



دانشگاه گورگان
فصلنامه علمی و پژوهشی

نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک
جلد بیست و ششم، شماره سوم، ۱۳۹۸
۲۴۷-۲۶۳

<http://jwsc.gau.ac.ir>

DOI: 10.22069/jwsc.2019.15189.3037

بررسی خشک‌سالی هیدرولوژیک رودخانه ارمند با استفاده از تجزیه و تحلیل جریان‌های کم‌آبی

مریم قربانی^۱، *ملیحه مزین^۲ و حیدر زارعی^۳

^۱دانش‌آموخته کارشناسی ارشد گروه مرتع و آبخیزداری، دانشگاه صنعتی خاتم‌الانبیاء بهبهان، آستادیار گروه مرتع و آبخیزداری،

دانشگاه صنعتی خاتم‌الانبیاء بهبهان، آستادیار گروه هیدرولوژی، دانشگاه شهید چمران اهواز

تاریخ دریافت: ۹۷/۰۳/۲۰؛ تاریخ پذیرش: ۹۷/۰۱/۲۶

چکیده

سابقه و هدف: پایش و ارزیابی خشک‌سالی هیدرولوژیک به دلیل وقوع مکرر آن در حوضه‌های مختلف آبریز در ایران و به‌منظور پیشگیری و مدیریت بحران ناشی از آن به یک ضرورت بدل شده است. در اغلب مطالعات انجام گرفته از شاخص‌های خشک‌سالی به‌منظور بررسی آن استفاده شده است. شاخص‌های خشک‌سالی مانند شاخص خشک‌سالی رودخانه‌ای (SDI)، با استفاده از محاسبات آماری بر داده‌های جریان رودخانه در نهایت منجر به یک عدد می‌گردد که توانایی بررسی و تحلیل کامل خشک‌سالی در منطقه مورد مطالعه را ندارد. جریان کم‌آبی یا جریان‌های حداقل رودخانه‌ای (Low Flow) از مهم‌ترین شاخص‌های خشک‌سالی هستند که با استفاده از معیارهای مختلف آن می‌توان به شناخت جامعی از وضعیت خشک‌سالی هیدرولوژیک در منطقه دست پیدا کرد. در اغلب مطالعات انجام شده از ویژگی‌های کمبود یا تحلیل فراوانی جریان کم‌آبی استفاده شده است. استفاده از شاخص‌های مختلف جریان کم‌آبی به‌منظور شناخت جنبه‌های مختلف خشک‌سالی و مدیریت آن در رودخانه‌ها ضروری به نظر می‌رسد. لذا هدف این تحقیق مطالعه و تحلیل جامع خشک‌سالی هیدرولوژیک رودخانه ارمند با استفاده از تمامی شاخص‌های جریان کم‌آبی شامل شاخص‌های منحنی تداوم جریان، ویژگی‌های کمبود، تحلیل فراوانی جریان کم‌آبی و شاخص جریان پایه است که با استفاده از آن‌ها می‌توان مشخصاتی همچون دوره‌های خشک و تر، مقدار جریان در زمان خشک‌سالی، آستانه خشک‌سالی، طول مدت خشک‌سالی، حجم و شدت کمبود جریان و فراوانی وقوع جریان‌های کم را تعیین نمود. همچنین در این مطالعه مقدار جریان زیست‌محیطی رودخانه محاسبه و مورد تحلیل قرار گرفت.

مواد و روش‌ها: حوضه آبریز رودخانه ارمند با مساحت ۹۹۶۱ کیلومترمربع واقع در استان چهارمحال و بختیاری به‌عنوان منطقه مورد مطالعه انتخاب و از آمار روزانه جریان مربوط به ایستگاه آب‌سنجی ارمند از سال ۱۳۳۶ تا ۱۳۹۲ استفاده گردید. ابتدا با ترسیم منحنی تداوم جریان، سه شاخص کم‌آبی Q_{70} ، Q_{90} و Q_{95} همچنین، وضعیت رودخانه شامل دوره‌های ترسالی، نرمال و خشک‌سالی تعیین گردید. سپس، حداقل جریان زیست‌محیطی رودخانه بر اساس دو شاخص Q_{75} و Q_{90} همچنین خصوصیات کمبود با استفاده از حد آستانه Q_{70} محاسبه شد. به‌منظور برآورد دوره

* مسئول مکاتبه: mmozayyan80@yahoo.com

بازگشت سری کم‌آبی (AM7)، تابع توزیع گامای دوپارامتری مناسب تشخیص داده شد. در نهایت شاخص جریان پایه با روش خودکار فیلتر عددی بازگشتی در مقیاس‌های زمانی مختلف محاسبه گردید.

یافته‌ها: بر اساس نتایج، رودخانه ارمند طی ۲۸، ۲۲ و ۱۴ سال (از ۵۷ سال دوره آماری) به ترتیب دارای جریان کم‌تر از Q_{70} ، Q_{90} و Q_{95} (۴۵، ۳۲ و $27 \text{ m}^3/\text{s}$) است. با توجه به شیب ملایم منحنی تداوم جریان حوضه، همچنین مقدار بالای شاخص BFI (۰/۹۵) مشخص شد که آب‌های زیرزمینی مشارکت بالایی در جریان رودخانه دارند. دوره خشک در این رودخانه از زمانی آغاز می‌شود که جریان به کم‌تر از ۴۵ مترمکعب بر ثانیه (آستانه Q_{70}) برسد. نتایج نشان داد که حجم و شدت کمبود طی ۵۰ سال اخیر افزایش یافته است. بر اساس تحلیل فراوانی جریان کم، در دوره بازگشت‌های ۲، ۵، ۱۰، ۲۰، ۵۰ و ۱۰۰ سال، جریان کم‌آبی به ترتیب برابر با ۳۴/۲۶، ۲۶/۸، ۲۳، ۲۱، ۱۹/۱ و ۱۷ مترمکعب بر ثانیه است. مقایسه مقادیر مذکور با حداقل جریان زیست‌محیطی نشان داد که جریان رودخانه به‌طور متوسط هر دو سال یکبار از حداقل جریان زیست‌محیطی خود کم‌تر می‌شود.

نتیجه‌گیری: علی‌رغم وجود جریان پایدار در رودخانه ارمند (به دلیل رژیم برفی-بارانی منطقه، توانایی بالای حوضه در ذخیره آب و تخلیه آن در فصل خشک) دوره‌های خشک با شدت‌های متفاوت طی ۵۷ سال گذشته به وقوع پیوسته است. همچنین شدت خشک‌سالی با توجه به افزایش حجم کمبود جریان طی سال‌های اخیر، افزایش یافته است و در صورت ادامه این روند، در آینده شدت و فراوانی وقوع خشک‌سالی بیشتر و جریان کلی رودخانه کاهش خواهد یافت.

واژه‌های کلیدی: جریان کم‌آبی، حداقل جریان زیست‌محیطی، خصوصیات کمبود، رودخانه ارمند، منحنی تداوم جریان

مقدمه

زیرزمینی تقسیم می‌شود. خشک‌سالی‌های رودخانه‌ای دوره‌هایی هستند که دبی رودخانه برای تأمین نیازهای برنامه‌ریزی‌شده، تحت نظام مدیریتی موجود کافی نیست (۱۶). مطالعات متعدد پیرامون خشک‌سالی هیدرولوژیک در رودخانه‌های مناطق مختلف در ایران شواهدی مبنی بر وقوع خشک‌سالی در رودخانه را نشان می‌دهند (۷ و ۱۲). بررسی‌های آگاولا و همکاران (۲۰۰۱) نشان داد که در ایران و کشورهای جنوب شرق آسیا از سال ۱۹۹۹ تا ۲۰۰۱ میلادی، به مدت سه سال خشک‌سالی شدیدی رخ داده است (۱). بروز این خشک‌سالی سه‌ساله، ۱۰ استان از ۲۸ استان ایران را تحت تأثیر قرار داد و بیش از ۳۷ میلیون نفر از جمعیت کشور را با بحران کمبود آب و مواد غذایی مواجه کرد

افزایش مصرف آب رودخانه‌ها به علت رشد و پیشرفت جمعیت همواره در تعارض با آب مورد نیاز برای ادامه حیات اکوسیستم‌های مختلف آبی، گیاهی و جانوری است. این موضوع در اقصی نقاط جهان خصوصاً در کشورهای در حال توسعه از جمله ایران با وسعت و شدت بیشتری نمایان است. خشک‌سالی هیدرولوژیک از طریق کاهش میزان ذخیره آب دریاچه‌ها، پایین رفتن سطوح آب‌های زیرزمینی و کاهش دبی جریان رودخانه‌ای تشخیص داده می‌شود و معمولاً بر منطقه وسیعی تأثیر می‌گذارد (۱۹). خشک‌سالی هیدرولوژیک به نوبه خود به دو دسته خشک‌سالی در جریان رودخانه (جریان حداقل) و خشک‌سالی آب‌های

