشیار گروه منابع طبیعی و عضو پژوهشکده مدیریت آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

(۴) دانشیار گروه منابع طبیعی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

(۵) دانش‌آموخته دکتری علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

* ایمیل نویسنده مسئول: raofmostafazadeh@uma.ac.ir

چکیده:

زمینه و هدف: خشکسالی پدیده‌ای جهانی است که می‌تواند در هر جایی رخ دهد و خسارات قابل توجهی به انسان و اکوسیستم‌های طبیعی وارد کند. لذا موضوع خشکسالی هیدرولوژیک و کاهش جریان در رودخانه‌های استان اردبیل نیز از موارد مهمی است که نیازمند مطالعه جامعی در این خصوص است.

هدف: در تحقیق حاضر، به تحلیل و مقایسه خشکسالی هیدرولوژیک با استفاده از ۴ آستانه مختلف (ثابت، متوسط سالانه، جریان زیست‌محیطی و فصلی) در ۳۳ ایستگاه هیدرومتری استان اردبیل پرداخته شد. شدت وقایع خشکسالی با استفاده از نرم‌افزار Easy-Fit در دوره‌بازگشت‌های مختلف محاسبه شد. در این راستا، منحنی‌های بزرگی-مدت-فرآوانی خشکسالی محاسبه شد و بر اساس آن مقادیر وقایع خشکسالی در دوره‌بازگشت‌های مختلف محاسبه و مورد تحلیل قرار گرفت.

روش: برای مطالعه خشکسالی هیدرولوژیک از ۴ آستانه مختلف استفاده شده و شدت خشکسالی هیدرولوژیک در دوره‌بازگشت‌های متفاوت محاسبه شد و سپس به بررسی خشکسالی هیدرولوژیک در دوره‌بازگشت‌های مختلف و منحنی‌های بزرگی-مدت-فرآوانی پرداخته شد.

یافته‌ها: بیش‌ترین رخداد خشکسالی در آستانه‌های ثابت، فصلی، سالانه و جریان زیست‌محیطی به‌ترتیب مربوط به ایستگاه‌های سامیان، مشیران، بوران و سامیان بوده است. هم‌چنین کم‌ترین رخداد خشکسالی مربوط به ایستگاه ویلادرق بوده است. بیش‌ترین رخدادهای خشکسالی در هر چهار آستانه مذکور، اکثراً در تداوم‌های کم‌تر به خصوص یک ماهه دیده می‌شود. با توجه به تناسب داده‌ها با توزیع‌های متفاوت، توزیع‌های جانسون-اس بی و مقادیر فرین تعمیم یافته بیش‌ترین کاربرد را داشتند. بیش‌ترین شدت خشکسالی با افزایش دوره‌بازگشت مربوط به سطح آستانه متوسط سالانه و کم‌ترین شدت خشکسالی هیدرولوژیک، مربوط به سطح آستانه جریان زیست‌محیطی است. منحنی‌های بزرگی-مدت-فرآوانی در همه ایستگاه‌ها روند افزایشی را نشان داد و این بدین معنا است که با افزایش تداوم خشکسالی هیدرولوژیک در همه آستانه‌های مورد مطالعه، شدت وقوع خشکسالی‌های هیدرولوژیک هم افزایش می‌یابد. بیش‌ترین شدت خشکسالی هیدرولوژیک به‌ترتیب مربوط به آستانه سالانه سپس آستانه فصلی و آستانه ثابت و از همه کم‌تر و پایین‌تر آستانه جریان زیست‌محیطی است. بنابراین، در دوره‌بازگشت‌های کم‌تر در هر چهار ایستگاه آستانه ثابت شدت یا بزرگی بیش‌تری را نسبت به آستانه فصلی نشان می‌دهد و در دوره‌بازگشت‌های بالاتر آستانه فصلی شدت بالاتر وقایع خشکسالی را نسبت به آستانه ثابت نشان می‌دهد.

نتایج: هم‌چنین می‌توان نتیجه گرفت که بزرگی خشکسالی هیدرولوژیک در آستانه ثابت در هر چهار ایستگاه منتخب نوسان کم‌تری را نسبت به سایر آستانه‌ها نشان می‌دهد. باید اشاره شود که در تعیین خشکسالی بر اساس آستانه ثابت، سالانه و فصلی، وقایع دارای تعداد و شدت بیش‌تر نسبت به آستانه جریان محیط زیستی خواهد بود. نقشه تغییرات مکانی شدت خشکسالی نشان داد که بیش‌تر خشکسالی‌ها در ایستگاه‌های واقع در شمال و شمال غرب (بران و دوست‌بیگللو) اتفاق افتاده است. تفکیک اثر عوامل انسانی و اقلیمی در ارزیابی خشکسالی از پیشنهادات تحقیق حاضر است که می‌تواند در مطالعات آتی مدنظر قرار گیرد.

کلیدواژه‌ها: حد آستانه، میانگین فصلی جریان، جریان زیست‌محیطی، شدت خشکسالی، تداوم خشکسالی



مقدمه

مواردی از آن اشاره شده است. هیسدال و تالاکسن^۲ (۲۰۰۳) جهت تعیین خشکسالی هیدرولوژیکی در اروپا از روش آستانه با داده‌های روزانه جریان استفاده نمودند. نتایج نشان داد که برای داده‌های ماهانه یا روزانه آستانه بین صدک‌های ۷۰ و ۹۰ درصد منحنی تداوم جریان است. سونگ و چونگ^۳ (۲۰۱۴) در تحقیقی از منحنی بزرگی-مدت-فراوانی^۴ خشکسالی رودخانه‌ای به منظور درک بهتر منحنی عمق-مدت-فراوانی^۵ استفاده کردند. مطالعه منحنی بزرگی-مدت-فراوانی با ۴ آستانه متفاوت (ثابت، ماهانه، روزانه و آستانه ۷۰ درصد منحنی‌های تداوم جریان) استفاده شد. نتایج نشان داد که آستانه مناسب با رژیم رودخانه نسبت به سایر سطوح آستانه‌ای متفاوت است و نتایج این آستانه مناسب‌تر بوده و با اهداف اقتصادی-اجتماعی و هیدرولوژیکی هم‌خوانی بیش‌تری دارد. سارایلیدیس^۶ و همکاران (۲۰۱۵) به مطالعه جریان‌های کم، با چهار آستانه (روزانه، ماهانه، فصلی و ثابت) در حوضه آبخیز یرماسوئیا^۷ قبرس با استفاده از داده‌های دبی روزانه سی ساله پرداختند. در مطالعه ایشان از ۵۰ و ۷۰ درصد منحنی‌های تداوم جریان استفاده و منحنی‌های بزرگی-مدت-فراوانی جداگانه‌ای برای هر کدام از آستانه‌ها رسم شد و به این نتیجه رسیدند که آستانه‌های مختلف روزانه و ماهانه نقص بیش‌تری را نسبت به آستانه ثابت و فصلی در دبی ۷۰ درصد منحنی تداوم جریان نشان می‌دهد. یوروسف^۸ و همکاران (۲۰۱۶) به بررسی خشکسالی هیدرولوژیک در ۱۵ ایستگاه هیدرولوژیکی حوضه آبخیز جوزنا رودخانه موروا واقع در صربستان پرداختند. ایشان ۹۰ درصد منحنی‌های تداوم جریان را به عنوان آستانه در نظر گرفتند و طولانی‌ترین و کوتاه‌ترین مدت زمان خشکسالی را در رودخانه‌های مختلف مشخص نمودند. رزم‌خواه (۲۰۱۷) برای بررسی خشکسالی هیدرولوژیک، از روش آستانه و منحنی‌های بزرگی-مدت-فراوانی و تئوری دنباله استفاده کرد. ایشان از داده‌های دبی روزانه در طی سال‌های ۱۹۷۰ تا ۲۰۱۲ حوضه آبخیز رود زرد، استفاده کردند و ۷۰ و ۹۰ درصد دبی روزانه و هم‌چنین ۷۰ درصد متوسط دبی ماهانه را به عنوان آستانه در نظر گرفتند. نتایج ایشان نشان داد که منحنی‌های بزرگی-مدت-فراوانی، در هر دوره در پارامترهای شدت و مدت دارای روند افزایشی غیر خطی بوده، درحالی که همین دو پارامتر در آستانه‌های مختلف، متفاوت از هم برآورد شد. رویرا^۹ و همکاران (۲۰۲۱) با هدف ارزیابی شرایط خشکسالی هیدرولوژیک در ۱۵ حوضه در مرکز و غرب آرژانتین، شاخص‌های خشکسالی هیدرولوژیکی را با استفاده از روش سطح آستانه و شاخص استاندارد جریان محاسبه نمودند. نصرتی (۲۰۱۲) به بررسی خشکسالی هیدرولوژیک در حوضه آبخیز سفیدرود با استفاده از شاخص جریان پایه و سطوح آستانه‌ای پرداخت و به این نتیجه رسید که میانگین منطقه‌ای شاخص

جریان رودخانه‌ای یکی از منابع آب مصرفی است که برای مدیریت بهتر این منابع، اطلاع از روند دبی آن‌ها و عوامل ایجادکننده آن ضروری است و تغییرپذیری زیادی در زمان و مکان دارند. بخش عمده این تغییرات در اثر عوامل جوی است، بنابراین تغییرپذیری، جزء ذاتی جریان رودخانه‌ها است (Hassani et al., 2012; Bayazidi and Saghafian, 2011). از طرفی، جریان رودخانه‌ای توسط سدها، انحراف، جریان‌های برگشتی و کاهش جریان پایه از طریق استخراج بیش از حد آب‌های زیرزمینی و توسعه شهری تحت تاثیر قرار گرفته و منجر به مسائل مختلفی از جمله وقوع خشکسالی، کاهش آبدهی و مسائل زیست محیطی می‌شود. در همین راستا شناسایی وقایع خشکسالی و ویژگی‌های آن از اطلاعات ضروری مدیریت منابع آب است (Khedun et al., 2011; Kwak et al., 2012). خشکسالی به سبب تعداد، فراوانی، گستردگی و تبعات کوتاه و بلندمدت اقتصادی-اجتماعی و زیست‌محیطی، از جمله مهم‌ترین حوادث طبیعی به‌شمار می‌رود (Bagheri and Mohammadi 2012) و بر همین اساس نقش مهمی در برنامه‌ریزی‌ها و تصمیم‌گیری‌های کلان مدیریتی برای رسیدن به اهداف توسعه پایدار دارد. خشکسالی، معمولاً به‌عنوان آب در دسترس در زیر حد نرمال تعریف شده است (Van Loon and Laaha, 2015). یکی از انواع خشکسالی‌ها، خشکسالی هیدرولوژیک است که در ادامه خشکسالی هواشناسی و با تاخیر زمانی به وقوع می‌پیوندد (Tallaksen, 2000; Karimi et al., 2015). پایش و پیش‌بینی خشکسالی هیدرولوژیک و تعیین دقیق زمان شروع و تداوم آن، اهمیت ویژه‌ای در مدیریت منابع آبی و برنامه‌ریزی جهت کاهش اثرات مخرب خشکسالی دارد. وقوع متناوب دوره‌های خشک و مرطوب جزء ماهیت جریان رودخانه‌ای بوده و روی وضعیت کمی آب‌های سطحی تاثیر می‌گذارد (Shafiei Haji et al., 2014; Van Huijgevoort, 2014; and Raeini, 2016). هر خشکسالی دارای خصوصیتی مانند مدت زمان خشکسالی، شدت خشکسالی و فاصله خشکسالی است (Kwak et al., 2012). انتخاب آستانه بستگی به هدف مطالعه، منطقه مورد مطالعه و داده‌های موجود دارد. در خصوص تعیین خشکسالی، در مواردی از صدک‌ها به‌عنوان آستانه استفاده می‌شود (Sung and Chung, 2014). نسبت پایین آستانه‌های مورد استفاده، در دامنه‌ی ۷۰ درصد منحنی‌های تداوم جریان^۱ تا ۹۵ درصد منحنی‌های تداوم جریان بوده و اغلب برای رودخانه‌های دائمی استفاده می‌شود (Kjeldsen et al, 2000). در رابطه با بررسی خشکسالی هیدرولوژیک تحقیقات متعددی در سطح محلی و جهانی انجام شده است که به

