

## طبقه‌بندی و تعیین تغییرات رژیم جریان آب رودخانه‌ای با استفاده از شاخص‌های هیدرولوژیکی IHA (مطالعه موردی: رودخانه خرمارود - استان گلستان)

غلامرضا خسروی<sup>۱</sup>، امیر سعدالدین<sup>۲\*</sup>، مجید اونق<sup>۳</sup>، عبدالرضا بهره‌مند<sup>۲</sup>، حسین مصطفوی<sup>۴</sup>

۱. دانشجوی دکتری علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

۲. دانشیار گروه آبخیزداری و مدیریت مناطق بیابانی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

۳. استاد گروه آبخیزداری و مدیریت مناطق بیابانی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

۴. دانشیار گروه تنوع زیستی و مدیریت اکوسیستم‌ها، پژوهشکده علوم محیطی، دانشگاه شهید بهشتی تهران

(تاریخ دریافت ۱۳۹۷/۰۸/۲۰؛ تاریخ تصویب ۱۳۹۸/۰۲/۳۰)

### چکیده

در تحقیق حاضر با استفاده از شاخص‌های تغییرات هیدرولوژیکی IHA، تغییرات رژیم هیدرولوژیکی در دو دوره آماری «رژیم جریان طبیعی» و «رژیم جریان تغییر یافته» در ایستگاه هیدرومتری نوده خاندوزه واقع در خروجی حوضه آبخیز تیل‌آباد (استان گلستان) بررسی شد. براساس روش IHA، در مجموع ۶۷ پارامتر آماری توسط نرم‌افزار IHA7 محاسبه شد؛ این پارامترها به دو گروه شاخص‌های تغییرات هیدرولوژیکی IHA در محدوده هدف RVA و مؤلفه جریان محیط زیستی EFCs تقسیم شدند. به منظور تفکیک و تعیین میزان اختلاف معنادار بین مقادیر میانگین دوره با رژیم جریان طبیعی نسبت به دوره رژیم جریان تغییر یافته از آزمون رقم معناداری استفاده شد. برای طبقه‌بندی رژیم جریان نیز روش طبقه‌بندی توسعه یافته توسط کوئسلاتی و همکارانش به کار برده شد. نتایج تحقیق حاضر نشان می‌دهد الگوی رژیم جریان آب سالانه طی دوره آماری ۱۳۴۶ تا ۱۳۹۵ از طبقه «رواناب دائمی PR» به «دائمی با سیلاب‌های ناگهانی PF» تغییر کرده است. فعالیت‌های انسانی در حوضه آبخیز تیل‌آباد سبب کاهش مقادیر جریان‌های کم، دبی حداقل و میانگین ماهانه، مدت زمان تداوم جریان، تعداد پالس‌های جریان‌های زیاد، مدت زمان تداوم سیلاب‌های کوچک و بزرگ، میانگین حداقل جریان‌های یک، هفت و ۹۰ روزه و همچنین میانگین حداکثر جریان‌های هفت و ۹۰ روزه در هر سال آبی شده و به عکس سبب افزایش مقدار و فراوانی دبی اوج سیلاب‌های کوچک و بزرگ، تعداد روزهای جریان با دبی صفر، فراوانی جریان‌های خیلی کم و میانگین حداکثر جریان یک‌روزه در هر سال آبی شده است. همچنین، تغییر مدت تداوم و زمان وقوع رخداد‌های جریان‌های زیاد و خیلی کم سالانه را در پی داشته است.

**کلیدواژگان:** حوضه آبخیز تیل‌آباد، رژیم جریان، IHA، RVA، EFCs.

## مقدمه

بهره‌برداری خردمندان از منابع آب به گونه‌ای که کارکردها و ارزش‌های اکوسیستم‌های آبی حفظ شود، همواره از مهم‌ترین اهداف مدیریت جامع منابع آب به شمار می‌رود. رودخانه‌ها در اغلب نقاط کشور ایران بر اثر دخالت‌های انسانی مانند ساخت سد، افزایش میزان بهره‌برداری از آب برای مصارف کشاورزی و شهری، انتقال آب بین حوضه‌های، تغییرات زیادی یافته‌اند. این دخالت‌ها به بروز آثاری از جمله کاهش کل جریان رودخانه و تحت تأثیر قرار دادن تغییرات فصلی و نیز اندازه و تناوب سیلاب منجر شده است. در بسیاری موارد، این تغییرات آثار منفی‌ای روی خدمات هیدرولوژیکی و اکولوژیکی حوضه آبخیز دارند که به نوبه خود میزان آسیب‌پذیری مردم وابسته به این خدمات را افزایش می‌دهد [۱]. در حال حاضر، به‌روشنی درک شده است که تغییرات انجام‌شده در جریان‌های رودخانه، باید با حفاظت از خدمات اکولوژیکی ضروری وابسته به آب، متوازن شود. جریان‌های مورد نیاز برای حفاظت از این خدمات «جریان‌های محیط زیستی» نامیده می‌شوند و فرایند تعیین این جریان‌ها «ارزیابی جریان محیط زیستی» نام دارد. تعیین و تخصیص جریان محیط زیستی مؤثرترین نگرش برای جلوگیری از آثار مخرب رژیم جریان رودخانه‌هاست [۲]. به منظور ارزیابی رژیم هیدرولوژیکی و تعیین نیاز آب محیط زیستی با توجه به مقیاس مکانی، داده‌های موجود، گام زمانی ارزیابی و ظرفیت‌های فنی و مالی، روش‌های مختلفی به کار برده می‌شوند. حدود ۲۰۷ روش برای ارزیابی رژیم هیدرولوژیکی و تعیین نیاز آب محیط زیستی رودخانه‌ها در ۴۴ کشور از سراسر جهان شناسایی شده است. به طور کلی، این روش‌ها را می‌توان در قالب چهار گونه متمایز شامل روش‌های هیدرولوژیکی، درجه‌بندی هیدرولیکی، شبیه‌سازی زیستگاه‌ها و روش جامع<sup>۱</sup> طبقه‌بندی کرد [۳]. روش‌های مبتنی بر شاخص‌های هیدرولوژیکی ساده‌ترین و پرکاربردترین روش‌های ارزیابی رژیم هیدرولوژیکی و برآورد جریان محیط زیستی در سطح جهان هستند. این روش‌ها معمولاً به عنوان روش جدول‌های در دسترس<sup>۲</sup> مشهورند و بیشتر بر آمارهای تاریخی جریان رودخانه تکیه دارند. روش‌های قدیمی از این دسته فقط به حداقل نیاز آبی رودخانه اکتفا می‌کنند، در حالی که روش‌های جدیدتر چندین ویژگی جریان مانند مقدار،

فراوانی، مدت زمان تداوم جریان، میزان تغییرات و... را در نظر می‌گیرند [۴]. از جمله مرسوم‌ترین این روش‌ها، شاخص‌های تغییرات هیدرولوژیکی (IHA)<sup>۳</sup> است که توسط ریچتر و همکاران (۱۹۹۶) توسعه یافته [۵] و در تحقیقات مختلفی از سرتاسر جهان از جمله [۶-۹] استفاده شده است. IHA پارامترهایی را برای مقایسه ویژگی‌های هیدرولوژیکی در دو دوره زمانی قبل و بعد از آثار مداخلات انسانی و تغییر اقلیم در محدوده تغییرات (RVA)<sup>۴</sup> ارائه می‌دهد [۱۰]. همچنین، یک سری از شاخص‌های هیدرولوژیکی با نام مؤلفه‌های جریان زیست‌محیطی (EFCs)<sup>۵</sup> به منظور ارائه روابط بین ویژگی‌های جریان و عملکردهای اکولوژیکی به کار گرفته می‌شود [۱۱]. روند تغییرات رژیم هیدرولوژیکی می‌تواند ناشی از آثار تغییر اقلیم و فعالیت‌های انسانی مانند تغییر کاربری اراضی، بهره‌برداری بی‌رویه از منابع آب سطحی و زیرزمینی، احداث سد و... باشد [۱۲]. افزایش تقاضا و بهره‌برداری بی‌رویه از منابع آب سطحی و زیرزمینی، تخریب جنگل و تغییر کاربری، بیشترین فشارها بر وضعیت هیدرولوژیکی حوضه آبخیز تیل‌آباد هستند [۱۳]. بنابراین، بررسی تغییرات رژیم جریان هیدرولوژیکی در دو دوره آماری قبل از آثار (رژیم جریان طبیعی) و بعد از تأثیرات (رژیم جریان تغییر یافته) با استفاده از ۳۳ پارامتر تغییرات هیدرولوژیکی (IHA) در محدوده تغییرات RVA و همچنین بررسی ۳۴ مؤلفه جریان محیط زیستی EFCs برای آمار دبی روزانه ایستگاه هیدرومتری نوده خاندوزه واقع در خروجی حوضه آبخیز تیل‌آباد به عنوان هدف اصلی تحقیق حاضر مد نظر قرار گرفته است. شایان یادآوری است در تحقیق حاضر علاوه بر بررسی و تحلیل تمام شاخص‌های تغییرات هیدرولوژیکی (IHA)، برای نخستین بار در ایران روش طبقه‌بندی هیدرولوژیکی توسعه یافته توسط کونسلاتی و همکارانش برای تعیین نوع رژیم هیدرولوژیکی در شرایط طبیعی و تغییر یافته جریان در رودخانه خرم‌رود به کار برده شده است.

## مواد و روش

## محدوده مطالعه شده

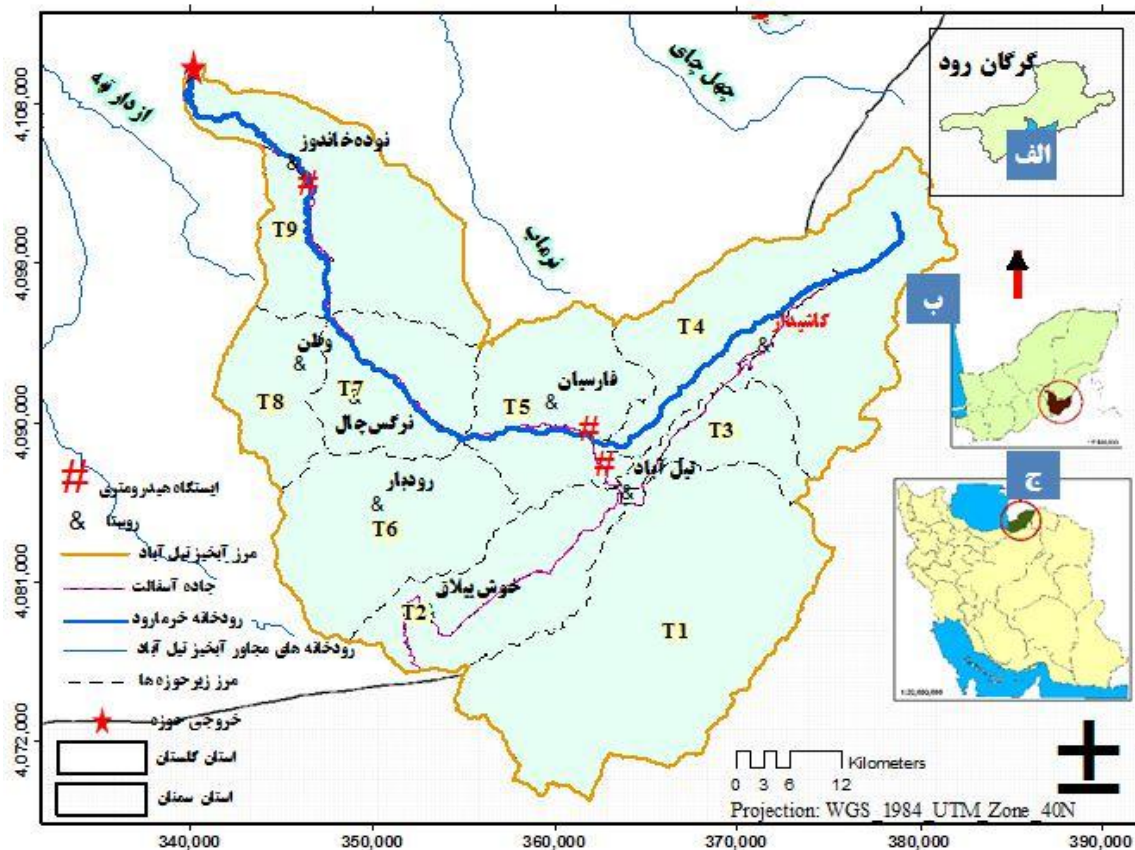
حوضه آبخیز تیل‌آباد در شمال کشور و شرق استان گلستان واقع شده و زیرحوضه‌ای از حوضه رودخانه

3. The Indicators of Hydrologic Alteration  
4. Range of Variability Approach  
5. Environmental Flow Components

1. Holistic Methods  
2. Look-up or Desktop Tables

عرض‌های جغرافیایی ۲° ۴۵' ۳۶" تا ۰° ۵۰' ۳۷" شمالی و طول‌های جغرافیایی ۷۵° ۱۲' ۵۵" تا ۳۷° ۴۰' ۵۵" شرقی قرار دارد. رودخانه خرمارود آبراهه اصلی حوضه است. ایستگاه هیدرومتری نوده خاندوز در پایین دست حوضه واقع شده است. شکل ۱ موقعیت حوضه آبخیز تیل‌آباد را در حوضه رودخانه گرگان‌رود، استان گلستان و کشور ایران نشان می‌دهد.