و باعث شد که ذخایر آبی ایران در جولای ۲۰۰۱ (تیرماه ۱۳۸۰) به مقدار ۴۵٪ افت پیدا کند (۱). این مطالعه و مطالعات مشابه آن، همگی بیانگر وقوع خشک‌سالی‌های دوره‌ای در ایران و اهمیت مطالعه و پایش آن است. یکی از مهم‌ترین شاخص‌های مطالعه خشک‌سالی هیدرولوژیک، جریان‌های حداقل یا جریان‌های کم رودخانه‌ای است. در واژه‌نامه فرهنگ بین‌المللی هیدرولوژی، جریان کم‌آبی را به‌عنوان جریان رودخانه در طول آب‌وهوای خشک طولانی مدت تعریف می‌کنند (۲۸). تعریف عمومی‌تر، کم‌ترین جریان متوسط در چند روز پیاپی مانند ۵، ۷، ۳۰، ... و ۱۸۰ روزه در طول یک سال است. علت محاسبه جریان کم‌آبی برای روزهای پیاپی به حداقل رساندن اثر تغییرها و نوسان‌های جریان است (۳، ۱۹ و ۲۸). بررسی رژیم و ویژگی‌های جریان‌های کم‌آبی منابع آب یک منطقه از جنبه‌های برنامه‌ریزی، طراحی، ساخت، نگهداری، استفاده و مدیریت مربوط به ساختارها و دستگاه‌های مختلف مدیریتی دارای اهمیت حیاتی است (۳۵). جریان‌های کم‌آبی شدید، می‌توانند باعث محدودیت‌هایی در تولید نیروی برق-آبی، خنک‌سازی پروسه سنتی تولید انرژی، صنعت، کشتیرانی، کشاورزی و ... شوند. بر اساس نظریه میزر و همکاران (۲۰۰۸) وضعیت جریان‌های کم‌آبی، یکی از فاکتورهای مهم محدودکننده در بهره‌برداری از منابع آب است (۲۴). شاخص‌های جریان کم‌آبی متعددی به‌منظور تحلیل خشک‌سالی هیدرولوژیکی رودخانه استفاده می‌شوند (۲۴). این شاخص‌ها شامل شاخص‌های کم‌آبی منحنی تداوم جریان، ویژگی‌های کمبود، تحلیل فراوانی جریان کم‌آبی و شاخص جریان پایه می‌باشند (۳۴ و ۴۰). کریمی و همکاران (۲۰۱۵) با روش حد آستانه ثابت به بررسی خشک‌سالی هیدرولوژیکی حوضه آبریز کرخه پرداختند و دریافتند که حجم کمبود و بیش‌ترین تداوم خشک‌سالی در حد آستانه ۷۰ و ۸۰ درصد در بیش‌تر ایستگاه‌ها بعد از سال

۱۳۷۷ رخ داده است (۲۰). در پژوهش اسلامی و شکوهی (۲۰۱۳) دو رودخانه دائمی استان خراسان رضوی و البرز، با استفاده از دو شاخص^۱ (SDI) و شاخص مبتنی بر منحنی تداوم جریان^۲ (FDCl) مورد تحلیل خشک‌سالی قرار گرفت (۱۸). کارایی دو شاخص مذکور در تشخیص خشک‌سالی با وضعیت‌های شدید و بسیار شدید و همبستگی معنی‌دار بین مقادیر شاخص SDI با مقادیر شاخص FDCl، گویای نزدیکی و مشابهت نتایج این دو شاخص در تشخیص و تحلیل وقوع خشک‌سالی هیدرولوژیکی است. در پژوهش‌های پندی و همکاران (۲۰۰۸) جهت تحلیل خشک‌سالی جریان در رودخانه بتوا در هندوستان شاخصی مربوط به حجم کمبود و تداوم نسبی جریان ارائه کردند (۲۷). نتایج آن‌ها نشان داد که خشک‌سالی ماه‌های اوت تا نوامبر شدیدتر از سایر ماه‌ها هستند. در سال (۲۰۰۸) نیز ماریچیچ و مجاسکوویسی به بررسی جریان حداقل رودخانه در پایین‌دست رودخانه دراوا پرداختند (۲۵). در این پژوهش از داده‌های دبی روزانه طی دوره آماری ۱۹۸۰ تا ۲۰۰۷ استفاده شد، سپس با استفاده از روش آستانه Q₉₅ پارامترهای خشک‌سالی مانند حجم کمبود، تداوم جریان، حداکثر حجم کمبود، حداکثر تداوم جریان استخراج گردید. نتایج نشان داد که توزیع پیرسون در سطح اطمینان ۹۵٪ بهترین برازش را با داده‌های جریان حداقل دارد. در اغلب مطالعات انجام شده به‌منظور تعیین وضعیت خشک‌سالی هیدرولوژیک رودخانه معمولاً از ویژگی‌های کمبود و یا تحلیل فراوانی جریان کم‌آبی استفاده شده است؛ این در حالی است که هر یک، فقط جنبه خاصی از خشک‌سالی را نشان می‌دهند. بنابراین هدف این پژوهش مطالعه و تحلیل جامع خشک‌سالی هیدرولوژیک رودخانه ارمند با استفاده از تمامی شاخص‌های جریان کم‌آبی شامل

1- Stream flow Drought Index

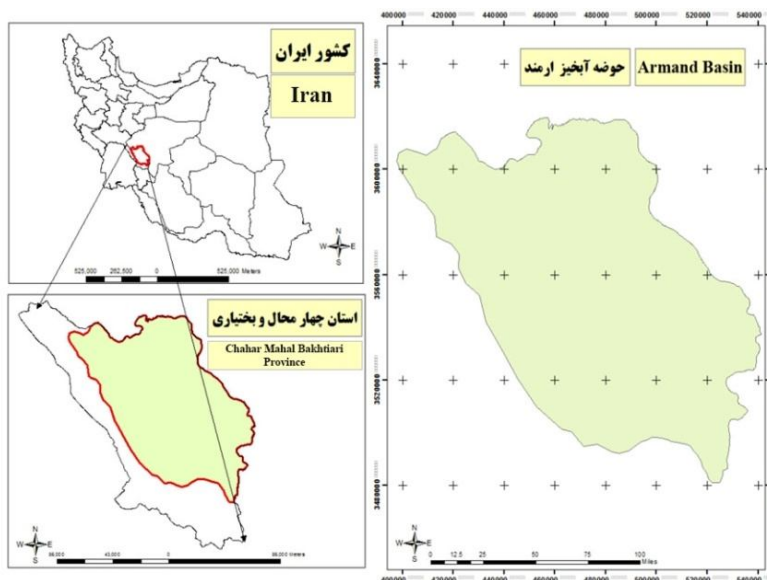
2- flow Drought curve Index

بختیاری در محدوده طول جغرافیایی ۴۹ درجه و ۳۴ دقیقه تا ۵۱ درجه و ۴۷ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۱ درجه و ۱۸ دقیقه تا ۳۲ درجه و ۴۰ دقیقه شمالی قرار دارد (شکل ۱) (۳۰). حوضه آبریز رودخانه ارمند با مساحت ۹۹۶۱ کیلومترمربع و با متوسط آبدهی سالانه حدود ۱۰۰ مترمکعب در ثانیه، به‌عنوان اصلی‌ترین پتانسیل آبی استان مطرح است. زمستان پر بارش‌ترین فصل سال و پس از آن فصل‌های پاییز و بهار می‌باشد، تابستان اغلب فصل کاملاً خشک این منطقه است. رژیم بارندگی حوضه برفی-بارانی و متوسط بارش سالانه ایستگاه ارمند بالغ بر ۶۰۰ میلی‌متر و ارتفاع متوسط حوضه ۱۰۳۹ متر از سطح آزاد دریا است (۳۰). همچنین متوسط دمای منطقه بر اساس آمار ایستگاه‌های هواشناسی بهشت‌آباد (۱۳۶۱-۱۳۹۲) و منج (۱۳۴۹-۱۳۹۲)، ۲۰/۸۱ درجه سانتی‌گراد است (۳۰).

