

## شبیه‌سازی دینامیکی آستانه تحمل خشکسالی

### در حوضه‌های مدیریتی تقاضامحور

شهلا پایمزد<sup>۱\*</sup>، فاطمه حامدی<sup>۲</sup>

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۳/۳۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۶/۰۲

#### چکیده

حوضه‌های آبریز به موازات رخداد پدیده خشکسالی به دو روش عرضه و تقاضامحور مدیریت می‌شوند. در یک سامانه مدیریتی، پرداختن به اجزا و متغیرهای بازخوردی و تأثیر سامانه از تمام پارامترها، نقش تعیین‌کننده‌ای در تصمیم‌های آینده دارد. تحقیق حاضر شبیه‌سازی جریان خروجی از سد و نیز شبیه‌سازی خشکسالی در حوضه قروه دهگلان را که دیدگاهی تقاضامحور داشته، به صورت دینامیکی، طی سال‌های ۱۳۷۰ تا ۱۴۰۱ انجام داد. مدل اولیه با متوسط ارقام RMSE، MAE و  $R^2$  به ترتیب معادل ۰/۱۴۴، ۰/۱۴۰ و ۰/۹۸۹ تأیید گردید؛ سپس در سطوح شدید و بسیار شدید خشکسالی دینامیکی شبیه‌سازی شد. نتایج با توجه به اولویت تقاضا در منطقه نشان داد که در ایستگاه سنگ‌سیاه کمبود جریان، منجر به خشکسالی (MCM ۰/۰۰۶) با تداوم بالا (۱۷۲ روز) و در ایستگاه گلبلاغ خشکسالی با تداوم ۲۱۶ روزه در کمبود MCM ۰/۱۲۲ طی سال ۱۳۹۲ ثبت شده است. ایستگاه سورال نیز دارای شرایطی مشابه بوده است؛ اما در خصوص ایستگاه شادی‌آباد، که ارقام دبی تمایز و تفاوت قابل ملاحظه‌ای را ثبت نکرده‌اند، ماکزیمم تداوم خشکسالی (۲۱۵ روز) با ماکزیمم کمبود جریان منجر (MCM ۰/۷۳) در سال ۱۳۹۳ رخ داده است. ایستگاه‌های حسن‌خان و دهگلان که تحت تأثیر سدهای بالادست خود قرار دارند، قبل از سطح ۷۵٪ به خشکسالی شدید رسیده، به گونه‌ای که ایستگاه دهگلان در سطح خشکسالی ۲۲٪ با رقم دبی MCM ۰/۰۳۲ و ایستگاه حسن‌خان در سطح ۲۸٪ با دبی معادل MCM ۰/۲۲ خشکسالی را تجربه نموده‌اند. در نهایت نتایج نشان داد سطحی که منطقه قابلیت تحمل آن را دارد، به طور متوسط سطح خشکسالی ۲۵٪ است.

**کلیدواژه‌ها:** آستانه تحمل خشکسالی، تقاضا، خشکسالی، شبیه‌سازی.

۱. استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و محیط زیست، دانشگاه اراک، اراک، ایران، نویسنده مسئول؛ s-paimozd@araku.ac.ir

۲. دانش آموخته کارشناس ارشد گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و محیط زیست، دانشگاه اراک، اراک، ایران

\* این مقاله برگرفته از پایان‌نامه کارشناسی ارشد دانشگاه اراک است.

## مقدمه

منابع آب و خشکسالی نیز از این قاعده مستثنا نیست. در بررسی پدیده‌های هیدرولوژیک و مباحث مرتبط با منابع آب و به‌خصوص آب‌های سطحی، تخصیص منابع، متأثر از خشکسالی و احداث سد بوده و حتی در برخی موارد، اقدامات انسانی و خشکسالی، تشدید شرایط بحرانی را در پی داشته است. خشکسالی از پدیده‌های زیان‌آور طبیعی است که بسته به دوام و شدت آن می‌تواند تأثیرات جبران‌ناپذیری را بر سامانه‌های منابع آب و اقدامات وابسته به آن بگذارد. مطابق نظر میشر و سینگ<sup>۵</sup> (۲۰۱۰) مطالعه و بررسی نحوه تأثیر خشکسالی روی کاهش منابع آب می‌تواند کمک شایانی به مدیریت منابع آب و ذخیره آب‌های سطحی در سال‌های پیش رو بنماید. با توجه به چندبعدی بودن مسئله خشکسالی و تأثیرات آن بر شرایط هوا و اقلیم، برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب به درک تاریخچه خشکسالی و تأثیرات آن بر بخش‌های مختلف در زمان وقوع وابسته است. این برنامه‌ریزی نیازمند استفاده از شاخص‌های گوناگون خشکسالی و نتایج حاصل از آن است. سلیمانی مطلق و همکاران (۲۰۱۵) پیامدهای خشکسالی بر کیفیت آب‌های سطحی در حوزه آبریز کشکان استان لرستان طی دوره آماری ۲۰ سال را بررسی کردند. بدین منظور با استفاده از شاخص‌های<sup>۶</sup> SDI،<sup>۷</sup> RDI دوره‌ها و شدت خشکسالی‌های هواشناسی و هیدرولوژیک را بررسی کردند. نتایج تأثیر منفی روند صعودی خشکسالی بر کیفیت منابع آب سطحی حوزه آبریز مورد نظر را نشان داد. کریمی و همکاران (۲۰۱۶) به بررسی خشکسالی‌های هیدرولوژیکی و هواشناسی در حوزه آبریز قره‌سو در استان کرمانشاه پرداختند. همچنین تأخیر زمانی احتمالی بین وقوع این دو نوع خشکسالی توسط آن‌ها بررسی شد. بدین منظور، آمار پنج ایستگاه هیدرومتری، پنج ایستگاه باران‌سنجی و ۲۰ چاه پیزومتری موجود در حوزه استخراج شد و شاخص‌های خشکسالی<sup>۸</sup> RAI،<sup>۹</sup> SIAP<sup>۱۰</sup> و<sup>۱۱</sup> SWI مورد استفاده قرار

کمبود منابع آب‌های سطحی و همچنین برداشت بی‌رویه از آن‌ها سبب بروز بحران جدی شده و در صورت عدم بررسی پدیده‌های تأثیرگذار و عدم مدیریت صحیح، بروز مشکلات در سامانه‌های منابع آب در آینده‌ای نزدیک با شدت بیشتری تجربه خواهد شد. در این بین، بررسی شرایط هیدرولوژیک منطقه و تعیین سطح تحمل خشکسالی از اهمیت بالایی برخوردار است. جریان رودخانه‌ها که تحت تأثیر خشکسالی قرار می‌گیرند، مناقشات آبی فراوانی را در پایین دست به همراه خواهند داشت که ممکن است نتیجه دخالت انسانی و نه تغییرات اقلیمی باشند. در این میان، شبیه‌سازی خشکسالی هیدرولوژیک که بررسی دبی رودخانه در مقیاس‌های زمانی گوناگون است، راهبردی مطمئن برای پایش شرایط است؛ لذا شبیه‌سازی پدیده‌ها و اتفاقات گوناگون تأثیرگذار بر سامانه‌های منابع آب با توجه به ویژگی و پیچیدگی این سامانه‌ها مورد توجه ویژه‌ای قرار می‌گیرند. سامانه‌های پیچیده با توجه به المان‌های خاص خود، به نوعی از شبیه‌سازی نیاز دارد که با درک حلقه‌های علی و معلولی<sup>۱</sup> و ساختار درون‌زا، همه اجزا و پدیده‌های درون و برون سامانه را در حیطه مرز تعریف شده ارتباط داده و در حصول نتایج واقعی‌تر مشارکت دهد (ریچموند، ۱۹۹۳). در این تفکر برخلاف تفکر خطی، متغیرهای سیستم عامل و معلول یکدیگر بوده و در صورت تغییر یک جزء از سامانه (سیستم)، اجزای دیگر نیز تحت تأثیر قرار خواهند گرفت. در تفکر سیستمیک روابط بین اجزای یک سیستم و بازخوردها<sup>۲</sup> و اثرگذاری آن‌ها بر رفتار سیستم و نیز ابهامات درون سیستم مشهود و ملموس‌اند (استرمن، ۱۹۹۴). اما در روش‌های خطی ارتباط بین پارامترها یک‌سویه و لذا حلقه‌ای تشکیل نمی‌شود تا سامانه تحت تأثیر حلقه‌های موجود بررسی گردد (پایمزد و همکاران، ۲۰۱۱). اغلب محققان از دیدگاه خطی در بررسی‌های خود بهره جسته و به‌ندرت به دیدگاه سیستمیک توجه نشان داده‌اند. سامانه‌های

5. Mishra &amp; Singh

6. Standard Precipitation Index

7. Silt Density Index

8. Regional Streamflow Deficiency Index

9. Rain Anomalies Index

10. Standard Index Annual Precipitation

1. Causal Loop

2. Richmond

3. Feed back

4. Sterman

گرفتند. مطابق نتایج به‌دست‌آمده از هریک از شاخص‌های مورد نظر، از سال ۱۳۷۸ به‌تدریج شدت خشکسالی افزایش پیدا کرده است؛ به‌طوری‌که شدیدترین خشکسالی در سال ۱۳۸۶ و طولانی‌ترین آن بین سال‌های ۱۳۸۶ تا ۱۳۹۱ اتفاق افتاده است. در تحقیق دیگری که توسط سلاجقه و همکاران (۲۰۱۷) در حوزه آبریز سد کرج انجام شد، از روش حد آستانه ثابت ( $Q_{90}$  و  $Q_{70}$ ) به‌منظور بررسی خشکسالی هیدرولوژیکی استفاده شد. نتایج نشان داد که سال ۱۳۷۷ با تداوم ۲۸۴ روز در ایستگاه کرج و ۲۵۵ روز در ایستگاه گچسر یکی از خشک‌ترین سال‌ها در این حوضه بوده است. اثرات خشکسالی هواشناسی بر منابع آب‌های زیرزمینی و آب‌های سطحی در حوزه رودخانه هرات توسط میراکبری و همکاران (۲۰۱۸)، با استفاده از شاخص‌های  $SPI$ ،  $SPEI$ ،  $SDI$  و  $GRI$  بررسی شد. در این تحقیق از داده‌های بارندگی و دما برای استخراج دوره‌های خشکسالی هواشناسی توسط شاخص‌های  $SPI$  و  $SPEI$ ، داده‌های دبی و سطح سفره زیرزمینی چاه‌های پیژومتر در دوره آماری مشترک (۱۳۸۰ تا ۱۳۹۴) در سطح منطقه توسط دو شاخص  $SDI$  و  $GRI$  برای تحلیل خشکسالی هیدرولوژیکی استفاده شد. طبق نتایج به‌دست‌آمده، خشکسالی هواشناسی بعد از گذشت حداقل دو سال بر منابع آب زیرزمینی تأثیر می‌گذارد. تیموری و همکاران (۲۰۱۸) شبیه‌سازی اثرات تغییر اقلیم بر منابع آب با استفاده از رویکرد سیستم‌های پویا و تأثیر استفاده از سناریوهای مختلف، مدیریت تأمین آب و رشد جمعیت را ارزیابی کرده و رفتار متغیرهای حجم منابع آب و سرانه آب تجدیدپذیر استان خراسان جنوبی طی دوره ۲۰۱۳ تا ۲۰۱۴ را با دیدگاه دینامیکی مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد خشکسالی‌ها تأثیر منفی بر حجم آب تجدیدپذیر استان داشته و این خشکسالی‌ها همواره با رشد جمعیت باعث کاهش سرانه آب تجدیدپذیر استان شده‌اند. هاشمی و باقری (۲۰۲۰) به ارزیابی سامانه‌های منابع آب با استفاده از رویکرد پویا

