تعدیل وضع هوا، راه‌کاری جهت سازگاری با تغییرات اقلیمی (مطالعه موردی استان تهران)

سمانه پورمحمدی[۱*]، مهران فاطمی[۲]

۱) دکتری علوم و مهندسی آب‌خیزداری، شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران.

۲) عضو هیات علمی دانشگاه میبد، گروه جغرافیا و علوم انسانی.

*نویسنده مسئول: s.poormohammadi@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۱/۱۴ **تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۶/۳**

چکیده

یکی از راه‌های توسعه‌ی کشورها و حرکت آن‌ها به سوی تمدن و رفاه عمومی، استفاده‌ی بهینه و کارا از منابع طبیعی است. از جمله منابع بسیار مهم و حیاتی که در زندگی روزمره‌ی انسان و کشورها و تداوم تولیدات نقش مهمی دارد، منابع آب است. رشد روز افزون جمعیت، پیشرفت سریع فن‌آوری در زمینه‌های صنعتی، کشاورزی، اقتصادی و در پی آن افزایش سطح بهداشت و رفاه عمومی، باعث افزایش نیاز به آب شده است. از سوی دیگر گرمایش جهانی و اثرات نا به‌هنجار تغییرات اقلیمی، نظم طبیعی اقلیم کشورها به ویژه کشور ما را تحت تاثیر قرار داده است. جهت سازگاری با اثرات سوء تغییر اقلیم راه‌کارهای متعددی وجود دارد که تعدیل وضع هوا یکی از راه‌های علمی، اثبات شده و پیشنهاد شده از سوی سازمان بین‌المللی هواشناسی می‌باشد. هدف از این تحقیق بررسی اثر اجرای پروژه‌ی باروری ابرها در سال آبی ۹۴-۹۳ در استان تهران به منظور اثرگذاری بر منابع آب سطحی و زیرزمینی جهت سازگاری با اثرات تغییر اقلیم می‌باشد. به این منظور چندین گام اساسی برای رسیدن به هدف مورد نظر برداشته شده است. در بخش نخست، به آماده‌سازی داده‌ها و اطلاعات موردنیاز برای ارزیابی اثرات بارورسازی ابر در منطقه پرداخته شد. در بخش دوم، با توجه به داده‌های موجود ارزیابی عملیات باروری ابرها به روش رگرسیونی منطقه‌ای انجام شد. در بخش سوم مدل‌سازی بیلان هیدروکلیماتولوژی به دو روش جزیم و رائو به منظور بررسی اثربخشی اثرات باروری ابرها بر منابع آب سطحی و زیرزمینی صورت گرفت. در بخش انتهایی نیز رواناب و تغذیه منابع آب زیرزمینی ناشی از باروری ابرها برآورد شد. نتایج این تحقیق گسترده نشان داد که باروری ابرها توانسته است به ترتیب ۵۱/۲ میلیون مترمکعب به روش استدلالی و ۶۳/۹ میلیون مترمکعب رواناب به روش SCS به منابع آب سطحی و ۴۰/۵ میلیون مترمکعب به منابع آب زیرزمینی در سال آبی ۹۴-۹۳ اضافه نماید.

واژه‌های کلیدی: بارورسازی ابرها، تعدیل وضع هوا، سازگاری با تغییر اقلیم، منابع آب.

