

پیش بینی اثر بارورسازی ابرها بر رواناب حوزه آبخیز بهشت آباد با استفاده از مدل IHACRES

- ❖ **عباس رضایی هارونی***؛ دانش آموخته کارشناسی ارشد علوم و مهندسی آبخیز، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران.
- ❖ **رفعت زارع بیدکی**؛ استادیار آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران.
- ❖ **سمانه پورمحمدی**؛ دکتری علوم و مهندسی آبخیز، شرکت آب و نیروی ایران، یزد، ایران.

چکیده

فناوری بارورسازی ابرها راهکاری جدید و نسبتاً موثر جهت کاهش اثرات خشکسالی و افزایش آب در دسترس است. بارورسازی ابرها از منعطف‌ترین و به صرفه‌ترین راه‌های مدیریت منابع آب است که می‌تواند موجب افزایش ۱۰ تا ۳۰ درصدی بارندگی سالانه شود. حوزه آبخیز بهشت آباد که در سراب حوزه آبخیز کارون است، می‌تواند مستعد بارورسازی ابرها در استان چهارمحال و بختیاری باشد. بنابراین با استفاده از داده‌های فیزیوگرافی و هواشناسی پتانسیل زمانی و مکانی بارورسازی ابرها در این منطقه بررسی شد. نتایج نشان داد که ۲۵/۴۳ درصد مناطق حوزه آبخیز بهشت‌آباد که بیشتر در منطقه جنوب غربی حوزه قرار دارد، برای بارورسازی ابرها مناسب می‌باشد. در ادامه به بررسی کارایی مدل IHACRES به منظور شبیه‌سازی رواناب خروجی از حوزه پرداخته شد. سپس با استفاده از مدل IHACRES رواناب حوزه آبخیز بهشت‌آباد برای یک سال نرمال شبیه‌سازی شد. دو سناریو افزایش ۱۰ درصد بارش ماه فوریه و افزایش ۱۰ درصد بارش در شش ماه سال یعنی ماه‌های فوریه، ژانویه، دسامبر، مارس، نوامبر و آوریل (نسبت به یک سال متوسط) مورد آزمون قرار گرفت. نتایج نشان داد که افزایش ۱۰ درصدی بارش در ماه فوریه ۳/۶ درصد و افزایش ۱۰ درصدی بارش در شش ماه مذکور ۱۳/۷ درصد به حجم آورد سالانه رودخانه بهشت‌آباد اضافه می‌کند. همچنین ۱۰ درصد افزایش بارش در دو سال نمونه ترسالی و خشکسالی مقایسه شد. نتایج نشان داد اثر بارورسازی ابرها در خشکسالی بیشتر است.

کلمات کلیدی: استان چهارمحال و بختیاری، بارندگی، دبی جریان، منطق فازی.

۱. مقدمه

۱۳۸۸ به میزان ۲۰/۲۷ درصد می‌باشد. همچنین رواناب حوزه به میزان ۲۶ میلیون مترمکعب و رسوب نیز به میزان ۳/۸ تن در روز در طی مدت ۳ ماه بارورسازی ابرها افزوده شد [۱۵]. در مطالعه‌ای به منظور بررسی اثرات تغییر اقلیم بر رواناب حوزه توپسرکان، محققان بیان کردند که با احتساب افزایش ۱۰ درصدی بارش، دو میلیون متر مکعب حجم رواناب کاهش یافته در اثر تغییر اقلیم جبران خواهد شد [۱۹]. در مطالعه‌ای به بررسی اثر بارورسازی ابرها در حوزه آبخیز آذربایجان شرقی به منظور تاثیر بر منابع آب پرداختند. نتایج حاکی از آن بود که در اثر بارورسازی ابرها در سال آبی ۹۱-۹۲ افزایش ۱۹ درصدی بارش و همچنین افزایش ۹۷/۶ و ۲۲/۰۴ میلیون متر مکعبی تولید منابع آب سطحی و زیرزمینی رخ داده است. نتایج بدست آمده از میزان افزایش بارش و افزایش میزان آب‌های سطحی با استفاده از روش‌های آماری در منطقه هدف کنترل و ثبت شد [۲۰]. در مطالعه مشابهی در ایالات متحده عربی، منحنی‌های IDF سه ایستگاه هواشناسی، در دو دوره زمانی قبل و بعد از بارورسازی ابرها (سال ۲۰۱۰) مقایسه شده است. نتایج حاکی از افزایش مشخصی در شدت بارندگی بر اثر باروری ابرهاست. پیشنهاد شده است به موضوع وقوع سیل شهری ناشی از بارش‌های حاصل از بارورسازی ابرها، در مطالعات توسعه شهری شارجه توجه شود [۲]. در مطالعه‌ای که در فلات مرکزی ایران انجام شده است، دو رویکرد آماری برای مقایسه بارش بین مناطق هدف بارورسازی و خارج از آن، استفاده گردید. نتایج هر دو روش نشان داد بارورسازی ابرها اثر معنی‌داری بر بارندگی مناطق هدف داشته است به طوری که توانسته حجم بارش ماه فوریه سال ۲۰۱۵ (زمان بارورسازی) در این مناطق را ۱۵ تا ۸۰ درصد افزایش دهد [۲۵]. ارزیابی نتایج بارورسازی ابرها در حوضه رودخانه شیانگ چین نشان داد بارندگی در حوضه حدود ۳۳/۷ میلیمتر (۱۷/۵ درصد) افزایش یافته است. همچنین در مقایسه با منطقه شاهد که در این مدت کاهش رواناب را تجربه کرده است، حجم رواناب

آب یکی از اساسی‌ترین نیازهای انسان برای ادامه حیات در کره زمین است [۳]. قرارگرفتن در کمربند خشک و نیمه خشک جهان و خشکسالی‌های پی در پی در کشور ایران [۱۵] سبب به وجود آمدن بحران کم‌آبی شده است که یکی از موانع عمده دستیابی به توسعه پایدار است. در کشور ایران برای مقابله با کمبود آب اقداماتی از قبیل احداث آب انبارها، حفر چاه‌ها، قنات‌ها، ایجاد کانال‌ها و پروژه‌های انتقال آب و احداث بندها و سد‌های کوچک و بزرگ انجام شده است. در حال حاضر راهکارهای جدیدتری چون اجرای پروژه بارورسازی ابرها برای مقابله با بحران کم‌آبی پیشنهاد می‌شود [۱۸]. اما، پاسخ به این سوال که باروری ابرها تا چه حدی می‌تواند به افزایش بارش و کاهش اثرات خشکسالی و تغییر اقلیم کمک کند؟، باید با اندازه‌گیری میزان اثر بارورسازی ابرها بر افزایش دبی و رواناب و تاثیر آن بر منابع آب مشخص شود تا راهکارهای مدیریتی مناسب اتخاذ شود [۱۵]. مطالعات انجام شده در سراسر دنیا اثر بارورسازی ابرها بر افزایش میزان رواناب را تایید کرده است از جمله: به مقدار ۱۱/۶ درصد در مقایسه با منطقه مشابه [۴]؛ حدود ۴۰ درصد از حجم متوسط رواناب در هر واقعه در حوزه‌های آبخیز کوچک [۶]؛ به میزان ۲۲۳۰۰ آکر فوت در حوزه‌های ایالت یوتا [۱۴] از ۴۹ تا ۸۹ درصد در مناطق مختلف هدف در رودخانه والکر منطقه نوادا [۷]. در سیرانوادا، ارزیابی‌ها نشان‌دهنده تاثیر مثبت اثر بارورسازی ابرها بر جریان در قسمت غربی این منطقه بود [۲۱]. مطالعات در حوزه آبخیز پلت شمالی حاکی از افزایش یک تا پنج درصدی بارش برف و یک و نیم تا سه درصدی افزایش رواناب تحت اثر بارورسازی ابرها بود [۱]. در مطالعه‌ای که در حوزه آبخیز زاینده‌رود به منظور بررسی اثر بارورسازی ابرها بر میزان رواناب و رسوب با استفاده از مدل SMA در نرم افزار HEC-HMS انجام شد، نشان دادند که افزایش بارش در ماه‌های بهمن و اسفند ۱۳۸۷ به ترتیب ۲۸/۹۶ و ۲۱/۹ درصد و در دی‌ماه

