

## اثرات احداث سد بر شاخص‌های تغییرات هیدرولوژیک در حوضه آبخیز گرگانرود

فاطمه دایی‌چینی<sup>۱</sup>، مهدی وفاخواه<sup>۲\*</sup>، وحید موسوی<sup>۳</sup>

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس، نور

۲. استاد، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس، نور

۳. استادیار، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس، نور

(تاریخ دریافت ۱۴۰۰/۰۷/۱۲؛ تاریخ بازنگری ۱۴۰۰/۰۸/۳۰؛ تاریخ تصویب ۱۴۰۰/۱۱/۱۱)

### چکیده

جریان رودخانه‌ای یکی از منابع مهم آبی است که برای مصارف مختلف حائز اهمیت بوده و روند تغییرات آن در مدیریت منابع آب ضروری است و از طرفی، جریان رودخانه‌ای توسط سدها، انحراف‌ها، جریان‌های برگشتی و توسعه شهری تحت تأثیر قرار می‌گیرد و منجر به مسائل مختلفی از جمله وقوع خشکسالی، کاهش آبدهی و مسائل محیط زیستی می‌شود. با توجه به اهمیت رودخانه‌ها در تأمین آب، شناخت شرایط جریان و رژیم هیدرولیکی آن‌ها از اهمیت به‌سزایی برخوردار است. بنابراین، سازه‌های هیدرولیکی تأثیرات گسترده‌ای بر شرایط هیدرولیکی رودخانه در پایین‌دست خود دارند. هدف تحقیق حاضر، ارزیابی اثر احداث سدهای بوستان، گلستان و وشمگیر بر تغییرات رژیم جریان پایین‌دست آن‌ها است. به این منظور، واسنجی و اعتبارسنجی مدل هیدرولوژیک HBV در دوره قبل از احداث سدهای بوستان، گلستان و وشمگیر انجام شده و مقدار دبی روزانه در دوره بعد از احداث سدها شبیه‌سازی شد. در مطالعه حاضر، با استفاده نرم‌افزار IHA نسخه ۷/۱ و با رویکرد محدوده تغییرپذیری (RVA)، ۳۳ شاخص تغییرات هیدرولوژیک (IHA) در پنج گروه اصلی (مقدار؛ تداوم؛ زمان‌بندی؛ فراوانی و میزان تغییرات) در ایستگاه‌های تحت تأثیر سدهای بوستان، گلستان و وشمگیر در دوره‌های قبل و بعد از احداث این سدها مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج حاصل از شبیه‌سازی ایستگاه‌های تحت تأثیر سد با مدل HBV نشان داد مدل در هر دو دوره (واسنجی و اعتبارسنجی) در دوره قبل از احداث سدها دارای کارایی خوبی هستند. نتایج نشان داد در دوره واسنجی ایستگاه‌های آب‌سنجی اوغان، گنبد، قزاقلی و آق‌قلا به ترتیب با ضریب نش-ساتکلیف ۰/۵۲، ۰/۶۷ و ۰/۸۰ و ۰/۶۱ و همچنین، در دوره اعتبارسنجی ایستگاه‌های آب‌سنجی اوغان، گنبد، قزاقلی و آق‌قلا به ترتیب با ضریب نش-ساتکلیف ۰/۵۹، ۰/۴۱ و ۰/۵۸ و ۰/۵۴ بهترین کارایی را دارند. براساس نتایج، شاخص‌های هیدرولوژیک جریان ماهانه نشان می‌دهد در ایستگاه اوغان تحت تأثیر سد بوستان حدود ۳۰ درصد، در ایستگاه‌های گنبد و قزاقلی تحت تأثیر سد گلستان به ترتیب حدود ۵۲ و ۳۰ درصد و در ایستگاه آق‌قلا در پایین‌دست سد وشمگیر ۴۹ درصد مقدار دبی جریان رودخانه در دوره‌های بعد از احداث سدها کاهش داشته است. نتایج حاصل از این تجزیه و تحلیل می‌تواند در تصمیم‌گیری در مورد مسائل مدیریت پایدار منابع آب برای تدوین برنامه مدیریت حوضه در آینده مورد استفاده قرار گیرد.

**کلمات کلیدی:** احداث سد، اعتبارسنجی، رویکرد محدوده تغییرپذیری، مدیریت منابع آب، واسنجی.

## مقدمه

بهره‌برداری خردمندان از منابع آبی 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 احداث سد، افزایش 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 منفی روی خدمات هیدرولوژیکی و اکولوژیکی حوضه آبخیز دارند که به نوبه خود میزان آسیب‌پذیری مردم وابسته به این خدمات را افزایش می‌دهد [۱]. دست‌اندازی در محیط‌های طبیعی، حضور ساختارهای متعدد و نبود مقررات مناسب برای محافظت از این محیط‌ها، شرایط رویداد سیلاب را فراهم می‌کند. افزایش فراوانی و شدت سیلاب‌ها در سال‌های اخیر بیانگر آن است که بیشتر مناطق کشور در معرض تهاجم سیلاب‌های ادواری و مخرب قرار دارند و ابعاد خسارت‌ها و تلفات جانی و مالی سیل افزایش یافته است [۲]. اگرچه در موارد ضروری احداث سدها برای تولید برق، کنترل سیلاب و تأمین آب شرب انکارناپذیر است، اما جدای از این موارد، هرگونه احداث سد می‌تواند مشکلات و مسائل محیط زیستی، زمین‌شناسی، اقلیمی، اجتماعی و اقتصادی جبران‌ناپذیر را به دنبال داشته باشد [۳]. سدها بزرگ‌ترین تأثیرات هیدرولوژیک را بر وضعیت رودخانه اعمال می‌کنند و مقدار جریان را در مقیاس‌های زمانی مختلف (ساعت تا سال) تحت تأثیر قرار می‌دهند [۴ و ۵]. بارزترین اثر سدها، تغییر رژیم هیدرولوژیکی مناطق مجاور خود است، که از جمله این تغییرات می‌توان به تأمین دبی پایه دائمی و تغییر در سطح اساس آبخوان‌های مجاور اشاره کرد. محققان مختلفی گزارش کرده‌اند که تغییر شاخص‌های هیدرولوژیک جریان بر اثر سدها، می‌تواند در تحلیل کاهش جریان سیل یا جریان‌های حداقل رودخانه‌ای، مؤثر واقع شود [۶]. روش‌های مبتنی بر شاخص‌های هیدرولوژیکی ساده‌ترین و پرکاربرترین روش‌های ارزیابی رژیم هیدرولوژیکی و برآورد جریان محیط زیستی در سطح جهان هستند. این روش‌ها

معمولاً به عنوان روش جدول‌های در دسترس<sup>۱</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 و میزان تغییرات را در نظر می‌گیرند. از جمله مرسوم‌ترین این روش‌ها، شاخص‌های تغییرات هیدرولوژیکی (IHA)<sup>۲</sup> است که این روش پارامترهایی را برای مقایسه ویژگی‌های هیدرولوژیکی در دو دوره زمانی قبل و بعد از آثار مداخلات انسانی و تغییر اقلیم در رویکرد دامنه تغییرپذیری (RVA)<sup>۳</sup> ارائه می‌دهد (۱، ۷ و ۸). برای ارزیابی اثرات احداث سد، پژوهش‌های متعددی در داخل و خارج کشور صورت گرفته است که به تعدادی از این مطالعات پرداخته می‌شود. در تحقیقی خاددور<sup>۴</sup> و همکاران [۹] به تأثیر احداث سد در مدیریت سیل در حوضه آبخیز غوغا<sup>۵</sup> در جنوب خلیج طنجه (شمال غربی مراکش) با استفاده از مدل HEC-HMS<sup>۶</sup> پرداختند. مدل تحت دو سناریوی مختلف اجرا شد که شبیه‌سازی تحت سناریوی اول با در نظر گرفتن نبود سد شبیه‌سازی و تحت سناریوی دوم با در نظر گرفتن وجود مخزن آیین مکلاوا<sup>۷</sup> در دوره بازگشت‌ها مختلف از ۲ سال تا ۲۰۰ سال انجام شد. نتیجه نشان داد بزرگی دبی اوج سیلاب در پایین‌دست به طور چشم‌گیری کاهش یافته و حجم سیلاب با افزایش دوره بازگشت کاهش یافته است. برای دوره‌های بازگشت ۱۰۰ و ۲۰۰ سال، کاهش بزرگی دبی اوج تحت سناریوی ۱ و سناریوی ۲ به ترتیب ۵۲/۰۶ و ۲۲/۱۷ درصد و برای کاهش حجم سیلاب ۲۲/۴۶ و ۲۲/۸۲ درصد بود. سرانجام، نتایج بررسی‌ها کارایی خوب مدل در برآورد دبی اوج سیلاب در خروجی سد را نشان داد. جایا<sup>۸</sup> [۱۰] به بررسی اثربخشی سد سابو<sup>۹</sup> در کاهش سیل رودخانه وای لیمان<sup>۱۰</sup> پرداخت و نتایج شبیه‌سازی نشان داد کاهش قابل توجهی در دبی سیل با جریان ناپایدار وجود دارد که در

1. Look-up or Desktop Tables
2. Indicators of Hydrologic Alterations
3. Range of Variability Approach
4. Khaddor
5. Mghogha
6. Hydrologic Engineering Center's Hydrological Modelling System
7. Ain Mechlawa
8. Jaya
9. Sabo
10. Way Leman