پرداختند. یافته‌ها حاکی از آن است که تنها با افزایش سطح زیر کشت و صرف‌نظر از روند نزولی تولید در واحد سطح به‌ویژه در رابطه با محصولات باغی، تخصیص به بخش کشاورزی توسعه پیدا می‌کند. همچنین با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، ایجاد یک موازنه بین کاهش شش‌درصدی سطح زیر کشت زراعی و باغی و رشد چهاردرصدی صنایع و معادن تعادل منابع آب‌های زیرزمینی می‌شود. مارتین و همکاران (۲۰۲۰) به مدیریت خشکسالی در سیستم رودخانه جوکار پرداختند. در این شبیه‌سازی، برنامه‌ریزی استراتژیک مدیریت خشکسالی ارائه شده است. در این پژوهش، کاهش ۵ درصدی مصارف شرب و کاهش ۲۰ تا ۴۰ درصدی مصارف کشاورزی می‌تواند به کاهش اثرات خشکسالی کمک کند. جان‌بزرگی و همکاران (۲۰۲۱) عملکرد شاخص‌های هواشناسی و هیدرولوژیکی در ارزیابی پهنه‌بندی خشکسالی در دوره‌های سه، ۶، ۹ و ۱۲ ماهه ۱۷ ایستگاه در استان گیلان را بررسی کردند. دوره آماری مورد نظر از سال ۱۳۵۱ تا ۱۳۹۶ بود که شاخص  $SPI$  سه‌ماهه رو به ترسالی بود. در دوره‌های ۶، ۹ و ۱۲ ماهه شاخص در اکثر شهرهای استان نرمال بود. همچنین با توجه به نقشه‌های درونیابی  $SPI$  در چهار دوره آماری با بهترین برازش مشخص شد که هرچه دوره مورد نظر به سال ۱۳۹۶ نزدیک‌تر می‌شود، میزان شاخص خشکسالی نسبت به سال ۱۳۵۱ افزایش می‌یابد و محدوده وسیع‌تری از استان درگیر خشکسالی می‌شود. هادیانی (۲۰۲۱) به بررسی شدت خشکسالی هیدرولوژیکی در استان مازندران با روش تئوری توالی و شاخص استاندارد متوسط جریان کمینه ۳۰ روزه پرداخت و آن‌ها را در دسته‌های ضعیف، شدید و خیلی شدید طبقه‌بندی کرد. در فصل پاییز، شاخص شدت بسیار شدید در رودخانه چالوس ۱/۴۸۷- و برای رودخانه چشمه کیله با رژیم جریان مشابه، ۰/۷۴۲- عنوان شد. میزان این شاخص در رژیم برفی یخچالی در فصل پاییز ۱/۳۸۴- بود. احمدی و همکاران (۲۰۲۱) به بررسی خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی در حوضه

1. Standardized Water level Index
2. Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index
3. Groundwater Resource Index
4. Climate Change

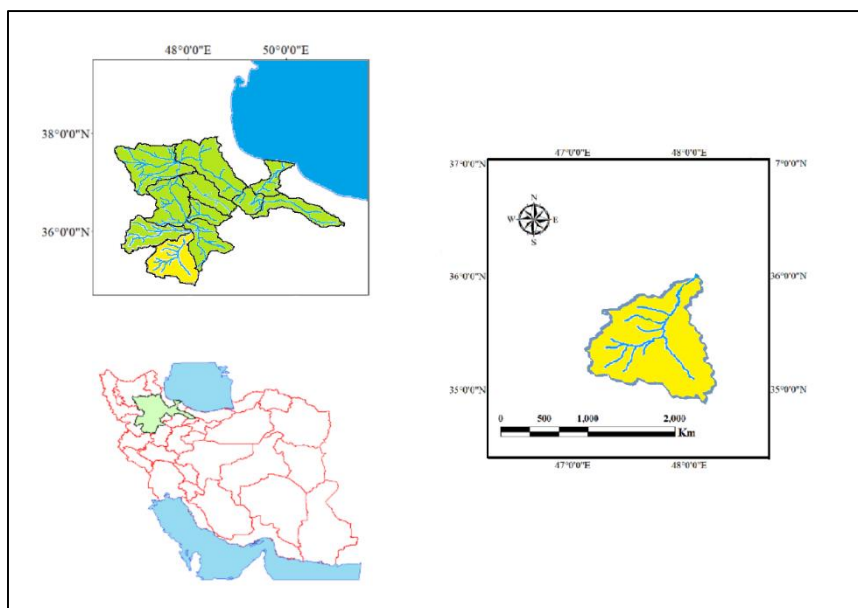
### مواد و روش‌ها

در منطقه مورد مطالعه شبیه‌سازی جریان رودخانه‌های موجود و خشکسالی هیدرولوژیکی با استفاده از آمار و اطلاعات مورد نیاز طی سال‌های ۱۳۷۰ تا ۱۴۰۰ در محیط نرم‌افزار ونسیم در مقیاس روزانه انجام شد. بدین منظور لازم بود ابتدا جریان سطحی رودخانه و سدها در منطقه منطبق بر واقعیت در مقیاس روزانه شبیه‌سازی گردد و پس از اطمینان از حصول نتایج و تأیید کارایی مدل، خروجی برای شبیه‌سازی خشکسالی هیدرولوژیکی، مورد استفاده قرار گیرد تا تأثیر وجود سدها بر خشکسالی به‌دقت ارزیابی گردد. برای شبیه‌سازی خشکسالی هیدرولوژیکی، شاخص کمبود جریان (تئوری دنباله‌ها) انتخاب شد. این شاخص دارای مقیاس روزانه بوده و از دقت بالایی برخوردار است (ادموند، ۲۰۱۱؛ علیشاهی چگنی، ۲۰۲۳).

### منطقه مطالعاتی

منطقه مورد مطالعه این تحقیق شامل زیرحوضه‌های قروه دهگلان است. این حوضه دارای میانگین دمای ۱۶ درجه سانتی‌گراد و میانگین بارش سالانه ۳۷۳ میلی‌متر در استان کردستان واقع شده است. حوضه آبریز قروه دهگلان با موقعیت ۳۴ درجه و ۵۴ دقیقه و ۲۰ ثانیه تا ۳۶ درجه و ۱۰ ثانیه عرض شمالی و ۴۷ درجه و ۶ دقیقه و ۵۳ ثانیه تا ۴۸ درجه و ۱۲ دقیقه و ۴۸ ثانیه طول شرقی در شکل (۱) نشان داده شده است. شریان اصلی استان کردستان از رودخانه تالوار واقع در قروه دهگلان سرچشمه گرفته است. تالوار پس از گذر از ایستگاه‌های دهگلان، حسن‌خان و سلامت‌آباد و تقاطع رودخانه‌های اوزون‌دره و چم‌شور، به رودخانه قزل‌اوزن می‌پیوندد. موقعیت ایستگاه‌های آب‌سنجی منطقه مطالعاتی برحسب درجه، دقیقه و ثانیه در جدول (۱) آمده است.

دورود بروجرد پرداختند. شاخص‌های EDI و RDI حاکی از وجود حالت غالب خشکسالی‌های نرمال و متوسط در اکثر مناطق حوضه بود. همچنین نتایج نشان داد شاخص EDI حساسیت کمتری نسبت به طول دوره آماری نشان می‌دهد و دارای تغییرات منطقی زمانی بود. این شاخص سال ۱۳۹۱ را خشک‌ترین سال تعیین کرد. همچنین شاخص RDI در هر دو حالت دبی آستانه Q70 و Q90 سال ۱۳۷۰ را خشک‌ترین سال نشان داد. علیشاهی چگنی و همکاران (۲۰۲۳) به بررسی دینامیکی تداوم و حجم خشکسالی دینامیکی در حوضه دورود بروجرد با استفاده از روش حد آستانه پرداختند. نتایج ضمن برتری تفکر سیستمی، نشان داد سال‌های ۱۳۹۱ و ۱۳۹۴ از جمله سال‌های بسیار خشک به‌لحاظ تداوم روزهای خشک و حجم خشکسالی بوده است. متأسفانه اغلب تحقیقات انجام‌شده در زمینه خشکسالی با دیدگاه خطی صورت گرفته و معدود تحقیقاتی به کاربرد روش دینامیک پرداخته‌اند. نکته قابل توجه عدم پردازش به تأثیر خشکسالی‌های هیدرولوژیک طولانی‌مدت در مقیاس روزانه بر سامانه منابع آب با حضور سد است. لذا بررسی و شبیه‌سازی دقیق خشکسالی هیدرولوژیک به‌موازات احداث سد بر روی جریان‌های آبی و تغییرات ایجادشده در پایین‌دست ضروری است. در این تحقیق با وجود نرم‌افزارهای گوناگون، دیدگاه دینامیک در اولویت بوده و ونسیم که از جمله کاربردوست‌ترین این نرم‌افزارهاست، مورد توجه واقع شده و تأثیر خشکسالی هیدرولوژیکی در حوضه آبریز قروه دهگلان واقع در استان کردستان طی سال‌های ۱۳۷۱ الی ۱۴۰۱ در مقیاس روزانه با دیدگاه دینامیک شبیه‌سازی گردید. حوزه آبریز قروه دهگلان در استان کردستان از مهم‌ترین سرشاخه‌های رودخانه قزل‌اوزن واقع در حوضه بزرگ سفیدرود به شمار می‌رود. در پایین‌دست این حوزه آبریز مناقشات آبی بسیاری بین استان‌های بالادست و پایین وجود دارد که بررسی عوامل دخیل در روند جریان خروجی از استان‌های بالادستی را ضروری می‌سازد.



