**مجله پژوهش آب ایران**
**جلد ۱۵/ شماره ۱/ پیاپی ۴۰/ بهار ۱۴۰۰ (۱۶۳-۱۷۱)**

**مقاله پژوهشی**

# برآورد جریان محیط‌زیستی رودخانهٔ بالیخلوچای و بررسی تأثیر بهره‌برداری از سد یامچی بر رژیم جریان هیدرولوژیکی و محیط‌زیستی رودخانه

**مجید رئوف[1*] و سیمین علی اوغلی[2]**

## چکیده

تأمین و تخصیص حقابه‌های محیط‌زیستی رودخانه‌ها برای حفاظت از اکوسیستم منابع آب و اکوسیستم‌های وابسته باید به‌عنوان ضرورت در مدیریت پایدار منابع آب کشور در نظر گرفته شود. در این پژوهش، در یک دورهٔ۴۴ ساله (از ۱۹۷۰ تا ۲۰۱۳)، جریان محیط‌زیستی رودخانهٔ بالیخلوچای بررسی شد. همچنین، با استفاده از نرم‌افزار IHA، تغییرات هیدرولوژیکی و محیط‌زیستی ناشی از احداث و بهره‌برداری از سد یامچی بررسی شد. نتایج نشان داد با استفاده از روش تنانت و برای حفاظت از رژیم جریان رودخانه در محدودهٔبهینه، برای تمام ماه‌های سال به جریانی در محدودهٔ۱/۹۶ تا ۳/۲۷ مترمکعب بر ثانیه نیاز است. روش تسمن برای حفاظت از اکوسیستم‌های رودخانه‌ای، جریانی معادل ۱/۳۱ مترمکعب بر ثانیه را تخمین زده است. روش تنانت، مقدار جریان محیط زیستی را کمتر از $Q_{75}$ تخمین زده است. نتایج روش منحنی تداوم جریان، نشان‌دهندهٔتأمین دبی ۲/۹۵ و ۲/۴۶ مترمکعب بر ثانیه به‌ترتیب برای حفاظت از رودخانه در شرایط مناسب و شرایط نسبتاً مناسب بود. میزان تأثیر احداث سد یامچی بر پارامترهای هیدرولوژیکی به میزان ۶۱/۳۸ درصد با درجه تغییرات متوسط بود. همچنین، با وجود سد یامچی، پارامترهای محیط‌زیستی به میزان ۵۱/۶ درصد تغییر یافت.

**واژه‌های کلیدی**: جریان محیط‌زیستی، تنانت، تسمن، منحنی تداوم جریان، نرم‌افزار IHA.

**ارجاع**: رئوف م. و علی اوغلی س. ۱۴۰۰. برآورد جریان محیط‌زیستی رودخانهٔ بالیخلوچای و بررسی تأثیر بهره‌برداری از سد یامچی بر رژیم جریان هیدرولوژیکی و محیط‌زیستی رودخانهمجله پژوهش آب ایران. ۴۰: ۱۶۳-۱۷۱.

1- دانشیار گروه مهندسی آب و پژوهشکدهٔ مدیریت آب، دانشگاه محقق اردبیلی.
2- فارغ‌التحصیل کارشناسی ارشد، گروه مهندسی منابع آب، دانشگاه تربیت مدرس.
*** نویسندهٔ مسئول**: majidraoof2000@gmail.com
تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۷/۱۳ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۰/۲۲

**مقدمه**

در دهه‌های اخیر، روش‌ها، رویکردها و چارچوب‌های مختلفی برای ارزیابی و تنظیم جریان آب برای حفاظت از محیط‌زیست گسترش یافته است؛ ولی در بسیاری از کشورها رویکرد جامعی برای چنین ارزیابی‌هایی وجود ندارد (اسلام، ۲۰۱۰). در مجموع، ۲۰۷ روش برای تعیین جریان محیط‌زیستی رودخانه‌ها در ۴۴ کشور از سراسر جهان شناسایی شده است که آنها را در قالب ۴ روش کلی، شامل روش هیدرولوژیکی، روش هیدرولیکی، شبیه‌سازی زیستگاه و روش جامع می‌توان طبقه‌بندی کرد (کینگ و همکاران، ۲۰۰۰). این روش‌ها به‌طور معنی‌دار ازنظر اهداف، اطلاعات ورودی لازم و دقت نتایج خروجی با یکدیگر متفاوت است (اسماختین، ۲۰۰۶).

انتخاب بهترین روش برای تخصیص جریان محیط‌زیستی رودخانه‌ها به عواملی ازجمله سطح حفاظت از رودخانه، اهمیت تقلید از رژیم طبیعی رودخانه، دسترسی به داده‌ها، زمان محاسبه و در نهایت، سهولت کاربرد بستگی دارد.

در میان روش‌های استفاده‌شده در رویکرد هیدرولوژیکی برای برآورد جریان محیط‌زیستی رودخانه از روش‌هایی مانند تنانت، تسمن، اسماختین، منحنی تداوم جریان ارائه‌شده توسط اسماختین، روش ذخیرهٔرومیزی (DRM) و نرم‌افزار IHA[1] استفاده می‌شود. ولگا و همکاران (۲۰۱۵)، روش تنانت و تسمن را براساس کاربرد داده‌های سه رودخانه در لهستان مقایسه کردند و با بررسی نتایج دریافتند روش تسمن، نتایج پذیرفتنی‌تری برای رودخانه‌های یادشده دارد. برای محاسبهٔجریان محیط‌زیستی و توجه به موضوعاتی از قبیل سدسازی‌ها یا تغییر اقلیم بر تغییر جریان‌های هیدرولوژیکی و محیط‌زیستی رودخانه از نرم‌افزار IHA استفاده می‌شود.

