فصلنامه علوم محیطی، دوره بیست و یکم، شماره ۱، بهار ۱۴۰۲

۶۵-۸۶

مقاله پژوهشی

ارزیابی تغییرات هیدرواکولوژیک رودخانه هلیل‌رود و نقش سدهای در دست بهره‌برداری در ایجاد آن

ناهید احمدی[۱]، حسین مصطفوی[۱*]، خسرو پیری[۱] و حسین زینی‌وند[۲]

[۱] گروه تنوع زیستی و مدیریت اکوسیستم‌ها، پژوهشکده علوم محیطی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

[۲] گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۶/۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۷/۳۰

احمدی، ن.، ح. مصطفوی، خ. پیری و ح. زینی‌وند. ۱۴۰۲. ارزیابی تغییرات هیدرواکولوژیک رودخانه هلیل‌رود و نقش سدهای در دست بهره‌برداری در ایجاد آن. فصلنامه علوم محیطی. ۲۱(۱): ۶۵-۸۶.

سابقه و هدف: گرچه آب عنصر اصلی توسعه پایدار به شمار می‌رود، اما پروژه‌های سدسازی در راستای مدیریت منابع آب در سال‌های اخیر نتوانسته است تعادل میان مصارف انسانی و نیاز آبی اکوسیستم‌های طبیعی را به گونه‌ای حفظ کند که ضمن بهره‌برداری با اهداف اجتماعی و اقتصادی، حیات پایدار سیستم‌های رودخانه‌ای نیز تضمین شود. این پژوهش کوشیده است در حوضه بالادست سد جیرفت به عنوان ناحیه کلیدی تامین آب در نیمه غربی حوضه آبخیز جازموریان که به نام هلیل‌رود نیز شناخته می‌شود، نسبت به درک اثرات هیدرولوژیک و پیامدهای اکولوژیک ساخت سدها اقدام نماید.

مواد و روش‌ها: در این پژوهش معنادار بودن روند تغییرات بلند مدت متوسط آبدهی سالیانه در رودخانه‌های محدوده مطالعات در محل ایستگاه‌های هیدرومتری سلطانی، بافت، هنجان، میدان، قلعه‌ریگی، کناروئیه و حسین‌آباد و نیز تغییرات متوسط بارندگی سالانه در ایستگاه-های باران‌سنجی متناظر با مناطق فوق در بازه زمانی ۳۸ ساله (۹۸-۱۳۶۰) با استفاده از آزمون من-کندال بررسی شده و سپس ۳۳ پارامتر هیدرولوژیکی (بر اساس آمار دبی روزانه جریان در ایستگاه حسین‌آباد در بازه زمانی مذکور) به عنوان شاخص نیازهای اکولوژیک (که متاثر از سدهای مخزنی بافت و جیرفت است) با استفاده از رویکرد محدوده تغییرپذیری و نرم‌افزار IHA در دو دوره قبل و بعد از احداث سدها مورد تحلیل قرار گرفته‌اند.

نتایج و بحث: بر اساس آزمون من-کندال، متوسط آبدهی سالیانه در رودخانه‌های بالادست مخزن سد جیرفت در طول ۳۸ سال گذشته در سطح ۹۵ و ۹۹ درصد افت معنادار دبی داشته‌اند، اما روند تغییرات متوسط بارندگی سالیانه در همین بازه جز در یک ایستگاه (هنجان) معنادار نبوده است که این تفاوت ناشی از اثرات منفی ساخت سدها است و توسط خروجی مدل IHA نیز تایید گردید. لازم به ذکر است بر اساس خروجی مدل مذکور ۳ ویژگی هیدرو-اکولوژیک جریان رودخانه هلیل از زمان بهره‌برداری سد جیرفت (سال ۱۳۷۱) دچار تغییرات

* Corresponding Author: *Email Address*. H-mostafavi@sbu.ac.ir
http://dx.doi.org/10.48308/envs.2022.1228
http://dorl.net/dor/20.1001.1.17351324.1402.21.1.6.2

اساسی شده، اما بهره‌برداری سد بافت در بالادست سد جیرفت در سال ۱۳۸۸ منجر به تشدید اثرات منفی ویژگی‌های جریان (خارج از محدوده قابل قبول تغییرپذیری اکولوژیکی) هلیل‌رود شده است.

نتیجه‌گیری: به منظور جلوگیری از تشدید بحران آب، ضرورت دارد اثرات تجمعی در احداث سدهای زنجیره‌ای با رویکرد هیدرو-اکولوژیک به دقت مدنظر قرار گیرد و برنامه تخصیص آب سدها به‌ویژه حقابه‌های محیط زیستی با توجه به تحولات بالادست حوضه هر سد بازنگری گردد تا اهداف مدیریت یکپارچه منابع آب برای تامین نیازهای اجتماعی-اقتصادی پایدار در کنار حفظ سلامت و بقای اکوسیستم‌های طبیعی تضمین گردد.

واژه‌های کلیدی: هیدرواکولوژی، سد، مدیریت یکپارچه منابع آب، RVA، IHA.

مقدمه

آب، زیربنای هرگونه توسعه پایدار به شمار می‌رود و در این راستا رویکرد مدیریت یکپارچه منابع آب (Integrated Water Resources Management) امکان بهینه‌سازی مشارکت بخش آب در دستیابی به توسعه پایدار را فراهم می‌کند (Araghinejad and Esfandiyari, 2006). اما لازمه این یکپارچگی نیز حفاظت، توسعه و بهره‌برداری از منابع آب به گونه‌ای است که در عین به حداکثر رساندن رفاه اقتصادی و اجتماعی به شیوه‌ای عادلانه، حفظ سلامت و پایداری اکوسیستم‌ها نیز محقق شود (Ghasemiye *et al*., 2016). از این رو ضروری است مدیران، متولیان و کارشناسان در برنامه‌ریزی تامین آب و طراحی و مدیریت سازه‌ها و سامانه‌های مرتبط با آن، تقاضای در حال تغییر برای منابع آب برای مصارف اجتماعی و اقتصادی را به گونه‌ای لحاظ نمایند که سهم اکوسیستم‌های طبیعی در زمان حال و آینده، بدون تخریب این منابع و با حفظ توان آن‌ها برای نسل‌های آینده در نظرگرفته شود (Loucks, 2000). اهمیت مدیریت منابع آب در راستای پایدارسازی طرح‌های توسعه، عمدتاً ناشی از تقابل نتایج مطالعات منفرد و مستقل منابع و مصارف آب با افزایش رقابت‌ها و تضادهای مصارف آب در نتیجه افزایش سریع جمعیت، روند صعودی نیازها، مسائل کیفی، مسائل اقتصادی و اجتماعی است (Jamab, 2012). تعریف پایداری اکوسیستم‌ها در سایه مدیریت منابع آب در شرایطی مطرح می‌گردد که امروزه بسیاری از کشورها از جمله ایران در معرض چالش‌های سنگین مدیریت منابع آب شیرین هستند (Saeedpanah and Badalzadeh, 2014). بررسی‌ها نشان داده است که بحران آب در ایران از آنجایی ناشی می‌گردد که علی‌رغم کاهش منابع آب تجدیدشونده، میزان مصرف آب، نه تنها کاهش نیافته، بلکه با رشد جمعیت، افزایش نیز داشته است و این چالش‌ها در شرایطی است که از حدود ۱۰۰ میلیارد مترمکعب مصرف آب در کشور، حدود ۹۲٪ مربوط به بخش کشاورزی، ۶/۵٪ مصارف شرب و بهداشت و ۱/۵٪ مصارف صنعتی است که با مصارف جهانی فاصله قابل‌توجهی دارد (MPO, 2016). هرگونه تغییر در رژیم طبیعی جریان رودخانه‌ها بایستی با درنظرگرفتن حداقل نیازمندی‌های جریان برای حفظ سلامت اکوسیستم و خدمات اکولوژیکی وابسته به آب صورت گرفته و با آن در تعادل و توازن باشد (Dyson, 2008). در همین راستا بهره‌برداری صحیح و پایدار از منابع آب به گونه‌ای که سلامت ساختار و عملکرد اکوسیستم‌های آبی محفوظ بماند، یکی از الزامات مدیریت یکپارچه منابع آب در هر سطح و مقیاسی است. با این وجود دخالت‌های انسانی که در سایه مدیریت جامع منابع آب در رودخانه‌های اغلب نقاط ایران صورت گرفته مانند ساخت سدها، انتقال آب بین حوضه‌های متفاوت و عدم توجه به الزامات حفاظت از اکوسیستم‌های طبیعی، ساختار و عملکرد اکوسیستم‌ها را به شدت متاثر ساخته است. اولین سطح از تخریب حاصل از چنین اقداماتی نیز کاهش کل دبی رودخانه، تغییر

روندهای فصلی و سالیانه جریان و تناوب سیلاب‌ها بوده است (Iran Ministry of Energy, 2011). تغییر چرخه هیدرولوژیک در سطح حوضه به تنهایی می‌تواند بر تمامی ابعاد اکولوژیک، ساختار فیزیکی و نیز شرایط اقتصادی و اجتماعی حوضه اثرگذار بوده و پایداری و حیات آن را با اختلال روبرو نماید. در حوضه هلیل‌رود به دلیل وجود مسائل محیط‌زیستی، اقتصادی و اجتماعی و اهداف متضاد در بهره‌برداری و مدیریت منابع آب، لازم است تا مدیریت یکپارچه با دقت و نظام‌مندی و جامع‌نگری بیش از پیش برای حل منازعات صورت گیرد (Mirzaei, 2019).