شکل (۱): موقعیت منطقه مطالعاتی حوضه آبریز قروه دهگلان

Figure (1): The study area is located in the Qorveh Dehgolan Watershed

جدول (۱): مشخصات ایستگاه‌های آب‌سنجی منطقه مورد مطالعه

Table (1): Characteristics of Water Gauging Stations in the Study Area

ردیف	نام ایستگاه	رودخانه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع (m)
۱	سورال	تالوار	۴۷-۱۲-۰۰	۳۵-۰۹-۰۰	۱۹۸۸
۲	دهگلان	تالوار	۴۷-۲۴-۴۰	۳۵-۱۶-۴۵	۱۸۲۵
۳	سنگ‌سیاه	تالوار	۴۷-۲۸-۰۰	۳۵-۱۱-۰۰	۱۸۳۰
۴	حسن‌خان	تالوار	۴۷-۴۱-۲۳	۳۵-۲۶-۱۸	۱۷۱۹
۵	پای پل دلبران	چم‌شور	۴۷-۳۶-۳۵	۳۵-۱۲-۴۶	۱۷۷۰
۶	شادی‌آباد	چم‌شور	۴۷-۴۶-۳۲	۳۵-۲۸-۴۱	۱۶۸۰
۷	گلبلاغ	اوزون‌دره	۳۵-۰۸-۳۶	۵۰-۲۳-۴۷	۱۸۱۵
۸	سلامت‌آباد (مهرآباد)	تالوار	۴۷-۵۴-۰۰	۳۵-۵۱-۰۰	۱۴۸۰

## آمار و اطلاعات

روند داده‌ها نیز تحت تأثیر عوامل مختلفی مانند تغییر اقلیم، کاربری اراضی، تأثیرات برداشت، احداث سازه‌ها و سایر تأثیرات مصنوعی دیگر ایجاد می‌گردند. به‌منظور ارزیابی و کمی‌سازی میزان تأثیر تغییرات ذکرشده لازم است که روند موجود در این سری‌ها حذف و سری زمانی بدون روند مورد استفاده قرار گیرد. برای حذف روند داده‌ها، روش‌های معدودی وجود دارد. یکی از مطرح‌ترین این روش‌ها روش مبتنی بر شیب خط روند است که مورد تأیید وزارت نیروست (قدوسی، ۲۰۱۳). این روش توسط یو و وانگ (۲۰۰۴) برای

برای مدیریت و برنامه‌ریزی مسائل پیچیده سامانه‌های آبی و حصول نتایج قابل اطمینان، کنترل صحت و کیفیت داده‌ها لازم و ضروری است. معمولاً تلاش بر این است که در نحوه قرائت داده‌های اولیه احتمال بروز خطاها و اشتباهات فردی، تغییر محل اندازه‌گیری و تغییرات شدید موضعی آب‌وهوا در نظر گرفته شده و به حداقل برسند؛ اما درنهایت ممکن است داده‌ها به اصلاح یا کنترل نیاز داشته باشند. برای کنترل کیفیت اطلاعات و بررسی همگنی و نبود روند، روش‌های مختلفی وجود دارد. یکی از برترین روش‌ها برای بررسی همگنی داده‌ها، آزمون جرم مضاعف است (علیزاده، ۲۰۱۴). از طرفی

این مشکل باید خشکسالی‌های جزئی ترکیب شوند و در صورتی که از یک تعداد روز مشخص، توالی کمتری داشته باشند، حذف گردند. در بین روش‌های ترکیب خشکسالی‌های جزئی روش معیار داخلی ادقت بیشتری دارد (فلیگ و همکاران، ۲۰۰۶). در تحقیق حاضر روش تئوری دنباله‌ها و معیار داخلی استفاده شده است.

### شبیه‌سازی دینامیکی

نرم‌افزار ونسیم مدلی بصری و ابزاری شیء‌گراست که مدل‌های ذهنی منطبق بر واقعیت را تصویرسازی، شبیه‌سازی و آنالیز نموده و قادر است همچون سیستم پشتیبانی از تصمیم‌گیری، عواقب تصمیم‌گیری‌های مدیریتی را تحلیل و ارزیابی کند. اساس شبیه‌سازی این نرم‌افزار، استفاده از حل عددی معادلات دیفرانسیل به روش تفاضل محدود است. تصویر مدل از کل به جزء و توسعه مدل از جزء به کل انجام می‌شود (سینگ و همکاران، ۲۰۱۹). اساس مدل ونسیم بر متغیرهای حالت و جریان استوار است، اما تصمیمات مورد نظر توسط کاربر با استفاده از معادلات نوشته و پردازش می‌شود. یکی از مزیت‌های قابل توجه نرم‌افزار ونسیم این است که ترتیب قرار گرفتن جزئیات در این نرم‌افزار مشابه واقعیت است (پایمزد، ۲۰۲۱). در این نرم‌افزار نیازی به کدنویسی نیست. لیکن انتخاب دقیق و اصولی اجزا، متغیرها و پارامترهای سامانه، نوشتار معادلات خاص و پیچیده، مطابق هدف تعیین‌شده و مبنی بر واقعیت توسط کاربر و درون یک مرز انجام می‌شود. سپس با استفاده از بازخوردهای موجود و ترسیم نمودارهای علی و معلولی، مدل مفهومی اولیه استخراج و با تعریف متغیرهای حالت، جریان، مستقل و ثابت نمونه‌ای از سامانه مد نظر شبیه‌سازی می‌گردد. پس از اطمینان از صحت مدل، نتایج حاصل از تغییرات مورد نظر مدیر یا محقق، در کمترین زمان ممکن، به صورت جداول و نمودارها در یک صفحه و برای تمام متغیرها و پارامترها قابل مشاهده و تصمیم‌گیری است. این مدل برخلاف مدل‌های خطی هرگونه

حذف روند سری‌های زمانی پیشنهاد شد. در این تحقیق نیز روش جرم مضاعف و شیب خط روند استفاده شده است. در ادامه، پس از بررسی آمار روزانه جریان رودخانه‌ها، نوع محصولات زراعی، سطح زیر کشت، الگوی کشت، نیاز آبی، بارندگی و شبکه هیدروگرافی طی سال‌های ۱۳۷۰ تا ۱۴۰۱ شبیه‌سازی جریان خروجی از سدها و خشکسالی هیدرولوژیک انجام گرفت.

### خشکسالی هیدرولوژیکی

روش تئوری دنباله‌ها یکی از پرکاربردترین روش‌های تحلیل خشکسالی هیدرولوژیکی است. این روش از حدود بالا و پایین دبی در سطوح احتمال تعریف‌شده بهره می‌برد. این روش در مباحث مدیریت منابع آب، برنامه‌ریزی آبیاری، طراحی نیروگاه‌های آبی و حفظ کیفیت آب بسیار مد نظر قرار گرفته است. در این روش، ابتدا سطح شاخص مد نظر تعیین می‌شود. برای تعیین سطح شاخص مناسب برای استخراج دوره‌های خشکسالی هیدرولوژیکی، از منحنی تداوم جریان روزانه بهره گرفته می‌شود. اغلب سطح شاخص دبی‌هایی از منحنی تداوم جریان روزانه بین ۷۰ تا ۹۵ درصد در نظر گرفته می‌شود. در صورتی که مقادیر دبی روزانه از سطح شاخص مورد نظر کمتر شود، خشکسالی رخ می‌دهد و برای تحلیل خشکسالی، تنها از باقی‌مانده‌های منفی استفاده می‌شود. طول توالی منفی که تعداد روزهای خشک است، نشان‌دهنده تداوم خشکسالی یا به عبارتی تعداد روزهایی است که خشکسالی تداوم دارد. در ادامه، از مجموع حجم توالی‌های منفی، بزرگی یا کمبود منجر به خشکسالی به دست می‌آید (علیشاهی چگنی و همکاران، ۲۰۲۳؛ قربانی و همکاران، ۲۰۱۹).

مورد قابل توجه در خصوص تداوم و کمبود خشکسالی این‌که در طول یک دوره خشکسالی، در برخی موارد، دبی جریان برای یک دوره زمانی کوتاه، از حد مورد نظر تجاوز نموده و باعث می‌شود خشکسالی به تعداد خشکسالی‌های کوچک‌تر و وابسته تفکیک شود. این مشکل در مقیاس روزانه بیشتر به چشم می‌خورد و سبب می‌گردد خشکسالی‌های جزئی با توالی و کمبود کم نیز محاسبه گردند. به منظور رفع

1. Internal Criterion
2. Fleig
3. Xing
4. Stock
5. How

بازخورد به متغیرهای وابسته به جریان در هر ایستگاه، ارقام مورد نظر را در محدود مجاز به‌گونه‌ای تغییر می‌دهد که دبی‌ها به حداقل دبی طی دوره آماری نزدیک و به صفر نرسند. لذا با توجه به سری زمانی درازمدت دبی‌های هر ایستگاه و متغیرهای وابسته سطح تحمل خشکسالی هر ایستگاه اعلام می‌گردد و لزوماً خشکسالی ایستگاه در یک سطح خاص قرار نمی‌گیرد.