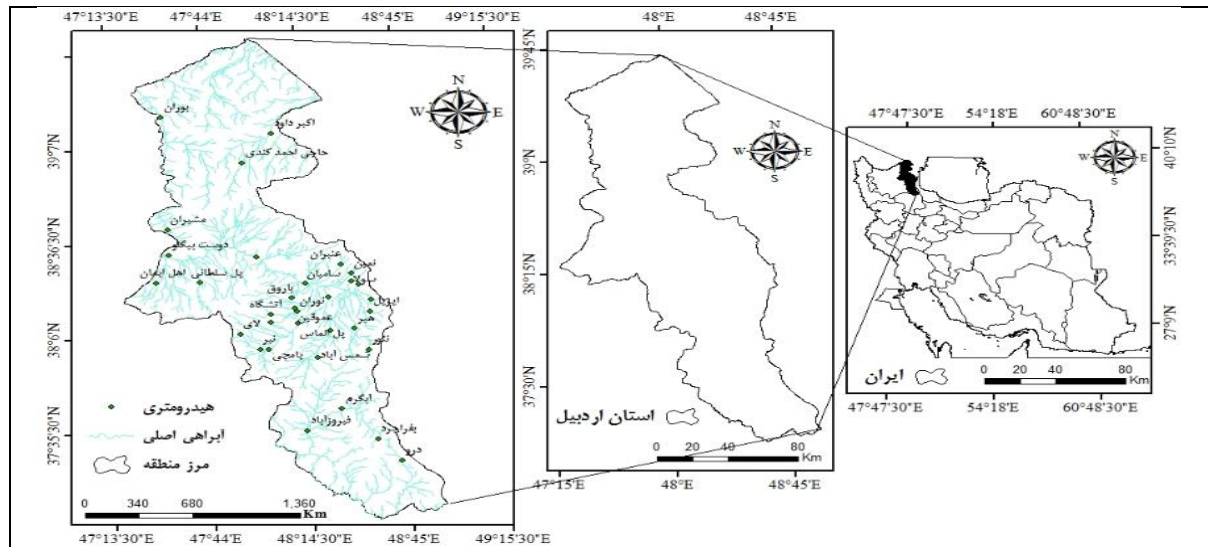
اول تعیین علل خشکسالی و درک بهتر از گردش‌های جوی، دسته دوم درک فراوانی و بزرگی خشکسالی به‌منظور مشخص کردن احتمال وقوع خشکسالی‌های بزرگ، دسته سوم تلاش برای توصیف و درک اثرات خشکسالی، دسته چهارم مربوط به برآورد هزینه‌ها و خسارت‌های مرتبط با خشکسالی شامل اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی است (Byun and Wilhite, 1999). علاوه بر چهار نوع خشکسالی هواشناسی، کشاورزی، هیدرولوژیک و اقتصادی-اجتماعی، اخیراً خشکسالی آب‌های زیرزمینی نیز پیشنهاد شده است (Delpla et al, 2009؛ Mishra and Singh, 2010). هدف از مطالعه حاضر، ارزیابی منحنی‌های بزرگی-مدت-فراوانی خشکسالی هیدرولوژیک بر اساس آستانه‌های مختلف خشکسالی هیدرولوژیک در رودخانه‌های استان اردبیل با شرایط متنوع اقلیمی، کاربری اراضی، توپوگرافی است. در این راستا، ویژگی‌های وقایع خشکسالی با آستانه‌های ثابت، متحرک فصلی، متغیر متوسط سالانه و جریان زیست محیطی استخراج و در دوره بازگشت‌های مختلف تحلیل شدند. با توجه به تاثیر سطوح مختلف آستانه، درک تغییرات ویژگی‌های خشکسالی در دوره برگشت‌های مختلف ضرورت انجام پژوهش را توجیه می‌نماید.

مواد و روش‌ها

معرفی منطقه مورد مطالعه

استان اردبیل به‌عنوان یکی از استان‌های مرزی کشور در شمال‌غربی ایران است که جزء نواحی سردسیر کوهستانی محسوب می‌شود (Mostafazadeh and Mehry, 2019). میزان نزولات جوی در استان اردبیل به طور متوسط بین ۲۵۰ تا ۶۰۰ میلی‌متر در سال است که در بخش‌های مختلف استان نوسان دارد (Khorrooshi et al., 2018). باید اشاره شود که ایستگاه‌های مورد مطالعه استان شامل سه حوضه اصلی ارس، بالهارود و قزل اوزن را شامل می‌شود که می‌توان گفت معادل حدود ۹۰ درصد مساحت استان اردبیل را شامل می‌شود. هم‌چنین مبنای انتخاب ایستگاه‌ها در تحقیق حاضر، پراکنش مناسب براساس استفاده حداکثری از آمار دبی ثبت شده بوده است. در شکل (۱) موقعیت ایستگاه‌های هیدرومتری منتخب در استان اردبیل نشان داده شده است. آمار دبی ۳۳ ایستگاه هیدرومتری در آبخیزهای استان اردبیل به‌منظور دستیابی به اهداف در پژوهش فعلی استفاده شده است که برخی از خصوصیات آن‌ها در جدول (۱) ارائه شده است.

جریان پایه سالانه، با میزان ۰/۶۵ با مقدار انحراف معیار ۰/۱۹ در دوره آماری بلندمدت ثابت است. محدوده شاخص جریان پایه بر پایه صدک‌های ۲۵، ۵۰ و ۷۵ رژیم جریان رودخانه به چهار طبقه دسته‌بندی شد که بیش از ۵۰ درصد حوزه‌های آبخیز منطقه مورد مطالعه دارای رژیم جریان با پایداری کم و یا ناپایدار است. سلاجقه و همکاران (۲۰۱۸) به بررسی خشکسالی هیدرولوژیک با استفاده از روش آستانه ثابت، با استفاده از آمار دبی روزانه ایستگاه‌های هیدرومتری واقع در حوزه پرداختند. در مطالعه ایشان از روش آستانه ثابت (۷۰ و ۹۰ درصد منحنی تداوم جریان) در حوزه آبخیز سد کرج استفاده شده است. نتایج نشان داد که سال ۱۳۷۷ یکی از خشک‌ترین سال‌ها در این حوزه بوده و خشکسالی در ایستگاه‌های کرج و گچسر در سال ۱۳۷۷، به‌ترتیب با ۲۸۴ و ۲۵۵ روز تداوم داشته است. لذا مجموع کمبود آب در آستانه ۷۰ درصد منحنی تداوم جریان در ایستگاه گچسر برابر با ۱۱/۸ میلیون مترمکعب، در ایستگاه کلوان برابر با ۲/۷۵ میلیون مترمکعب و در ایستگاه کرج ۴۲/۴۴ میلیون مترمکعب بوده و هم‌چنین تابع مقادیر فرین تعمیم یافته^۱ بهترین برازش را به پارامترهای خشکسالی داشت. خشکسالی یکی از پدیده‌های محیطی شناخته شده است که تبعات اقتصادی اجتماعی و زیست محیطی را به‌دنبال دارد. بنابراین بررسی و تحلیل آن برای مدیریت و برنامه‌ریزی بهتر منابع آب، حائز اهمیت است. دبی از پارامترهای مهم هیدرولوژیکی است که شناسایی رفتار آن برای مدیریت منابع آبی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (Smakhtin, 2001). از آنجا که تغییرات عوامل اقلیمی می‌تواند بر آبدهی رودخانه موثر باشد، لذا بررسی تغییرات دبی رودخانه در طول زمان می‌تواند آثار تغییر یا ثبات در شرایط اقلیمی یک منطقه را مشخص کند (Maroufi and Tabari 2011؛ Garberchet, 2004). خشکسالی از نظر فراوانی وقوع، شدت، مدت، وسعت و خسارت‌های اقتصادی-اجتماعی و اثرات شدید بلند مدت آن، نسبت به سایر بلایای طبیعی اولویت دارد و مخاطره‌آمیزتر است و نیازمند توجه بیشتری در تصمیم‌گیری‌ها است (Nosrati and Kazemi, 2010). متداول‌ترین تعریف کمی خشکسالی هیدرولوژیکی بر اساس تبیین یک آستانه است که اگر جریان رودخانه کم‌تر از آن باشد، به عنوان خشکسالی هیدرولوژیکی در نظر گرفته می‌شود (Tallaksen, 2000؛ Karimi et al., 2015). به‌طور کلی اثرات خشکسالی، به شدت رویداد خشکسالی هیدرولوژیکی وابسته است (Van Loon and Laaha, 2015). روش‌های مطالعه خشکسالی در چهار دسته، طبقه‌بندی می‌شود: دسته