دربارهٔکاربرد این نرم‌افزار می‌توان به پژوهش گین و گوپونی (۲۰۱۴) در بررسی آثار سد فاراکا بر رژیم هیدرولوژیکی حوضهٔپایین‌دست رودخانهٔگنگ با روش محدودهٔ تغییرپذیری جریان «RVA[2]» اشاره کرد؛ بنابراین، برای بررسی و ارزیابی آثار محیط‌زیستی این سد، روش مذکور به کار رفت و ۲۲ پارامتر هیدرولوژیکی آن، در دوره‌های قبل و بعد از ساخت و بهره‌برداری از سد با همدیگر مقایسه شد. نتایج نشان داد احداث سد، مقادیر جریانات ۳، ۷، ۳۰، ۱ و ۹۰ روزه را کاهش داده و تأثیر بسیاری بر رژیم هیدرولوژیکی پایین‌دست گذاشته است.

زو و لیانگ (۲۰۱۵) نیز آثار احداث سد بر جریانات محیط‌زیستی رودخانهٔشایینگ[3]، یکی از سرشاخه‌های رودخانهٔچین، را ارزیابی کردند. نتایج نشان داد احداث سد، مقادیر حداکثر و حداقل جریان‌های ۳، ۷، ۳۰، ۱ و ۹۰ روزه را کاهش داده و موجب افزایش تعداد روزهای دارای جریانات صفر شده است.

مسمن (۲۰۲۰)، توانایی پیش‌بینی شاخص‌های هیدرولوژیکی را با مدل‌های هیدرولوژیکی بررسی کرد. نتایج نشان داد شاخص‌های توصیف میزان دبی (ماهانه و سالانه) را با استفاده از مدل‌های هیدرولوژیکی تا حدودی می‌توان تخمین زد؛ اما هنگام تخمین ویژگی‌های پالس‌های جریان، برآورد حاصل از این مدل‌ها دقیق نیست.

نادری و همکاران (۱۳۹۹)، تغییرات شاخص هیدرولوژیک جریان رودخانهٔکارون را در دورهٔقبل و بعد از سد گتوند با استفاده از رویکرد محدودهٔ تغییرپذیری ارزیابی کردند. نتایج نشان داد جریان‌های حداکثر روزانه، هفتگی، ماهانه و سه‌ماهه نشان می‌دهد احداث سد مذکور، اثر منفی بر دبی جریان رودخانهٔکارون داشته است.

با توجه به موارد مذکور مبنی بر اهمیت بررسی و تأمین جریان‌های محیط‌زیستی رودخانه‌ها، این پژوهش با استفاده از اطلاعات در دسترس رودخانهٔ بالیخلوچای (ایستگاه پل الماس) از سال ۱۹۷۰ تا ۲۰۱۳ و با به‌کارگیری برخی از رویکردهای هیدرولوژیکی به‌علت نیاز به دسترسی به داده‌های محدود و زمان نسبتاً سریع ارزیابی، مانند روش‌های تنانت، تسمن و منحنی تداوم جریان در ماه‌های مختلف سال، جریان محیط‌زیستی رودخانه را محاسبه و بهترین روش را انتخاب و معرفی می‌کند. همچنین، درادامه به‌علت اهمیت تأثیر سدها بر تغییر جریانات محیط‌زیستی و هیدرولوژیکی پایین‌دست سد و بی‌توجهی مدیران و ارگان‌های مربوط به مسائل محیط‌زیستی ناشی از احداث سد در حوضه‌های آبریز در این پژوهش، آثار ساخت سد یامچی (قبل و بعد از احداث سد در سال ۲۰۰۴)، بر جریانات محیط‌زیستی و هیدرولوژیکی پایین‌دست رودخانه، با استفاده از نرم‌افزار IHA بررسی و تحلیل شد.

1- Indicators of Hydrologic Alteration
2- Range of Variability Approach
3- Shaying River

## مواد و روش‌ها

### منطقۀمورد مطالعه

حوضۀآبریز بالیخلوچای با مساحت تقریبی ۱۰۹۳ کیلومتر مربع بین طول‌های جغرافیایی '۴۶ °۴۷ و° ' ۴۸ شرقی و عرض‌های '۵۲ °۳۷ تا '۱۵ °۳۸ شمالی قرارگرفته است. رودخانۀ بالیخلوچای در استان اردبیل قرار دارد و از شاخه‌های رودخانۀقره‌سو است. طول این رودخانه تا نقطۀپایاب در شهر اردبیل، ۶۵ کیلومتر است. رودخانۀ بالیخلوچای از گردنۀ بالیخلی در جنوب غربی شهرستان نیر، حدّ فاصل دو رشته‌کوه بزقوش و سبلان سرچشمه می‌گیرد و درنهایت با الحاق به رودخانۀ قره‌سو در شمال اردبیل تخلیه می‌شود (رئوف و همکاران، ۱۳۹۵). سد یامچی در زیرحوضۀارس و بر رودخانۀ بالیخلوچای در شرق استان اردبیل ساخته شده است. مساحت حوزه آبریز سد، ۷۳۰ کیلومتر مربع است و ظرفیت ذخیره‌سازی ۸۰ میلیون مترمکعب آب را دارد. موقعیت جغرافیایی و مشخصات ایستگاه هیدرومتری در جدول ۱ و شکل ۱ نشان داده شده است.

### روش‌شناسی

برای دستیابی به اهداف پژوهش حاضر از برخی روش‌های هیدرولوژیکی استفاده شده است که داده‌های ورودی به این روش‌ها و نرم‌افزار، داده‌های مربوط به رواناب روزانۀایستگاه پل الماس است. بدین‌منظور، پژوهش در دو مرحلۀاصلی محاسبۀجریان محیط‌زیستی رودخانه از سال ۱۹۷۰ تا سال ۲۰۱۳ بدون درنظرگیری سد یامچی و با به‌کارگیری روش‌های تنانت، تسمن و منحنی تداوم جریان در ماه‌های مختلف سال انجام؛ سپس در ادامه، آثار ساخت سد یامچی (قبل و بعد از احداث سد در سال ۲۰۰۴) بر جریانات محیط‌زیستی و هیدرولوژیکی پایین‌دست رودخانه با استفاده از نرم‌افزار IHA بررسی و تحلیل شد.