مقدمه

به علت تغییر اقلیم و گرمایش جهانی در سال‌های اخیر، به‌ویژه تغییر در رژیم بارش، مقدار بارش و درنتیجه میزان آب قابل‌دسترس به‌ویژه در ایران کاهش یافته است. موضوعاتی از قبیل افزایش رشد جمعیت، گسترش اقتصادی و مسائل زیست‌محیطی موجب بحران آب، شدت خشک‌سالی، کاهش آب زیرزمینی و رواناب سطحی در رودخانه‌ها شده است. در این میان تکنیک باروری ابرها یکی از اقتصادی‌ترین راه‌کارهای افزایش استحصال آب در جهان می‌باشد. استفاده از تکنیک باروری ابرها تنها در سال‌های خشک‌سالی نمی‌تواند موجب کاهش خسک‌سالی شود، بلکه بایستی در سال‌های‌تر و خشک به‌صورت متمادی این پروژه اجرا شود؛ هرچند که فرصت‌های باروری در سال‌های خشک محدود می‌باشد. درواقع تکنولوژی باروری ابرها بایستی به عنوان ابزار مدیریتی در جعبه ابزار مدیریت منابع آب، یکی از راه حل‌ها معرفی شود. باروری ابرها یک شکلی از تعدیل وضع هوا می‌باشد که ایمن، علمی، آزموده شده و اثبات شده جهت افزایش بارش و برف و همچنین کاهش خطرات تگرگ و مه می‌باشد. در زمینه اثرات بارورسازی ابرها و تغییرات اقلیم، تحقیقات زیادی صورت گرفته است بحری و همکاران (۱۳۹۴) پتانسیل اثر تغییر اقلیم بر خشک‌سالی‌های آینده حوزه اسکندری را با کمک مدل HadCM3 و تحت سناریوی A2 و با استفاده از شاخص SPI مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان داد منابع آب سطحی و زیرزمینی از فوریه ۲۰۱۹ تا مارس ۲۰۲۰ و بخش کشاورزی در دسامبر ۲۰۱۸ تا اگوست ۲۰۱۹ با خشک‌سالی مواجه می‌شود. Yun و همکاران (۲۰۱۸) تجزیه و تحلیل اثر تغییرات در دوازده شاخص دما حدی و یازده شاخص بارش شدید در ۶۴ ایستگاه هواشناسی در لس‌فلات را نشان دادند. نتایج نشان داد که افزایش معنی‌داری در درجه حرارت گرم‌ترین و سردترین شب و طولانی شدن روزها و شب‌های خیلی گرم، وجود دارد. کاهش تعداد روزهای یخبندان آماری معنی‌دار بود، اما روند کاهش محدوده درجه حرارت روزلنه معنی‌دار نبود. روند گرم شدن زمین در شاخص‌های دمای کمینه بیش‌تر از روند افزایشی مربوط به دمای بیشینه بودند. تغییرات در میزان بارش‌های سنگین نسبتا کوچک بودند و تنها روند منطقه‌ای در روزهای خشک متوالی معنی‌دار بود. درمجموع، تعداد روزهای بارانی در شمال لس‌فلات افزایش یافته است، اما مقدار بارش شدید در کل منطقه کاهش‌یافته بود. در ایالت تگزاس برای اولین بار در سال ۲۰۰۲ از روش نسبت مضاعف برای ارزیابی پروژه‌های باروری ابرها استفاده گردید. نتایج نشان داد که بارورسازی ابر توانسته است تا ۱۳درصد، حجم آب استحصالی را افزایش دهد (Woodley and Rosenfeld, 2004). پورمحمدی (۱۳۹۰) به بررسی اثر بارورسازی ابرها بر بارش حوضه آب‌ریز گاوخونی پرداخت. نتایج نشان داد بارورسازی ابر در حوضه آب‌ریز گاوخونی منجر به افزایش ۲۱٪ بارش در سال آبی ۹۰-۸۹ شده است. پورمحمدی و همکاران (۱۳۹۳) با بررسی ارزیابی اثر بارورسازی ابر در ایران به چالش‌های موجود در اثر بارورسازی ابر در ایران پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد کمبود آمار و نداشتن منطقه هدف و کنترل ثابت یکی از مشکلات اساسی ارزیابی پروژه‌های بارورسازی ابرها در ایران است. پورمحمدی و گلکار (۱۳۹۲) به ارزیابی اقتصادی پروژه‌های بارورسازی ابر در حوضه آبریز رفسنجان پرداختند. نتایج نشان داد استحصال آب به کمک فن