درجه و ۴۹ دقیقه تا ۳۲ درجه و ۳۴ دقیقه شمالی واقع شده است (شکل ۱). حوزه آبخیز بهشت‌آباد ۲۷ درصد از حوزه آبخیز کارون شمالی را در برمی‌گیرد. از کل مساحت حوزه آبخیز بهشت‌آباد، ۷۹ درصد در ارتفاع ۲۰۰۰ تا ۲۵۰۰ متر از سطح دریا قرار دارد. کمترین ارتفاع این حوزه ۱۶۶۰ متر در محل خروجی و بیشترین ارتفاع آن ۳۶۲۰ متر می‌باشد [۲۴].

۲.۲. روش شناسی

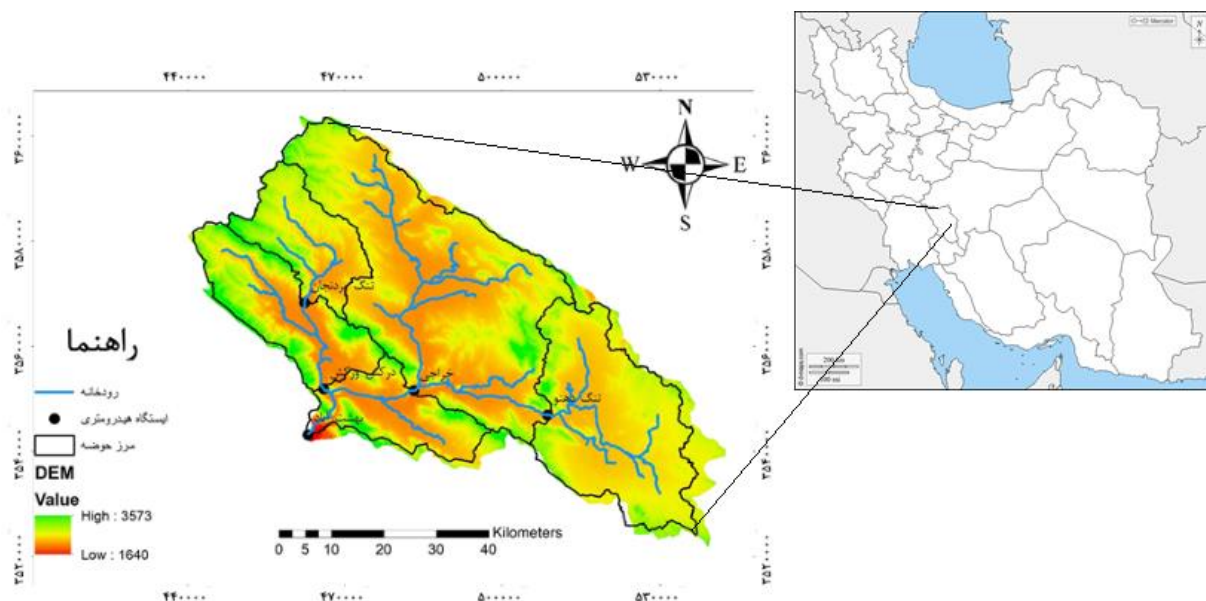
این پژوهش در دو بخش انجام شده است. در ابتدا مناطق مستعد بارورسازی ابرها و زمان مناسب اجرای عملیات بارورسازی برای کل استان چهارمحال و بختیاری مشخص گردید. سپس با استفاده از نتایج به دست آمده شبیه‌سازی رواناب در حوزه آبخیز بهشت‌آباد انجام شد.

سالانه ۳۴ میلیون مترمکعب (۳/۷ درصد) افزایش داشته است [۸]. در پژوهشی در آمریکا، معیاری را بر مبنای آب معادل برف برای تعلیق پروژه بارورسازی ابرها در غرب ایالات متحده تعیین کردند. بدین صورت که وقتی آب معادل برف ماهانه از آستانه تعیین شده عبور کرد عملیات بارورسازی متوقف شود [۱۲].

۲. مواد و روش‌ها

۱.۲. منطقه‌ی مورد مطالعه

حوزه آبخیز بهشت‌آباد با مساحت ۳۸۶۰ کیلومتر مربع در شمال و شمال شرقی حوزه آبخیز کارون شمالی در حد فاصل طول‌های جغرافیایی ۵۰ درجه و ۲۳ دقیقه تا ۵۱ درجه و ۲۵ دقیقه شرقی و عرض‌های جغرافیایی ۳۱



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی حوزه آبخیز بهشت‌آباد

طول آماری مناسب، تعیین مناطق مستعد بارورسازی ابرها در کل مساحت استان چهارمحال و بختیاری با

۱.۲.۲. تعیین مناطق مستعد بارورسازی ابرها

و زمان مناسب

با استفاده از داده‌های هواشناسی و روش فازی، مناطق مستعد و زمان مناسب برای بارورسازی ابرها تعیین شده است. به دلیل امکان بهره‌گیری از داده‌های بیشتر و با

استفاده از روش فازی^۱ در محیط GIS استفاده شد. بدین منظور از متغیرهای هواشناسی مثل بارش، متوسط رطوبت نسبی و دما در ۱۳ ایستگاه هواشناسی سینوپتیک، کلیماتولوژی و بارانسنجی، در یک دوره ۱۱ ساله (۲۰۰۸-۲۰۱۸) استفاده شد. در کنار نقشه ارتفاع از سطح دریا، نقشه هم‌دما، نقشه هم‌بارش، نقشه هم‌مقدار رطوبت نسبی، نقشه ابرناکی، نقشه هم‌مقدار حداکثر سرعت باد با استفاده از روش IDW^۲ در محیط GIS تهیه شد. نقشه فازی هر یک از پارامترها بوسیله دستور

Fuzzy Membership با استفاده از تابع Linear بدست آمد. بعد از امتیازدهی این نقشه‌ها طبق جدول (۱) با استفاده از دستور RASTER CALCULATOR نقشه‌ها در ضرایب ضرب شدند و سپس باهم جمع شدند و نقشه‌ی نهایی به صورت فازی به دست آمد. به منظور اولویت بندی مناطق مستعد باروری ابرها با استفاده از جدول (۲) این نقشه به چهار منطقه با اولویت مناسب تا ضعیف طبقه‌بندی گردید.