گرگان‌رود است که از دامنه‌های شمالی رشته‌کوه‌های البرز سرچشمه می‌گیرد و پس از پیوستن شاخه‌های فرعی متعددی به آن، به دریای خزر می‌ریزد. این آبخیز حدود ۹/۳ درصد از کل حوضه رودخانه گرگان‌رود را شامل می‌شود که به دلیل استقرار روستاهای تیل‌آباد، خوش‌بیلاق و کاشیدار موقعیت اقتصادی درخور توجهی دارد. منطقه مطالعه شده مساحتی حدود ۸۸۹۷۰ هکتار در



شکل ۱. موقعیت حوضه آبخیز تیل‌آباد در الف) حوضه رودخانه گرگان‌رود؛ ب) استان گلستان و ج) کشور ایران

محدوده RVA و مؤلفه‌های جریان زیست‌محیطی EFC از طریق نرم‌افزار IHA7 بررسی شدند. به منظور تفکیک و تعیین میزان اختلاف معنادار بین مقادیر میانگین دوره پس از تأثیرپذیری نسبت به دوره قبل، از آزمون میزان معناداری<sup>۱</sup> استفاده شد. سپس، با توجه به این آزمون، شروع معنادار روند تغییرات از سال ۱۳۷۲ مشخص شد. بنابراین، جریان‌های روزانه ثبت‌شده در ایستگاه هیدرومتری یادشده به دو دوره (دوره با رژیم جریان طبیعی از سال ۱۳۴۶ تا ۱۳۷۱ و دوره با رژیم جریان متأثر از فعالیت‌های انسانی از

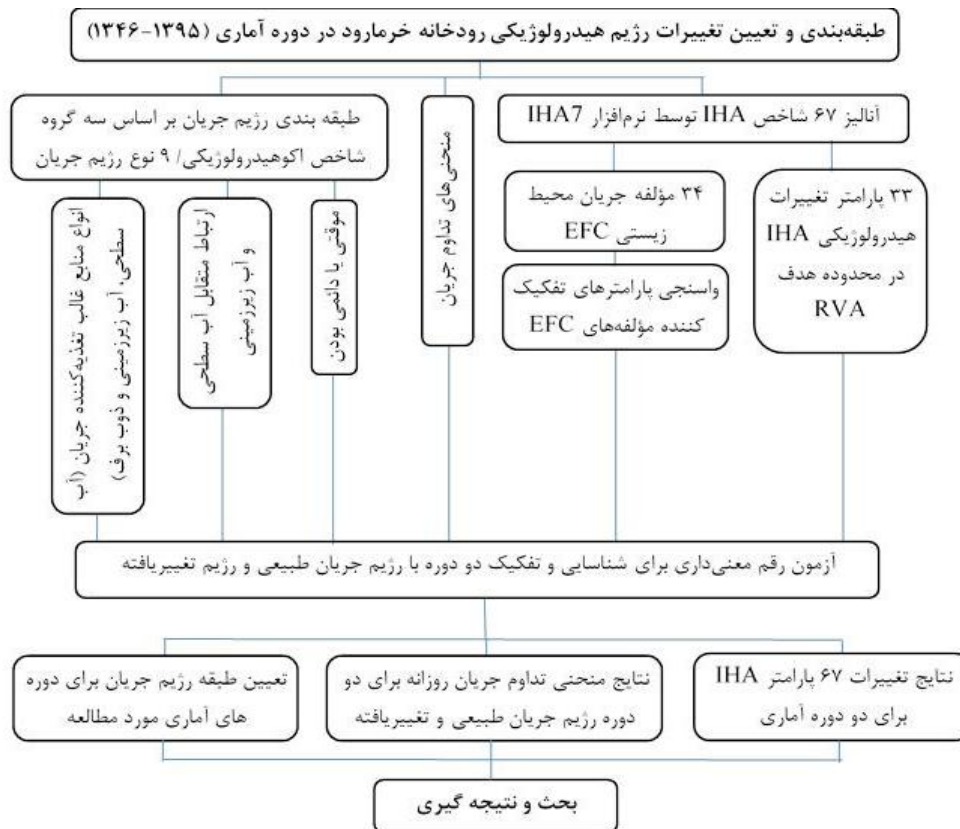
### روش تحقیق

در تحقیق حاضر با استفاده از شاخص‌های هیدرولوژیکی (IHA)، وضعیت تغییرات رژیم هیدرولوژیکی آمار دبی روزانه (از سال ۱۳۴۶ تا ۱۳۹۵) ایستگاه هیدرومتری نوده خاندوز در رودخانه خرمارود- حوضه آبخیز تیل‌آباد (استان گلستان) بررسی می‌شود. به منظور بررسی تغییرات رژیم هیدرولوژیکی متأثر از فعالیت‌های انسانی در حوضه آبخیز تیل‌آباد از جمله افزایش بهره‌برداری از آب‌های سطحی و زیرزمینی، تغییرات کاربری اراضی و تخریب جنگل با استفاده از شاخص‌های تغییرات هیدرولوژیکی IHA در

1. Significance Count

مربوط به دوره بعد از سال ۱۳۷۲ است، بلکه آثار تجمعی معنادار این فشارها از سال ۱۳۷۲ مشخص شده است [۱۳]. نمودار جریان روش تحقیق در شکل ۲ ارائه شده است.

سال آبی ۱۳۷۲ تا ۱۳۹۵) تقسیم شد. شایان یادآوری است تفکیک زمانی قبل و بعد از سال ۱۳۷۲ به این معنا نیست که فشارهای مربوط به فعالیت‌های انسانی و خشکسالی



شکل ۲. نمودار جریانی مراحل روش تحقیق

خواهد بود. مشروح این پارامترها و میزان تأثیرگذاری آنها بر اکوسیستم به ترتیب در جدول‌های ۱ و ۲ ارائه شده است. نرم‌افزار IHA7 برای محاسبه این پارامترها توسعه یافته است؛ این نرم‌افزار گزینه‌های زیادی دارد که می‌تواند برای کنترل محاسبه این پارامترها استفاده شود و نتایج جدولی و نموداری تولید شده توسط مدل IHA بسته به اینکه کدام گزینه به کار برده شده، متفاوت خواهد بود. یک گزینه مهم نرم‌افزار یاد شده این است که می‌تواند شاخص‌های هیدرولوژیکی دو دوره زمانی مجزا مانند دوره زمانی قبل و بعد از آثار فعالیت‌هایی مانند احداث سد، انحراف جریان، پمپاژ آب زیرزمینی، تغییرات شدید کاربری اراضی را با هم مقایسه کند و یا اینکه برای سیستم‌های هیدرولوژیکی‌ای که در بلندمدت تحت تأثیر دخالت‌ها و تغییرات انسانی قرار گرفته‌اند، روند تغییرات را با رگرسیون خطی بسنجد [۱۴]. برای هر دوره رژیم طبیعی جریان یا

#### مجموعه شاخص‌های هیدرولوژیکی (IHA)

IHA در سال ۱۹۹۰ توسط کمیسیون حفاظت از طبیعت (TNC)<sup>۱</sup> به عنوان ابزاری کاربردی برای محاسبه ویژگی‌های رژیم هیدرولوژیکی طبیعی و تغییر یافته، توسعه یافت [۱۴]. این روش برای هر نوع داده روزانه هیدرولوژیکی مانند دبی و تراز جریان رودخانه، تراز آب زیرزمینی و یا دریاچه قابل استفاده است. مزیت IHA در این است که می‌تواند داده‌های هیدرولوژیکی روزانه را به تعدادی مؤلفه هیدرولوژیکی قابل مدیریت و مرتبط با وضعیت اکولوژی مانند مقدار، زمان وقوع، فراوانی، مدت تداوم و میزان تغییرات خلاصه کند. IHA قادر به محاسبه ۶۷ پارامتر در دو گروه «۳۳ پارامتر تغییرات هیدرولوژیکی (IHA)» و «۳۴ پارامتر جریان محیط زیستی (EFC)»

1. The Nature Conservancy

دوره رژیم طبیعی به سه طبقه عددی (پایین، میانه و بالا) تقسیم می‌شود. مرز بین این طبقات براساس مقادیر صدک (برای آنالیز ناپارامتریک) و یا مقادیر انحراف معیار (برای آنالیز پارامتریک) توسط کاربر تعیین می‌شود. به طور پیش‌فرض در نرم‌افزار IHA7، این مرز در آنالیز ناپارامتریک روی صدک ۱۷ از میانه قرار دارد و این رقم به صورت اتوماتیک سه طبقه عددی با اندازه یکسان را به دست می‌دهد. پایین‌ترین طبقه شامل همه مقادیر کمتر یا مساوی صدک ۳۳ است؛ طبقه متوسط شامل همه مقادیری که در بازه صدک ۳۴ تا ۶۷ هستند، می‌شود و بالاترین طبقه همه مقادیر بیشتر از صدک ۶۷ را در بر می‌گیرد. سپس، فاکتور درجه تغییر هیدرولوژیکی (میزان عدم دستیابی به اهداف RVA) بر حسب درصد از رابطه ۱ [۵] محاسبه می‌شود.

$$D_i = \frac{N_i - N_e}{N_e} \times 100 \quad (1)$$

که در آن  $D_i$  درجه تغییر هیدرولوژیکی پارامتر  $i$  ام IHA و  $N_0$  فراوانی مورد انتظار است که در دوره رژیم طبیعی جریان برای هر یک از سه طبقه هدف RVA، براساس تعداد سال‌هایی که رقم پارامتر  $i$  ام IHA در هر طبقه قرار دارد، محاسبه می‌شود و  $N_e$  فراوانی مشاهداتی یا تعداد سال‌هایی است که مقدار پارامتر هیدرولوژیکی مربوطه در دوره رژیم تغییر یافته در هر یک از سه طبقه هدف RVA قرار دارد.

مقادیر مثبت تغییرات هیدرولوژیکی در هر یک از سه طبقه عددی نشان می‌دهد فراوانی مقادیر پارامتر هیدرولوژیکی مد نظر در هر یک از سه طبقه هدف RVA در دوره رژیم تغییر یافته افزایش یافته است (بیشترین مقدار تغییرات مثبت تا بی‌نهایت است). در حالی که مقادیر منفی تغییرات هیدرولوژیکی نشان‌دهنده کاهش فراوانی مقادیر پارامتر مد نظر در طبقه مربوطه در دوره رژیم تغییر یافته است (حداقل مقدار تغییرات تا -۱) [۱۴]. در این خصوص برای ارزیابی شدت تغییرات هیدرولوژیکی از سیستم سه‌کلاسه استفاده می‌شود. ریچتر و همکاران (۱۹۹۶ و ۱۹۹۷) نشان دادند که مقادیر  $D_i$  بین صفر تا ۳۳ درصد بیان‌کننده میزان تغییرات هیدرولوژیکی کم، بین ۳۳ تا ۶۷ درصد نشان‌دهنده میزان تغییرات

رژیم تغییر یافته حداقل ۲۰ سال آمار روزانه توصیه شده است [۱۵]. در مواردی که طول آمار موجود کافی نباشد، سری زمانی باید با استفاده از مدل‌های هیدرولوژیکی-آماری بازسازی شوند. همچنین، برای انجام تحلیل‌های هیدرولوژیکی، سری زمانی روزانه اغلب ارجحیت دارد. فقط در حالت نبود این داده‌ها، استفاده از سری زمانی ماهانه توصیه می‌شود [۱۶]. شاخص‌های IHA می‌توانند با استفاده از آمار پارامتریک (میانگین انحراف معیار) یا آمار ناپارامتریک (میانه و صدک) محاسبه شوند. برای بیشتر وضعیت‌ها، آمار ناپارامتریک گزینه بهتری است، زیرا بیشتر داده‌های هیدرولوژیکی چولگی غیر نرمال دارند (فرض کلیدی آمار پارامتریک این است که داده‌ها توزیع نرمال داشته باشند)؛ اما برای مقادیری مانند میانگین دبی ماهیانه، آمار پارامتریک ترجیح داده می‌شود. در آخر، وقتی هدف تحلیل تغییرات جریان رودخانه بین دو دوره زمانی باشد، نرم‌افزار این امکان را برای کاربر فراهم می‌کند که روش نگرش محدوده تغییرات RVA را به کار گیرد [۱۰].

#### روش نگرش محدوده تغییرات (RVA)

نگرش محدوده تغییر پذیری RVA نوعی روش کاربردی و پیچیده از روش‌های هیدرولوژیکی است که توسط ریچتر و همکاران [۱۰ و ۵] برای رودخانه‌ها ارائه شده است. مبنای روش نگرش محدوده تغییر پذیری RVA این است که حوضه‌های رودخانه‌ای به گونه‌ای مدیریت شوند که توزیع مقادیر سالانه هر یک از ۳۳ پارامتر تغییرات هیدرولوژیک IHA تا حد امکان در محدوده تغییرات طبیعی پارامترها واقع شوند. اهداف مدیریتی باید بر مبنای اطلاعات اکولوژیکی موجود تعیین شوند. در صورت نبود اطلاعات اکولوژیکی مناسب، توصیه می‌شود که دامنه انحراف معیار به عنوان پیش‌فرض برای تعیین اولیه اهداف به کار رود؛ به این معنا که مقادیر طبیعی هر یک از پارامترهای IHA در حالت طبیعی در دامنه انحراف معیار ( $\pm$  STD) از مقادیر متوسط در نظر گرفته شوند و یا اینکه چارک‌های ۲۵ و ۷۵ درصد به ترتیب به عنوان حدود پایین و بالای پارامترها لحاظ شود [۱۰]. باید دقت شود که تحلیل RVA فقط برای ۳۳ پارامتر تغییرات هیدرولوژیکی IHA امکان‌پذیر است و برای مؤلفه‌های EFC قابل محاسبه نیست. در آنالیز RVA، دامنه کامل مقادیر هر پارامتر در

از جریان پیک سیلاب‌های بزرگ را دارند، به کلاس سیلاب‌های کوچک اختصاص داده می‌شوند. همه وقایع با جریان پیک کمتر از این آستانه، به عنوان کلاس پالس‌های جریان بالا در نظر گرفته می‌شوند. دبی سیلاب‌های کوچک معمولاً معادل دبی با دوره بازگشت دو تا کمتر از ۱۰ سال در نظر گرفته می‌شود.