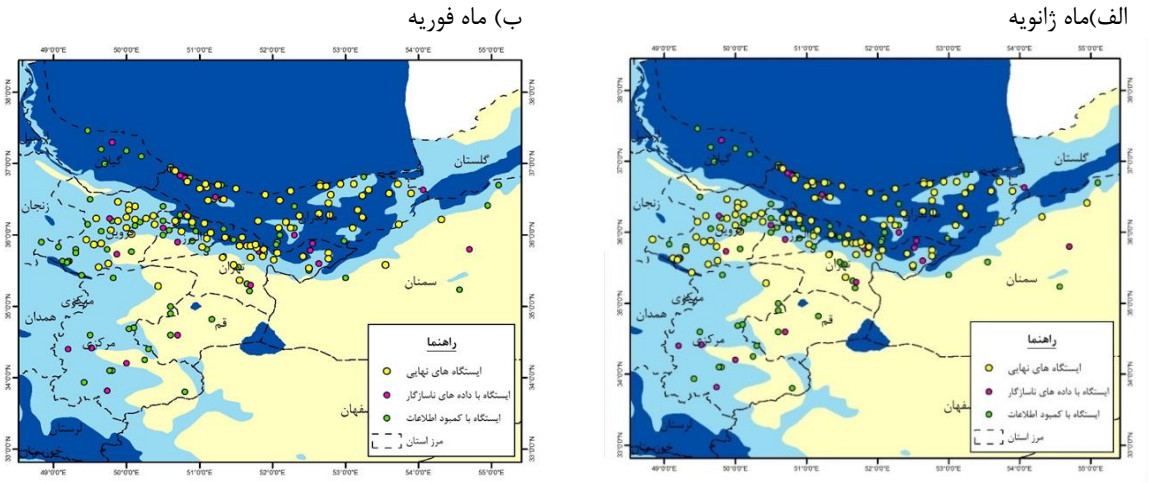
بارورسازی ابرها می‌تواند جهت کشت پسته در این منطقه مقرون به صرفه باشد. پورمحمدی و جوادیان‌زاده (۱۳۹۳) گزارش کردند که در اثر اجرای پروژه بارورسازی ابر در حوضه آبریز طشک-بختگان، ۱۱٪ به منابع آب این حوضه در سال آبی ۸۹-۸۸ افزوده شده است. پورمحمدی و رحیمیان (۱۳۹۳) نیز به بررسی اثر بارورسازی ابر بر کشت گندم دیم استان خوزستان پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد که باروری ابرها می‌تواند باعث افزایش عملکرد محصول گندم دیم در استان شود. علومی مجومرد و همکاران (۱۳۹۵) اثر بارورسازی ابر بر پوشش طبیعی استان فارس را بررسی نمودند. نتایج نشان داد که بارورسازی ابر باعث افزایش ۸٪ پوشش طبیعی منطقه شده است. هدف از تحقیق حاضر بررسی اثرات بارورسازی ابرها بر منابع آب حوضه‌های آب‌ریز استان تهران جهت سازگاری و کاهش اثرات سوء تغییر اقلیم می‌باشد.