جدول ۱. وزن پارامترهای مورد استفاده در تعیین مناطق مستعد بارورسازی ابرها [۲۳]

ردیف	نام پارامتر	وزن (درصد)
۱	بارش	۳۳
۲	رطوبت نسبی	۳۳
۳	دما	۲۲
۴	ارتفاع	۱۲

جدول ۲. طبقات مطلوبیت مناطق مختلف جهت بارورسازی ابرها

نام طبقه	عنوان طبقه مطلوبیت	درصد مطلوبیت
۱	مناسب (اولویت ۱)	بیشتر از ۷۳
۲	به نسبت مناسب (اولویت ۲)	بین ۵۴ تا ۷۳
۳	متوسط (اولویت ۳)	بین ۳۲ تا ۵۴
۴	ضعیف (اولویت ۴)	کمتر از ۳۲

زمان‌های مناسب برای اجرای عملیات بارورسازی ابرها تعیین شد.

۲.۲.۲. مدل شبیه سازی بارش - رواناب

IHACRES

مدل IHACRES (تعیین هیدروگراف‌های واحد و مؤلفه‌های جریان از داده‌های جریان رودخانه، تبخیر و بارش) مدلی مفهومی و یکپارچه است که در مناطق آب و

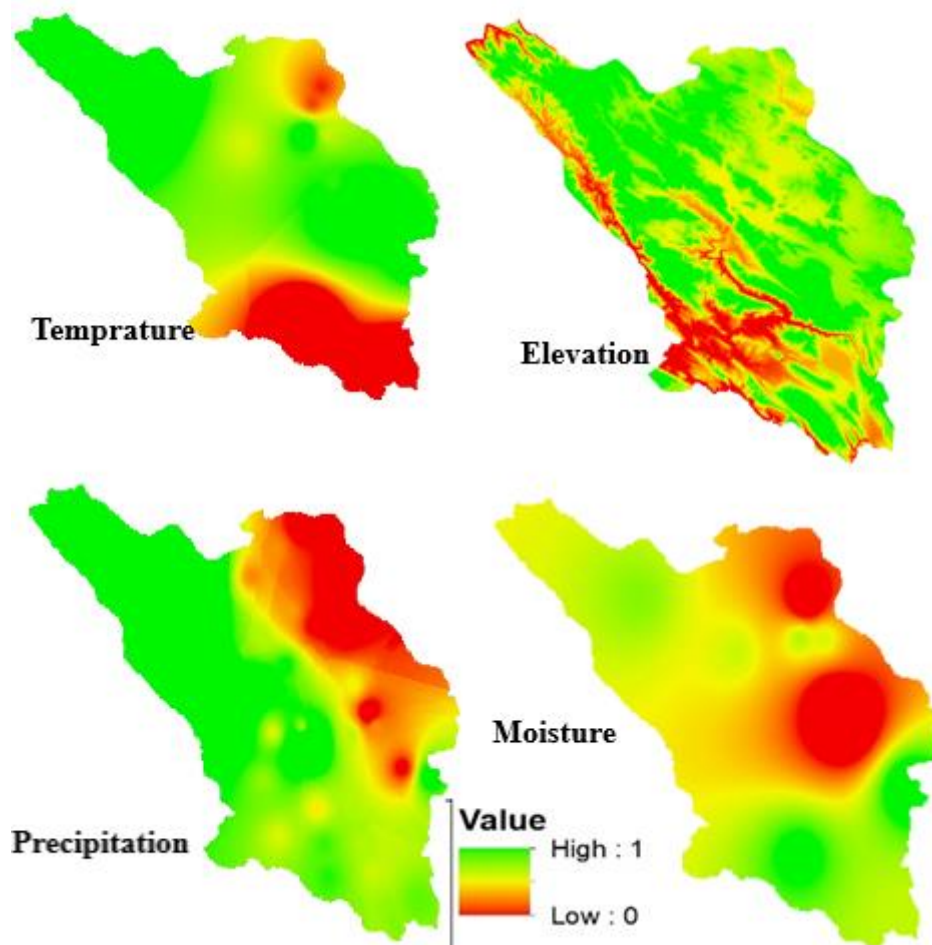
برای تعیین زمان‌های مستعد بارورسازی ابرها از پارامترهای هواشناسی مجموع بارش ماهانه، متوسط رطوبت نسبی، ابرناکی، حداقل و حداکثر دما، سرعت باد، دمای هوا در تراز ۵۰۰ تا ۷۰۰ میلی بار، سرعت و جهت باد در تراز ۵۰۰ تا ۷۰۰ میلی بار استفاده شد. نقشه دمای هوا و سرعت باد در تراز ۵۰۰ تا ۷۰۰ میلی بار سالیته هواشناسی NOAA گرفته شد. با مقایسه ماه‌های مختلف،