### روش تسمن[1]

در این روش، اگر ۴۰ درصد متوسط جریان سالیانه از متوسط جریان ماهیانه بزرگ‌تر باشد، متوسط جریان ماهیانه به‌عنوان حداقل جریان ماهیانه در نظر گرفته می‌شود؛ در غیر این صورت (کوچک‌تر بودن ۴۰ درصد جریان سالیانه از متوسط جریان ماهانه)، ۴۰ درصد متوسط جریان سالیانه به‌عنوان حداقل جریان ماهیانه در نظر گرفته می‌شود. همچنین، اگر متوسط جریان سالیانه از متوسط جریان ماهیانه کوچک‌تر باشد، ۴۰ درصد متوسط جریان ماهیانه به‌عنوان حداقل جریان ماهیانه در نظر گرفته می‌شود.

### روش منحنی تداوم جریان[2]

در این روش، ابتدا داده‌های متوسط روزانه به‌ترتیب نزولی مرتب می‌شود. احتمال تجاوز از این مقدار جریان از معادلۀ (۱) محاسبه می‌شود. در این معادله، n کل روزهای مشاهداتی در طول یک سال و i جریان در ترتیب نزولی مرتب‌شده است (راهنمای تعیین آب ضروری اکوسیستم‌های آبی، ۲۰۱۲).

$$p(i) = \frac{i}{n+1} \qquad (۱)$$

### بررسی تغییرات هیدرولوژیکی و محیط زیستی

نرم‌افزار IHA استفاده از برخی اطلاعات هیدرولوژیکی در مقیاس روزانه تحلیل و محاسبات مربوط به تغییرات هیدرولوژیکی و محیط‌زیستی را انجام می‌دهد. این مدل با استفاده از داده‌های هیدرولوژیکی روزانه، ۶۷ پارامتر را در دو گروه ۳۳ پارامتری IHA و ۳۴ پارامتر جریان زیست‌محیطی (EFC) محاسبه می‌کند (ریچتر، ۱۹۹۶). نرم‌افزار، قابلیت توصیف تغییرات جریان ناشی از فعالیت‌های انسانی (احداث و بهره‌برداری از سد یا کانال انحرافی) را دارد. برای تشخیص محدودۀاین تغییرات از روش RVA استفاده شد.

### روش محدودۀ تغییرپذیری جریان (RVA)

روش محدودۀتغییرات از آمار پارامتری و ناپارامتری برای تحلیل رژیم جریان استفاده می‌کند (راهنمای حفاظت از طبیعت، ۲۰۰۹). چگونگی محاسبۀدرجۀتغییرات در روش محدودۀ تغییرپذیری جریان به شرح ذیل است:

۱) ۳۳ فاکتور IHA در دورۀپیش از تغییرات (رژیم جریان طبیعی) با روش محدودۀ تغییرپذیری جریان محاسبه می‌شود. ۲) برای هر پارامتر هیدرولوژیکی و مطابق با نتایج گام اول، محدودۀهدف تغییرپذیری جریان مشخص

1- Tessman

2- Flow Duration Curves

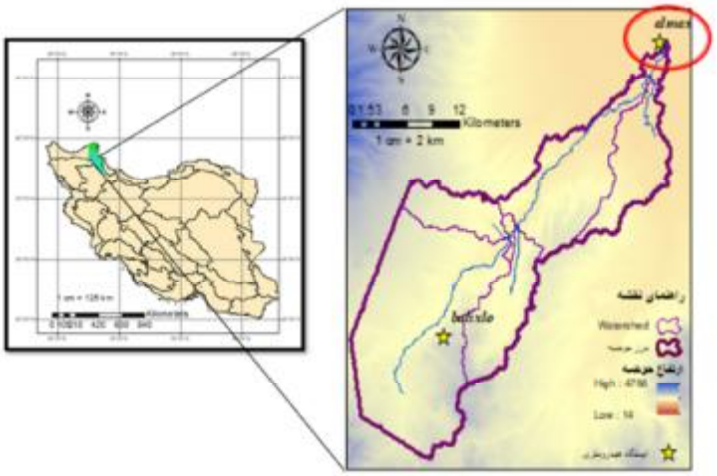
می‌شود. ۳) ۳۳ فاکتور IHA در دورهٔ بعد از تغییرات (رژیم تغییریافتهٔجریان) محاسبه می‌شود. ۴) با استفاده از درجهٔرژیم متغیر هیدرولوژیکی، آثار توسعهٔ فعالیت‌های انسانی روی اکوسیستم رودخانه تحلیل می‌شود. ریچتر (۱۹۹۶)، برای تعیین درجهٔتغییر هیدرولوژیکی از معادلهٔ (۲) استفاده کرد.

$$D_i = \left|\frac{N_O - N_e}{N_e}\right| \times 100 \qquad (۲)$$

که در آن، $D_i$، درجهٔتغییر هیدرولوژیکی پارامتر iام ام $N_O$، تعداد سال‌هایی که مقدار مشاهده شدهٔ پارامتر در محدودهٔ RVA و $N_e$، تعداد سال‌هایی است که پیش‌بینی می‌شود مقدار پارامتر هیدرولوژیکی، درون محدودهٔRVA قرار گیرد (ریچتر و همکاران، ۱۹۹۷). در این پژوهش، مقادیر ۲۵ و ۷۵ درصد به‌عنوان محدودهٔ RVA برای دو دورهٔرژیم جریان طبیعی و رژیم جریان تغییر یافته، اعمال شد. همچنین، درجهٔکلی تغییر هیدرولوژیکی ($D_O$)، برای تحلیل رودخانه مطابق معادلهٔ (۳) دست‌یافتنی است.

$$D_O = \sqrt{\frac{1}{33}\sum_{i=1}^{33} D_i^2} \qquad (۳)$$

در تحلیل RVA، درصدهای ۳۳ و ۶۷ برای مشخص‌کردن نوع RVA به کار می‌رود.