## نتایج و بحث

### بررسی شرایط هیدرولوژیک منطقه

از آنجاکه هدف بررسی شاخص هیدرولوژیک روزانه بوده است، برای بررسی خشکسالی هیدرولوژیک نیاز به خروجی روزانه مدل بود. لذا ابتدا شبیه‌سازی دینامیکی تخصیص آب پس از بررسی صحت آمار در مقیاس روزانه صورت گرفت. در منطقه مورد مطالعه تعدادی سد به بهره‌برداری رسیده‌اند. متأسفانه دیدگاهی که اغلب به تقاضا بهای بیشتری داده شده و کمتر دیدگاه مدیریتی عرضه‌محور مورد توجه واقع شده است. لذا شبیه‌سازی جریان بایستی به‌گونه‌ای انجام شود که مقادیر جریان قبل و بعد از بهره‌برداری از سدها مطابق واقعیت منطقه باشد. به‌منظور دقت بالا و ارائه مدلی با حداقل خطا، منطقه به بازه‌هایی تقسیم شد که تخصیص جریان‌های سطحی به بخش کشاورزی به ریز محصولات و سطوح زیر کشت و نیاز آبی و... را در خود جای داده است؛ سپس برای شبیه‌سازی مدلی دقیق‌تر، آمار ایستگاه‌های آب‌سنجی، طبیعی شدند. در واقع برای بررسی کامل و عدم تأثیر برداشت بین بازه‌ای و بالادست ایستگاه‌ها، کلیه آمار ایستگاه‌های هیدرومتری طی دوره آماری با استفاده از روش حذف روند طبیعی گردید تا از این طریق دبی حوضه‌های میانی محاسبه شود. از آنجاکه هدف از شبیه‌سازی دینامیکی، ورود تمام بازخوردهای واقعی بوده است، از بالاترین ایستگاه واقع در کردستان که سوال است تا ایستگاه سلامت‌آباد در خروجی حوضه، مدل در مقیاس روزانه شبیه‌سازی گردید. مدل بین هر دو ایستگاه یا سد و ایستگاه را یک بازه در نظر گرفته و در هر بازه، سطح زیر کشت سالانه، نوع کشت (که حدود ۳۰ نوع مختلف را شامل می‌گردد)، نیاز آبی و راندمان آبیاری (توسعه و بهبود) طی دوره آماری به مدل وارد گردید. براساس گزارش‌های بهنگام‌سازی مطالعات جامع

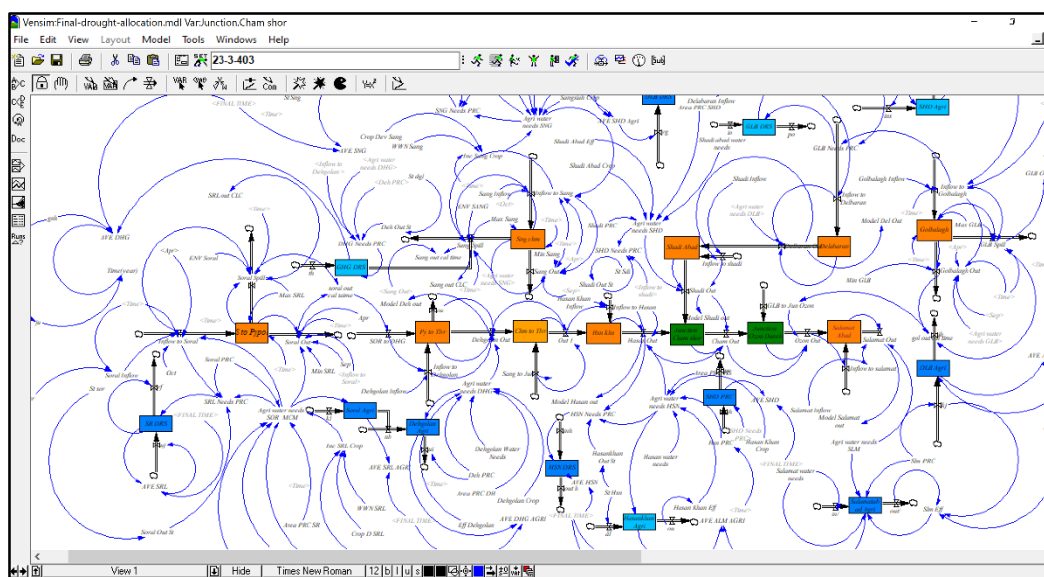
ارتباط بین اجزا را به‌صورت دوطرفه بررسی نموده و در صورت ایجاد هرگونه خطا تأثیر آن بر کل متغیرها به‌صورت تصاعدی نمایش داده خواهد شد. لذا برای اطمینان و دقت بیشتر و به‌دلیل حساسیت منطقه با توجه به احداث سدهای متوالی این نرم‌افزار برای شبیه‌سازی انتخاب شد.

در تحقیق حاضر ابتدا شبیه‌سازی بخش تخصیص و در ادامه شبیه‌سازی خشکسالی هیدرولوژیک انجام شد. در بخش تخصیص، متغیرهای اصلی شامل جریان روزانه در تمام ایستگاه‌های واقع در سرشاخه‌ها و همه رودخانه‌ها، سطح زیر کشت و نیاز آبی حدود ۴۰ گیاه مختلف در هر بازه (که مابین دو ایستگاه قرار شده)، راندمان آبیاری در شرایط معمول و توسعه و نیز احجام سدها و... انتخاب گردید. در ادامه، برای تعیین سطح و شدت خشکسالی به جریان‌های خروجی از هر ایستگاه در مقیاس زمانی روزانه نیاز است که از نتایج حاصل از خروجی مدل اول وارد مدل تئوری دنباله‌ها گردید. مدل تئوری دنباله‌ها در شرایط معمول برای تعیین سطح و شدت خشکسالی نیاز به شبیه‌سازی به تعداد ایستگاه دارد. لیکن در این تحقیق، با تعریف زیرمجموعه‌ها و به کار بردن آرایه‌ها و ایجاد ماتریس چهاربعدی، در محیط نرم‌افزار ونسیم مدل به‌گونه‌ای نوشته شده است که در قسمت ورود اطلاعات، دبی‌های روزانه ایستگاه‌های هیدرولوژی در کل حوضه فراخوانی شده و در ادامه، محاسبات مربوط به یک ایستگاه انجام، و خروجی حاصل مربوط به تمام ایستگاه‌های تعریف شده در مدل انجام می‌گردد و نیازی به شبیه‌سازی به تعداد ایستگاه نخواهد بود. مهم‌ترین برتری مدل حاضر چندبعدی بودن آن و عدم تکرار بازخوردها و متغیرهاست. این ویژگی امکان معرفی معادلات و بازخوردها و متغیرهای حالت و جریان را برای یک ایستگاه ایجاد کرده و نیازی به گسترده‌سازی معادلات و... به تعداد ایستگاه‌ها مورد نظر نخواهد بود. برتری دیگر این مدل استفاده از بازخوردها در تعیین سطح تحمل خشکسالی در هر ایستگاه است؛ بدین معنا که مدل با استفاده از آمار ایستگاه‌های آب‌سنجی و ترسیم نمودار تداوم جریان، ابتدا در سطوح خشکسالی مورد نظر، به محاسبه توالی و کمبود خشکسالی می‌پردازد. سپس با لینک

می‌شوند. لذا شبیه‌سازی جریان سطحی و تخصیص نیاز کشاورزی تحت خشکسالی هیدرولوژیکی مد نظر این تحقیق بوده است.

در شکل (۲)، شبیه‌سازی در مقیاس روزانه نمایش داده شده است. همان‌گونه که اشاره شد، جای‌گذاری متغیرها بر اساس شبکه هیدروگرافی محدوده مطالعاتی منطبق بر واقعیت منطقه و در مقیاس روزانه، در دوره زمانی ۱۳۷۰ تا ۱۴۰۱ انجام پذیرفته است.

منابع آب مقدار جریان برگشتی در هر بازه برابر ۱۰٪ مقدار مصارف در بالادست است (گزارش‌های مطالعات بهنگام‌سازی طرح جامع آب کشور، ۲۰۱۲). برای محاسب مقدار و درصد منابع آب تخصیص داده‌شده به بخش کشاورزی، از بازخورد خروجی ایستگاه پایین‌دست هر بازه نسبت به متغیر برداشت بخش کشاورزی استفاده شد. در حوضه مورد مطالعه، تأمین آب از دو بخش آب‌های سطحی و زیرزمینی صورت می‌گیرد. در این منطقه تأمین آب شرب، صنعت و خدمات بر عهده آب‌های زیرزمینی و کشاورزی از آب‌های سطحی تأمین نیاز



شکل (۲): مدل هیدرولوژیکی جریان روزانه رودخانه تالوار طی سال‌های ۱۳۷۰ تا ۱۴۰۱ تحت تأثیر خشکسالی

Figure (2): Hydrological Model of Daily River Flow in Talavar River during the Years 1992 to 2022 under the Influence of Drought

معیارهای ارزیابی را نشان می‌دهد. مقادیر نشان می‌دهد مدل ارائه‌شده دارای دقت بالایی در شبیه‌سازی و در تطبیق نتایج با واقعیت قابلیت بالایی دارد.