شکل ۱. موقعیت کشوری و استانی ایستگاه‌های هیدرومتری منتخب در منطقه مطالعاتی

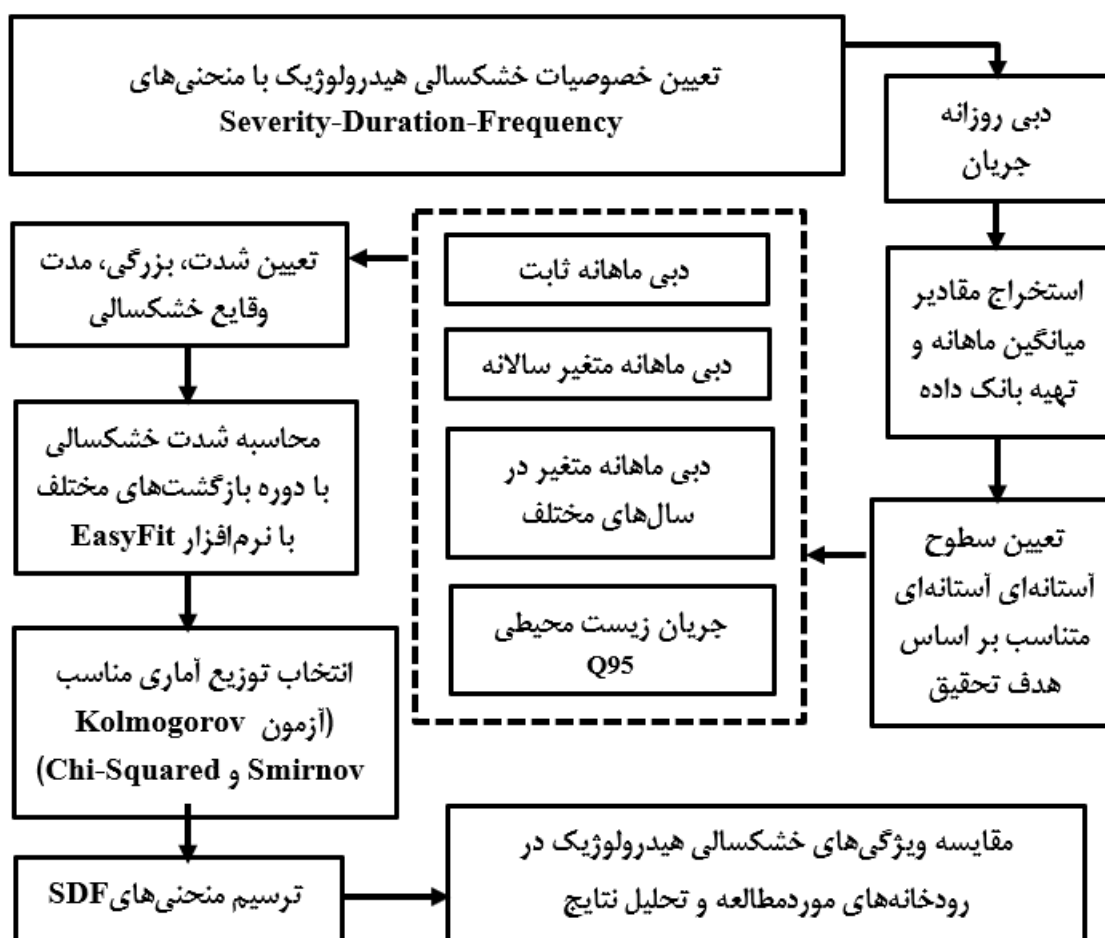
جدول ۱. مشخصات ایستگاه‌های هیدرومتری مورد مطالعه در ارزیابی جریان کمینه در رودخانه‌های استان اردبیل

ردیف	محدوده مطالعاتی	نام رودخانه	نام ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	مساحت حوضه (کیلومترمربع)
۱		بالخوچای	پل الماس	۴۸-۱۱-۱۹	۴۸-۰۸-۱۶	۱۰۷۰
۲		قره‌سو	سامیان	۴۸-۱۴-۴۸	۳۸-۲۲-۵۳	۴۰۰۴
۳		نوران چای	آتشگاه	۴۸-۰۳-۲۳	۳۸-۱۳-۰۵	۴۴
۴		بالخوچای	یامچی	۴۸-۰۲-۱۱	۳۸-۰۲-۰۵	۷۱۰
۵		نیر چای	نیر	۴۷-۵۹-۳۸	۳۸-۰۲-۰۲	۲۵۶
۶		قره‌سو	آلادیزگه	۴۸-۳۵-۲۲	۳۸-۱۷-۰۰	۲۲
۷		نوران چای	نوران	۴۸-۱۱-۳۷	۳۸-۱۳-۵۹	۱۲۶
۸		نمین چای	نمین	۴۸-۲۹-۰۶	۳۸-۲۵-۴۵	۴۴
۹		قوریچای	کوزه‌تپراقی	۴۸-۲۲-۰۱	۳۸-۰۷-۲۸	۵/۸۱۲
۱۰		بالخوچای	گیلانده	۴۸-۲۱-۴۳	۳۸-۱۸-۲۶	۱۶۳۸
۱۱	اردبیل	هیرچای	هیر	۴۸-۳۰-۲۸	۳۸-۰۴-۵۵	۱۷۸
۱۲		لای چای	لای	۴۷-۵۴-۰۳	۳۸-۰۷-۰۰	۳۶
۱۳		ویلادرق چای	ویلادرق	۴۸-۰۳-۱۹	۳۸-۱۰-۳۸	۹۴
۱۴		شهریورچای	باروق	۴۸-۱۰-۰۶	۳۸-۱۸-۱۷	۹۶
۱۵		سفرچی چای	ایریل	۴۸-۳۴-۳۰	۳۸-۱۳-۲۳	۸
۱۶		نرگس چای	ننه‌کران	۴۸-۳۱-۳۲	۳۸-۲۲-۱۷	۴۰
۱۷		سولاچای	سولا	۴۸-۲۹-۰۴	۳۸-۲۳-۱۴	۴۴
۱۸		خروجی سد	ننور	۴۸-۳۳-۴۳	۳۸-۰۰-۵۳	۴۴
۱۹		یدی بولیک چای	عموقین	۴۸-۱۰-۴۰	۳۸-۱۵-۰۷	۱۱۰
۲۰		آغ چای	شمس آباد	۴۸-۱۵-۱۴	۳۷-۵۹-۵۳	۱۲۸
۲۱		عنبران چای	عنبران	۴۸-۲۹-۰۶	۳۸-۲۹-۴۰	۳۶
۲۲	مشگین شهر	قره‌سو	دوست بیگلو	۴۷-۳۲-۱۸	۳۸-۳۳-۰۲	۷۳۱۱
۲۳		قره‌سو	ارباب کندی	۴۸-۰۱-۵۸	۳۸-۲۹-۴۱	۴۸۰۰
۲۴		خیابوچای	پل سلطانی	۴۷-۴۱-۳۹	۳۸-۲۳-۵۶	۹۸
۲۵		هندالوچای	اهل ایمان	۴۷-۲۸-۰۵	۳۸-۲۴-۰۲	-
۲۶	مغان	برزندچای	حاجی احمدکندی	۴۷-۵۶-۱۷	۳۹-۰۲-۱۰	۱۵۷
۲۷		ساریقمیش	اکبرداود	۴۸-۰۵-۳۱	۳۹-۱۱-۴۵	۷۱۰
۲۸		دره رود	بوران	۴۷-۳۱-۸	۳۹-۱۷-۴۱	۱۳۶۷۰
۲۹		دره رود	مشیران	۴۷-۳۲-۰۱	۳۸-۴۱-۱۰	۱۱۲۶۷
۳۰		شاهرود	درود	۴۸-۴۱-۴۸	۳۷-۲۴-۳۸	۱۵۸
۳۱	خلخال	هروچای	آبگرم	۴۸-۲۴-۲۵	۳۷-۴۱-۴۵	۵۹۰
۳۲		بفراجرد چای	بفراجرد	۴۸-۳۴-۳۷	۳۷-۳۲-۱۵	۳۶
۳۳		فیروزآبادچای	فیروزآباد	۴۸-۱۳-۳۵	۳۷-۳۵-۰۸	۱۵۱۵

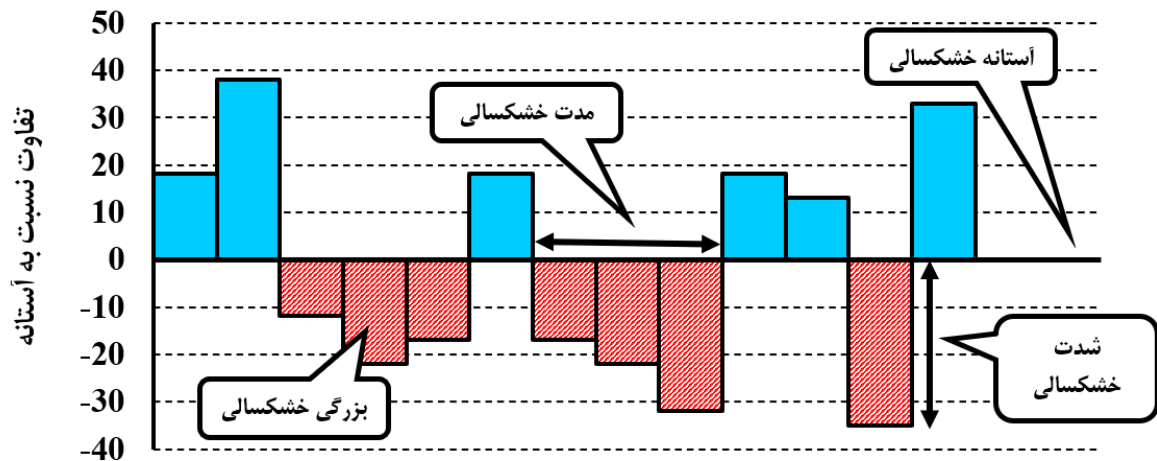
روش تحقیق

متوسط ماهانه دبی از طریق میان‌گیری به‌دست آمده است. طبیعی است که در بسیاری از رودخانه‌های فصلی، مقادیر دبی در برخی از فصول خشک صفر هستند که باید در محاسبه متوسط دبی ماهانه در نظر گرفته شوند. در مرحله بعدی از میانگین کل ماهانه دوره، میانگین ماهانه فصلی، متوسط سالانه و جریان زیست محیطی به‌عنوان مقادیر آستانه استفاده شده است. با توجه به ماهیت تحقیق حاضر در استفاده از توزیع‌های آماری ایجاد خطای ناشی از مقادیر صفر مد نظر قرار گرفته است. قابل ذکر است که یکی از کاربردهای منحنی‌های بزرگی-مدت-فراوانی تعیین تغییرات خشکسالی هیدرولوژیک است و لذا اثر عواملی مانند تغییر کاربری اراضی، احداث سد، بهره‌برداری، تنظیم و انحراف جریان مشخص خواهد شد. علاوه بر این باید اشاره کرد که جریان بسیاری از رودخانه‌ها تحت تاثیر بهره‌برداری و برداشت‌های مجاز و غیر مجاز از حالت طبیعی خارج شده است و این اثرات جزئی از تغییراتی است که بر خشکسالی هیدرولوژیک تاثیر می‌گذارد در شکل (۲) نمودار جریانی مراحل انجام تحقیق حاضر آورده شده است.

