

## بررسی تأثیر احداث سد بر پارامترهای اکوهیدرولوژیکی رودخانه (جاجرود - پایین دست سد لتیان)

مرضیه رضائی<sup>۱</sup>، مهدی یاسی<sup>۲\*</sup>، جواد فرهودی<sup>۳</sup>

۱. دانشجوی دکتری سازه‌های آبی گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج، ایران

۲. دانشیار گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج، ایران

۳. استاد گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج، ایران

(تاریخ دریافت ۱۴۰۱/۰۳/۲۸؛ تاریخ بازنگری ۱۴۰۱/۰۶/۲۸؛ تاریخ تصویب ۱۴۰۱/۰۹/۲۸)

## چکیده

مدیریت پایدار رودخانه‌ها نیازمند ساخت و بهره‌برداری از سدهایی است که جریان محیط زیستی را برای حمایت از اکوسیستم رودخانه پایین دست فراهم کند. بیشتر سدهای ایران رژیم طبیعی جریان را به شدت تغییر داده و باعث آسیب‌های محیط زیستی شده‌اند. هدف از این بررسی، ارزیابی تغییرات کمی پارامترهای هیدرولوژیکی جریان و مؤلفه‌های محیط زیستی رودخانه جاجرود در بازه پایین دست سد لتیان بوده است. در این بررسی، از شاخص تغییرات هیدرولوژیکی و محدوده رویکرد تغییرپذیری برای تحلیل داده‌های بلندمدت جریان در دوره ۷۰ ساله (۱۳۲۶-۱۳۹۶) استفاده شد. نتایج نشان می‌دهد درجه تغییرات تعداد ۲۴ متغیر جریان در دامنه زیاد تا متوسط است، که نشان‌دهنده تغییرات زیاد هیدرولوژیکی رودخانه جاجرود است. متوسط، بیشینه و کمینه جریان در همه ماه‌های سال به ترتیب ۵۷، ۹۴ و ۲۱ درصد کاهش یافته است. درجه تغییر کل پارامترهای هیدرولوژیکی در این بازه ۵۱ درصد بوده است. مقدار و مدت رخدادهای حدی جریان کاهش داشته است؛ به طوری که جریان‌های کمینه و پایه بیشترین تغییر را داشته، و کمترین تغییر مربوط به جریان‌های بیشینه بوده است. همچنین، احداث سد باعث حذف سیلاب‌های بزرگ و کاهش سیلاب‌های کوچک شده است. نتایج نشان می‌دهد اهداف RVA در دوره پس از احداث سد لتیان تأمین نشده و شرایط محیط زیستی رودخانه آسیب شدید دیده است. براساس شاخص‌های اکوهیدرولوژیکی، بازتوانی محیط زیست جاجرود در بازه پایین دست سد نیازمند آزادسازی کمینه جریان مورد نیاز ماهانه در دامنه ۲/۳ تا ۳۳/۸ مترمکعب بر ثانیه و به طور متوسط ۶/۵ مترمکعب بر ثانیه است.

**کلمات کلیدی:** شاخص تغییرات هیدرولوژیکی، روش محدوده تغییرپذیری، جریان محیط زیستی، سد لتیان، جاجرود.

## مقدمه

رودخانه‌ها نقش مهمی در توسعه جامعه بشری ایفا می‌کنند که به واسطه آن رژیم جریان رودخانه به دلیل فعالیت‌های مختلف انسانی تغییر کرده است [۱ و ۲]. انسان با تغییر جریان طبیعی رودخانه از طریق احداث سدها، آن را مطابق با نیاز خود کنترل و مورد استفاده قرار می‌دهد [۳]. دهه‌های گذشته به دلیل ساخت سدهای گسترده شاهد تغییر بزرگ رژیم جریان رودخانه در حوضه‌های آبخیز در سراسر جهان بوده‌ایم [۴ و ۵]. بنابراین، شناسایی اثرات محیط زیستی ناشی از سازه‌های آبی (مانند سدها) به یک بخش اساسی در برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب تبدیل شده است [۶ و ۷]. ساخت سدهای بزرگ، تغییر چشمگیری در میزان تأثیرات هیدرولوژیکی، ژئومورفولوژیکی و اکولوژیکی بر رودخانه‌ها ایجاد کرده است [۷ و ۸].

توسعه آب، که بیشتر مربوط به سدها و انحرافات آب از مسیر اصلی است، به کاهش بیشتر گونه‌های در معرض تهدید و در خطر انقراض کمک کرده است [۹]. مطالعات قبلی نشان می‌دهد تنظیم سدها به طور کلی اثرات بیشتری بر رژیم هیدرولوژیکی نسبت به سایر تغییرات از طریق کاهش تنوع هیدرولوژیکی سیستم‌های رودخانه‌ای داشته است [۴، ۱۰ و ۱۱]. بدیهی است که تغییر رژیم هیدرولوژیکی باعث تغییر سیستم اکولوژیکی در رودخانه‌هاست [۱۱-۱۳]. ساخت سد تأثیرات زیادی بر هیدرولوژی دارد، بنابراین ارزیابی تغییرات هیدرولوژیکی ناشی از ساخت سد از اهمیت علمی برخوردار است. تلاش‌های زیادی برای کشف پیامدهای هیدرولوژیکی مرتبط با ساخت سد در دهه‌های اخیر انجام شده است [۸، ۱۱، ۱۴ و ۱۵].

بیش از ۱۷۰ معیار هیدرولوژیکی (به عنوان مثال، میانگین جریان، فراوانی سیل، بده اوج) برای تشریح اجزای مختلف رژیم جریان رودخانه و سهم آن‌ها در پیامدهای اکولوژیکی در سیستم اکولوژیکی رودخانه در دهه گذشته توسعه یافته است [۱۶]. تا به امروز، چندین نمونه رژیم جریان طبیعی پیشنهاد شده است که هدف آن‌ها حفظ اکوسیستم رودخانه است. در میان آن‌ها، شاید شاخص

تغییر هیدرولوژیکی (IHA<sup>۱</sup>) بیشترین توجه را به خود جلب کرده باشد [۱۷]. IHA جریان را با ویژگی‌های طبیعی مختلف، از جمله میزان جریان‌های ماهانه، مقدار، تناوب و زمان وقوع جریان‌های شدید سالانه و تناوب و مدت تناوب پالس‌های جریان کم و زیاد توصیف می‌کند. ارزیابی هر پارامتر IHA به طور جداگانه ممکن است کار پیچیده‌ای باشد. در چنین شرایطی، ضریب تغییر هیدرولوژیکی برای ارزیابی جامع وضعیت سیستم رودخانه، با بررسی ۳۲ شاخص هیدرولوژیکی و تجزیه و تحلیل ناپارامتری از طریق رویکرد دامنه تغییرپذیری (RVA<sup>۲</sup>) استفاده می‌شود [۱۸].

پیروی از رژیم جریان قبل از تأثیر برای به حداقل رساندن ضریب تغییر هیدرولوژیکی در رژیم جریان و اکوسیستم پایین دست از توسعه پایدار حوضه حمایت می‌کند [۱۸ و ۱۹]. سینگ و جین (۲۰۲۱) از میانگین مربعات درجه تغییر برای ۳۳ پارامتر IHA برای ارزیابی درجه کلی تغییر هیدرولوژیکی در رژیم جریان رودخانه روانوک استفاده کردند و درجه تغییر هیدرولوژیکی متوسط اکوسیستم رودخانه را گزارش دادند [۲۰]. سونگ و همکاران (۲۰۲۰) با استفاده از جذر مجذور میانگین مربعات ۳۳ پارامتر IHA، با در نظر گرفتن ۳۵ ایستگاه اندازه‌گیری در چین، تأثیر سدها بر تغییرات رژیم هیدرولوژیکی را بررسی کردند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که احداث سد، پارامترهای IHA را به جز برای جریان‌های بسیار کم، میانگین جریان ماهانه از دسامبر تا مارس، تعداد پالس کم و تعداد برگشت‌ها کاهش می‌دهد [۱۹]. درجه تغییر هیدرولوژیکی، به عنوان نسبت تفاوت بین فراوانی مورد انتظار با توجه به دوره رژیم طبیعی و فراوانی مشاهده شده در رژیم تغییر یافته، محاسبه می‌شود [۲۱].

علاوه بر فعالیت‌های انسانی، تنوع آب‌وهوا ممکن است با تغییر تبخیر و تعرق و کاهش کل منابع آب منطقه‌ای و درجه تغییر هیدرولوژیکی در سیستم‌های رودخانه‌ای، بر فرایندهای هیدرولوژیکی تأثیر بگذارد [۲۲-۲۴]. برای ارزیابی تغییرات رژیم جریان رودخانه با استفاده از روش IHA/RVA، بیش از ۲۰ سال داده‌های جریان روزانه پیوسته تاریخی مورد نیاز است [۲۵]. با داده‌های سری

1. Indicator of Hydrologic Alteration  
2. Range of Variability Approach

### روش کار (مواد و روش‌ها)

#### منطقه مطالعه شده

رودخانه جاجرود رودخانه‌ای دائمی است با جهت شمالی - جنوبی و مساحت حوضه آبریز در حدود ۱۰۶۰ کیلومتر مربع که متوسط دمای سالانه این حوضه ۱۲ درجه سانتی‌گراد و متوسط بارندگی سالانه آن ۳۶۹ میلی‌متر است. این رودخانه یکی از رودخانه‌های مهم استان تهران است که از کوه‌های بستک در بلندی‌های خرسنگ‌کوه سرچشمه می‌گیرد و قسمتی از آب شرب استان تهران را تأمین می‌کند.

بازه مورد مطالعه رودخانه جاجرود در مختصات شرقی ۵۶۱۳۲۷ تا ۵۷۱۹۰۹ متر و مختصات شمالی ۳۹۶۰۷۷۱ تا ۳۹۳۷۸۹۸ متر، و در شهرستان جاجرود واقع شده است که طولی حدود ۲۲ کیلومتر را شامل می‌شود. این بازه از پایین دست سد لتیان شروع و تا سد ماملو ادامه می‌یابد. جدول ۱ مشخصات ایستگاه هیدرومتری لتیان- رودخانه جاجرود را نشان می‌دهد. محدوده مطالعه شده رودخانه جاجرود در شکل ۱ نمایش داده شده است. تراز ارتفاعی کف رودخانه در بالادست ۱۵۰۶ متر و در پایین دست ۱۲۵۹ متر نسبت به سطح آب‌های آزاد است. بر اساس طول بازه مورد مطالعه و ترازهای ارتفاعی، شیب متوسط رودخانه جاجرود در بازه مورد مطالعه ۴ درصد است. عرض متوسط بستر رودخانه در سیلاب‌دشت آن از ۳۵۰ تا ۴۵۰ متر است.