محیط زیستی مورد نیاز رودخانه بهشت‌آباد بین ۱/۲۲ مترمکعب بر ثانیه برای شهریور تا ۱۶/۷۵ مترمکعب بر ثانیه برای فروردین برآورده شده است. حداقل جریان محیط زیستی برآورده شده برای رودخانه کوه‌رنگ نیز از ۳/۶۹ مترمکعب بر ثانیه برای شهریور تا ۱۶/۸۱ مترمکعب بر ثانیه برای فروردین متغیر است. نتایج حاصل نشان می‌دهد در موارد متعددی به‌ویژه در سال‌هایی که منطقه با خشکسالی خفیف تا متوسط مواجه بوده، جریان آب مشاهداتی رودخانه برای تأمین حداقل نیازهای محیط زیستی آن کافی نبوده است. با جمع‌بندی نتایج به‌دست‌آمده از مطالعات مختلف می‌توان به این نتیجه رسید که اثر فعالیت‌های انسانی بر میزان تغییرات شاخص‌های هیدرولوژیک جریان می‌تواند در تعدادی از رودخانه‌های استان گلستان مورد مطالعه قرار گیرد، همچنین از بررسی این مطالعات می‌توان نتیجه گرفت که در سال‌های اخیر پارامترهای هیدرولوژیک جریان رودخانه‌ها بر اثر فعالیت‌های انسانی مانند سدسازی، انحراف آب و نیز تغییر اقلیم در سراسر جهان دست‌خوش تغییرات بسیاری بوده است که این تغییرات به‌شدت می‌توانند اکوسیستم رودخانه‌ها را تحت تأثیر قرار دهند و این موضوع اهمیت بررسی میزان تغییرات شاخص‌های جریان را دوچندان می‌کند. حوضه آبخیز گرگانرود با داشتن زمین‌های حاصل‌خیز و تأمین‌کننده آب مورد استفاده برای آبیاری، دامداری و کشاورزی در طول مسیر خود بوده و به‌ویژه آنکه محل مناسب تخم‌ریزی انواع ماهیان خاویاری مهاجر به خصوص تاس‌ماهیان در سالیان نه‌چندان دور بوده است. رودخانه گرگانرود به دلیل سرعت جریان و دبی زیاد همراه با طغیان آب در ماه‌های پرآب سال که منجر به گل‌آلودگی شدید است. وسعت و اهمیت این رودخانه سبب شد به بررسی اثرات احداث سدهای بوستان، گلستان و وشمگیر بر شاخص‌های تغییرات هیدرولوژیک با استفاده از مدل هیدرولوژیک HBV<sup>۲</sup> به‌منظور تخمین دبی روزانه بعد از احداث سدها و سپس محاسبه شاخص‌ها تغییرات هیدرولوژیک در حوضه آبخیز گرگانرود مد نظر قرار گرفت. نتایج پژوهش‌های انجام‌شده برای کاربرد در مطالعات شاخص‌های تغییرات هیدرولوژیک در بخش وسیعی از شمال کشور حیاتی است، لذا انجام این پژوهش از این نظر

نتایج شبیه‌سازی نشان داده شده که با توجه به مشخصات تراز آب سد از نظر ارتفاع اصلی، تراز آب بدون احداث سد بیش از ۲۶/۷۵ متر و بعد از احداث سد به بیش از ۲۵/۱۶ متر یا حدود ۷۰/۶۷ درصد کاهش یافته است. نیسی و تیشه‌زن [۱۱] با بررسی تأثیر احداث سد جره بر کیفیت آب رودخانه زرد در جنوب غربی کشور ایران با استفاده از تحلیل‌های ناپارامتری نشان دادند که با استفاده از آزمون LSD<sup>۱</sup> در مقایسه با سال ۱۳۹۴ (سال شاهد) پارامترهای SAR, Na, Cl و pH تا سال ۱۳۸۹ (قبل از احداث سد) در سطح اطمینان ۹۵ درصد معنادار بوده‌اند و بعد از احداث سد تغییرات معنادار نداشته‌اند. طبق آزمون ناپارامتری من-کندال pH, Ca و SO<sup>۲-</sup> دارای روند معنادار صعودی به ترتیب به‌میزان ۰/۰۳۷، ۰/۳۹۳ و ۰/۳۷۶ و Na, SAR, Cl و دما دارای روند نزولی معنادار به ترتیب به‌میزان ۰/۳۸۷، ۰/۴۱۷، ۰/۳۸۶ و ۰/۱ هستند. آزمون اسپیرمن نشان داد احداث سد به میزان ۹۰ درصد باعث بهبود کیفیت آب رودخانه از نظر شوری شده، اما طبق آزمون LSD این اختلاف معنادار نبوده است. نتایج تجزیه واریانس نیز نشان داد پارامترهای SAR, Na, Cl, pH, Ca و SO<sup>۲-</sup> دارای اختلاف معنادارند. کعبزاده و همکاران [۱۲] به اثرات احداث سد بهره‌برداری سد مخزنی کرخه بر کاربری اراضی و کیفیت آب منطقه پرداختند و نتایج مطالعه حاضر نشان داد پارامترهای شیمیایی و فیزیکی آب و کاربری اراضی حوضه پایاب سد در دوره‌های زمانی بعد از احداث سد دچار تغییر شده است. پارامترهای EC, TDS, SAR, Cl, Ca<sup>۲+</sup>, Na, Mg<sup>۲+</sup>, SO<sup>۲-</sup> و Na<sup>+</sup> روند افزایشی داشته‌اند و pH تغییر محسوسی نداشته است. تغییرات کاربری اراضی نشان می‌دهد زمین‌های بایر، اراضی مرتع و مرتع مشجر کاهش و کشتزارها و اراضی کشت آبی و دیم افزایش یافته است. مهم‌ترین منابع محیط زیستی تأثیرپذیر از احداث سد کرخه به ترتیب تغییر کاربری اراضی و تغییرات نوع و تراکم پوشش گیاهی طبیعی و کاهش محسوس و معنادار کیفیت آب است. حیات‌گیبی و همکاران [۱۳] با برآورد حداقل جریان آب محیط زیستی مورد نیاز رودخانه کارون در بالادست و پایین‌دست سد بهشت‌آباد به این نتیجه رسیدند که بر اساس نتایج حاصل در بالادست سد، حداقل جریان

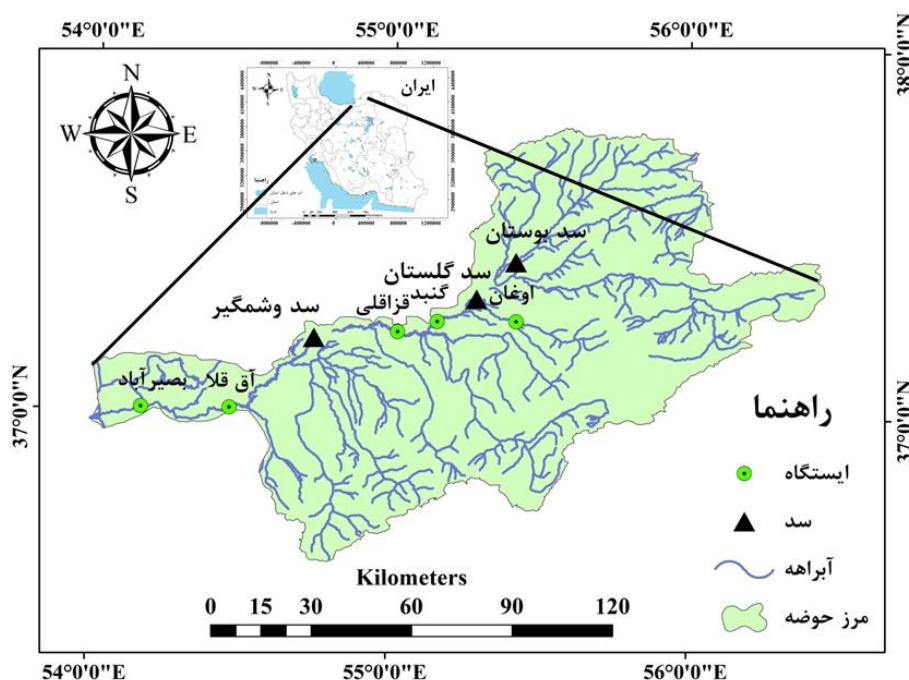
کاملاً کاربردی و ضروری است که در حوضه آبخیز یادشده در محدوده زمانی ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۹ تعداد هشت سیلاب مخرب رخ داده است که آخرین مورد نیز (۲۶ اسفند ۱۳۹۷) تقریباً بی سابقه بوده و خسارت های جبران ناپذیری را در استان گلستان به بار آورده است [۱۴].

**مواد و روش ها**

**منطقه مورد مطالعه**

حوضه آبخیز گرگانرود با مساحت ۱۰۱۹۷ کیلومتر مربع در بخش جنوب شرقی دریای خزر و از نظر موقعیت جغرافیایی، در شمال شرقی ایران و بین عرض های جغرافیایی ۳۳° ۳۶' تا ۳۷° ۴۵' شمالی و طول های جغرافیایی

۱۳° ۴۵' تا ۵۴° ۰۳' شرقی در استان گلستان واقع شده است [۱۵]. آبراهه یا رودخانه اصلی گرگانرود پس از طی ۳۳۳ کیلومتر با تشکیل یک دلتای بزرگ در شهرستان گمیشان به دریای خزر می ریزد. بارش سالانه این حوضه از ۲۳۱ میلی متر تا ۸۴۸ میلی متر تغییر می کند [۱۶]. براساس روش دومارتن، این حوضه به دلیل گستردگی دارای اقلیم متنوعی شامل خشک، نیمه خشک، معتدل مدیترانه ای، نیمه مرطوب و مرطوب است [۱۷]. شکل ۱ موقعیت منطقه مطالعه شده در استان گلستان و ایران و همچنین، موقعیت ایستگاه های آبسنجی را نمایش می دهد.



شکل ۱. موقعیت ایستگاه های آبسنجی و سدهای مطالعه شده در استان گلستان

بهره برداری از سدها، دوره زمانی قبل از بهره برداری از سدها به منظور واسنجی و اعتبارسنجی مدل مفهومی HBV و دوره بعد از احداث سدها به منظور شبیه سازی رواناب استفاده شد. سپس، مقادیر ۳۳ شاخص هیدرولوژیک در دوره قبل و بعد از احداث سدهای بوسستان، گلستان و وشمگیر با استفاده از نرم افزار IHA نسخه ۷/۱ با رویکرد دامنه تغییرپذیری (RVA) استخراج شد. با استفاده از نرم افزار IHA پنج ویژگی اساسی رژیم جریان شامل مقدار، تداوم، زمان بندی، فراوانی و میزان مورد بررسی قرار گرفت

### روش پژوهش

در پژوهش حاضر، آمار بارندگی، دما، تبخیر و تعرق و دبی روزانه از شرکت تحقیقات منابع آب، شرکت سهامی آب منطقه ای استان گلستان و سازمان هواشناسی کشور دریافت شد. ابتدا، موقعیت ایستگاه های آبسنجی کلیه رودخانه های حوضه آبخیز گرگانرود و ایستگاه های آبسنجی منطقه مطالعه شده با استفاده از نرم افزار earth Google تعیین و سپس، ایستگاه های آبسنجی دارای آمار کامل انتخاب شدند. با توجه به زمان

مقیاس حوضه است که می‌تواند در حکم مدلی نیمه‌توزیعی با تقسیم حوضه به چندین زیرحوضه اجرا شود. هر زیرحوضه با توجه به ارتفاع، دریاچه، یخچال‌های طبیعی و پوشش گیاهی به چندین ناحیه تقسیم می‌شود. کاربرد این مدل، ساختار ساده ولی انعطاف‌پذیر، اطلاعات زیادی نیاز ندارد و داده‌های ورودی آن در دسترس است و همچنین، در شرایط آب‌وهوایی متفاوت، قابلیت استفاده دارد. این مدل، دبی روزانه را با استفاده از بارندگی روزانه، حداقل و حداکثر دما پتانسیل و تبخیر و تعرق به عنوان ورودی شبیه‌سازی می‌کند و از پارامترهایی مانند روندیابی داده‌ها آب‌وهوایی، روال ذوب و پوشش برف، روال خاک و تابع واکنش تشکیل شده است [۱۸-۲۰].