مواد و روش‌ها

در این تحقیق ۴ گام مختلف به منظور دستیابی به اثرات باروری ابرها بر منابع آب سطحی و زیرزمینی در حوضه‌های آب‌ریز استان تهران در سال آبی ۹۴-۹۳ طی شد. در مرحله اول به تعیین ایستگاه‌های اندازه‌گیری بارش و آماده‌سازی اطلاعات پرداخته شد. دوره آماری بلند مدت مورد استفاده در این تحقیق ۱۹۸۱-۲۰۱۲ انتخاب گردید و بر این اساس ایستگاه هواشناسی متعلق به سازمان هواشناسی و وزرات نیرو مورد بررسی قرار گرفت. مرتب‌سازی اطلاعات مربوط به موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌ها، شامل: طول و عرض جغرافیایی هر ایستگاه و ارتفاع هر ایستگاه از سطح دریا بود. ارتفاع ایستگاه‌ها در موارد مورد نیاز با استفاده از DEM استخراج و مورد استفاده قرار گرفت. همچنین در موارد معدودی موقعیت ایستگاه‌ها تصحیح شد. سپس ایستگاه‌های قرارگرفته در منطقه هدف تعین شدند. بعد از آن اطلاعات مربوط به دوره‌های تاریخی که در آن دوره‌ها، بارورسازی ابرها در منطقه موردنظر صورت گرفته، از جریان محاسبات کنار گذاشته شدند. دلیل این کار این بود که داده‌های مربوط به این دوره‌ها از رژیم طبیعی بارش پیروی نمی‌کنند و در نتیجه باعث خطا در مدل‌سازی می‌شوند. در همین راستا، در مطالعات مربوط به منطقه تهران، داده‌های تاریخی مربوط به ماه ژوئن در سال ۱۹۹۹، ماه‌های دسامبر و ژانویه در سال ۲۰۰۱، و ماه‌های می، ژوئن، ژانویه، فوریه، مارس، نوامبر، دسامبر در سال ۲۰۰۹ از جریان محاسبات کنار گذاشته شدند. بعد از آن ایستگاه‌هایی که خلاء آماری آن‌ها در هر کدام از ماه‌های مورد مطالعه (ماه‌های ژانویه و فوریه) بیش از ۱۰٪ کل داده‌های تاریخی است، از جریان محاسبات مربوط به آن ماه کنار گذاشته شدند. سپس به نرمال‌سازی داده‌ها پرداخته شد. برای بررسی نرمال بودن داده‌های استاندارد-نرمال به دست آمده، از آزمون نیکوئی برازش کولموگروف-اسمیرنوف[1] استفاده شد. براساس نتایج حاصله، فرض نرمال بودن برای تمام داده‌های استاندارد-نرمال شده تایید شد. در مرحله دوم پس از حذف ایستگاه‌های با داده‌های ناسازگار و ایستگاه-های با کمبود اطلاعات، ایستگاه‌های نهایی برای ادامه محاسبات و ارزیابی‌ها مشخص شده‌اند. موقعیت و تعداد ایستگاه‌های نهایی

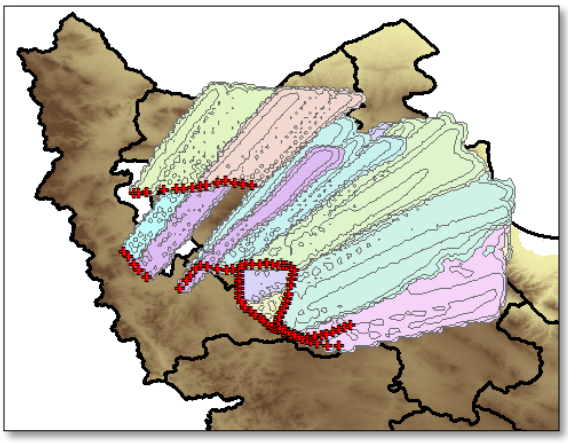
[1] Kolmogorov-Smirnov goodness-of-fit test

در منطقه تهران در (شکل ۱) نشان داده شده است. در این شکل منظور از "ایستگاه با کمبود اطلاعات" ایستگاه‌هایی است که به دلیل خلأ آماری در داده‌های تاریخی و یا دردسترس نبودن اطلاعات بارش سال ۲۰۱۵، کنار گذاشته شده‌اند. همان‌طور که ملاحظه می‌شود در ماه‌های ژانویه و فوریه به ترتیب تعداد ۹۳ و ۸۵ ایستگاه به عنوان ایستگاه‌های نهایی در نظر گرفته شده است.