#### داده‌های تحقیق

در تحقیق حاضر، تأثیر احداث سد لتیان روی شاخص‌های هیدرولوژیکی و محیط زیستی در رودخانه جاجرود بررسی شد. در این بخش، داده‌های روزانه بده جریان به مدت ۷۰ سال (۱۳۲۶-۱۳۹۶) در ایستگاه هیدرومتری لتیان، از مدیریت منابع آب تهران و شرکت آب منطقه‌ای تهران، دریافت شد. بهره‌برداری از سد لتیان در سال ۱۳۴۶ شروع شده است، بنابراین سال ۱۳۴۴ به عنوان نقطه شروع تغییرات هیدرولوژیکی در نظر گرفته شد. بنابراین، داده‌های آماری از سال ۱۳۲۶-۱۳۴۴ قبل از احداث سد و از سال ۱۳۴۵-۱۳۹۶ بعد از احداث سد در نظر گرفته شد. مشخصات ایستگاه هیدرومتری لتیان در جدول ۱ و خلاصه‌ای از داده‌های جریان در این ایستگاه قبل از احداث سد در جدول ۲ و بعد از احداث سد در جدول ۳ ارائه شده است.

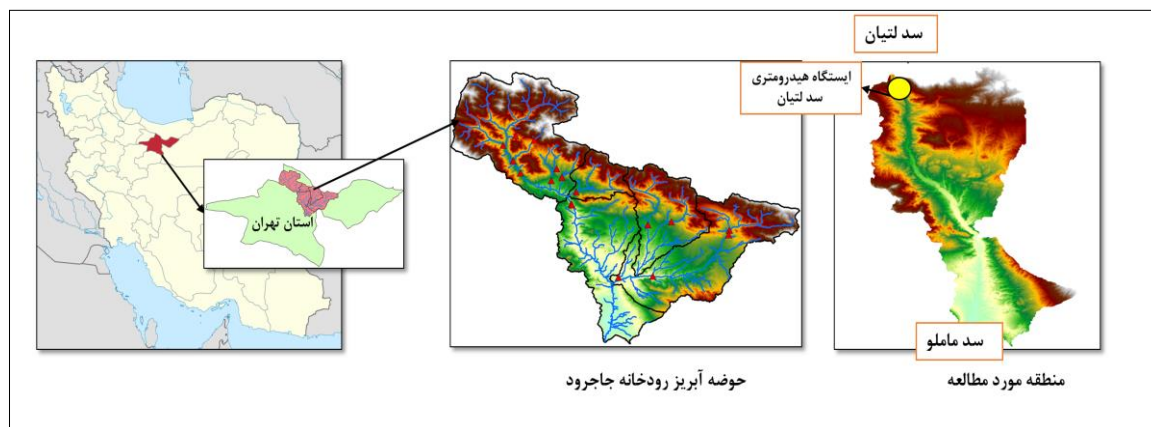
زمانی کافی، این رویکرد امکان محاسبه ویژگی‌های جریان و سپس تغییر میانگین جریان را دارد [۲۰].

تغییر رژیم طبیعی جریان یکی از محرک‌های اولیه برای اثرگذاری بر فرایندهای اکولوژیکی در اکوسیستم رودخانه است. احداث سدهای مخزنی، همراه با تقاضای روزافزون برای مصارف مختلف آب، سبب تغییر رژیم هیدرولوژیکی در پایین دست سدها و در نتیجه، آسیب‌پذیری محیط زیست رودخانه‌ها شده است. در تحقیقات اخیر Uday Kumar [۲۶] اثر احداث سد بر تغییرات پارامترهای جریان رودخانه کریشنا در هندوستان در پنج ایستگاه آب‌سنجی (در قبل و بعد از احداث سد) بررسی و تأیید شد. نتایج مشابه توسط Guo و همکاران [۲۷] برای رودخانه مین در چین؛ توسط Ali و همکاران [۲۸] برای رودخانه یانگ تسه در چین؛ و در پژوهش Zheng و همکاران [۲۹] برای رودخانه زرد چین گزارش شده است.

سد لتیان در سال ۱۳۴۶ روی رودخانه جاجرود احداث شد و به بهره‌برداری رسید. این سد چندمنظوره در تأمین آب شرب تهران، تولید برق و تأمین آب کشاورزی اراضی پایین دست جاجرود مشارکت دارد. پیشینه مطالعات و شواهد میدانی نشان می‌دهد رودخانه فاقد کمینه جریان مورد نیاز محیط زیستی در ماه‌های مختلف سال است. از این‌رو، بررسی کمی اثرات سد لتیان بر تغییرات پارامترهای اکوهیدرولوژیکی رودخانه، و برآورد کمینه جریان‌های محیط زیستی برای مدیریت سد و رودخانه و بازتوانی اکوسیستم پایین دست رودخانه ضروری است. اهداف خاص این مطالعه عبارت‌اند از: (۱) بررسی تغییرات پارامترهای هیدرولوژیکی قبل و بعد از احداث سد؛ و (۲) بررسی حداقل جریان محیط زیستی. رویکرد مورد استفاده در این پژوهش استفاده از داده‌های روزانه جریان و بررسی تغییرات پارامترهای هیدرولوژیکی با استفاده از روش شاخص تغییرات هیدرولوژیکی IHA و دامنه رویکرد تغییرپذیری RVA در رودخانه جاجرود- ایستگاه سد لتیان بوده است. نتایج این مطالعه می‌تواند الگوی مناسبی برای بازنگری در مدیریت سدهای پنج‌گانه تهران و دیگر سدهای ایران و کاهش اثرات منفی به‌جامانده در سامانه زیستی رودخانه‌ها فراهم کند.

جدول ۱. مشخصات ایستگاه هیدرومتری لتیان- رودخانه جاجرود

سال تأسیس	مشخصات جغرافیایی			رودخانه	نام ایستگاه	کد ایستگاه
	ارتفاع	عرض	طول			
۱۳۲۵	۱۵۶۰	۳۵-۴۷-۰۰	۵۱-۴۱-۰۰	جاجرود	سد لتیان	۶۸-۵۸۲



شکل ۱. موقعیت منطقه مطالعاتی جاجرود

جدول ۲. آبدهی ماهانه رودخانه جاجرود- ایستگاه لتیان قبل از احداث سد لتیان (۱۳۲۶-۱۳۴۴)

آذر	آبان	مهر	شهریور	مرداد	تیر	خرداد	اردیبهشت	فروردین	اسفند	بهمن	دی	میانگین آبدهی
۳/۹۸	۴/۱۸	۳/۲	۳/۳	۴/۰۸	۱۰/۲۹	۱۳/۷۳	۲۹/۱۱	۲۷/۶۳	۱۰/۳۷	۵/۲	۳/۸۷	۳/۸۷
۶/۲	۸/۲	۵	۵/۸۵	۸/۷	۷۰	۲۹/۵	۶۱	۵۰	۱۶	۸/۸۵	۷/۵	۷/۵
۲/۴	۲/۳	۱/۶	۱/۴	۱/۳	۱/۹	۴	۱۰	۸/۸۵	۳/۸	۳	۲/۴	۲/۴

جدول ۳. آبدهی ماهانه رودخانه جاجرود- ایستگاه لتیان بعد از احداث سد لتیان (۱۳۴۵-۱۳۹۶)

آذر	آبان	مهر	شهریور	مرداد	تیر	خرداد	اردیبهشت	فروردین	اسفند	بهمن	دی	میانگین آبدهی
۳/۷۱	۳/۸۵	۲/۰۱	۲/۴۵	۳/۲۱	۴/۱۰	۷/۵۳	۱۶/۶۳	۱۴/۳۱	۳/۳۵	۱/۸۲	۱/۷۷	۱/۷۷
۱۵/۸	۱۲/۷۹	۷/۸۵	۱۲/۳۵	۱۲/۸	۱۶/۸	۲۸	۶۵	۶۴/۱۵	۱۸/۱۵	۹/۴	۹	۹
۰/۳۲	۰/۱۳	۰/۱۴	۰/۱۳	۰/۲۲	۰/۳۵	۰/۴۴	۰/۵۴	۰/۴۸	۰/۲۹	۰/۲۸	۰/۲۹	۰/۲۹

### شاخص تغییرات هیدرولوژیکی (IHA)

مدل IHA در مجموع ۶۷ پارامتر آماری را محاسبه می‌کند. این پارامترها به دو گروه، پارامترهای IHA و پارامترهای مؤلفه جریان محیطی (EFC<sup>۱</sup>) تقسیم می‌شوند. ۳۳ پارامتر IHA و ۳۴ پارامتر EFC وجود دارد. نرم‌افزار IHA برای محاسبه این پارامترها توسعه یافته است؛ این نرم‌افزار قابلیت کنترل محاسبه این پارامترها دارد. نتایج جدولی و نموداری تولیدشده توسط مدل IHA بسته به اینکه کدام

گزینه مورد استفاده قرار گرفته، متفاوت خواهد بود. یک گزینه مهم این نرم‌افزار این است که شاخص‌های هیدرولوژیکی دو دوره زمانی مجزا (مانند دوره زمانی قبل و بعد از تأثیرات فعالیت‌هایی مانند احداث سد، انحراف جریان، پمپاژ آب زیرزمینی، تغییرات شدید کاربری اراضی) را با هم مقایسه کند و یا اینکه برای سامانه‌های هیدرولوژیکی که در بلندمدت تحت تأثیر مداخله‌ها و تغییرات انسانی قرار گرفته‌اند، روند تغییرات را با همبستگی خطی محاسبه کند.

1. Environmental Flow Component

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 دارای چولگی غیرنرمال هستند (فرض کلیدی آمار پارامتریک این است که داده‌ها دارای توزیع نرمال باشند)، اما برای مقادیری مانند میانگین دبی ماهیانه، آمار پارامتریک ترجیح داده می‌شود. با توجه به در دسترس بودن داده‌ها در منطقه مورد نظر، یکی از شاخص‌های ارزیابی هیدرولوژیکی استفاده می‌شود. پارامترهای هیدرولوژیکی به کاررفته در IHA در راهنمای نرم‌افزار شرح داده شده است [۳۰].

#### مؤلفه‌های جریان محیط زیستی

در IHA، ۳۴ پارامتر در قالب پنج مؤلفه جریان محیط زیستی شامل جریان کم، جریان‌های بسیار کم، پالس‌های جریان‌های بالا، سیلاب‌های کوچک و سیلاب‌های بزرگ وجود دارند. این پنج مؤلفه طیف کاملی از وضعیت جریان را ارائه می‌دهند که نشان‌دهنده وضعیت پایداری اکولوژیکی رودخانه هستند. نه تنها حفظ جریان کافی در دوره‌های جریان کم ضروری است، بلکه جریان‌های بالاتر و سیلاب‌ها و همچنین شرایط شدید جریان کم نیز عملکردهای اکولوژیکی مهمی را انجام می‌دهند. پارامترهای جریان محیط زیستی و تأثیرات آن بر اکوسیستم رودخانه در منبع [۲۶] شرح داده شده است.

#### روش محدوده تغییرپذیری RVA

روش محدوده تغییرپذیری، از اولین روش‌هایی است که برای محاسبه تغییرات جریان رودخانه از نظر اندازه، تناوب، زمان وقوع، مدت و سرعت تغییر رخدادهای جریان استفاده می‌شود. ۳۳ شاخص تغییر هیدرولوژیکی نشان‌دهنده این پنج پارامتر (IHA) است که بر اساس فراوانی و تناوب تغییرات IHA در محدوده هدف بین دوره طبیعی و تغییر یافته، اندازه‌گیری می‌شود. RVA از تغییرات طبیعی قبل از تأثیر مقادیر پارامتر IHA، به عنوان مرجعی برای تعریف میزان تغییر رژیم‌های جریان طبیعی استفاده می‌کند. تغییرات پیش از تأثیر همچنین می‌تواند به عنوان مبنایی برای تعریف اهداف اولیه جریان محیط زیستی استفاده شود.