شاخص‌های منحنی تداوم جریان، ویژگی‌های کمبود، تحلیل فراوانی جریان کم‌آبی و شاخص جریان پایه است تا بتوان به تصویری واضح از خشک‌سالی هیدرولوژیک رودخانه دست یافت و مشخصاتی هم‌چون دوره‌های خشک و تر، مقدار جریان رودخانه در زمان خشک‌سالی، آستانه خشک‌سالی، طول مدت خشک‌سالی، فراوانی وقوع جریان‌های کم، حجم و شدت کمبود جریان را مشخص نمود. همچنین در این مطالعه مقدار جریان زیست‌محیطی رودخانه محاسبه و مورد تحلیل قرار گرفت. آگاهی از وضعیت جریان رودخانه در فصول خشک سال، برای تعیین میزان و نوع بهره‌برداری از جریان رودخانه ضمن حفظ شرایط اکولوژیکی و زیست‌محیطی آن، همچنین به‌منظور جلوگیری از وقوع خشک‌سالی در آینده امری ضروری به‌حساب می‌آید.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه: رودخانه ارمند یکی از مهم‌ترین سرشاخه‌های رودخانه کارون در استان چهارمحال و



شکل ۱- منطقه مورد مطالعه، حوضه آبریز ارمند.

Figure 1. The location of the study area, Armand Basin.

باید سری جریان کم‌آبی را تعیین نمود (۴، ۱۰، ۱۴، ۳۷، ۳۸ و ۳۹). این سری سالانه با میانگین مقدار جریان در فاصله زمانی ۷ روز در سال و کم‌ترین این مقدار در هر سال به‌دست می‌آید (سری AM7^۲). متداول‌ترین توزیع‌های احتمال مورد استفاده جهت تعیین دوره بازگشت جریان‌های حداقل، توزیع نرمال، لوگ‌نرمال دوپارامتری، لوگ‌نرمال سه‌پارامتری، گامای دوپارامتری، پیرسون نوع سه و گامبل است (۳۴). منظور از برازش یک توزیع احتمالاتی، یافتن بهترین تخمین پارامترهای آن توزیع است. روش‌های متعددی جهت یافتن پارامترهای یک توزیع ارائه شده است که در این میان، روش گشتاورها^۳ و روش حداکثر درست‌نمایی^۴ مرسوم‌تر است (۵). انتخاب توزیع مناسب، براساس آزمون نیکویی برازش مربع کای و محاسبه مقدار خطا است. در این مطالعه، جریان کم‌آبی با احتمال وقوع‌های ۵۰٪، ۹۰٪، ۹۵٪ و ۹۹٪ (به‌ترتیب) مناظر با دوره بازگشت‌های ۲، ۱۰، ۲۰ و ۱۰۰ سال به‌دست آمد.

کمبود جریان^۵: کمبود جریان به دوره‌هایی گفته می‌شود که جریان در رودخانه به پایین‌تر از یک حد معین می‌رسد که در این صورت یک خشکی یا یک واقعه کمبود شکل می‌گیرد (۱۵). دو روش اصلی برای انتخاب و توصیف خصوصیات کمبود وجود دارد؛ روش سطح آستانه^۶ و الگوریتم اوج‌های^۷ متوالی (۳۴). در این مطالعه از روش سطح آستانه استفاده شد. یک run در مفهوم کم‌آبی، تعداد روزهایی است که آبدهی روزانه به کم‌تر از یک حد آستانه معین می‌رسد. برای مطالعاتی که بر مبنای داده‌های روزانه هستند، درصدی از منحنی تداوم جریان را می‌توان به‌عنوان حد آستانه در نظر گرفت. در رودخانه‌های دائمی اغلب، آستانه‌های

از لحاظ سنگ‌شناسی ارتفاعات این حوضه از تشکیلات آهکی مربوط به دوره کرتاسه تشکیل شده است. به‌علت وضعیت اقلیمی مناسب و ریزش‌های جوی نسبتاً زیاد منطقه، وضعیت پوشش گیاهی مناسب بوده و عمدتاً شامل مراتع استپی و جنگل‌های نیمه‌مترکم است (۳۰). مجموع عوامل مذکور باعث ایجاد سفره‌های گسترده آب زیرزمینی در این منطقه شده است (۳۱). در این مطالعه از آمار روزانه جریان مربوط به ایستگاه آب‌سنجی ارمند از سال ۱۳۳۶ تا ۱۳۹۲ استفاده گردید.

روش تحقیق

شاخص‌های مستخرج از منحنی تداوم جریان: منحنی تداوم جریان^۱ (FDC) نمودار دبی جریان رودخانه در برابر فراوانی تجاوز آن است. با اعمال میانگین متحرک هفت‌روزه بر داده‌های روزانه جریان، منحنی تداوم جریان برای کل دوره آماری ۱۳۳۶-۱۳۹۲ ترسیم شد (۴۰). بخشی از منحنی تداوم جریان در شرایط خشک و حداقل شامل شاخص‌های Q₇₀ تا Q₉₉ است. منظور از شاخص Q₇₀ و Q₉₉ جریانی است که به‌ترتیب در بیش‌تر از ۷۰٪ تا ۹۹٪ مواقع اندازه‌گیری در رودخانه جریان دارد. دو شاخص Q₉₀ و Q₉₅ از پرکاربردترین شاخص‌های کم‌آبی به‌شمار می‌روند. انتخاب شاخص‌های جریان کم‌آبی بستگی بسیار زیادی به نوع رودخانه مورد مطالعه دارد (۴۰). همچنین، در این مطالعه از شاخص‌های مستخرج از منحنی تداوم جریان براساس سطوح مختلف آستانه، وضعیت هیدرولوژیکی ترسالی و خشک‌سالی در رودخانه تعیین گردید (۱۸).

تحلیل فراوانی جریان کم‌آبی: هدف اولیه تحلیل فراوانی جریان کم‌آبی، ارتباط دادن بزرگی وقایع حدی به فراوانی وقوع آن‌ها از طریق استفاده از توزیع‌های آماری است (۶). برای انجام تحلیل فراوانی کم‌آبی، ابتدا

1- Flow Duration Curve

- 2- Annual Minimum-7day
- 3- Method of Moment
- 4- Method of Maximum Likelihood
- 5- Stream flow Deficit
- 6- Threshold-Level methods
- 7- Sequent peak algorithm

شاخص جریان پایه^۵: در مطالعات مقدماتی جریان کم‌آبی، شاخص جریان پایه دارای اهمیت است. شاخص BFI ممکن است به شکل سالانه و یا برای کل دوره آماری به دست آید (۹ و ۱۳) در حوضه‌ای با سهم بالای آب زیرزمینی در جریان رودخانه، BFI نزدیک به ۱ است، در حوضه‌های نفوذناپذیر و رژیم جریان سریع، مقدار این شاخص از ۰/۱۵ تا ۰/۲ و برای جریان موقتی برابر با صفر است (۹، ۳۳ و ۴۰). محاسبات جریان پایه در این مطالعه با روش فیلتر عددی بازگشتی^۶ و با استفاده از نرم‌افزار Hydro office انجام گرفت. از مقایسه روش‌های مختلف جداسازی جریان پایه در مطالعات مختلف مشخص شد که روش فیلتر عددی بازگشتی، روشی مناسب برای جداسازی جریان پایه از جریان روزانه رودخانه‌ای است (۲۱، ۲۹ و ۴۱). روش مذکور که از جمله پرکاربردترین روش‌های جداسازی جریان پایه است، تحت تأثیر یک یا چند الگوریتم فیلتر تعریف شده عمل می‌کند. در این مطالعه الگوریتم فیلتر لاین و هولیک با ضریب ۰/۹۲۵ (BFLOW) مدنظر قرار گرفت.

$$q_t = \alpha q_{t-1} + \frac{(1+\alpha)}{2}(Q_t - Q_{t-1})$$

که در آن، $q_t \geq 0$ که رواناب مستقیم فیلترشده در گام زمانی t بر حسب مترمکعب بر ثانیه، q_{t-1} رواناب مستقیم فیلترشده در گام زمانی $t-1$ بر حسب مترمکعب بر ثانیه، α پارامتر فیلتر مرتبط با حوضه، Q_t جریان کل در مرحله زمانی t به مترمکعب بر ثانیه و Q_{t-1} جریان کل در گام زمانی $t-1$ به مترمکعب بر ثانیه است. در مطالعه ناتان و مک‌ماهان (۱۹۹۰) مشخص شد که جداسازی جریان پایه با پارامتر فیلتر ۰/۹۲۵ سریع و هدفمند است (۲۲ و ۲۶).