این پژوهش سعی دارد با درنظرگرفتن یکی از مهم‌ترین استراتژی های اجرایی برای مدیریت منابع آب در سطح کشور (ساخت سدها)، اثرات هیدرواکولوژیک سدهای در دست بهره‌برداری در بالادست حوضه هلیل‌رود را بررسی نماید که آیا بحران فعلی آب در حوضه هلیل‌رود ناشی از عملکرد سدهای در دست بهره‌برداری است؟ و ویژگی‌های هیدرو-اکولوژیک جریان چگونه بر اثر بهره‌برداری سدها تغییر یافته است. مدل IHA به عنوان یک روش پرکاربرد در سال‌های گذشته به‌طور خاص برای بررسی اثرات ساخت سدها در نقاط مختلف دنیا مورد استفاده قرارگرفته است (Marsh and Maingi, 2002; Nislow and Magilligan, 2005; Hu *et al*., 2008; Yang *et al*., 2008; Gao *et al*., 2008; Chen *et al*., 2010; Zhao *et al*., 2012; Cardoso *et al*., 2013; Lin *et al*., 2017; Liu *et al*, 2018; Song *et al*., 2020). در ایران نیز این رویکرد عمدتاً با تاکید بر ابعاد هیدرولوژیک مورد استفاده قرار گرفته است (Fooladvand *et al*., 2011; Madadi *et al*., 2012; Tayi Samiromi *et al*., 2014; Khorooshi Isaloo *et al*., 2017; Nasiri Khyavi *et al*., 2019; Khosravi *et al*., 2019; Naderi *et al*., 2010). در این پژوهش رویکرد محدوده تغییرپذیری از منظر هیدرو-اکولوژیک برای نخستین بار در حوضه هلیل‌رود به عنوان پایلوت به‌کار رفته و با استفاده از مدل IHA نسبت به شناسایی اثرات تجمعی سدهای زنجیره‌ای در راستای عملکرد بهینه مدیریت یکپارچه منابع آب در حوضه هلیل‌رود به عنوان مهم‌ترین زیرحوضه تامین آب در حوضه استراتژیک جازموریان اقدام گردیده است. محدوده این پژوهش، نقش مهمی در تامین ۸۳٪ حجم تولید سالانه آب سطحی و ۸۱٪ سهم تولید آب زیرزمینی در کل حوضه جازموریان را برعهده داشته و از این رو شناسایی تحولات هیدرو-اکولوژیک حوضه جایگاه بسیار مهمی در سلامت و پایداری ساختار و عملکرد اکوسیستمی در کنار توسعه اجتماعی-اقتصادی حوضه دارد (Regional Water Company of Kerman, 2017; 2018).

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه و روش انجام پژوهش

محدوده مطالعاتی

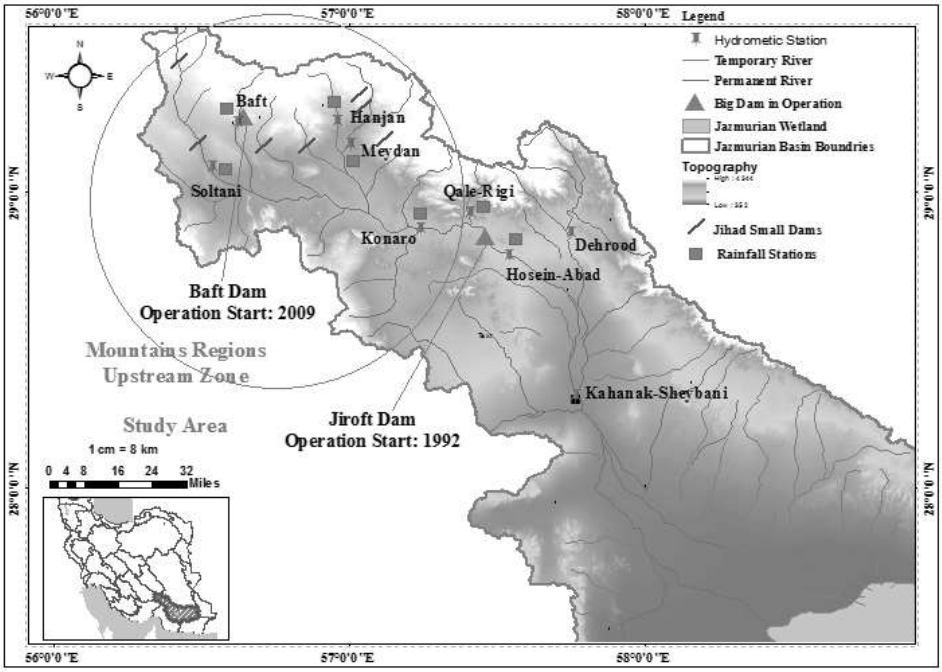
حوضه آبخیز هامون جازموریان با مساحت ۶۹۳۸۳ کیلومترمربع، بخشی از حوضه درجه یک کویر مرکزی ایران است که کلیه رودخانه‌ها و مسیل‌های این حوضه به سمت تالاب جازموریان جریان می‌یابند که در مرز دو استان سیستان و بلوچستان و کرمان واقع شده و عملاً حوضه را به دو نیمه غربی و شرقی تقسیم کرده است. دو رودخانه اصلی این حوضه، رودخانه بمپور در استان سیستان و بلوچستان و رودخانه هلیل‌رود در استان کرمان است (Regional Water Company of Kerman, 2017; 2018). محدوده مطالعات این پژوهش، حوضه بالادست سد جیرفت می‌باشد که در برگیرنده ناحیه کوهستانی و رودخانه‌های دائمی و مهمی چون سلطانی، بافت، رابر، رودر، سیدمرتضی، قلعه ریگی و زیرحوضه‌های این رودخانه‌ها است که سرشاخه‌های رود بزرگ هلیل را شکل داده و آبدهی این رودخانه‌ها نیز تامین کننده آب مخزن سد جیرفت به شمار می‌رود. هر یک از این سرشاخه‌ها نیز دارای یک ایستگاه هیدرومتری است که در جدول شماره۱ مشخصات ایستگاه

و آبدهی رودخانه‌های بالادست سدجیرفت ارائه شده است. شکل شماره ۱ نیز موقعیت قرارگیری این ایستگاه‌های هیدرومتری را نمایش می‌دهد. همچنین هفت ایستگاه باران‌سنجی متناطر با ایستگاه‌های هیدرومتری نیز به عنوان ایستگاه‌های شاخص برای بررسی روند بارندگی بلندمدت در محدوده مطالعاتی لحاظ گردیده‌اند که موقعیت آن‌ها در شکل شماره ۱ نشان داده شده است. متوسط بارندگی بلندمدت ۱۷۹ میلیمتر و حجم تبخیر و تعرق حقیقی ۳۱۷۴ میلیون مترمکعب برآورد شده است. متوسط دمای بلندمدت سالانه در ایستگاه بافت ۱۳ درجه سانتیگراد و در ایستگاه حسین آباد، ۲۴ درجه سانتیگراد برآورد شده است (Regional Water Company of Kerman, 2018; Jamab, 2011). اقلیم منطقه بر اساس روش سیلیانینف از مرطوب و نیمه‌مرطوب در ارتفاعات بخش‌های شمال و شمال غرب حوضه تا خشک و در جنوب و جنوب شرق متغیر است (Jamab, 2011; Yekom, 2008).

جدول ۱- معرفی رودخانه‌های اصلی محدوده مطالعاتی، ایستگاه‌های هیدرومتری و باران‌سنجی منتخب

Table 1. Main rivers of the study area, hydrometric and precipitation stations

نام رودخانه River name	کد ایستگاه Station-code	نام ایستگاه هیدرومتری Hydrometric station	مساحت حوضه رودخانه Area	میانگین آبدهی بلندمدت سالیانه (مترمکعب برثانیه) Mean discharge M^3/s	سال حداکثر آورد Year of max discharge	حداکثر آورد سالانه (م.م.م) Max. discharge (M.C.M)
سلطانی Soltani	44-003	سلطانی Soltani	988	1.66	1992-93	341
بافت Baft	44-001	پل بافت Pol-e-Baft	478	0.74	1992-93	137.6
رودر Rudar	44-053	هنجان Hanjan	311	1.37	1992-93	229.2
رمون Ramoon	44-107	قلعه ریگی Qale-Rigi	249	0.86	1992-93	157
سیدمرتضی Seyed-Morteza	44-111	میدان Meydan	631	3.15	1992-93	665.5
هلیل Halil	44-115	کناروئیه Konarooiye	7600	10.44	1995-96	1070
هلیل Halil	44-007	حسین آباد Hossein-Abad	8420	7.48	1995-96	1386.5



شکل ۱ - موقعیت جغرافیایی محدوده مورد مطالعه و ایستگاه‌های منتخب باران‌سنجی و هیدرومتری

Fig. 1- Map of study area, rain and hydrologic stations

فهرست سدهای ساخته شده و یا در دست ساخت و مطالعه وزارت نیرو و جهاد کشاورزی در محدوده مطالعاتی در جدول ۲ ارائه شده است. آب منطقه‌ای استان کرمان تا کنون دو سد مهم و مخزنی جیرفت و بافت را به بهره-برداری رسانده و سد صفا در مرحله ساخت بوده و سدهای مخزنی سلطانی (زردشت) و شورجیرفت نیز در فاز مطالعاتی می‌باشند. جهادکشاورزی استان کرمان نیز عمدتاً با هدف تامین آب برای کشاورزی اقدام به ساخت سدهای کوچک تا ارتفاع ۲۰ متر و مخازنی بین ۰/۳ تا ۱/۵ میلیون مترمکعب نموده است. از مجموع ۱۲ سد کوچک و بزرگ و بند خاکی موجود در هلیل‌رود، سد جیرفت با حجم ۴۲۵ و صفا با ۵۱ میلیون مترمکعب و بافت با حجم مخزن ۴۰ میلیون مترمکعب دارای بیشترین حجم هستند که سدهای جیرفت و بافت در دست بهره-برداری و سد صفا در دست ساخت می‌باشد (Regional Water Company of Kerman, 2018; Jamab, 2011). به‌طور کلی عمده مصارف آب در این محدوده مطالعاتی به فعالیت‌های کشاورزی اختصاص دارد و مصرف شرب و صنعت در جایگاه‌های دوم و سوم قرارگرفته‌اند (Mirzaei *et al.*, 2019).