روش RVA، تغییر پارامترهایی را که در خارج از محدوده هدف قرار می‌گیرند، در نظر نمی‌گیرد و گاهی اوقات درجه تغییر را پایین ارزیابی می‌کند. در تجزیه و تحلیل به روش RVA، دامنه کامل مقادیر هر پارامتر در دوره رژیم طبیعی به سه دسته (پایین، میانه و بالا) تقسیم می‌شود. کمترین دسته شامل تمامی مقادیر کمتر یا مساوی با صدک ۳۳ است. صدک گروه میانی شامل تمام مقادیری است که در محدوده صدک‌های ۳۴ تا ۶۷ قرار دارند و بالاترین گروه شامل تمام مقادیر بزرگ‌تر از صدک ۶۷ است. سپس، فاکتور درجه تغییر هیدرولوژیکی بر حسب رابطه ۱ محاسبه می‌شود [۳]:

$$(1) \quad \text{فراوانی مورد انتظار} / \text{فراوانی مورد انتظار} - \text{فراوانی مشاهده شده} = \text{درجه تغییر هیدرولوژیکی}$$

مقادیر مثبت تغییرات هیدرولوژیکی در هر یک از سه طبقه عددی نشان می‌دهد فراوانی مقادیر پارامتر هیدرولوژیکی مد نظر در هر یک از سه محدوده 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 ۱- است).

#### بررسی وضعیت توزیع داده‌های بده جریان

برای تحلیل جریان محیط زیستی در روش (RVA) در نرم‌افزار (IHA) دو روش آماری پارامتری و ناپارامتری معرفی شده‌اند. در حالت کلی، چنانچه چولگی و کشیدگی در بازه (۲، ۲-) نباشند، داده‌ها از توزیع نرمال برخوردار نیستند. چولگی کلی داده‌ها (در دوره ۷۰ ساله) برابر با ۲/۸۶ است، که خارج از بازه تقارن (۲+ و ۲-) است. شکل ۲ نشان می‌دهد در تابع توزیع احتمال بده‌های ماهانه رودخانه، محدوده چولگی داده‌ها عموماً در محدوده توزیع نرمال نیست، در نتیجه داده‌ها دارای توزیع غیرنرمال هستند. در نتیجه، از آمار ناپارامتریک (صدک، میانه) جهت محاسبه تغییرات هیدرولوژیکی و محیط زیستی استفاده شد.

#### یافته‌ها

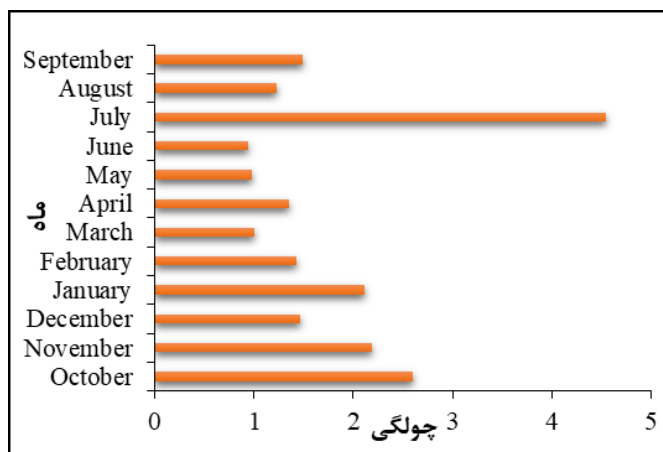
##### نتایج روش RVA

جدول ۴ نشان می‌دهد مقادیر بده میانگین در تمامی

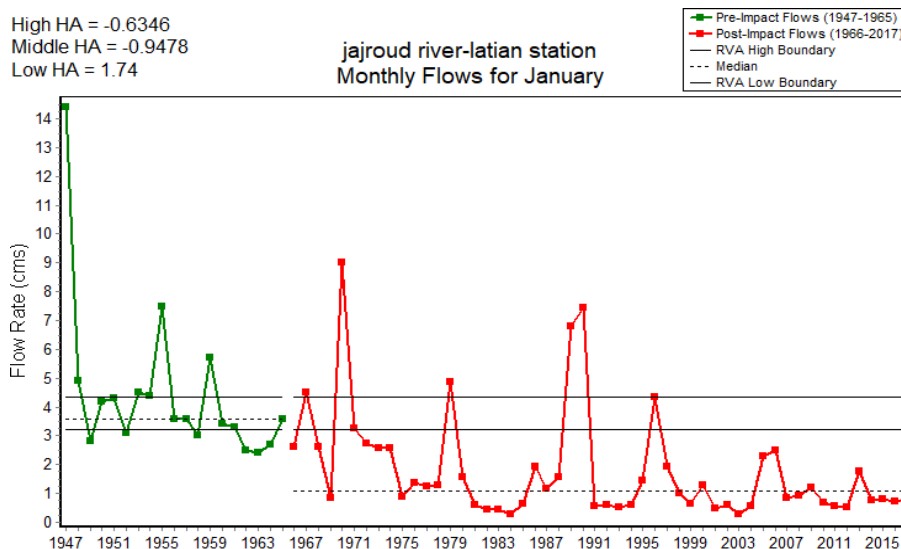
تغییرات بیشتری داشته است. جریان‌های حداقل ۱، ۳، ۷، ۳۰ و ۹۰ روزه با درجه تغییر در بازه ۶۸ تا ۸۹ درصد در کلاس تغییرات زیاد قرار دارند. درجه تغییر جریان‌های حداکثر ۱،۹۰ روزه با درجه تغییر به ترتیب برابر با ۵۳ و ۴۲ درصد در کلاس تغییرات متوسط و جریان‌های حداکثر ۷،۳ و ۳۰ روزه با درجه تغییر به ترتیب برابر با ۰/۸ و ۲۶ درصد در کلاس تغییرات کم قرار دارند. شاخص جریان پایه (حداقل بده هفت‌روزه تقسیم بر میانگین بده سالانه) در دوره پس از احداث سد در ایستگاه لتیان با درجه تغییر ۶۸ درصد، تغییرات هیدرولوژیکی زیادی داشته است. این مطلب در شکل ۴ به خوبی نشان داده شده است.

ماه‌های پس از احداث سد (۱۳۴۵-۱۳۹۶) کاهش داشته است. با توجه به طبقه‌بندی سه کلاسه RVA مقادیر بده میانگین در دوره پس از احداث سد در ماه‌های دی، بهمن، اسفند و مهر تغییرات زیاد در بازه ۶۸ تا ۹۴ درصد، در ماه‌های آذر، آبان، تیر، خرداد، مرداد، فروردین تغییرات متوسط در بازه ۴۲ تا ۶۳ درصد و در ماه‌های شهریور و اردیبهشت تغییرات کم که به ترتیب برابر با ۳۲ و ۲۱ درصد بوده، داشته است. شکل ۳ بده میانگین در دی‌ماه (ژانویه) را نشان می‌دهد.

با توجه به مقادیر گروه ۲ در جدول ۵، می‌توان بیان کرد که جریان‌های حداقل نسبت به جریان‌های حداکثر



شکل ۲. وضعیت توزیع بده‌های ماهانه جاجرود- ایستگاه سد لتیان



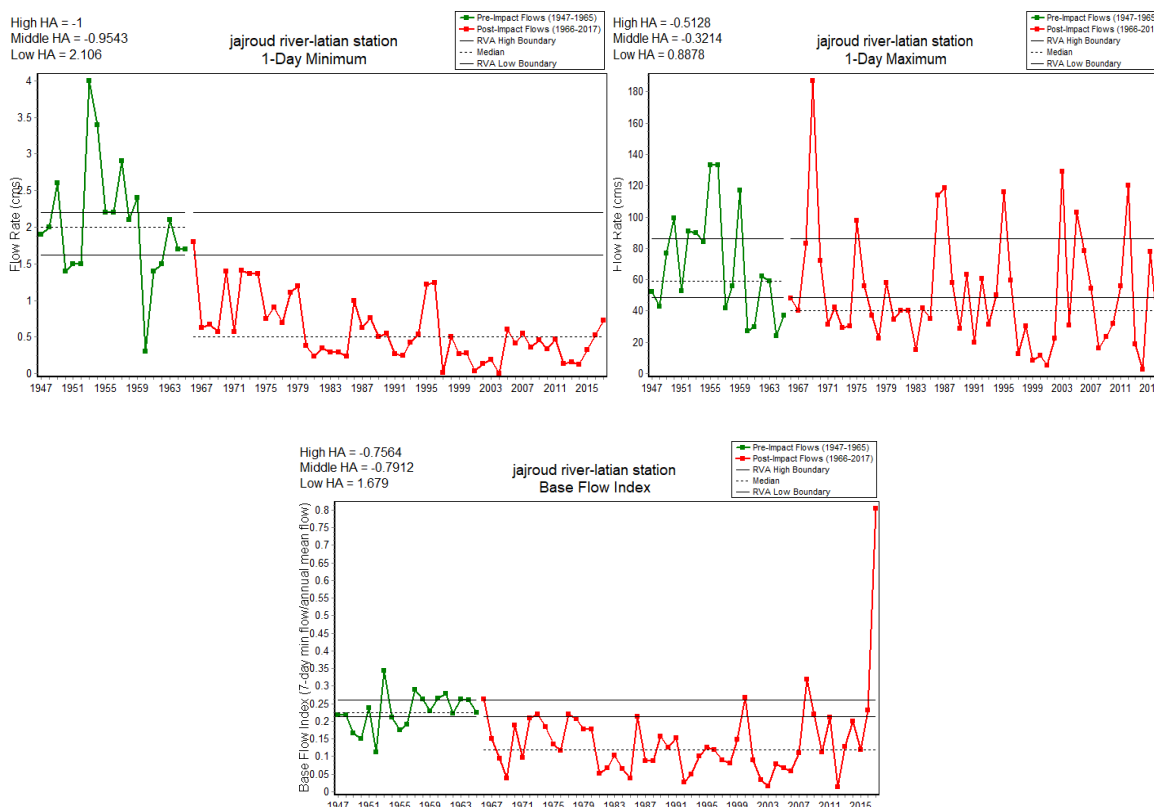
شکل ۳. مقایسه تغییرات بده میانگین ماهانه و محدوده تغییرپذیر جریان (میان و صدک ۷۵ و ۲۵) در دوره رژیم طبیعی (قبل از احداث سد) و رژیم تغییر یافته جریان (بعد از احداث سد)