**شکل ۱- موقعیت ایستگاه هیدرومتری پل الماس**

**جدول ۱- موقعیت جغرافیایی و مشخصات ایستگاه پل الماس**

| نام رودخانه | نام ایستگاه | کد ایستگاه | سال تأسیس | مختصات جغرافیایی | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | طول | عرض | ارتفاع از سطح دریا |
| بالیخلوچای | پل الماس | ۱۹۰۵۳ | ۱۳۴۸ | ۴۸ ° ۱۱ ' | ۳۸ ° ۰۹ ' | ۱۴۳۵ |

اگر درجهٔتغییر هیدرولوژیکی بین صفر تا ۳۳ درصد باشد، تغییر هیدرولوژیکی تأثیرات کمتری داشته است. اگر درجهٔتغییر بین ۳۳ تا ۶۷ درصد باشد، میزان تغییر، متوسط و اگر بزرگ‌تر از ۶۷ درصد باشد، تغییرات زیاد است (ریچتر و همکاران، ۱۹۹۶).

## نتایج و بحث

### دبی حداقل نیاز محیط‌زیستی

تمام روش‌های استفاده‌شده در این پژوهش بر مبنای روش‌های هیدرولوژیکی است. بدین‌منظور، نیاز اطلاعاتی هر روش با توجه به اطلاعات موجود، از آمار داده‌های روزانه و ماهیانهٔرودخانه برای دوره‌های بلندمدت استفاده شد. در جدول ۲، نتیجهٔ محاسبات آماری دبی‌های روزانهٔایستگاه هیدرومتری پل الماس رودخانهٔ بالیخلوچای در سال‌های ۱۹۷۰ تا ۲۰۱۳ نشان داده شده است. همان‌گونه که در این جدول مشاهده می‌شود، حداکثر دبی جریان ماهانهٔ رودخانهٔ بالیخلوچای در ماه آوریل، برابر ۴۵ مترمکعب بر ثانیه و حداقل میانگین دبی جریان ماهانه در ماه می و فوریه برابر صفر و میانگین دبی سالانه، ۳/۲۷ مترمکعب بر ثانیه است.

### روش تنانت

محاسبات مربوط به جریان محیط‌زیستی در این روش در جدول ۳ نشان داده شده است. محاسبات نشان داد با کاربرد روش تنانت و برای حفاظت از رودخانه در محدودهٔ‌بهینه به جریانی در محدودهٔ ۱/۹۶ تا ۳/۲۷ مترمکعب بر ثانیه در تمام ماه‌های سال نیاز است. همچنین، شرایط مطلوب محیط‌زیستی برای ماه‌های اکتبر تا مارس، برابر ۰/۳۳ و برای ماه‌های آوریل تا سپتامبر، ۰/۹۸ مترمکعب بر ثانیه برآورد شده است.

### روش تسمن

نتایج محاسبهٔ‌جریان محیط‌زیستی روش تسمن برای رودخانهٔ بالیخلوچای در جدول ۴ ارائه شده است که در محاسبات مربوط بر حسب متوسط جریان ماهیانه و متوسط جریان سالانه است. در این روش، متوسط جریان محیط‌زیستی، معادل ۱/۳۱ مترمکعب بر ثانیه است.

**جدول ۲- دبی روزانه ایستگاه پل الماس در پایین‌دست سد یامچی (مترمکعب بر ثانیه)**

| | Jan | Feb | Mar | Apr | May | June | July | Aug | Sep | Oct | Nov | Dec |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Average | ۳/۷۹ | ۳/۹۲ | ۵/۳۶ | ۷/۴۶ | ۳/۵۷ | ۱/۷۲ | ۰/۹۶ | ۰/۸۸ | ۱/۴۷ | ۲/۵۰ | ۳/۷۷ | ۳/۸۳ |
| Min | ۰/۰۱۲ | ۰ | ۰/۰۵۳ | ۰/۰۲۶ | ۰ | ۰/۰۱ | ۰/۰۲۵ | ۰/۰۰۴ | ۰/۰۰۹ | ۰/۰۵۵ | ۰/۰۳۵ | ۰/۰۰۲ |
| Max | ۱۰/۳ | ۸/۵۹ | ۳۹/۱ | ۴۵ | ۳۴/۵ | ۱۵/۷ | ۷/۱۶ | ۶/۱۱ | ۱۱/۲ | ۱۷/۲ | ۱۶/۰۲ | ۹/۴ |

**جدول ۳- رژیم پیشنهادی جریان پایه براساس روش تنانت**

| توصیف جریان‌ها | | شست‌وشوی سریع یا حداکثر | محدوده بهینه | بسیار عالی | عالی | خوب | قابل قبول | ضعیف | بسیار ضعیف |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| رژیم‌های پیشنهادی جریان پایه (درصدی از متوسط جریان سالیانه) | اکتبر - مارس | ۰/۶۵ | ۳/۲۷-۱/۹۶ | ۱/۳۱ | ۰/۹۸ | ۰/۶۵ | ۰/۳۳ | ۰/۳۳ | <۰/۳۳ |
| | آوریل - سپتامبر | ۰/۶۵ | ۳/۲۷-۱/۹۶ | ۱/۹۶ | ۱/۶۴ | ۱/۳۱ | ۰/۹۸ | ۰/۳۳ | <۰/۳۳ |

### روش منحنی تداوم جریان

دبی‌های ۵۰، ۷۵ و ۹۰ درصد برای کلیهٔ منحنی‌های تداوم جریان و محاسبهٔ میانگین جریانات محاسبه‌شده در سال‌های آماری موجود برای رودخانهٔ بالیخلوچای در ایستگاه پل الماس برآورد شد. روش منحنی تداوم جریان برای حفظ شرایط محیط‌زیستی خوب یا متوسط و ارائهٔ الگوی مدیریتی برای حفاظت از رودخانهٔ بالیخلوچای و برنامه‌ریزی‌های اولیه مفید است. بدین‌منظور، میزان جریان محیط‌زیستی لازم برای هر یک از ماه‌ها در رودخانه محاسبه شد که در جدول ۵ ارائه شده است. جدول ۵، میزان دبی لازم را برای حفظ شرایط بهینه در ایستگاه پل الماس نشان می‌دهد. برای حفظ حداقل جریان محیط‌زیستی در شرایط مناسب باید دبی ۲/۴۶ مترمکعب بر ثانیه در ایستگاه پل الماس برقرار باشد و برای حفظ شرایط نسبتاً مناسب به دبی ۲/۹۴ مترمکعب بر ثانیه نیاز است.