شکل ۱: موقعیت ایستگاه‌های نهایی در منطقه مطالعاتی تهران، ماه ژانویه و فوریه

در مرحله سوم مناطق هدف یا مناطق تحت تأثیر بارورسازی با کمک مدل عددی WRF و مدل واپاشی ذرات جوی HYSPLIT تعین شدند. منطقه هدف در روش کنترل شناور که روش مورد استفاده در ارزیابی نتایج پروژه‌های باروری ابرها در ایران است، برای هر عملیات باروری متفاوت بوده و بنا به‌تعریف، منطقه‌ای است که به‌مدت دو ساعت پس از تزریق مواد در راستای جهت باد و با توجه به سرعت باد تحت‌تأثیر مواد باروری قرار می‌گیرد. اما در پروژه حاضر از یک مدل مسیریابی، پخش و واپاشی ذرات در جو به نام HYSPLIT استفاده گردید. مزیت مهم این مدل این است که نه تنها تلاطم ابر و سرعت باد در سه جهت X و Y و Z را درنظر می‌گیرد؛ بلکه نقش تمامی پارامترهای هواشناسی از جمله شرایط توربولانس، جریانات عمودی و افقی، کلیه جریانات لحظه‌ای واقع در جو را در پخش و گسترش مواد و یا به عبارتی شبیه‌سازی منطقه تحت تأثیر مواد، اعمال می‌نماید. علاوه بر آن این مدل می‌تواند غلظت مواد در فواصل مختلف از مرکز پخش و تزریق مواد را نیز محاسبه نموده و با تفکیک رنگ بر روی نقشه نشان می‌دهد. مزیت دیگر این مدل قابلیت تهیه خروجی کار در فرمت قابل کاربرد در نرم افزار GIS(فرمت shp.file) می‌باشد که به‌طور قابل توجهی حجم عملیات ترسیم منطقه هدف در این محیط را به روش‌های گذشته کاهش می‌دهد. (شکل ۲) نمونه‌ای از نحوه پخش مواد باروری بلافاصله پس از شلیک از هواپیما را در یکی از پروژه‌های اجرا شده (در منطقه شمال غرب ایران) نشان می‌دهد.

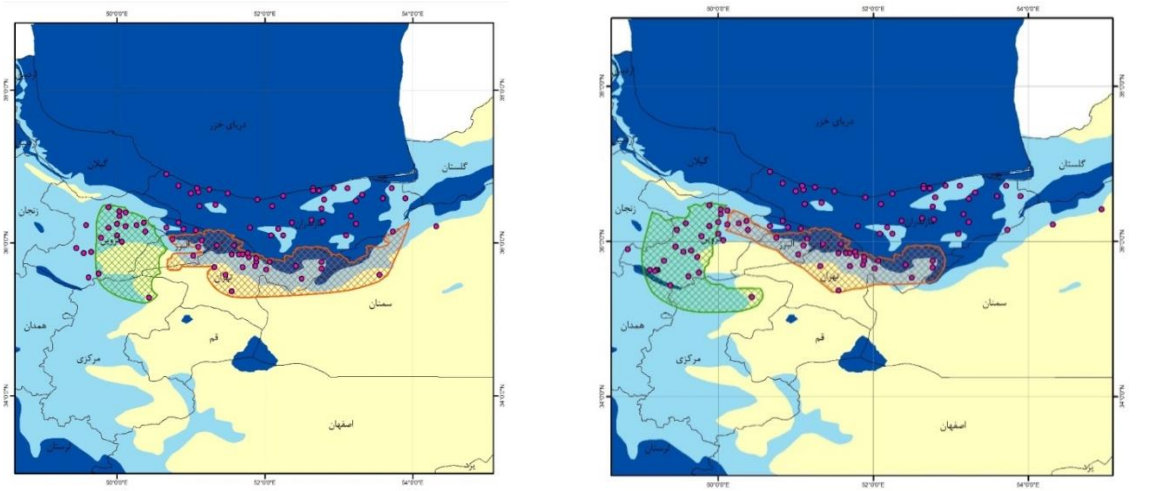


شکل ۲: منطقه تحت تأثیر مواد باروری در بازه زمانی دو ساعت پس از تزریق مواد در پرواز شماره ۱۹ مورخ ۲۰۱۵/۱/۳۰

تعیین مناطق هدف-کنترل

مقصود از منطقه کنترل، منطقه‌ای است که از نظر اقلیمی مشابه منطقه هدف است. اما در دوره بارورسازی مورد بررسی، تحت تاثیر عملیات بارورسازی قرار نگرفته است. ایستگاه یا ایستگاه‌های کنترل، باید به گونه‌ای انتخاب شوند که دقیق‌ترین نتایج از ارزیابی به دست آید. لذا باید همبستگی بالایی با ایستگاه هدف داشته باشند. همچنین لازم است که داده‌هایی با طول کافی در این ایستگاه‌ها در اختیار باشد تا هم از نظر تاریخی و هم در دوره عملیاتی مورد نظر، مقایسه معنی‌داری بین ایستگاه کنترل و هدف انجام شود. در تعیین منطقه کنترل، مناطق پایین‌دست بارورسازی درنظر گرفته نشده است. همچنین فاصله‌ای بین منطقه هدف و منطقه کنترل درنظر گرفته شده تا به این ترتیب اطمینان حاصل شود که منطقه کنترل تحت تأثیر بارورسازی نبوده است. فاصله بین منطقه کنترل و هدف، ۱۰ کیلومتر و متوسط عرض منطقه کنترل ۸۰ کیلومتر است. با توجه به توضیحات فوق، مناطق هدف نهایی ماه‌های ژانویه و فوریه و مناطق کنترل تعیین شده برای هر یک در منطقه مطالعاتی تهران در شکل(۳) نشان داده شده است.