در ادامه به منظور سنجش مدل، ارزیابی ساختار و رفتار انجام شد. برای بررسی صحت ساختار مدل، از ابزارهای ارزیابی MAE، RMSE و  $R^2$  استفاده شد. جدول (۳) مقادیر

جدول (۳): معیارهای ارزیابی مدل در مقیاس روزانه (مقایسه دبی مشاهداتی و دبی شبیه‌سازی‌شده)

Table (3): Evaluation Criteria for Model Assessment at Daily Scale (Comparison of Observed Discharge and Simulated Discharge)

$R^2$	RMSE	MAE	ایستگاه
۰/۹۹۵	۰/۰۱۹	۰/۰۹۴	سورال
۰/۹۹۵	۰/۰۳۹	۰/۰۴۷	دهگلان
۰/۹۹۲	۰/۰۲۲	۰/۰۳۲	سنگ سیاه
۰/۹۸۲	۰/۰۴۴	۰/۰۵۶	حسن‌خان
۰/۹۹۴	۰/۰۱۸	۰/۰۲۶	پای پل دلبران
۰/۹۹۱	۰/۰۹۰۲	۰/۰۶۲۴	شادی‌آباد
۰/۹۷۵	۰/۰۹۹	۰/۰۲۳۲	گلبلاغ
۰/۹۹۳	۰/۰۱۱	۰/۰۱۵	سلامت‌آباد

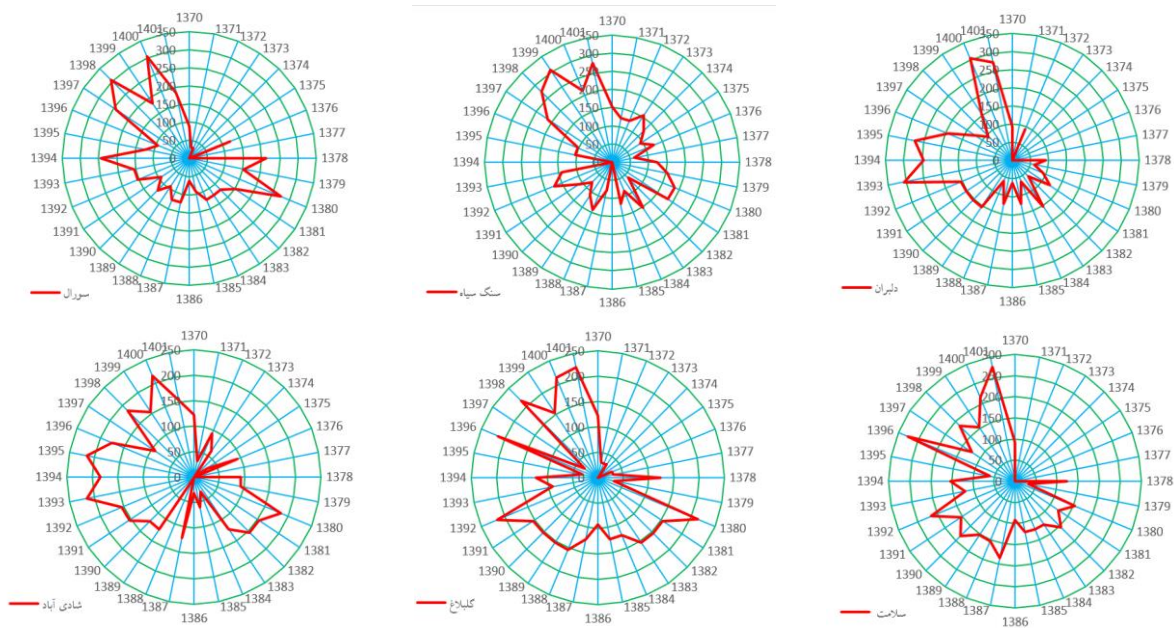


## نتایج حاصل از مدل تئوری دنباله‌ها

پس از اطمینان از صحت مدل، خروجی حاصل از مدل تخصیص، به مدل تئوری دنباله‌ها که در نرم‌افزار ونسیم شبیه‌سازی شده است وارد گردید تا تأثیر سد و خشکسالی هیدرولوژیکی در منطقه مطالعاتی مورد نظر ارزیابی شود. طول دوره خشک یا توالی خشکسالی، طی شبیه‌سازی به ترتیب در سطح‌های ۷۵٪ (شدید) و ۹۵٪ (بسیار شدید) در کل ایستگاه‌های منطقه استخراج شده و در شکل‌های (۳) و (۴) نشان داده شده است.

مطابق شکل (۳)، منطقه مطالعاتی در همه ایستگاه‌ها و طول دوره شبیه‌سازی، خشکسالی را با طول دوره‌های گوناگون تجربه نموده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، تداوم روزهای خشک طی سال‌های اخیر به ۳۰۰ روز در سال نیز رسیده است. در ایستگاه‌های سورال و سنگ‌سیاه خشکسالی از سال ۱۳۹۷ با تداوم بیشتری شدت یافته است؛ به گونه‌ای که بیشترین توالی

روزهای خشک با رقم ۳۰۵ روز در سال در این دو ایستگاه ثبت شده است. در ایستگاه‌های دلبران و شادی‌آباد نیز کل دوره در خشکسالی شدید تداوم بالایی داشته و از سال ۱۳۸۹ شدت بیشتری نشان داده است. این خشکسالی ادامه داشته، در حوالی سال‌های ۱۳۹۷ و ۱۳۹۸ کاهش و سپس افزایش قابل توجهی با توالی ۲۱۵ و ۳۰۴ به ترتیب برای ایستگاه‌های دلبران و شادی‌آباد ثبت نموده است. همچنین در ایستگاه گلبلاغ کل دوره خشک و همانند ایستگاه‌های سورال و سنگ‌سیاه حوالی سال ۱۳۹۲ شدت یافته، در ادامه تداوم خشکسالی افت داشته و به یکباره از سال ۱۳۹۸ تداوم خشکسالی قابل توجهی با ثبت رقم ۲۱۴ روز، را تجربه نموده است. در ایستگاه سلامت‌آباد که تحت تأثیر جریان‌های بالادست قرار دارد، تداوم خشکی نشان‌دهنده رخداد خشکسالی از سال ۱۳۸۰ او در سطح شدید بوده و در سال‌های اخیر شدت بیشتری با ثبت رقم ۲۷۵ روز خشک نشان داده است.



شکل (۳): طول دوره خشک در ایستگاه‌های هیدرومتری منطقه مطالعاتی در سطح شدید

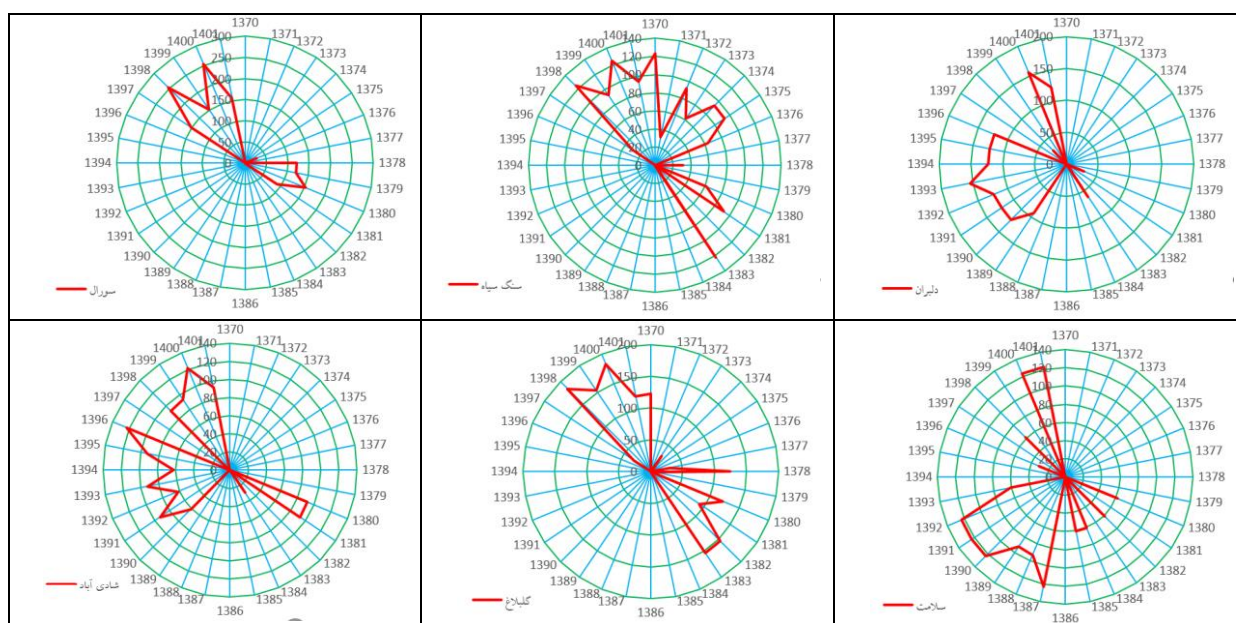
Figure (3): Drought Sequences at the Hydrometric Stations in the Study Area at the Intense Level

سطح بسیار شدید است. در اغلب ایستگاه‌ها، طی سال‌های ۱۳۹۸ تا ۱۴۰۱ خشکسالی در کل ایستگاه‌ها تداوم بیشتری داشته است. ایستگاه‌های سورال و سنگ‌سیاه که موقعیت جغرافیایی نزدیک به یکدیگر دارند، در ثبت روزهای خشک برخورد مشابهی نشان داده‌اند. این امر در خصوص ایستگاه‌های

مطابق شکل (۴) حوضه رفتار مشابهی را در کل دوره شبیه‌سازی خشکسالی هیدرولوژیکی در سطوح شدید و بسیار شدید را نشان داده است. در سطح بسیار شدید، تداوم خشکسالی، نسبت به سطح شدید از مقادیر کمتری برخوردار است که البته این امر به دلیل کوچک‌تر بودن مقادیر دبی در

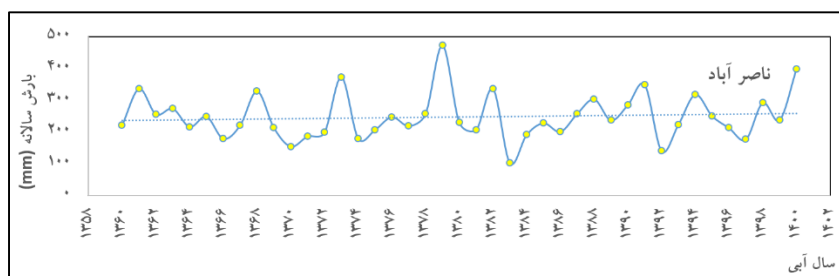
در ارتباط با علت بروز پدیده خشکسالی هیدرولوژیک دو گزینه مد نظر قرار می‌گیرد. گزینه‌ای که اکثر محققان نیز ابتدا مورد بررسی و ارزیابی قرار می‌دهند، احتمال کاهش نزولات جوی و گزینه دوم مطرح شده افزایش برداشت از رودخانه‌های منطقه مطالعاتی است (فرجی و همکاران، ۲۰۲۳). لذا بررسی روند بارش در حوضه الزامی است. برای نمونه و شاخص منطقه روند بارش ایستگاه سلامت‌آباد که خروجی حوضه است، در شکل (۵) نشان داده شده است. با توجه به عدم روند کاهشی بارش در ایستگاه ناصرآباد به‌عنوان منتخب منطقه مطالعاتی، افزایش برداشت عامل اصلی پدیده خشکسالی به نظر می‌رسد.