و نتایج مربوط به ۳۳ شاخص هیدرولوژیک در دوره قبل و بعد از احداث سدها مورد بررسی و نتایج به صورت جدول ارائه شد.

#### مدل هیدرولوژیک HBV

مدل HBV در مؤسسه هواشناسی و هیدرولوژیکی سوئد در اوایل دهه ۱۹۷۰ میلادی توسعه داده شد، امکان استفاده از این مدل برای طیف وسیعی از حوضه‌ها با شرایط اقلیمی گوناگون وجود دارد. این مدل برای پیش‌بینی سیلاب در کشورهای اسکاندیناوی و بسیاری اهداف دیگر مانند طراحی سرریز، شبیه‌سازی سیلاب و ارزیابی منابع آب به کار می‌رود. این مدل یک مدل مفهومی و شامل محاسبات مفهومی برای فرایندهای هیدرولوژیکی در

جدول ۱. پارامترهای مدل بارش-رواناب HBV [۲۰]

محدوده	واحد	توصیف	پارامتر
			routine Snow
-۲-۰	C°	آستانه دما	TT
۰/۵-۴	<sup>۱</sup> C°d mm	فاکتور درجه-روز	CFMAX
۰/۵-۰/۹	-	فاکتور تصحیح برف	SFCF
۰/۰۵	-	ضریب انجماد مجدد	CFR
۰/۱	-	ظرفیت ذخیره آب	CWH
			routine Soil
۱۰۰-۵۵۰	mm	بیشینه ذخیره در خاک	FC
۰/۳-۱	-	آستانه کاهش تبخیر	LP
۱-۵	-	ضریب ذخیره و نفوذ عمقی خاک	BETA
			routine Response
۰-۴	<sup>۱</sup> mmd	جریان بیشینه از لایه بالایی به پایین	PERC
۰-۷۰	mm	آستانه خروجی از مخزن پایین	UZL
۰/۱-۰/۵	<sup>۱</sup> d	ضریب فروکش (بالای مخزن پایین)	.K
۰/۰۱-۰/۲	<sup>۱</sup> d	ضریب فروکش (پایین مخزن بالایی)	<sub>۱</sub> K
۰/۰۰۱-۰/۰۵	<sup>۱</sup> d	ضریب فروکش (مخزن پایین)	<sub>۲</sub> K
			routine Routing
۱-۲/۵	d	روندیابی، طول تابع وزنی	MAXBAS

مؤلفه جریان محیط زیستی (EFC) تقسیم می‌شود [۲۱] و [۲۲]. با استفاده از شاخص‌های IHA امکان مقایسه تغییرات جریان رودخانه در قبل و بعد از احداث سد وجود دارد. بنابراین، با استفاده از شاخص‌های تغییرات هیدرولوژیک (IHA) می‌توان پنج ویژگی اساسی رژیم جریان را بررسی کرد که شامل مقدار، تداوم، زمان بندی،

#### شاخص‌های تغییرات هیدرولوژیک

شاخص‌های تغییرات هیدرولوژیک (IHA) یک مجموعه توسعه یافته آماری هستند که برای ارزیابی درجه تغییر هیدرولوژیک جریان رودخانه استفاده می‌شوند. این مجموعه آماری شامل ۶۷ پارامتر است که به دو زیرگروه شامل ۳۳ شاخص تغییرات هیدرولوژیک (IHA) و ۳۴

مربعات خطا نیز از رابطه ۲ محاسبه می‌شود که مقدار این شاخص آماری بین صفر تا بی‌نهایت متغیر است.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (O_o - O_e)^2} \quad (2)$$

که در رابطه یادشده،  $O_o$  جریان شبیه‌سازی‌شده،  $O_e$  جریان مشاهده‌شده و  $\bar{O}$  میانگین جریان مشاهده‌شده را نشان می‌دهد [۲۷ و ۲۹]. طول دوره آماری واسنجی و اعتبارسنجی مدل HBV در ایستگاه‌های آب‌سنجی تحت تأثیر سدهای بوستان، گلستان و وشمگیر در جدول ۲ بیان شد.

برای بررسی تعیین داده‌های دبی روزانه بعد از دوره زمانی بهره‌برداری از سدها با استفاده از مدل HBV در مطالعه حاضر، با توجه به معیارهای عملکرد مدل در دوره واسنجی و اعتبارسنجی در دوره قبل از احداث سدها، شبیه‌سازی دبی ایستگاه‌های آب‌سنجی تحت تأثیر سدهای بوستان، گلستان و وشمگیر در دوره بعد از احداث سدها مورد بررسی قرار گرفت. سپس، با استفاده از نتایج به‌دست آمده در ارتباط با بررسی اثرات سدها بعد از دوره زمانی بهره‌برداری، با استفاده از نرم‌افزار IHA ۱/۷ و برآورد ۳۳ شاخص هیدرولوژیک در پنج گروه اصلی در ایستگاه‌های آب‌سنجی تحت تأثیر سدها مورد بررسی و نتایج در جدول ۶ ارائه شد.

#### یافته‌ها

مطالعه ریزش‌های جوی استان گلستان نشان می‌دهد در این استان، پاییز و زمستان پر بارش‌ترین فصول سال هستند و پس از آن فصل بهار پر باران‌ترین فصل سال شناخته می‌شود و تابستان کم‌بارش‌ترین فصل سال است [۳۱]. مرادی و میکاییلی تبریزی [۳۲] در بررسی رواناب در کل حوضه آبخیز گرگانود نشان دادند که میزان رواناب در کل حوضه، به خصوص در قسمت شرق و شمال شرق حوضه که بیشترین تغییرات کاربری هم در این مناطق رخ داده، افزایش یافته است. این افزایش در میزان رواناب بر اثر تغییر کاربری اکوسیستم جنگلی به کاربری کشاورزی در این مناطق صورت گرفته است. با توجه به جدول‌های ۴ و ۵ می‌توان نتیجه گرفت که مقادیر ضریب نش-ساتکلیف در بیشتر ایستگاه‌ها در دوره واسنجی خیلی خوب بودند (بیشتر از ۰/۶۰) و فقط در ایستگاه آب‌سنجی اوغان مقدار آن ۰/۵۲۹ است. با توجه به معیار ضریب نش-ساتکلیف در دوره واسنجی دارای مقادیر

فراوانی و میزان هستند [۲۳-۲۵]. همچنین، باید گفت که تجزیه و تحلیل RVA تنها برای شاخص‌های IHA قابل محاسبه است و برای مؤلفه‌های جریان محیط زیستی (EFC) مورد استفاده قرار نمی‌گیرد [۲۶]. براساس IHA، از رویکرد دامنه تغییرپذیری (RVA) برای بررسی اثرات سدهای بوستان، گلستان و وشمگیر بر رژیم جریان رودخانه گرگانود محاسبه شد که این ۳۳ شاخص یک نمایش دقیق از رژیم هیدرولوژیک برای ارزیابی تغییرات هیدرولوژیک را فراهم می‌کند.

#### واسنجی و اعتبارسنجی مدل هیدرولوژیک نیمه‌توزیعی

##### بارش-رواناب HBV

دوره‌های واسنجی و اعتبارسنجی مدل باید در شرایط آب‌وهوایی یکسان قرار داشته باشند و هرچه دوره مدل‌سازی طولانی‌تر باشد، روندها در آن بهتر دیده می‌شود و نتایج بهتری به دست می‌آید [۲۰]. مدل هیدرولوژیک ارائه‌شده می‌تواند به راحتی در یک صفحه گسترده اکسل ساخته یا در یک برنامه MATLAB برنامه‌ریزی می‌شود [۲۷]. در مرحله بعد با استفاده از این پارامترها برای واسنجی مدل در محیط MATLAB با استفاده از جعبه‌ابزار NCRRT مورد استفاده قرار گرفتند. سپس، با استفاده از NCRRT برای پارامترهای مدل که در مرحله قبل برای ایستگاه‌های آب‌سنجی تحت تأثیر سدها تعیین شده بودند، استفاده شد. توابع هدف مختلفی می‌توانند در امر بهینه‌سازی مورد استفاده قرار گیرند، ولی معیاری که بیش از همه مورد استفاده قرار گرفته، شاخص نش-ساتکلیف (NSE) است. این شاخص روش مناسبی برای ارزیابی مدل‌سازی هیدرولوژیک بوده و به‌طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار گرفته است [۲۸].

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (o_e - o_o)^2}{\sum_{i=1}^n (o_e - \bar{o})^2} \quad (1)$$

براساس پژوهش‌های مختلف صورت گرفته، اگر مقدار ضریب NSE بیشتر از ۰/۵ باشد، مدل شبیه‌سازی خوبی داشته است [۲۹ و ۳۰]. بنابراین، برای نشان دادن تصویر بهتری از نتایج، علاوه بر NSE از RMSE<sup>۲</sup> نیز برای تفسیر نتایج این مطالعه استفاده شد. شاخص ریشه دوم میانگین

در ایستگاه آب‌سنجی آق‌قلا بیانگر دقت خوب مدل است. با توجه به معیارهای کارایی مدل در دوره واسنجی (جدول ۴) و اعتبارسنجی (جدول ۵) در دوره قبل از احداث سدها، معیار کارایی ضریب نش-ساتکلیف در دوره واسنجی نتایج قابل قبول و اعتبارسنجی با نتایج مطلوب‌تری را به همراه دارد. نتایج معیارها کارایی خوب و مناسب در دوره واسنجی و اعتبارسنجی روشن ساخت که مدل با پارامترهای بهینه‌شده می‌تواند به خوبی شبیه‌سازی بارش-رواناب را برای حوضه عملی سازد.