جدول ۴. نتایج تغییرات پارامترهای IHA - در روش RVA برای ایستگاه سد لتیان - جاجرود

گروه ۱: میانگین جریان ماهانه	قبل از سد (۱۳۲۶-۱۳۴۴)			بعد از سد (۱۳۴۵-۱۳۹۶)			اهداف RVA		تغییر هیدرولوژیکی	طبقه بندی تغییرات
	میان	حد پایین	حد بالا	میان	حد پایین	حد بالا	حد	حد بالا		
مهر	۳/۱	۱/۶	۱۴/۴	۱/۷۳	۰/۱۴	۷/۸۵	۲/۷	۳/۷	-۰/۶۸	زیاد
آبان	۳/۷	۲/۳	۱۴/۴	۳/۵	۰/۱۳	۱۲/۷۹	۳/۴۶	۴/۷	-۰/۵۳	متوسط
آذر	۴/۱	۲/۴	۱۴/۴	۲/۷۴	۰/۳۲	۱۵/۸	۳/۲۲	۴/۵	-۰/۶۳	متوسط
دی	۳/۶	۲/۴	۱۴/۴	۱/۰۸	۰/۲۹	۹	۳/۲۲	۳/۴	-۰/۹۴	زیاد
بهمن	۵	۳	۱۴/۴	۱/۹۵	۰/۲۸	۹/۴	۴/۴	۶/۳	-۰/۸۹	زیاد
اسفند	۱۳	۳/۸	۱۶	۱/۳۳	۰/۲۹	۱۸/۱۵	۸/۵۴	۱۳/۴	-۰/۸۴	زیاد
فروردین	۲۴/۵	۸/۸۵	۵۰	۱۰/۴۱	۰/۴۸	۶۴/۱۵	۱۶/۳	۳۳/۲	-۰/۴۲	متوسط
اردیبهشت	۲۶	۱۰	۶۱	۱۶/۰۵	۰/۵۴	۶۵	۱۸/۸	۳۳/۸	-۰/۲۱	کم
خرداد	۱۲/۵	۴	۲۹/۵	۶/۷	۰/۴۴	۲۸	۹/۳۲	۱۵/۷	-۰/۴۷	متوسط
تیر	۶/۱	۱/۹	۷۰	۳/۱۱	۰/۳۵	۱۶/۸	۴/۲۶	۷/۸	-۰/۴۹	متوسط
مرداد	۴/۳	۱/۳	۸/۷	۲/۵۶	۰/۲۲	۱۲/۸	۲/۶۶	۴/۸	-۰/۴۳	متوسط
شهریور	۳/۱	۱/۴	۵/۸۵	۱/۷۴	۰/۱۳	۱۲/۳۵	۲/۲۶	۴/۰۴	-۰/۳۲	کم

جدول ۵. نتایج تغییرات پارامترهای IHA در روش RVA برای ایستگاه سد لتیان - جاجرود

گروه ۲: مقدار و مدت وقایع حدی	قبل از سد (۱۳۲۶-۱۳۴۴)			بعد از سد (۱۳۴۵-۱۳۹۶)			اهداف RVA		تغییر هیدرولوژیکی	طبقه بندی تغییرات
	میان	حد پایین	حد بالا	میان	حد پایین	حد بالا	حد	حد بالا		
حداقل یکروزه	۱/۷	۰/۳	۳/۴	۰/۴۷	۰	۱/۷	۱/۵۶	۲/۱۴	-۰/۸۴	زیاد
حداقل سهروزه	۱/۹	۱/۲	۳/۴	۰/۵۲	۰/۰۳	۱/۸۲	۱/۶	۲/۱۴	-۰/۸۶	زیاد
حداقل هفتروزه	۱/۹۱	۱/۲	۳/۵	۰/۵۶	۰/۰۴	۲/۰۴	۱/۶	۲/۲۵	-۰/۸۶	زیاد
حداقل سیروزه	۲/۴۳	۱/۳	۴/۱۳	۰/۶۹	۰/۱۳	۳/۳۳	۲/۰۲	۲/۹۹	-۰/۸۹	زیاد
حداقل نودروزه	۳/۱۸	۱/۷	۵/۸۶	۱/۰۱	۰/۲۳	۳/۶۶	۳/۶۳	۳/۶۳	-۰/۶۸	زیاد
حداکثر یکروزه	۵۹	۲۴	۱۳۳	۴۰/۱	۱/۰۹	۱۸۷	۸۶/۴	۸۶/۴	-۰/۴۲	متوسط
حداکثر سهروزه	۴۸	۲۳/۶	۱۰۷/۳	۳۰/۷	۱/۰۹	۱۲۸/۳	۶۶/۹	۶۶/۹	-۰/۲۶	کم
حداکثر هفتروزه	۴۲	۱۹/۱	۸۵/۸۶	۲۷/۳	۰/۹۸	۱۰۴/۱	۶۰/۱	۶۰/۱	-۰/۰۰۸	کم
حداکثر سیروزه	۳/۱۶	۱۲/۳	۶۰	۲۰/۷	۰/۶۲	۷۳/۰۷	۴۳/۹	۴۳/۹	-۰/۲۶	کم
حداکثر نودروزه	۲۳/۲	۹/۴	۴۹/۶۸	۱۴/۹	۰/۵۵	۵۶/۷	۳۰/۷	۳۰/۷	-۰/۵۳	متوسط
تعداد روزهای صفر	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۰	-۰/۰۱	کم
شاخص جریان پایه	۰/۲۱	۰/۱۱	۰/۲۸	۰/۱۱	۰/۰۱	۰/۶۸	۰/۲۲	۰/۲۲	-۰/۶۸	زیاد



شکل ۴. مقایسه پارامترهای گروه دوم IHA و محدوده تغییرپذیری جریان در دوره رژیم طبیعی (قبل از سد ۱۳۲۶-۱۳۴۴) و رژیم تغییریافته جریان (بعد از سد ۱۳۴۵-۱۳۹۶)

درصد تغییرات کمی داشته است. شکل ۵، نشان‌دهنده تغییرات پارامترهای گروه ۳ در دو دوره رژیم طبیعی و تغییر یافته است.

نتایج جدول ۷ نشان‌دهنده این مطلب است که رفتار پالسی رودخانه کمتر مورد تأثیر قرار گرفته و پالس‌های جریان کم‌آبی و پرآبی تقریباً با همان تعداد ادامه دارند، اما تداوم پالس‌های بالا در دوره قبل از احداث سد بیشتر از دوره بعد از احداث سد است و تداوم پالس‌های پایین افزایش داشته است. شکل ۶، روند تغییرات در دو دوره رژیم طبیعی و تغییر یافته نشان می‌دهد.

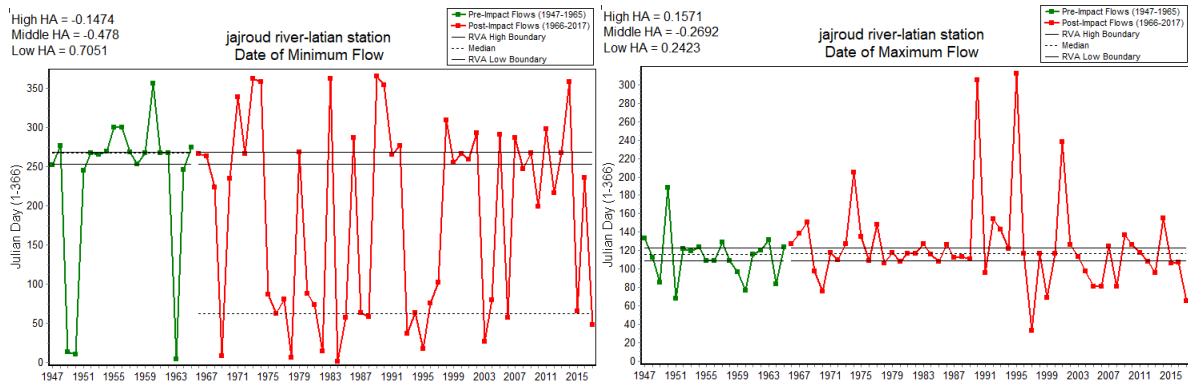
بر اساس جدول ۶، ملاحظه می‌شود که در دوره رژیم جریان طبیعی، متوسط زمان رخداد مقادیر کمینه جریان سالانه در محدوده روزهای ۱۰ تا ۳۵۶ قرار دارد، در حالی که در رژیم تغییر یافته بین روزهای ۶ تا ۳۶۵ قرار دارد. بیشینه جریان سالانه در دوره رژیم جریان طبیعی، در محدوده روزهای ۶۸ تا ۱۸۸ قرار دارد و در دوره رژیم جریان تغییر یافته در روزهای ۳۳ تا ۳۶۲ قرار دارد. بنابراین، جریان‌های حدی سالانه دچار تغییرات شده است. کمینه جریان سالانه با درجه تغییر ۵۱ درصد تغییرات متوسط و حداکثر جریان‌های سالانه با درجه تغییر ۲۶

جدول ۶. نتایج تغییرات پارامترهای IHA در روش RVA برای ایستگاه سد لتیان - جاجرود

تغییر هیدرولوژیکی	اهداف RVA		بعد از سد (۱۳۹۶-۱۳۴۵)		قبل از سد (۱۳۲۶-۱۳۴۴)		میان		گروه ۳: زمان رخداد جریان‌های حدی سالانه	
	حد بالا	حد پایین	حد بالا	حد پایین	حد بالا	حد پایین	میان			
طبقه‌بندی تغییرات	درصد تغییر هیدرولوژیکی	حد بالا	حد پایین	حد بالا	حد پایین	میان	حد بالا	حد پایین	میان	
H	-۰/۵۱	۲۷۵	۲۶۱/۴	۳۶۵	۶	۲۵۱	۳۵۶	۱۰	۲۶۸	شماره روز وقوع حداکثر جریان سالانه
H	-۰/۲۶	۱۲۲/۸	۱۰۹	۳۶۲	۳۳	۱۱۷	۱۸۸	۶۸	۱۱۶	شماره روز وقوع حداکثر جریان سالانه



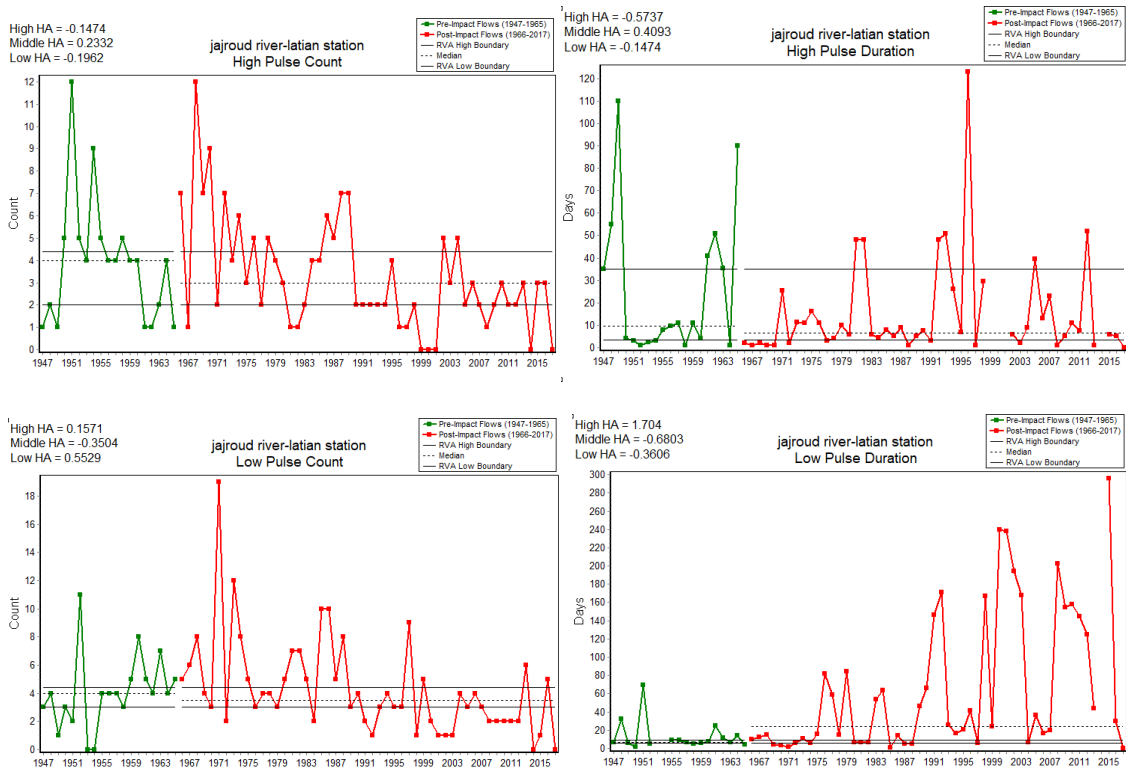
رضائی و همکاران: بررسی تأثیر احداث سد بر پارامترهای اکوهیدرولوژیکی رودخانه (جارجود- پایین دست سد لتیان) ۸۰۵