### مقایسهٔ روش‌های هیدرولوژیکی

خلاصهٔ نتایج برآورد حداقل جریان محیط‌زیستی رودخانهٔ بالیخلوچای با سه روش تنانت، تسمن و منحنی تداوم جریان در جدول‌های ۳، ۴ و ۵ نمایش داده شده است. روش تسمن با مقایسهٔ‌متوسط جریان ماهیانه و متوسط جریان سالیانه، کمترین جریان محیط‌زیستی لازم را در ماه‌های مختلف سال پیشنهاد می‌دهد. ضرایب پیشنهادی برای روش‌های تنانت و تسمن برای رودخانه‌های خارج از کشور کالیبره شده است. به هر حال، از این ضرایب برای تخمین جریان محیط‌زیستی رودخانه‌های ایران استفاده می‌شود. با مقایسهٔ جدول‌های ۳ تا ۵ مشخص شد در تمام ماه‌های سال، روش منحنی تداوم جریان، مقادیر جریان محیط‌زیستی را بیشتر از سایر روش‌ها تخمین زده است. همچنین، روش تنانت، مقادیر جریان محیط‌زیستی را کمتر از دو روش دیگر تخمین زده است. در تمام ماه‌های سال، روش تنانت، مقدار جریان محیط‌زیستی را کمتر از $Q_{75}$

تخمین زده است. در برخی از ماه‌ها روش تسمن، مقدار جریان را کمتر از $Q_{75}$ و در برخی از ماه‌ها بیشتر از $Q_{75}$ برآورد کرده است. نتایج در جدول ۵ نشان داده شده است.

## تغییرات هیدرولوژیکی و محیط زیستی ناشی از احداث سد یامچی

نتایج تغییرات پارامترهای گروه اول هیدرولوژیکی رودخانهٔ بالیخلوچای در ایستگاه پل الماس در شکل ۲ نشان داده شده است. با اجرای روش محدودهٔ تغییرپذیری جریان برای رودخانهٔ بالیخلوچای، میانگین و میانهٔ دبی‌های ماهانه در هر دو محدودهٔکم و زیاد به دست آمد که شامل مقادیر دبی‌های لازم برای حفظ زیستگاه رودخانه در محدودهٔ طبیعی آن است. همان‌گونه که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، متوسط جریان ماهیانه در ماه‌های مختلف سال نسبت به دورهٔ قبل از احداث سد، تغییرات محسوسی یافته است. این امر نشان می‌دهد در دورهٔ پس از احداث سد، اهداف RVA حاصل نشده است.

**جدول ۴- رژیم پیشنهادی جریان براساس روش تسمن ($m^3/s$)**

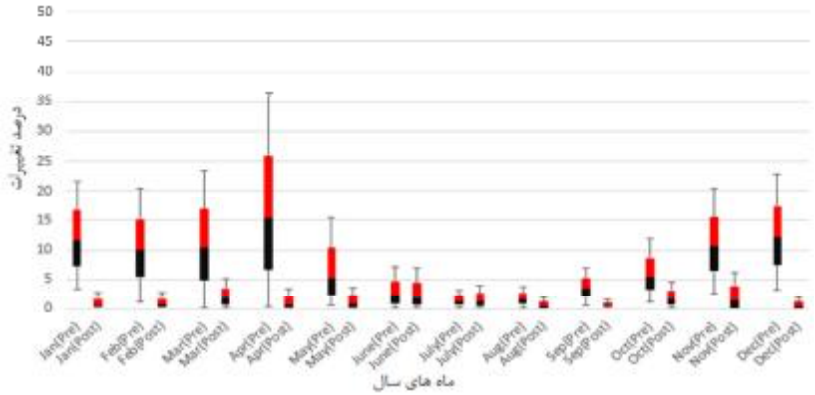
| ماه | Jun | Feb | Mar | Apr | May | June | Jul | Aug | Sep | Oct | Nov | Dec |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| جریان محیط‌زیستی | ۱/۵۲ | ۱/۵۷ | ۲/۱۵ | ۲/۹۹ | ۱/۴۳ | ۱/۳۰ | ۰/۹۷ | ۰/۸۸ | ۱/۳۰ | ۱/۳۰ | ۱/۵۱ | ۱/۵۳ |