۳. تعیین آستانه سیلاب‌های بزرگ: همه جریان‌های بالا که دبی پیک بیشتر یا مساوی این مقدار را دارند به عنوان کلاس سیلاب‌های بزرگ در نظر گرفته می‌شوند. همه وقایع با دبی پیک کمتر از این مقدار در کلاس پالس جریان بالا یا کلاس سیلاب کوچک طبقه‌بندی می‌شوند. در این خصوص، کاربر می‌تواند یکی از سه گزینه دبی با دوره بازگشت، مقدار معین جریان یا صدک همه جریان‌های روزانه را انتخاب کند. مقدار اولیه پیشنهاد شده، دبی با دوره بازگشت ۱۰ سال است.

۴. تعیین جریان‌های بسیار کم: همه دبی‌های روزانه با مقدار جریان کمتر یا مساوی این مقدار آستانه، در طبقه جریان‌های بسیار کم قرار می‌گیرند. در این خصوص، کاربر می‌تواند گزینه صدک همه جریان‌های کم روزانه، صدک همه جریان‌های روزانه و یا مقدار معین دبی جریان را انتخاب کند. مقدار اولیه توصیه شده، صدک ۱۰ جریان‌های کم روزانه است [۱۴].

#### واسنجی پارامترهای تفکیک‌کننده مؤلفه‌های EFC

به منظور دستیابی به نتایج بهینه EFC، معمولاً باید پارامترهای استفاده شده در الگوریتم EFC واسنجی شوند. کارآمدترین روش برای واسنجی این الگوریتم، نمایش و کنترل بصری نمودار یا هیدروگراف جریان روزانه حاصل از تنظیم و تغییرات پارامترهاست. نمودار جریان روزانه می‌تواند ارزیابی شود؛ به این منظور که آیا پارامترهای تنظیم شده توانسته است تفکیک مناسبی بین جریان‌های بالا و جریان‌های کم و همچنین سایر ویژگی‌های جریان ایجاد کند و یا اینکه آستانه دوره بازگشت مناسب برای سیلاب‌های بزرگ و کوچک تعیین شده است. در نتیجه، می‌توان با توجه به هیدروگراف جریان روزانه، پارامترها را واسنجی کرد [۱۴].

هیدرولوژیکی متوسط و بین ۶۷ تا ۱۰۰ درصد، بیان‌کننده مقدار تغییرات هیدرولوژیکی زیاد است [۱۰ و ۵].

#### مؤلفه‌های جریان محیط زیستی (EFC)

در IHA، ۳۴ پارامتر در قالب پنج مؤلفه جریان محیط زیستی (EFCs) شامل جریان کم، جریان‌های بسیار کم، پالس‌های جریان‌های بالا، سیلاب‌های کوچک و سیلاب‌های بزرگ وجود دارد. این پنج مؤلفه، طیف کاملی از وضعیت جریان را ارائه می‌دهند که نشان‌دهنده وضعیت پایداری اکولوژیکی رودخانه هستند (جزئیات هر یک از این مؤلفه‌ها در منبع ۱۴ تشریح شده است).

#### الگوریتم محاسبه مؤلفه‌های EFC

مراحل تنظیم و محاسبات مؤلفه‌های EFC به شرح زیر است:

۱. ابتدا جریان‌های بالا و جریان‌های کم تفکیک می‌شود. به این منظور، از چهار پارامتر برای تفکیک این دو نوع جریان استفاده می‌شود. در نخستین مرحله برای تفکیک جریان‌های بالا یک مقدار آستانه (مقدار اولیه توصیه شده، صدک ۷۵ از جریان‌های روزانه است) تعیین می‌شود و جریان‌های بیشتر از این آستانه به عنوان جریان‌های بالا در نظر گرفته می‌شوند. دومین پارامتر، مقدار آستانه برای تفکیک جریان کم (مقدار اولیه توصیه شده، صدک ۵۰ جریان‌های روزانه) است؛ همه دبی‌های کمتر از این آستانه به عنوان جریان‌های کم طبقه‌بندی می‌شوند. سومین پارامتر، آستانه شروع جریان بالاست. وقتی جریان‌ها در بین آستانه جریان بالا و جریان پایین قرار دارند، این پارامتر آستانه شروع جریان‌های بالا را کنترل می‌کند؛ مقدار اولیه توصیه شده ۲۵ درصد است. چهارمین پارامتر، مقدار آستانه برای تفکیک انتهای جریان‌های بالاست و برای جریان‌هایی به کار می‌رود که بین آستانه جریان بالا و آستانه جریان پایین قرار دارند، این آستانه، انتهای وقایع جریان‌های بالا را روی شاخه نزولی مشخص می‌کند. مقدار اولیه توصیه شده، ۱۰ درصد است.

۲. تعیین آستانه سیلاب‌های کوچک: همه جریان‌های بالا که جریان پیک بزرگ‌تر یا مساوی با این آستانه و کمتر

جدول ۱. پارامترهای تغییرات هیدرولوژیکی IHA به‌کاررفته در روش RVA و تأثیرات آنها بر اکوسیستم [۱۴]

گروه پارامترهای IHA	ویژگی‌های رژیم هیدرولوژیکی جریان	تأثیر بر اکوسیستم
۱. میزان آبدهی ماهانه (مجموع ۱۲ پارامتر)	میانگین یا میانۀ دبی جریان برای هر ماه	وجود زیستگاه‌ها، میزان رطوبت خاک، دسترسی‌پذیری به آب و غذا برای جانوران، تأثیرات دما، آب، میزان اکسیژن و فتوسنتز گیاهان آبی
۲. مقدار و مدت وقایع حدی (حداقل و حداکثر سالانه) (مجموع ۱۲ پارامتر)	حداقل و حداکثر میانگین‌های یک، سه، هفت، ۳۰ و ۹۰ روزه طی سال -تعداد روزهای صفر جریان -شاخص جریان پایه: حداقل دبی جریان هفت‌روزه تقسیم بر میانگین دبی سالانه	تعادل در رقابت، تنش و تحمل موجودات، توسعه و توزیع جوامع گیاهی، ساختار مورفولوژی رودخانه و وضعیت فیزیکی زیستگاه، استرس رطوبتی خاک در گیاه، حجم مبادلات مواد مغذی بین رودخانه و دشت سیلابی، مدت‌زمان‌های استرس‌زا مانند اکسیژن کم و افزایش غلظت مواد شیمیایی، دفع زباله، هوادهی بسترهای تولید مثل در رسوبات کانال
۳. زمان وقوع جریان حدی (مجموع دو پارامتر)	شمارهٔ روز <sup>۱</sup> وقوع حداقل و حداکثر جریان یک‌روزه طی هر سال	چرخهٔ حیات موجودات زنده، قابلیت پیش‌بینی و جلوگیری از استرس برای موجودات، فراهم کردن زیستگاه‌های خاص برای تولید مثل و یا پناهگاه حیات وحش، زمان تخم‌ریزی برای ماهیان مهاجر، مکانیزم‌های رفتاری
۴. تناوب و مدت تداوم پالس‌های کم و زیاد جریان (مجموع چهار پارامتر)	- تعداد پالس‌های کم و بالا در هر سال آبی - میانگین یا میانۀ مدت زمان تداوم پالس‌های کم و بالا (روز)	فراوانی و شدت تنش رطوبتی خاک برای گیاهان، فراوانی و مدت تنش‌های بدون اکسیژن برای گیاهان، دسترسی به زیستگاه‌های دشت سیلابی برای موجودات آبی، تبادل مواد مغذی و ارگانیک بین رودخانه و دشت سیلابی، دسترسی پرندگان آبی به سایت‌های تغذیه، استراحت و تولید مثل، انتقال بار بستر، ساختار رسوبات کانال
۵. میزان و فراوانی تغییرات وضعیت جریان (مجموع سه پارامتر)	- میزان افزایش جریان (شاخهٔ سعودی): میانگین یا میانۀ تمام تفاوت‌های مثبت بین مقادیر روزانهٔ متوالی - میزان کاهش جریان (شاخهٔ نزولی): میانگین یا میانۀ تمام تفاوت‌های منفی بین مقادیر روزانهٔ متوالی -تعداد برگشت‌های هیدرولوژیکی	حمل مواد بستر، بافت رسوب کانال، تنش خشکی بر گیاهان، به دام افتادن موجودات در جزایر و دشت‌های سیلابی، استرس خشکی روی موجودات کم‌تحرک

جدول ۲. پارامترهای جریان محیط زیستی (EFC) و تأثیرات آنها بر اکوسیستم [۱۴]

گروه پارامترهای EFC	ویژگی‌های رژیم هیدرولوژیکی جریان	تأثیر بر اکوسیستم
۱. جریان‌های کم ماهانه (مجموع ۱۲ پارامتر)	مقادیر میانگین یا میانۀ مقادیر جریان‌های کم برای هر ماه	تشکیل زیستگاه مناسب، تنظیم دمای آب، اکسیژن محلول و کیفیت آب، حفظ رطوبت خاک، آب شرب برای حیوانات، حفظ تخم ماهی‌ها و دوزیستان در حالت معلق، قادر ساختن ماهی برای تحرک، تغذیه و تخم‌ریزی، حمایت از موجودات هیپورهیک (زندگی در رسوبات اشباع‌شده)
۲. جریان‌های بسیار کم (مجموع چهار پارامتر)	فراوانی جریان‌های بسیار کم در هر سال آبی یا فصل - میانگین یا میانۀ مقادیر جریان‌های بسیار کم شامل مدت زمان (روزها)، مقدار و زمان وقوع یا شمارهٔ روز جریان پیک (حداقل جریان) جریان‌های بسیار کم	توسعهٔ برخی گونه‌های گیاهی در دشت سیلابی، توسعهٔ گونه‌های مهاجم، گونه‌های آبی و جوامع کنارزی رودخانه، متمرکز شدن شکار در مناطق محدود (به سود شکارچیان درنده)
۳. پالس‌های جریان‌های بالا (مجموع شش پارامتر)	فراوانی پالس‌های جریان‌های بالا در هر سال یا فصل - میانگین یا میانۀ مقادیر پالس‌های جریان بالا شامل مدت زمان (روزها)، مقدار و زمان وقوع جریان پیک (جریان حداکثر) جریان‌های بالا - میزان افزایش و کاهش (منحنی هیدروگراف)	ویژگی‌های واحدهای ژئومورفیک، اندازهٔ ابعاد قطر رسوبات کف و لایهٔ زیرین بستر، جلوگیری از گسترش جوامع گیاهی کنارزی در کانال، جابه‌جایی مواد زائد و آلاینده‌ها، هوادهی تخم‌ها در سنگ‌ریزه‌ها، برقرار کردن وضعیت مناسب برای شوری آب در شارگاه (محل تلاقی رود به دریا)
۴. سیل‌های کوچک (مجموع شش پارامتر)	فراوانی سیلاب‌های کوچک و بزرگ طی سال آبی یا فصل	فراهم شدن شرایط برای مهاجرت و تخم‌ریزی ماهی، ایجاد یک مرحلهٔ جدید در چرخهٔ زندگی، قادر ساختن ماهی برای تخم‌ریزی در دشت سیلابی، فراهم کردن فرصت‌های تغذیه‌ای جدید برای ماهی و پرندگان آبی، تغذیهٔ سطح آب دشت سیلابی، حفظ و کنترل تنوع و توزیع گیاهان دشت سیلابی، ترسیب مواد مغذی در دشت سیلابی، حفظ تعادل گونه‌های جوامع آبی و کنارزی رودخانه، ایجاد واحدهای ژئومورفیک برای توسعهٔ پوشش گیاهی، ته‌نشینی سنگ‌ریزه و قطعات سنگ در مناطق تخم‌ریزی، جابه‌جایی چوب در کانال (تشکیل زیستگاه)، حرکت جانبی رودخانه و شکل‌گیری زیستگاه‌های جدید، جداسازی دانه و میوه‌های جوامع گیاهی کنارزی رودخانه
۵. سیل‌های بزرگ (مجموع شش پارامتر)	میانگین یا میانۀ مقادیر سیلاب‌های کوچک و بزرگ: مدت زمان (روزها)، مقدار، زمان وقوع جریان پیک - میزان افزایش و کاهش (منحنی هیدروگراف)	

## منحنی‌های تداوم جریان<sup>۲</sup>

طریق منحنی تداوم جریان می‌توان مشخص کرد که مقادیر برابر یا بیش از دبی‌های مختلف چند درصد زمان از یک دوره آماری هیدرولوژیکی را شامل می‌شود. IHA می‌تواند منحنی‌های تداوم جریان (FDCs) به طور مجزا برای هر یک از دوره‌های آماری (تحلیل دوره منفرد و تحلیل دو دورهٔ زمانی) به صورت روزانه، ماهانه و سالانه محاسبه کند.

تحلیل منحنی تداوم جریان با نشان دادن توزیع مقادیر جریان یک دوره آماری در ارزیابی نوسانات و تغییرپذیری آب رودخانه اهمیت دارد. این منحنی با رابطهٔ بین دبی و احتمال وقوع یا فراوانی (درصد زمانی)، اطلاعات مفیدی از همهٔ دبی‌های رودخانه اعم از رخدادهای کم‌آبی تا سیلابی ارائه می‌دهد. از

1. Julian Date
2. Flow Duration Curves

که در آن  $N$  تعداد سال‌ها،  $M$  تعداد ماه‌ها (۱۲) و  $QM_{j,i}$  دبی ماهانه برای ماه  $j$ ام و سال  $i$ ام است.

۲. ZERODAY: تعداد روزها طی سال که رودخانه بدون جریان آب است (میانگین آن برای سال‌هایی که روزهای بدون جریان دارد، محاسبه می‌شود).

۳.  $FLDFREQ^{-1}$ : فراوانی سیلاب عبارت است از: میانگین تعداد سیل‌های هر سال که دبی بیشتر از مقدار دبی آستانه سیل (میانگین حداکثر دبی روزانه هر سال طی دوره آماری) دارند.