1 Fuzzy

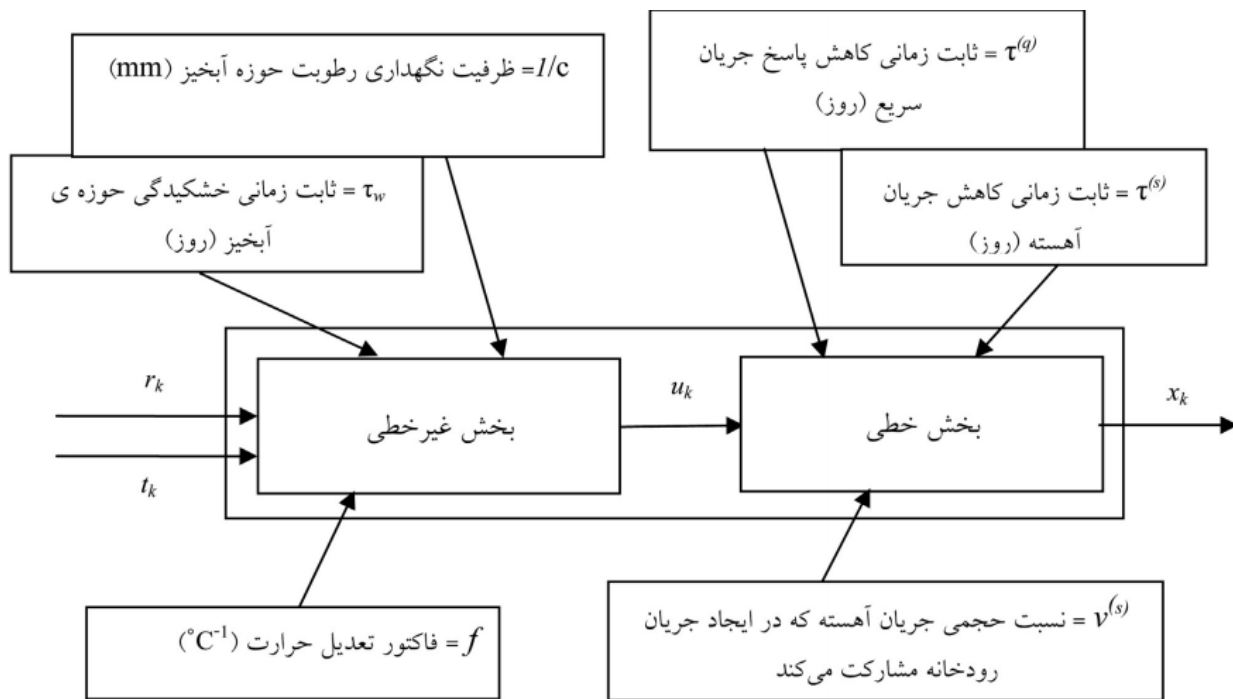
2 Inverse Distance Weight

روز (t_s) است که مقدار بهینه این پارامترها در مرحله واسنجی مدل بدست می‌آید (شکل ۳). نسخه نرم‌افزار مورد استفاده در این تحقیق 2.0.1 می‌باشد که از طریق سایت www.toolkit.net.au/ihacres قابل دسترس است. برای اجرای این تحقیق ۱۸ سال (۱۹۹۱/۰۱/۰۱ تا ۲۰۱۶/۱۲/۳۱) آمار هیدرومتری ایستگاه بهشت‌آباد در خروجی حوزه آبخیز بهشت‌آباد مورد استفاده قرار گرفت. از تاریخ ۱۹۹۹/۰۱/۰۱ تا تاریخ ۲۰۱۱/۱۲/۳۱ برای مرحله واسنجی و از تاریخ ۲۰۱۲/۰۱/۰۱ تا تاریخ ۲۰۱۶/۱۲/۳۱ برای مرحله اعتبارسنجی استفاده شد. برای ارزیابی دقت مدل از معیارهای ضریب تعیین (R^2)، ضریب نش - ساتکلیف (NSE)، RMSE و BIAS استفاده شد.

هوایی متفاوت، از جمله مناطق خشک و نیمه خشک کاربرد دارد [۹]. این مدل براساس دو روش یکی غیرخطی کاهش و دیگری خطی هیدروگراف استوار می‌باشد به این منظور در ابتدا بارندگی (r_k) و دما (t_k) در هر گام زمانی k توسط مدول غیر خطی، به بارندگی مؤثر (u_k) تبدیل شده و سپس به وسیله روش خطی هیدروگراف واحد، به رواناب سطحی در همان گام زمانی تبدیل می‌شود. هدف اصلی مدل IHACRES تعیین رفتار هیدرولوژیکی حوضه با استفاده از تعداد کمی از پارامترها می‌باشد. برای بدست آوردن جریان مؤثر، علاوه بر بارش r_k و دما t_k نیاز به پارامترهای دیگری می‌باشد که شامل ظرفیت نگهداری رطوبت حوزه ($1/C$)، فاکتور تعدیل حرارت (f)، ثابت خشکیدگی حوزه برحسب روز (t_w)، نسبت حجمی جریان آهسته (v_s) و ثابت زمانی کاهش جریان آهسته برحسب



شکل ۲. نقشه فازی شده چهار عامل مؤثر در تعیین مناطق مستعد بارورسازی ابرها استان چهارمحال و بختیاری



شکل ۳. ساختار مدل IHACRES [۱۳]

۳.۱. تعیین مناطق مستعد و زمان مناسب

بارورسازی

بر اساس نقشه نهایی، مناطق مناسب برای بارورسازی ابرها ۳۱/۰۹ درصد مساحت استان چهارمحال و بختیاری را در برمی‌گیرد، مناطق به نسبت مناسب ۳۶/۶۶ درصد، مناطق با اولویت متوسط ۲۶/۳۹ درصد، و مناطق ضعیف برای بارورسازی ابرها حدود ۵/۸۴ درصد استان را در بر می‌گیرد.

بر اساس نقشه مناطق مستعد حوزه آبخیز بهشت آباد، ۲۵/۴۳ درصد مناطق در اولویت اول، ۲۹/۷۲ درصد در اولویت دوم، ۳۹/۲۶ درصد در اولویت سوم، ۵/۵۶ در اولویت چهارم برای بارورسازی ابرها قرار می‌گیرد (شکل ۴).

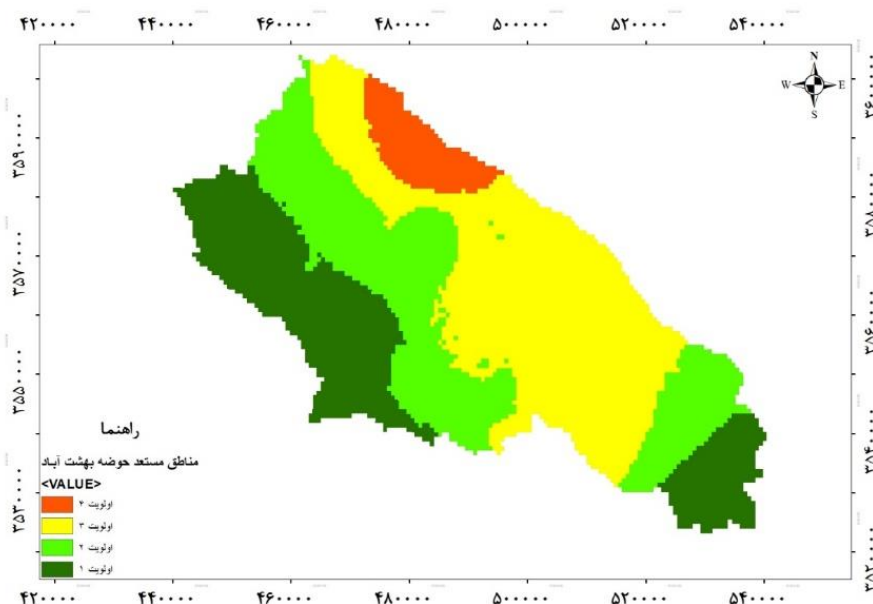
بعد از بررسی ماه‌های مناسب بارورسازی ابرها در استان چهارمحال و بختیاری با متغیرهایی همچون دما، بارش، متوسط رطوبت نسبی، ابرناکی، سرعت باد در تراز ۵۰۰ تا ۷۰۰ میلی بار و دمای هوا در تراز ۵۰۰ تا ۷۰۰