نسبتاً کم در محدوده Q_{70} تا Q_{95} استفاده می‌شود (۳۴ و ۴۰). در این مطالعه آستانه Q_{70} به مقدار ۴۵ مترمکعب بر ثانیه مدنظر قرار گرفت (۲). بر اساس سطح آستانه، کل سال به دو دوره خشک و تر تقسیم گردید. ۶ ماه از سال که در آن تعداد روزهای خشک بیش‌تر از سایر ماه‌ها باشد، به‌عنوان فصل خشک سال تعیین گردید. در نهایت پارامترهای مدت کمبود^۱، حجم یا سختی، شدت کمبود و کم‌ترین جریان در هر واقعه کمبود به‌عنوان خصوصیات کمبود، محاسبه گردید.

حداقل جریان زیست‌محیطی^۲: جریان زیست‌محیطی به جریان لازم برای اطمینان از زیستن موجودات آبی در زیستگاه رودخانه گفته می‌شود که ممکن است طیف وسیعی از جریان متوسط و بلندمدت و انواع وقایع جریان‌های کم تا حوادث مکرر سیلابی باشد (۸). روش‌های مختلفی برای تعیین نیاز آبی زیست‌محیطی وجود دارد (۲۳). در این مطالعه از روش تحلیل منحنی تداوم جریان^۳ FDCA استفاده گردید (۳۶). در این روش دبی جریان در سطح آستانه ۷۰٪ تا ۹۵٪ (Q_{70}) تا Q_{95} معادل حداقل جریان زیست‌محیطی در نظر گرفته می‌شود (۲۸ و ۳۶). در این مطالعه صدک‌های ۷۵ و ۹۰ استفاده شد. از منظر زیست‌محیطی اگر متوسط جریان از صدک ۹۰ پایین‌تر قرار گیرد به اکوسیستم رودخانه آسیب‌های جبران‌ناپذیری وارد خواهد شد. با توجه به قابلیت و کارایی منحنی تداوم جریان در پژوهش اسلامی و شکوهی در سال (۲۰۱۳)، شاخص^۴ (FDCI) را که دربرگیرنده هر دو جنبه خشک‌سالی هیدرولوژیکی و زیست‌محیطی بوده برای تحلیل کم‌آبی جریان رودخانه در سه منطقه ایران ارائه کردند (۱۸).

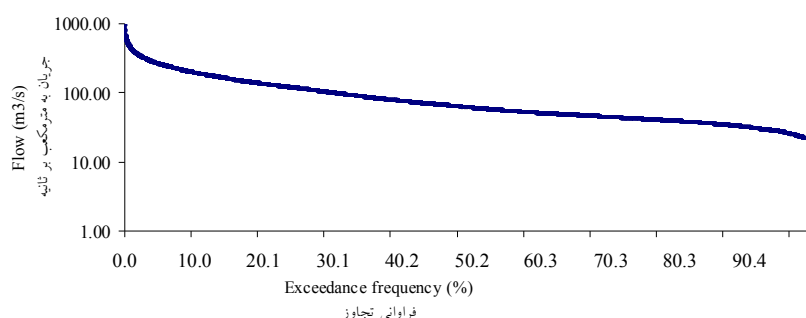
- 1- Deficit
- 2- Minimum Environmental flow
- 3- Flow Duration Curve Analysis
- 4- Flow Duration Curve Index

- 5- Base flow Index
- 6- Recursive Digital Filter

نتایج و بحث

سهم بالای جریان آبهای زیرزمینی با توجه به مقدار بالای شاخص BFI در این حوضه مورد تأیید است. حدود آستانه‌های مختلف جهت تعیین دوره‌های ترسالی و خشک‌سالی در رودخانه ارمند در جدول ۱ آمده است.

شاخص‌های منحنی تداوم جریان: در (شکل ۲) منحنی تداوم جریان حوضه ارمند را در یک نمودار نیمه‌لگاریتمی نمایش داده شده است؛ با توجه به شیب ملایم منحنی FDC در بخش‌های انتهایی، سهم آب‌های زیرزمینی نسبت به جریان سطحی به‌طور معمول قابل‌توجه است و جریان کم‌آبی پایدار می‌باشد (۳۴).



شکل ۲- منحنی تداوم جریان رودخانه ارمند، ۱۳۹۲-۱۳۳۶.

Figure 2. Flow duration curves of Armand River, 1957-2013.

جدول ۱- مقادیر جریان‌های Q_{95} و Q_{90} ، Q_{80} ، Q_{70} ، Q_{50} ، Q_{30} در دوره آماری ۱۳۳۶-۱۳۹۲ رودخانه ارمند.

Table 1. Flow values of Q_{30} ، Q_{50} ، Q_{70} ، Q_{80} ، Q_{90} and Q_{95} in the 1957-2013 period, Armand River.

Q_{95}	Q_{90}	Q_{80}	Q_{70}	Q_{50}	Q_{30}	شاخص Index
27	32	39	45	61.36	100.78	جریان (مترمکعب بر ثانیه) Stream flow (m^3/s)
خشک‌سالی شدید Severe drought	خشک‌سالی متوسط Moderate drought	خشک‌سالی خفیف Mild drought	ورود به دوره خشک‌سالی Beginning of the drought period	نرمال Normal	ترسالی Wet	وضعیت هیدرولوژیک Hydrologic status

بر اساس جدول ۱ خشک‌سالی در رودخانه‌ها از زمانی آغاز می‌شود که جریان به حد آستانه Q_{70} برسد. در سال‌های ۱۳۷۸ تا ۱۳۸۰ در دبی متناظر با سه شاخص مهم کم‌آبی Q_{70} ، Q_{90} و Q_{95} کاهش شدید رخ داده است، به‌صورتی‌که مقدار شاخص‌های مذکور در سال ۱۳۸۰ (به‌ترتیب برابر با $23/2$ ، $21/4$ و 21 مترمکعب بر ثانیه) نسبت به سال ۱۳۷۷ (سال قبل از شروع خشک‌سالی که مقدار شاخص‌ها به‌ترتیب

۴۳/۲، $40/5$ و 40 مترمکعب بر ثانیه بوده است)، بیش از ۵۰٪ افت نشان می‌دهد. این تغییر مقارن است با وقوع یک دوره سه‌ساله خشک‌سالی از ۱۹۹۹ تا ۲۰۰۱ که در ایران و کشورهای جنوب‌شرق آسیا رخ داد (۱). در پایان این دوره ذخایر آبی ایران در جولای ۲۰۰۱ (تیرماه ۱۳۸۰) به مقدار 45% افت پیدا کرد. در مطالعه حیسنی زارع و سعادت‌ی نیز (۲۰۰۲) خشک‌سالی در دوره ۱۳۷۷ تا ۱۳۸۰ در رودخانه کارون مورد تأیید و

جدول ۲ و تغییرات سالانه جریان در این سدک‌ها طی دوره آماری در شکل ۳ نشان داده شده است.

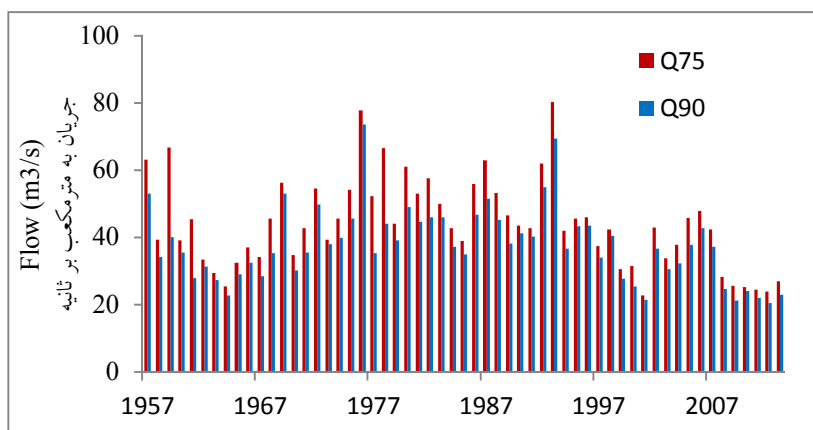
از جمله اثرات آن افزایش شوری آب به میزان ۱۵ الی ۲۱ درصد بیان شد (۱۷).

حداقل جریان زیست‌محیطی: حداقل جریان زیست‌محیطی رودخانه ارمند بر اساس سدک‌های ۷۵ و ۹۰ در

جدول ۲- شاخص‌های حداقل جریان زیست‌محیطی Q_{75} و Q_{90} .

Table 2. Indices of minimum environmental flow Q_{75} and Q_{90} .

Q_{90}	Q_{75}	شاخص Index
37.8	44.1	مقدار شاخص (m^3/s) Index value (m^3/s)
نسبتاً مناسب Fairly suitable	مناسب Suitable	شرایط زیست‌محیطی Environmental status



شکل ۳- تغییرات زمانی شاخص‌های Q_{75} و Q_{90} در دوره آماری ۱۳۳۶-۱۳۹۲.