جدول ۲- مشخصات سدهای محدوده مطالعاتی

Table 2. Characteristics of dams in the study area

ردیف No.	نام سد Dam name	فاز عملیاتی Operational stage	ارتفاع سد (متر) Dam height (m)	حجم مخزن(م.م.م) Reservoir volume (MCM)	اهداف سد Objectives	طول جغرافیایی Longitude	عرض جغرافیایی Latitude
1	Jiroft* جیرفت	In operation- since 1992 در دست بهره-برداری-۱۳۷۱	133	369	Agriculture-drinking water-electricity production کشاورزی، شرب و برقابی	57-28-39	28-51-57
2	Baft* بافت	In operation- 2009 در دست بهره-برداری-۱۳۸۸	65	40	Agriculture-drink-industry کشاورزی، شرب و صنعت	57-27-58	28-51-43

ادامه جدول ۲- مشخصات سدهای محدوده مطالعاتی

Table 2. Cont. Characteristics of dams in the study area

ردیف No.	نام سد Dam name	فاز عملیاتی Operational stage	ارتفاع سد (متر) Dam height (m)	حجم مخزن(م.م.م) Reservoir volume (MCM)	اهداف سد Objectives	طول جغرافیایی Longitude	عرض جغرافیایی Latitude
3	Safa* صفا	Under construction در دست ساخت	78	77	Drink (rabor, Kerman:transebasin conveyance) شرب	57-04-45	29-16-30
4	Zardasht (Soltani) * زردشت	Study Phase 2 در دست مطالعه	43	40	Agriculture کشاورزی	56-28	29-11
5	Shoor-e-Jiroft* شور جیرفت	Study Phase 2 در دست مطالعه	121	104	Agriculture-drinking water-electricity production کشاورزی، شرب و برقابی	57-44-54	28-53-03
6	Aderenjan** آدرنجان	In operation-2016 در دست بهره‌برداری	20	1.5	Agriculture,1.3-aquifer recharge, 0.2 شرب و تغذیه آب زیرزمینی	56-25-34	29-17-56
7	Amir-Abad-Googhar** امیرآباد گوغر	In operation-2006 در دست بهره‌برداری	17	0.65	Agriculture,0.6-drinking water, 0.05 کشاورزی و شرب	56-24-45	29-28-45
8	Ahooye** آهوئیه	In operation-2017 در دست بهره‌برداری	20	1.5	Agriculture کشاورزی	56-44-41	29-17-11
9	Shastfich** شصت‌فیچ	In operation-2006 در دست بهره‌برداری	14	0.65	Agriculture کشاورزی	56-50-48	29-10-5
10	Kabir** کبیر	In operation-1981 در دست بهره‌برداری	20	0.3	Agriculture کشاورزی	56-53-6	29-20-58
11	Naniz** ننیز	In operation-1999 در دست بهره‌برداری	20	0.8	Agriculture کشاورزی	56-53-54	29-19-4
12	Qanat-Malek** قنات ملک	In operation-1981 در دست بهره‌برداری	14	0.35	Agriculture کشاورزی	57-2-48	29-17-51

*Regional Water Company of Kerman

**Regional Agricultural Jihad Company of Kerman

روش پژوهش

در این مطالعه به منظور ارزیابی روند تغییرات بلندمدت آبدهی جریان در رودخانه‌های تامین‌کننده آب سد جیرفت و معناداری این تحولات از آزمون من-کندال استفاده شده و سپس به منظور تعیین نقش تحولات اقلیمی، روند تغییرات بلندمدت متوسط بارندگی سالیانه نیز با آزمون من–کندال ارزیابی و نتایج مقایسه شده‌اند. این بررسی در بازه زمان ۳۸ ساله (۹۸-۱۳۶۰) بر اساس داده‌های ایستگاه‌های هیدرومتری و باران‌سنجی سلطانی، بافت، هنجان، میدان، قلعه‌ریگی، کناروئیه و حسین‌آباد صورت گرفته است. سپس به منظور ارزیابی اثرات روندهای شناسایی شده بر عملکرد سد جیرفت و نیز پیامدهای بهره‌برداری از سد مخزنی جیرفت بر تغییر ویژگی‌های هیدرواکولوژیک جریان، مدل IHA بر اساس داده‌های آبدهی روزانه در بازه زمانی ۳۸ ساله در ایستگاه حسین‌آباد واقع در خروجی سد جیرفت اجرا و نتایج بدست آمده به منظور تعیین تاثیر سد مخزنی بر ساختار و عملکرد هیدرواکولوژیک هلیل‌رود مورد تحلیل و بررسی

قرارگرفته است. ذکر این نکته ضروریست که با توجه به محدودیت تعداد ایستگاه‌های سینوپتیک و کلیماتولوژی که بتواند پوشش دهنده کل سطح محدوده مطالعاتی از دیدگاه داده‌های بارش و تبخیر باشد، صرفاً پارامتر بارش به عنوان اصلی‌ترین پارامتر اثرگذار اقلیمی بر حجم آب در چرخه هیدرلوژیک مدنظر قرار گرفت.

آزمون روندیابی من-کندال

آزمون روند من-کندال یک روش توصیه شده توسط سازمان هواشناسی جهانی است (Mitchell *et al*., 1966) که از شروط استفاده از این آزمون، ناپارامتری بودن داده‌ها و تعلق آن‌ها به یک جامعه آماری است. در این مطالعه از آزمون کلموگراف-اسمیرنوف برای ارزیابی همگنی داده‌ها استفاده شده و نتایج نشان داده است که داده‌های هیچ-کدام از ایستگاه‌های ذکر شده، توزیع نرمال نداشته و در نتیجه پیش‌شرط لازم برای اجرای آزمون ناپارامتری من-کندال برقرار است. در این روش داده‌ها به ترتیب زمان وقوع مرتب می‌شوند و هر داده با تمام داده‌های پس از خود مقایسه می‌شود. مراحل انجام آزمون به ترتیب زیر است (Yue and Pilon, 2004).

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^{n} \operatorname{sgn}(x_j - x_i) \qquad (۱)$$

$$\operatorname{sgn}(x_j - x_i) = \begin{bmatrix} 1 & \text{if} & (x_j - x_i) > 0 \\ 0 & \text{if} & (x_j - x_i) = 0 \\ -1 & \text{if} & (x_j - x_i) < 1 \end{bmatrix} \qquad (۲)$$

برای متغیرهای تصادفی مستقل و دارای توزیع یکنواخت و بدون گره (دو یا چندین داده با مقادیر عددی مساوی که در یک سری مرتب شده به دنبال هم قرار می‌گیرند) میانگین و واریانس S به‌صورت زیر است:

$$E(s)=0 \qquad (۳)$$

$$\mathrm{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} = \sigma^2$$

اگر در سری داده گره وجود داشته باشد، مقدار واریانس از رابطه زیر محاسبه خواهد شد:

$$S = \frac{n(n-1)(2n+5)\sum_{i+1}^{m} t_i(i)(i-1)(2i+5)}{18} \qquad (۴)$$

به گونه‌ای که t_i تعداد گره با ظرفیت i را نشان می‌دهد. برای مثال اگر در یک سری داده فقط دو عدد با مقادیر مساوی وجود داشته باشد، یک گره با ظرفیت (t_2=1) خواهیم داشت. اگر تعداد داده‌های یک سری بیش از ۱۰ عدد باشد، S از توزیع نرمال تبعیت می‌کند و مقدار معیار آماری استاندارد (Z) به صورت زیر خواهد بود.

$$Zs=\begin{bmatrix} \frac{s-1}{\sigma} & \text{if} & s>0 \\ 0 & \text{if} & \theta=0 \\ \frac{s+1}{\sigma} & \text{if} & s<0 \end{bmatrix} \qquad (۵)$$

برای بررسی معنی‌داری روند داده‌ها در سری‌های فصلی، سالانه، بیشینه بارش ۲۴ ساعته و نیز تعداد روزهای بارانی، آماره Z محاسبه و در سطوح معناداری ۵،۱ و ۱۰ درصد مورد آزمون قرار می‌گیرد (Lettenmaier *et al.*, 1994). برای محاسبه آماره‌های آزمون من- کندال از نرم افزار Makesens (تهیه و تایید شده توسط سازمان هواشناسی کشور) استفاده شده است.

روش محدوده تغییرپذیری

به منظور تحلیل چگونگی تغییرات دبی، متاثر از ساخت سد جیرفت از روش محدوده تغییرپذیری (RVA: Range of Variability Approach) با استفاده از نرم‌افزار IHA (Indicator of Hydrological Alteration, version7.1) استفاده شده است. داده‌های پایه این مطالعات از شرکت-های آب منطقه‌ای استان کرمان و موسسه تحقیقات منابع آب ایران اخذ شده است.

رویکرد محدوده تغییرپذیری در گروه روش‌های هیدرولوژیکی برای برآورد جریان زیست‌محیطی (Environmental Flow) قرار دارد(Iran Ministry of Energy, 2011) که بر خلاف روش‌های قدیمی این گروه، ۳۳ ویژگی هیدرولوژیک از جریان آبدهی را که نماینده وضعیت اکولوژیک سیستم رودخانه هستند در پنج گروه شامل آبدهی ماهانه (۱۲پارامتر)، مقدار و مدت وقایع حدی (۱۲ پارامتر)، زمان وقوع جریان‌های حدی (۲ پارامتر)، تناوب و مدت تداوم پالس‌های کم و بالای جریان (۴ پارامتر) و میزان و فراوانی تغییرات وضعیت جریان (۳

پارامتر) مورد مطالعه قرار می‌دهد (Shrestha *et al.*, 2014; Richter *et al.*, 1997). بر خلاف سایر روش‌ها مانند روش‌های هیدرولیکی و شبیه‌سازی زیستگاه و یا روش‌های جامع که نیاز به صرف زمان، هزینه، داده‌های تاریخی و نیروی انسانی قابل توجه دارند، رویکرد محدوده تغییرپذیری در اغلب نقاط جهان پرکاربرد و مورد توجه بوده و در عمل می‌تواند جایی مابین روش‌های هیدرولوژیکی و مدل‌های شبیه‌سازی زیستگاه قراربگیرد (Khanmohammady fallah and Shokoohi, 2018; Smakhtin *et al.*, 2006; Saeedpanah and Badalzadeh, 2014). برای اجرای این روش به حداقل سری زمانی ۲۰ ساله از آمار دبی رودخانه مورد مطالعه نیاز است (Richter *et al.*, 1998) و در دستورالعمل آن ذکر شده که استفاده از داده‌های روزانه بلندمدت بر داده‌های ماهانه دارای ارجحیت بسیار است. مراحل روش محدوده تغییرپذیری به شرح زیر است (The Nature Conservancy, 2009):

۱. ویژگی‌های جریان در قالب ۳۳ پارامتر در دوره قبل از تغییرات (رژیم طبیعی جریان) با روش محدوده تغییرپذیری محاسبه می‌شود.
۲. برای هر پارامتر هیدرولوژیکی محدوده تغییرپذیری تعریف می‌گردد
۳. ۳۳ فاکتور در دوره بعد از تغییرات (رژیم تغییریافته جریان) محاسبه می‌شود.