قابل قبولی بوده و در دوره اعتبارسنجی به‌غیر از ایستگاه آب‌سنجی گنبد در همه ایستگاه‌ها دارای مقادیر قابل قبولی هستند. ریشه دوم میانگین مربعات خطا در ایستگاه‌های آب‌سنجی در مرحله واسنجی مدل از ۲/۱۴ تا ۱۴ مترمکعب بر ثانیه است که واسنجی مناسب مدل و قابل قبول بودن دقت مدل در شبیه‌سازی بارش-رواناب در حوضه گرگانرود را نشان می‌دهد. همچنین، در مرحله اعتبارسنجی ۱۳/۵۶- که بیانگر کم‌آورد بودن مدل در شبیه‌سازی بارش-رواناب در ایستگاه آب‌سنجی گنبد و با دقت نسبی قابل قبول و ۲۸/۹۰

جدول ۲. طول دوره‌های آماری واسنجی و اعتبارسنجی ایستگاه‌های آب‌سنجی

ایستگاه آب‌سنجی	دوره آماده‌سازی	دوره واسنجی	دوره اعتبارسنجی	دوره شبیه‌سازی
اوغان	۱۹۸۴/۰۹/۲۳	۱۹۸۶/۰۹/۲۳	۱۹۸۹/۰۹/۲۳	۲۰۰۵/۰۷/۱۲ تا ۲۰۱۵/۰۹/۲۲
	۱۹۸۶/۰۹/۲۲	۱۹۸۹/۰۹/۲۲	۱۹۹۲/۰۹/۲۲	۲۰۰۰/۰۲/۱۹ تا ۲۰۱۵/۰۹/۲۲
گنبد	۱۹۸۷/۰۹/۲۳	۱۹۸۹/۰۹/۲۳	۱۹۹۱/۰۹/۲۳	۲۰۰۰/۰۲/۱۹ تا ۲۰۱۵/۰۹/۲۲
	۱۹۸۹/۰۹/۲۲	۱۹۹۱/۰۹/۲۲	۱۹۹۳/۰۹/۲۲	۲۰۰۰/۰۲/۱۹ تا ۲۰۱۵/۰۹/۲۲
قزاقلی	۱۹۸۴/۰۹/۲۳	۱۹۸۶/۰۹/۲۳	۱۹۸۹/۰۹/۲۳	۲۰۰۰/۰۲/۱۹ تا ۲۰۱۵/۰۹/۲۲
	۱۹۸۶/۰۹/۲۲	۱۹۸۹/۰۹/۲۲	۱۹۹۱/۰۹/۲۲	۱۹۷۰/۰۸/۲۳ تا ۲۰۱۵/۰۹/۲۲
آق‌قلا	۱۹۵۶/۰۹/۲۳	۱۹۵۸/۰۹/۲۳	۱۹۶۱/۰۹/۲۳	۱۹۷۰/۰۸/۲۳ تا ۲۰۱۵/۰۹/۲۲
	۱۹۵۸/۰۹/۲۲	۱۹۶۱/۰۹/۲۲	۱۹۶۳/۰۹/۲۲	

جدول ۳. مقادیر شاخص‌ها در دوره‌های قبل و بعد از احداث سدها با استفاده از RVA

ردیف	نام سد	سال بهره‌برداری از سد	نام ایستگاه آب‌سنجی	دوره قبل از احداث	دوره بعد از احداث
۱	سد بوستان	۱۳۸۴	اوغان	۱۳۶۳-۱۳۸۴	۱۳۸۵-۱۳۹۵
۲	سد گلستان	۱۳۷۹	گنبد	۱۳۳۴-۱۳۷۹	۱۳۸۰-۱۳۹۵
۳			قزاقلی	۱۳۵۲-۱۳۷۹	۱۳۸۰-۱۳۹۵
۴	سد وشمگیر	۱۳۴۹	آق‌قلا	۱۳۲۹-۱۳۴۹	۱۳۵۰-۱۳۹۵

جدول ۴. نتایج واسنجی ایستگاه‌های آب‌سنجی تحت تأثیر سد با مدل HBV

معیار	اوغان	گنبد	قزاقلی	آق‌قلا
ضریب نش-ساتکلیف	۰/۵۲	۰/۶۷۵	۰/۸۰	۰/۶۱
ریشه دوم میانگین مربعات خطا	۲/۱۴	۴/۱۲	۱۰/۷۶	۱۴

جدول ۵. نتایج اعتبارسنجی ایستگاه‌های آب‌سنجی تحت تأثیر سد با مدل HBV

معیار	اوغان	گنبد	قزاقلی	آق‌قلا
ضریب نش-ساتکلیف	۰/۵۹	۰/۴۱	۰/۵۸	۰/۵۴
ریشه دوم میانگین مربعات خطا	۲/۸۹	۱۳/۵۶	۸/۶۴	۲۸/۹۰

آب‌سنجی اوغان، گنبد، قزاقلی و آق‌قلا مطابق جدول ۶ است. در این جدول شاخص‌های گروه ۱ نشان‌دهنده مقدار جریان

مقادیر تغییرات ۳۳ شاخص هیدرولوژیک جریان با رویکرد RVA در دوره شبیه‌سازی بعد از احداث سدها در ایستگاه‌های

حداقل روزانه (یک، سه و هفت روزه)، حداکثر (هفت، ۳۰ و ۹۰ روزه)، در ایستگاه آب‌سنجی گنبد غیر از شاخص حداقل روزانه (یک، سه و هفت روزه)، حداکثر ۹۰ روزه و شاخص جریان پایه، در ایستگاه آب‌سنجی قزاقلی همه شاخص‌ها و در ایستگاه آق‌قلا به‌غیر از شاخص حداقل روزانه (یک و سه روزه) و حداکثر ۹۰ روزه و شاخص جریان پایه، همه شاخص‌ها در دوره بعد از احداث سد بیشتر از دوره قبل از احداث سد و در هر چهار ایستگاه شاخص روزهای صفر جریان بدون تغییر مانده است.

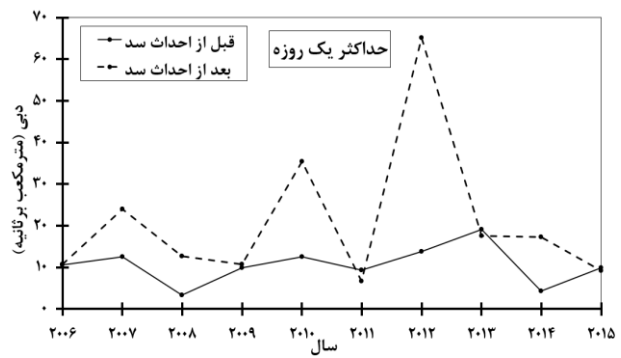
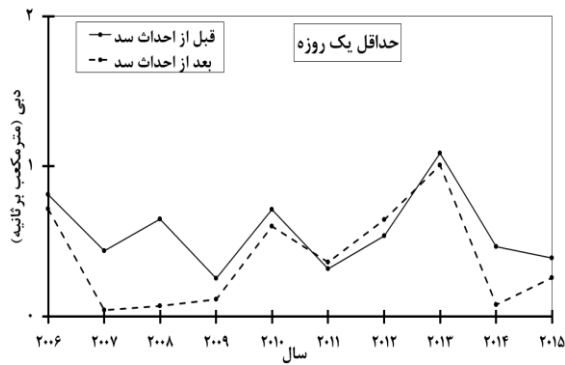
ماهانه است که با توجه به مقادیر این گروه از شاخص‌ها در ایستگاه‌های آب‌سنجی اوغان در بیشتر شاخص‌ها مقدار دبی جریان در دوره قبل از احداث سد بیشتر از مقدار آن در دوره بعد از احداث سد است و در ایستگاه آب‌سنجی گنبد، قزاقلی و آق‌قلا در بیشتر شاخص‌ها دوره قبل از احداث سد کمتر از دوره بعد از احداث سد است. شاخص‌های گروه دو شامل جریان‌های حداقل و حداکثر روزانه (یک‌روزه، سه‌روزه، هفت‌روزه، ۳۰ روزه و ۹۰ روزه) و روزهای صفر جریان و شاخص جریان پایه است که با توجه به مقادیر این گروه در ایستگاه اوغان غیر از شاخص