**جدول ۵- رژیم پیشنهادی جریان براساس روش منحنی تداوم جریان (مترمکعب بر ثانیه)**

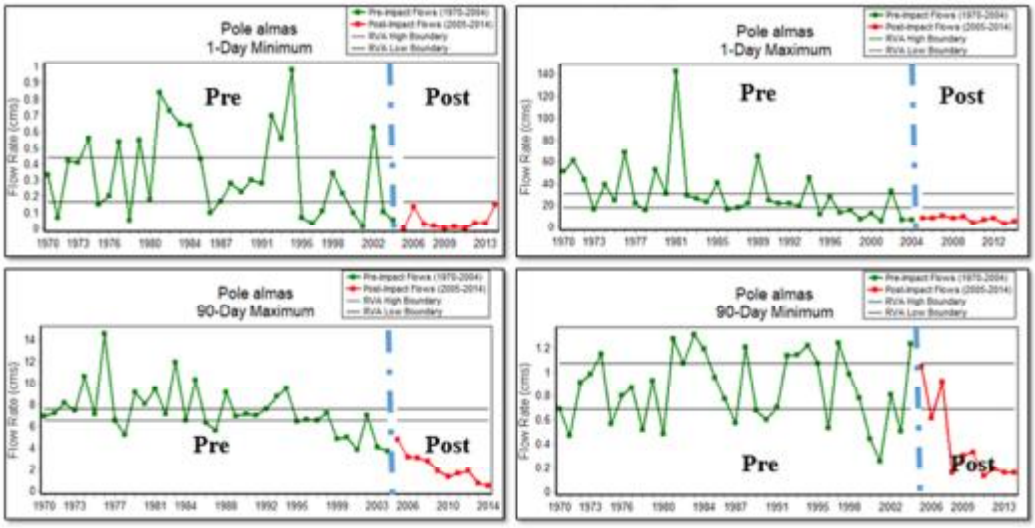
| Month | Jun | Feb | Mar | Apr | May | June | July | Aug | Sep | Oct | Nov | Dec | year |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $Q_{average}$ | ۳/۷۹ | ۳/۹۲ | ۵/۳۶ | ۷/۴۶ | ۳/۵۸ | ۱/۷۲ | ۰/۹۶ | ۰/۸۸ | ۱/۴۸ | ۲/۵۱ | ۳/۷۷ | ۳/۸۳ | ۳/۲۷ |
| $Q_{75}$ | ۲/۸۴ | ۲/۹۴ | ۴/۰۲۲ | ۵/۵۹ | ۲/۶۸ | ۱/۲۹ | ۰/۷۲ | ۰/۶۶ | ۱/۱۰ | ۱/۸۸ | ۲/۸۳ | ۲/۸۸ | ۲/۴۶ |
| $Q_{90}$ | ۳/۴۲ | ۳/۵۳ | ۴/۸۳ | ۶/۷۲ | ۳/۲۲ | ۱/۵۵ | ۰/۸۷ | ۰/۷۹ | ۱/۳۳ | ۲/۵۵ | ۳/۳۹ | ۳/۴۵ | ۲/۹۴ |

همچنین، با بررسی نتایج مربوط به روش محدودهٔ تغییرپذیری جریان (حدود بالا و پایین RVA) مشاهده می‌شود دامنهٔ مناسب مقادیر دبی ماهانه در ایستگاه هیدرومتری پل الماس، برای شش‌ماه اول سال آبی (مهر تا اسفند)، اهداف تأمین حیات رودخانه متناسب با دبی ۱۳۹/۸ تا ۴۴۸/۲ مترمکعب بر ثانیه و برای شش‌ماه دوم سال (فروردین تا شهریور) این محدوده بین دبی ۲۸۹/۴ تا ۵۴۵/۸ مترمکعب بر ثانیه بود؛ بنابراین، هدف تنظیمی جریان رودخانه باید براساس دامنهٔ دبی مذکور باشد. همچنین، افزایش یا کاهش هر کدام از این میزان جریان تنظیمی بر برخی از کارکردهای اکوسیستم تأثیر می‌گذارد. ازجملهٔاین تأثیرات به دسترسی زیستگاه برای ارگانیزم‌های آبزی، فراهم‌کردن رطوبت خاک برای گیاهان، ذخایر آب مطمئن برای جانوران خاک‌زی و تأثیر بر دمای آب، مقدار اکسیژن و فتوسنتز در آب می‌توان اشاره کرد. گروه دوم شاخص‌های هیدرولوژیکی، نشان‌دهندهٔمقدار و تداوم جریان حدی در سال است. تأثیر تغییرات این پارامترها بر عملکرد اکوسیستم، شامل تأثیر بر ساختار اکوسیستم‌های آبزی توسط مؤلفه‌های زنده و غیرزنده، تأثیر بر ساختار مورفولوژی رودخانه و شرایط فیزیکی زیستگاه، استرس رطوبتی خاک در گیاهان، استرس فعالیت‌های بدون اکسیژن در گیاهان، توزیع اجتماعات گیاهی در دریاچه‌ها، تالاب‌ها و دشت‌های سیلابی است. در حالت کلی، تغییر در پارامترهای این گروه بر شرایط فوق‌العادهٔآبی ازجمله سیل و خشکسالی تأثیرگذار است. شکل ۳، تغییرات هیدرولوژیکی مقادیر حدی را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود، مقادیر حدی شاخص‌های هیدرولوژیکی قبل و بعد از ساخت سد یامچی، تغییرات محسوسی پیدا کرده و فقط جریان حداقل ۹۰ روزه (با درجه تغییرات ۴۶ درصد) به‌طور شهودی در مقایسه با تغییرات بقیهٔ شاخص‌ها در حد متوسط بود. تعداد روزهای جریان صفر و شاخص جریان پایه دو، پارامتر دیگر این گروه است که شاخص جریان پایه ازنظر میزان تغییر هیدرولوژیکی ثابت است؛ این در حالی است که تعداد روزهای دارای جریان صفر در دورهٔبعد از احداث سد تغییراتی داشته است؛ بنابراین، می‌توان چنین تشریح کرد که سد یامچی از نوع تنظیمی است؛ بنابراین، با ذخیره و تنظیم جریان‌های با دبی زیاد، باعث نامتعادل‌شدن جریان‌های خروجی در مناطق پایین‌دست می‌شود. در گروه سوم پارامترهای هیدرولوژیکی، تاریخ وقوع حداقل جریان ۱ روزه در دورهٔپس از احداث سد، دیرتر از دورهٔ قبل از احداث بوده است. همچنین، تاریخ وقوع حداکثر جریان ۱ روزه در

دورۀپس از احداث سد، زودتر از دورۀقبل از احداث سد است (شکل ۴). این پارامترها با تولد و مرگ گونه‌ها، سازگاری با چرخۀزندگی ارگانیزم‌ها، پیش‌بینی و کاهش استرس برای ارگانیزم‌ها و دسترسی به زیستگاه‌های خاص در مدت تولید مثل یا برای دوری از شکار در ارتباط است؛ درنتیجه، گفتنی است این شاخص‌ها بر پویایی جمعیت اثر می‌گذارد. در بررسی تناوب و تداوم رفتار ضربانی رودخانۀ بالیخلوچای در دوره‌های کم‌آبی و پرآبی، قبل و بعد از احداث سد یامچی مشخص شد مدت‌زمان پالس جریانات کم، تغییر هیدرولوژیکی کمی دارد؛ این در حالی است که درجۀتغییر هیدرولوژیکی پالس دورۀپرآبی ازنظر تناوب متوسط بوده و ازنظر تداوم در دستۀ تغییرات زیاد قرار گرفت.