شکل ۵. مقایسه پارامترهای گروه سوم IHA و محدوده تغییرپذیری جریان در دوره رژیم طبیعی (قبل از احداث سد ۱۳۴۴-۱۳۲۶) و رژیم تغییر یافته جریان (بعد از احداث سد ۱۳۴۵-۱۳۹۶)

جدول ۷. نتایج تغییرات پارامترهای IHA - در روش RVA برای ایستگاه سد لتیان - جارجود

تغییر هیدرولوژیکی	اهداف RVA	بعد از سد (۱۳۹۶-۱۳۴۵)				قبل از سد (۱۳۴۴-۱۳۲۶)				گروه ۴: تناوب و مدت تداوم پالس‌های کم و بالای جریان
		حد بالا	حد پایین	حد بالا	حد پایین	میان	حد بالا	حد پایین	میان	
M	درصد تغییر هیدرولوژیکی	۵	۳	۲۳	۰	۴	۸	۰	۴	تعداد پالس‌های کم
L	تغییرات	۱۵/۱۱	۳/۱۳	۲۹۶	۰	۲۴	۱۲۹	۱/۵	۶/۵	تعداد پالس‌های بالا
L		۳/۸	۲	۱۳	۰	۳	۹	۱	۳	میانگین مدت تداوم پالس‌های کم
L		۲۶/۷	۴/۶	۷۸	۰	۶	۱۰۸	۱	۱۰	میانگین مدت تداوم پالس‌های بالا



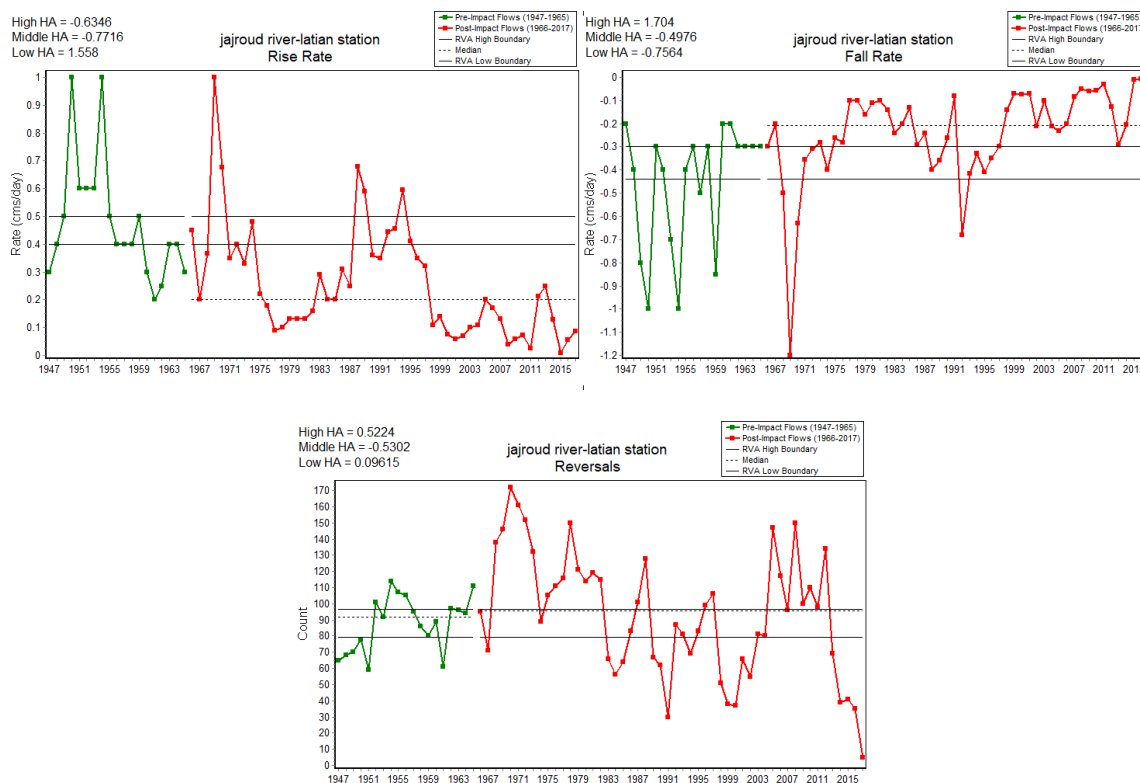
شکل ۶. مقایسه پارامتر تعداد پالس‌های جریان کم (پایه) و زیاد در دوره رژیم طبیعی (قبل از احداث سد ۱۳۴۴-۱۳۲۶) و رژیم تغییر یافته جریان (بعد از احداث سد ۱۳۴۵-۱۳۹۶)

نسبت به دوره طبیعی کمتر شده است. همچنین، نوسان‌های کاهشی در بده جریان و تعداد برگشت جریان در دوره بعد از احداث سد افزایش یافته است.

با توجه به مقادیر گروه پنج در جدول ۸ و روند تغییرات نشان داده شده در شکل ۷، می‌توان بیان کرد که میزان نوسان‌های افزایشی در بده جریان در دوره بعد از احداث سد

جدول ۸. نتایج تغییرات پارامترهای IHA در روش RVA برای ایستگاه سد لتیان - جاجرد

تغییر هیدرولوژیکی	اهداف RVA	قبل از سد (۱۳۲۶-۱۳۴۴)							گروه ۵. شدت کاهش و افزایش جریان:	
		بعد از سد (۱۳۹۶-۱۳۴۵)	حد بالا	حد پایین	حد بالا	حد پایین	میان	حد بالا		حد پایین
طبقه‌بندی	درصد تغییر هیدرولوژیکی	حد بالا	حد پایین	حد بالا	حد پایین	میان	حد بالا	حد پایین	میان	
H	-۰/۸۴	۰/۴۷	۰/۴	۰/۹۵	۰/۰۰۲	۰/۲۱	۱/۱	۰/۲	۰/۴	میزان افت
H	-۰/۷۷	-۰/۳	-۰/۴۴	-۰/۰۱	-۱	-۰/۲	-۰/۲	-۱	-۰/۴	میزان افزایش
M	-۰/۵۹	۹۷	۸۲	۱۸۴	۱۳	۹۴	۱۱۳	۴۲	۸۵	تعداد برگشت‌های هیدرولوژیکی



شکل ۷. مقایسه پارامترهای گروه پنجم IHA و محدوده تغییرپذیری جریان در دوره رژیم طبیعی (قبل از احداث سد ۱۳۲۶-۱۳۴۴) و رژیم تغییریافته جریان (بعد از احداث سد ۱۳۹۶-۱۳۴۵)

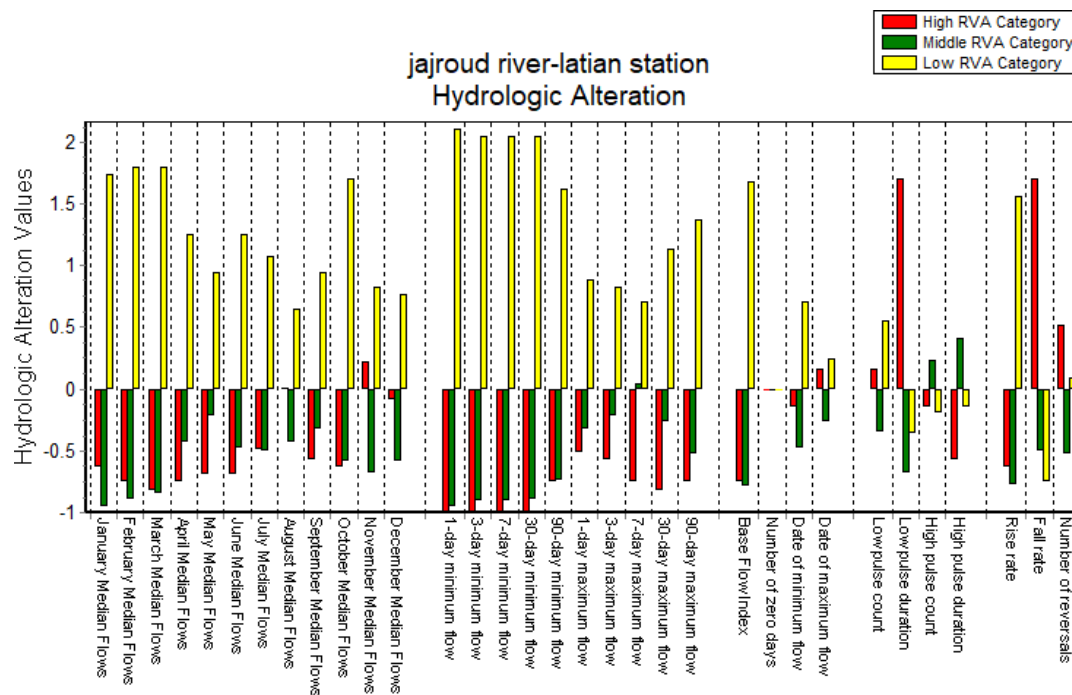
محدوده تغییرات رژیم طبیعی (محدوده مورد انتظار) هستند. مقادیر مثبت تغییرات هیدرولوژیکی اغلب پارامترها (زرد رنگ) در طبقه عددی پایین قرار دارند که نشان‌دهنده افزایش فراوانی مقادیر پارامترهای تغییرات هیدرولوژیکی در این طبقه نسبت به فراوانی مورد انتظار است.

تغییرات ۳۳ پارامتر IHA در سه طبقه بندی RVA فراوانی مقادیر ۳۳ پارامتر تغییرات هیدرولوژیکی 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

درجه تغییرات ۲۴ متغیر زیاد تا متوسط و ۹ متغیر دیگر، درجه تغییرات آن‌ها، پایین به دست آمد و میانگین درجه تغییر کلی در این ایستگاه برابر با ۵۶ درصد بوده است که بیان‌کننده درجه تغییرات هیدرولوژیکی قابل توجه در جاجرود است. با توجه به مقادیر تغییرات هیدرولوژیکی مشخص می‌شود که متوسط جریان ماهانه و همچنین، بیشینه و کمینه‌های جریان، در همه ماه‌های سال به مقدار قابل توجهی کاهش یافته است. از این‌رو، در دوره پس از احداث سد اهداف RVA حاصل نشده است. نتایج مربوط به رویکرد دامنه تغییرپذیری (محدوده بالا و پایین) نشان می‌دهد برای هدف بازتوانی رودخانه، مقادیر بده ماهانه در ایستگاه هیدرومتری سد لتیان باید در دامنه ۲/۳ تا ۳۳/۸ متر مکعب بر ثانیه باشد. نتایج توزیع بده ماهانه محیط زیستی برای منحنی فرمان سد به منظور تنظیم جریان رودخانه جاجرود پیشنهاد می‌شود.