به‌منظور انجام پژوهش حاضر از آمار دبی ۳۳ ایستگاه هیدرومتری با حداکثر دوره آماری موجود هر ایستگاه (۱۳۹۲-۱۳۵۳) استفاده شده است. شایان ذکر است که کلیه آزمون‌های آماری مرتبط به‌منظور بررسی صحت و درستی داده‌ها صورت پذیرفت. قابل ذکر است که در مطالعه حاضر داده‌های دبی روزانه در نرم‌افزار اکسل و از طریق پیوت‌تیبل^{۱۱} به‌صورت داده‌های ماهانه مرتب شد و سپس با استفاده از روش تئوری دنباله‌ها با در نظر گرفتن آستانه‌های مختلف، اقدام به بررسی وضعیت خشکسالی هیدرولوژیک شد (Araghinejad and Karamouz 2014؛ Janbozorgi et al., 2021). داده‌های دبی جریان صفر در مواردی ممکن است نتایج تحلیل‌ها و محاسبات آماری را تحت تاثیر قرار دهد. در این خصوص بر اساس پیشنهاد گوردون^{۱۲} و همکاران (۲۰۰۴)، می‌توان مقادیر خیلی جزئی به داده‌های صفر اضافه نمود و تحلیل‌ها را انجام داد. باید اشاره شود که در تحقیق حاضر مقادیر ۰/۰۰۱ به‌عنوان یک مقدار جزئی جایگزین داده‌های صفر شده است و سپس



شکل ۲. نمودار جریانی مراحل انجام تحقیق



شکل ۳. نمایش مولفه‌های خشکسالی (شدت، مدت، بزرگی و آستانه)

- مدت: مدت زمان خشکسالی به بازه زمانی جریان رودخانه‌ای کم‌تر از متوسط جریان مربوطه اطلاق می‌شود.

براساس خصوصیات منطقه، مدت خشکسالی می‌تواند بین یک هفته و چند سال متغیر باشد. ماهیت دینامیکی خشکسالی یک منطقه می‌تواند تجربه رطوبت و خشکی به‌طور هم‌زمان، با در نظر گرفتن بازه‌های زمانی مختلف باشد. رابطه بین مدت و بزرگی خشکسالی خطی نیست و به طبقه‌بندی خشکسالی و ویژگی‌های آب و هوا و مشخصات حوزه آبخیز بستگی دارد (Van Loon and Laaha, 2015: 3).

- فراوانی (دوره بازگشت): فراوانی یا دوره بازگشت یک خشکسالی به‌عنوان دوره متوسط بین رخداد‌های خشکسالی که دارای شدتی برابر یا بالاتر از یک آستانه است.

تعیین آستانه‌های مختلف خشکسالی هیدرولوژیک

مشخص نمودن میزان آستانه در تعیین خشکسالی از مواردی است که می‌تواند بر خصوصیات وقایع و دوره‌های خشکسالی در دوره‌بازگشت‌های مختلف تاثیر بگذارد. علاوه بر این، آستانه خشکسالی می‌تواند بر اساس ماهیت تغییر در شرایط جریان، خصوصیات منطقه و میزان تغییرپذیری جریان انتخاب شود. معمولاً آستانه‌های متغیر جریان بهتر می‌تواند شرایط تغییر جریان رودخانه‌ای در اثر خشکسالی و یا تغییرات فصلی را نمایش دهد، زیرا تغییر فصلی دبی جریان و نیز استفاده انسانی از جریان آب سطحی را مدنظر قرار می‌دهد. روش آستانه پرکاربردترین روش برای تحلیل خشکسالی و کم‌آبی‌ها بوده به عبارتی این اساس تعیین مشخصات خشکسالی‌ها و کم‌آبی‌ها است. در این روش اگر مقادیر دبی از یک آستانه کم‌تر باشد خشکسالی و یا کم‌آبی رخ می‌دهد. در این روش دوره‌های بالا و پایین سطح آستانه تحت عنوان دنباله‌ها مشخص شدند. مهم‌ترین کاربرد تحلیل‌های آستانه خشکسالی

ویژگی‌های وقایع خشکسالی

شدت خشکسالی به‌عنوان سطح جریان رودخانه‌ای کم‌تر از متوسط جریان مربوطه تعریف شده است، که می‌تواند به‌عنوان کمبود هیدرولوژیکی ناشی از خشکسالی توضیح داده شود. اساسی‌ترین عنصر برای استخراج این پارامترها، تعیین آستانه مشخص است که ممکن است ثابت یا متغیر و تابعی از زمان باشد. به‌علاوه، هر خشکسالی دارای خصوصیتی است که شامل مدت زمان خشکسالی، شدت خشکسالی، و فاصله میان وقوع خشکسالی است. یوجویچ^{۱۳} (۱۹۶۷)، برای شناسایی پارامترهای خشکسالی و بررسی خصوصیات آن از واژه‌های (۱) شدت^{۱۴} (۲) مدت^{۱۵} (۳) بزرگی^{۱۶} استفاده نمود (Kwak et al., 2012; Tareke et al., 2022). اصطلاحاتی مانند، شدت، بزرگی و مقدار کاربرد جهانی دارند و علاوه بر این اصطلاحات، سایر موارد دیگر مرتبط با خشکسالی عبارتند از: فراوانی^{۱۷}، مقدار، پیش‌بینی، نرخ شروع و زمان که گاهی اوقات به‌عنوان ابزاری کلیدی در مدیریت خشکسالی در نظر گرفته می‌شود (Zargar et al., 2011). اساسی‌ترین عنصر برای استخراج این پارامترها، تعیین آستانه مشخص است که ممکن است ثابت یا متغیر و تابعی از زمان باشد. به‌علاوه، هر خشکسالی دارای خصوصیتی است که شامل مدت زمان خشکسالی، شدت خشکسالی، و بزرگی خشکسالی است (Yildirim et al., 2012; Kwak et al., 2012; al., 2022). تعاریف شدت، مدت، بزرگی و فراوانی به‌صورت شماتیک در شکل ۳ ارائه شده و در زیر توضیف شده است (Zargar et al., 2011).

- شدت: از تقسیم شدت کمبود به مدت زمان حاصل می‌شود.
- بزرگی: برابر مساحت زیر خط آستانه است که از مجموع مقادیر کمبود جریان در دوره خشکی به‌دست می‌آید.

داده‌های میدانی ضروری است. هر چند استفاده از رویکرد ارزیابی سریع، می‌تواند با ارائه تصویر کاملی از وضعیت رودخانه در خصوص پتانسیل حفاظت از فون و فلور منطقه می‌تواند مفید باشد (Hirji and Davis, 2009: 1).

برای رسم منحنی‌های شدت خشکسالی در دوره بازگشت‌های مختلف و منحنی‌های بزرگی-مدت-فراوانی، مشخصات خشکسالی با استفاده از آستانه‌های مختلف محاسبه شد و سپس مجموع کمبودهای دبی یا شدت خشکسالی‌ها (Severity) در تدام‌های مختلف در نرم‌افزار ایزی‌فیت^{۱۹} با دوره بازگشت‌های متفاوت از طریق توزیع‌های متناسب با داده‌ها محاسبه شد.

در صورتی که تعدادی داده تصادفی وجود داشته باشد، می‌توان با استفاده از توزیع‌های آماری ماهیت داده‌ها را توصیف نمود. برازش توزیع‌های آماری احتمالاتی، فرآیندی است که در آن یک توزیع احتمال مناسب توسط فرآیندهای تصادفی و براساس ماهیت داده‌ها مشخص می‌شود. در عمل، توزیع‌های احتمال برای محاسبه احتمال وقوع و در نظر گرفتن عدم قطعیت در داده‌ها به کار می‌روند. پس از محاسبه توزیع‌های احتمال، برای انتخاب توزیع برتر می‌توان از آزمون‌های نکویی برازش استفاده نمود (Schittkowski, 2002). آماره این آزمون بیش‌ترین اختلاف بین فراوانی مورد انتظار و واقعی (به‌صورت قدرمطلق) اندازه‌گیری شده در دسته‌های مختلف است (Alijani and Afsharmanesh, 2015). قابل ذکر است که برای هر کدام از توزیع‌های احتمالاتی در نرم‌افزار ایزی‌فیت، خصوصیات آماری توزیع و سطح معنی‌داری و آماره آزمون ارائه می‌شود (Schittkowski, 2002). انتخاب نهایی توزیع احتمالاتی برازش داده شده به داده‌ها بر مبنای مقایسه بصری داده‌های تجربی، تئوری و ماهیت داده‌های مورد استفاده خواهد بود (Schittkowski, 2002; Razmkhah 2017).

بعد از استخراج مشخصات خشکسالی در تداوم و دوره‌بازگشت‌های مختلف، نمودارهای شدت‌های خشکسالی در دوره بازگشت‌های مختلف در آستانه ثابت، آستانه متغیر سالانه، آستانه فصلی و آستانه جریان زیست‌محیطی برای تمام ایستگاه‌های هیدرومتری مورد مطالعه رسم شد و سپس به بررسی خصوصیات خشکسالی هیدرولوژیکی با استفاده از نمودارهای شدت خشکسالی در دوره بازگشت‌های مختلف پرداخته شد. در مرحله بعد، از این نمودارها (نمودارهای شدت خشکسالی در دوره بازگشت‌های مختلف) برای رسم منحنی‌های بزرگی-مدت-فراوانی به کار رفت. با توجه به حجم زیاد داده‌ها و نمودارها صرفاً به ارائه ۴ ایستگاه نمونه اکتفا شد و این ایستگاه‌ها از طریق بررسی مقادیر متوسط دبی (کم‌ترین دبی، دبی کم، بیش‌تر و بیش‌ترین دبی کل دوره مطالعاتی هر ایستگاه) این ایستگاه‌ها انتخاب شد که در جدول (۲) ارائه شده است.

در طراحی نیروگاه‌های آبی، مدیریت منابع آب، سیستم‌های تأمین آب، برنامه‌ریزی آبیاری و حفظ کیفیت آب است. ابتدا دبی‌های ایستگاه‌های مورد مطالعه در استان در نرم‌افزار اکسل مرتب شد و سپس ۴ آستانه مختلف ثابت و متغیر برای برآورد خشکسالی‌ها در نظر گرفته شد که این آستانه شامل: آستانه ثابت، آستانه متغیر سالانه، آستانه فصلی و آستانه جریان زیست محیطی است.