الف)ماه ژانویه ب) ماه فوریه



شکل ۳: مناطق هدف و کنترل منطقه مطالعاتی تهران در ماه ژانویه، فوریه

روش منتخب برای منطقه‌ای کردن بارش

در این پروژه منطقه‌ای کردن بارش برای منطقه مورد مطالعه با استفاده از هر دو روش انجام شده و نتایج حاکی از آن است که مقادیر به‌دست آمده از این دو روش تفاوت چندانی با هم نداشته و لذا دقت روش IDW در کنار سرعت بالای این روش تاحد زیادی قابل قبول است. در این پروژه بسته به شرایط و حجم داده‌های مورد استفاده و نیاز به دقت و یا سرعت بیش‌تر در هر مرحله، از یکی از این دو روش استفاده شد. به منظور تعیین اثر افزایش بارش ناشی از باروری ابرها بر منابع آب سطحی و زیرزمینی در این تحقیق از دو مدل جزیم و رائو در حوضه آبریز منتخب استفاده شد. دو مدل جزیم با بیلان برفی و مدل رائو و الوقدانی به منظور کالیبراسیون در این محدوده‌ها با توجه به خصوصیات فیزیوگرافیک و اقلیمی انتخاب شدند. هر دو مدل بر اساس المان‌های موجود در بیلان آبی برای حوضه‌های آبریز ایران مناسب هستند، چراکه آب زیرزمینی، رطوبت خاک و بیلان برفی را در خود دارند. در مرحله چهارم اثر افزایشی یا کاهشی بارورسازی‌ها تعین شد. پس از برآورد رگرسیون، پیش‌بینی حجم بارش هر منطقه براساس معادله رگرسیون انجام شده و بازه اطمینان پیش‌بینی محاسبه شده است. سپس مطابق روشی که در بخش ارزیابی ایستگاهی نیز اشاره شد. اثر افزایشی یا کاهشی معنی‌دار به شرح زیر تعیین شد: ۱) اگر حجم بارش مشاهداتی سال ۲۰۱۵ در منطقه مربوطه در ماه موردنظر بیش از حد بالای پیش‌بینی رگرسیون باشد، افزایش بارش برای آن منطقه تعیین می‌شود. ۲) اگر حجم بارش مشاهداتی سال ۲۰۱۵ در منطقه مربوطه در ماه مورد نظر کمتر از حد پایین پیش‌بینی رگرسیون باشد، کاهش بارش برای آن منطقه تعیین می‌شود. اگر حجم بارش مشاهداتی سال ۲۰۱۵ در منطقه مربوطه در ماه موردنظر در درون بازه اطمینان پیش‌بینی رگرسیون قرار گرفته باشد، کاهش یا افزایش معنی‌داری برای بارش آن ایستگاه قابل تشخیص نیست.