۴. FLDPROD(-): امکان پیش‌بینی فصل سیلاب است. روش محاسبه آن به این صورت است که ابتدا دبی‌های روزانه طی یک دوره آماری چندین ساله که مقدار آنها بیشتر از مقدار آستانه سیل است را شناسایی می‌کنند، سپس فراوانی آنها را در هر ماه و در پنجره ۶۰ روزه فصلی (دی - بهمن، بهمن - اسفند، اسفند-فروردین و...) محاسبه می‌کنند. پس از آن، تعداد رخداد این سیل‌ها در هر ماه و در پنجره ۶۰ روزه بر تعداد کل سیل‌های با مقادیر بیشتر از سیل آستانه تقسیم می‌شوند. این مقدار از  $0/167$  (فصلی نبودن) تا ۱ (کاملاً قابل پیش‌بینی بودن فصل سیلاب‌ها) متغیر است. سیل در فصل یا ماهی قابل پیش‌بینی است که بیشترین مقدار از نسبت یادشده را داشته باشد.

۵. FLDTIME (زمان وقوع): زمان رخداد سیل، این شماره اولین روز از پنجره ۶۰ روزه‌ای است که FLDPROD بیشترین مقدار را دارد. به طور پیش‌فرض شماره روز احتمالی رخداد سیلاب در پنجره ۶۰ روزه در جدول ۳ ارائه شده است.

۶. DAYCV (/): ضریب تغییرات، نسبت میانگین انحراف معیار دبی روزانه (طی سال) بر میانگین دبی سالانه (ضرب در ۱۰۰) است (معادله ۴).

$$DAYCV = 100 \times \frac{1}{N} \sum_{i=1}^M \left( \frac{\sigma_{QD,i}}{\mu_{QD,i}} \right) \quad (4)$$

که در آن  $N$  تعداد سال،  $QD$  میانگین دبی روزانه،  $\sigma_{QD,i}$  انحراف معیار میانگین دبی روزانه برای  $i$  امین سال و  $\mu_{QD,i}$  میانگین دبی‌های روزانه برای  $i$  امین سال است.

لیست مقادیر آستانه شش شاخص هیدرولوژیکی استفاده شده برای تعیین نه طبقه رژیم جریان در جدول ۳ ارائه شده است.

مراحل محاسبه و ترسیم منحنی تداوم جریان به شرح زیر است:

۱. تنظیم کردن میانگین دبی‌های روزانه برای دوره مطالعه شده از عدد بزرگ تا عدد کوچک.

۲. برای هر مقدار دبی، یک رتبه ( $M$ ) اختصاص داده می‌شود، از رتبه یک برای بزرگ‌ترین دبی روزانه شروع می‌کنیم.

۳. محاسبه احتمال وقوع<sup>۱</sup> ( $P$ ) براساس معادله ۲:

$$P = 100 * [M / (n+1)] \quad (2)$$

$P$  = احتمال وقوع یک واقعه جریان (درصد زمان)

$M$  = رتبه واقعه جریان مد نظر (بی‌بعد)

$N$  = تعداد وقایع یک دوره آماری (بی‌بعد)

### طبقه‌بندی رژیم جریان

طبقه‌بندی رژیم جریان مبنای مفیدی برای خلاصه یا بیان کلی ویژگی رژیم جریان یک دوره و نیز برای مقایسه تغییرات وضعیت رژیم جریان گذشته و اکنون است.

طبقه‌بندی رژیم جریان ابتدا توسط پوف (۱۹۹۶) برای رودخانه‌ها در ایالات متحده ارائه شده [۱۵ و ۱۹] و سپس با برخی تغییرات برای رودخانه‌های مختلف اروپا توسعه یافته است [۱۷]. این روش براساس شاخص‌های اکوهیدرولوژی، نه نوع رژیم جریان (شامل سه نوع رژیم غیردائمی و شش نوع رژیم دائمی) براساس (۱) موقتی بودن؛ (۲) ارتباط متقابل آب سطحی و آب زیرزمینی و (۳) انواع منابع غالب تغذیه‌کننده جریان (آب سطحی، آب زیرزمینی و ذوب برف) ارائه می‌دهد. مدل مفهومی این طبقه‌بندی رژیم جریان در شکل ۳ ارائه شده است. شایان یادآوری است برای طبقه‌بندی رژیم جریان حداقل ۲۰ سال داده روزانه دبی جریان نیاز است [۱۸].

به طور کلی، رژیم جریان براساس شش شاخص جریان روزانه تعریف شده‌اند که عبارت‌اند از:

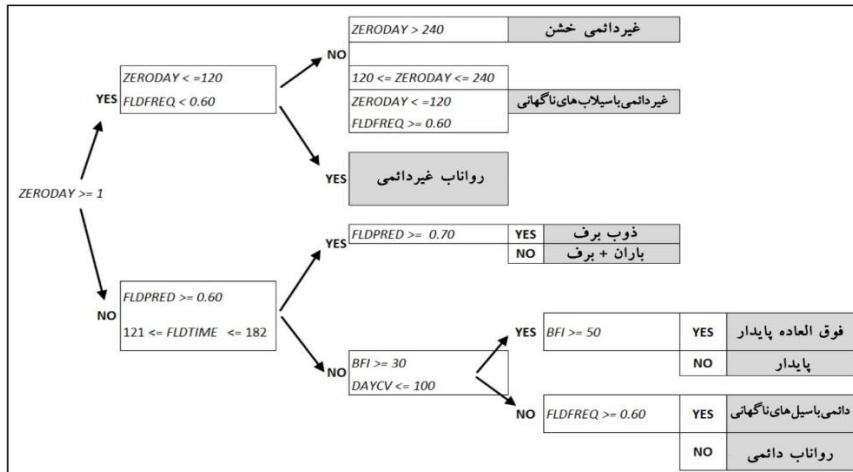
۱. BFI (/): شاخص جریان پایه (BFI) معادل میانگین

نسبت بین حداقل دبی ماهانه و میانگین دبی ماهانه طی سال و برای دوره آماری چندین ساله است (معادله ۳).

$$BFI = 100 \times \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M \left[ \frac{\min_{1 \leq i \leq N} (QM_{j,i})}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (QM_{j,i})} \right] \quad (3)$$

1. Exceedence probability
2. Intermittancy





شکل ۳. مدل مفهومی طبقه‌بندی رژیم جریان [۱۷]

جدول ۳. طبقه‌بندی رژیم جریان براساس شاخص‌های هیدرولوژیکی و نوع رژیم جریان [۱۷]

شاخص‌های هیدرولوژیکی	رژیم جریان	طبقه هیدرولوژیکی
ZERODAY > 240	آبراهه‌های موقت و بدون جریان پایه طی سال. جریان آبراهه طی بارش شدید فعال می‌شود. بین رودخانه و آبخوان ارتباط متقابل وجود ندارد. جریان آب آبراهه‌ها فقط توسط رواناب سطحی تغذیه می‌شود. (R > 90%)	غيردائمی خشن (HI) <sup>۱</sup>
120 ≤ ZERODAY ≤ 240 or (ZERODAY ≤ 120 and FLDFREQ ≥ 0.60)	آبراهه‌های موقت که کمتر از هشت ماه از سال رواناب در بستر رودخانه وجود دارند. آبراهه‌ها بیشتر توسط رواناب سطحی تغذیه می‌شوند. رواناب گاهی به علت بارش، ذوب برف یا نوسان‌های فصلی سطح آبخوان به وجود می‌آید.	غيردائمی با سيلاب‌های ناگهانی (IF) <sup>۲</sup>
1 ≤ ZERODAY ≤ 120 and FLDFREQ < 0.60	آبراهه‌های موقت که بیشتر از هشت ماه از سال دارای رواناب در بستر رودخانه هستند. رودخانه به دلیل تغییرات سطح تراز آبخوان بیشتر توسط آب زیرزمینی و رواناب سطحی تغذیه می‌شود.	رواناب غيردائمی (IR) <sup>۳</sup>
BFI < 30% and FLDFREQ < 0.60 (سهام زیاد رواناب سطحی در دبی کل)	رودخانه‌های دائمی که ابتدا توسط رواناب سطحی (جریان سریع) و سپس توسط آب زیرزمینی (جریان پایه) تغذیه می‌شوند. رژیم جریان تغییرپذیری فصلی کمی دارد	رواناب دائمی (PR) <sup>۵</sup>
BFI < 30% and FLDFREQ ≥ 0.60 (سهام زیاد رواناب سطحی در دبی کل)	رودخانه‌های دائمی که بیشتر توسط رواناب سطحی (جریان سریع) تغذیه می‌شوند و سيلاب‌های ناگهانی دارند. رژیم جریان به شدت تحت تأثیر رویدادهای سيلاب‌های شدید و خشکسالی‌های فصلی است.	دائمی با سيلاب‌های ناگهانی (PF) <sup>۶</sup>
30 ≤ BFI < 50 % and DAYCV ≤ 100 (سهام زیاد جریان پایه در دبی کل)	رودخانه‌ها با تغذیه منظم آب‌های زیرزمینی رژیم جریان پایدار دارند. در مورد رودخانه‌های نامنظم، تغذیه و تنظیم جریان پایه بیشتر توسط آب زیرزمینی است.	جریان پایدار دائمی (SG) <sup>۷</sup> (آب زیرزمینی)
BFI ≥ 50 % and DAYCV ≤ 100 (سهام بسیار زیاد جریان پایه در دبی کل)	تغییرات خیلی کم در رژیم جریان رودخانه‌ها وجود دارد. در مورد رودخانه‌ها با جریان نامنظم (رژیم طبیعی)، جریان آب بیشتر توسط آب زیرزمینی (جریان پایه) تغذیه می‌شوند.	بسیار پایدار دائمی (SS) <sup>۸</sup> (آب زیرزمینی)
0.6 ≤ FLDPRED < 0.7 and 121 ≤ FLDTIME ≤ 182 (قابلیت پیش‌بینی زیاد فصلی بودن سيلاب) <sup>۹</sup>	رودخانه‌های دائمی که توسط ترکیب رواناب و ذوب برف تغذیه می‌شوند.	جریان دائمی - برف + باران (SR) <sup>۱۰</sup>
FLDPRED ≥ 0.7 and 121 ≤ FLDTIME ≤ 182 (قابلیت پیش‌بینی بسیار زیاد فصلی بودن سيلاب)	آبراهه‌های دائمی که بیشتر توسط ذوب برف و یخچال تغذیه می‌شوند.	جریان دائمی حاصل از ذوب برف (SN) <sup>۱۱</sup>

1. Harsh Intermittent
2. Intermittent Flashy
3. Intermittent Runoff
4. Quick Flow
5. Perennial Runof
6. Perennial Flashy
7. Perennial Stable
8. Perennial Super-stable
9. High seasonal predictability
10. Perennial Snow+rain
11. Perennial Snowmelt

## نتایج تحقیق

نتایج پارامترهای تغییرات هیدرولوژیکی IHA در روش

RVA برای ایستگاه هیدرومتری نوده\_خرمارود

نتایج تغییرات پنج گروه پارامتر تغییرات هیدرولوژیکی (IHA) در محدوده تغییرات RVA در ایستگاه هیدرومتری نوده\_خرمارود که از نرم افزار IHA نسخه 7.1 به دست آمد در جدول ۴ و شکل های ۴ تا ۸ ارائه شده است. در جدول ۴ از رابطه ۱ برای به دست آوردن درجه تغییرات هیدرولوژیکی در طبقه متوسط RVA استفاده شده است. همچنین، درصد تغییرات هیدرولوژیکی ۳۳ پارامتر IHA در سه کلاس (۳۳-۰)، (۰-۶۷) و (۶۷-)> طبقه بندی شده است. مقادیر منفی نشان می دهد در بیشتر این پارامترها، قرارگیری مقدار فراوانی سالیانه آنها در محدوده RVA کمتر از مقدار مورد انتظار (رژیم طبیعی) است. ستون آخر جدول یادشده «میزان معناداری<sup>۱</sup>» میزان انحراف و اختلاف معناداری بین مقادیر میانه دوره رژیم طبیعی جریان نسبت به دوره رژیم تغییر یافته را ارائه می دهد. میزان معناداری کم (حداقل مقدار صفر است) به این معناست که بین مقادیر دو دوره یادشده اختلاف معنادار زیادی وجود دارد و به عکس میزان معناداری زیاد (حداکثر مقدار یک است) به این معناست که بین مقادیر آنها اختلاف معنادار کمی وجود دارد.

## گروه نخست: میانگین دبی ماهانه در هر سال

در گروه نخست پارامترهای IHA، مقادیر میانگین دبی همه ماه های سال در دوره متأثر از فعالیت های انسانی کاهش معناداری داشته اند، به طوری که با توجه به طبقه بندی سه کلاسه و در طبقه متوسط RVA که پیش از این گفته شد، مقادیر میانگین دبی در دوره متأثر از فعالیت های انسانی در ماه های آبان، دی، اردیبهشت، خرداد، تیر، مرداد و شهریور، درصد تغییرات هیدرولوژیکی زیاد، در ماه های مهر، آذر و فروردین درصد تغییرات متوسط و در ماه های بهمن و اسفند درصد تغییرات کم را دارند و به طور کلی بیشترین تغییرات هیدرولوژیکی به ترتیب مربوط به فصل های تابستان، بهار، پاییز و زمستان است (جدول ۴ و شکل ۴). شکل ۷، میانگین ماهانه تغییرات جریان در دوره رژیم طبیعی جریان (خط سبز) و رژیم جریان تغییر یافته (خط قرمز) و همچنین حد بالا و پایین RVA را نشان می دهد.