Figure 3. Time series of Q_{75} and Q_{90} indices in the 1957-2013 period.

لحاظ زیست‌محیطی از سال ۱۳۷۸ به بعد در شرایط نامناسبی قرار دارد.

تحلیل فراوانی جریان کم‌آبی: به منظور تعیین دوره بازگشت سری جریان کم‌آبی (AM7) از توزیع‌های احتمالاتی مختلف استفاده گردید که نتایج مربوط به آن‌ها در جدول ۳ آمده است.

بر اساس آمار، رودخانه ارمند در ۴۲ سال از دوره آماری دارای جریان کم‌تر از Q_{75} (۴۴/۱ مترمکعب بر ثانیه) و ۳۷ سال نیز دارای جریانی کم‌تر از Q_{90} (۳۷/۸ مترمکعب بر ثانیه) بوده است. رودخانه در سال‌های ۱۳۷۸ تا ۱۳۹۲ به صورت متوالی و پی در پی در شرایطی پایین‌تر از شرایط نسبتاً مناسب قرار گرفته است که نشان‌دهنده این حقیقت است که رودخانه به

جدول ۳- توزیع احتمال انتخاب شده برای تحلیل فراوانی جریان کم آبی.

Table 3. Selected probability distribution for low flow frequency analysis.

Gumbel EVI		Pearson Type III		2Parameter Gama		3Log-Normal		2Log- Normal		Normal		توزیع Distribution
Ma	Mo	Ma	Mo	Ma	Mo	Ma	Mo	Ma	Mo	Ma	Mo	روش Method
3.96	3.96	3.35	3.96	3.26	3.26	-	2.56	2.56	2.56	3.61	3.61	مقدار مربع کای Chi-Squire value
3.85	4.28	5.6	3.81	3.22	3.24	-	3.42	3.60	3.60	3.63	3.63	خطای نسبی (%) Relative error (%)
22.21	28.82	20.56	19.95	19.29	<u>17.96</u>	-	19.84	21.52	21.52	36.14	36.14	مربع خطا (مترمکعب بر ثانیه) Square error (m ³ /s)

Ma = maximum likelihood, Mo = moment

(۲۰۱۴) نیز به منظور پیش بینی خشک سالی در رودخانه کارون، سری زمانی جریان حداقل ۷ روزه را استفاده و توزیع گامای دو پارامتری را به عنوان بهترین توزیع منطقه ای انتخاب کردند (۳۲).

بر مبنای دو معیار مربع کای و مقدار خطا، توزیع مناسب برای سری آماری جریان کم رودخانه ارمند، توزیع گامای دو پارامتری تعیین شد و بر همین اساس مقادیر جریان کم آبی در دوره بازگشت های مختلف به دست آمد (جدول ۴). شماعی زاده و سلطانی

جدول ۴- دوره بازگشت جریان کم آبی.

Table 4. Low flow Return Period.

100	50	20	10	5	2	دوره بازگشت (سال) Return period (Year)
17.05	19.12	21.06	23.06	26.8	34.26	جریان کم آبی (مترمکعب بر ثانیه) Low flow (m ³ /s)

متوسط هر دو سال یکبار جریان رودخانه از حداقل جریان زیست محیطی خود کم تر است. خصوصیات کمبود جریان: بر اساس آستانه Q₇₀، در حوضه مورد مطالعه، فصل خشک در شش ماه مرداد تا دی و فصل تر از بهمن ماه تا خردادماه به وقوع می پیوندد (جدول ۵).

بر اساس جدول ۴، با افزایش دوره بازگشت، مقدار جریان کاهش می یابد به طوری که در دوره بازگشت صد سال جریان رودخانه به ۱۷ m³/s می رسد که تقریباً معادل نصف جریان در دوره بازگشت دو سال است. همه جریان های کم آبی ذکر شده در بالا از جریان Q₇₅ (جریان زیست محیطی مناسب) و جریان Q₉₀ (جریان زیست محیطی نسبتاً مناسب) کم تر است. این امر نشان می دهد که به طور

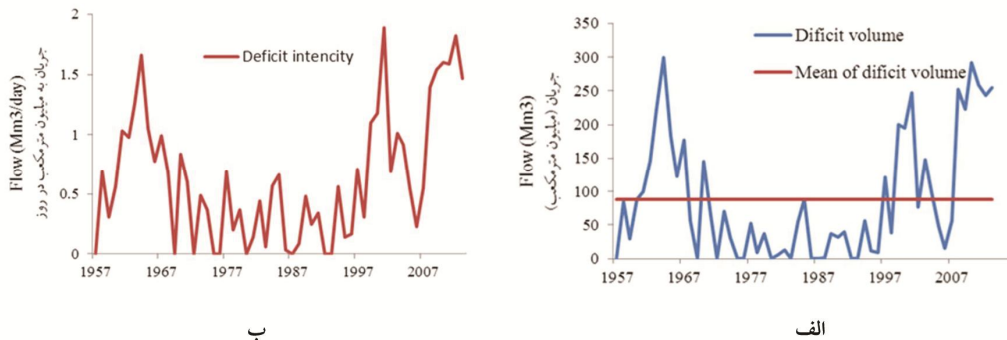
جدول ۵- تعداد روزهای با جریان کم تر از Q₇₀ (45 m³/s) در کل دوره آماری.

Table 5. Number of days with flow less than Q₇₀ (45 m³/s) over the entire statistical period.

اسفند	بهمن	دی	آذر	آبان	مهر	شهریور	مرداد	تیر	خرداد	اردیبهشت	فروردین	ماه
Mar	Feb	Jan	Dec	Nov	Oct	Sep	Aug	Jul	Jun	May	Apr	Month
41	362	495	677	1116	1311	1242	734	291	101	11	0	تعداد روز خشک Number of dry day

به حجم و شدت کمبود نشان می‌دهد که طی ۵۷ سال آمار مطالعه شده رودخانه ارمند، ۹ سال فاقد دوره خشک (کمبود جریان) بوده است که در این سال‌ها، هیچ روزی مقدار جریان به کم‌تر از ۴۵ مترمکعب بر ثانیه (Q_{70}) نرسیده است.

در فروردین‌ماه در کل دوره آماری به دلیل افزایش دما و ذوب برف، هیچ‌گونه کمبود جریانی مشاهده نشد. بیش‌ترین مدت‌زمان کمبود جریان در مهرماه و پس‌از آن شهریورماه و آبان‌ماه طی دوره آماری تعیین شد. که این امر حاصل کاهش حجم بارش و به‌تبع آن کاهش ذخایر رودخانه در تابستان و اوایل پاییز است. شکل ۴ مربوط



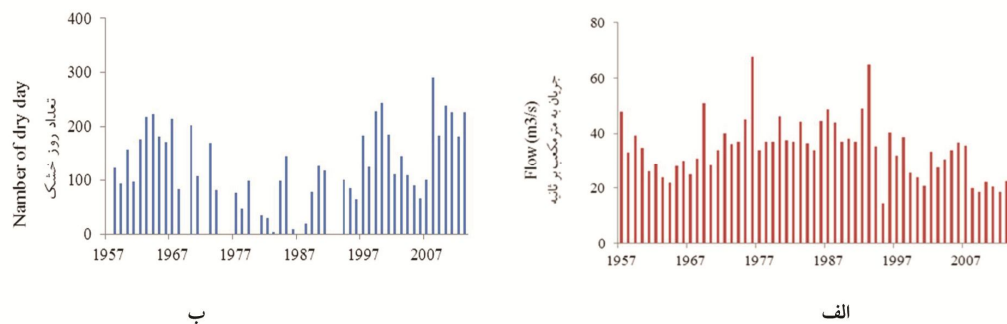
شکل ۴- الف) تغییرات حجم کمبود (میلیون مترمکعب) نسبت به متوسط آن و ب) تغییرات شدت کمبود (میلیون مترمکعب در روز) طی دوره آماری.

Figure 4. (a) Changes of deficit volume (million cubic meters) compared to its average and (b) Changes of deficit intensity (million cubic meters per day) during the statistical period.

در شکل ۴ قسمت الف نشان داده شده است در اغلب سال‌ها میزان حجم کمبود، در زیرخط میانگین قرار دارد. همچنین با توجه به شکل مذکور میزان کمبود در سال‌های اخیر افزایش و جریان کلی رودخانه کاهش یافته است.