با محاسبه درجه تغییر رژیم هیدرولوژیکی Di از فرمول زیر، اثرات فعالیت توسعه‌ای مدنظر تحلیل می‌شود

$$D_i = \frac{(N_{0i} - N_e)}{N_e} * 100 \qquad (۶)$$

پارامتر N_0 تعداد سال‌هایی است که مقادیر محاسبه شده از پارامترهای مربوطه در سال‌های پس از توسعه برآورد شده RVA قرار می‌گیرند و N_e نیز تعداد سال‌هایی است که پارامتر در دوره قبل از توسعه در محدوده مورد نظر قرار می‌گیرد. درصدهای ۳۳ و ۶۷ برای مشخص کردن مرز طبقات به کار می‌روند. چنانچه درجه تغییر هیدرولوژیکی بین صفر تا ۳۳ درصد باشد درجه تغییرات پایین است، اگر بین ۳۳ تا ۶۷ باشد از نوع متوسط محسوب شده و اگر بزرگتر از ۶۷ باشد نشان دهنده درجه تغییرات هیدرولوژیکی زیاد است. همچنانکه عدد مثبت نشان‌دهنده افزایش جریان در دوره تغییر یافته (پس از بهره برداری سد) نسبت به دوره طبیعی جریان (قبل از بهره‌برداری سد) و عدد منفی، نشان‌دهنده کاهش جریان در دوره تغییریافته نسبت به دوره طبیعی و پیش از ساخت سد به شمار می‌رود (The Nature Conservancy, 2009).

ایستگاه منتخب در این مطالعات برای بررسی روند تغییرات بلندمدت دبی، ایستگاه حسین‌آباد واقع در پایین‌دست سد جیرفت می‌باشد. ایستگاه حسین‌آباد با بیش از ۴۰ سال داده آماری از جمله قدیمی‌ترین ایستگاه‌های هیدرومتری حوضه هلیل‌رود به شمار می‌رود که واقع شدن آن در پایین‌دست سد جیرفت نقش مهمی در برآورد دبی خروجی از سد جیرفت و ارزیابی تغییرات هیدرولوژی جریان در هلیل‌رود دارد. در این مطالعه داده‌های دبی رودخانه هلیل‌رود در محل ایستگاه هیدرومتری حسین‌آباد در دو دوره زمانی قبل و بعد از ساخت سد جیرفت در بازه بلندمدت ۳۸ ساله بررسی شد.

لازم به ذکر است که در این محاسبات ۳۸ سال داده روزانه دبی و داده متوسط بارندگی سالیانه مورد استفاده قرار گرفت و به منظور رفع نواقص آماری از روش رگرسیون چندگانه برای بازسازی داده‌های آماری در سال‌های دارای کمبود و نقص استفاده گردید.

نتایج و بحث

بررسی معناداری روند تغییرات بلندمدت در آبدهی ایستگاه‌های هیدرومتری واقع در بالادست سد جیرفت (جدول ۳) نشان داد که در تمامی آن‌ها (به استثناء قلعه‌ریگی) روند آبدهی رودخانه، کاهشی و در سطح ۹۵ تا ۹۹ درصد معنادار است؛ این در حالی است که در ایستگاه‌های

باران‌سنجی متناظر با ایستگاه های هیدرومتری (جدول ۳)، گرچه روند بارش کاهشی شناسایی شده اما معنادار ارزیابی نشده و حتی در در دو ایستگاه سلطانی و حسین‌آباد نیز روند بارش افزایشی شناسایی شده که آن نیز معنادار ارزیابی نشده است و می‌تواند ناشی از شرایط میکروکلیمایی کوهستانی در ایستگاه سلطانی و نیز میکرو اقلیم ناشی از مخزن سد بزرگ جیرفت و اثر آن بر رطوبت محلی نسبی و بارش های موقت در محدوده ایستگاه حسین‌آباد باشد. این نتایج با خروجی مطالعات بررسی تغییرات فصلی و سالانه بارش در ایران مرکزی (Hejam *et al*., 2008) و الگوهای بارش‌های سنگین شهر جیرفت (Ghavidel *et al*., 2014) نیز تطابق دارد. به این ترتیب کاهش معنادار دبی جریان در رودخانه های بالادست سد جیرفت متاثر از کاهش بارندگی نبوده و عمدتاً ناشی از فشارهای انسانی است. لازم به ذکر است بر اساس مطالعات Rashki *et al*.(2019) حوضه هلیل-رود از خشکسالی شدید دهه هشتاد نیز اثر پذیرفته است و بخشی از روند نزولی معنادار جریان می‌تواند ناشی از این خشکسالی باشد. در عین حال بروز پدیده خشکسالی، نفی‌کننده نقش تاثیرگذار توسعه‌های انسانی نیست. از جمله توسعه کشاورزی و نیز توسعه‌های شهری و روستایی ناشی از تامین آب توسط سدهای بافت و جیرفت که به منزله افزایش تقاضا و مصرف آب نیز هستند.

جدول ۳- نتایج آزمون من-کندال در ارزیابی روند تغییرات متوسط آبدهی سالانه و متوسط بارندگی سالیانه در حوضه بالادست سد جیرفت
Table 3. Mann-Kendal results for alteration trend analysis of mean annual discharge and mean precipitation trend in upstream of Jiroft Dam basin

نام ایستگاه Station name	نام رودخانه River name	طول دوره آماری Duration of period	متوسط آبدهی سالیانه Mean annual discharge			متوسط بارندگی سالیانه Mean annual precipitation		
			آماره آزمون Test Z	معناداری Sig.	روند Trend	آماره آزمون Test Z	معناداری Sig.	روند Trend
سلطانی Soltani	سلطانی Soltani	38	-4.02 ***	99%	کاهشی Decreasing	0.17	ns	Increasing افزایشی
بافت Baft	بافت Baft	38	-3.22 **	95%	کاهشی Decreasing	-1.63	ns	Decreasing کاهشی
هنجان Hanjan	رودر Hanjan	38	-3.24 **	95%	کاهشی Decreasing	-2.17*	90%	Decreasing کاهشی
میدان Meydan	سیدمرتضی Meydan	38	-3.47 ***	99%	کاهشی Decreasing	-0.87	ns	Decreasing کاهشی
قلعه‌ریگی Qale-Rigi	رمون Ramon	38	-1.81	ns	کاهشی Decreasing	-1.04	ns	Decreasing کاهشی
کنارویه Konarooiye	هلیل Halil	38	-3.6***	99%	کاهشی Decreasing	-0.96	ns	Decreasing کاهشی
حسین‌آباد Hossein-Abad	هلیل Halil	38	-3.34 ***	99%	کاهشی Decreasing	0.17	ns	Increasing افزایشی

خروجی مدل IHA و مقایسه دبی جریان رودخانه هلیل-رود در دوره طبیعی جریان (قبل از احداث سد جیرفت) و دوره جریان تغییریافته (پس از بهره‌برداری) در جدول شماره ۴ ارائه شده و نشان می‌دهد که در دوره پس از بهره‌برداری و آغاز رهاسازی تنظیمی جریان از سد جیرفت به پایین‌دست، هر ۳۳ پارامتر ویژگی جریان در ۵ گروه اصلی دستخوش تغییر شده‌اند. همانطور که در جدول۴ مشاهده می‌شود پس از بهره‌برداری سدهای جیرفت و بافت، ۱۹ پارامتر تغییرات شدید، ۱۱ مورد تغییرات متوسط و ۳ پارامتر تغییرات کم هیدرولوژیکی داشته‌اند.

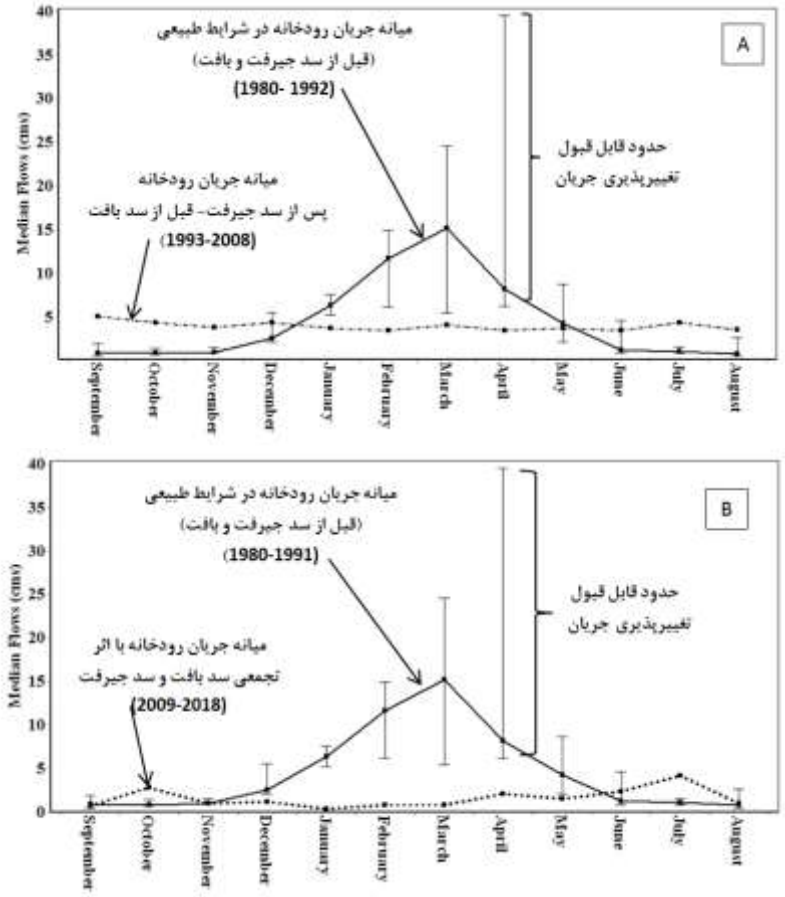
جدول ۴- نتایج تغییرات ۳۳ پارامتر هیدرولوژیکی با مدلIHA در ایستگاه حسین‌آباد