گروه دوم: مقدار و مدت وقایع حدی (حداقل و حداکثر سالانه)

نتایج تغییرات پارامترهای هیدرولوژیکی گروه دوم در جدول ۴ و شکل ۵ ارائه شده است. در این گروه، در دوره متأثر از فعالیت های انسانی، جریان های حداقل یک تا هفت روزه (در طبقه متوسط RVA/ صدک ۳۴ تا ۶۷) در کلاس تغییرات هیدرولوژیکی کم و جریان حداقل ۳۰ و ۹۰ روزه به ترتیب در کلاس تغییرات هیدرولوژیکی متوسط و زیاد قرار دارند. از طرفی، جریان های حداکثر یک روزه در کلاس تغییرات کم و جریان های حداکثر سه تا ۹۰ روزه در کلاس تغییرات متوسط قرار دارند. همچنین، تعداد روزهای جریان با دبی صفر در دوره متأثر از فعالیت های انسانی نیز افزایش پیدا کرده است، به طوری که در سال های اخیر (۱۳۹۴) حدود ۳۵ روز در ایستگاه هیدرومتری نوده خاندوز جریانی ثبت نشده است. نمودارهای پارامترهای حداکثر یک، هفت و ۹۰ روزه به ترتیب نشان دهنده افزایش، کاهش و کاهش مقادیر دبی حداکثر است که بیان می کند مقدار و تعداد دبی های حداکثر لحظه ای افزایش یافته و از طرفی، مدت تداوم پالس های بالا کاهش یافته است.

شاخص جریان پایه، پارامتر دیگری از این گروه است، به طور کلی شاخص جریان پایه (حداقل دبی جریان هفت روزه تقسیم بر میانگین دبی سالانه)، در دوره متأثر از فعالیت های انسانی روند نزولی داشته است اما عملاً شروع روند نزولی از سال ۱۳۶۳ بوده و در سال های اخیر این شاخص به حدود صفر رسیده است (شکل ۵).

## گروه سوم: - زمان رخداد جریان های حدی سالانه

در دوره رژیم جریان طبیعی، متوسط زمان رخداد مقادیر حداقل جریان سالانه در محدوده روزهای ۲۸۸ تا ۳۰۵ قرار دارد، در حالی که در دوره رژیم جریان تغییر یافته، بین روزهای ۲۷۵ تا ۳۲۰ اتفاق می افتد و به طور کلی درجه تغییر زمان رخداد آنها در دوره متأثر از فعالیت های انسانی در کلاس متوسط قرار می گیرد؛ اما متوسط زمان رخداد مقادیر حداکثر جریان سالانه در دوره رژیم جریان طبیعی در محدوده ۱۶۰ تا ۲۴۰ روز قرار دارد، در حالی که در دوره رژیم جریان تغییر یافته، بین روزهای ۱۷۰ تا ۳۴۰ با درجه تغییرات متوسط اتفاق می افتد؛ بنابراین جریان های حدی سالانه هم دچار آشفتگی و تغییر شده اند.

جدول ۴. نتایج پارامترهای IHA در طبقه متوسط RVA برای ایستگاه هیدرومتری نوده\_خرمارود (سال ۱۳۴۶ تا ۱۳۹۵)

رقم معناداری	فاکتور انحراف <sup>۲</sup>	درصد تغییر هیدرولوژیکی <sup>۱</sup> (طبقه متوسط)	اهداف RVA		وضعیت جریان رژیم تغییر یافته (۱۳۷۲-۱۳۹۵)				وضعیت جریان با رژیم طبیعی (۱۳۴۶-۱۳۷۱)				پارامترهای تغییرات هیدرولوژیکی (IHA)
			حد بالا	حد پایین	محدوده تغییرات		میان	محدوده تغییرات		میان			
					حد بالا	حد پایین		حد بالا	حد پایین				
<b>گروه ۱</b>													
۰/۰۲	۰/۳۴	-۵۸ (M)	۲/۳۶	۱/۸۶	۲/۳۲	۰/۷۲	۱/۵۳	۳/۶۸	۰/۸۱	۲	مهر		
۰/۰۴	۰/۳۲	-۶۴ (H)	۲/۰۷	۱/۷۰	۲/۳۲	۰/۹۶	۱/۳۸	۲/۹۳	۰/۹۴	۱/۷۸	آبان		
۰/۰۳	۰/۳۴	-۶۶ (M)	۲/۱۳	۱/۷۳	۲/۴۹	۰/۸۷	۱/۴۹	۳/۱۶	۰/۸۵	۱/۹۷	آذر		
۰/۰۷	۰/۳۹	-۶۴ (H)	۲/۲۸	۲/۰۴	۳	۱	۱/۵۶	۳/۴۲	۱/۱۴	۲/۲	دی		
۰/۳۲	۰/۰۴	-۱۵ (L)	۲/۴۵	۲/۰۸	۳/۶۱	۰/۸۷	۲/۰۶	۵/۳۴	۱/۱۴	۲/۱۵	بهمن		
۰/۰۵	۰/۳۱	-۳ (L)	۴/۱۰	۳/۰۲	۵/۴۷	۱/۲۹	۲/۷۷	۷/۷۸	۱/۰۷	۳/۵	اسفند		
۰/۰۱	۰/۵۴	-۵۲ (M)	۵/۵۶	۴/۱۰	۱۵/۲	۱/۲۸	۲/۱۸	۱۰/۱۶	۲/۱۳	۴/۷۷	فروردین		
۰/۰۱	۰/۴۳	-۶۴ (H)	۳/۴۳	۲/۱۶	۴/۹۷	۰/۶۲	۱/۶۳	۶/۱	۰/۸۷	۲/۸۵	اردیبهشت		
۰/۰۵	۰/۵۹	-۱۰۰ (H)	۱/۹۹	۱/۲۹	۳/۱۵	۰/۰۵	۰/۶۸	۳/۷	۰/۰۲	۱/۶۴	خرداد		
۰/۰۱	۰/۷	-۸۸ (H)	۱/۲۲	۰/۸۸	۱/۴۷	۰	۰/۳	۲/۴۸	۰/۲۹	۱	تیر		
۰/۰۱	۰/۴۶	-۷۴ (H)	۱/۳۶	۰/۹۵	۱/۲	۰/۰۴	۰/۵۸	۱/۹۱	۰/۳۸	۱/۰۷	مرداد		
۰/۰۷	۰/۳۴	-۶۸ (H)	۱/۶۴	۱/۳۶	۲/۱۵	۰/۰۰	۰/۹۵	۲/۴۸	۰/۴۵	۱/۴۳	شهریور		
<b>گروه ۲</b>													
۰/۳۰	۱	-۲ (L)	۰/۳۷	۰/۰۱	۰/۱۳	۰	۰	۱/۱	۰	۰/۱۴	حداقل یک‌روزه		
۰/۳۴	۱	-۲ (L)	۰/۴۰	۰/۰۱	۰/۱۶	۰	۰	۱/۱۳	۰	۰/۱۷	حداقل سه‌روزه		
۰/۳۱	۰/۹۹	-۲۱ (L)	۰/۵۴	۰/۰۳	۰/۳۴	۰	۰/۰۰	۱/۳۱	۰	۰/۳۵	حداقل هفت‌روزه		
۰/۰۵	۰/۸۰	-۵۲ (M)	۰/۸۷	۰/۳۹	۰/۹۷	۰	۰/۱۵	۱/۶۳	۰/۱۴	۰/۷۴	حداقل ۳۰ روزه		
۰/۰۰	۰/۵۳	-۷۶ (H)	۱/۱۹	۰/۸۸	۱/۴۰	۰/۰۸	۰/۴۹	۱/۷۲	۰/۴۲	۱/۰۵	حداقل ۹۰ روزه		
۰/۳۲	۰/۳۱	-۳ (L)	۱۶/۱۸	۱۰/۱۹	۹۱/۱۱	۵/۸۱	۱۵/۱۰	۷۹	۳/۶۱	۱۲/۵	حداکثر یک‌روزه		
۰/۹۳	۰/۰۱	-۴۰ (M)	۱۲/۷۶	۸/۳۳	۳۲/۶۳	۵/۴۱	۹/۲۱	۲۸/۱۳	۳/۱۰	۹/۱۵	حداکثر سه‌روزه		
۰/۸۲	۰/۰۷	-۵۲ (M)	۹/۹۱	۶/۴۲	۲۵/۸۳	۳/۵۴	۷/۲۱	۲۰/۶۳	۳/۰۳	۷/۷۷	حداکثر هفت‌روزه		
۰/۰۵	۰/۳۹	-۱۵ (L)	۶/۷۷	۴/۷۳	۱۵/۷۱	۲/۵۹	۴/۱۲	۱۲/۰۶	۲/۴۵	۵/۷۷	حداکثر ۳۰ روزه		
۰/۰۳	۰/۳۲	-۴۰ (M)	۴/۹۰	۳/۸۰	۹/۲۰	۲/۰۳	۳/۲۵	۸/۱۱	۲/۳۲	۴/۱۶	حداکثر ۹۰ روزه		
۰/۳۲	۰/۹۹	-۲۱ (L)	۰/۱۹	۰/۰۱	۰/۱۴	۰	۰/۰۰۲	۰/۵۳	۰	۰/۱۵	تعداد روزهای صفر شاخص جریان پایه		
<b>گروه ۳</b>													
۰/۶۸	۰/۰۱	-۴۰ (M)	۳۱۲	۲۹۰	۳۳۲	۲۵۵	۳۰۴	۳۱۰	۲۸۸	۲۹۲	شماره روز وقوع حداقل جریان سالانه		
۰/۵۱	۰/۱۳	-۴۰ (M)	۲۴۰	۱۵۵	۳۴۰	۱۷۰	۲۲۸	۲۴۰	۱۵۰	۱۹۵	شماره روز وقوع حداکثر جریان سالانه		
<b>گروه ۴</b>													
۰	۱/۲	-۱۰۰ (H)	۶/۴۲	۴/۵۸	۲۶	۱	۱۱	۱۶	۱	۵	تعداد پالس‌های کم <sup>۳</sup>		
۰/۱۵	۰/۳۹	-۵۷ (M)	۱۱/۸۹	۶/۵	۱۲۰	۲	۵	۱۹۱	۱/۵	۷	تعداد پالس‌های بالا <sup>۴</sup>		
۰/۱۶	۰/۱۱	-۶۴ (H)	۱۰/۴۲	۸/۱۶	۱۸	۳	۱۰	۱۶	۵	۹	میانگین مدت تداوم پالس‌های کم		
۰/۰۰	۰	۳۶ (M)	۲/۵	۲	۴/۵	۱	۲	۲۱	۱	۲	میانگین مدت تداوم پالس‌های بالا		
<b>گروه ۵</b>													
۰/۳۵	۰/۰۹	-۳ (L)	۰/۳۱	۰/۱۵	۰/۴۱	۰/۰۳	۰/۱۶	۰/۴	۰/۰۸	۰/۱۷	میزان افت		
۰/۳۱	۰/۳۴	-۴۰ (M)	-۰/۱۳	-۰/۲	-۰/۰۵	-۰/۳۲	-۰/۱۳	-۰/۰۸	-۰/۳۴	-۰/۱۷	میزان افزایش		
۰/۱۴	۰/۰۹	-۶۴ (H)	۱۱۱/۳	۹۸/۵۸	۱۳۵	۶۳	۹۶	۱۳۲	۷۸	۱۰۶	تعداد برگشت‌های هیدرولوژیکی		

H= High (> 67%), M= Middle (34-66%), L= Low (< 33%)

۱. اهداف RVA بر مبنای حدود (± STD) میانگین است.

2. Deviation Factor

۳. منظور درصد مواقعی است که متوسط جریان روزانه کمتر از محدوده ۲۵ درصد از کل جریان‌های قبل از تغییرات قرار می‌گیرد.

۴. منظور درصد مواقعی است که متوسط جریان روزانه بیش از محدوده ۷۵ درصد از کل جریان‌های قبل از تغییرات قرار می‌گیرد.

پایه و مدت زمان تداوم پالس‌های کم) نشان می‌دهد مقادیر پارامترهای یادشده در دوره رژیم تغییر یافته نسبت به شرایط طبیعی کاهش چشمگیری داشته است. بنابراین، جریان از صدک بیش از ۳۳ درصد (رژیم طبیعی جریان) افت شدیدی کرده و به سمت صدک کمتر از ۳۳ درصد گرایش پیدا کرده است. از طرفی، پارامتر حداکثر جریان یک‌روزه در طبقه عددی پایین RVA، کاهش داشته و در طبقه عددی بالا، افزایش داشته است که نشان‌دهنده افزایش فراوانی و پیک سیلاب است. همچنین، پارامتر تعداد روزهای جریان صفر و مدت زمان رخداد دبی حداقل و حداکثر جریان در دوره رژیم جریان تغییر یافته نیز افزایش پیدا کرده است.

نتایج ارزیابی جریان محیط زیستی با استفاده از پارامترهای گروه EFC

هیدروگراف دبی روزانه ایستگاه هیدرومتری نوده- خاندوز طی دوره آماری مطالعه شده بر اساس پنج گروه مؤلفه‌های رژیم جریان محیط زیستی (EFC) از طریق نرم‌افزار IHA7 تفکیک شد (شکل ۹). این پنج نوع جریان، طیف کاملی از وضعیت جریان را ارائه می‌دهند که نشان‌دهنده وضعیت پایداری اکولوژیکی رودخانه هستند.

گروه نخست مؤلفه‌های EFC (میانگین مقادیر جریان‌های کم ماهانه) در دوره متأثر از فعالیت‌های انسانی روند نزولی داشته است. در این خصوص ماه‌های فصول تابستان، بهار و پاییز به ترتیب حداکثر و ماه‌های فصل زمستان حداقل کاهش و تغییرات را در دوره متأثر از فعالیت‌های انسانی داشته‌اند.

در مورد مؤلفه‌های گروه دوم (جریان‌های بسیار کم)، فراوانی این پارامتر طی سال‌های متأثر از فعالیت‌های انسانی، روند افزایشی داشته است. پیک جریان این پارامتر نیز کاهش یافته است. در دوره رژیم جریان طبیعی، متوسط زمان رخداد مقادیر این پارامتر روزهای ۲۸۸ تا ۳۱۰ است، در حالی که در دوره زمانی رژیم جریان تغییر یافته، بین روزهای ۲۵۵ تا ۳۳۲ اتفاق می‌افتد. نتایج این گروه برای رودخانه خرمارود نشان‌دهنده کاهش شدید مقادیر جریان‌های کم و افزایش مدت تداوم آن در فصول با بارندگی کم است (شکل ۱۰).