به منظور تعیین اثر بارورسازی ابرها در حوزه آبخیز بهشت‌آباد بر جریان خروجی، پس از ساخت مدل شبیه‌سازی رواناب ماهانه، دو سناریوی افزایش بارش تعریف شد و دبی ماهانه یک سال فرضی شبیه‌سازی شد. سناریوی اول افزایش ۱۰ درصدی بارش در ماه فوریه که مستعدترین ماه بارورسازی است، نسبت به یک سال نرمال است. سناریوی دوم افزایش ۱۰ درصد بارش شش ماه مستعد بارورسازی ابرها اجرا شد و اثر این سناریو بر جریان خروجی رودخانه مورد بررسی قرار گرفت. همچنین به منظور مقایسه اثر بارورسازی در دوره‌های ترسالی و خشکسالی، سناریوی افزایش بارش در شش ماه مستعد برای دو سال خشک و مرطوب مورد بررسی قرار گرفت. تعیین دوره‌های ترسالی و خشکسالی در دوره زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۸ با استفاده از دو شاخص SIAP و PNI انجام شد و مشخص شد سال ۲۰۰۸ خشکسالی شدید و سال ۲۰۰۶ ترسالی رخ داده است.

۳. نتایج

نوامبر و آوریل بودند.

میلی بار، ماه‌های مناسب بارورسازی ابرها مشخص شد که به ترتیب شامل ماه‌های فوریه، ژانویه، دسامبر، مارس،



شکل ۴. نقشه مناطق مستعد بارورسازی ابرها حوزه آبخیز بهشت‌آباد

نتایج شبیه‌سازی قابل قبول است. در شکل (۵) پراکنش داده‌های مشاهداتی در برابر شبیه‌سازی برای دو مرحله اعتبارسنجی و واسنجی و در شکل (۶) هیدروگراف مشاهداتی و شبیه‌سازی ارائه شده که بیانگر این است که مدل دبی شبیه‌سازی را کمتر از دبی مشاهداتی برآورد کرده است.

۳.۲. ارزیابی و اجرای مدل IHACRES

مدل IHACRES برای شبیه‌سازی دبی خروجی از حوزه آبخیز بهشت‌آباد در مقیاس زمانی ماهانه مورد استفاده قرار گرفت. نتایج ارزیابی مدل در گام زمانی ماهانه در مرحله واسنجی و اعتبارسنجی در جدول (۳) ارائه شده است. با توجه به مقادیر آماره‌ها می‌توان گفت

جدول ۳. معیارهای ارزیابی نتایج شبیه‌سازی جریان توسط مدل IHACRES برای کل دوره با گام زمانی ماهانه در حوزه آبخیز بهشت‌آباد

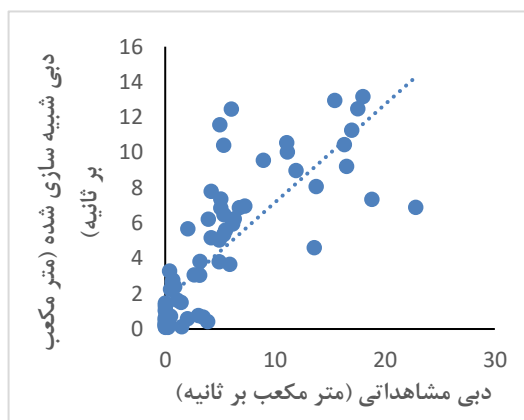
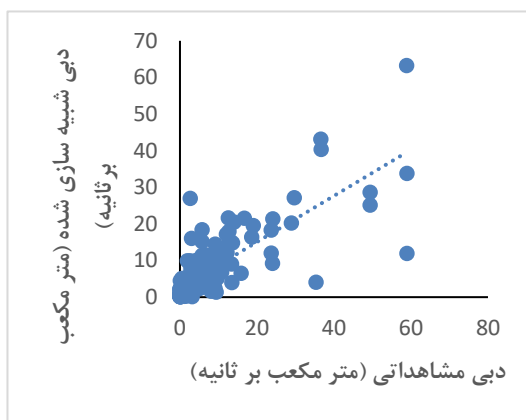
مرحله	NSE	R ²	RMSE	BIAS
واسنجی	۰/۶۲۲	۰/۶۲۴	۷/۲۶۱	-۰/۰۴۵
اعتبارسنجی	۰/۶۲۴	۰/۶۴۳	۳/۵۴۳	-۰/۱۰۱

BIAS به ترتیب نشان دهنده‌ی بیشتر و کمتر بودن جریان شبیه‌سازی شده از جریان مشاهداتی است. با توجه به مقادیر به دست آمده BIAS در دوره واسنجی و

با توجه به جدول (۳) مقادیر NSE و ضریب تعیین بالاتر از ۰/۶ هستند که نشان از دقت مناسب مدل در برآورد مقادیر ماهانه دبی دارد. مقادیر مثبت و منفی

جریان مشاهداتی است.

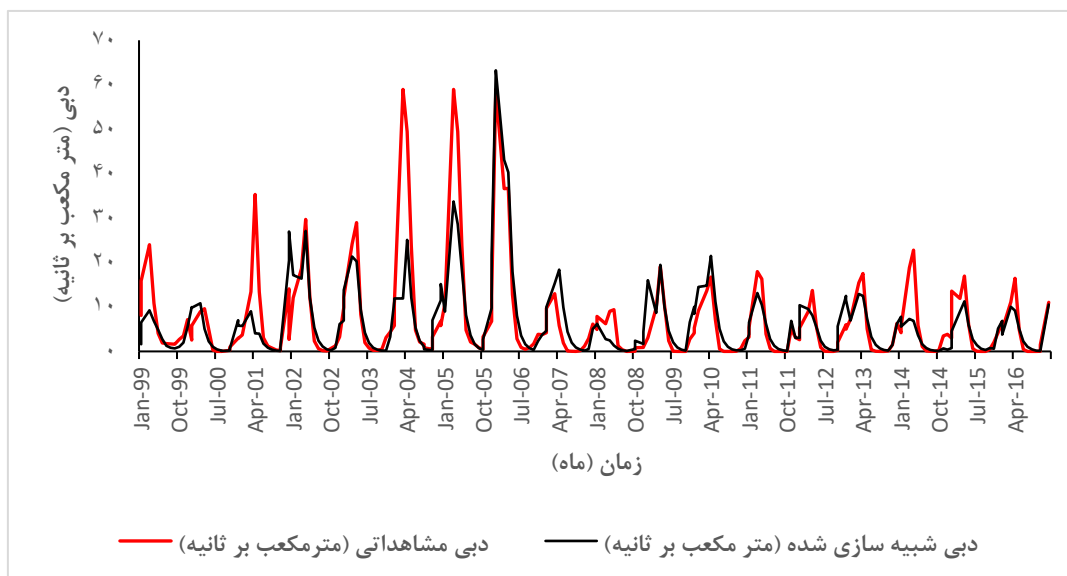
اعتبارسنجی، مقدار جریان شبیه‌سازی کمتر از مقدار