Table 4. The results of 33 indicators of hydrologic alteration by IHA model in Hossein-Abad hydrometric station

Station Name / Index Group	Index parameters	Natural flow (Before dam)			Altered flow (After dam)			RVA		Hydrologic alteration%
		Mean.	Min.	Max.	Mean	Min.	Max.	Mi.	Max.	
Group 1 Magnitude of monthly water conditions	1- Mean flow in January	6.33	2.9	24.8	2.64	0	101	5.19	7.6	-91.85-H
	2- Mean flow in February	11.66	3.04	33.9	1.7	0	254.5	6.19	14.91	-67.41-H
	3- Mean flow in March	15.2	3.44	96.25	2.92	0	666	5.49	24.6	-51.11- M
	4- Mean flow in April	8.22	2.24	112.6	2.9	0	92.18	6.16	39.52	-67.41- H
	5- Mean flow in May	4.25	1.22	25.16	3.5	0	74.79	2.08	8.71	-18.25- L
	6- Mean flow in June	1.25	0.46	10.31	2.9	0	29	0.85	4.61	-10.37-L
	7- Mean flow in July	1.08	0.25	17.77	4.35	0	34.6	0.81	1.57	-100- H
	8- Mean flow in August	0.8	0.2	8.4	3.5	0	27.8	0.51	2.6	-67.41-H
	9- Mean flow in September	0.9	0.3	3.84	3.93	0	36.2	0.51	1.8	-75-H
	10- Mean flow in October	0.83	0.48	4.3	3.94	0	71.6	0.67	1.41	-91.85-H
	11- Mean flow in November	1	0.8	6.6	2.43	0	51.15	0.97	1.55	-91.85-H
	12- Mean flow in December	2.58	0.9	2.78	2.78	0	35	2.09	5.54	42.96-M
Group 2 Magnitude and duration of annual extreme water conditions	13 - 1 d minimum	0.24	0.01	2.55	0	0	5.52	0.2	0.35	-100-H
	14- 3 d minimum	0.3	0.01	2.6	0.93	0	5.1	0.22	0.4	-100-H
	15- 7 d minimum	0.31	0.16	3.11	1.18	0	5.12	5.12	0.29	-100-H
	16- 30 d minimum	0.56	0.18	4.45	1.61	0	5.57	0.48	0.73	-67.41-H
	17- 90 d minimum	1.04	0.64	6.62	1.99	0	16.45	0.86	1.68	-42.96-M
	18- 1 d maximum	82.84	29.6	198.1	31.25	2.96	1808	53.54	168.2	-67.41-H
	19- 3 d maximum	58.45	25.53	151.8	17.15	2.93	1679	40.59	114.2	-67.41-H
	20- 7 d maximum	34.58	18.66	143.6	14.39	2.89	1401	33.2	83.13	-59.26-M
	21- 30 d maximum	27.11	10.32	121.3	7.36	2.66	946.5	20.95	53.27	-51.11-M
	22- 90 d maximum	18.93	6.2	76.19	6.64	1.63	424.8	12.97	27.94	-67.41-H
	23- Base flow index	0	0	0	1	0	358	0	0	-51.85-M
	24- Zero-flow day	0.05	0.02	0.15	0.13	0	0.81	0.04	0.08	-91.85-H
Group 3 Timing of annual extreme water conditions	25- Date of minimum	260	187	308	267	11	331	237	267	-34.81-M
	26- Date of maximum	38	4	341	202	43	344	25	92	-51.11-M
Group 4 Frequency and duration of high and low pulse	27- Low-pulse count	6	0	13	1	0	50	3	6	-91.85-H
	28- Low-pulse duration	10	1	63	4	2	182	5	18	-59.26-M
	29- High-pulse count	7	1	14	4	0	24	5	9	-79.63-H
	30- High-pulse duration	2	1	95	3	1	98	1	3	-59.26-M
Group 5 Rate and frequency of water condition change	31- Rise rate	0.48	-1.5	-0.1	-0.7	-6.5	-0.01	-0.7	0.31	-42.96-M
	32- Fall rate	0.35	0.13	3.3	0.8	0.01	14.65	0.24	0.86	-18.52-L
	33- Number of reversals	82	34	116	80	5	172	77.28	91.68	-75.56-H

براساس شکل ۲ (A) ، جریان تنظیمی رها شده از سد جیرفت، معکوس با رژیم طبیعی جریان رودخانه عمل کرده است. به طوری که دبی جریان بعد از شروع بهره-برداری سد جیرفت، در ماه‌های خشک سال متناظر با اواخر خرداد تا اواسط آذر (Sep, Oct, Nov, July, August) -دربرگیرنده تابستان و پاییز- خارج از محدوده قابل قبول تغییرپذیری افزایش یافته است. این در حالی است که در فصل‌های توام با بارندگی (زمستان و بهار) و ماه‌های مرطوب سال متناظر با ماه‌های دی تا اردیبهشت (May, Jan, Feb, Apr)، جریان آبدهی در رودخانه خارج از محدوده قابل قبول تغییرپذیری کاهش داشته است (جدول ۴). توجه به این نکته ضروری است که پس از

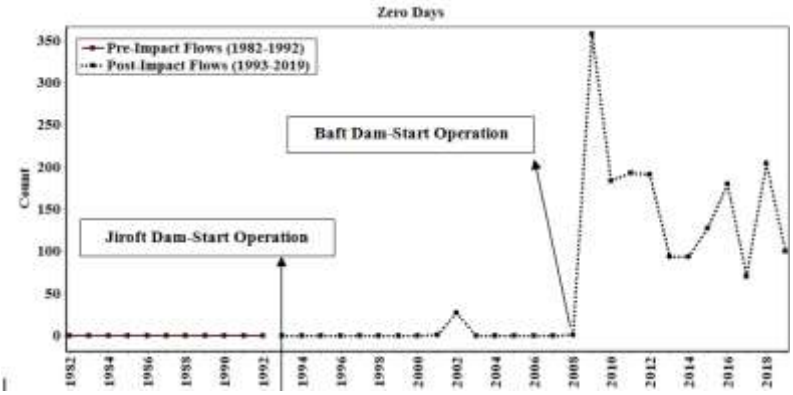
بهره‌برداری سد بافت (۲۰۰۸) که در بالادست سد جیرفت واقع شده (شکل ۲(B))، جریان دبی آب دچار افت شدیدتری شده و با حداقل دامنه قابل قبول تغییرپذیری فاصله بیشتری پیدا می‌کند.



شکل ۲ – تغییرات جریان ماهانه رودخانه هلیل‌رود در دوره‌های پیش و پس از احداث سد جیرفت و بافت در محدوده RVA

Fig. 2- Monthly flow alteration of Halil-Rud River in periods before and after Jiroft and Baft Dam with RVA boundaries

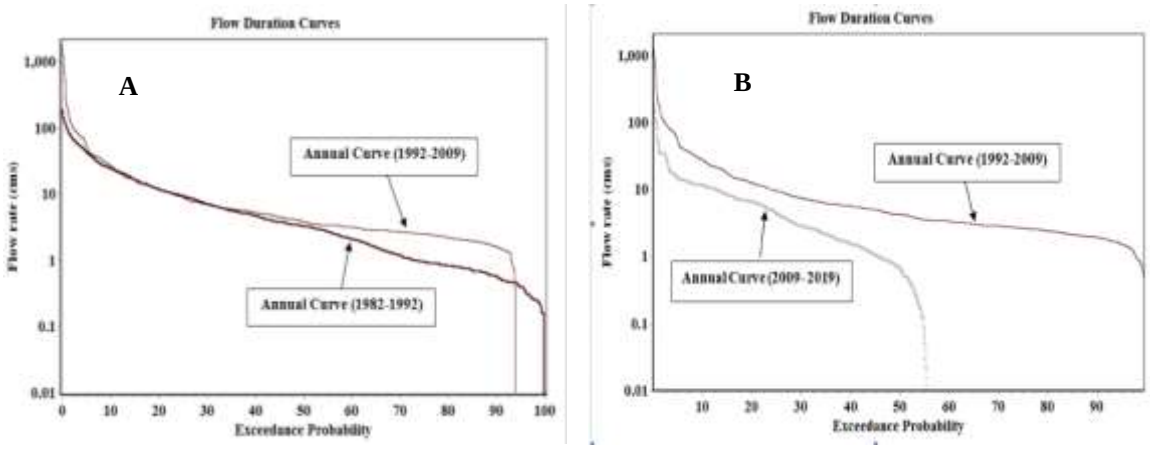
بررسی نمودار جریان صفر (شکل ۳) نیز نشان می‌دهد تغییرات آبدهی پس از بهره‌برداری سد جیرفت به گونه‌ای نبوده که جریان رودخانه را به صفر برساند اما از سال ۱۳۸۸و با آغاز بهره برداری سد بافت، ضمن کاهش شدید دبی، ثبت روزهای صفر و خشکی هلیل‌رود به‌صورت قابل توجهی آغاز شده است؛تاثیر تجمعی این سدها به گونه‌ای بوده است که دبی جریان در پایین‌دست سد جیرفت و رودخانه هلیل‌رود دیگر به‌صورت پیوسته برقرار نبوده است.