دلبران و شادی‌آباد نیز صدق می‌کند. در این سطح نیز همانند سطح خشکسالی شدید ایستگاه‌های سوزال، سنگ‌سیاه و گلبلاغ رفتار مشابهی در ثبت روزهای خشک داشته‌اند. در این ایستگاه‌ها به ترتیب ۲۵۴، ۱۲۵ و ۱۸۳ روز خشک در سال ۱۴۰۰ داشته‌اند. در این ۳ ایستگاه از سال ۱۳۹۸ خشکسالی هیدرولوژیک با متوسط رقم ۱۵۸ روز تداوم داشته است. ایستگاه‌های دلبران و شادی‌آباد نیز ارقام ۱۵۵ و ۱۲۲ روز تداوم خشکی را در سال ۱۴۰۰ اعلام داشته‌اند. همچنین مطابق سطح شدید، از حوالی سال‌های ۱۳۸۹ و ۱۳۹۰ خشکسالی نمود بیشتری داشته و تنها در سال‌های ۱۳۹۷ و ۱۳۹۸ افت پیدا نموده و با شدت بیشتری ادامه یافته است.



شکل (۴): طول دوره خشک در ایستگاه‌های هیدرومتری منطقه مطالعاتی در سطح بسیار شدید

Figure (4): Drought Sequences at the Hydrometric Stations in the Study Area at the Very Intense Level

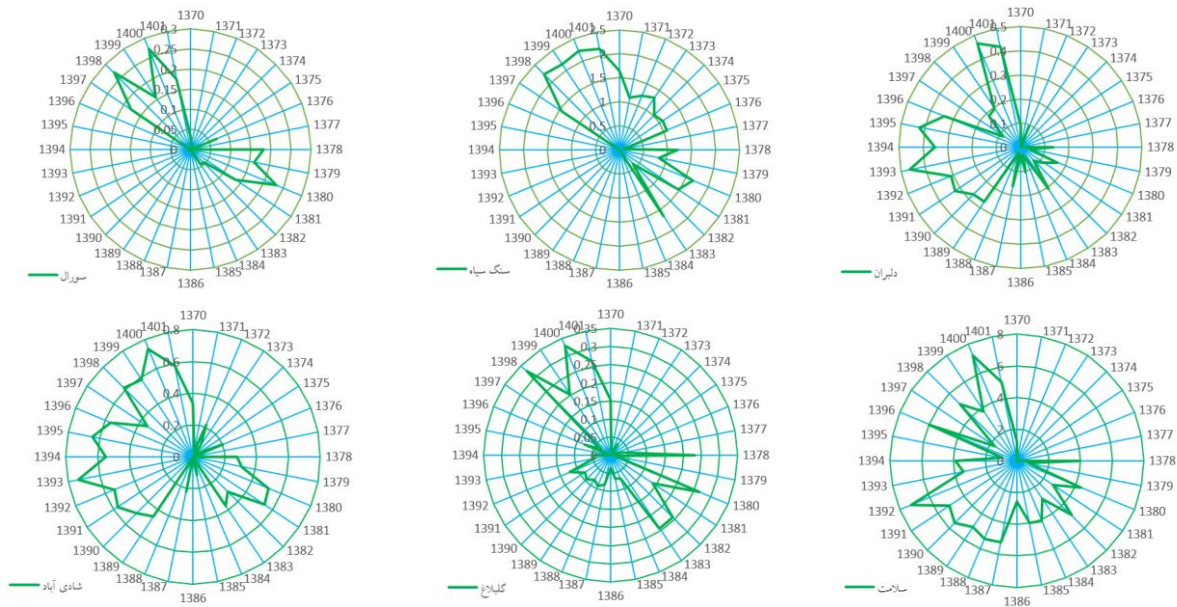


شکل (۵): روند بارش سالانه در ایستگاه ناصرآباد

Figure (5): The trend of precipitation at Naser Abad station

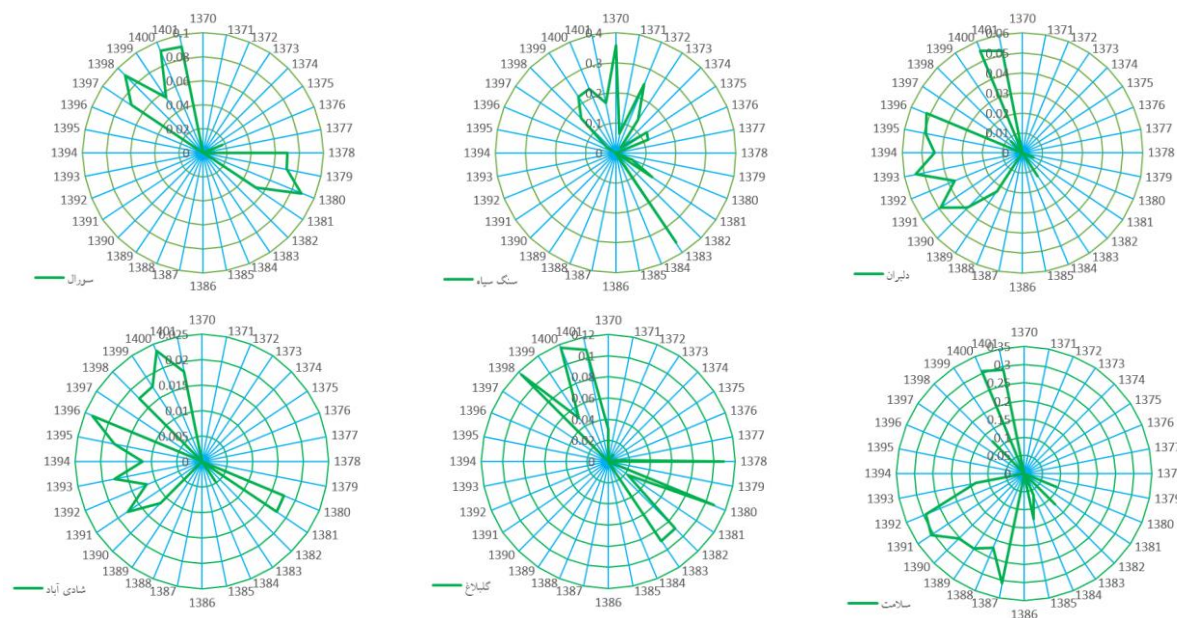
علت بروز این رخداد احداث سد‌های سوزال، سنگ‌سیاه و گلبلاغ حوالی قبل از ۱۳۹۰ است. قبل از بهره‌برداری از سد‌ها، بازه‌های مابین هر دو ایستگاه در رقابت با یکدیگر از ابتدای تعریف طرح‌ها، سطوح زیر کشت خود را افزایش داده و

برداشت بیشتری از منابع آب داشته‌اند. در این حوضه تا ۳/۸ برابر نیز سطوح زیر کشت در پاسخ به احداث سدها افزایش داشته‌اند (پایمزد، ۲۰۲۱). این امر سبب بروز خشکسالی و نیز تداوم روزهای خشک شده است. بررسی توالی خشکسالی تعداد روزهای خشک رودخانه‌ها را مورد ارزیابی قرار می‌دهد.



شکل (۶): کمبود جریان خشکسالی (MCM) ایستگاه‌های منطقه مطالعاتی در سطح شدید

Figure (6): Drought Volume (MCM) of Stations in the Study Area at the Very Intense Level



شکل (۷): کمبود جریان خشکسالی (MCM) دبی ایستگاه‌های منطقه مطالعاتی در سطح بسیار شدید

Figure (7): Drought Volume (MCM) of Stations in the Study Area at the Very Intense Level

مشاهده می‌شود که به‌رغم عدم روند کاهشی بارش، خشکسالی چه در خصوص توالی و چه کمبود جریان، در برخی سال‌ها با شدت بیشتری افزایش نشان داده است. روند بارش در شکل (۵) نشان‌دهنده افزایش بارش طی سال‌های ۱۳۷۸ تا

آنچه از نتایج قابل مشاهده است، رفتار مشابه ایستگاه‌هایی است که سد در آن‌ها احداث شده است. در سال ۱۳۹۰ و ۱۳۹۲ سدهای منطقه (سد سورال، سنگ‌سیاه و گلبلاغ) افتتاح و قبل از آن آبیگری شده‌اند. شروع به احداث سدها مقارن با زمانی است که اغلب ایستگاه‌ها خشکسالی را نشان داده و در پاسخ به این واکنش، در رقابت برداشت آب، به توسعه اراضی کشاورزی پرداخته‌اند. این امر برداشت بیش از پیش از جریان رودخانه و متعاقب آن خشکسالی هیدرولوژیک را در تمام ایستگاه‌ها به‌جز دلبران در پی داشته است. ایستگاه دلبران تنها ایستگاهی است که با توجه به موقعیت جغرافیایی و در سرشاخه قرار گرفتن، رفتار متعادل‌تری طی سال‌های احداث سد داشته است. اما ایستگاه شادی‌آباد و دلبران که سدی در بازه آن‌ها احداث نشده است، از سال ۱۳۸۹ تا ۱۳۹۶ با توجه به احساس برداشت آب در دیگر بازه‌ها سطوح زیر کشت خود را افزایش داده و دچار خشکسالی هیدرولوژیکی شده‌اند و از سال ۱۳۹۸ خشکسالی در کل منطقه شدت بیشتری داشته است.

دو ایستگاه حسن‌خان و دهگلان ایستگاه‌هایی هستند که منحنی تداوم جریان کاملاً متفاوتی داشته‌اند؛ لذا نسبت به دیگر ایستگاه‌ها سطوح خشکسالی شدید و بسیار شدید در آستانه پایین‌تری خواهند داشت. در این تحقیق، شبیه‌سازی به‌گونه‌ای انجام شده است که در صورت پایین بودن رقم دبی و رخداد خشکسالی شدید در سطوحی غیر از سطوح اعلام‌شده به مدل، مدل با استفاده از لینک‌های بازخوردی و نمودار تداوم جریان به محاسبه سطح خشکسالی قابل تحمل ایستگاه می‌پردازد. ایستگاه‌های حسن‌خان و دهگلان که تحت‌تأثیر سدهای بالادست خود قرار دارند، قبل از سطح ۷۵٪ به خشکسالی شدید رسیده بوده و آن را تجربه نموده‌اند. جدول (۴) سطح تحمل خشکسالی و ارقام دبی سطح مورد نظر این دو ایستگاه و شروع خشکسالی ایستگاه‌های دیگر قبل از سطح ۷۵٪ را نشان می‌دهد. در واقع سطحی که منطقه قابلیت تحمل آن را دارد، به‌طور متوسط سطح خشکسالی ۲۵٪ اعلام شده است.