استخراج دوره‌های خشکسالی هیدرولوژیکی

انتخاب آستانه تحت تأثیر هدف مطالعه، منطقه و داده‌های موجود، قرار دارد. به‌طور کلی، یک درصد از داده‌ها هم می‌تواند به عنوان آستانه استفاده شود (Hisdal and Tallaksen, 2003). در مطالعه حاضر از ۴ آستانه مختلف استفاده شده است:

آستانه ثابت: برای بررسی خشکسالی هیدرولوژیکی اگر از یک مقدار ثابت استفاده شود، برای کل سری داده‌ها بوده و سطوح متغیر برای آن است که داده‌ها در طول سال چه در سطح ماهانه و چه در سطح روزانه متفاوت است (Hisdal and Tallaksen, 2003; Wu et al., 2022). در این مطالعه در مورد سطح آستانه ثابت، متوسط دبی کل دوره مطالعاتی هر ایستگاه هیدرومتری مبنای انتخاب بوده، لذا در هر ایستگاه هیدرومتری یک آستانه‌ای وجود دارد که مبنای انتخاب رخداد خشکسالی هیدرولوژیکی در آن ایستگاه است.

آستانه متوسط سالانه: با توجه به اینکه این سطح آستانه در هر سال تغییر می‌کند، پس جزو سطوح آستانه‌ای متغیر است. در سطوح آستانه متغیر سالانه، مبنای انتخاب، متوسط دبی ۱۲ ماه یک سال هیدرولوژیکی بوده است که خشکسالی را بر اساس متوسط دبی هر سال هیدرولوژیکی در دوره مطالعاتی یک ایستگاه بررسی می‌کند.

آستانه فصلی: آستانه مذکور جزء آستانه‌های متغیر است و در آن مبنای انتخاب، متوسط یا میانگین دبی‌های ماهانه هر فصل در یک سال هیدرولوژیکی بوده است، لذا برای هر سال هیدرولوژیکی ۴ آستانه متفاوت وجود خواهد داشت.

آستانه جریان زیست محیطی (دبی ۹۵ درصد): در آستانه جریان زیست محیطی، از ۹۵ درصد منحنی‌های تداوم جریان استفاده می‌شود. معمولاً مقادیر کم میزان آستانه‌ای (۹۵ درصد منحنی تداوم جریان) برای رودخانه‌های دائمی که دارای جریان زیست محیطی‌اند استفاده می‌شود (Kjeldsen et al., 2000; Smakhtin, 2001). این آستانه برابر دبی با احتمال وقوع بیش‌تر از ۹۵ درصد در منحنی تداوم جریان و جریان خشک، میانگین سالانه هفت روز با جریان حداقل^{۱۸} است. به‌طور کلی برای تعیین جریان زیست محیطی، جمع‌آوری

جدول ۲. تعداد تداوم‌های خشکسالی در سطوح آستانه‌ای مختلف

ایستگاه‌های هیدرومتری	متوسط دبی (متر مکعب بر ثانیه)	مجموع رخداد خشکسالی (در آستانه ثابت ماه)	مجموع رخداد خشکسالی فصلی	مجموع رخداد خشکسالی در آستانه سالانه	مجموع رخداد خشکسالی در آستانه دبی ۹۵ درصد
بوران	۱۶/۸	۷۸	۱۴۵	۹۸	۳۷
مشیران	۱۳/۷	۷۶	۱۵۳	۹۰	۳۳
سامیان	۵/۷	۸۱	۱۲۷	۹۲	۳۸
ویلادرق	۰/۱	۴۸	۸۴	۵۶	۱۵

جدول ۳. روابط تجربی همبستگی و سطح معناداری مشخصه‌های تداوم و تعداد رخداد خشکسالی هیدرولوژیک

ایستگاه‌ها	آستانه ثابت	آستانه فصلی	آستانه دبی ۹۵ درصد	آستانه سالانه
بوران	$y = -1/5x + 16/5$ $R^2 = -0/64$ **	$y = -26/1x + 101$ $R^2 = -0/86$ ns	$y = -1/4x + 11/7$ $R^2 = -0/52$ *	$y = -2/81x + 25/8$ $R^2 = -0/79$ **
مشیران	$y = -1/3x + 14/9$ $R^2 = -0/61$ **	$y = -26/9x + 105$ $R^2 = -0/86$ ns	$y = -1/2x + 10/6$ $R^2 = -0/49$ *	$y = -2/37x + 22/5$ $R^2 = -0/74$ **
سامیان	$y = -1/5x + 16/5$ $R^2 = -0/64$ **	$y = -16/7x + 73$ $R^2 = -0/55$ ns	$y = -1/2x + 11/1$ $R^2 = -0/69$ **	$y = -2/52x + 23/6$ $R^2 = -0/71$ **
ویلادرق	$y = -0/95x + 10/5$ $R^2 = -0/5$ **	$y = -14x + 56$ $R^2 = -0/97$ *	$y = -0/56x + 4/7$ $R^2 = -0/56$ *	$y = -1/56x + 14/5$ $R^2 = -0/73$ **

ns=عدم وجود همبستگی معنادار * = همبستگی در سطح ۹۵ درصد ** = همبستگی در سطح ۹۹ درصد

برای ارزیابی تغییرات مکانی شدت خشکسالی در چهار آستانه مختلف و نیز ارزیابی تداوم و دوره بازگشت‌های مختلف، درون‌یابی تغییرات مکانی خشکسالی هیدرولوژیک با تداوم ۳ ماهه و دوره بازگشت ۲۰ ساله در نرم‌افزار آرک جی‌آی‌اس^{۲۰} شد.

نتایج و بحث

با توجه به این که در مطالعه حاضر، خشکسالی در ۴ آستانه مختلف صورت گرفت، لذا در آن، تداوم‌های خشکسالی در آستانه‌های مختلف با هم‌دیگر متفاوت بوده است، لذا با توجه به آستانه ثابت، خشکسالی در تداوم‌های ۱ ماهه تا ۱۲ ماهه، در آستانه فصلی، خشکسالی فقط در تداوم‌های ۱ الی ۴ ماهه و همچنین در آستانه زیست محیطی، تداوم‌های ۱ تا ۹ ماهه و ۱۲ ماهه و در آستانه متوسط سالانه، تداوم‌های ۱ تا ۹ ماهه مشاهده شد و این بیان‌گر و اثبات‌کننده این است که تداوم‌های خشکسالی با توجه به آستانه انتخابی تعیین می‌شود. با توجه به حجم زیاد داده‌ها و نمودارها فقط نمودارهای ۴ ایستگاه به‌عنوان نمونه ارائه شد و این ایستگاه‌ها از طریق بررسی مقادیر متوسط دبی (کم‌ترین دبی، دبی کم، بیش‌تر و بیش‌ترین دبی کل دوره مطالعاتی هر ایستگاه) انتخاب شد که در جدول (۲) تعداد تداوم‌های خشکسالی در سطوح آستانه‌ای مختلف ارائه شده است.

با توجه به جدول (۲)، بیش‌ترین و کم‌ترین متوسط دبی در بین ۳۳ ایستگاه هیدرومتری مورد مطالعه، به‌ترتیب مربوط به ایستگاه بوران و ویلادرق با مقادیر ۱۶/۸۵ و ۰/۰۷۳ متر مکعب بر ثانیه است، همچنین بیش‌ترین رخداد خشکسالی در آستانه

ثابت در ایستگاه سامیان و در آستانه فصلی در ایستگاه مشیران بوده و لذا در آستانه سالانه، مربوط به ایستگاه بوران و در آستانه جریان زیست‌محیطی، مربوط به ایستگاه سامیان بوده است، و در هر ۴ ایستگاه منتخب کم‌ترین رخداد خشکسالی مربوط به ایستگاه ویلادرق است. در جدول (۳) به همبستگی و سطوح معناداری بین تداوم خشکسالی و تعداد رخداد خشکسالی در ایستگاه‌های منتخب اشاره شده است.

در جدول ۳، روابط تجربی، همبستگی و سطوح معناداری همبستگی بین دو مشخصه تداوم و تعداد رخداد خشکسالی هیدرولوژیک در نرم‌افزار اکسل محاسبه و معناداری آن‌ها در SPSS مشخص شد. با توجه به جدول ۳ می‌توان گفت که همبستگی بین دو مشخصه تداوم و تعداد رخداد خشکسالی هیدرولوژیک در هر چهار آستانه مورد نظر از نوع منفی یا کاهشی است و در همه موارد بدین معنی است که با افزایش تداوم خشکسالی هیدرولوژیک تعداد رخداد آن کاهش می‌یابد. همچنین قابل ذکر است که بیش‌ترین همبستگی میان تعداد رخداد و تداوم خشکسالی در سطح آستانه فصلی در ایستگاه ویلادرق با سطح معناداری ۹۵ درصد است و به جز ایستگاه‌های بوران، مشیران و سامیان در آستانه فصلی، در سایر آستانه‌ها، معنی‌دار است. در جدول (۴)، فراوانی توزیع‌های خشکسالی مناسب حاصل از نرم‌افزار ایزی‌فیت با دو روش کلوموگروف-اسمیرنوف و کای اسکور اولویت‌بندی شدند. نتایج مربوط به توزیع‌های آماری مناسب در جدو ۴ ارائه شده است. در این تحقیق برای ایستگاه‌های مختلف آزمون‌های جانسون-اس‌بی و مقادیر فرین تعمیم‌یافته انتخاب و در نظر گرفته شدند.

جدول ۴. توزیع‌های متناسب با سطوح آستانه‌های مختلف در ۴ ایستگاه هیدرومتری منتخب در استان اردبیل

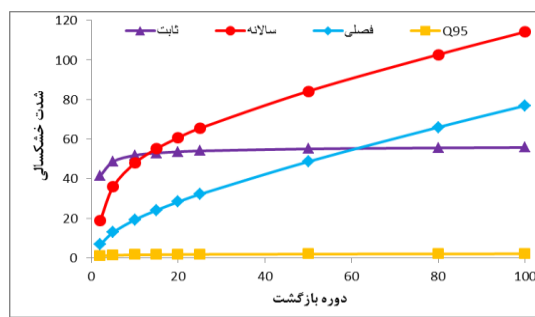
ایستگاه‌ها	سطوح آستانه‌ای	۱ ماهه	۲ ماهه	۳ ماهه	۴ ماهه	۵ ماهه	۶ ماهه	۱۲ ماهه
بوران		Jonson_SB	Jonson_SB	Gen.Pareto	Error	Uniform	-	Uniform
مشیران		Gen.Pareto	Logistic	Pert	G.E. V	Jonson_SB	-	Gumbel_Min
سامیان	آستانه ثابت	Jonson_SB	Pert	Jonson_SB	Pert	-	Log pearson3	Jonson_SB
ویلادرق		Log Normal	Frechet	Weibul	Gen.Pareto	Log pearson 3	Inv Gaussian	
بوران		Gen.Pareto	Kumaraswamy	Gen.Pareto	Pearson	-	-	-
مشیران	آستانه متوسط سالانه	Gen Gamma 4p	Inv Gassion 3p	Beta	Gen.Pareto	Hypersecant	-	-
سامیان		Dagum	Gamma	Log Logistic 3p	Log Pearson	Log Logistic 3p	-	-
ویلادرق		Gen.Pareto	Beta	Log Pearson	Burr	Burr	-	-
بوران		Gen.Pareto	Log Logistic 3p	Jonson_SB	Log Logistic 3p	-	-	-
مشیران		Dagum	Burr 4p	G.E. V	-	-	-	-
سامیان	آستانه فصلی	Jonson_SB	Fatigue life 3p	Gamma	Dagum	Dagum	-	-
ویلادرق		Burr	Fatigue life 3p	Burr	Hypersecant	-	-	-
بوران		Jonson_SB	Error	-	-	-	-	-
مشیران	آستانه دبی ۹۵ درصد	G.E. V	Jonson_SB	Gamma	-	-	-	-
سامیان		Jonson_SB	Log Logistic 3p	Error	-	-	-	-
ویلادرق		Log Pearson 3	Burr	-	-	-	-	-