گروه چهارم: تناوب و مدت تداوم پالس‌های کم و بالای جریان

تعداد پالس‌های کم جریان نسبت به پالس‌های بالای جریان در دوره رژیم جریان تغییر یافته بیشتر است. تعداد پالس‌های کم و بالای جریان در دوره رژیم جریان طبیعی در مقایسه با دوره متأثر از فعالیت‌های انسانی زیادتر است. همچنین، تعداد پالس‌های سیلاب‌های بزرگ و کوچک نیز افزایش چشمگیری داشته است (شکل ۶).

گروه پنجم: - شدت کاهش و افزایش جریان

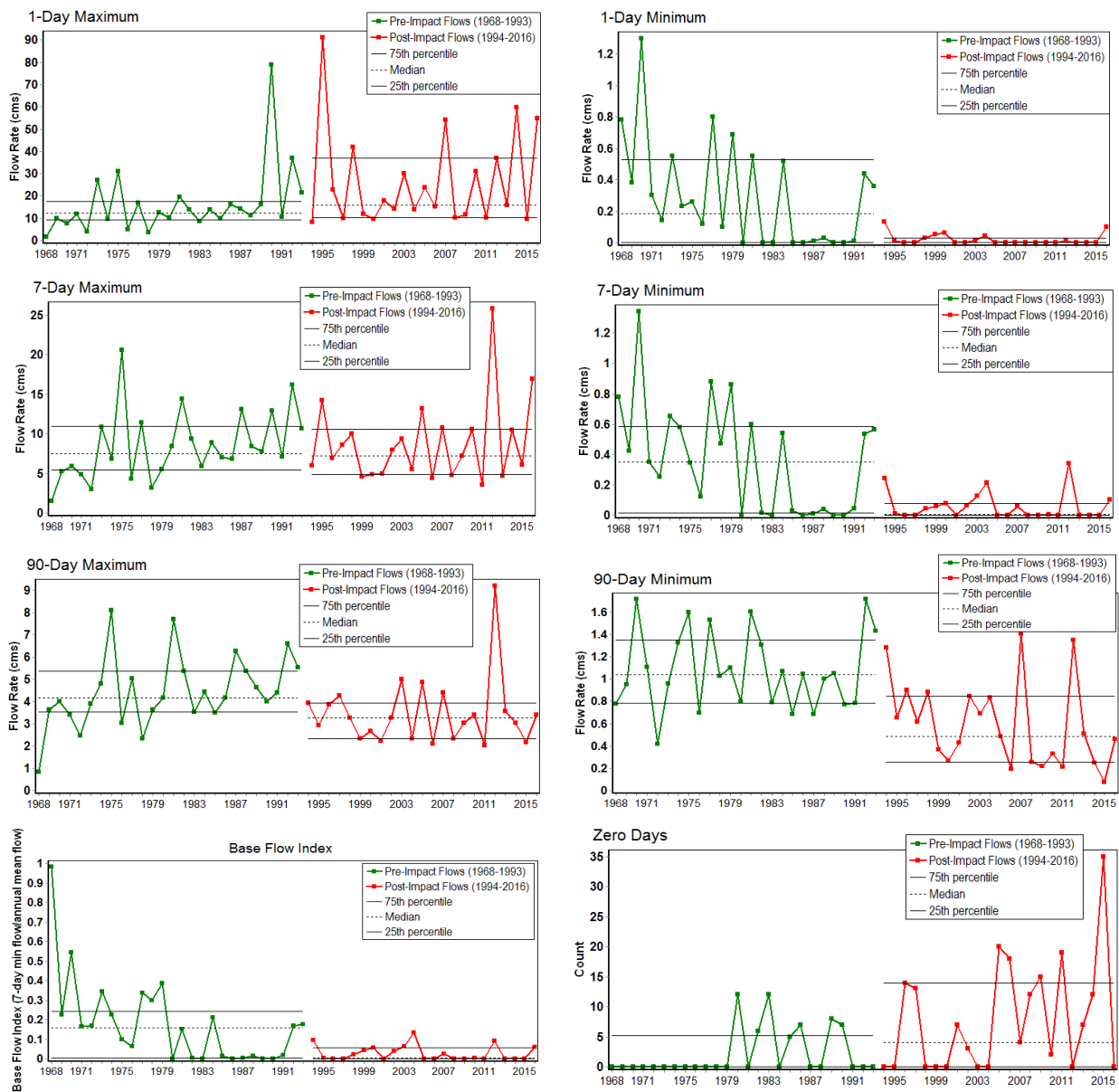
میزان افزایش و کاهش شاخه هیدروگراف جریان در دوره رژیم جریان متأثر از فعالیت‌های انسانی در طبقه متوسط RVA کاهش یافته است (جدول ۴).

تغییرات ۳۳ پارامتر IHA در سه طبقه هدف RVA

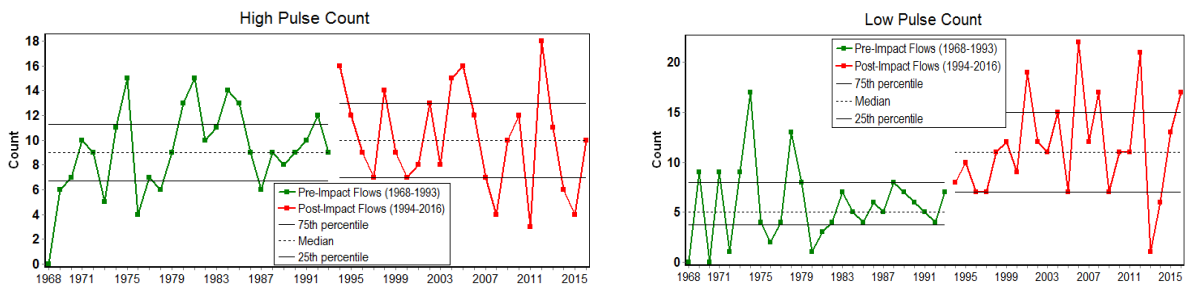
فراوانی مقادیر ۳۳ پارامتر تغییرات هیدرولوژیکی (IHA) در دوره رژیم تغییر یافته در سه طبقه عددی RVA (طبقه پایین: کمتر یا مساوی صدک ۳۳؛ طبقه متوسط: شامل صدک ۳۴ تا ۶۷؛ طبقه بالا: شامل مقادیر بیشتر از صدک ۶۷) خارج از محدوده تغییرات رژیم طبیعی (محدوده مورد انتظار) هستند. حداکثر تغییرات رژیم جریان به ترتیب اولویت مربوط به طبقه پایین، بالا و متوسط RVA است. مقادیر مثبت تغییرات هیدرولوژیکی اغلب پارامترها (نمودار میله‌ای زردرنگ) در طبقه عددی پایین قرار دارند که نشان‌دهنده افزایش فراوانی مقادیر پارامترهای تغییرات هیدرولوژیکی در این طبقه نسبت به فراوانی مورد انتظار (محدوده تغییرات طبیعی) است. در این طبقه بیشترین افزایش فراوانی مربوط به گروه اول و دوم از پارامترهای تغییرات هیدرولوژیکی است؛ اما مقادیر منفی تغییرات هیدرولوژیکی اغلب پارامترها مربوط به طبقه بالا (نمودار میله‌ای قرمز رنگ) و سپس طبقه متوسط (نمودار میله‌ای سبزرنگ) RVA است که کاهش فراوانی مقادیر پارامترهای تغییرات هیدرولوژیکی این طبقه‌ها را نسبت به فراوانی مورد انتظار (محدوده تغییرات طبیعی) نشان می‌دهد (شکل ۸). افزایش فراوانی (طبقه عددی پایین) و کاهش فراوانی (طبقه عددی متوسط و بالا) RVA مقادیر میانگین بیشتر پارامترهای تغییرات هیدرولوژیکی مانند (میانگین ماهانه، حداقل جریان‌های یک تا ۹۰ روزه، حداکثر سه تا ۹۰ روزه، شاخص جریان



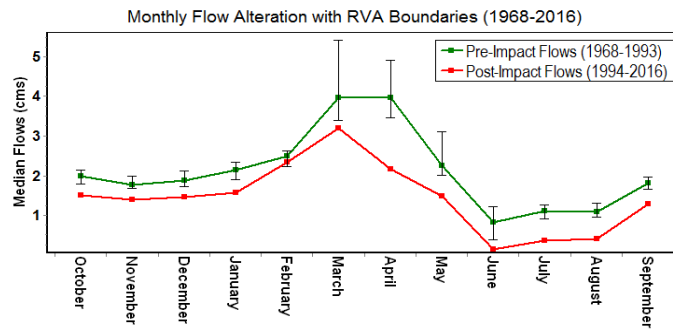
شکل ۴. نمودار مقایسه تغییرات دبی میانگین ماهانه و محدوده تغییرپذیری جریان (میان و صدک ۷۵ و ۲۵) در دو دوره رژیم طبیعی و رژیم تغییر یافته جریان



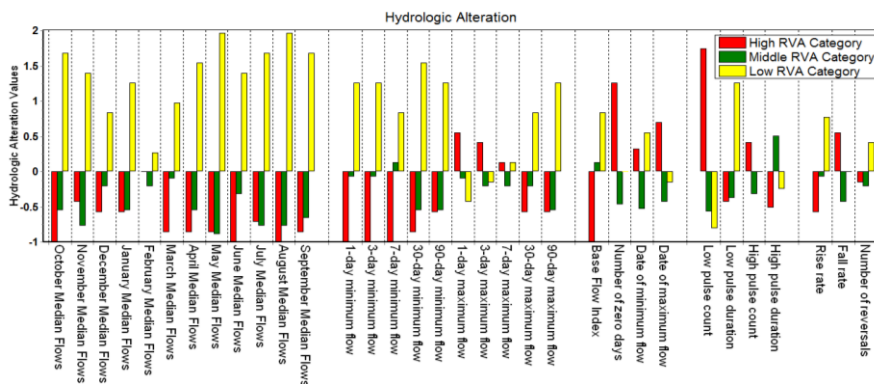
شکل ۵. مقایسه پارامترهای گروه دوم IHA و محدوده تغییرپذیری جریان (میانگین صدک ۷۵ و ۲۵) در دو دوره قبل و پس از تغییر رژیم جریان



شکل ۶. مقایسه پارامتر تعداد پالس‌های جریان کم (پایه) و زیاد در دو دوره زمانی قبل و پس از تغییر رژیم جریان

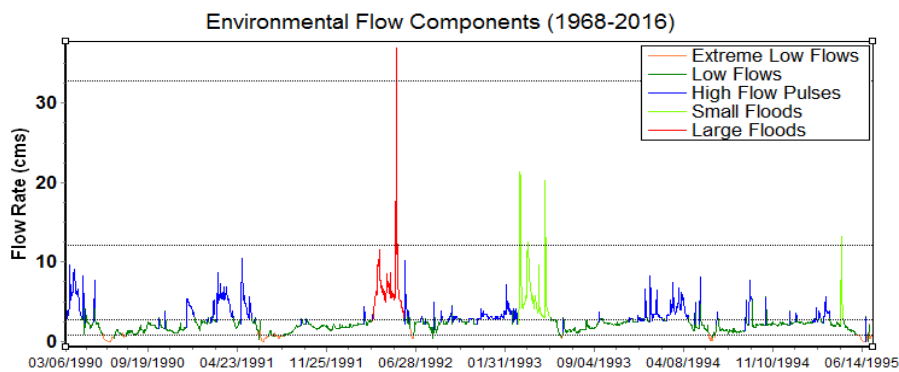


شکل ۷. میانۀ جریان ماهانه در دو دوره قبل و بعد از تأثیرات و حد بالا و پایین RVA (خط سبز و قرمز به ترتیب نشان‌دهنده دوره قبل و بعد از تغییر رژیم جریان)