بیشترین افزایش فراوانی مربوط به گروه‌های دوم و اول از پارامترهای تغییرات هیدرولوژیکی است، اما مقادیر منفی تغییرات هیدرولوژیک اغلب پارامترها مربوط به طبقه بالا (قرمز رنگ) و سپس طبقه متوسط (سبز) RVA است که کاهش فراوانی مقادیر میانگین بیشتر پارامترهای تغییرات هیدرولوژیکی را نشان می‌دهد.

شکل ۸ افزایش فراوانی و کاهش فراوانی مقادیر میانگین بیشتر پارامترهای هیدرولوژیکی (مانند: میانگین ماهانه، حداقل جریان‌های یک تا ۹۰ روزه، حداکثر جریان‌های ۳ تا ۹۰ روزه، شاخص جریان پایه) را 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 پیدا کرده و به سمت صدک کمتر از ۳۳ درصد گرایش پیدا کرده است.



شکل ۸. نمودار درجه تغییرات ۲۳ پارامتر IHA در سه طبقه هدف RVA

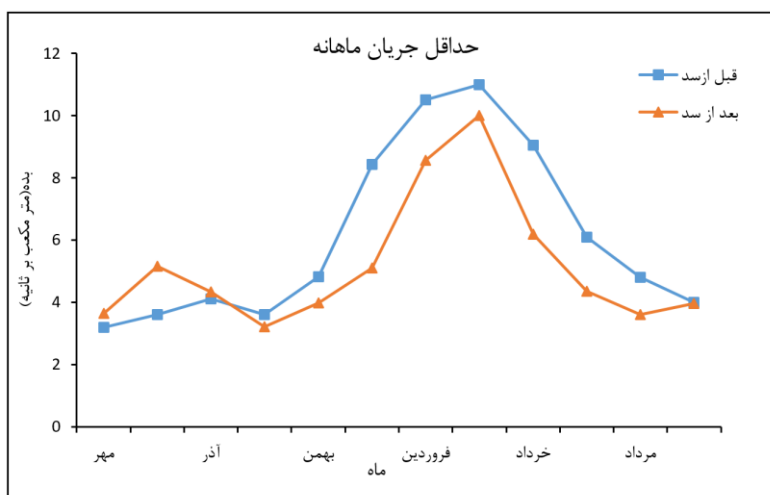
نتایج شکل ۱۰، فراوانی مؤلفه‌های گروه دوم (جریان‌های بسیار کم) طی سال‌های متأثر از فعالیت‌های انسانی روند افزایشی داشته است. پیک جریان این پارامتر نیز کاهش یافته است. در دوره رژیم جریان طبیعی، متوسط زمان رخداد این پارامتر ۲۵۶ روز است، در حالی که در دوره

#### نتایج جریان محیط زیستی (EFC)

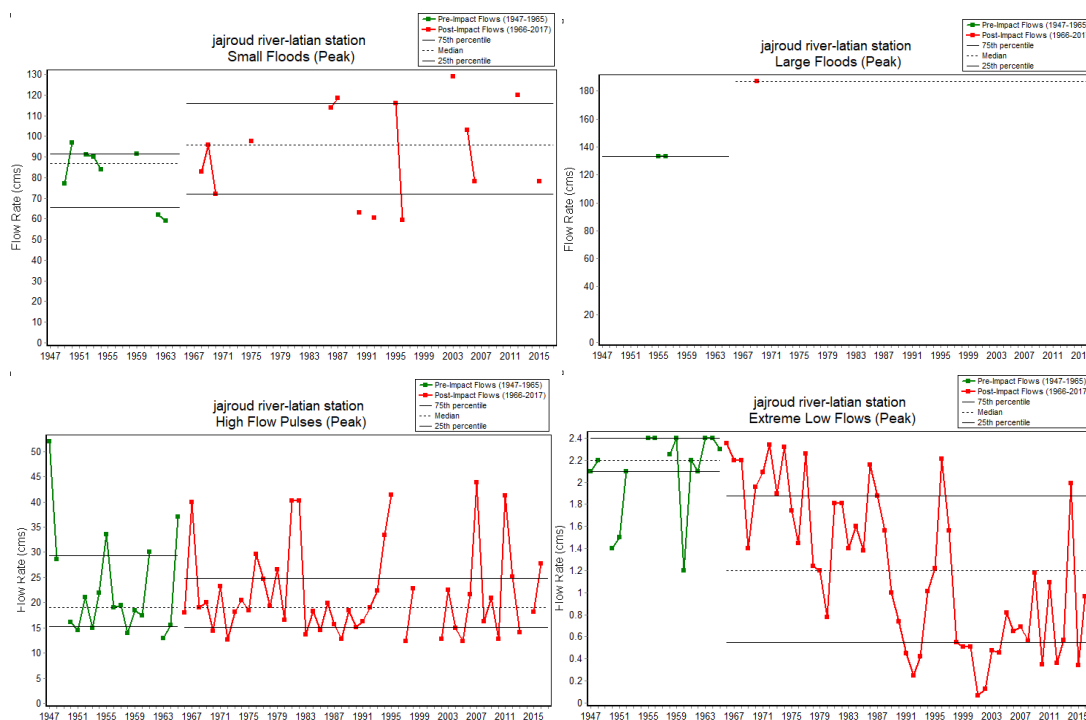
شکل ۹ نمودار میانگین جریان‌های کم ماهانه و دامنه تغییرات این جریان را در قبل و بعد از احداث سد نشان می‌دهد که بیانگر کاهش میانگین جریان‌های کم ماهانه در دوره رژیم تغییر یافته نسبت به رژیم طبیعی است. طبق

پس از تأثیر افزایش پیدا کرده است و از طرفی، مدت تداوم رخداد پالس‌های جریان بالا و سیلاب‌های بزرگ افزایش یافته و این پارامتر در سیلاب‌های کوچک کاهش یافته است. همچنین، فراوانی پالس‌های جریان بالا روند کاهشی و فراوانی سیلاب‌های کوچک و بزرگ برابر صفر است.

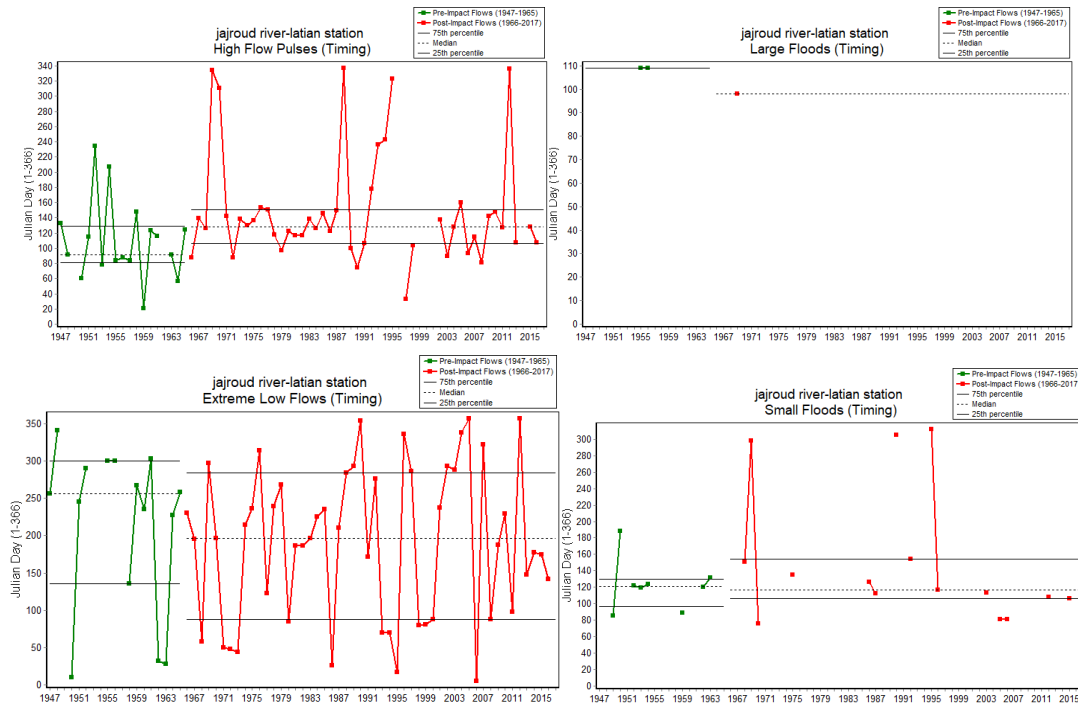
زمانی رژیم جریان تغییر یافته این پارامتر برابر با ۱۹۶ روز است. نتایج این گروه برای ایستگاه هیدرومتری لتیان نشان‌دهنده کاهش مقادیر جریان‌های کم و افزایش مدت تداوم آن است. در گروه‌های دیگر مؤلفه‌های (EFC) (شکل‌های ۱۱ و ۱۲، پالس‌های جریان بالا، سیلاب‌های کوچک و بزرگ) به طور متوسط مقادیر بده پیک در دوره



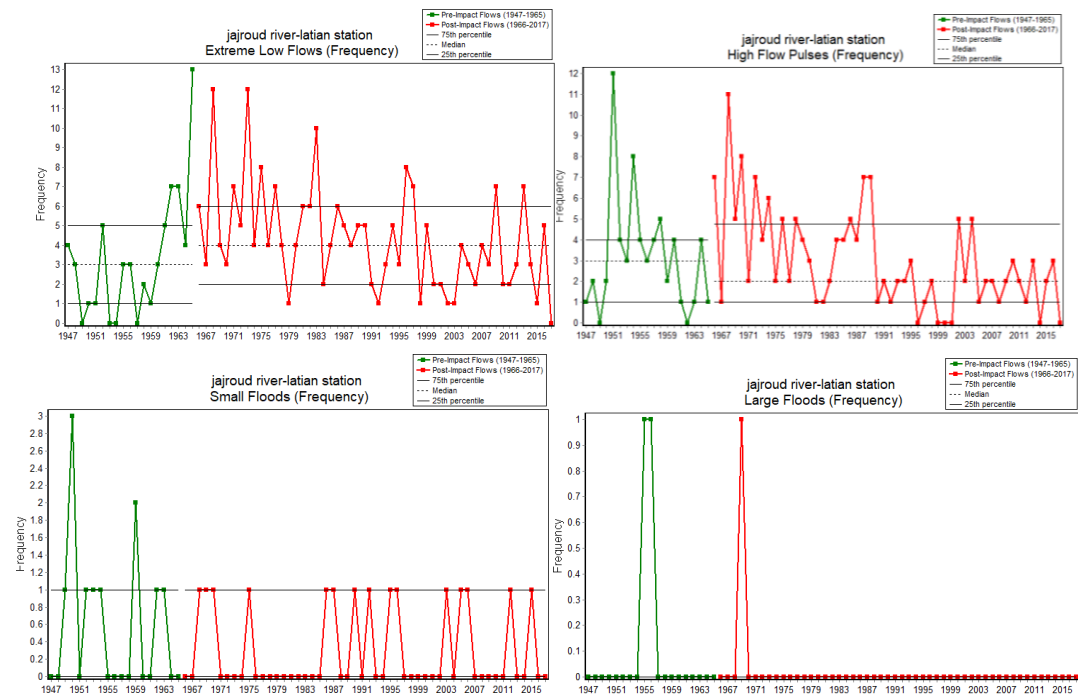
شکل ۹. میانگین کمینه جریان ماهانه در دوره رژیم طبیعی (قبل از احداث سد لتیان) و رژیم تغییر یافته جریان (بعد از احداث سد لتیان) رودخانه جاجرود-ایستگاه لتیان