و همچنین در آستانه جریان زیستی، توزیع‌های جانسون-اس بی و مقادیر فرین تعمیم یافته بیشتر از سایر توزیع‌ها بود. با توجه به مطالب بالا می‌توان گفت که کل داده‌های دبی مورد مطالعه در ۳۳ ایستگاه استان اردبیل به ترتیب از ۳ توزیع جانسون-اس بی، مقادیر فرین تعمیم یافته و جن پارتو بیش‌ترین تناسب را داشته‌اند. شکل (۴)، بیان‌گر رابطه بین مقادیر شدت خشکسالی هیدرولوژیک در دوره بازگشت‌های مختلف با آستانه‌های مختلف تعیین خشکسالی هیدرولوژیک ارائه شده است.

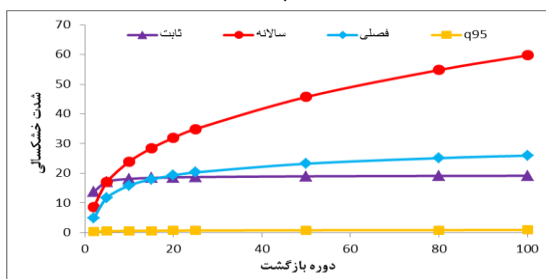
با توجه به اطلاعاتی که در جدول ۲ ارائه شده است می‌توان گفت که بیش‌ترین توزیع در کل ۳۳ ایستگاه مورد مطالعه در آستانه ثابت از توزیع جانسون-اس بی و مقادیر فرین تعمیم یافته تبعیت کرده و در آستانه فصلی نیز حداکثر تعداد توزیع‌ها مربوط به توزیع‌های جانسون-اس بی و ژن پارتو^{۲۱} و بور^{۲۲} هستند، لذا قابل ذکر است که در آستانه متوسط سالانه، توزیع‌های پارتو تعمیم‌یافته و مقادیر فرین تعمیم‌یافته و لجستیک لگاریتمی و لگاریتم نرمال بیش‌ترین کاربرد را داشتند



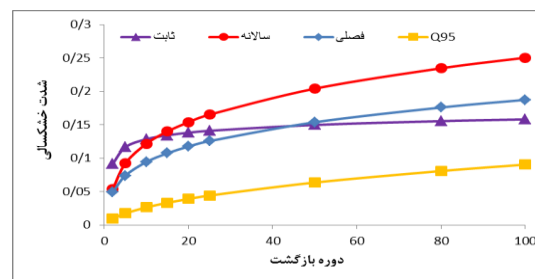
(ب)



(الف)



(د)



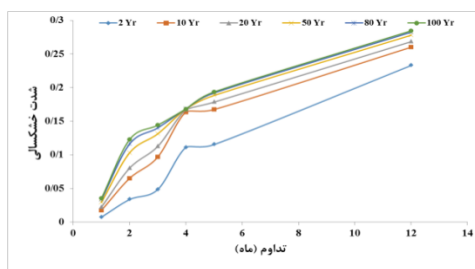
(ج)

شکل ۴. مقادیر شدت خشکسالی در دوره بازگشت‌های مختلف با آستانه‌های مختلف تعیین خشکسالی در ایستگاه‌های مختلف (الف مشیران، ب) بوران، ج) ویلادرق، د) سامیان

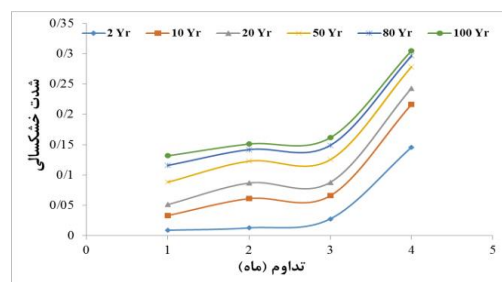
مربوط به تداوم خشکسالی با واحد ماه و محور عمودی مربوط به شدت خشکسالی هیدرولوژیک است. با توجه به شکل ۵ می‌توان گفت منحنی‌های بزرگی-مدت-فراوانی در همه ایستگاه‌ها روند افزایشی را نشان می‌دهند و این بدین معنا است که با افزایش تداوم خشکسالی هیدرولوژیک در همه آستانه‌های مورد مطالعه، شدت وقوع خشکسالی‌های هیدرولوژیک هم افزایش می‌یابد و این یک نتیجه‌گیری محض نیست، یعنی با توجه به نمودار آستانه فصلی، بین تداوم‌های دو و سه ماهه یک روند کاهش در این بازه زمانی دیده می‌شود و این بیان‌گر این است که همیشه این نتیجه که با افزایش تداوم خشکسالی باید شدت رخداد خشکسالی هیدرولوژیک هم افزایش یابد، صادق نیست و در این نمودارها خلاف این فرضیه اثبات شد و قابل توجه نیز است، یعنی این امکان وجود دارد که شاید شدت خشکسالی‌های هیدرولوژیک یا مجموع کمبودها، در هر آستانه‌ای ممکن است خیلی کم‌تر از مقدار عددی آن آستانه باشد یا به عبارتی خیلی نزدیک به مقدار عددی آستانه مورد نظر باشد که در این صورت مجموع این کمبودها که شدت خشکسالی آن تداوم دارد، ممکن است کم‌تر از تداوم‌های بعدی یا بالاتر خود باشد. همچنین خشکسالی هیدرولوژیک در دوره بازگشت‌های بالا با شدت بیشتری رخ می‌دهد و این خصوصیت در همه آستانه‌های انتخاب شده مشخص است. در شکل (۶) تغییرات مکانی شدت خشکسالی هیدرولوژیک در چهار آستانه مورد مطالعه ارائه شده است. با توجه به این که خشکسالی هیدرولوژیک در تداوم و دوره بازگشت‌های متفاوت بررسی می‌شود، لذا درون‌یابی در دوره بازگشت ۲۰ ساله با تداوم ۳ ماهه برای تحلیل تغییرات مکانی انتخاب شد.

در شکل ۴ محور افقی نمودارها بیان‌گر دوره بازگشت‌های مورد مطالعه و محور عمودی مربوط به شدت خشکسالی است، لذا واحد بزرگی خشکسالی همان واحد دبی جریان بر حسب متر مکعب بر ثانیه است. با توجه به شکل ۴ می‌توان گفت که در هر ۴ ایستگاه منتخب، با افزایش دوره بازگشت، شدت خشکسالی هیدرولوژیک افزایش می‌یابد. بیش‌ترین شدت خشکسالی با افزایش دوره بازگشت مربوط به سطح آستانه متوسط سالانه است و کم‌ترین شدت خشکسالی هیدرولوژیک، مربوط به آستانه جریان زیست‌محیطی است. همچنین شدت خشکسالی هیدرولوژیک در سطح آستانه ثابت ابتدا در دوره بازگشت‌های کم‌تر بالاتر از شدت خشکسالی هیدرولوژیک سطح آستانه فصلی بوده ولی با افزایش دوره بازگشت شدت خشکسالی هیدرولوژیک در سطح آستانه فصلی نسبت به سطح آستانه ثابت افزایش پیدا می‌کند و این بیان‌گر این است که شدت خشکسالی هیدرولوژیک در سطوح آستانه فصلی در دوره بازگشت‌های بالاتر بیش‌تر از سطوح آستانه‌های ثابت رخ می‌دهد. در هر چهار ایستگاه مورد مطالعه بیش‌ترین شدت خشکسالی هیدرولوژیک مربوط به آستانه سالانه است. مقادیر شدت خشکسالی در آستانه‌های فصلی و ثابت و جریان زیست‌محیطی به ترتیب دارای شدت‌های کم‌تری هستند. نکته قابل توجه دیگر، بزرگی خشکسالی هیدرولوژیک در آستانه ثابت، در هر چهار ایستگاه منتخب دارای نوسان کم‌تری نسبت به سایر آستانه‌ها بوده است. در شکل (۵) نمودارهای (بزرگی-مدت-فراوانی) ارائه شده است.

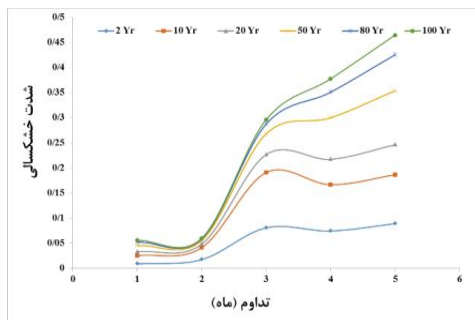
در این تحقیق به دلیل تعدد نمودار مربوط به ایستگاه‌ها، تنها یک نمونه ارائه شده است. در نمودارهای بزرگی-مدت-فراوانی، محور افقی



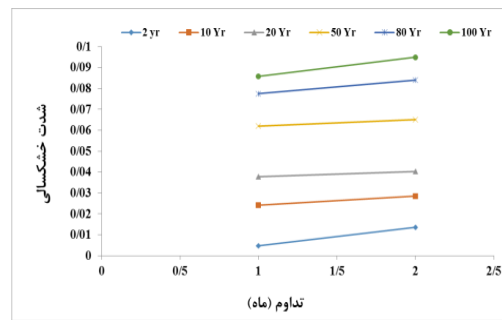
(ب)



(الف)