جدول ۶. مقایسه میانگین شاخص‌های هیدرولوژیک شبیه‌سازی شده قبل و بعد از احداث سدها

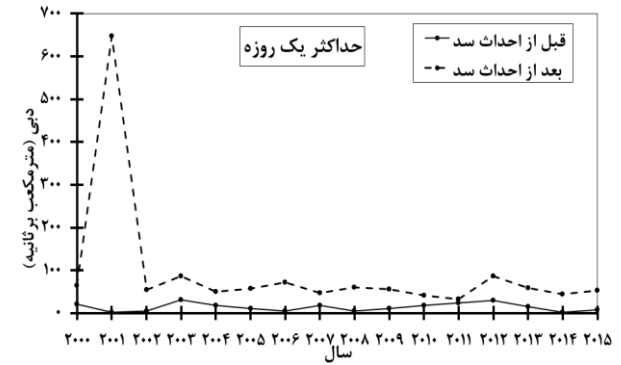
شاخص‌های هیدرولوژیک	ایستگاه اوغان		ایستگاه گنبد		ایستگاه قزاقلی		ایستگاه آق‌قلا	
	قبل	بعد	قبل	بعد	قبل	بعد	قبل	بعد
<b>شاخص گروه ۱</b>								
اکتبر	۰/۸۵ <sup>a</sup>	۱ <sup>a</sup>	۰/۲۸ <sup>a</sup>	۱/۵۲ <sup>b</sup>	۰/۲۱ <sup>a</sup>	۳/۱۸ <sup>b</sup>	۱/۱۲ <sup>a</sup>	۶/۳۱ <sup>b</sup>
نوامبر	۱/۲۱ <sup>a</sup>	۱/۲۵ <sup>b</sup>	۰/۶۶ <sup>a</sup>	۲/۲۰ <sup>b</sup>	۰/۹۳ <sup>a</sup>	۴/۱۰ <sup>b</sup>	۳/۱۴ <sup>a</sup>	۷/۷۶ <sup>b</sup>
دسامبر	۱/۹۷ <sup>a</sup>	۱/۳۳ <sup>b</sup>	۱/۲۸ <sup>a</sup>	۱/۱۹ <sup>a</sup>	۲/۸۵ <sup>a</sup>	۳/۹۳ <sup>b</sup>	۶/۵۰ <sup>a</sup>	۹/۹۳ <sup>b</sup>
ژانویه	۱/۸۹ <sup>a</sup>	۱/۲۸ <sup>b</sup>	۱/۶۹ <sup>a</sup>	۱/۲۸ <sup>a</sup>	۵/۲۴ <sup>a</sup>	۴/۳۴ <sup>b</sup>	۱۱/۲۰ <sup>a</sup>	۱۱/۴۰ <sup>a</sup>
فوریه	۴/۰۵ <sup>a</sup>	۲/۹۷ <sup>b</sup>	۵/۱۳ <sup>a</sup>	۳/۳۵ <sup>a</sup>	۱۵/۷۷ <sup>a</sup>	۱۱/۲۸ <sup>b</sup>	۱۹/۴۱ <sup>a</sup>	۱۵/۶۸ <sup>b</sup>
مارس	۳/۷۹ <sup>a</sup>	۴ <sup>a</sup>	۵/۶۸ <sup>a</sup>	۷/۳۷ <sup>b</sup>	۱۸/۴۵ <sup>a</sup>	۲۴/۱۸ <sup>a</sup>	۳۱/۰۴ <sup>a</sup>	۲۵/۳۳ <sup>b</sup>
آوریل	۳/۵۳ <sup>a</sup>	۴/۰۲ <sup>b</sup>	۵/۰۳ <sup>a</sup>	۷/۸۵ <sup>b</sup>	۱۵/۶۷ <sup>a</sup>	۱۸/۵۴ <sup>b</sup>	۳۳/۲۰ <sup>a</sup>	۲۵/۷۰ <sup>a</sup>
مه	۲/۴۷ <sup>a</sup>	۲/۰۳ <sup>a</sup>	۳/۶۳ <sup>a</sup>	۴/۸۹ <sup>b</sup>	۱۱/۲۰ <sup>a</sup>	۸/۲۸ <sup>a</sup>	۲۷ <sup>a</sup>	۱۷/۱۵ <sup>a</sup>
ژوئن	۱/۷۱ <sup>a</sup>	۱/۲۸ <sup>b</sup>	۱/۹۰ <sup>a</sup>	۱/۰۴ <sup>a</sup>	۳/۷۹ <sup>a</sup>	۱/۳۱ <sup>b</sup>	۱۱/۶۳ <sup>a</sup>	۵/۸۵ <sup>b</sup>
ژوئیه	۱/۰۹ <sup>a</sup>	۰/۹۹ <sup>a</sup>	۱/۰۴ <sup>a</sup>	۱/۶۲ <sup>b</sup>	۰/۹۸ <sup>a</sup>	۲/۳۷ <sup>b</sup>	۵/۱۲ <sup>a</sup>	۲/۰۳ <sup>b</sup>
اوت	۰/۸۸ <sup>a</sup>	۰/۹۳ <sup>a</sup>	۰/۶۰ <sup>a</sup>	۳/۹۷ <sup>b</sup>	۰/۳۰ <sup>a</sup>	۱/۵۴ <sup>b</sup>	۲/۳۴ <sup>a</sup>	۲/۴۳ <sup>a</sup>
سپتامبر	۰/۸۴ <sup>a</sup>	۱/۰۱ <sup>a</sup>	۰/۴۰ <sup>a</sup>	۳/۴۸ <sup>b</sup>	۰/۲۲ <sup>a</sup>	۵/۳۳ <sup>b</sup>	۱/۷۰ <sup>a</sup>	۵/۱۶ <sup>b</sup>
<b>شاخص گروه ۲</b>								
حداقل ۱ روزه	۰/۴۵ <sup>a</sup>	۰/۳۱ <sup>b</sup>	۰/۱۶ <sup>a</sup>	۰/۰۳ <sup>b</sup>	۰/۰۴ <sup>a</sup>	۰/۱۲ <sup>b</sup>	۰/۳۷ <sup>a</sup>	۰/۲۷ <sup>b</sup>
حداقل ۳ روزه	۰/۴۶ <sup>a</sup>	۰/۳۹ <sup>a</sup>	۰/۱۶ <sup>a</sup>	۰/۰۵ <sup>b</sup>	۰/۰۴ <sup>a</sup>	۰/۱۷ <sup>b</sup>	۰/۳۸ <sup>a</sup>	۰/۳۴ <sup>b</sup>
حداقل ۷ روزه	۰/۴۷ <sup>a</sup>	۰/۴۶ <sup>a</sup>	۰/۱۷ <sup>a</sup>	۰/۰۸ <sup>b</sup>	۰/۰۵ <sup>a</sup>	۰/۲۴ <sup>b</sup>	۰/۴۱ <sup>a</sup>	۰/۴۶ <sup>a</sup>
حداقل ۳۰ روزه	۰/۵۴ <sup>a</sup>	۰/۶۸ <sup>a</sup>	۰/۲۱ <sup>a</sup>	۰/۲۴ <sup>b</sup>	۰/۰۷ <sup>a</sup>	۰/۷۷ <sup>b</sup>	۰/۵۴ <sup>a</sup>	۱ <sup>b</sup>
حداقل ۹۰ روزه	۰/۷۹ <sup>a</sup>	۰/۸۳ <sup>a</sup>	۰/۳۳ <sup>a</sup>	۰/۸۹ <sup>b</sup>	۰/۱۶ <sup>a</sup>	۲/۳۶ <sup>a</sup>	۱/۳۴ <sup>a</sup>	۲/۱۵ <sup>b</sup>
حداکثر ۱ روزه	۱۰/۵۳ <sup>a</sup>	۲۰/۹۰ <sup>b</sup>	۱۳/۹۱ <sup>a</sup>	۹۴/۴۶ <sup>b</sup>	۴۵/۳۳ <sup>a</sup>	۸۷/۵۸ <sup>b</sup>	۱۱۲/۶۹ <sup>a</sup>	۱۲۶/۳۷ <sup>a</sup>
حداکثر ۳ روزه	۸/۸۲ <sup>a</sup>	۱۳/۷۳ <sup>b</sup>	۱۳/۹۸ <sup>a</sup>	۶۲/۶۲ <sup>b</sup>	۴۲/۴۳ <sup>a</sup>	۷۷/۸۲ <sup>b</sup>	۱۰۱/۹۱ <sup>a</sup>	۱۱۱/۳۰ <sup>a</sup>
حداکثر ۷ روزه	۸/۳۳ <sup>a</sup>	۱۰/۵۶ <sup>b</sup>	۱۱/۷۰ <sup>a</sup>	۴۷/۶۳ <sup>b</sup>	۳۷/۵۶ <sup>a</sup>	۶۲/۲۳ <sup>b</sup>	۸۳/۷۵ <sup>a</sup>	۹۰/۱۷ <sup>a</sup>
حداکثر ۳۰ روزه	۵/۷۱ <sup>a</sup>	۶/۸۶ <sup>b</sup>	۸/۷۵ <sup>a</sup>	۲۳/۶۳ <sup>b</sup>	۲۸/۸۱ <sup>a</sup>	۳۹/۴۶ <sup>b</sup>	۵۵/۳۸ <sup>a</sup>	۵۶/۲۱ <sup>a</sup>
حداکثر ۹۰ روزه	۴/۲۹ <sup>a</sup>	۴/۳۴ <sup>a</sup>	۱۳/۶۶ <sup>a</sup>	۵/۷۴ <sup>b</sup>	۱۸/۲۳ <sup>a</sup>	۲۴/۲۸ <sup>a</sup>	۳۸/۱۷ <sup>a</sup>	۳۴/۸۵ <sup>a</sup>
تعداد روزهای صفر	.	.	.	.	.	.	.	۷/۲۸ <sup>b</sup>
شاخص جریان پایه	۰/۲۲ <sup>a</sup>	۰/۲۴ <sup>a</sup>	۰/۰۸ <sup>a</sup>	۰/۰۳ <sup>a</sup>	۰/۰۹ <sup>a</sup>	۰/۰۲ <sup>b</sup>	۰/۰۴ <sup>a</sup>	۰/۰۳ <sup>b</sup>
<b>شاخص گروه ۳</b>								
زمان وقوع جریان حداقل	۲۴۸/۲۰ <sup>a</sup>	۲۵۳/۵۰ <sup>b</sup>	۲۷۳/۴۳ <sup>a</sup>	۱۶۲/۱۲ <sup>a</sup>	۲۷۹/۰۶ <sup>a</sup>	۱۹۷/۷۵ <sup>b</sup>	۲۷۴/۷۵ <sup>a</sup>	۱۸۰/۰۲ <sup>b</sup>
زمان وقوع جریان حداکثر	۱۲۴/۸۰ <sup>a</sup>	۱۴۴/۲۰ <sup>a</sup>	۱۰۷/۹۳ <sup>a</sup>	۱۴۱/۲۵ <sup>a</sup>	۶۷ <sup>a</sup>	۱۰۹/۳۷ <sup>a</sup>	۱۰۸/۶۳ <sup>a</sup>	۱۲۴/۶۰ <sup>a</sup>
<b>شاخص گروه ۴</b>								
تعداد پالس کم	۲/۱۰ <sup>a</sup>	۹ <sup>b</sup>	۲/۵۶ <sup>a</sup>	۱۱/۵۶ <sup>b</sup>	۱/۳۱ <sup>a</sup>	۱۲/۹۳ <sup>b</sup>	۲/۲۸ <sup>a</sup>	۸/۲۰ <sup>b</sup>
مدت‌زمان پالس کم	۱۶/۲۰ <sup>a</sup>	۱۰/۸۰ <sup>b</sup>	۳۱/۵۹ <sup>a</sup>	۱۷/۸۱ <sup>b</sup>	۷۸/۲۵ <sup>a</sup>	۹/۴۶ <sup>b</sup>	۲۶/۹۴ <sup>a</sup>	۱۳/۳۸ <sup>b</sup>
تعداد پالس بالا	۶/۶۰ <sup>a</sup>	۷/۶۰ <sup>a</sup>	۲/۴۳ <sup>a</sup>	۸/۸۷ <sup>b</sup>	۱/۴۳ <sup>a</sup>	۹/۳۷ <sup>b</sup>	۲/۳۳ <sup>a</sup>	۷/۰۸ <sup>b</sup>
مدت‌زمان پالس بالا	۸/۶۰ <sup>a</sup>	۲/۶۰ <sup>a</sup>	۲۲/۴۳ <sup>a</sup>	۵/۴۰ <sup>b</sup>	۴۶/۳۷ <sup>a</sup>	۳/۴۶ <sup>b</sup>	۳۵/۸۳ <sup>a</sup>	۹/۳۸ <sup>b</sup>
<b>شاخص گروه ۵</b>								
میزان نوسانات افزایشی دبی	۱۲۴/۸۰ <sup>a</sup>	۱۴۴/۲۰ <sup>a</sup>	۱۰۷/۹۳ <sup>a</sup>	۱۴۱/۲۵ <sup>a</sup>	۶۷ <sup>a</sup>	۱۰۹/۳۷ <sup>a</sup>	۱۰۸/۶۳ <sup>a</sup>	۱۲۴/۶۰ <sup>a</sup>
میزان نوسانات کاهش دبی	۲۴۸/۲۰ <sup>a</sup>	۲۵۳/۵۰ <sup>b</sup>	۲۷۳/۴۳ <sup>a</sup>	۱۶۲/۱۲ <sup>a</sup>	۲۷۹/۰۶ <sup>a</sup>	۱۹۷/۷۵ <sup>b</sup>	۲۷۴/۷۵ <sup>a</sup>	۱۸۰/۰۲ <sup>b</sup>
تعداد برگشت جریان	۰/۱۴ <sup>a</sup>	۰/۱۶ <sup>b</sup>	۰/۱۷ <sup>a</sup>	۰/۲۶ <sup>b</sup>	۰/۱۵ <sup>a</sup>	۰/۷۶ <sup>b</sup>	۱/۰۱ <sup>a</sup>	۰/۹۱ <sup>a</sup>