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



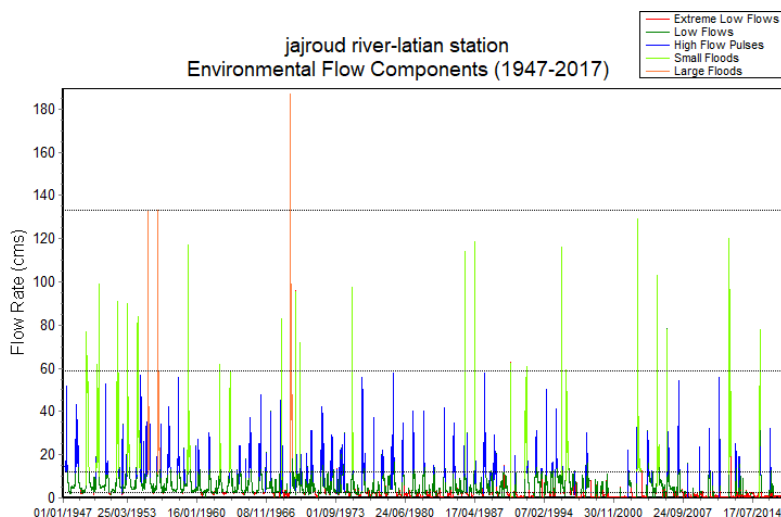
شکل ۱۱. متوسط رخداد مؤلفه‌های EFC الف) جریان‌های بسیار کم؛ ب) پالس‌های جریان بالا؛ ج) سیلاب‌های کوچک و د) سیلاب‌های بزرگ در دوره قبل و بعد از اثرات سد لتیان



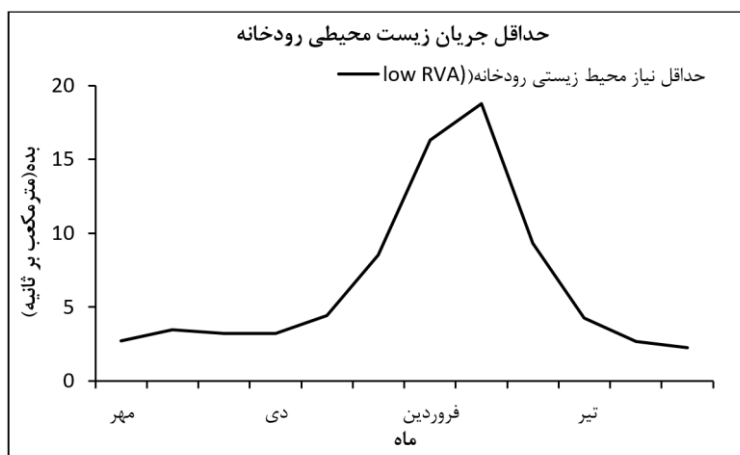
شکل ۱۲. فراوانی رخداد مؤلفه‌های EFC الف) جریان‌های بسیار کم؛ ب) پالس‌های جریان بالا؛ ج) سیلاب‌های کوچک و د) سیلاب‌های بزرگ در دوره قبل و بعد از تأثیرات

ثانیه است. میانگین جریان ماهانه و سالانه مشاهداتی و محیط زیستی جریان در شرایط رژیم طبیعی قبل از احداث شکل ۱۵ و رژیم تغییر یافته بعد از احداث سد شکل ۱۶، برای مشخص کردن تغییرات زمانی جریان مشخص شده است. متوسط جریان سالانه در دوره قبل از احداث سد برابر با  $10/4$  مترمکعب بر ثانیه و در دوره پس از احداث سد برابر با  $5/8$  مترمکعب بر ثانیه است که این مقدار نشان دهنده تقریباً ۴۴ درصد کاهش متوسط جریان سالانه است. درجه کلی تغییر هیدرولوژیکی ناشی از سد لتیان، برابر ۵۱ درصد به دست آمد که نشان می‌دهد سد لتیان شاخص‌های هیدرولوژیکی را به طور متوسط نسبت به جریان عادی رودخانه (قبل از احداث سد) تغییر داده است.

بر اساس نتایج شکل ۱۳، سد لتیان باعث حذف سیلاب‌های کوچک و کاهش سیلاب‌های بزرگ می‌شود. تأثیراتی که تغییر در هر یک از این پارامترها بر اکوسیستم خواهد گذاشت، شامل تغییراتی در شرایط مهاجرت و تخم‌ریزی ماهی‌ها، ته‌نشینی مواد در دشت‌های سیلابی، کنترل توزیع و فراوانی گیاهان در دشت سیلابی، به هم خوردن حفظ تعادل گونه‌ها در محیط‌های آبی و اجتماعات ساحلی، ته‌نشینی سنگریزه و قطعات سنگ در مناطق تخم‌ریزی و تغییر در شکل فیزیکی زیستگاه‌های دشت سیلابی می‌شود. شکل ۱۴ کمینه جریان محیط زیستی بر اساس رویکرد RVA را نشان می‌دهد. براساس جدول ۹، بده جریان محیط زیستی به طور متوسط برابر  $6/5$  مترمکعب بر ثانیه است و بده ماهانه در دامنه  $2/3$  تا  $33/8$  مترمکعب بر



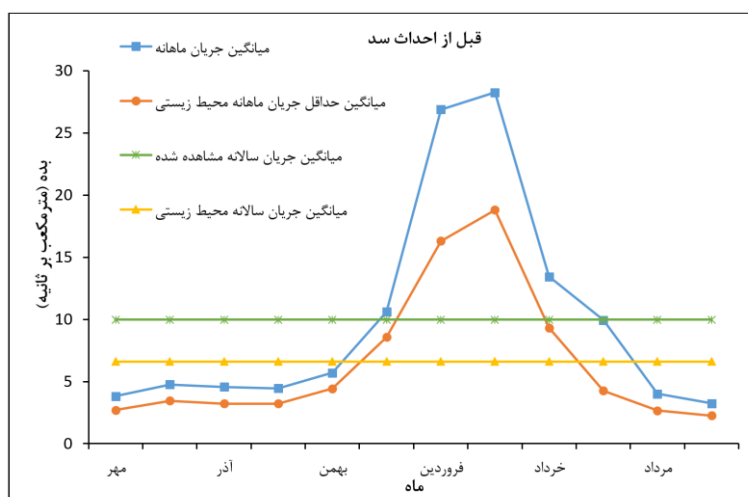
شکل ۱۳. نمودار مؤلفه‌های جریان محیط زیستی (EFC) ایستگاه هیدرومتری سد لتیان در ۱۹۴۷-۲۰۱۷ (۱۳۲۶-۱۳۹۶)



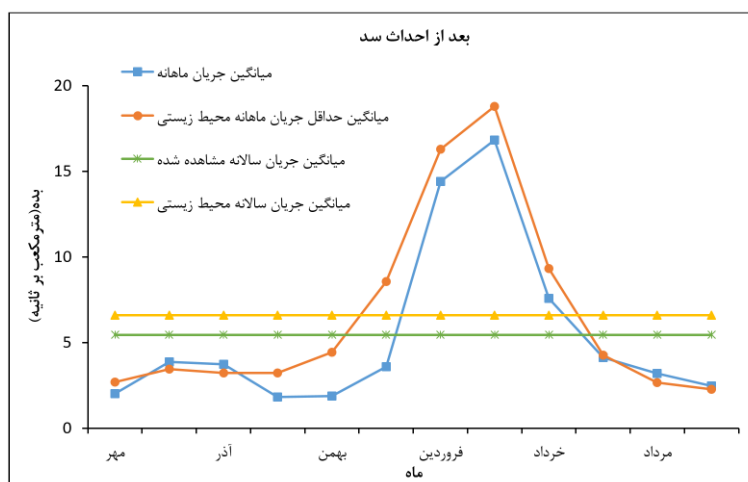
شکل ۱۴. کمینه جریان محیط زیستی رودخانه جاجرود براساس رویکرد RVA

جدول ۹. برآورد کمیته ماهانه نیاز محیط زیستی رودخانه جاجرود-پایین دست سد لتیان

ماه	کمیته جریان محیط زیستی (مترمکعب بر ثانیه)
مهر	۲/۷
آبان	۳/۴۶
آذر	۳/۲۲
دی	۳/۲۲
بهمن	۴/۴۴
اسفند	۸/۵۴
فروردین	۱۶/۳
اردیبهشت	۱۸/۸
خرداد	۹/۳۲
تیر	۴/۲۶
مرداد	۲/۶۶
شهریور	۲/۲۶



شکل ۱۵. روند زمانی جریان ماهانه در دوره رژیم طبیعی (قبل از احداث سد ۱۳۲۶-۱۳۴۴)



شکل ۱۶. روند زمانی جریان ماهانه در دوره رژیم تغییر یافته جریان (بعد از احداث سد ۱۳۴۵-۱۳۹۶)

### بحث و نتیجه‌گیری

ساخت و بهره‌برداری از مخازن با هدف کاهش خطرات سیل و کنترل رسوب، تغییرات هیدرولوژیکی زیادی را ایجاد کرده است که تعادل طبیعی رژیم‌های جریان محیط زیستی را به شدت تغییر داده و تهدیدهای قابل توجهی برای گونه‌های جانوری و گیاهی مانند اختلال در زیستگاه موجودات آبی رودخانه، رسوب بیش از حد در رودخانه‌ها [۳۱]، تغییر مسیر مهاجرت ماهی‌ها [۳۲] و کاهش شدید گونه‌های جانوری [۳۳] ایجاد کرده و در نتیجه اثرات نامطلوب اکولوژیکی را در پی داشته است. تغییرات هیدرولوژیکی و محیط زیستی ناشی از سدسازی در رودخانه جاجرود طی هفت دهه اخیر با استفاده از روش RVA بررسی شد. تغییرات کلی به شرح زیر است:

تأثیر سدها بر جریان ماهانه به طور گسترده در مقالات گزارش شده است. در این مطالعه، مقادیر بده میانگین در تمامی ماه‌های پس از احداث سد کاهش داشته است. با توجه به طبقه‌بندی سه کلاس RVA مقادیر بده میانگین در دوره پس از احداث سد در ماه‌های دی، بهمن، اسفند و مهر تغییرات زیاد، در ماه‌های آذر، آبان، تیر، خرداد، مرداد، فروردین تغییرات متوسط و در ماه‌های شهریور و اردیبهشت تغییرات کم داشته است. تغییرات ماهانه جریان گرایش مشخصی نداشت. بیشترین میانگین کاهش جریان در دی‌ماه و کمترین میزان کاهش جریان در اردیبهشت‌ماه برآورد شد. میانگین نرخ جریان ماهانه به شدت تغییر کرده است، که روی زیستگاه آبی و خاک تأثیر می‌گذارد و در نتیجه خطرات اکولوژیکی خاصی را به همراه دارد. به طور کلی، درجه تغییرات در گروه نخست ۵۷ درصد است، که تغییرات قابل توجهی در این گروه را نشان می‌دهد. در تحقیقات مشابه توسط Uday Kumar [۳۰]، اثر احداث سد بر تغییرات پارامترهای جریان رودخانه کریشنا در هندوستان در پنج ایستگاه آب‌سنجی (در قبل و بعد از احداث سد) بررسی شد. نتایج نشان داد تغییرات در هر ایستگاه متفاوت بوده است؛ به طوری که سه ایستگاه با درجه تغییر ۵۱، ۶۰ و ۶۰ درصد در گروه تغییرات متوسط و دو ایستگاه با درجه تغییر ۶۸ و ۶۷ درصد در گروه تغییرات زیاد گزارش شده است. همچنین، در پژوهش Guo و همکاران [۳۱] برای رودخانه مین در چین، تغییرات جریان میانگین در این رودخانه در گروه متوسط بوده است.