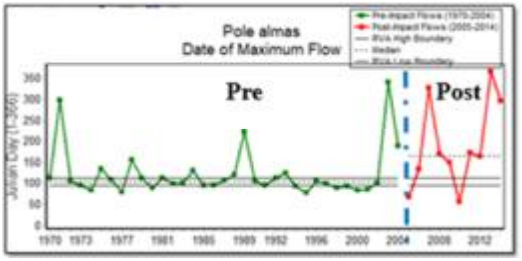

**شکل ۲- نمودار جعبه‌ای تغییر پارامترهای گروه اول قبل و بعد از احداث سد یامچی**



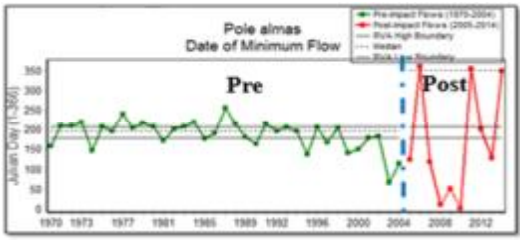

**شکل ۳- تغییرات هیدرولوژیکی مقادیر حدی**

در حالت کلی، ۲۳ شاخص از ۳۳ شاخص IHA در گروه با درجه تغییر زیاد و متوسط دسته‌بندی می‌شود؛ زیرا درجۀتغییرات هیدرولوژیکی آنها بزرگ‌تر از ۳۳ درصد بود. با این حال، تغییرات ۱۰ شاخص با مقادیر کمتر از ۳۳ درصد، نشان‌دهندۀ تأثیر کم سد یامچی بر این شاخص‌هاست. درجۀکلی تغییر هیدرولوژیکی ناشی از سد یامچی، مطابق معادلۀ (۳)، برابر ۶۱/۳۸ درصد به دست آمد که نشان می‌دهد سد یامچی به‌طور کلی، شاخص‌های هیدرولوژیکی را به‌طور متوسط نسبت به جریان عادی رودخانه (قبل از احداث سد) تغییر داده است. برای بررسی تغییرات جریان‌های محیط‌زیستی، نرم‌افزار، این تغییرات را در ۵ گروه عمده شامل جریان‌های کم‌آبی شدید، جریان‌های کم‌آبی، پالس جریان‌های پرآبی، سیلاب‌های کوچک و سیلاب‌های بزرگ دسته‌بندی کرده است. ازجمله

تأثیراتی که تغییر در هر کدام از پارامترها بر اکوسیستم خواهد داشت، به تأثیر بر زیستگاه مناسب برای ارگانیزم‌های آبزی، نگه‌داشتن دمای مناسب آب، اکسیژن محلول و مواد شیمیایی آب، پایش گونه‌های مهاجم و گونه‌های آبزی، ورود گونه‌های گیاهی خاص دشت سیلابی، تغییرات در شکل فیزیکی کانال رودخانه، برگرداندن شرایط کیفی نرمال آب بعد از یک دوره کم‌آبی، ته‌نشینی مواد در دشت سیلابی، شکل فیزیکی زیستگاه‌های دشت سیلابی می‌توان اشاره کرد. سد یامچی باعث حذف سیلاب‌های بزرگ و کاهش سیلاب‌های کوچک می‌شود. تأثیراتی که تغییر در هر کدام از این پارامترها بر اکوسیستم می‌گذارد، شامل تغییراتی در شرایط مهاجرت و تخم‌ریزی ماهی‌ها، ته‌نشینی مواد در دشت‌های سیلابی، کنترل توزیع و فراوانی گیاهان در دشت سیلابی، برهم‌خوردن حفظ تعادل گونه‌ها در محیط‌های آبزی و اجتماعات ساحلی، ته‌نشینی سنگ‌ریزه و قطعات سنگ در مناطق تخم‌ریزی و تغییر در شکل فیزیکی زیستگاه‌های دشت سیلابی می‌شود. همچنین، این سد باعث تغییر ۵۱/۶ درصدی براساس معادلهٔ (۳) در پارامترهای محیط‌زیستی می‌شود.




(الف)




(ب)

**شکل ۴- زمان رخداد مقادیر حدی سالانه (الف) مقدار بیشینه (ب) مقدار کمینه**

## نتیجه‌گیری

در این پژوهش برای مطالعهٔجریان محیط‌زیستی رودخانهٔ بالیخلوچای در استان اردبیل، از سرشاخه‌های رودخانهٔ قره‌سو، روش‌های هیدرولوژیکی تنانت، تسمن و منحنی تداوم جریان به کار رفت. در ادامه نیز تأثیر احداث و بهره‌برداری از سد یامچی از زیرحوزه‌های آبریز ارس با استفاده از روش محدودهٔ تغییرپذیری جریان و تغییر شاخص‌های هیدرولوژیکی و محیط‌زیستی بررسی شد.