بیش‌ترین حجم کمبود ۲۹۹/۶۳ میلیون مترمکعب در سال ۱۳۴۳ (به دلیل وجود یک دوره خشک‌سالی هیدرولوژیک از سال ۱۳۳۹ تا ۱۳۴۶) و کم‌ترین میزان حجم کمبود صفر و پس‌از آن ۰/۲۴ میلیون مترمکعب در سال ۱۳۶۲ است. متوسط حجم کمبود و شدت کمبود به ترتیب برابر با ۸۸/۴۲ میلیون مترمکعب و ۰/۹ میلیون مترمکعب در ثانیه به دست آمد. شدت کمبود در هر سال از حجم کمبود در آن سال تبعیت می‌کند. همان‌طور که

شکل ۵ الف و ب به ترتیب حداقل جریان در دوره خشک سال و تعداد روزهای خشک را طی دوره آماری نشان می‌دهد.

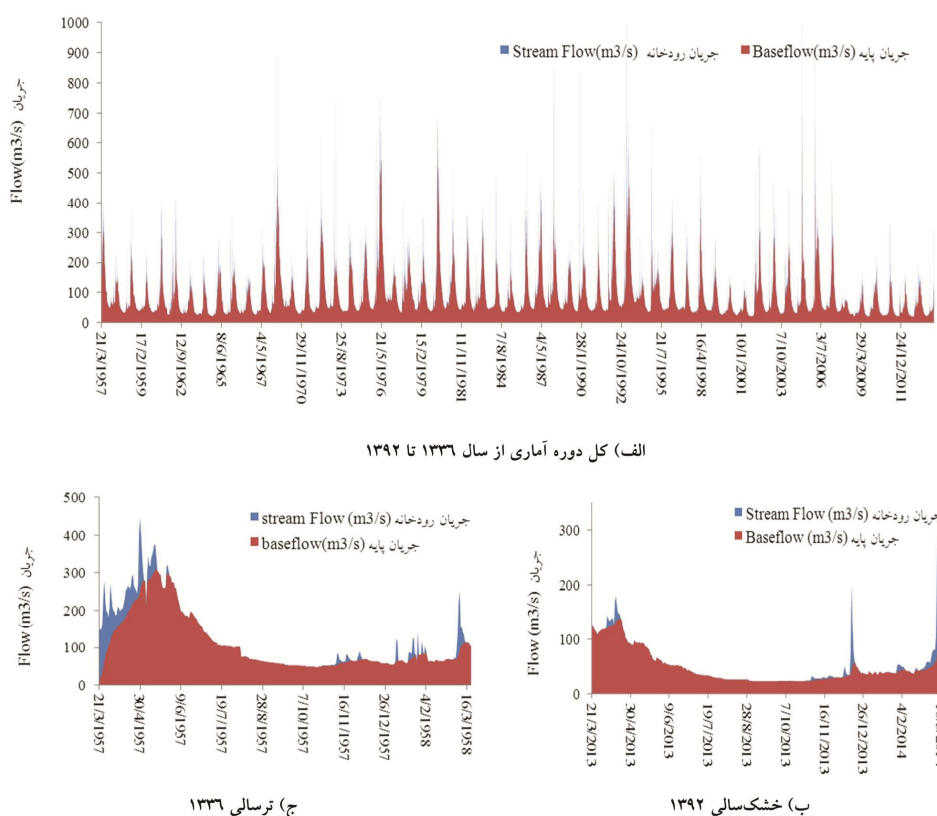


شکل ۵- الف) حداقل جریان سالانه در طی دوره آماری و ب) تعداد روزهای خشک در سال در طول دوره آماری.

Figure 5. (a) Minimum annual flow during the statistical period (b) The number of dry days per year during the statistical period.

است. با مقایسه مقدار حداقل جریان با دو شاخص Q_{90} و Q_{95} مشخص شد که تعداد سال‌های دارای جریان حداقل پایین‌تر از Q_{90} و Q_{95} به ترتیب ۲۳ و ۱۴ سال بوده است. شاخص جریان پایه: جداسازی جریان پایه از جریان رودخانه برای طول دوره آماری و یک سال تر و یک سال خشک ترسیم گردید (شکل ۶).

بیش‌ترین مدت خشکی در سال ۱۳۸۷ به مدت ۲۹۱ روز رخ داده است. این سال هم به لحاظ اقلیمی (مقدار بارش) و هم هیدرولوژیکی (حجم کمبود) سال خشکی به‌شمار می‌رود. کم‌ترین مدت خشکی در سال‌های برابر صفر است. براساس شکل ۵ (ب) کم‌ترین مقدار جریان در سال‌های ۱۳۸۸ و ۱۳۹۱ به میزان ۱۸/۶ مترمکعب بر ثانیه رخ داده است که به دلیل کمبود بارش در سال‌های مذکور



شکل ۶- جریان رودخانه و جریان پایه رودخانه ارمند در ایستگاه هیدرومتری ارمند الف) جریان برای کل دوره آماری، ب) خشک‌سالی در ۱۳۹۲ و ج) ترسالی در سال ۱۳۳۶.

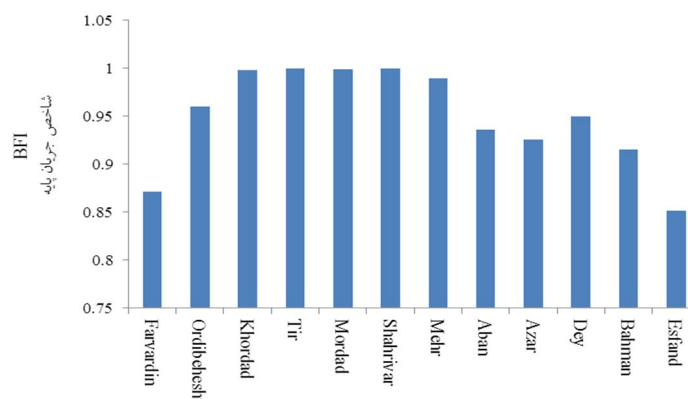
Figure 6. River flow and base flow of the Armand River at Armand Hydrometric Station; A) For all statistical period; b) Dry year in 2013; c) Wet year in 1957.

به‌طورکلی مقدار BFI در حوضه آبریز ارمند از ۰/۹۷ در ۶ ماهه خشک تا ۰/۸۸ در ۶ ماهه تر متغیر است. میانگین جریان پایه طی دوره آماری ۰/۹۵ است که بیانگر نفوذپذیری بالای حوضه و قدرت بالای ذخیره آب در آبخوان این حوضه و در نتیجه پایداری

رژیم رودخانه است. مقدار بالای BFI، تأییدکننده شیب ملایم منحنی تداوم جریان است و نشان‌دهنده سهم بالای آب‌های زیرزمینی در جریان رودخانه است. از مقایسه نمودار مربوط به سال خشک و تر در (شکل ۶) مشخص می‌شود که در هر دو حالت در اغلب ایام سال

می‌رسد. در ماه‌های زمستان و بهار که بارندگی‌ها به وقوع می‌پیوندند، رودخانه وابستگی کم‌تری به جریان آب زیرزمینی داشته و شاخص جریان پایه نسبتاً کاهش می‌یابد. قنبرپور و همکاران (۲۰۱۰) نیز در حوضه آبریز کارون شاخص جریان پایه را با استفاده از روش خودکار فیلتر عددی برگشتی با ضریب $0/925$ بین $0/79$ تا $0/88$ متغیر دانسته‌اند (۱۱).

جریان رودخانه از طریق جریان پایه تأمین می‌شود (به جز در اواخر اسفند و اوایل فروردین به‌ویژه در سال‌های تر، که منحنی جریان پایه اندکی پایین‌تر از منحنی جریان رودخانه قرار می‌گیرد و به دلیل ورود جریان‌های ناشی از ذوب برف و بارش باران به رودخانه است). تغییرات ماهانه شاخص جریان پایه در (شکل ۷) نشان می‌دهد که حداقل شاخص جریان پایه در اسفندماه به میزان $0/85$ و حداکثر آن در تیرماه به 1



شکل ۷- تغییرات ماهانه شاخص BFI.

Figure 7. The monthly change of the BFI index.