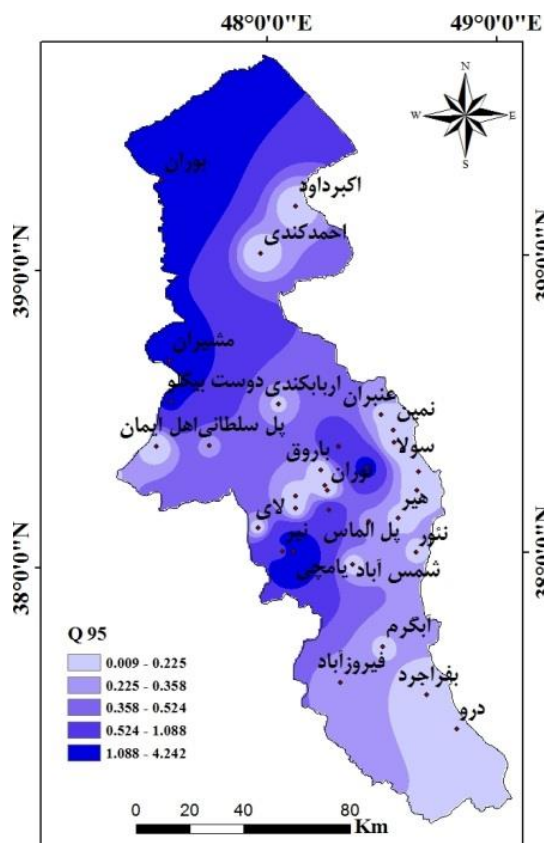


(د)

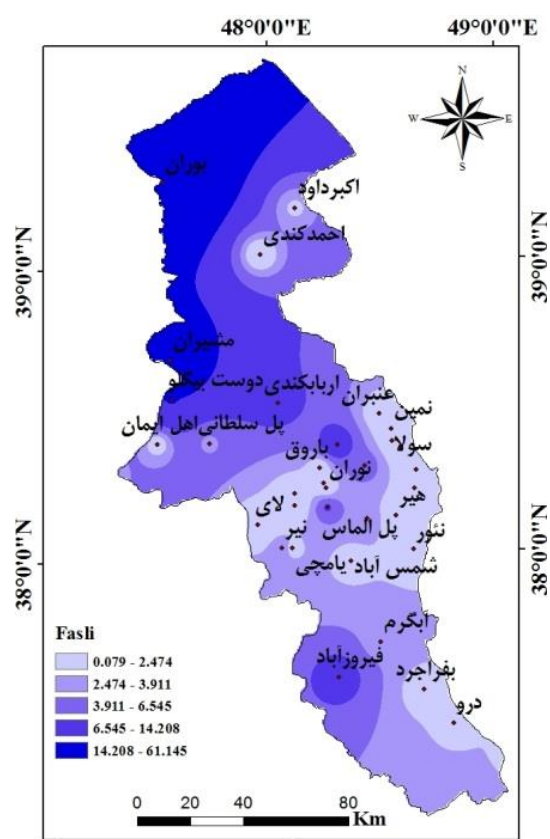


(ج)

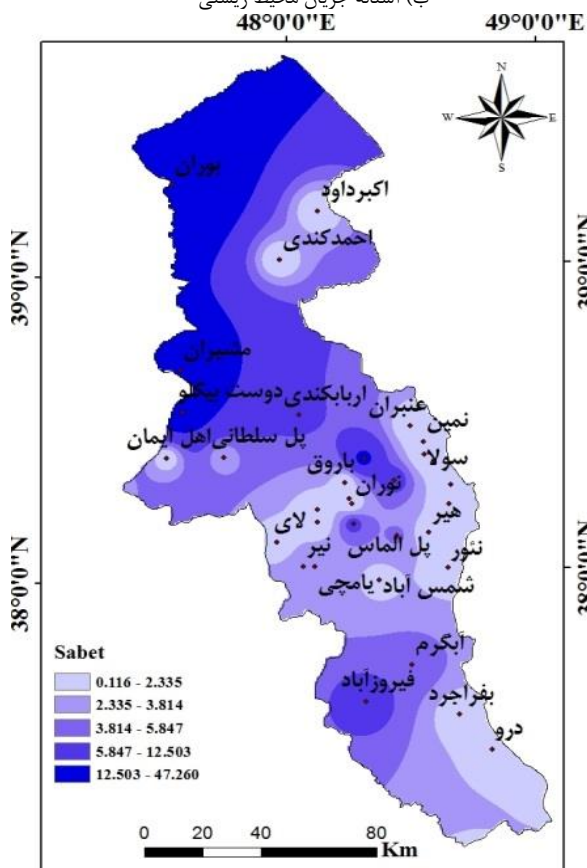
شکل ۵. منحنی‌های بزرگی-مدت-فراوانی در ایستگاه ویلادرق در آستانه‌های مختلف، (الف) آستانه فصلی، (ب) آستانه ثابت، (ج) آستانه جریان زیست محیطی، (د) آستانه متوسط سالانه



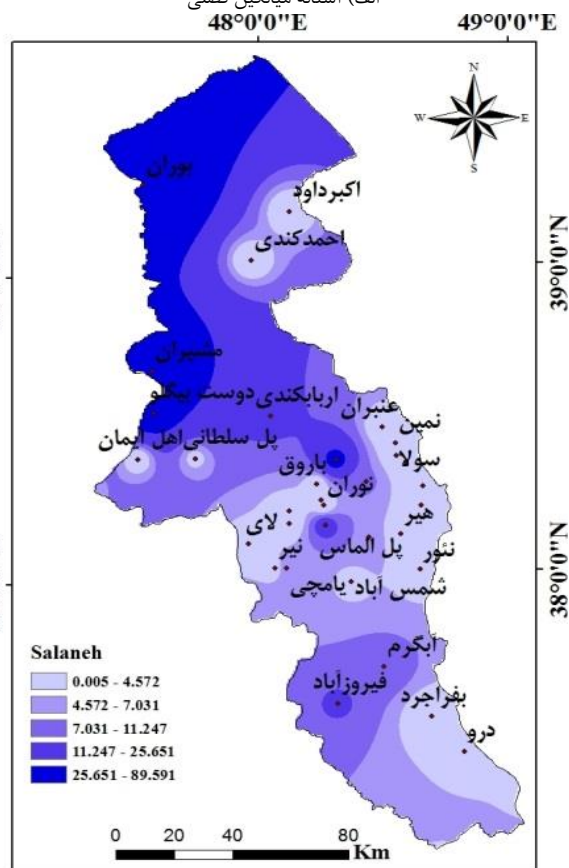
ب) آستانه جریان محیط زیستی



الف) آستانه میانگین فصلی



د) آستانه میانگین ثابت



ج) آستانه میانگین متغیر سالانه

شکل ۶. تغییرات مکانی شدت خشکسالی در آستانه‌های مختلف

الف) آستانه میانگین فصلی ب) آستانه جریان محیط زیستی ج) آستانه میانگین متغیر سالانه د) آستانه میانگین ثابت

افزایش دوره بازگشت، شدت خشکسالی هیدرولوژیک افزایش می‌یابد. بیش‌ترین شدت خشکسالی با افزایش دوره بازگشت مربوط به سطح آستانه متوسط سالانه بوده و کم‌ترین شدت خشکسالی هیدرولوژیک، مربوط به سطح آستانه آستانه جریان زیست‌محیطی شد. بیش‌ترین شدت خشکسالی هیدرولوژیک به ترتیب مربوط به آستانه سالانه، سپس آستانه فصلی و آستانه ثابت و از همه کم‌تر و پایین‌تر آستانه جریان زیست محیطی است، لذا در دوره بازگشت‌های کم‌تر در هر چهار ایستگاه آستانه ثابت شدت یا بزرگی بیش‌تری را نسبت به آستانه فصلی نشان می‌دهد و در دوره بازگشت‌های بالاتر آستانه فصلی شدت بالاتری را نسبت به آستانه ثابت نشان می‌دهد. هم‌چنین می‌توان نتیجه گرفت که بزرگی خشکسالی هیدرولوژیک آستانه ثابت در هر چهار ایستگاه منتخب نوسان کم‌تری را نسبت به سایر آستانه‌ها نشان می‌دهد. با توجه به ارتباط مقادیر دبی آستانه و خصوصاً آستانه جریان زیست‌محیطی با مقادیر دبی پایه جریان می‌توان گفت که نتایج تحلیل خشکسالی هیدرولوژیک با تغییرات زمانی دبی پایه هم‌راستا است. در این خصوص مهری و همکاران (۲۰۱۷)، نیز براساس مطالعه انجام شده در رودخانه‌های استان اردبیل بیان نموده‌اند که بیش‌ترین کاهش دبی پایه در دوره زمانی ۱۳۶۸ تا ۱۳۷۳ بوده و این تغییرات در دوره‌های اخیر کم‌تر بوده است. با توجه به شکل ۵ می‌توان گفت منحنی‌های شدت-مدت-فراوانی در همه ایستگاه‌ها روند افزایشی را نشان داد و این بدین معنا است که با افزایش تداوم خشکسالی هیدرولوژیک در همه آستانه‌های مورد مطالعه، شدت وقوع خشکسالی‌های هیدرولوژیک هم افزایش می‌یابد. در این راستا باید به نقش تغییرات انسانی و تغییر در مولفه‌های جریان رودخانه‌ای اشاره نمود، به عبارتی برداشت‌های بیش‌از حد و نیز انحراف جریان باعث شده است که روندهای طبیعی تغییرات جریان به شدت متاثر شود. تفکیک اثر عوامل انسانی و اقلیمی در ارزیابی خشکسالی از پیشنهادات تحقیق حاضر است که می‌تواند در مطالعات آتی مدنظر قرار گیرد.

با توجه به شکل ۶ بیش‌ترین و کم‌ترین شدت خشکسالی به ترتیب در آستانه سالانه و جریان زیست‌محیطی ثبت شده است. در هر چهار آستانه، کم‌ترین شدت خشکسالی هیدرولوژیک، را ایستگاه‌های شرقی استان (عنبران، نمین، هیر، ننه‌کران، آلاذیزگه، سولا ونغور) و در غرب استان (به ترتیب ایستگاه‌های لای، آتشگاه، ویلادرق و اهل‌ایمان) و در قسمت‌های شمالی استان دو ایستگاه اکبرداود و احمد کندی تجربه کرده‌اند، هم‌چنین بیش‌ترین شدت خشکسالی در هر چهار آستانه در ایستگاه‌های پایین‌دست بوران، مشیران و دوست‌بیگلو (شمال و شمال شرقی استان) ثبت شده است و این به این دلیل است که رودخانه‌های پایین‌دست استان (اطراف ایستگاه بوران)، تحت تاثیر اثر تجمعی اثر سد، بهره‌برداری‌های انسانی (شرب، صنعت و کشاورزی) و انحراف جریان هستند. در این راستا، میرعباسی نجف‌آبادی و همکاران (۲۰۱۰)، در تحقیقی که به منظور بررسی روند دبی رودخانه‌های شمال‌غرب ایران انجام دادند، نتیجه گرفتند که در حالت کلی جریان آب رودخانه‌های منطقه مورد مطالعه روند نزولی داشته است. مهری و همکاران (۲۰۱۷)، نتیجه گرفتند که تغییرات شاخص دبی پایه جریان در غرب و جنوب‌غربی و شرق و شمال‌شرق بیش‌تر است.