پس از ساخت سد لتیان، بیشینه و کمینه جریان به طور چشمگیری تغییر کرده است. تمام جریان‌های حداکثر و حداقل جریان ۱ روز، ۳ روز، ۷ روز، ۳۰ روز و ۹۰ روز کاهش یافته است. حداکثر جریان منجر به انتقال ضعیف مواد مغذی در رودخانه می‌شود که به طور جدی بر رشد موجودات آبی و پوشش گیاهی اطراف تأثیر می‌گذارد. در عین حال، تغییر حداقل نرخ جریان شدید بر محیط زیست رودخانه تأثیر منفی می‌گذارد. بنابراین، حداقل بده شدید سالانه نیز یکی از عوامل اصلی خطر اکولوژیکی رودخانه است. تعداد دفعاتی که جریان زیاد و کم رخ می‌دهد از زمان ایجاد سد تغییر کرده است. بده زیاد و کم با نقش ترویج انتقال رسوب و مواد مغذی، یک عامل ضروری در اکولوژی رودخانه است که تغییر این پارامترها، سالانه محیط زیست رودخانه‌ها را تهدید می‌کند و برای رشد پوشش گیاهی اطراف مساعد نیست. نتایج نشان می‌دهد سیکل‌های روزانه، هفتگی، ماهانه و سه‌ماهه بیشینه/کمینه جریان به طور منفی تحت تأثیر تنظیم سدها و درجه‌ها قرار دارند. در گروه دوم، بیشترین تغییر مربوط به جریان‌های شاخص جریان پایه؛ و کمترین تغییر مربوط به جریان‌های بیشینه بوده است. نتایج پژوهش Ali و همکاران [۳۲] روی دو ایستگاه از رودخانه یانگ تسه در چین نیز نشان داد جریان‌های کمینه بیشترین تغییر در گروه دوم را داشته‌اند.

تعداد رخداد‌های پالس بالا روند کاهشی و رخداد‌های پالس پایین روند افزایشی را نشان می‌دهند. تعداد دفعات برگشت جریان پس از ساخت سد نیز افزایش داشته است. تعداد برگشت جریان رودخانه می‌تواند زیستگاه بیولوژیکی را به خطر اندازد. همچنین، احداث سد باعث حذف سیلاب‌های بزرگ و کاهش سیلاب‌های کوچک شده است. نتایج مشابه توسط Zheng و همکاران [۳۳] در دو ایستگاه از رودخانه زرد چین نیز گزارش شده است.

احداث سد اثر شدیدی بر شرایط هیدرولوژیکی و محیط زیستی رودخانه جاجرود داشته است. در مقایسه با دوره قبل از احداث سد، ویژگی‌های هیدرولوژیکی و محیط زیستی تغییرات آشکاری را طی دوره بهره‌برداری سد نشان می‌دهد. شرایط مشابه برای اثرات منفی سدهای مخزنی توسط Zuo, Lian, Song, و همکاران [۲۵]، Bai و همکاران [۲۷]، Zhang, و همکاران [۳۴]، و Magilligan [۳۵] و Nislow [۳۶] تأیید و گزارش شده است.



### منابع

- [1]. Poff NL, Allan JD, Bain MB, Karr JR, Prestegard KL, Richter BD, Sparks RE, Stromberg JC. The natural flow regime. *BioScience*. 1997; 47(11):769-84.
- [2]. Huang J, Zhang Z, Feng Y, Hong H. Hydrologic response to climate change and human activities in a subtropical coastal watershed of southeast China. *Regional Environmental Change*. 2013; 13(6):1195-210.
- [3]. Richter BD, Warner AT, Meyer JL, Lutz K. A collaborative and adaptive process for developing environmental flow recommendations. *River research and applications*. 2006; 22(3):297-318.
- [4]. Poff NL, Olden JD, Merritt DM, Pepin DM. Homogenization of regional river dynamics by dams and global biodiversity implications. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2007; 4(14):5732-7.
- [5]. Gao B, Yang D, Zhao T, Yang H. Changes in the eco-flow metrics of the Upper Yangtze River from 1961 to 2008. *Journal of Hydrology*. 2012; 448-449:30-38.
- [6]. Flug M, Seitz HL, Scott JF. Multicriteria decision analysis applied to Glen Canyon Dam. *Journal of Water Resources Planning and Management*. 2000; 126(5):270-6.
- [7]. Zhao Q, Liu S, Deng L, Dong S, Yang Z, Yang J. Landscape change and hydrologic alteration associated with dam construction. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2012; 16:17-26.
- [8]. Costigan KH, Daniels MD. Damming the prairie: human alteration of Great Plains river regimes. *Journal of Hydrology*. 2012; 444:90-9.
- [9]. Losos E, Hayes J, Phillips A, Wilcove D, Alkire C. Taxpayer-subsidized resource extraction harms species. *BioScience*. 1995; 45(7):446-55.
- [10]. Trush WJ, McBain SM, Leopold LB. Attributes of an alluvial river and their relation to water policy and management. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2000; 24:97(22):11858-63.
- [11]. McManamay RA, Orth DJ, Dolloff CA. Revisiting the homogenization of dammed rivers in the southeastern US. *Journal of Hydrology*. 2012; 424:217-37.
- [12]. Bunn SE, Arthington AH. Basic principles and ecological consequences of altered flow regimes for aquatic biodiversity. *Environmental management*. 2002; 30(4):492-507.
- [13]. Moyle PB, Mount JF. Homogenous rivers, homogenous faunas. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2007; 104(14):5711-2.
- [14]. Jansson R, Nilsson C, Renöfalt B. Fragmentation of riparian floras in rivers with multiple dams. *Ecology*. 2000; 81(4):899-903.
- [15]. Tockner K, Stanford JA. Riverine flood plains: present state and future trends. *Environmental conservation*. 2002; 29(3):308-30.
- [16]. Olden JD, Poff NL. Redundancy and the choice of hydrologic indices for characterizing streamflow regimes. *River research and applications*. 2003; 19(2):101-21.
- [17]. Richter B, Baumgartner J, Wigington R, Braun D. How much water does a river need?. *Freshwater biology*. 1997; 37(1):231-49.
- [18]. Reichold L, Zechman EM, Brill ED, Holmes H. Simulation-optimization framework to support sustainable watershed development by mimicking the predevelopment flow regime. *Journal of Water Resources Planning and Management*. 2010; 136(3):366-75.
- [19]. Song X, Zhuang Y, Wang X, Li E, Zhang Y, Lu X, Yang J, Liu X. Analysis of hydrologic regime changes caused by dams in China. *Journal of Hydrologic Engineering*. 2020; 25(4):05020003.
- [20]. Singh RK, Jain MK. Reappraisal of hydrologic alterations in the Roanoke River basin using extended data and improved RVA method. *International Journal of Environmental Science and Technology*. 2021; 18(2):417-40.
- [21]. Sharma PJ, Patel PL, Jothiprakash V. Impact assessment of Hathnur reservoir on hydrological regimes of Tapi River, India. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*. 2021; 27(sup1):433-45.
- [22]. Sun G. Impacts of climate change and variability on water resources in the Southeast USA. *InClimate of the southeast United States 2013* (pp. 210-236). Island Press, Washington, DC.
- [23]. Sun G, Hallema D, Asbjornsen H. Ecohydrological processes and ecosystem services in the Anthropocene: a review. *Ecological Processes*. 2017; 6(1):1-9.
- [24]. Dong Q, Fang D, Zuo J, Wang Y. Hydrological alteration of the upper Yangtze River and its possible links with large-scale climate indices. *Hydrology Research*. 2019; 50(4):1120-37.
- [25]. Zuo QI, Liang SH. Effects of dams on river flow regime based on IHA/RVA. *Proceedings of*

- the International Association of Hydrological Sciences. 2015; 368:275-80.
- [26]. Uday Kumar A, KV J. Assessment of flow regime alteration in the Krishna River basin. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*. 2022; 28(2):212-8.
- [27]. Guo W, Zhou H, Jiao X, Huang L, Wang H. Analysis of Alterations of the Hydrological Situation and Causes of River Runoff in the Min River, China. *Water*. 2022; 14(7):1093.
- [28]. Ali R, Kuriqi A, Abubaker S, Kisi O. Hydrologic alteration at the upper and middle part of the Yangtze river, China: towards sustainable water resource management under increasing water exploitation. *Sustainability*. 2019; 11(19):5176.
- [29]. Zheng X, Yang T, Cui T, Xu C, Zhou X, Li Z, Shi P, Qin Y. A revised range of variability approach considering the morphological alteration of hydrological indicators. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*. 2021; 35(9):1783-803.
- [30]. The Nature Conservancy. Indicators of Hydrologic Alteration Version 7.1 User's Manual. 2009:81pp. Available online at: <https://www.conservationgateway.org>.
- [31]. Song JX, Xu ZX, Liu CM, Li HE. Ecological and environmental instream flow requirements for the Wei River—the largest tributary of the Yellow River. *International Journal of Hydrological Processes*. 2007; 21(8):1066-73.
- [32]. Moog O. Quantification of daily peak hydropower effects on aquatic fauna and management to minimize environmental impacts. *Regulated Rivers: Research & Management*. 1993; 8(1-2):5-14.
- [33]. Zincon LH, Rulifson RA. Instream flow and striped bass recruitment in the lower Roanoke River, North Carolina. *Journal of Rivers*. 1991; 2(2):125-37.
- [34]. Bai T, Ma PP, Kan YB, Huang Q. Ecological risk assessment based on IHA-RVA in the lower Xiaolangdi reservoir under changed hydrological situation. *InIOP conference series: earth and environmental science* 2017; 100(1): 012214.
- [35]. Zhang Z, Liu J, Huang J. Hydrologic impacts of cascade dams in a small headwater watershed under climate variability. *Journal of Hydrology*. 2020; 590:125426.
- [36]. Magilligan FJ, Nislow KH. Changes in hydrologic regime by dams. *Geomorphology*. 2005; 71(1-2):61-78.