۱. پرکاربردترین شاخص‌های مورد استفاده در مطالعات کم‌آبی، سه شاخص استخراج‌شده از منحنی تداوم جریان شامل Q_{70} ، Q_{90} و Q_{95} است که در منطقه مورد مطالعه مقادیر آن‌ها به ترتیب ۴۵، ۳۲ و ۲۷ مترمکعب بر ثانیه است. شاخص Q_{70} در تعیین شروع دوره خشک‌سالی مدنظر قرار می‌گیرد. در صورتی که شاخص‌های Q_{90} و Q_{95} به ترتیب وضعیت خشک‌سالی شدید و بسیار شدید را در حوضه بیان می‌کنند. با مقایسه حداقل جریان سالانه با شاخص‌های مذکور مشخص شد که رودخانه ارمند در طی ۲۸ سال (از ۵۷ سال دوره آماری) دارای جریان کم‌تر از Q_{70} ، ۲۲ سال جریان کم‌تر از Q_{90} و ۱۴ سال نیز جریان کم‌تر از Q_{95} است. این شرایط آستانه هشدار برای مدیریت منابع آب و تعیین میزان حداقل و

نتیجه‌گیری کلی

بررسی و تحلیل نتایج شاخص‌های کم‌آبی مختلف در این پژوهش نشان می‌دهند که علی‌رغم وجود جریان پایدار در رودخانه ارمند (به دلیل رژیم برفی-بارانی منطقه، توانایی بالای حوضه در ذخیره آب و تخلیه آن در فصل خشک (۳۰)) دوره‌های خشک با شدت‌های متفاوت طی ۵۷ سال گذشته به وقوع پیوسته است و شدت خشک‌سالی طی سال‌های اخیر افزایش یافته است و در صورت ادامه این روند، در آینده شدت و فراوانی وقوع خشک‌سالی افزایش و جریان کلی رودخانه کاهش خواهد یافت. مهم‌ترین نتایج حاصله از این پژوهش به شرح زیر است:

کند، بنابراین توجه و برنامه‌ریزی مدیران آبی منطقه به‌منظور پیشگیری از آسیب‌های احتمالی را می‌طلبد.

۴. براساس مطالعه خصوصیات کمبود، متوسط حجم کمبود در ۶ ماه خشک‌سال ۸۸/۲۴ میلیون مترمکعب و شدت آن ۰/۹ میلیون مترمکعب بر ثانیه است. بررسی نتایج نشان داد که با گذشت زمان حجم کمبود در این رودخانه افزایش یافته است. افزایش حجم کمبود نشانگر کاهش جریان در رودخانه است که به‌طورکلی کاهش عملکردهای رودخانه‌ای را در پی خواهد داشت.

۵. جریان رودخانه ارمند متشکل از ۹۵ درصد جریان پایه و ۵ درصد جریان رواناب است که نشان می‌دهد این رودخانه بیش‌تر از منابع زیرزمینی تغذیه می‌شود و بنابراین برداشت‌های بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی می‌تواند منجر به وقوع خشک‌سالی با دوره بازگشت‌های کوتاه‌تری شود.

۶. برای مطالعات جریان کم‌آبی یک حوضه در صورت وجود برخی محدودیت‌ها، پیشنهاد می‌شود که به‌ترتیب از شاخص‌های مستخرج از منحنی تداوم جریان، ویژگی‌های کمبود و برای اهداف خاص از شاخص جریان پایه، تحلیل فراوانی و بررسی روند بهره‌جست. به‌طورکلی، نوع شاخص مورد‌استفاده در مطالعات جریان کم‌آبی، کاملاً بستگی به هدف مطالعه، مقیاس زمانی در دسترس داده‌های جریان و مدت طرح دارد.

حداکثر برداشت آب جهت مصارف شرب، کشاورزی و صنعت است.

۲. حداقل جریان زیست‌محیطی با استفاده از شاخص Q_{90} و Q_{75} مستخرج از منحنی FDC به‌ترتیب ۴۴/۱ (شرایط مناسب زیست‌محیطی) و ۳۷/۸ (شرایط نسبتاً مناسب زیست‌محیطی) مترمکعب بر ثانیه به‌دست آمد. کاهش جریان رودخانه به کم‌تر از مقادیر ذکرشده می‌تواند باعث آسیب رساندن به اکوسیستم گیاهی و جانوری رودخانه شده و توانایی‌های زیستی آبریان بومی منطقه مانند توان جفت‌گیری و زادآوری و مهاجرت آن‌ها را کاهش دهد. بنابراین مدیران آبی منطقه در بهره‌برداری از رودخانه باید سهم زیست‌محیطی آن را در نظر داشته باشند.

۳. در تحلیل فراوانی جریان کم‌آبی با استفاده از تابع توزیع احتمال گامای دوپارامتری، جریان با دوره بازگشت‌های ۲، ۵، ۱۰، ۲۰، ۵۰ و ۱۰۰ سال به‌ترتیب برابر ۳۴/۲۶، ۲۳/۰۶، ۲۱/۰۶، ۱۹/۱۲ و ۱۷/۰۵ مترمکعب بر ثانیه تعیین شد. با توجه به جریان حداقل زیست‌محیطی، به‌طور متوسط جریان رودخانه هر دو سال یک‌بار به کم‌تر از میزان جریان زیست‌محیطی Q_{75} و Q_{90} می‌رسد. در صورتی‌که رودخانه برای مدت طولانی در این وضعیت بماند یا مقدار جریان کاهش بیش‌تری یابد، می‌تواند آسیب‌هایی به اکوسیستم وارد

منابع

1. Agawala, S., Barlow, M., Gullen, H., and Lyon, B. 2001. The drought and humanitarian crisis Central Southwest Asia: A climate perspective. IRI Special Report. 01: 1. 11-24.
2. Bayazidi, M., Saghafiyan, B., Sedghi, H., and Kaveh, F. 2010. Hydrological drought analysis of Karoon Basin by daily data. J. Water. Manage. 86: 3. 52-63. (In Persian)
3. Biabanaki, M. 2004. Low flow analysis using hybrid method in Karkheh watershed. Master's thesis for water engineering. Isfahan University of Technology. Isfahan, 112p. (In Persian)
4. Chang, M., and Boyer, D.G. 1997. Estimates of low flows using watershed and climatic parameters. Water Resources Research. 13: 6. 997-1001.
5. Chow, V.T., Maidment, D.R., and Mays, L.W. 1988. Applied hydrology. MCGraw-Hill, New York, 281p.
6. Dudangeh, E., Soltani Koupaie, S., and Sarahidi, A. 2009. Frequency analysis of minimum flow in Gilvan Water Basin for management of drinking and agricultural

- water quality in the region. 8th International River Engineering Conference, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz. (In Persian)
7. Eghtedari, M., Bazrafshan, J., Shafie, M., and Hejabi, S. 2016. Prediction of stream flow drought using SPI and Markov chain in Kharkkeh Basin. *J. Water Soil Cons.* 23: 2. 115-130. (In Persian)
 8. Environmental flow guidelines. Environment ACT. 1999. Australia.
 9. Frend. 1989. Flow regimes from experimental and network data. I: Hydrological studies. 1-334; II: Hydrological data, Wallingford, UK. 1-266.
 10. Feyen, L., and Dankers, R. 2009. Impact of global warming on Stream flow drought in Europe. *J. Geophysic. Res.* 114, D17116.
 11. Ghanbarpour, M.R., Timouri, M., and Gholami, Sh.A. 2010. Comparison of basin base flow estimation methods based on hydrograph separation of the current case study of Karoon watershed. *J. Natur. Sci. Technol.* 12: 44. 1-10. (In Persian)
 12. Ghobadi, S., Abghari, H., and Erfanian, M. 2016. Monitoring the spatial and temporal distribution of the intensity droughts using the isoSDI and isoSPI in the West of Lake Uremia. *J. Water Soil Cons.* 24: 5. 111-127. (In Persian)
 13. Gustard, A., Bullock, A., and Dixon, J.M. 1992. Low flow estimation in the United Kingdom. Institute of hydrology, Report. No.1. 08-88.
 14. Heo, J.H., Kim, J.H., and Salas, J.D. 2001. Estimation of confidence intervals of quantiles for the Weibull distribution. *J. Stochastic Environ. Res. Risk Assess.* 15: 4. 284-309.
 15. Hisdal, H., Clausen, B., Gustard, A., Peters, E., and Tallaksen, L.M. 2004. Event definitions and indices, In: Hydrological drought - processes and estimation methods for stream flow and groundwater. P 1-155, Tallaksen, L.M., and Lanen, H.A.J., van (eds), *Developments in Water Science*, 48. Elsevier Science, Amsterdam.
 16. Hisdal, H. 2002. Regional aspects of drought. Ph.D. Faculty of Mathematics and Natural Sciences. University of Oslo, Oslo, thesis, 221p.
 17. Hosseini Zare, N., and Saadati, N. 2002. The effect of drought on the water quality of Karoon and Dez Rivers in Khuzestan Province. The First National Conference on Coping with Water Crisis. Zabol University, Zabol, Pp: 171-189. (In Persian)
 18. Islami, A.R., and Shokouhi, A.R. 2013. Analysis of river flow status using hydrological-environmental drought index. *J. Water Manage. Engin. Manage.* 5: 2. 125-133. (In Persian)
 19. Islamian, S.S., Zarei, A.R., and Abrishamchi, A. 2004. Regional estimation of low flows for Mazandaran River Basin. *J. Agric. Sci. Technol.* 8: 1. 27-38. (In Persian)
 20. Karimi, M., Shahedi, K., and Bayazidi, M. 2015. Analysis of hydrological drought using constant threshold level method (Case study: Karkkeh River Basin, Iran). *J. Water. Manage. Res.* 6: 11. 59-72. (In Persian)
 21. Kazemi, R., and Ghermez Cheshmeh, B. 2016. Investigation of different base flow separation methods using flow duration indices (Case study: Khazar region). *J. Water Soil Cons.* 23: 2. 131-146. (In Persian)
 22. Lyne, V., and Hollick, M. 1979. Stochastic time-variable rainfall- runoff modeling. Hydrology and Water Resources Symposium, Institution of Engineers, Australia, Perth. Pp: 89-92.
 23. Marchand, M.D. 2006. Environmental flow requirements for rivers: An integrated approach for river and coastal zone management. Report. Z2850 WLDelft Hydraulics. Pp: 28-50.
 24. Mauser, W., Marke, T., and Stoeber, S. 2008. Climate change and water resources: Scenarios of Low flow conditions in the Upper Danube River Basin. XXIVth Conference of Danubian Countries. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 4: 1. 012-027.
 25. Mijuskovic-Svetinovic, T., and Maricic, S. 2008. Low flow analysis of the Lower Drava River. *J. Earth Environ. Sci.* 4: 112-125.