نتیجه‌گیری

یکی از انواع خشکسالی‌ها، خشکسالی هیدرولوژیک است که در ادامه خشکسالی هواشناسی و با تاخیر زمانی به وقوع می‌پیوندد که تبعات اقتصادی-اجتماعی و زیست محیطی را به دنبال دارد. بنابراین بررسی و تحلیل آن، برای مدیریت و برنامه‌ریزی بهتر منابع آب حائز اهمیت است. در تحقیق حاضر برای تحلیل خشکسالی هیدرولوژیک از ۴ آستانه (ثابت، متوسط سالانه، جریان زیست‌محیطی و فصلی) استفاده شد. بر اساس نتایج، بیش‌ترین رخداد در سطح آستانه ثابت نسبت به سایر آستانه اتفاق افتاده است. با توجه به تناسب داده‌ها در تحقیق حاضر با توزیع‌های متفاوت، توزیع‌های جانسون-اس بی و مقادیر فرین تعمیم یافته بیش‌ترین کاربرد را داشته است. هم‌چنین با توجه به شکل ۴، در هر چهار ایستگاه منتخب، با

Reference:

- Alijani, B., & Afsharmanesh, H. (2015). Statistical analysis of long-term precipitation values to fit the appropriate statistical distribution (Case study of Iran). *Geography and urban planning of Zagros Landscape*, 7(5): 73-95. [In Persian]
- Araghinejad, Sh., & Karamouz, M. (2014). *Advanced Hydrology*. Amir Kabir Publications. 1st Edition, 468p. [In Persian]
- Bagheri, R., & Mohammadi, S. (2012). Investigation on spatial variations of drought using geostatistics in Kerman province over a thirty-year period (1970- 2000). *Rangeland and Desert Research*, 19(2): 283-296. [In Persian]
- Bayazidi, M., & Saghafian, B. (2011). Regional analysis of river flow drought in southwestern regions of the country. *Iranian Journal of Watershed Management Science and Engineering*, 5(14): 37-52. [In Persian]

- Byun, H.R., & Wilhite, D. (1999). Objective quantification of drought severity and duration, *Journal of Climate*, 2(9): 2747-2756.
- Delpla, I., Jung, A.V., Baures, E., Clement, M & Thomas, O., (2009). Impacts of climate change on surface water quality in relation to drinking water production. *Environmental International*, 35(8): 1225-1233.
- Garberchet, J., Van Liew, M & Brown, G.O., (2004). Trends in precipitation, streamflow, and evapotranspiration in the great plains of the United States, *Hydrologic Engineering*, 9(5): 360-367.
- Gordon, N., McMahon, Th., Finlayson, B., Gippel, Ch & Nathan, R., (2004). *Stream Hydrology: An Introduction for Ecologists*, 2nd Edition, Wiley, Pp 448.
- Haji, Kh., Mostafazadeh, R., EsmaliOuri, A. (2017). Severity and duration variations of monthly stream flow in Gorganroud Watershed, Golestan Province. *Extension and Development of Watershed Management*, 5(19):57-67. [In Persian]
- Hasani, M., Malekian, A., Rahimi, M., Samiei, M., & Khamushi, M.R. (2012). Study of efficiency of various base flow separation methods in arid and semi-arid rivers (Case study: Hablehroud basin). *Journal of Arid Biome*, 2(2): 10-212. [In Persian]
- Hirji, R & Davis, R., (2009). Environmental flows in water resources policies, plans, and projects, findings and recommendations, The World Bank, Washington DC. Vol 1, 189 Pp.
- Hisdal, H & Tallaksen, L. M., (2003). Estimation of regional meteorological and hydrological drought characteristics: a case study for Denmark, *Journal of Hydrology*, 281(3): 230-247.
- Janbozorgi, M., Hanifepour, M., & Khosravi, H. (2021). Temporal changes in meteorological-hydrological drought (Case study: Guilan Province). *Water and Soil Management and Modelling*, 1(2), 1-13. doi: 10.22098/mmws.2021.1215
- Karimi, M., Shahedi, K., & Bayazidi, M. (2015). Analysis of hydrological drought using constant threshold level method (Case study: Karkheh River Basin, Iran). *Journal of Watershed Management Research*, 60(11): 59-72. [In Persian]
- Khedun, C.P., Chowdhary, H., Giardino, J.R., Mishra & Singh, V.P., (2011). Analysis of drought severity and duration based on runoff derived from the noah land surface model. *Symposium on Data- Driven Approaches to Droughts*, 6(21): 1-10.
- Khorooshi, S., Mostafazadeh, R., Esmali-Ouri, A., & Raoof, M. (2017). Spatiotemporal Assessing the Hydrologic River Health Index Variations in Ardabil Province Watersheds. *Ecohydrology*, 4(2): 393-379. [In Persian]
- Kjeldsen, T.R., Lundorf, A & Dan, R., (2000). Use of two components exponential distribution in partial duration modeling of hydrological droughts in Zimbabwean rivers, *Hydrological Science*, 45(2):285-298.
- Kwak, J., Soo, Y., So, J.K., Soo, L & H., Kim., (2012). Drought Severity-Duration-Frequency analysis of hydrological drought based on copula theory, *Hydrology Days*, Pp82-89.
- Maroufi, S., & Tabari, H. (2011). Revealing the process of changes in Maroon River discharge using parametric and non-parametric methods. *Geographic research*, 26(2): 125-146. [In Persian]
- Mehry, S., Mostafazadeh, R., EsmaliOuri, A., & Ghorbani, A. (2017). Spatial and Temporal Variations of Base Flow Index (BFI) the Ardabil Province rivers, Iran. *Earth and Space Physics*, 43(6)623-634. [In Persian]
- Mirabbasi Najafabadi; R., & Dinpazhoh, Y. (2010). Analysis of the changes in the water yield of the northwest rivers of Iran in the last three decades. *Water and Soil*, 24(4): 757-768. [In Persian]
- Mishra, A.K and Singh, V.P., (2010). A review of drought concepts. *Journal of Hydrology*, 391(1-2): 202-216.
- Mostafazadeh, R., & Mehry, S. (2019). Determining the precipitation regime and changes of precipitation seasonality index in the central part of Ardabil province. *Watershed Management Research*, 31(3): 28-39. [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., & and Kazemi, Y. (2010). Daily monitoring of drought and water resources in different climates of Iran. *Journal of Range and Watershed Management*, 64(1): 79-94. [In Persian]
- Razmkhah, H., (2017). Comparing threshold level methods in development of stream flow drought Severity-Duration-Frequency curves, *Water Resources Management*, 31(13): 4045-4061.
- Salajeghe, A., Mesbahzade, T., Soleimani Sardoo, F., & Alipour, N. (2018) Assessment of hydrological drought using constand treshhold level. *Iranian Journal of Watershed Management Science and Engineering*, 11(39): 89-99. [In Persian]
- Sarailidis, G., Vasilides, L & Loukas., (2015). The quantification of threshold level method on lows studies, *Proceedings of the 14th International Conference on Environmental Science and Technology Rhodes, Greece*, Pp 1-5.
- Schittkowski, K., (2002). EASY-FIT: a software system for data fitting in dynamical systems. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 23(2): 153-169.

- Shafiei, M., & Raeini, M. (2016). Assessment of the Impact of meteorological drought and wetness trends on the Parishan Lake water level decline. *Journal of Watershed Management Research*, 6(12): 118-126. [In Persian]
- Smakhtin, V.U., (2001). Low flow hydrology: a review, *Journal of Hydrology*, 240(3-4): 147-186.
- Sung, J.H & Chung, E.S., (2014). Development of streamflow drought Severity–Duration–Frequency curves using the threshold level method, *Hydrology and Earth system Sciences*, 18(9): 3341–3351.
- Tallaksen, L.M., (2000). Streamflow drought frequency analysis, *Drought and Drought Mitigation in Europe*, 14:103-117.
- Tareke, K.A., Awoke, A.G. 2022. Hydrological and meteorological drought monitoring and trend analysis in Abbay River basin, Ethiopia. *Advances in Meteorology*, 2048077. <https://doi.org/10.1155/2022/2048077>
- Urosev, M., Dolinaj, D & Lescesen, I., (2016). Hydrological droughts in the Juzna Morava river basin (Serbia), *Geographica Pannonica*, 20(4): 197-207.
- Van Huijgevoort, M.H.J., Van Lanen, H.A.J., Teuling, A.J., & Uijlenhoet, R., (2014). Identification of changes in hydrological drought characteristics from a multi-GCM driven ensemble constrained by observed discharge. *Journal of Hydrology*, 512: 421-434.
- Van Huijgevoort, M.H.J., Van Lanen, H.A.J., Teuling, A.J., & Uijlenhoet, R., (2014). Identification of changes in hydrological drought characteristics from a multi-GCM driven ensemble constrained by observed discharge. *Journal of Hydrology*, 512: 421-434.
- Van Loon, A.F & Laaha, G. (2015). Hydrological drought severity explained by climate and Catchment Characteristics. *Journal of Hydrology*, 526: 3–14.
- Wu, J.; Yao, H.; Wang, G. 2022. Propagation Characteristics of Hydrological Drought Based on Variable and Fixed Threshold Methods in Snowmelt and Rainfall Driven Catchments. *Water*, 14, 3219. <https://doi.org/10.3390/w14203219>
- Yildirim, G., Rahman, A., Singh, V.J. 2022. Meteorological and hydrological drought hazard, frequency and propagation analysis: A case study in southeast Australia, *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 44, 101229, <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2022.101229>.
- Yousefi, Y., Rordeh, H., Razavi, S.M. (2011). Spatial and Temporal Variability of River Flow in Mazandaran Province, *Geographical Planning of Space*. 1(2): 75-88. [In Persian]
- Zargar, A., Sadiq, R., Naser, B & Khan, F.L., (2011). A review of drought indices. *Environmental Reviews*. 19(1): 333-349.

یادداشت‌ها

- ¹ Flow Duration Curve
- ² Hisdal and Tallaksen
- ³ Sung and Chung
- ⁴ Severity Duration Frequency
- ⁵ Depth–Duration–Frequency
- ⁶ Sarailidis
- ⁷ Yermasuyia
- ⁸ Urosev
- ⁹ Rivera
- ¹⁰ Generalized Extreme Value
- ¹¹ Pivot Table
- ¹² Gordon
- ¹³ Yevejevich
- ¹⁴ Intensity
- ¹⁵ Duration
- ¹⁶ Severity
- ¹⁷ Frequency
- ¹⁸ Mean Annual 7-day Minimum flow
- ¹⁹ Easy fit
- ²⁰ ArcGIS
- ²¹ Gen. Pareto
- ²² Burr