واسنجی

اعتبارسنجی

شکل ۵. پراکنش دبی متوسط ماهانه مشاهداتی و شبیه‌سازی شده مدل IHACRES در حوزه آبخیز بهشت‌آباد



شکل ۶. مقایسه دبی متوسط ماهانه مشاهداتی و شبیه‌سازی شده مدل IHACRES در حوزه آبخیز بهشت‌آباد

میانگین دبی ماهانه در دوره ۱۸ ساله مورد مطالعه، یک سال متوسط ساخته شد. در یک مرحله، سناریوی افزایش ۱۰ درصدی بارش ناشی از بارورسازی ابرها در شش ماه ذکر شده اعمال شد. نتایج نشان داد افزایش ۱۰ درصدی بارش در شش ماهه سرد سال، موجب افزایش ۱۳/۶۸ درصدی آورد سالانه رودخانه خواهد شد و مقدار آورد سالانه از ۲۳۷۱۶۰۷۶۱۱ به ۲۶۹۶۱۴۸۱۱۹ مترمکعب در

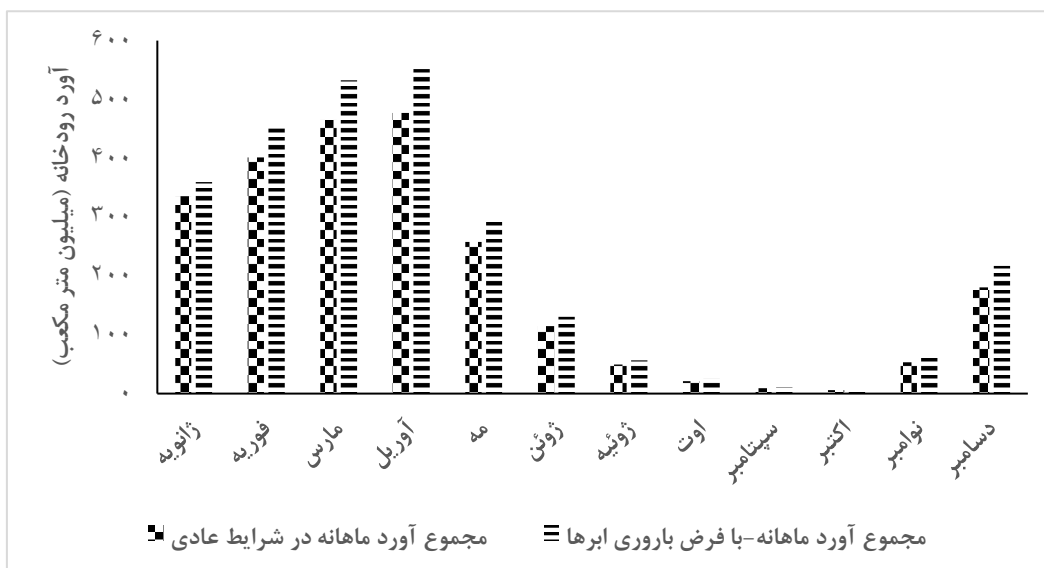
۳.۳. اجرای سناریوی افزایش ۱۰ درصدی

بارش بوسیله بارورسازی ابرها با استفاده از مدل IHACRES

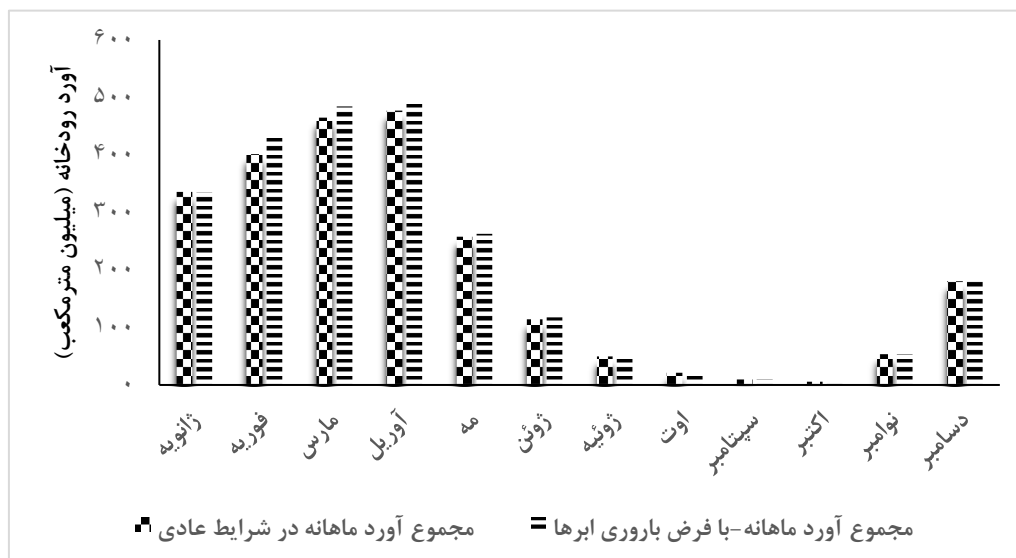
پس از تایید عملکرد مناسب مدل IHACRES برای شبیه‌سازی رواناب ماهانه حوزه آبخیز بهشت‌آباد، از مدل برای اعمال سناریوی افزایش ۱۰ درصدی بارش، ناشی از بارورسازی ابرها استفاده شد. برای انجام این کار از

میزان ۷۵۰۰۳۹۶۰ متر مکعب به آورد سالانه رودخانه افزوده خواهد شد و مقدار آورد سالانه حوزه در سال فرضی از ۲۳۷۱۶۰۷۶۱۱ متر مکعب به ۲۴۴۶۶۱۱۵۷۲ مترمکعب در سال خواهد رسید که نشان‌دهنده افزایش ۳/۱۶ درصدی آورد رودخانه به خاطر افزایش بارش است (شکل ۸).

سال خواهد رسید و مقدار ۳۲۴۵۴۰۵۰۸ مترمکعب به آورد سالانه رودخانه افزوده خواهد شد (شکل ۷). یکی از ماه‌های مستعد برای بارورسازی ابرها ماه فوریه است. سناریوی افزایش ۱۰ درصدی بارش بوسیله‌ی بارورسازی ابرها در این ماه نیز اعمال شد. نتایج نشان داد، با اعمال سناریو افزایش ۱۰ درصدی بارش در این ماه به



شکل ۷. مقایسه آورد رودخانه شبیه سازی شده با فرض افزایش ۱۰ درصدی بارش در شش ماه مستعد بارورسازی ابرها با آورد رودخانه در سال نرمال در حوزه آبخیز بهشت آباد



شکل ۸. مقایسه آورد رودخانه شبیه سازی شده با فرض افزایش ۱۰ درصد بارش ماه فوریه با آورد رودخانه در یک سال نرمال در حوزه آبخیز بهشت آباد

استفاده شد. از یک دوره ۱۲ ساله برای واسنجی و یک دوره ۶ ساله برای اعتبارسنجی استفاده شد. پس از بررسی و مقایسه مقادیر شبیه‌سازی شده با مقادیر دبی مشاهداتی، ضرایب R^2 ، $BIAS$ ، و $RMES$ همگی نشان دادند که مدل در گام زمانی ماهانه شبیه‌سازی مناسبی انجام می‌دهد و نتایج همسو با تحقیقات [۵، ۱۰، ۲۲] بود.