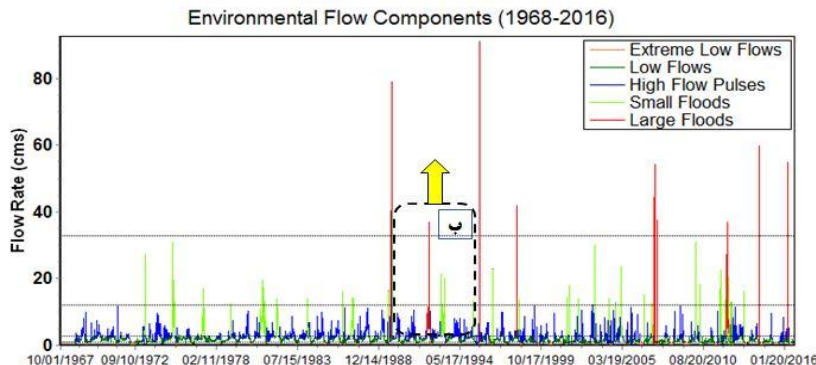


شکل ۸. نمودار درجه تغییرات ۳۳ پارامتر IHA در سه طبقه هدف RVA

الف



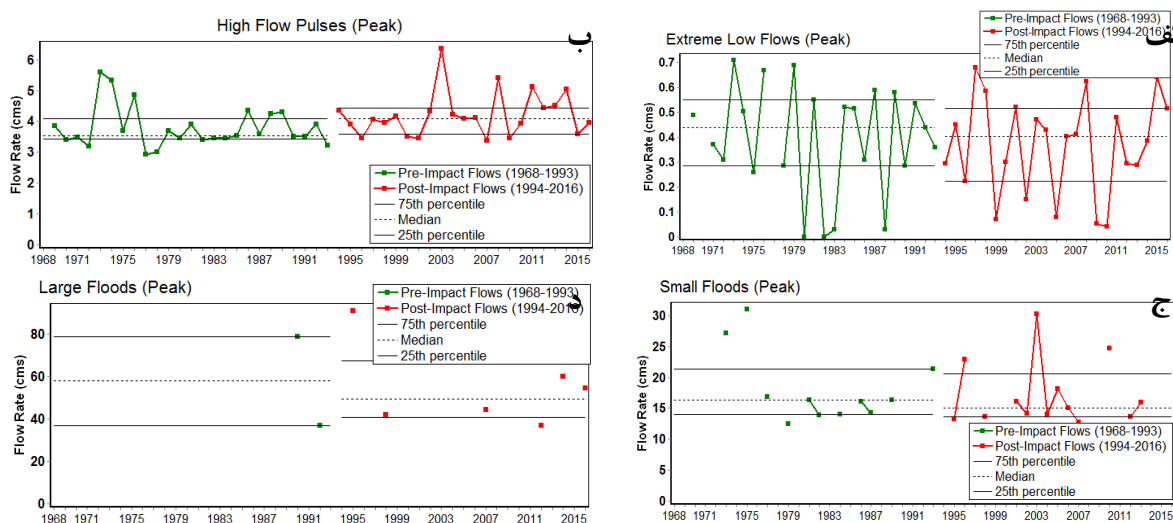
ب



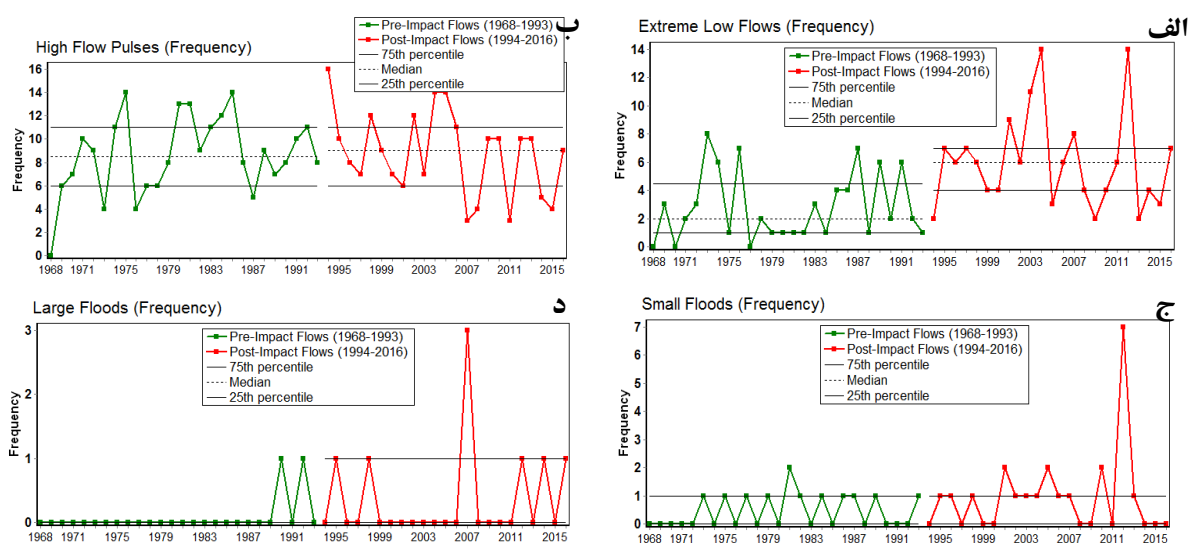
شکل ۹. الف) نمودار مؤلفه‌های رژیم جریان محیط زیستی (EFC)، ایستگاه هیدرومتری نوده خاندوز در دوره آماری ۱۹۶۸-۲۰۱۶ میلادی؛ ب) نمودار یادشده در مقیاس کوتاه‌مدت

افزایشی دارند که تغییر فراوانی و افزایش دبی سیلاب‌های بزرگ را نشان می‌دهند. در نتیجه با این روند باید شاهد افزایش دبی در دوره بازگشت‌های مختلف بود (شکل ۱۱). مدت زمان تداوم رخداد این سه پارامتر کاهش یافته و از طرفی بازه زمانی وقوع آنها طی سال آبی نیز تغییر یافته است. حدود زمانی وقوع این سه پارامتر بر مبنای حد بالا و پایین (صدک ۲۵ و ۷۵) تعیین شد (شکل ۱۲).

در سه گروه آخر مؤلفه‌های EFC، (پالس‌های جریان زیاد، سیلاب‌های کوچک و بزرگ)، به طور متوسط مقادیر دبی پیک در دوره متأثر از فعالیت‌های انسانی به خصوص برای پارامتر سیلاب‌های بزرگ افزایش معناداری پیدا کرده است (شکل ۱۰). نتایج به دست آمده از فراوانی رخداد این پارامترها نشان می‌دهد فراوانی پالس‌های جریان زیاد در دوره متأثر از فعالیت‌های انسانی تقریباً روند کاهشی دارد، اما به عکس فراوانی سیلاب‌های کوچک و بزرگ روند

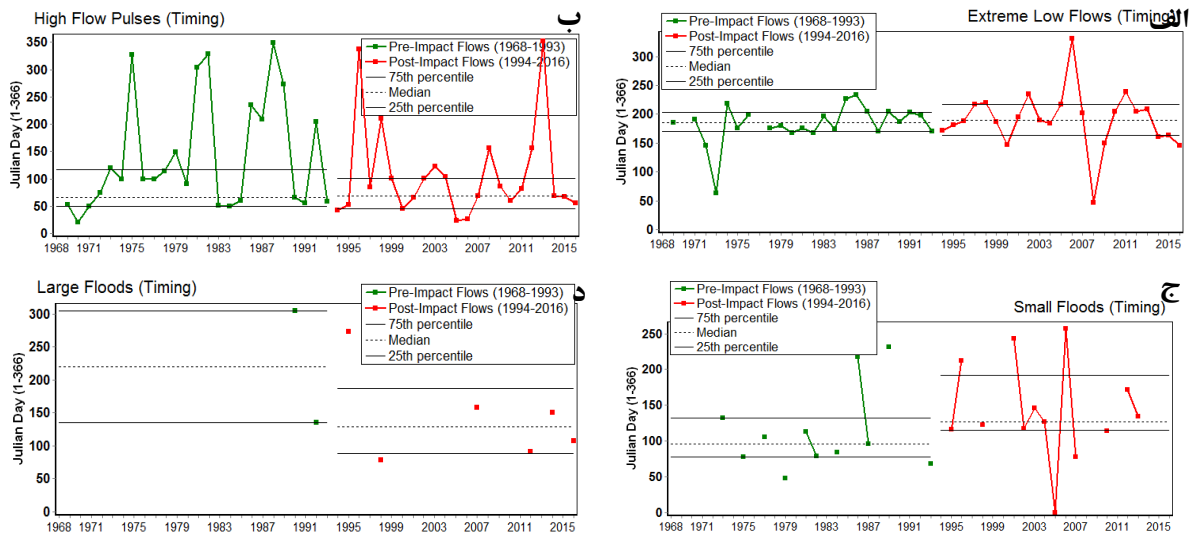


شکل ۱۰. مقادیر پیک مؤلفه‌های EFC (الف) جریان‌های بسیار کم؛ (ب) پالس‌های جریان بالا؛ (ج) سیلاب‌های کوچک و (د) سیلاب‌های بزرگ در دو دوره قبل و بعد از تأثیرات

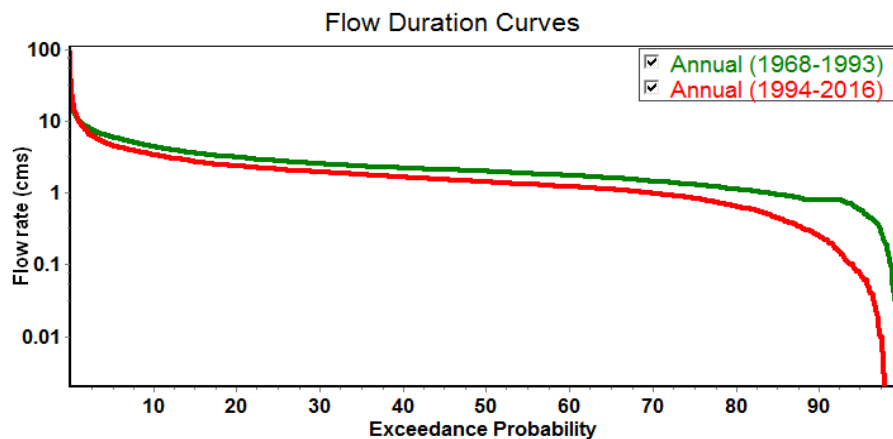


شکل ۱۱. فراوانی مقادیر مؤلفه‌های EFC (الف) جریان‌های بسیار کم؛ (ب) پالس‌های جریان بالا؛ (ج) سیلاب‌های کوچک و (د) سیلاب‌های بزرگ در دو دوره قبل و بعد از تأثیرات





شکل ۱۲. متوسط زمان رخداد مؤلفه‌های EFC (الف) جریان‌های بسیار کم؛ (ب) پالس‌های جریان بالا؛ (ج) سیلاب‌های کوچک و (د) سیلاب‌های بزرگ در دو دوره قبل و بعد از تأثیرات



شکل ۱۳. منحنی تداوم جریان برای دو دوره رژیم جریان طبیعی و تغییر یافته

موجود، در دوره رژیم جریان تغییر یافته، ۰/۵ درصد از کل زمان رژیم جریان، رودخانه بدون جریان ثبت شده است.

**نتایج طبقه‌بندی رژیم جریان آب در دو دوره رژیم جریان طبیعی و تغییر یافته**

طبقه رژیم جریان ایستگاه نوده خاندوز براساس محاسبه شش شاخص طبقه‌بندی رژیم جریان و برای دو دوره رژیم جریان طبیعی و رژیم جریان تغییر یافته تعیین شد (جدول‌های ۵- ۷). همان‌طور که در جدول ۵ مشاهده می‌شود، دوره رژیم جریان طبیعی در طبقه «رواناب دائمی PR» و دوره رژیم جریان تغییر یافته در طبقه «دائمی با سیلاب‌های ناگهانی PF» قرار گرفته است. شایان یادآوری

**نتایج منحنی تداوم جریان روزانه برای دو دوره رژیم جریان طبیعی و تغییر یافته**

منحنی تداوم جریان روزانه برای دو دوره رژیم جریان طبیعی و تغییر یافته در شکل ۱۳ نشان داده شده است، بیشترین تمایز بین منحنی تداوم جریان تغییر یافته با منحنی تداوم جریان طبیعی مربوط به قسمت جریان پایه و دبی‌های بسیار کم (با روند کاهشی) و سیل‌های بزرگ (با روند افزایشی) است. از کل دوره آماری مطالعه‌شده، سهم زمانی مجموع سیل‌های کوچک و بزرگ حدود یک درصد از کل زمان رژیم جریان است. ۵۰ درصد زمان از کل دوره رژیم جریان طبیعی و تغییر یافته به ترتیب مربوط به مقادیر برابر یا بیشتر از دبی ۲ و ۱/۴ است. با توجه به آمار روزانه

رودخانه هنوز دائمی است اما روند آن غیردائمی شدن در سال‌های آتی را نشان می‌دهد. بیشترین مقدار شاخص FLDPRED در دوره‌های آماری یادشده و در کل دوره آماری به ترتیب اولویت مربوط به دوره دوماهه «دی-بهمن»، «آذر-دی» و «اردیبهشت-خرداد» و بر مبنای فصل به ترتیب اولویت مربوط به زمستان، بهار، پاییز و تابستان است.

است با اینکه در آمار موجود روزهای بدون جریان ثبت شده است، اما با مشاهدات میدانی در فصل تابستان طی سال‌های ۱۳۹۶ و ۱۳۹۷ و همچنین به استناد مشاهدات جوامع محلی مشخص شد که در فصل تابستان جریان اندکی در بستر رودخانه تداوم دارد که به علت تغییرپذیری لایه بالایی بستر رودخانه، این آمار توسط ایستگاه هیدرومتری ثبت نشده است. به همین علت، جریان

جدول ۵. شاخص‌های تعیین‌کننده طبقه رژیم جریان در دو شرایط رژیم جریان طبیعی و تغییر یافته

شاخص‌های تعیین‌کننده طبقه رژیم	وضعیت جریان با رژیم طبیعی (۱۳۴۶-)	وضعیت رژیم جریان تغییر یافته (۱۳۷۲-)
جریان	(۱۳۷۱)	(۱۳۹۵)
BFI (%)	۱۵/۹	۰/۲۳
ZERODAY (میانگین تعداد روز)	۰	۴
FLDFREQ (yr <sup>-1</sup> )	۰/۳۲	۱/۱
FLDPRED (-)	۰/۵	۰/۴۲
FLDTIME (شماره روز)	مندرج در جدول ۴	مندرج در جدول ۴
DAYCV (%)	۹۰	۱۴۰
طبقه رژیم جریان	رواناب دائمی (PR)	دائمی با سیلاب‌های ناگهانی (PF)
مقدار آستانه سیلاب (m <sup>3</sup> /s)		۱۵/۸

جدول ۶. ویژگی‌های وقایع سیلاب بیشتر از مقدار آستانه سیل در دو دوره رژیم جریان طبیعی و تغییر یافته