برآورد رواناب حاصل از افزایش بارش ناشی از باروری ابرها

یکی از مهم‌ترین منافع حاصل از اجرای پروژه‌های باروری ابرها، افزایش رواناب بر اثر افزایش بارش ناشی از اجرای پروژه است. در همین راستا، تعیین میزان رواناب استحصالی حاصل از اجرای پروژه‌های باروری ابرها یک گام مهم در ارزیابی موفقیت پروژه و کارایی اقتصادی آن است. به همین منظور، در این قسمت از دو روش مختلف برای برآورد رواناب استفاده شده است. روش اول، روش شماره منحنی مربوط به اداره حفاظت خاک (SCS) آمریکا است. مزیت این روش، سادگی آن و در نظرگرفتن عوامل اصلی تاثیرگذار بر فرایند شکل‌گیری رواناب است. اما این روش بیشتر مناسب مناطق با سطح محدود و تغییرات ارتفاعی کم است. به‌همین دلیل، از روش دیگری موسوم به روش استدلالی نیز استفاده شده است. در روش استدلالی، پارامتر اصلی تعیین کننده میزان رواناب، ضریب رواناب است که بیانگر درصدی از بارش است که تبدیل به رواناب می‌شود. عامل اصلی تاثیرگذار بر ضریب رواناب شیب منطقه مورد بررسی است. برهمین اساس ضریب رواناب براساس پروفیل شیب منطقه تعیین می‌شود.

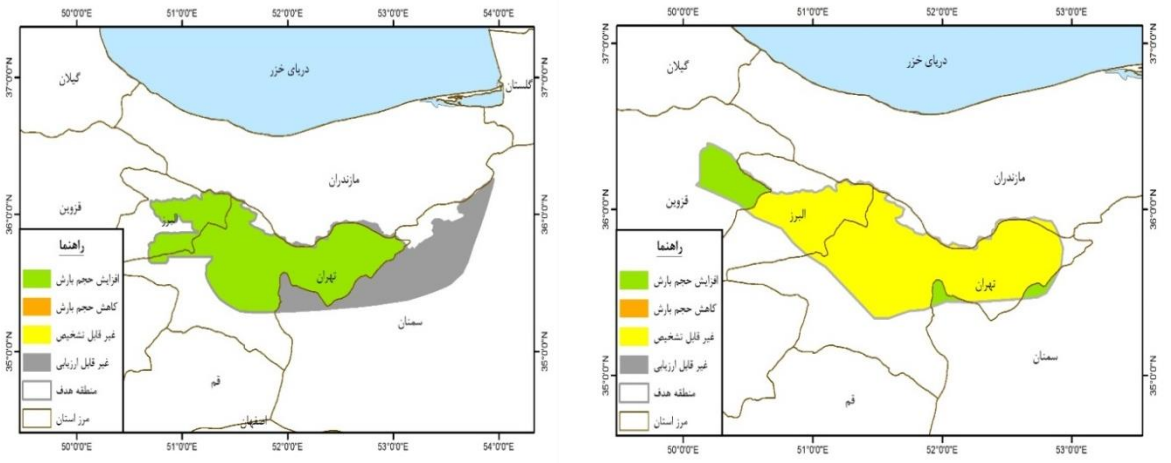
برآورد تغذیه منابع آب زیرزمینی ناشی از باروری ابرها

بخش دیگری از منافع حاصل از پروژه‌های باروری ابرها مربوط به میزان افزایش نفوذ به آب زیرزمینی و تغذیه منابع آب زیرزمینی در اثر افزایش بارش در مناطق مختلف است. در همین راستا، تعیین میزان افزایش تغذیه آب زیرزمینی مدنظر است. جهت تعیین میزان افزایش تغذیه آب زیرزمینی، لازم است ضریب نفوذ به آب زیرزمینی در مناطق مختلف تعیین شود. این ضریب، نشان‌دهنده سهمی از بارش است که نفوذ کرده و سبب تغذیه آب زیرزمینی می‌شود. به‌منظور تعیین ضریب نفوذ آب زیرزمینی، از گزارش‌های بیلان طرح جامع آب کشور استفاده شد. به این ترتیب که ناحیه‌های مطالعاتی قرار گرفته در محدوده منطقه هدف هر استان براساس نقشه‌های GIS استخراج شده و ضریب نفوذ هر ناحیه مطالعاتی براساس گزارش‌های بیلان طرح جامع آب کشور استخراج شد. سپس براساس مساحت هر ناحیه مطالعاتی، میانگین وزنی ضریب نفوذ نواحی مطالعاتی قرار گرفته در منطقه هدف هر استان، به عنوان ضریب نفوذ آن استان در نظر گرفته شده است.