با مقایسه هیدروگراف‌های شبیه‌سازی شده و مشاهداتی و نیز با توجه به ضریب $BIAS$ می‌توان نتیجه گرفت که مدل در گام زمانی ماهانه توانایی شبیه‌سازی مقادیر دبی‌های زیاد را ندارد ولی در شبیه‌سازی دبی متوسط و کم شبیه‌سازی خوبی انجام شده است. دلیل عدم شبیه‌سازی مدل در دبی‌های زیاد می‌تواند این باشد که مدل $IHACRES$ از نوع مدل‌های یکپارچه است و تمام عوامل موثر در دبی مانند خصوصیات رودخانه اصلی، ضریب زبری، کاربری اراضی منطقه، خصوصیات خاک و زمین‌شناسی و... را در نظر نمی‌گیرد. به همین دلیل نمی‌توان از مدل $IHACRES$ برای شبیه‌سازی دبی‌های زیاد و سیلاب‌های شدید استفاده کرد. به طور کلی می‌توان گفت نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که در دوره واسنجی، شبیه‌سازی به صورت خوبی انجام شده و اعتبارسنجی مدل نیز نتایج قابل قبولی را ارائه کرد. نتایج بدست آمده با تحقیقات [۹، ۱۰، ۱۷] همسو می‌باشد. لذا با توجه به نیار مدل $IHACRES$ به داده‌های نسبتاً کم، این مدل برای انجام شبیه‌سازی رواناب در سال فرضی مورد نظر ما، مناسب شناخته شد. با داشتن آمار هیدرومتری ایستگاه خروجی حوزه آبخیز بهشت‌آباد در دوره ۱۸ ساله که می‌تواند در برگیرنده دوره‌های خشکسالی و ترسالی باشد، یک سال فرضی متوسط ساخته شد. از این داده‌های فرضی برای تعیین مقدار اثر افزایش بارندگی ناشی از بارورسازی ابرها بر مقادیر دبی خروجی حوزه آبخیز بهشت‌آباد استفاده شد.

افزایش ۱۰ درصدی بارندگی در سناریوی اول، یعنی بارورسازی ابرها در ماه فوریه سال نرمال باعث افزایش

سناریو افزایش ۱۰ درصدی بارش برای دو سال ترسالی ۲۰۰۶ و خشکسالی ۲۰۰۸ در شش ماه مستعد بارورسازی ابرها اجرا شد که به ترتیب باعث افزایش $7/48$ و $8/83$ درصدی آورد رودخانه در این سال‌ها گردید. مقدار کل آورد سالانه در سال ۲۰۰۶ از 6515584180 به 703579087 مترمکعب در سال رسید؛ همچنین مقدار آورد سالانه سال ۲۰۰۸ از 774695337 به 843120478 مترمکعب در سال رسید.

۴. بحث و نتیجه‌گیری

مطالعه تعیین مناطق مستعد بارورسازی ابرها در استان چهارمحال و بختیاری نشان می‌دهد بیشتر مناطق استان برای عملیات بارورسازی ابرها مناسب هستند. مناطق با اولویت بیشتر، مناطقی هستند که از نظر بارش و رطوبت شرایط بهتری دارند و بیشتر در غرب و جنوب غرب استان قرار گرفته‌اند و سریع‌تر تحت تاثیر سامانه‌های بارشی که وارد استان می‌شود، قرار می‌گیرند. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد اکثر مناطق با ارتفاع بالا مناطق مناسبی برای باروری ابرها می‌باشد و نتایج به دست آمده هم‌سو با تحقیقات [۱۸] می‌باشد. نتایج به دست آمده کاملاً بر نتایج تحقیق انجام شده در فلات مرکزی ایران که استان چهارمحال و بختیاری را مساعد باروری ابرها می‌داند، منطبق است. در پژوهش ذکر شده اذعان شده است که بارورسازی ابرها در سال ۹۳ سبب افزایش معنی‌داری در بارش این منطقه از کشور شده است [۲۵]. نتایج تعیین مناطق مستعد بارورسازی ابرها در حوزه آبخیز بهشت‌آباد نشان می‌دهد که $25/43$ درصد این حوزه برای بارورسازی ابرها دارای اولویت مناسب و $29/72$ درصد نیز به نسبت مناسب است. این مناطق بیشتر منطبق بر مناطق مرتفع حوزه قرار دارند اما الزاماً عامل ارتفاع تعیین‌کننده اولویت مناسب آن نیست.

در این پژوهش از مدل هیدرولوژیکی $IHACRES$ در گام زمانی ماهانه برای مدل‌سازی تبدیل بارش به رواناب

می‌دهد که افزایش بارش ناشی از بارورسازی ابرها موجب افزایش آورد سالیانه رودخانه شد که نتایج بدست آمده همسو با تحقیقات [۱، ۱۱، ۷، ۱۶، ۱۹] است. مطالعات مشابه در حوزه آبخیز زاینده‌رود، افزایش رواناب به میزان ۲۶ میلیون مترمکعب طی سه ماه بارورسازی ابرها در این حوزه آبخیز را تصریح کرد [۱۵]. در حوزه آبخیز تویسرکان هم مطالعه نشان داد افزایش ۱۰ درصدی بارش، حجم رواناب را ۲ میلیون مترمکعب افزایش خواهد داد [۱۹]. نتایج شبیه‌سازی اثر باروری ابرها بر رواناب در دو سال ۲۰۰۶ و ۲۰۰۸ نشان دهنده تاثیر گذاری بهتر بارورسازی ابرها در خشکسالی نسبت به ترسالی بود. درصد افزایش آورد سالیانه به ترتیب در سال ۲۰۰۶ و ۲۰۰۸ به میزان ۸/۸۳ و ۷/۴۸ درصد به دست آمد. نتایج تحقیقات نشان می‌دهد که بارورسازی ابرها می‌تواند راهکاری برای مقابله با خشکسالی و ذخیره آب در ترسالی باشد، که همسو با تحقیقات [۲۰، ۱۹] بود.