۱۳۸۰ بوده و به‌موازات آن، خشکسالی به‌خصوص در سطح شدید نیز مشاهده شده است. لذا در منطقه مورد نظر یک عامل خارج از سامانه سبب بروز خشکسالی شده است. احداث سدها و روند کاهش جریان خروجی نسبت به کل دوره، شیب منحنی تداوم جریان را تحت‌تأثیر قرار می‌دهد. درخصوص تغییر شیب منحنی تداوم جریان، یا دبی‌های ناشی از بارش دچار تغییر اقلیم می‌شوند یا فعالیت سدها سبب تغییر الگوی جریان در منطقه می‌شوند. در یک دید کلی چنین می‌توان اظهار داشت در صورتی که دبی‌ها از یک دوره خاص، دبی مقادیر کمتری داشته باشد، این امر شیب منحنی تداوم جریان ایستگاه‌ها را تحت‌تأثیر قرار می‌دهد؛ به‌گونه‌ای که دبی در سطح شدید و بسیار شدید دارای ارقام بالاتری (در ابتدای دوره) نسبت به زمانی است که دبی‌ها از یک روند مشابه و حدود پایین‌تری (انتهای دوره) پیروی کنند. تحت این شرایط در طول دوره و در مقیاس روزانه نمودار مقادیر دبی و تغییرات ناشی از آن تعیین‌کننده حجم و کمبود خشکسالی خواهند بود؛ به‌گونه‌ای که زمانی که دبی‌ها دارای مقادیر نزدیک به یکدیگر باشند، خشکسالی‌ها با تداوم بیشتر و کمبود کمتر اتفاق می‌افتد و در صورت تغییرات ناگهانی دبی، تداوم خشکسالی کمتر و کمبود بیشتری خواهد داشت. برای نمونه، در ایستگاه سنگ‌سیاه کمبود خشکسالی حداقلی (MCM ۰/۰۰۰۶) با تداوم بالا (۱۷۲ روز) در سال ۱۳۹۲ اعلام شده است. در ایستگاه گلبلاغ نیز در سال ۱۳۹۲ خشکسالی با تداوم ۲۱۶ روزه در کمبود ۰/۱۲۲ MCM ثبت شده است. ایستگاه سورال نیز دارای شرایطی مشابه بوده و تعداد ۱۵۴ روز خشک در سال ۱۳۹۲ با کمبود ۰/۰۰۴ MCM را طی کرده است.

اما درخصوص ایستگاه شادی‌آباد، که دبی ارقام متمایز و متفاوت چشمگیری نداشته، ماکزیمم تداوم خشکسالی (۲۱۵ روز) با ماکزیمم کمبود خشکسالی (MCM ۰/۸۳) در سال ۱۳۹۳ رخ داده است. ایستگاه دلبران نیز دارای چنین خصوصیتی است. در این ایستگاه، ماکزیمم تعداد روزهای خشک، ۳۰۵ روز با مقدار ماکزیمم کمبود معادل (MCM) ۰/۴۶ در سال ۱۳۹۳ رخ داده است.

جدول (۴): سطح تحمل خشکسالی ایستگاه‌های منطقه مطالعاتی  
 Table (4): Drought Tolerance Level of Stations in the Study Area

ایستگاه	سطح تحمل ایستگاه (%)	میزان دبی
سورال	۱۹	۰/۰۰۷
سنگ‌سیاه	۲۳	۰/۰۴۵
دهگلان	۳۲	۰/۰۱۲۲
حسن‌خان	۲۸	۰/۸۷۰
دلبران	۲۱	۰/۲۲
شادی‌آباد	۲۱	۰/۰۶۴
گلبلاغ	۲۷	۰/۰۱۳
سلامت‌آباد	۲۹	۰/۳۷۵

### نتیجه‌گیری

دوره) نسبت به زمانی است که دبی‌ها از یک روند مشابه و حدود پایین‌تری (انتهای دوره) پیروی کنند. تحت این شرایط در طول دوره و در مقیاس روزانه نمودار مقادیر دبی و تغییرات ناشی از آن تعیین‌کننده حجم و کمبود خشکسالی خواهند بود. به‌گونه‌ای که زمانی که دبی‌ها دارای مقادیر نزدیک به یکدیگر باشند، خشکسالی‌ها با تداوم بیشتر و کمبود کمتر اتفاق می‌افتد و در صورت تغییرات ناگهانی دبی تداوم کمتر و کمبود بیشتری را خواهد داشت (جیریایی شراهی و پایمزد، ۲۰۲۳؛ چگنی علیشاهی و همکاران، ۲۰۱۳). حال در مناطقی که افت دبی به دو دوره تقسیم می‌شود، مقادیر سطوح دبی از دوره‌ای تبعیت خواهد کرد که زمان بیشتری را به خود اختصاص داده است. همین امر سبب می‌گردد احجام و تداوم خشکسالی تحت‌تأثیر این دوره واقع گردد. برای نمونه در ایستگاه سنگ‌سیاه کمبود خشکسالی حداقلی (MCM ۰/۰۰۶) با تداوم بالا (۱۷۲ روز) در سال ۱۳۹۲ اعلام شده است. در ایستگاه گلبلاغ نیز در سال ۱۳۹۲ خشکسالی با تداوم ۲۱۶ روزه در کمبود MCM ۰/۱۲۲ ثبت شده است. ایستگاه سورال نیز دارای شرایطی مشابه بوده و تعداد ۱۵۴ روز خشک در سال ۱۳۹۲ با کمبود MCM ۰/۰۰۴ را طی کرده است.

اما درخصوص ایستگاه شادی‌آباد، که دبی ارقام متمایز و متفاوت چشمگیری نداشته، ماکزیمم تداوم خشکسالی (۲۱۵ روز) با ماکزیمم کمبود خشکسالی (MCM ۰/۷۳) در سال ۱۳۹۳ رخ داده است. ایستگاه دلبران نیز دارای چنین خصوصیتی است. در این ایستگاه ماکزیمم تعداد روزهای

رودخانه قزل‌اوزن واقع در کردستان، از کوهستان‌های رودخانه‌تالوار واقع در قروه دهگلان سرچشمه گرفته و در نهایت به سد منجیل می‌رسد. در تحقیق حاضر، آنالیز تأثیرات احداث سه سد سورال، سنگ‌سیاه و گلبلاغ بر جریان رودخانه و خشکسالی هیدرولوژیک انجام گرفته است. شبیه‌سازی در محیطی پویا صورت گرفته و نتایج نشان داد مطابق روند جریان‌های خروجی از سدهای منطقه، زمانی که دبی رودخانه‌ها دارای مقادیری بدون تغییرات قابل ملاحظه جریان یابد، توالی خشکسالی بیشتر و کمبود کمتری از خشکسالی ثبت خواهد شد و در شرایطی که دبی از مقادیر بالاتری برخوردار بوده و تغییرات قابل ملاحظه‌ای در مقادیر حدی داشته باشد، کمبود خشکسالی دارای مقادیر بیشتر و تداوم کمتری از خشکسالی تجربه می‌گردد. چنین نتیجه می‌شود که در بررسی خشکسالی هیدرولوژیک ورود سدها و شبیه‌سازی مقادیر دبی خروجی، آنالیز روند تغییرات دبی تحت‌تأثیر احداث سازه‌های موجود در منطقه، به‌موازات بررسی تغییرات بارش اهمیت بالایی دارد. این امر در تحقیقات دیگر محققان (حامدی و پایمزد، ۲۰۲۳؛ چگنی علیشاهی و همکاران، ۲۰۱۳) نیز تأیید شده است.

در یک دید کلی، می‌توان اظهار داشت از آنجاکه از سال ۱۳۷۸ تا ۱۴۰۱، دبی مقادیر کمتری داشته است، روند تغییرات منحنی تداوم جریان متفاوت خواهد بود؛ به‌گونه‌ای که دبی در سطح شدید و بسیار شدید دارای ارقام بالاتری (در ابتدای

خشکسالی ۲۵٪ اعلام شده است. لذا پیشنهاد می‌گردد قبل از احداث هر نوع سازه برای تأمین تقاضا، شرایط هیدرولوژیک منطقه و آستانه تحمل نیز بررسی گردد. اولویت قرار گرفتن تأمین تقاضا، بدون توجه به شرایط منطقه منجر به ایجاد تنش و وقوع خشکسالی‌های مکرر با شدت بیشتر خواهد شد. تحت این شرایط، تأمین تقاضا حتی با مقداری قبل از احداث سازه، اجرایی نخواهد بود و استان‌های پایین‌دست نیز درگیر بحران‌هایی با سطح شدت حداکثر خواهند شد.

خشک، ۳۰۵ روز با مقدار ماکزیمم کمبود معادل ۰/۴۶ (MCM) در سال ۱۳۹۳ رخ داده است.