حروف کوچک غیر مشابه معای داری را نشان می‌دهد ( $P < 0.05$ )

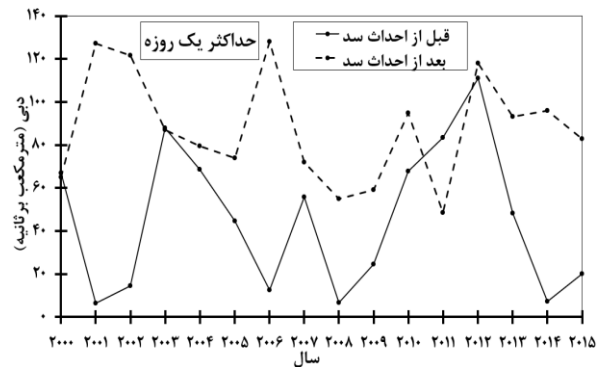
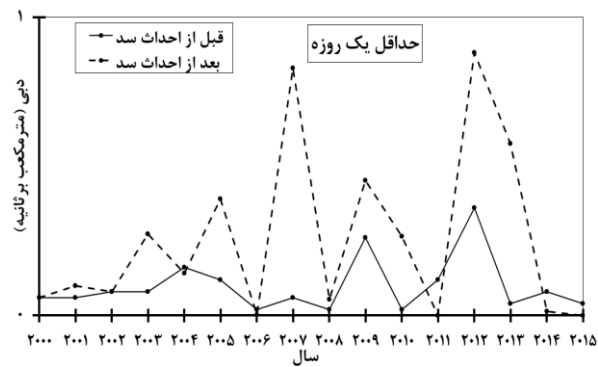




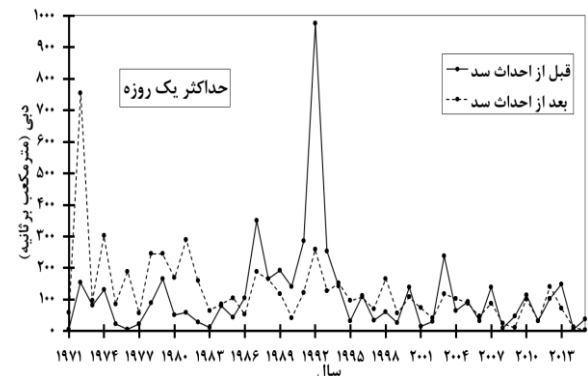
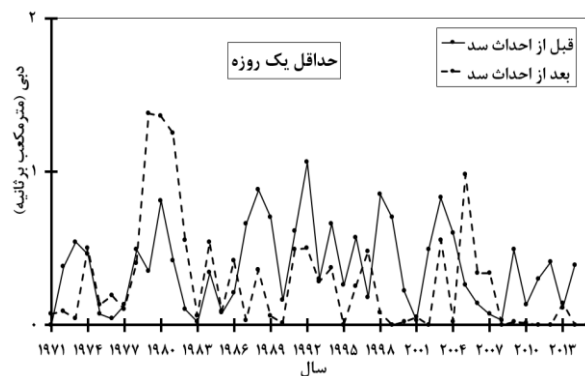
الف- اوغان



ب- گنبد



ج- قزاقلی



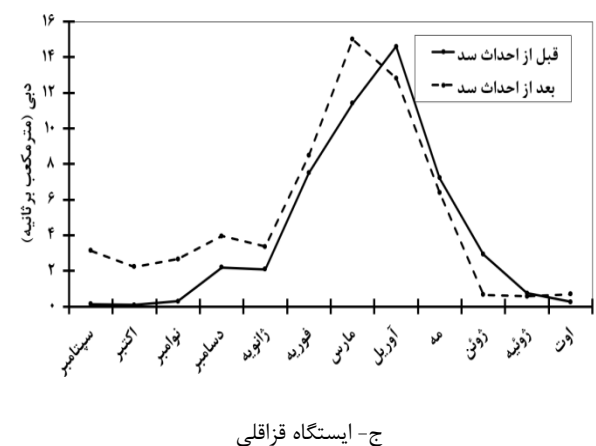
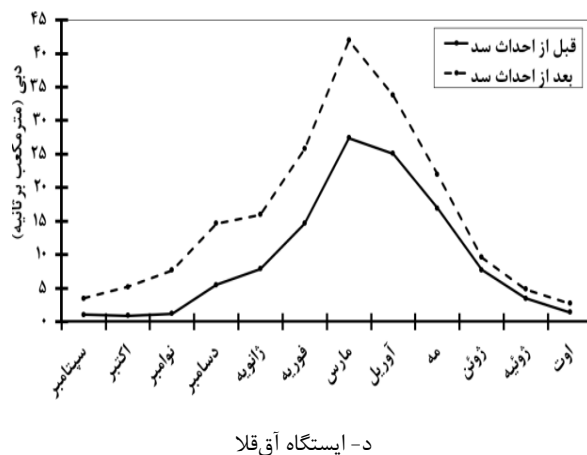
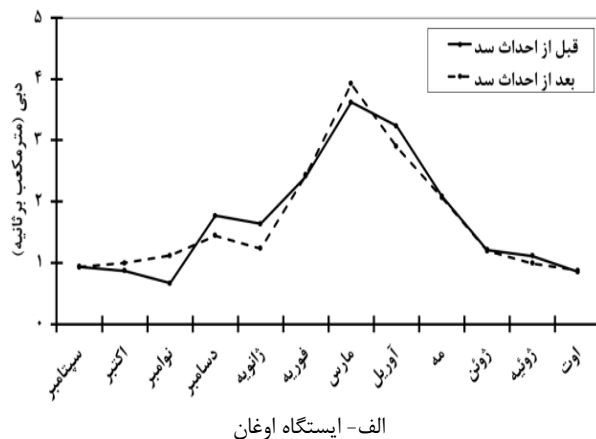
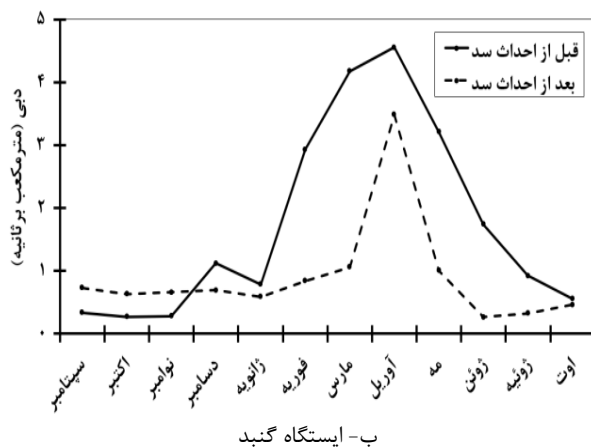
د- آق‌قلا

شکل ۲. تغییرات جریان‌های حداکثر و حداقل یک‌روزه رودخانه گرگانرود در ایستگاه‌های آب‌سنجی مطالعاتی برای دوره‌های قبل و بعد از احداث سدها

نوسانات افزایشی، افزایش یافته و میزان نوسانات کاهش یافته به غیر از اوغان، در دبی جریان روند کاهش نشان می‌دهد. شکل ۲ نشان‌دهنده تغییرات جریان‌های حداکثر و حداقل یک‌روزه رودخانه گرگانود در ایستگاه‌های آب‌سنجی مطالعاتی برای دوره‌های قبل و بعد از احداث سدها است.

با توجه به شکل ۲ می‌توان بیان کرد که مقادیر جریان حداکثر یک‌روزه در دوره بعد از احداث سدها نسبت به دوره قبل از احداث سدها در ایستگاه‌های اوغان، گنبد، قزاقلی و در ایستگاه آب‌سنجی آق‌قلا (تا سال ۱۳۶۶) به صورت افزایشی و دوره قبل از احداث سد در آق‌قلا، از سال ۱۳۶۶ تا ۱۳۹۴ روند افزایشی یافته است. مقادیر جریان حداکثر یک‌روزه در دوره بعد از احداث سدها نسبت به دوره قبل از احداث سدها در ایستگاه‌های اوغان غیر از سال ۱۳۹۱ و در ایستگاه گنبد غیر از سال ۱۳۸۹ کاهش و در ایستگاه‌های قزاقلی و آق‌قلا دارای نوسانات افزایشی بوده است.