ویژگی‌های سیل بیشتر از آستانه	رژیم جریان طبیعی (۱۳۴۶-۱۳۷۱)															رژیم جریان تغییر یافته (۱۳۷۲-۱۳۹۵)				
دبی پیک	۱۳۵۲	۱۳۵۴	۱۳۵۶	۱۳۶۰	۱۳۶۵	۱۳۶۸	۱۳۶۹	۱۳۷۱	۱۳۷۲	۱۳۷۴	۱۳۷۵	۱۳۷۷	۱۳۸۰	۱۳۸۲	۱۳۸۴	۱۳۸۶	۱۳۸۹	۱۳۹۱	۱۳۹۳	۱۳۹۵
FLDTIME	۲۷/۲	۳۱	۱۶/۹	۱۶/۴	۱۶/۱	۱۶/۳	۷۹	۳۶/۹	۲۱/۴	۹۱/۱۱	۲۲/۹	۴۱/۹	۱۶/۱۴	۳۰/۲	۱۸/۱۵	۴۴/۳	۳۴/۷	۳۶/۹	۵۹/۹	۵۴/۷
ماه رخداد	بهمن	آذر	دی	دی	اردیبهشت	اردیبهشت	مرداد	بهمن	آذر	خرداد	اردیبهشت	آذر	خرداد	بهمن	اردیبهشت	اسفند	دی	دی	بهمن	دی
فراوانی رخداد (اولویت)	۱- (دی=۲، بهمن=۲، اردیبهشت=۲) و ۲- (آذر=۱) و ۳- (دی=۳)، ۲- (آذر=۲، بهمن=۲، اردیبهشت=۲ و خرداد=۲) و ۳- (اسفند=۱) و ۴- (مرداد=۱)																			
فراوانی کل دوره (اولویت)	۱- (دی=۵)، ۲- (بهمن=۴ و اردیبهشت=۴)، ۳- (آذر=۳)، ۴- (خرداد=۲) و ۵- (اسفند=۱ و مرداد=۱)																			

جدول ۷. محاسبه شاخص FLDPRD برای ایستگاه هیدرومتری نوده خاندوز

دوره‌های دو ماه												ویژگی‌های سیل بیشتر از آستانه
۱۲	۱۱	۱۰	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	
۱	۱۲	۱۱	۱۰	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	فراوانی رخداد (Ft)
۰	۱	۱	۰	۲	۲	۰	۲	۴	۳	۱	۰	رژیم جریان طبیعی
۰	۰/۱۳	۰/۱۳	۰	۰/۲۵	۰/۲۵	۰	۰/۲۵	۰/۵	۰/۳۸	۰/۱۳	۰	FLDPRD
۰	۰	۰	۲	۴	۲	۱	۳	۵	۵	۲	۰	فراوانی رخداد (Ft)
۰	۰	۰	۰/۱۷	۰/۳۳	۰/۱۷	۰/۰۸	۰/۲۵	۰/۴۲	۰/۴۲	۰/۱۷	۰	رژیم جریان تغییر یافته
۰	۱	۱	۲	۶	۴	۱	۵	۹	۸	۳	۰	فراوانی رخداد (Ft)
۰	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۱	۰/۳	۰/۲	۰/۰۵	۰/۲۵	۰/۴۵	۰/۴	۰/۱۵	۰	FLDPRD
کل دوره آماری												فراوانی رخداد (Ft) به
(۱ دی-بهمن؛ ۲ آذر-دی؛ ۳ اردیبهشت-خرداد؛ ۴ بهمن-اسفند؛ ۵ فروردین-اردیبهشت؛ ۶ آبان-آذر؛ ۷ خرداد-تیر و ۸ اسفند-فروردین، تیر-مرداد، مرداد-شهریور												ترتیب اولویت

- ماه مهر (۱)، ماه شهریور (۱۲)، دی سیل بیشتر از آستانه (Ft)

### نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر آمار دبی روزانه (از سال ۱۳۴۶ تا ۱۳۹۵) ایستگاه هیدرومتری نوده خاندوز در رودخانه خرمارود- حوضه آبخیز تیل‌آباد (استان گلستان)، برای بررسی تغییرات رژیم هیدرولوژیکی با استفاده از شاخص‌های تغییرات هیدرولوژیکی IHA در محدوده تغییرات RVA و مؤلفه‌های جریان زیست‌محیطی EFC از طریق نرم‌افزار IHA7 بررسی شدند. شروع معنادار روند تغییرات با استفاده از آزمون رقم معناداری در سال ۱۳۷۲ مشخص شد. نتیجه‌گیری تحقیق حاضر به شرح زیر است:

۱. رژیم جریان آب سالانه طی دوره ۱۳۴۶ تا ۱۳۹۵ تغییر کرده است و دخالت‌های انسانی آثار شدیدی بر وضعیت هیدرولوژیکی حوضه آبخیز تیل‌آباد به‌خصوص از سال ۱۳۷۲ به بعد گذاشته‌اند. این دخالت‌ها به افزایش میزان دبی پیک سالانه، کاهش مدت تداوم جریان‌های بالا، کاهش میانگین دبی سالانه و همچنین تغییر مدت تداوم و زمان رخدادهای جریان‌های حداکثر و حداقل سالانه منجر شده است.

۲. به طور کلی، اغلب پارامترهای IHA در دوره پس از تأثیرات تغییرات درخور توجهی داشته است. به‌طوری‌که مقادیر میانگین دبی همه ۱۲ ماه کاهش معناداری داشته‌اند و به عکس فراوانی رویدادهای جریان کم برای همه ماه‌ها افزایش یافته است. پارامترهای حداقل جریان یک، هفت و ۹۰ روزه نیز تغییرات چشمگیر و روند نزولی دارد. همچنین تعداد روزهای جریان با دبی صفر نیز

افزایش پیدا کرده است، به‌طوری‌که در سال‌های اخیر (۱۳۹۴) حدود ۳۵ روز در ایستگاه هیدرومتری نوده خاندوز جریانی ثبت نشده است. نمودارهای پارامترهای حداکثر یک، هفت و ۹۰ روزه به‌ترتیب نشان‌دهنده افزایش، کاهش و کاهش مقادیر دبی مربوط است که بیان می‌کند مقدار و تعداد دبی‌های حداکثر لحظه‌ای افزایش یافته و از طرفی مدت تداوم پالس‌های بالا کاهش یافته است. تعداد رویدادهای پالس‌های بالا نیز روند کاهشی در حالی که رویدادهای پالس کم روند افزایشی داشته است. تعداد پالس‌های سیلاب‌های بزرگ نیز افزایش یافته است.

۳. کاهش دبی‌های حداقل یک تا ۹۰ روزه و افزایش مدت تداوم دوره‌های کم‌آبی، نه تنها خطر بزرگ برای نیازهای جوامع انسانی به نظر می‌رسد بلکه تهدیدی بزرگ برای حیات جانوری و گیاهی حوضه آبخیز تیل‌آباد است.

۴. تغییرات تعداد و تناوب پالس‌های کم و بالای جریان در دوره پس از تغییرات رژیم جریان به‌گونه‌ای بوده که تأثیر شدید و مخربی بر سطح رطوبت خاک، کیفیت زیستگاه و همچنین پوشش گیاهی حاشیه رودخانه گذاشته است.

۵. در طبقه متوسط RVA درجه تغییرات ۲۴ پارامتر متوسط تا زیاد و ۱۲ پارامتر دیگر درجه تغییرات آنها پایین به دست آمد و این نشان‌دهنده درجه زیاد تغییرات هیدرولوژیکی حوضه آبخیز تیل‌آباد است.

۶. براساس پنج گروه مؤلفه‌های رژیم جریان محیط زیستی (EFC)، مقدار و فراوانی مؤلفه‌های دبی حداقل

## منابع

- ماهانه و جریان‌های بسیار کم در دوره رژیم تغییر یافته به ترتیب در فصول تابستان، بهار و پاییز حداکثر کاهش و در فصل زمستان حداقل کاهش را داشته است و از طرفی، دامنه زمانی رخداد مؤلفه‌های یادشده طی سال افزایش یافته است.
۷. در سه گروه آخر مؤلفه‌های EFC، (پالس‌های جریان بالا، سیلاب‌های کوچک و بزرگ)، به طور متوسط مقادیر دبی پیک در دوره پس از آثار به خصوص برای پارامتر سیلاب‌های بزرگ افزایش معناداری پیدا کرده است و از طرفی، مدت تداوم رخداد این سه پارامتر کاهش یافته است. همچنین، فراوانی پالس‌های جریان بالا روند کاهشی و به عکس فراوانی سیلاب‌های کوچک و بزرگ روند افزایشی داشته است.
۸. ۸۵ درصد از ۳۳ پارامتر تغییرات رژیم هیدرولوژیکی، مقدار معناداری کم داشتند، به این معنا که بین مقادیر دوره قبل از آثار و دوره بعد از تأثیرات این پارامترها، اختلاف معنادار زیادی وجود دارد.
۹. طی دوره آماری ۴۹ ساله ثبت‌شده ایستگاه هیدرومتری نوده خاندوز، طبقه رژیم جریان رودخانه خرمارود از «رواناب دائمی (PR)» (رژیم جریان طبیعی) به «دائمی با سیلاب‌های ناگهانی (PF)» (رژیم جریان تغییر یافته) تغییر کرده است.
۱۰. در خصوص مقادیر سیل بیشتر از آستانه، بیشترین فراوانی به ترتیب اولویت مربوط به دوره دوماهه «دی-بهمن»، «آذر-دی» و «اردیبهشت-خرداد» است، این در حالی است که در آمار ۴۹ ساله ثبت‌شده ایستگاه هیدرومتری نوده خاندوز، سیل بیشتر از آستانه در دوره‌های «شهریور-مهر» و «مهر-آبان» اتفاق نیفتاده است.
۱۱. منحنی تداوم جریان بیشترین تغییرات بین منحنی تداوم جریان تغییر یافته و جریان طبیعی در قسمت جریان پایه و دبی‌های بسیار کم (با روند کاهشی) و همچنین سیل‌های بزرگ (با روند افزایشی) نشان داد. سهم زمانی مجموع سیل‌های کوچک و بزرگ حدود یک درصد از کل زمان رژیم جریان و سهم زمان بدون جریان در دوره رژیم جریان تغییر یافته، ۰/۵ درصد است. همچنین، ۵۰ درصد زمان از کل دوره رژیم جریان طبیعی و تغییر یافته به ترتیب مربوط به مقادیر برابر یا بیشتر از دبی ۲ و ۱/۴ است.
- [1]. Office of Deputy for Strategic Supervision, Ministry of Energy. Guideline for Finding Aquatic Ecosystems Environmental Water Requirement, Vice Presidency For Strategic Planning and Supervision, Iran. 2012; 150-205. [Persian]
- [2]. Dyson M, Bergkamp G, Scanlon J. Flow. The Essentials of Environmental Flows. IUCN, Gland, Switzerland and Cambridge, UK. 2003.
- [3]. Tharme R.E. "A global perspective on environmental flow assessment: emerging trends in the development and application of environmental flow methodologies for rivers", Published online in Wiley InterScience. 2003.
- [4]. Richter B.D, Davis M.M, Apse C, Konrad C.. A presumptive standard for environmental flow protection. *River Res.* 2011; 28: 1312–1321.
- [5]. Richter BD, Baumgartner JV, Powell J, Braun DP. A method for assessing hydrologic alteration within ecosystems. *Conserv Biol.* 1996; 10(4):1163–1174.
- [6]. Yang T, Zhang Q, Chen Y.D, Tao X. A spatial assessment of hydrologic alteration caused by dam construction in the middle and lower Yellow River, China. *Hydrol Process.* 2008; 22: 3829–3843.
- [7]. Fernandez J.A, Martinez C, Magdaleno F. Application of indicators of hydrologic alterations in the designation of heavily modified water bodies in Spain. *Environ. Sci.* 2012; 16: 31–43.
- [8]. Papadaki C, Soulis K, Muñoz-Mas R, Martinez-Capel F, Zogaris S, Ntoanidis L. Potential impacts of climate change on flow regime and fish habitat in mountain rivers of the south-western Balkans. *Sci. Total Environ.* 2016; 540: 418–428.
- [9]. Peñas F.J, Barquín J, Álvarez C. Assessing hydrologic alteration: evaluation of different alternatives according to data availability. *Ecol. Indic.* 2016; 60: 470–482.
- [10]. Richter B.D, Baumgartner J.V, Wigington R, and Braun D. P. How much water does a river need? *Freshwater Biology.* 1997; 37: 231-249.
- [11]. Mathews R, Richter B.D. Application of the indicators of hydrologic alteration software in environmental flow setting. *J. Am. Water Res. Assoc.* 2007; 43: 1400–1413.
- [12]. Smakhtin V.U, Revenga C, Doell, P. Taking into account environmental water requirements in global scale water resources assessments. Research Report 2 of the CGIAR Comprehensive Assessment Program of Water Use in Agriculture. Colombo, Sri Lanka: International Water Management Institute. 2004; 24 pp.

- [13]. Salmani H, Sheikh V, Mahini M, Ownegh M. Landuse planning for minimization runoff and sediment at tilabad watershed in Golestan Province, Iran, Ph.D. thesis, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Iran. 2108; 85-112. [Persian]
- [14]. The Nature Conservancy. Indicators of Hydrologic Alteration Version 7.1 User's Manual.. 2009; 81pp. Available online at: <https://www.conservationgateway.org>.
- [15]. Poff N.L. A hydrogeography of unregulated streams in United States and an examination of scale-dependance in some hydrological discriptors. *Freshwater Biology*. 1996; 36 pp: 71-91.
- [16]. Smakhtin V, Anputhas M. An assessment of environmental flow requirements of Indian river basins. Colombo, Sri Lanka: International Water Management Institute. 2006; 42 p.
- [17]. Oueslati O, De Girolamo A.M, Abouabdillah A, Lo Porto A. Attempts to flow regime classification and characterization in Mediterranean streams using multivariate analysis. *International Workshop 'Advances in Statistical Hydrology*. 2010; 23-25.
- [18]. Huh, S., Dickey, DA., Meador, MR., Ruh, KE. Temporal analysis of the frequency and duration of low and high streamflow: years of record needed to characterize streamflow variability, *Journal of Hydrology*. 2005; 310: 78-94.
- [19]. Poff NL, Ward JV. Implications of streamflow variability and predictability for lotic community structure: a regional analysis of Streamflow Patterns, *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*. 1989; 46: 1805-1818.