۳/۱۶ درصدی حجم کل آورد سالیانه در ایستگاه خروجی حوزه شد. با توجه به نتایج بدست آمده از دبی عادی و دبی تحت اثر بارورسازی ابرها می‌توان نتیجه گرفت افزایش میزان بارش در ماه فوریه بر حجم آورد رودخانه در کل سال تاثیر مثبت می‌گذارد و این اثر مثبت در ماه‌های نزدیک به فوریه محسوس‌تر است. در تحقیق دیگری که در مناطق مرکزی ایران انجام شده است نتایج حاکی از آن است که کلیه مناطق هدف باروری ابرها، در ماه فوریه بیشترین پاسخ مثبت را به عملیات بارورسازی داده‌اند [۲۵]. سناریوی افزایش ۱۰ درصدی بارش در ۶ ماه منتخب برای بارورسازی ابرها یعنی فوریه، ژانویه، دسامبر، مارس، نوامبر و آوریل، باعث افزایش ۱۳/۶۸ درصدی آورد سالیانه رودخانه شد که نسبت به بارورسازی ابرها در ماه فوریه افزایش بیشتری از آورد رودخانه را در سال را نشان می‌دهد. البته باید توجه داشت که بارورسازی ابرها در شش ماه مستعد سال تاثیر خود را بر افزایش رواناب در سال آینده هم خواهد داشت. نتایج نشان

References

- [1] Acharya, A., Piechota, T. C., Stephen, H. and Tootle, G. (2011). Modeled Streamflow Response Under Cloud Seeding in the North Platte River Watershed. *Journal of Hydrology*, 409(1-2), 305-314.
- [2] Almheiri, K. B., Rustum, R., Wright, G., and Adeloje, A. J. (2021). Study of Impact of Cloud-Seeding on Intensity-Duration-Frequency (IDF) Curves of Sharjah City, the United Arab Emirates. *Water*, 13(23), 3363.
- [3] American Meteorological Society. (1993). Planned and Inadvertant Weather Modification Bull. *Amer. Meteor. Soc.*, 73, 331-337.
- [4] Arie, B. and Langerman, M. (1993). Assesment of Runoff Enhancement by Randomized Cloud Seeding in Case of Carry Over Flow. *Journal of Hydrology*, 142, 391-408.
- [5] Ashofteh, P. and Massah Bouani, A. R. (2010). Impact of Climate Change on Maximum Discharges: Case Study of Aidoghmoush Basin, East Azerbaijan. *JWSS*, 14 (53), 28-38.
- [6] Ben-Zvi, A. (1988). Enhancement of Runoff From a Small Watershed by Cloud Seeding. *Journal of Hydrology*, 101, 291-303.
- [7] Boyle, D. P., Lamorey, G. W. and Huggins, A. W. (2006). Application of a Hydrologic Model to Assess the Effects of Cloud Seeding in the Walker River Basin of Nevada. *The Journal of Weather Modification*, 38(1), 66-76.
- [8] Cheng, P., Chen, Q., Jiang, Y., LI, B, and Han LUO. (2021). Effect Evaluation of Artificial Rainfall Enhancement in the Shiyang River Basin of Hexi Corridor in the Latest 10 Years, *Plateau Meteorology*, 40(4): 866-874. doi: 10.7522/j.issn.1000-0534.2020.00074.

- [9] Croke, B. F.W. and Jakeman A.J. (2008). Use of the IHACRES Rainfall-Runoff Model in Arid and Semi Arid Regions. In: H.S. Wheater, S. Sorooshian and K.D. Sharma, (eds) Hydrological Modelling in Arid and Semi-arid Areas, Cambridge University Press, Cambridge, 41- 48.
- [10] Goodarzi, M. R., Zahabiyoun, B., Massah Bavani, A. R. and Kamal, A. R. (2012). Performance Comparison of Three Hydrological Models SWAT, IHACRES and SIMHYD for the Runoff Simulation of Gharesou Basin. *Journal of Water and Irrigation Management*, 2(1), 25-40.
- [11] Griffith, D. A. and Solak, M.E. (2018). Economic feasibility assessment of winter cloud seeding in the Boise river drainage, Idaho. *The Journal of Weather Modification*, 34(1), 39-46.
- [12] Khatri, K. B., Pokharel, B., and Strong, C. (2021). Development of hydrologically-based seeding suspension criteria in the Western United States, *Atmospheric Research*, 262: 105768.
- [13] Littlewood, L. G., Clarke, R. T., Collischonn, W. and Croke, B.F.W. (2007). Predicting Daily Streamflow Using Rainfall Forecasts, a Simple loss Module and Unit Hydrographs: Two Brazilian Catchment. *Environmental Modelling and Software*, (22), 1229-1239.
- [14] Mark Solak, E. and David, P. (1992). Griffith North American Weather Consultants Inc. Sandy, Utah, U.S.A.
- [15] Moradi, N., Talebi, A. and Poormohamadi, S. (2014). Investigating the Effect of Cloud Fertilization on Drought Reduction, (case study: Eskandari watershed) the second national conference on water crisis.
- [16] Moradisadeghabadi, N. (2014). Investigating the Effect of Cloud Fertilization on runoff and sediment in watersheds, (case study: zayanderoud basin). Master of Science Degree in Watershed Management Science and Engineering, Yazd University, Iran.
- [17] Niromandfard, F., Zakerinia, M. and Zakerinia, B. (2018). Investigating the Effect of Climate Change on River Flow Using IHACRES Rainfall-Runoff Model. *Journal of Irrigation Sciences and Engineering*, 41(3), 103-117.
- [18] Omidvar, K. (2004). Investigating and Analysis of Synoptic and Thermodynamic Conditions of Precipitation Event, Shirkouh Region. *Geomorphological Researches*, Tehran University.
- [19] Poormohamadi, S., Dastorani, M. T., Massah Bavani, A. R., Gudarzi, M., Jafari, H. and Rahimian, M. H. (2017). Effects of climate change on river runoff and provide solutions to adapt to its effects (Case Study: Tuyserkan Basin, Hamedan Province). *Jwmseir*, 11 (37), 1-12.
- [20] Poormohamadi, S. and Golkar, F. (2016). The Effect of Cloud Seeding Technology on Surface and Groundwater Resources for Sustainable Basin Management (West Azarbaijan Province), 6th National Iranian Water Resources Management Conference, Kurdistan University of Kurdistan.
- [21] Silverman, B. A. (2010). An Evaluation of Eleven Operational Cloud Seeding Programs in the Watersheds of the Sierra Nevada Mountains, *Atmospheric Research*, 97(4), 526-539.
- [22] Verdian, F., Shahedi, K., Habibnejad Roshan, M. and Zarei, M. (2015). Evaluation of Rainfall-Runoff IHACRES Model to Simulate Daily and Monthly Streamflow in Navroud Catchment, Guilan Province. *Iranian Water Research Journal*, 8(15), 229-233.
- [23] World Meteorological Organization (WMO). (1976). Weather Modification Programme PEP Report No.3, pp. 52.
- [24] Water Resources Research Center. (2007). Necessity of Revision of Water Transmission Plan in Behesht Abad Basin with Consideration of Origin Basin in the chaharmahal va bakhtiari Province.
- [25] Zahraie, B., Poursepahy Samian, H., Nasserli, M., and Taheri, S. M. (2021). Statistical Evaluation of Cloud Seeding Operations in Central Plateau of Iran in the 2015 Water Year. *Journal of the Earth and Space Physics*, 47(1), 187-203.