شکل ۳ – تعداد روزهای جریان صفر در ایستگاه حسین‌آباد

Fig. 3- Zero current day count at Hossein-Abad station

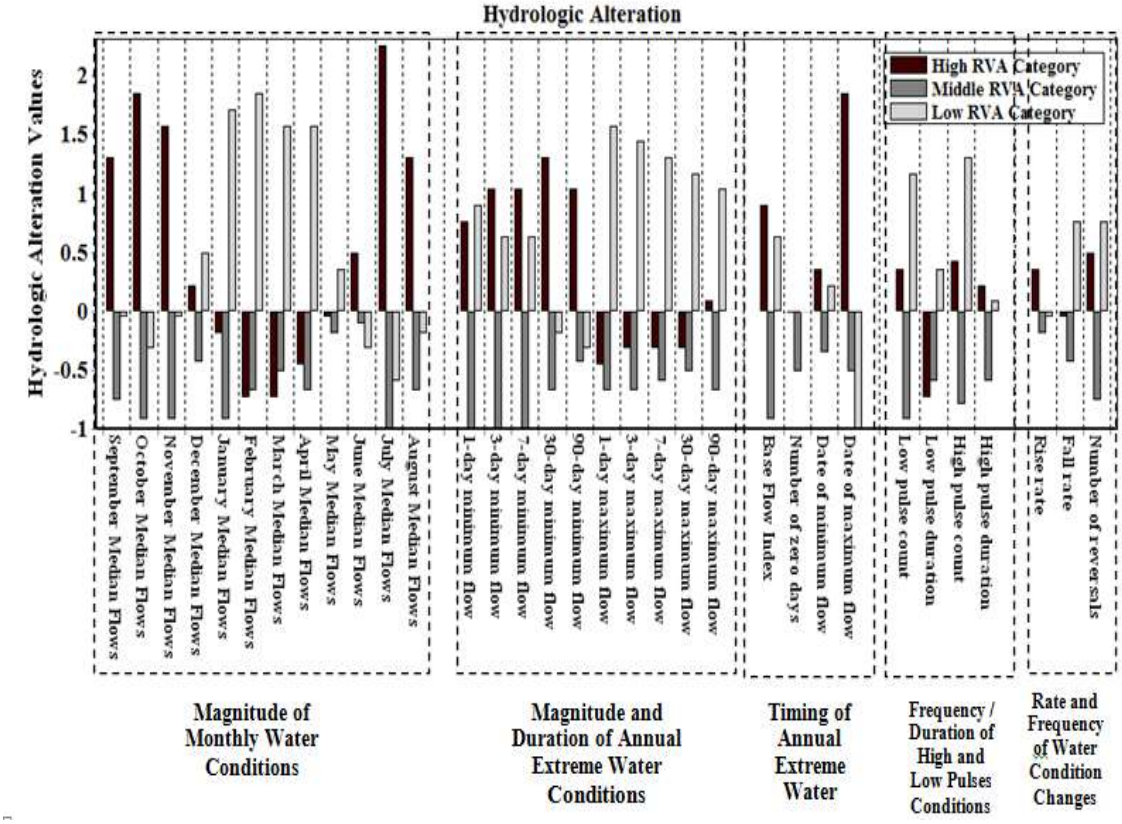
مقایسه منحنی‌های احتمال وقوع جریان در دو بازه زمانی مورد مطالعه (قبل و پس از ساخت سدها) که در شکل ۴ ارائه شده، نشان می‌دهد پس از بهره‌برداری سد جیرفت، با وجود روند کاهشی آبدهی رودخانه، احتمال وقوع جریان (شکل ۴، A) همچنان تا حدود ۹۰ درصد برای جریان‌های ۱ تا ۱۰ مترمکعب بر ثانیه برقرار بوده است. در حالی که پس از احداث سد بافت چنانکه در شکل ۴ نمودار B مشاهده می‌شود احتمال وقوع جریان‌های مذکور تا کمتر از ۴۰ درصد کاهش یافته است.



شکل ۴ – منحنی‌های احتمال وقوع جریان در دوره‌های زمانی قبل و پس از ساخت سدها در ایستگاه حسین‌آباد

Fig. 4- Exceedance probability flow duration curves at Hossein-Abad station

شکل شماره ۵ نشان می‌دهد که به‌طور کلی با احداث سدهای جیرفت و بافت، پالس‌های حد پایین و بالای جریان به شدت تغییریافته و جریان‌های حداقل یک روزه، سه روزه، هفت روزه، سی روزه و نود روزه نیز تغییرات قابل توجهی داشته‌اند.



شکل ۵ – شدت تغییرات هیدرولوژیک در ایستگاه حسین‌آباد (پایین‌دست سدجیرفت)

Fig. 5- Hydrological alteration at Hossein-Abad station (downstream of Jiroft Dam)

بر اساس مجموع نتایج به دست آمده در پنج گروه شاخص جریان (مقدار، تداوم، زمان‌بندی، فراوانی و میزان نوسانات) تغییرات کم تا شدید در محدوده قابل‌قبول برای تغییرپذیری در جریان رودخانه هلیل‌رود، به‌وقوع پیوسته است که اثرات اکولوژیکی ناشی از این تغییرات برای گروه‌های مختلف پنجگانه به صورت زیر است:

تغییرات پارامترهای گروه یک شامل آبدهی‌های ماهانه، اثرات منفی بر سلامت زیستگاه‌های داخل کانال رودخانه، ریپارین رودخانه، تامین رطوبت خاک و دسترسی پذیری به آب و غذا برای جانوران و گیاهان دارد؛ از سویی مقدار دبی آب اهمیت بسزایی در بقای گیاهان و فیتوپلانکتون‌های آب و کمک به فتوسنتز دارد که خود تضمین‌کننده حجم اکسیژن محلول و کیفیت آب می‌باشد (Gao *et al*., 2009; Richter *et al*., 2003; Richter *et al*., 1998; Smakhtin *et al*., 2006; The Nature Conservancy, 2009). تغییرات در شاخص‌های گروه دوم به گونه‌ای است که حداقل و حداکثر جریان‌های ۱، ۳، ۷، ۳۰ و ۹۰ روزه و تعداد روزهای جریان صفر و جریان پایه تغییراتی در رده شدید و متوسط در دوره پس از بهره‌برداری سدها نشان داده‌اند که مهم‌ترین اثر آن وقوع تغییر شدید در قدرت خودپالایی رودخانه و کاهش آن است که مستقیماً بر کلیه گونه‌های گیاهی و جانوری اکوسیستم آبی و نیز ریپارین آن اثرگذار است. همچنان که بر تعادل در رقابت، میزان تنش و تحمل موجودات، توسعه جوامع گیاهی، تعیین‌کننده ساختار مرفولوژیک رودخانه، حجم مبادلات مواد مغذی بین رودخانه و دشت سیلابی و حاصلخیزی خاک و هوادهی بسترهای تولیدمثلی به ویژه برای موجودات کفزی در کانال اصلی رودخانه نیز اثرگذار است (Poff *et al*., 2007; Richter *et al*., 2003; Smakhtin *et al*., 2006).

تغییرات پارامترهای گروه سوم که با عنوان زمان وقوع جریان‌های حدی از آن یاد می‌شود و نشان‌دهنده تاریخ وقوع سیلاب‌های کمینه و بیشینه است بر پایداری اکولوژیک اکوسیستم رودخانه اثرات منفی دارد؛ چرا که چرخه حیات موجودات آبزی در تطابق با زمان وقوع جریان‌های حدی در شرایط طبیعی شکل گرفته و تغییر این تاریخ به منزله اعمال استرس به چرخه حیات گونه‌های زیستی است که مشخص نیست گونه بتواند خود را با آن سازگار نماید و چه بسا منجر به نابودی گونه‌هایی شود که فرصت تطابق با این تغییر را نمی‌یابند. اثر مهم دیگر آن نیز بر مکانیزم‌های رفتاری ماهیان و نیز زمان تخم‌ریزی به ویژه برای ماهیان مهاجر است که به‌طور کلی تغییر جریان حدی ممکن است منجر به از دست رفتن بازه زمانی مناسب تخم‌ریزی برای ماهیان مهاجر شود (Smakhtin *et al*., 2006; Xue *et al*., 2017). تغییرات گروه چهارم که دربرگیرنده تعداد پالس‌های کم و زیاد جریان (که متفاوت از سیل‌های کوچک و بزرگ است) در طول سال و نیز میانگین مدت زمان تداوم آنها است، اثرات منفی بر تبادل مواد مغذی و ارگانیک و رطوبت خاک خواهد داشت (Smakhtin *et al*., 2006; Xue *et al*., 2017). پارامترهای گروه پنجم، بیان‌کننده نرخ و فراوانی تغییرات وضعیت جریان و تعیین‌کننده بافت رسوبی کانال رودخانه، شکل‌گیری جزایر و نقش آنها در توسعه جوامع گیاهی و جانوری وابسته به آب و به‌ویژه موثر بر موجودات کم‌تحرک است. بطور کلی نتایج به دست آمده در خصوص اثرات منفی ناشی از تغییرات ویژگی‌های هیدرولوژیک جریان پس از بهره‌برداری سدها توسط مدل IHA به اثبات رسیده و تبعات منفی و تجمعی آن بر ساختار و عملکرد اکولوژیک رودخانه هلیل‌رود در تطابق با نتایج پژوهش‌های مشابه در خصوص اثرات سدها بر تغییرات هیدرولوژیک (Habibiand M. Yasi, 2019; Khosravi *et al*., 2019; Mahmoudiyan and Taleb-Bidokhti, 2019; Raoof and Alioghli, 2020) و نیز اثرات اکولوژیک آن‌ها مانند مطالعات انجام شده بر روی رودخانه تریسن (Traisen) در اتریش قابل پیش‌بینی است (Schinegger

et al., 2016). مطالعات انجام شده در رودخانه تریسن نشان داده با تغییرات دبی جریان و مشخصات آن و مخصوصاً خشک شدن رودخانه، نابودی و از دست رفتن تنوع زیستی قطعی است. چنین تغییراتی در ساختار و عملکرد رودخانه هلیل رود نیز به قوع پیوسته است و در شکل شماره ۷ (ب) نیز نشان داده شده است.