همچنین، شاخص‌های گروه سه شامل زمان وقوع جریان حداقل و حداکثر است. براساس نتایج می‌توان گفت که شاخص‌ها به غیر از ایستگاه اوغان به صورت کاهش یافته و در خصوص ایستگاه‌های اوغان، گنبد، قزاقلی و آق‌قلا می‌توان علت افزایش زمان وقوع جریان حداکثر را به این شکل تفسیر کرد که ورود جریان از شاخه‌های فرعی به رودخانه اصلی و باعث افزایش مقدار دبی جریان در مناطق پایین دست سد می‌شود و همچنین، می‌توان علت دیگر آن را افزایش بارش دانست. شاخص‌های گروه چهار در ایستگاه‌های اوغان، گنبد، آق‌قلا و ایستگاه قزاقلی با افزایش دبی جریان اثر خود را در این شاخص با افزایش پالس‌های بالا و کم در دوره بعد از احداث سدها شده که نشان‌دهنده نوسانات بالا و کم در ایستگاه‌های آب‌سنجی اوغان، گنبد، قزاقلی و آق‌قلا است. در نهایت، با توجه به شاخص‌های گروه پنج می‌توان نتیجه گرفت که در ایستگاه‌های اوغان، گنبد، قزاقلی و آق‌قلا میزان



شکل ۳. تغییرات ماهانه دبی جریان رودخانه گرگانود در ایستگاه‌های آب‌سنجی مطالعاتی برای دوره‌های قبل و بعد از احداث سدها

تحت تأثیر سدها، بهترین دوره‌های واسنجی و اعتبارسنجی برای به حداقل رساندن خطاهای شبیه‌سازی انتخاب شدند. این انتخاب برای مدل براساس بیشترین ضریب نش-ساتکلیف بین رواناب مشاهداتی و شبیه‌سازی صورت گرفت. نتایج حاصل از شبیه‌سازی ایستگاه‌های تحت تأثیر با مدل HBV نشان داد مدل در دوره واسنجی و اعتبارسنجی کارایی خوبی دارد و می‌توان دریافت که مقادیر رواناب پیش‌بینی‌شده برابر با مقادیر مشاهده‌ای متناظر با آن است. بر اساس نتایج دایب چینی و همکاران [۳۵] روند متغیرهای اقلیمی بارش، دما و تبخیر و تعرق با استفاده از آزمون من-کندال و شیب‌سن نشان داد در اغلب ایستگاه‌های هواشناسی در سطح ۵ درصد معنادار است. به طوری که بارش و دما در اغلب ایستگاه‌ها روند معنادار افزایشی داشته، در حالی که روند تبخیر و تعرق از پنج ایستگاه در سه ایستگاه معنادار افزایشی بوده است. پس می‌توان انتظار داشت با توجه به روند افزایشی بارش، شاخص‌های تغییرات هیدرولوژیکی روند افزایشی داشته باشند. شاخص‌های هیدرولوژیک نشان می‌دهد شرایط هیدرولوژیک حاکم روی رودخانه گرگانرود نوسان داشته‌اند، به طوری که در برخی از آن‌ها به گونه‌ای بوده که باعث افزایش آن‌ها در دوره‌های بعد از احداث سدها شده و در برخی از آن‌ها حالت کاهش به خود گرفته است. براساس نتایج شبیه‌سازی بدون در نظر گرفتن سدهای بوستان، گلستان و وشمگیر، شاخص‌های هیدرولوژیک جریان ماهانه نشان می‌دهد در ایستگاه اوغان تحت تأثیر سد بوستان تقریباً ۳۰ درصد، در ایستگاه‌های گنبد و قزاقلی تحت تأثیر سد گلستان به ترتیب حدود ۵۲ و ۳۰ درصد و در ایستگاه آق‌قلا در پایین‌دست سد وشمگیر ۴۹ درصد مقدار دبی جریان رودخانه در دوره‌های بعد از احداث سدها کاهش داشته است و با توجه به نتایج تغییرات ماهانه در ایستگاه‌های اوغان، گنبد، قزاقلی و آق‌قلا نشان می‌دهد مقدار دبی جریان در دوره‌های بعد از احداث سدها نسبت به دوره‌های قبل از احداث سدها در ایستگاه‌های اوغان، گنبد و قزاقلی (با اختلاف کم از دوره قبل از احداث سد افزایش یافته) تحت تأثیر سدهای بوستان و گلستان باعث کاهش تغییرات ماهانه جریان شده و در ایستگاه آب‌سنجی آق‌قلا دوره بعد از احداث سد نسبت به قبل از احداث سد افزایش یافته است که علت

با توجه به شکل ۳ مقدار دبی جریان در دوره‌های بعد از احداث سدها نسبت به دوره‌های قبل از احداث سدها در ایستگاه‌های اوغان (غیر از ماه‌های آبان و اسفند)، گنبد (غیر از ماه‌های شهریور، مهر و آبان) و قزاقلی از شهریور تا فروردین دوره بعد از احداث سد افزایش یافته و از فروردین تا مرداد دوره بعد از احداث سد کاهش یافته و در ایستگاه آب‌سنجی آق‌قلا دوره بعد از احداث سدها نسبت به قبل از احداث سد افزایش یافته است که علت آن به خاطر ورود سرشاخه‌های فرعی و افزایش بارش است. منشأ اصلی رواناب، مقدار بارش است و طبیعی است که با کاهش بارش، میزان رواناب نیز کاهش می‌یابد. از سوی دیگر، از این نتایج می‌توان نتیجه‌گیری کرد که بارش بیشتر در فصل‌های پاییز و زمستان در ایستگاه اوغان متمرکز می‌شود و از بارش‌های بهار و تابستان کاسته می‌شود. وجود کاربری اراضی کشاورزی و جنگل‌های نیمه‌انبوه در این ایستگاه‌ها که در بخش بالادست این ایستگاه از پوشش نسبتاً خوبی برخوردارند، اما در پایین دست حوضه تغییر کاربری بیشتر مشهود است. بنابراین، کاربری اراضی در ایستگاه آب‌سنجی اوغان اثر مثبت خود را نشان داده است [۳۳ و ۳۴]. افزایش دبی جریان در فصل‌های پاییز و تابستان فقط در چند واقعه مشاهده شده است که به دلیل نبود شاخه فرعی به رودخانه، افزایش بارش و دما در این ایستگاه، پوشش مناسب کاربری اراضی می‌توان نتیجه گرفت که وجود مقادیر ماهانه دبی جریان در دوره بعد از احداث سد کاهش یافته است. در ایستگاه آب‌سنجی گنبد و قزاقلی بارش بیشتر در فصل‌های پاییز و زمستان در این ایستگاه متمرکز می‌شود و از بارش‌های بهار و تابستان کاسته می‌شود. در ایستگاه آب‌سنجی آق‌قلا در چهار فصل بارش بیشتر متمرکز می‌شود. افزایش دما در ماه‌های تابستان که هم‌زمان با کاهش بارش است، در رشد و توسعه پوشش گیاهی و بقایای گیاهی نقش قابل توجهی دارد و چرخش هیدرولوژی حوضه را تحت تأثیر قرار می‌دهد. از طرفی، تغییرات دمایی زمستان نیز می‌تواند زمان آغاز ذوب برف حوضه را تحت تأثیر قرار دهد که این عوامل روی دبی اوج سیلاب در پایین دست تأثیر بسزایی دارد.

### بحث و نتیجه‌گیری

در شبیه‌سازی رواناب حوضه آبخیز گرگانرود با استفاده از مدل هیدرولوژیک نیمه‌توزیعی HBV برای ایستگاه‌های

[۳۸] و نصیری‌خیای و رجبی [۲۲] مطابقت دارد. با توجه به تنوع مدل‌های هیدرولوژی، انتخاب هر مدل برای شبیه‌سازی هیدرولوژیک دشوار است. بنابراین، نیاز به ارزیابی مقایسه‌ای بین مدل‌ها برای مشخص کردن توانایی و قابلیت هر مدل در شبیه‌سازی دبی‌های حداقل و حداکثر در منطقه مطالعاتی است. بنابراین، تحقیقات بیشتری در حوضه مطالعه‌شده با استفاده از مؤلفه‌های جریان محیط زیستی در مطالعات آینده پیشنهاد می‌شود.

#### منابع

- [1].Khosravi G, Sadodin A, Ownegh M, Bahreman A, Mostafavi H. Classification and identification of changes in river flow regime using the Indicators of Hydrologic Alteration (IHA) Case study: (The Khormarud River- Tilabad Watershed- Golestan Province). *Echo Hydrology*. 2019; 6(3): 651-671. (In Persian)
- [2].Nasiri Khiavi A, vafakhah M, Sadeghi HR. Influence of flood regime from changes in rainfall and land use in Cheshmeh Kileh watershed. *Echo Hydrology*. 2021; 8(1): 221-234. (In Persian)
- [3].Mahmood Aznavah A. Environmental effects of the construction of dams. Office of cultural affairs university of Tehran. *Journal of Tagh , Nature Engineering-Student Association*. 2020; 1-9 pp. (In Persian)
- [4].Mohammadirad L. Comparing the hydrological indicators of stream flow under the effects of dam construction (case study: Yamchi and Sabalan Dams Ardabil province), M. Sc Dissertation in Geomorphology and Environmental Planning, University of Mohaghegh Ardabili, Depart of Natural Geography .2018; 100 pp. (In Persian)
- [5].Mostafazadeh R ,Esfandiary Darabad F , Mohammadirad L ,and Haji K. Quantitative Changes and Statistical Comparison of River Flow Hydrological Indicators after the Construction of Yamchi Dam, Ardabil, Iran. *Environment and Water Engineering*. 2020; 6(2): 107-121. (In Persian)
- [6].Naderi NH ,Alioghli S ,Pourgholam-Amiji M , Fazloulou R ,Ghojoghi A .Analysis of Changes in Hydrological Indices of Karun River Flow before and after Periods Gotvand Dam Using Range of Variability Approach .*Iranian Journal of Irrigation and Drainage*. 2020; 3(14): 765-782. (In Persian)