ازطرفی، ایستگاه‌های حسن‌خان و دهگلان که تحت‌تأثیر سدهای بالادست خود قرار دارند، قبل از سطح ۰/۷۵ به خشکسالی شدید رسیده و آن را تجربه نموده‌اند. ایستگاه دهگلان در سطح خشکسالی ۰/۲۲ و با رقم دبی MCM ۰/۳۲ و ایستگاه حسن‌خان در سطح ۰/۲۸ و دبی معادل MCM ۰/۲۲ خشکسالی را تجربه نموده‌اند. درنهایت نتایج نشان داد سطحی که منطقه قابلیت تحمل آن را دارد به‌طور متوسط سطح

## منابع

- Ahmadi, M., Paimozd, S., & Rahimi, M. (2021). Comparison of hydrological and meteorological drought monitoring using RDI and EDI indices. *Environ. Water Eng.*, 7(4), 683-696
- Alishahi Chegeni, M., Paimozd, Sh., & Rahimi, M. (2023). Dynamic Analysis of Hydrological Drought using Constant Threshold Method and Vensim Software. *Environ. Water Eng.*, 9(4), 467-484
- Alizadeh, A. (2014). *Principles of Applied Hydrology*. Imam Reza University. 942
- Edmund, T. (2011). Defining the Threshold Level of Hydrological Drought in Lake Catchments. *Limnological Review*, 11(2), 81-88
- Faraji, K., Paimozd, Sh., & Rahimi, M. (2023). dynamic simulation of generic archetype of upstream sefid rud basin and river inflow under influence of dams. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 53(12), 2839-2861
- Fleig, A. K., Tallaksen, L. M., Hisdal, H., & Demuth, S. (2006). A global evaluation of streamflow drought characteristics. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, 10(4), 535-552
- Ghodoosi, M., Morid, S., & Delavar, M. (2013). Comparison of de trending methods for the temperature and precipitations time series. *Journal of Agricultural Meteorology*, 1(2), 32-45
- Ghorbani, M., Mozayyan, M., & Zarei, H. (2019). Hydrological drought investigation of Armand River using low flows analysis. *J. Water Soil Conserv.*, 26(3), 247-263
- Hadiani, M. (2021). Hydrological drought intensity classification with SMMD30 index (Case study of snowy-icy flow regime rivers in Mazandaran province). *Journal of Renewable Natural Resources Research*, 12(2), 47-60.
- Hamedi, F., & Paimozd, Sh. (2023). *Dynamic Simulation of the Effect of Meteorological Drought on the Water Allocation in Kurdistan Province*. M.s. Thesis. Arak University
- Hashemi, S., & Bagheri, A. (2020). Integrated Assessment of South Khorasan Water Resources at a Strategic Level Using Goal Oriented Framework (GOF). *Iran-Water Resources Research*, 14(3), 15-30
- 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
- Jiriae Sharahi, H., & Paimozd, Sh. (2013). *Dynamic simulation downstream water supply index in Zanjan province under the influence of meteorological drought and construction of upstream dams*. M.s. Thesis. Arak University
- Karimi, M., Shahedi, K., & Khosravi, K. (2016). Investigation of meteorological and hydrological drought using drought indicators in the Gharezu watershed. *Earth Space Phys.*, 1(42), 159-170
- Martin, A., Velazquez, M. P., Sorribes, H., & Prats, A. G. (2020). System Dynamics Modeling for Supporting Drought-Oriented Management of the Jucar River System, Spain, *Water*, 12(5), 1407
- Mirakbari, M., Mortezaei, G., Mohseni, M., 2018. Investigation Of Effect Meteorological Drought On Surface And Ground Water Resources By Indices SPI, SPEI, SDI and GRI. *Iran-Watershed Management Science & Engineering*, 12 (42), 70-80
- Mishra, A. K., & Singh, V. P. (2010). A review of drought concepts. *Journal of Hydrology*, 391, 202-216
- Paimozd, S. (2021). Simulating surface water allocation and identifying systemic archetype using vensim software: A case study of Qorveh Dehgolan's basin. *Desert Ecosyst. Eng. J.*, 10(31), 123-141
- Paimozd, Sh., Morid, S., Bagheri, A. & Torabi, S. (2011). *Inter State water allocation in common basin, using a system dynamics approach: A case study in the Qezel ozan basin*. Ph.D. Thesis. Tarbiat Modares University.

20. Richmond, B. (1993). Systems thinking: critical thinking skills for the 1990s and beyond. *System dynamics review*, 9(2), 113-133
21. Salajegheh, A., Mesbah zade, T., Soleimani sardoo, F., & Alipour, N. (2017). Assessment of hydrological drought using constant threshold level method (Case Study: karaj Dam Basin). *Iran-Watershed Manag. Sci. Eng.*, 11(39), 89-99
22. Soleimani Motlagh, M., Talebi, M., & Zareei, M. (2015). The Study of Drought on the Quality of Surface Water Resources in Kashkan Watershed. *Journal of Watershed Management Research*, 6(12), 154-165
23. Sterman, J. D. (1994). Learning in and about complex systems. *System Dynamics Review*, 10(2-3), 291-330
24. Teimoori, M., Mirdamadi, S. M., Hosseini, S. J. (2018). Modeling of Climate Change Effects Management (Case study: Golak Dam). *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 44(1), 74-87
25. *Water resources balance updating studies*. (2011). ran Water Resources Studies Company
26. Xing, L., Xue, M., & Hu, M. (2019). Dynamic simulation and assessment of the coupling coordination degree of the economy-resource-environment system: Case of Wuhan City in China. *Journal of Environmental Management*, 230, 474-487

## Dynamic Simulation of Drought Tolerance in Demand-Driven Management Basins

Shahla Paimozd,<sup>1\*</sup> Fatemeh Hamedi<sup>2</sup>

Received: 19/06/2024

Accepted: 28/09/2024

### Extended Abstract

**Introduction:** Surface water scarcity and overexploitation of water have brought about a serious crisis in the contemporary age. Therefore, if the factors contributing to such a crisis remain unexplored and proper management is not implemented, water resource systems will face more severe problems. On the other hand, as complex systems possess their own specific elements, their analysis requires a kind of simulation that interconnects all components and phenomena within and outside the system using a specific boundary, helping to obtain more realistic results. Moreover, unlike linear thinking, the variables of a system are governed by causal relationships in dynamic thinking, indicating that changing one componential element of the system affects other components. However, the review of the related literature reveals that the majority of studies already conducted on drought have applied a linear perspective, and only a few studies have followed a dynamic approach. Moreover, it could be argued that no study has investigated the influence of long-term hydrological droughts on water resource systems with hydraulic structures on a daily scale. Therefore, when dams are constructed on water currents, it is necessary to investigate and simulate hydrological drought and the consequent changes made in downstream. This study used a dynamic perspective to simulate hydrological drought from 1991 to 2022 in the Qhorveh Dehgolan watershed in Kurdistan, Iran, on a daily basis, using the Vensim software.

**Materials and Methods:** The study area included the Qhorveh Dehgolan sub-basins in Kurdistan province. The study simulated the daily dam outflow and the hydrological drought using the data regarding the river flow statistics, crop types, cultivated area, cropping patterns, irrigation requirements, precipitation, and hydrograph network from 1991 to 2022. As one of the most commonly used methods for analyzing hydrological droughts, the sequence theory, which was also applied in the current study, determines the drought index threshold, according to which the daily flow rates below the specified threshold indicate the occurrence of drought. However, there are instances where, for a short period, the flow rate exceeds the threshold level, leading to the classification of the drought period into smaller, dependent droughts. The problem mostly occurs in studies

1. Assistant Professor, Department of Water Engineering, College of Agriculture and Environment, Arak University, Arak, Iran; Email: s-paimozd@araku.ac.ir

2. M.Sc Graduate of Water Engineering, Department of Water Engineering, College of Agriculture and Environment, Arak University, Arak, Iran

carried out on a daily basis, where small droughts with shorter durations are also counted as severe droughts. The problem can be solved by aggregating such small droughts. As the Internal Criterion method exhibits greater accuracy than other similar approaches used for aggregating small droughts, the current study used both sequence theory and the Internal Criterion method. The primary advantage of the current research model lies in its multidimensionality, obviating the need to separately obtain the feedback and variables for all stations. This characteristic allows for the introduction of equations, feedback, and all variables for a single station without necessitating the expansion of equations and other factors to accommodate multiple stations. Another advantage of the model is that it uses feedback mechanisms to determine the drought tolerance level at each station, indicating that the model initially calculates sequences and volumes at various drought levels using the data collected from stream gauging stations. Then, through feedback loops to flow-dependent variables at each station, the model adjusts the relevant figures within permissible limits to ensure that flow rates approach the minimum flow over the statistical period without reaching zero. Accordingly, based on a long-term time series of flow rates for each station and the related dependent variables, the drought tolerance level for each station was determined, considering the fact that drought conditions at any given station do not necessarily conform to a specific level.

**Results:** While the precipitation trend was not decreasing throughout the study period, drought has significantly increased in terms of frequency and intensity during certain years. The precipitation trend in the region indicated an increase in the 1999–2001 period, concurrently accompanied by severe drought conditions, substantiating that an external factor has brought about such drought. The construction of dams and the declining outflow volumes in proportion to the entire period have affected both the slope of the flow duration curve and the drought conditions. Therefore, on a daily scale, the flow rate and its variations determine the intensity and severity of drought events. Accordingly, when flow rates are similar, droughts occur over longer durations in less severe intensity, whereas sudden changes in flow rates result in droughts with shorter durations but greater severity. For instance, at Sang Siah station, the minimum drought intensity (0.0006 MCM) with a long duration (172 days) was recorded in 2013. Similarly, at Gol Bolagh station, a drought lasting 216 days with an intensity of 0.122 MCM was recorded in 2013. However, at Shadi Abad station, which did not exhibit significantly distinct or varying flow rates, the maximum drought duration (215 days) coincided with the maximum drought intensity (0.73 MCM) in 2014. The same was true for Delbaran station, where the maximum number of dry days was recorded in 2014 (305 days), with a corresponding maximum intensity being 0.46 MCM.

**Discussion and Conclusion:** This study carried out simulations in a dynamic environment, finding that according to the dam outflow rates when river flows exhibited minimal fluctuations, droughts were characterized by higher frequencies and less severe intensity. On the other hand, when flows were higher with significant variations in peak values, drought showed greater intensity and lasted for shorter periods. It can be concluded that analyzing the trend of changes made in the flow rate as a result of constructs built in the region and investigating the precipitation variations are required for investigating hydrological droughts that may occur over the dams' inflow rates and simulating the discharge rates. This is consistent with the results found in some other studies (Hamedi and Paimozd, 2023; Alishahi Chegeni et al., 2023). The similarity of the behavior of the stations near the newly constructed dams was also notable. The Sural, Sang Siah, and Gol Bolag dams were constructed and filled in the region in 2011 and 2013, respectively, coinciding with the recorded drought events, which also resulted in rivalry over water harvesting and the development of farmlands. Hassan Khan and Dehgolan stations recorded completely different flow duration curves throughout the period. Therefore, severe and very severe drought levels in these stations will have a lower threshold compared to other stations. In this study, a simulation was designed to calculate the tolerable drought level of the station, which was achieved by employing feedback loops and flow duration curves to assess the severity of drought conditions, particularly when flow rates were low and severe drought events occurred at levels beyond those officially declared. Hassan Khan and Dehgolan stations, which were under the influence of their upstream dams, showed severe droughts in lower values than the declared average drought tolerance threshold of 25%.

**Keywords:** Demand, Drought, Drought Tolerance Threshold, Simulation.