شکل ۷ – از دست رفتن تنوع زیستی در اثر خشک شدن رودخانه، الف(بالا): رودخانه تریسن در اتریش (Schinegger et al., 2016)؛ ب(پایین): هلیل رود در ایران

Fig. 7- Hydrological alteration at Hossein-Abad station (downstream of Jiroft Dam)

نتیجه‌گیری

چالش کمبود منابع آب در حوضه هلیل‌رود در شرایطی به‌وقوع پیوسته که این حوضه هم‌زمان متاثر از بحران‌های طبیعی و انسانی متعدد است که بطور مستقیم یا غیرمستقیم به نحوه مدیریت و مصرف منابع آب در این حوضه مرتبط هستند. با توجه به نقش کلیدی سد جیرفت در جهت‌دهی به توسعه‌های انسانی در حوضه، تغییرات رژیم جریان در بازه زمانی ۹۸-۱۳۶۰ با نرم افزار IHA7.1 و پارامترهای محدوده تغییرپذیری در دو بازه قبل و بعد از بهره‌برداری سد جیرفت به خوبی نشان داد گرچه بهره‌برداری از سد جیرفت، رژیم طبیعی جریان را دستخوش تغییرات نموده است، اما با آغاز بهره‌برداری از سد بافت بر روی رودخانه دائمی بافت که از سرشاخه‌های حیاتی هلیل‌رود نیز به شمار می‌رود، ویژگی‌های طبیعی جریان در رودخانه مذکور بطور کامل در پایین‌دست، دستخوش تغییرات شده است. اگرچه موارد دیگری مانند وقوع خشکسالی و نیز تغییر اقلیم می‌تواند بر چرخه اکوهیدرولوژیک منطقه مورد مطالعه اثرگذار باشد؛ اما نقش اثرات تجمعی احداث سدها بیش از موارد فوق‌الذکر می‌باشد. به طوری که حتی در صورت عدم وقوع تغییرات اقلیمی، خشک شدن رودخانه و روزهای صفر جریان در اثر وجود سدهای زنجیره‌ای همچنان قابل مشاهده خواهد بود. با درنظرگرفتن مجموعه درهم پیچیده از مشکلات، چالش‌ها و بحران‌های مرتبط با منابع آب، بازنگری در

برنامه مدیریت تخصیص سدهای موجود با درنظر گرفتن روند معنادار و کاهشی دبی جریان آب در رودخانه های بالادست سدها، ارزیابی اثرات تجمعی سدهای زنجیره‌ای و محاسبه نیاز زیست‌محیطی با روش‌های جدید و با تاکید بر محدوده قابل قبول برای تغییرپذیری که متناسب با نیازهای اکولوژیک رودخانه باشد، از مهم‌ترین اقدامات اولیه برای برون‌رفت از بحران آب در این محدوده است. علاوه بر موارد فوق، تهیه راهبردهای تاب‌آوری و سازگاری با تغییرات اقلیمی و نیز الزامات قانونی برای ذخیره‌سازی آب توسط سد و بندهای جهاد کشاورزی در چهارچوب محاسبات تخصیص وزارت نیرو از دیگر پیشنهادات موکد برای مدیریت بحران آب در این منطقه است. همچنان که بازنگری در اجرای طرح‌های سدهای مخزنی بزرگ و در دست مطالعه در سطح حوضه با درنظرگرفتن شرایط بحرانی رودخانه‌ها و افت معنادار دبی جریان از نخستین ضرورت‌های اجرایی به منظور جلوگیری از هدر رفت سرمایه‌ها و جایگزینی آن با راهبردهای غیرسازه‌ای در حوضه هلیل‌رود است. در خاتمه نگارندگان بسیار تاکید دارند که بازنگری مجدد در آمایش سرزمین حوضه و لحاظ نمودن محدودیت‌های منابع آب در آن نیز بسیار ضروری است.

سپاسگزاری

نویسندگان مقاله برخورد لازم می‌دانند ضمن سپاسگزاری از داوران محترم که با راهنمایی‌های ارزشمند خود بر غنای این پژوهش افزوده‌اند، مراتب قدردانی خود را از حمایت‌های پژوهشکده علوم محیطی دانشگاه شهیدبهشتی در راستای اجرای این پژوهش، اعلام نماید.

منابع

Adeli Sardooei, M., Asadi, A., Khalil, Kh., Barati, A.A. and Khosravi, H., 2021. Investigating land-use changes in Jiroft plain in the present and future period with a look at agricultural land-use suitability. Iranian Journal of Range and Watershed Management. 73(4), 893-913 (In Persian with English abstract).

Cardoso, J.S.L.L., 2013. Application of hydrologic indicators alteration in Portuguese rivers impacted by dams, MS.c. Thesis. University of Católica Portuguesa.

Chen, Y. D., Yang, T., Xu, C. Y., Zhang, Q., Chen, X., & Hao, Z. C. (2010). Hydrologic alteration along the Middle and Upper East River (Dongjiang) basin, South China: a visually enhanced mining on the results of RVA method. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, *24*, 9-18.

Dyson, M., Bergkamp, G. and Scanlon, J., 2008. Flow– the Essentials of Environmental Flows. (Second Eds). Gland, Switzerland, IUCN.

Ebrahimi khosfi, Z. and Mirakbari, M., 2020. Assessment the impact of climate change on the drought of Jazmourian wetland by using CanESM2 model. Iranian Journal of Desert Management 14, 149-166 (In Persian with English abstract).

Esfandiyari, A. and Araghinejad, S., 2006. Integrated water resources management is an approach to sustainable development. Iranian Journal of Mahab-Ghodss. 37, 18-31 (In Persian with English abstract).

Eskandari Damaneh, H., Zehtabian, Gh., Salajeghe, A., Ghorbani, M. and Khosravi, H., 2018. Assessing the effect of land use change on groundwater quality and quantity (case study: west basin of Jazmurian wetland). Iranian Journal of Range and Watershed Management. 7(3), 563-578 (In Persian with English abstract).

Fooladvand, S., Sayyad, Gh., Hemad, K. and Mooazed, H., 2011. Analysis the effects of Karkheh dam on discharge of Hourol-Azim wetland. Iranian Journal of Engineering and Irrigation Sciences. 36 (4), 1-8 (In Persian with English abstract).

Gao, Y., Vogel, R.M., Kroll, C.C., Poff, N.L. and Olden, J.D., 2009. Development of representative indicators of hydrologic alteration. Journal of Hydrologic. 374, 136-147.

Ghasemiye, H., Asadi, O., Mohammadi, T. and Salahshoor, M., 2016. Challenges of integrated water resources management. In Proceeding of 11th National Conference on Watershed Management Sciences and Engineering of Iran. 19 th- 21 th April, Yasuj, Iran. p. 358-366.

Ghavidel Rahimi, Y., Ahmadi, M., Hatami, D. and Rezaie, M., 2014. Identification of synoptic patterns of heavy rainfall of destructive flood in Jiroft city. Iranian Journal of Geography. 12 (41), 161-178 (In Persian with English abstract).

Habibi, S. and Yasi, M., 2019. Determination of environmental flow contribution of Gadar River to the Urmia Lake using echo hydrological methods. Iranian Journal of Water & Soil. 29(2):73-84 (In Persian with English abstract).

Hejam, S., Khoshkhooy, Y. and Shamseddinvandi, R., 2008. Analysis of seasonal and annual rainfall changes in several selected stations in the central basin of Iran using nonparametric method. Iranian Journal of Geographic Research. 44:157-168 (In Persian with English abstract).

Hu, W. W., Wang, G. X., Deng, W. and Li, S. N., 2008. The influence of dams on ecohydrological conditions in the Huaihe River basin, China. Journal of Ecological Engineering, 33(3-4): 233-241.

Iran Ministry of Energy, 2011. Environmental flow required for aquatic ecosystems guideline. Publication No. 557 Vice President for Strategic Planning and Supervision, 127p (In Persian with English abstract).

Jalali, M., Azaranfar, A. and Afzali, R., 2008. Development of hydropower capabilities of integrated water resources management model of WEAP. In Proceeding of 3ed Conference of Water. 15 th- 17 th October, Tabriz, Iran. p. 1-9. (In Persian with English abstract).

Jamab Consulting Engineering Company, 2011. Geology and Soil Structure of Jazmurian basin. 125p (In Persian with English abstract).

Jamab Consulting Engineering Company, 2012. Update Integrated Water Resources Management Report of Jazmurian basin.79p (In Persian with English abstract).

Khanmohammdy fallah, S. and shokoohi, A., 2018. Using RVA model for defining rivers' ecological regime for determining environmental flow. Iranian Journal of Iran-Water Resources Researches. 14(2):231-241 (In Persian with English abstract).

Khosravi, G., Sadodin, A., Ownegh, M., Bahremand, M. and Mostafavi, H., 2019. Classification and identification of changes in river flow regime using the Indicators of Hydrologic Alteration (IHA) case study (the Khormarud River- Tilabad Watershed- Golestan Province). Iranian Journal of Eco-Hydrology. 6(3), 651-671 (In Persian with English abstract).

Khorushi Isaloo, S., Mostafazadeh, R., Esmaili, A. and Raoof, A., 2015. River health, its importance and applications. Journal of development of Rangeland, 13(4): 35-40.

Lettenmaier, D. P., Wood, E. F. and Wallis, J.R., 1994. Hydro-climatological trends in the Continental United States (1948-88). Journal of Climate. 7:586-607.

Lin, Q., Wua, Z., Singh, V.P., Sadeghi, S.H.R., He, H. and Lu, G., 2017. Correlation between hydrological drought, climatic factors, reservoir operation, and vegetation cover in the Xijiang Basin, South China. Journal of Hydrology. 549, 512-524.

Liu, Y., Zhao, J. and Zheng, H., 2018. Piecewise-linear hedging rules for reservoir operation with economic and ecologic objectives. Journal of Water, 10(7): 865.

Loucks, D.P., 2000. Sustainable water resources management. Journal of Water International. 25(1), 3-10.

Madadi, H., Rahmatipur, M. and Sepahvand, M.A., 2012. Analysis the effects od Maroon dam on Maroon river by RVA in the process of sustainable development. In proceeding 1st conference of strategies to provide sustainable development, 16 th – 18 th March, Tehran, Iran. p. 1-8. (In Persian with English abstract).

Mahmoudiyan, L. and Taleb-Bidokht,i N., 2012. Assessment the effects of river management on eco-hydrological condition. In Proceeding of 1th International Conference on Environmental Crisis and Its Solutions. 13 th February, Kish, Iran. p. 1-9. (In Persian with English abstract).

Mahmoudiyan, L. and Taleb-Bidokhti, N., 2019. Environmental flow of Neka-River with different scenarios. In proceeding of 4th Conference on Environmental Engineering. 1 st November, Tehran, Iran. p. 1-12. (In Persian with English abstract).

Magilligan, F. J. and Nislow, K. H., 2005. Changes in hydrologic regime by dams. Journal of Geomorphology, 71(1-2), 61-78.

Management and Planning Organization of Kerman Province, 2016. Land use planning report of Kerman Province 1-154 (In Persian with English abstract).