نتایج پژوهش با استفاده از روش‌های هیدرولوژیکی برای برآورد حقابهٔمحیط‌زیستی رودخانهٔ بالیخلوچای با استفاده از روش تنانت و برای حفاظت از رودخانه در محدودهٔبهینه برای تمام ماه‌های سال در محدودهٔ ۱/۹۶ تا ۳/۲۷ مترمکعب در ثانیه به دست آمد. همچنین، برای نگهداری جریان رودخانه در شرایط مطلوب محیط‌زیستی از ماه اکتبر تا مارس به جریانی برابر ۰/۳۳ مترمکعب بر ثانیه و از ماه آوریل تا سپتامبر برابر ۰/۹۸ مترمکعب بر ثانیه نیاز است. روش تسمن، متوسط جریان محیط‌زیستی را ۱/۳۱ مترمکعب بر ثانیه تخمین زد. منحنی تداوم جریان برای حفاظت از رودخانه در شرایط مناسب از $Q_{75}$ استفاده می‌کند که برای رودخانهٔ بالیخلوچای و حفاظت از آن در شرایط مناسب به جریان ۲/۴۶ مترمکعب بر ثانیه نیاز است؛ این در حالی است که برای حفاظت از جریان در شرایط نسبتاً مناسب از دبی $Q_{90}$ استفاده می‌شود که برای رودخانهٔمذکور، معادل ۲/۹۴ مترمکعب بر ثانیه است. برای بررسی تغییرات هیدرولوژیکی و محیط‌زیستی، ناشی از احداث و بهره‌برداری از سد یامچی از نرم‌افزار IHA و محدودهٔ تغییرپذیری جریان استفاده شد.

نتایج در این قسمت با نتایج گین و گوپونی (۲۰۱۴) بر سد فارکا روی رودخانهٔگنگ، نتایج زو و لیانگ (۲۰۱۵) بر سد احداث‌شده روی رودخانهٔشائینگ و نتایج سوجکا و همکاران (۲۰۱۶) بر سد احداث‌شده روی رودخانهٔپووا مطابقت دارد. نتایج مشابهی نیز در بررسی تأثیرگذاری سد بر جریان‌های هیدرولوژیکی و زیست‌محیطی جریان رودخانهٔ بالیخلوچای به دست آمد؛ به‌گونه‌ای که سد به تغییر ۲۳ پارامتر هیدرولوژیکی در محدودهٔزیاد و متوسط با درجهٔتغییر هیدرولوژیکی ۶۱/۳۸ درصد منجر شده است؛ یعنی سد یامچی، پارامترهای هیدرولوژیکی را به‌طور متوسط تغییر داده است؛ زیرا محدودهٔتغییرات در بین ۳۳ تا ۶۶ درصد واقع شده است. ازلحاظ تغییر پارامترهای محیط‌زیستی نیز سد یامچی، این پارامترها را به میزان ۵۱/۶ درصد تغییر داد. نتایج پژوهش‌های گین و گوپونی (۲۰۱۴)، زو و لیانگ (۲۰۱۵) و سوجکا و همکاران

(۲۰۱۶) نیز نشان داد احداث سد بر پارامترهای هیدرولوژیکی و محیط‌زیستی تأثیرگذار بود.

## منابع


۱. رئوف م، عزیزی ج و سلحشور آ. ۱۳۹۵. تخمین پارامترهای هیدرولوژیکی و هیدروژئولوژیکی حوضهٔ‌آبخیز با استفاده از مدل SWAT (مطالعهٔ موردی: حوضهٔ بالخلوچای). دانش آب و خاک. ۲۶(۲): ۱۷۳-۱۸۵.

۲. نادری م، ح، علی اوغلی س، پورغلام آمیجی م، فضل اولی ر، و قجقی آ. ۱۳۹۹. تحلیل تغییرات شاخص‌های هیدرولوژیک جریان رودخانهٔ کارون در دوره‌های قبل و پس از احداث سد گتوند با استفاده از رویکرد محدودهٔ تغییرپذیری، مجلهٔ آبیاری و زهکشی ایران. ۱۴(۳): ۷۶۵-۷۸۲.

3. Gain A. and Giupponi C. 2014. Impact of the Farakka Dam on thresholds of the hydrologic flow regime in the Lower Ganges River Basin (Bangladesh). Water. 6(8): 2501-2518.
4. Anonymous. 2012. Guideline for Finding Aquatic Ecosystems Environmental Water Requirement, Vice President of Strategic Planning and Supervision .Report number: 1, pp 127.
5. Vice President of Strategic Planning and Supervision .Report number: 1, pp 127.
6. Islam M. S. 2010. Nature and limitations of environmental flow methodologies and its global trends. Journal of Civil Engineering (IEB). 38(2): 141-152.
7. King J.M. Tharme R.E. and De Villiers M.S. 2000. Environmental flow assessments for rivers: manual for the Building Block Methodology. Pretoria, Water Research Commission. 340 p.
8. Massmann C. 2020. Reproducing different types of changes in hydrological indicators with rainfall-runoff models. Hydrology Research. 51(2): 238-256.
9. Richter B. Baumgartner J. Wigington R. and Braun D. 1997. How much water does a river need? Freshwater biology. 37(1): 231-249.
10. Richter B. D. Baumgartner J. V. Powell J. and Braun D. P. 1996. A method for assessing hydrologic alteration within ecosystems. Conservation Biology. 10(4): 1163-1174.
11. Smakhtin V. Y. 2006. An assessment of environmental flow requirements of Indian River basins. (Report No 107). IWMI. 37 p.
12. Sojka M. Jaskuła J. Wicher-Dysarz J. and Dysarz T. 2016. Assessment of dam construction impact on hydrological regime changes in Lowland River–A case of study: the Stare Miasto reservoir located on the Powa River. Journal of Water and Land Development. 30(1): 119-125.
13. The Nature Conservancy. 2009. Indicators of Hydrologic Alteration Version7.1 User Manual.
14. Wałęga A. Młyński D. Kokoszka R. and Miernik W. 2015. Possibilities of applying hydrological methods for determining environmental flows in select catchments of the upper Dunajec Basin. Methodology (BBM). Pol. Journal Environ. Stud. 24(6): 2663-2676.
15. Zuo Q. I. and Liang S. I. 2015. Effects of dams on river flow regime based on IHA/RVA. Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences. 368: 275-280.