26. Nathan, R.J., and McMahon, T.A. 1990. Evaluation of automated techniques for base flow and recession analyses. *Water Resources Research*. 26: 7. 1465-1473.
27. Pandey, R.P., Mishra, S.K., Singh, R., and Ramasastri, K.S. 2008. Stream flow drought severity analysis of Betwa River system, (India). *Water Resource Management*. 22: 8. 1127-1141.
28. Pyrcce, R. 2004. Hydrological low flow indices and their uses. *Watershed Science Centre. WSC Report. 04, Trent University, Peterborough, Ontario*. 04: 1-33.
29. Rudy, K.A., and Broder, J.M. 2015. Investigation of the potential surface-groundwater relationship using automated baseflow separation techniques and recession curve analysis in Al Zerba of Aleppo, Syria. *Arabi. J. Geosci*. 8: 12. 1-21.
30. Sadaii, N., and Soleimani, K. 2013. Prioritization of Chang-Simon-Richardson, Begovolde and Tofalto formulas in three rivers using AHP method. *J. Water Soil Sci*. 23: 3. 235-247. (In Persian)
31. Soltani, S., Yaghmaii, L., Khodaghali, M., and Sabuhi, R. 2011. Ecological zonation of Chaharmahal and Bakhtiari province using multivariate statistical methods. *J. Agric. Technol. Water and Soil Science*. 14: 54. 53-68. (In Persian)
32. Shamaiezadeh, M., and Soltani, S. 2014. Low flow frequency analysis of low currents in North Karoon Basin. *J. Agric. Sci. Technol*. 18: 70. 231-243. (In Persian)
33. Smakhtin, V.Y., and Watkins, D.A. 1997. Low flow estimation in South Africa. *Water Research Commission Report. 494/1/97, Pretoria. South Africa*. Pp: 1-40.
34. Smakhtin, V.U. 2001. Low flow hydrology: a review. *J. Hydrol*. 240: 147-186.
35. Svetinovic, T.M., and Maricic, S. 2008. Low flow analysis of the Lower Drava River. XXIVth Conference of the Danubian Countries. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 4: 1. 012-011.
36. Taghavi Kaljahi, S., Reiazi, B., and Taghavi, L. 2014. Determination of the environmental right of the Miankaleh wetland. *J. Environ. Sci. Technol*. 16: 2. 101-109. (In Persian)
37. Tasker, G.D. 1987. A comparison of methods for estimating low flow characteristics of streams. *Water Resource Bull*. 23: 6. 1077-1083.
38. Yurekli, K., Kurunc, A., and Gul, S. 2005. Frequency analysis of low flow series from Çekerek stream Basin. *Tarim Bilimleri Dergisi*. 11: 1. 72-77.
39. Vogel, R.M., and Kroll, C.N. 1989. Low-flow frequency analysis using probability-plot correlation coefficients. *J. Water Resour. Plan. Manage. ASCE (ASCE)*. 115: 3. 338 - 357.
40. World meteorological organization. 2008. Manual on low flow estimation and prediction. *Operational hydrology report No.50.WMO - NO. 1029*. 13-136.
41. Zare Bidaki, R., Mahdian fard, M., Honarbakhsh, A., and Zainiwand, H. 2015. Estimating the base flow of Lorestan's Tire River to assess the environmental flow. *J. Echohydrol*. 2: 3. 275-287. (In Persian)



Hydrological Drought Investigation of Armand River Using Low Flows Analysis

M. Ghorbani¹, *M. Mozayyan² and H. Zarei³

¹M.Sc. Graduate, Dept. of Range and Watershed Management, Behbahan Khatam Alanbia University of Technology, ²Assistant Prof., Dept. of Range and Watershed Management, Behbahan Khatam Alanbia University of Technology, ³Assistant Prof., Dept. of Hydrology, Shahid Chamran University of Ahwaz

Received: 06.10.2018; Accepted: 04.15.2019

Abstract

Background and Objectives: Monitoring and evaluation of hydrological drought has become a necessity due to its frequent occurrence in various basins of Iran, and in order to prevent and manage the resulting crisis. In most studies, drought indices have been used to investigate that. Drought indices like Stream flow Drought Index, using statistical calculations on river flow data, ultimately leads to a number that does not have the ability to completely investigate and analyze drought in the studied area. Low flow or minimum river flow is one of the most important drought indices that by using different criteria can get a comprehensive understanding of the hydrological drought situation in the region. In most studies, deficit characteristics or low flow frequency analysis have been used. Using different low flow indices is necessary to recognize different aspects of drought and its management. Therefore, the aim of this research was to study hydrological drought of Armand river using all of the low flow indices including flow duration curve, deficit characteristics, low flow frequency analysis and base flow index, which can be used to determine characteristics such as dry and wet periods, amount of flow during drought, drought threshold, duration of drought, volume and intensity deficit and frequency of low flows. Also, in this study, the environmental flow of river was calculated and analyzed.

Materials and Methods: The Armand River basin with 9961 Km² area located in Chaharmahal and Bakhtiari province was selected as the study area and the daily flow statistics of the Armand hydrometric station were used from 1957 to 2013. First, by plotting the flow duration curve, three low flow indices Q_{70} , Q_{90} and Q_{95} also, the river status including wet, normal and drought periods were determined. Then, the minimum environmental flow was calculated based on the two indices Q_{75} and Q_{90} , and the deficit characteristics using the threshold level Q_{70} . In order to estimate the return period of low flow series (AM7), a suitable two-parameter gamma distribution function was considered appropriate. Finally, the base flow index was calculated using recursive digital filter method in different time scales.

Results: Based on the results, the Armand River in 28, 22 and 14 years (from 57 years of statistical period) has a flow of less than Q_{70} , Q_{90} and Q_{95} , respectively (45, 32 and 27 m³/s). Due to the gentle slope of the flow duration curve of basin, also the high value of the BFI index (0.95), it was concluded that groundwater had a high participation in the river flow. The dry period in this river begins when the flow reaches less than 45 m³/s (the threshold level Q_{70}). The results showed that the deficit volume and intensity increased over the past 50 years. Based on the frequency analysis of low flow, in the return periods of 2, 5, 10, 20, 50 and 100 years, the low flow was 34.26, 26.8, 23.1, 21.1, 19.1 and 17 m³/s. Comparison of these values with the minimum environmental flow showed that the river flow becomes less than its minimum environmental flow on average every two years.

* Corresponding Author; Email: mmozayyan80@yahoo.com

Conclusion: Despite the sustained flow in the Armand River (due to the snow-rainy regime of the region, the ability of the basin to save water and drain it during the dry season), the dry periods with different intensities occurred over the past 57 years. Also, the severity of drought has increased due to the increase in the volume deficit of the river in recent years, and if this continues in the future, the severity and frequency of the drought occurrence will increase and the overall flow of the river will decrease.

Keywords: Armand River, Deficit characteristics, Flow duration curve, Low flow, Minimum environmental flow

Arc