Maingi, J.K. and Marsh, S.E., 2002. Quantifying of hydrologic impacts following dam construction along the Tana River, Kenya. Journal of Arid Environments, 50(1): 53-79.

Mirzaei, A., Zibaei, M., Esmaeili, A. and Bakhshoodeh, M., 2019. Land use changes prediction and environmentally unstable areas prioritization of Halil-Rud river basin. Iranian Journal of Agricultural Economics and Development Research. 50(2), 231-248 (In Persian with English abstract).

Mitchell, J.M., Dzerdzeevskii, B., Flohn, H., Hofmeyr, W.L., Lamb, H.H., Rao, K.N. and Wallen, C.C., 1966. Journal of Climate Change, WMO Technical Note. No. 79, World Meteorological Organization, 1-79.

Morid, R. and Eagderi, S., 2016. Impact assessment of climate change on environmental flows by using hydrological indicators (Case study, Kordan River). Iranian Journal of Natural Environment. 69(4), 1109-1127 (In Persian with English abstract).

Nasiri Khiyavi, A., Moatafazade, R., Esmaili, A., Ghaffarzadeh, O. and Golashan, M., 2019. Changes in environmental flow components under the influence of Sabalan dam in Qarasu River in Ardabil Province. Iranian Journal of Watershed Management. 19, 85-94 (In Persian with English abstract).

Naderi, M.H., Amiji, M., Khoshravesh, M. and

Rajabizadeh, Y., 202. Analysis of Hydrologic and Hydraulic charactristics of uptimom Environmental flow for conservation of riverine ecosystem of Qaresoo. Iranian Journal of Irrigation and Draninage. 2(14), 464-481. (In Persian with English abstract).

Pourseyadi, A. and Kashkuli, A., 2012. Studying of groundwater conditions in Jiroft basin with Modflow. Iranian Journal of Irrigation Science and Engineering. 35(2), 51-63 (In Persian with English abstract).

Poff, N. L., Olden, J. D., Merritt, D. M. and Pepin, D. M., 2007. Homogenization of regional river dynamics by dams and global biodiversity implications. In Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. 104, 5732–5737.

Raoof, M. and Alioghli, S., 2020. Estimation of environmental flow of the Balikhlochai River and evaluation impact of Yamchi dam operation on hydrological and environmental regime of the river. Iranian Journal of Natural Environment. 73(2), 299-312 (In Persian with English abstract).

Rashki, A., Arjmand, M. and Kaskaoutis, D.G., 2017. Assessment of dust activity and dust-plume pathways over Jazmurian Basin, southeast Iran. Aeolian Research, 24, 145–160. doi:10.1016/j.aeolia.2017.01.002.

Regional Water Company of Kerman Province, 2006. Water Resources of Jazmurian Basin Report, 56p (In Persian with English abstract).

Regional Water Company of Kerman Province, 2017. Study Report of Water Resources of Jazmurian Basin, 86p (In Persian with English abstract).

Regional Water Company of Kerman, 2018. Water Resources of Upper Watershed of Jiroft Dam Study Report, 86p (In Persian with English abstract).

Richter, B.D., Baumgartner, J.V., Braun, D.P. and Powell, J., 1998. A spatial assessment of hydrologic alteration within a river network. Journal of Research & Management. 14:329– 340.

Richter, B.D., Baumgartner, J.V., Powell, J. and Braun, D.P., 1996, A method for assessing hydrologic alteration within ecosystems. Journal of Conservation Biology. 10(4):1163-1174.

Richter, B.D., Baumgartner, J.V., Wigington, R. and Braun, D.P., 1997. How much water does a river need, Journal of Freshwater Biology. 37, 231-249.

Richter, B.D., Mathews, R., Harrison, D.L. and Wigington, R., 2003. Ecologically sustainable water management, managing river flows for ecological integrity. Journal of Ecological Application. 13(1), 206-244.

Saeedpanah, I. and Badalzadeh, J., 2014. Investigating the obstacles to the implementation of integrated water resources management in Iran. In Proceeding of National Conference on Architecture, Civil Engineering and Urban Modern Development. 12 th May, Tabriz, Iran. p. 1-7. (In Persian with English abstract).

Shabani Gorji, k. and Sahebzadeh, B., 2015. Effect of drought on Jazmourian ecosystem. In Proceeding of International Conference of Civil Engineering and Environmental Technologies. 5th – 6 th May, Tehran, Iran. p. 1-10. (In Persian with English abstract).

Schinegger, R., Palt, M., Segurado, P. and Schmutz, S., 2016. Untangling the effects of multiple human pressure and their impacts on fish assemblages in European running waters. Journal of Science of the Total Environment. 573, 1079-1088.

Shrestha, R. R., Peters, D. L. and Schnorbus, M. A., 2014. Evaluating the ability of a hydrologic model to replicate hydro-ecologically relevant indicators. Journal of Hydrological Process. 28, 4294-4310.

Smakhtin, V.U., Shilpakar, R.L. and Hughes, D.A., 2006. Hydrology based assessment of environmental flows: an example from Nepal. Journal of Hydrological Sciences. 51(2):207-222.

Song, X., Zhuang, Y., Wang, X., and Li, E., 2020. Analysis of hydrologic regime changes caused by dams in China. Journal of Hydrologic Engineering, 25(4), 1-13.

Tayee Semiromi, S. and Moradi, H., 2013. Analysis of hydrologic alteration of Yar-Neyshabur River under Climate Change scenarios. Iranian Journal of Human & Environment. 29, 1-19.

The Nature Conservancy, 2009. Indicators of Hydrologic Alteration Version 7.1 User's Manual, 81p, from https://www.conservationgateway.org/Documents/IHAV7.pdf.

Xue, L., Zhang, H., Yang, C., Zhang, L. and Sun, C., 2017. Quantitative assessment of hydrological alteration caused by irrigation projects in the Tarim River basin(China). Journal of Scientific Reports. 7(4291), 1-13.

Yang, Y. C. E., Cai, X.M. and Herricks, E.E., 2008. Identification of hydrologic indicators related to fish diversity and abundance, A data mining approach for fish community analysis. Journal of Water Resource Restoration. 44, 2440-452.

Yekom Consulting Engineering Company, 2008. Study Report on Groundwater Resources of Halil-Rud River,189p (In Persian with English abstract).

Yue, S. and Pilon, P., 2004. A comparison of the power of the t test, Mann-Kendall and bootstrap tests for trend detection. Journal of Hydrological Science. 49(1), 21- 37.

Zarei, A., Sayari, N., Bakhtiari B. and Ahmadi, M.M., 2021. Modeling of precipitation-runoff for predicting upcoming flow stream in Halil-Rud basin. Iranian Journal of Ecohydrology. 8(1), 143-160 (In Persian with English abstract).

Zhao, Q., Liu, S., Deng, L., Dong, S., Yang, J. and Wang, C., 2012. The effects of dam construction and precipitation variability on hydrologic alteration in the Lancang River Basin of southwest China, Journal of Stochastic Environmental Research and Risk Management. 26, 993-1011.

Environmental Sciences Vol.21 / No.1 / Spring 2023

65-86

Original Article

Assessment of hydro-ecological alteration of Halil-Rud Basin and analysis of the role of operating dams in causing it

Nahid Ahmadi,[1] Hossein Mostafavi,[1*] Khosro Piri[1] and Hossein Zeinivand[2]

[1] Department of Biodiversity and Ecosystem Management, Environmental Sciences Research Institute, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran
[2] Department of Rangeland and Watershed Management, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Lorestan University, Khorram-Abad, Iran

Received: 2022.08.29 Accepted: 2022.10.22

Ahmadi, N., Mostafavi, H., Piri, Kh. And Zeinivand, H., 2023. Assessment of hydro-ecological alteration of Halil-Rud Basin and analysis of the role of operating dams in causing it. Environmental Sciences. 21(1): 65-86.

Introduction: However the role of water in sustainable development is vital, the launched infrastructure projects of Integrated Water Resources Management Plans in recent years have not been able to completely maintain the balance between human consumption for socio-economic activities and the water needs of natural ecosystems to guarantee the sustainable life for riverine ecosystems. In this regard, this research investigated the hydrological effects and ecological consequences of the construction of dams in the upstream basin of Jiroft Dam as the key water supply zone in the western Jazmurian watershed, which is also known as Halil-Rud River.

Material and methods: In this research, the significance of the long-term changes of the mean annual discharge in the rivers of the study area at the hydrometric stations of Solatni, Baft, Hanjan, Meydan, Qale-Rigi, Konarooiye and Hossein-Abad, as well as the alterations in the mean annual precipitation of rainfall gauges in the period of 38 years (1980-2018) have been analyzed by Mann-Kendall Test and then 33 hydrological parameters (based on the daily discharge of Hossein-Abad hydrometric station in the mentioned period) as indicators of ecological needs (which is affected by the Baft and Jiroft reservoir dams) have been analyzed by using the variability range approach and IHA software in two periods before and after the construction of the dams.

[*] Corresponding Author: *Email Address*. H-mostafavi@sbu.ac.ir

Results and discussion: According to the Mann-Kendall test results, although the mean annual discharge in the rivers upstream of Jiroft dam has had a significant drop at the level 95 and 99% of discharge during the past 38 years, the trend of change in the mean annual precipitation in the same period, except one station (Hanjan), was not significant and this difference was due to the negative effects of dams construction and it was also confirmed by the output of the IHA model. It should be noted that based on the output of the mentioned model, 33 hydro-ecological features of Halil-Rud river flow showed fundamental alterations since the operation of Jiroft Dam (1992), but the operation of Baft Dam upstream of Jiroft Dam in 2008 has led to intense negative effects of flow characteristics (outside the acceptable range of ecological variability) in Halil-Rud River.

Conclusion: In order to prevent the magnification of the water crisis, the cumulative effects of the construction of chain dams should be considered using hydro-ecological approaches, as well as the water allocation programs, especially the environmental flows should be revised according to the upstream developments of each dam basin, so that the sustainable socio-economic needs as the goals of integrated water resources management would be provided and also the health and survival of the natural ecosystem would be guaranteed.

Keywords: Hydro-ecology, Dam, Integrated water resources Management, IHA, RVA.