آن، ورود سرشاخه‌های فرعی و افزایش بارش است. همچنین، جریان حداکثر یک‌روزه در دوره بعد از احداث سدها در ایستگاه‌های اوغان ۳۳ درصد، گنبد ۷۶ درصد، قزاقلی ۴۵ درصد و ایستگاه آق‌قلا ۲۷ درصد افزایش داشته که نشان از تأثیر وجود شاخه‌های فرعی به رودخانه، کاربری اراضی و افزایش بارش است. از طرفی، تعداد پالس‌های بالای دبی جریان رودخانه مطالعه‌شده دوره قبل از احداث سدها کمتر از دوره بعد از احداث سدها است. افزایش بارش در منطقه مطالعه‌شده بر شاخص میزان نوسانات افزایشی در دبی جریان در ایستگاه‌های اوغان، گنبد، قزاقلی و ایستگاه آق‌قلا باعث تأثیر منفی و موجب افزایش این شاخص طی زمان شده است که تأثیر سدها روی این شاخص در رودخانه گرگانود را نشان می‌دهد. براساس نتایج شبیه‌سازی بدون در نظر گرفتن سدهای بوستان، گلستان و وشمگیر و با توجه به نتایج دایی‌چینی و همکاران [۳۵] که با در نظر گرفتن احداث سدهای گلستان و وشمگیر می‌توان نتیجه گرفت که سد گلستان بر شاخص‌های هیدرولوژیک جریان ماهانه، جریان حداکثر یک‌روزه، تعداد پالس‌های بالای دبی جریان و میزان نوسانات افزایشی تأثیر مثبت داشته و بر شاخص تغییرات ماهانه جریان تأثیر منفی داشته و سد وشمگیر بر شاخص‌های تغییرات ماهانه جریان، جریان حداکثر یک‌روزه تأثیر مثبت داشته و بر شاخص‌های هیدرولوژیک جریان ماهانه، تعداد پالس‌های بالای دبی و شاخص میزان نوسانات افزایشی تأثیر منفی داشته است که علت تأثیر مثبت بر شاخص‌ها ناشی از تأثیر سدهای بوستان، گلستان و وشمگیر و اثر مثبت کاربری اراضی و علت تأثیر منفی بر شاخص‌ها می‌تواند ناشی از تأثیر سدهای بوستان، گلستان و وشمگیر، وجود شاخه‌های فرعی به رودخانه اصلی، نبود کاربری اراضی و افزایش بارش طی دوره آماری باشد. همچنین، می‌توان گفت که تأثیر ترکیبی احداث سدها و از طرفی تغییرات اقلیمی طی دوره آماری (افزایش بارش و افزایش دما) بر دبی جریان رودخانه گرگانود تأثیر داشته است که نتایج این تحقیق با نتایج تحقیقات گاین و گیوپونی<sup>۱</sup> [۳۶]، زو و لیانگ<sup>۲</sup> [۳۷]، سوچکا<sup>۳</sup> و همکاران

---

1. Gain and Giupponi  
2. Zuo and Liang  
3. Sojka

- [7]. Richter BD, Davis MM, Apse C, Konrad C. A presumptive standard for environmental flow protection. *River Res.* 2011; 28: 1312–1321 .
- [8]. Richter BD, Baumgartner JV, Powell J, Braun DP. A method for assessing hydrologic alteration within ecosystems. *Conserv Biol.* 1996; 10(4): 1163-1174.
- [9]. Khaddor I, Achab M, Soumali M, Benjbara A, Alaoui A. The Impact of the Construction of a Dam on Flood Management. *Civil Engineering Journal.* 2021; 7(2): 343-356.
- [10]. Jaya RP .Study Effectiveness Sabo Dam on Reducing Flood in Way Leman River . In Proceedings of the International Conference on Civil .Offshore and Environmental Engineering .2021; 174-179 pp.
- [11]. Neisi L, and Tishehzan P. Evaluation of the Quality of Irrigation Water of Downstream of the Zard River Using Statistical Analysis. *Journal of Water and Soil Science (Science and Technology of Agriculture and Natural Resources.* 2019; 23(3): 81-93. (In Persian)
- [12]. Kaabzadeh S, Ghodousi J, Arjmandi R, Jaafarzadeh Haghighifard N. The effects of constructing and exploiting Karkheh Storage Dam on the land uses and quality of regional water. *Journal of Environment Science and Technology .*2021; 1-10 pp. (In Persian)
- [13]. Hayatgheibi1 F ,Shahnoushi N ,Ghahreman B ,Samadi Borujeni H ,Ghorbani M ,Sabouhi Sabouni M .Environmental Flow Assessment of Karun River in Upstream and Downstream of Beheshtabad Dam. *Journal of Water and Soil.* 2021; 35(3): 319-333. (In Persian)
- [14]. Rajabizadeh Y, Ayyoubzadeh S ,and Zahiri A .Flood Survey of Golestan Province in 2018-2019 and Providing Solutions for Its Control and Management in the Future. *Iranian journal of Ecohydrology.* 2019; 6(4): 921-942. (In Persian)
- [15]. Lalouzai A, Sadoddin A, Zare Garizi A, berdi Sheikh V. Analysis of seasonal behavior of flood events and their temporal changes for the Hyrcanian watersheds (Pilot study: watersheds of the Gorganroud River Basin, Iran). *Journal of Natural Environmental Hazards.* 2020; 9(25): 143-158. (In Persian)
- [16]. Gorganli Dudge A ,Jandaghi N ,Ghareh Mahmoodlu M ,Nik Ghogh Y .Effect of flood natural dispersal of Esfand 2019 on quantitative and qualitative characteristics of ground water in the area Sialbadasth The last part of Gorganroud catchment. *Echo Hydrology.* 2021; 8(2): 535-550. (In Persian)
- [17]. Ghareh Mahmoodlu M, Jandaghi N, Sayadi M. Hydrochemical evaluation and qualitative deterioration assessment of Gorganroud River. *Iranian Journal of Geology.* 2020; 14(55): 129-145. (In Persian)
- [18]. Fathabadi A, Rouhani H, Seidian M. Evaluation of the efficiency of non-parametric methods based on residual and parametric analysis in estimating the uncertainty of the hydrological model. *Iranian Soil and Water Research.* 2018; 49(2): 281-292. (In Persian)
- [19]. Havangi M, and Mesbah Bavani E. Comparison of the performance of two hydrological models IHACRES and HBV light in simulation of Dez basin. *Water Extraction and Watershed Management Congress .*2014; 1-11 pp. (In Persian)
- [20]. Yaghubi M, Mesbah Bavani E. Sensitivity analysis and performance comparison of three conceptual models HEC-HMS, IHARCES, HBV in continuous rainfall-runoff simulation in semi-arid basins (Case study: Harat-Yazd Great Basin). *Journal of Earth and Space Physics.* 2014; 4(2): 153-172. (In Persian)
- [21]. Nasiri Khiavi A, Esmali-Ouri A, Mostafazadeh R. Changes in the values of the river base index in four consecutive hydrometric stations located on the Qarasu River in Ardabil Province. *The First National Conference on Water Resource Management Strategies and Environmental Challenges.* Sari University of Agricultural Sciences and Natural Resources .10 to 11 May 2018; 1-9 pp. (In Persian)
- [22]. Nasiri Khiavi A, Rajabi MR. The effect of Bukan Dam on environmental flow in Zarrinehrood River using hydrologic methods and EFC. *The 14th National Conference on Watershed Management Science and Engineering, Iran.* University of Urmia .25-26 July 2019; 1-7 pp. (In Persian)
- [23]. Cardoso J S L L .Application of indicators of hydrologic alteration in Portuguese rivers impacted by dams ,MSc thesis .Faculty of Civil Engineering ,University of Católica Portuguesa . 2013; 53p.
- [24]. Lu W, Lei H, Yang D, Tang L & ,Miao Q. Quantifying the impacts of small dam construction on hydrological alterations in the Jiulong River basin of Southeast China. *Journal of Hydrology.* 2018; 567: 382-392.
- [25]. Madady H, Ashafzadeh MR. The effect of Karkheh dam on the spatial distribution pattern of riparian forests in Karkheh National Park. *Applied Ecology.* 2012; 1(2): 1-13. (In Persian)

- [26]. The Nature Conservancy. Indicators of Hydrologic Alteration Version 7/1 User's Manual .2009; 1-76 PP.
- [27]. Aghakouchak A ,Habib E .Application of a Conceptual Hydrologic Model in Teaching Hydrologic Processes .Int .Journal .Engng Ed. 2010; 26(4): 963-973.
- [28]. ASCE Task Committee on Definition of Criteria for Evaluation of Watershed Models of the Watershed Management Committee Irrigation and Drainage Division .Criteria for evaluation of watershed models .Journal of Irrigation and Drainage Engineering. 1993; 119(3): 429-442.
- [29]. Dastjerdi F, Azarakhshi M, Bashiri M. Comparison of the efficiency of hydrological models (AWBM and SimHyd) and neural network (RBF and MLP) in rainfall-runoff simulation (Case study: Bararieh Basin-Neishabour). Iranian Journal of Watershed Management Science. 2019; 13(45): 107-118. (In Persian)
- [30]. Gassman PW, Reyes MR, Green CH, and Arnold JG. The soil and water assessment tool: historical development, applications, and future research directions. American Society of Agricultural and Biological Engineering. 2007; 50(40): 1211-1250.
- [31]. Shahkoe E, Sarli R, Darvishi Y. The Zoning of Vulnerable Areas Against Natural Hazards with an Landslide (Case Study: Gorganroud Subdomain In Gorgan City). Quantitative Geomorphological Research. 2019; 8(2): 52-70. (In Persian)
- [32]. Moradi Z, and Mikaeili-Tabrizi R. Relationship between Land Use Change and Water Yield in Gorgan-roud Watershed. Journal of Watershed Management Research. 2020; 11(21): 269-280. (In Persian)
- [33]. Performance of watershed management measures in reducing flood damage in Golestan in March 2019 and April 2019 .Forests , Rangelands and Watershed Management Organization - General Department of Natural Resources and Watershed Management of Golestan Province.
- [34]. Saghafian B ,Farazjoo H ,Sepehry A , Najafinejad A .Effects of Land Use Change on Floods in Golestan Dam Drainage Basin .Iranian Water Resources Research. 2006; 2(1): 18-28. (In Persian)
- [35]. Daechini F, Vafakhah M ,and Moosavi V . Impacts of the Golestan and Voshmgir Dams on Indicators of Hydrologic Alterations in the Gorganroud River Using Range of Variability Approach .Echo Hydrology. 2020; 3(7): 595-607.( In Persian)
- [36]. Gain A, Giupponi C. Impact of the Farakka Dam on thresholds of the hydrologic flow regime in the Lower Ganges River Basin (Bangladesh). Water. 2014; 6(8): 2501-2518.
- [37]. Zuo Q, Liang SH. Effects of dams on river flow regime based on IHA/RVA. Remote Sensing and GIS for Hydrology and Water Resources (IAHS Publ). 2015; 368: 275-280.
- [38]. Sojka M, Jaskuła J, Wicher-Dysarz J & , Dysarz T. 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. 2016; 30(1): 119-125.