نتایج و بحث

در (شکل ۴) نتایج ارزیابی حجمی در منطقه تهران بدون لحاظ ناحیه‌بندی اقلیمی نشان داده شده است. مطابق نتایج به دست آمده در ماه ژانویه سال ۲۰۱۵ در استان‌های قزوین و سمنان، در ماه فوریه سال ۲۰۱۵ در استان‌های البرز و تهران، افزایش معنی‌دار بارش مشخص شده است.

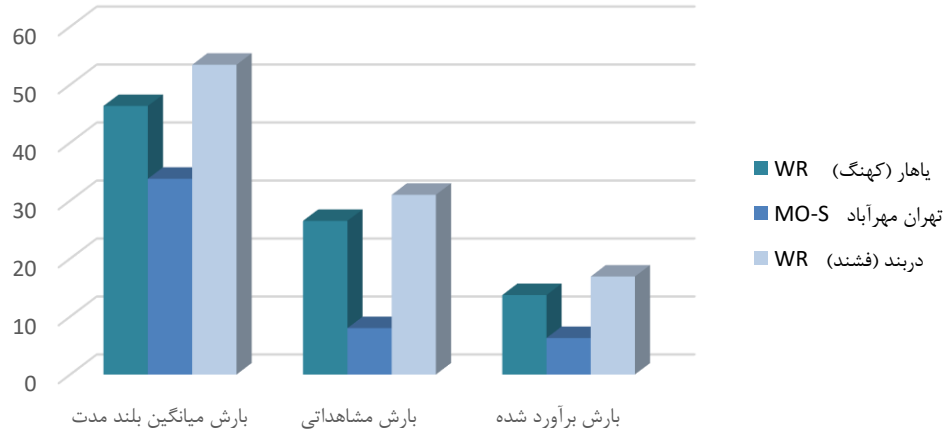
الف)ماه ژانویه ب) ماه فوریه



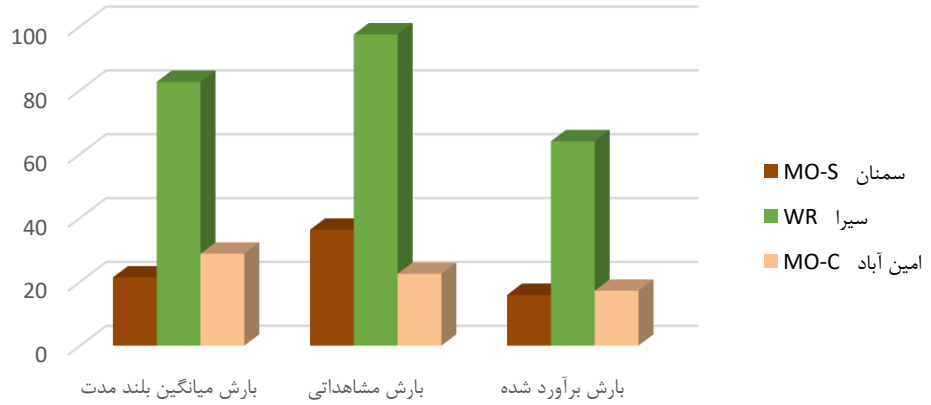
شکل ۴: نتایج ارزیابی حجمی در منطقه تهران، ماه ژانویه و فوریه

در شکل‌های (۵) و (۶) مقدار بارش میانگین بلند مدت، مشاهداتی و برآورد شده در ماه‌های مختلف برای ایستگاه‌های شاخص نشان داده شده است. با توجه به (شکل) مشاهده می‌شود که مقادیر بارش مشاهداتی ایستگاه یاهار (کهنگ) برای ماه ژانویه بیش‌تر از مقادیر برآورد شده برای بارش در این ایستگاه است. مقدار بارش مشاهداتی در ایستگاه دربند (فشم) نیز بیشتر از مقدار

بارش برآورد شده برای این ایستگاه است. اما ارزیابی اثرات باروری ابرها برای این ایستگاه غیرقابل تشخیص است. در ماه فوریه، همان‌طور که در شکل (۶) نیز نشان داده شده، مقدار بارش مشاهداتی در دو ایستگاه سمنان و سیرا از مقادیر بارش میانگین بلندمدت و بارش برآورد شده بیش‌تر بوده است. برای ایستگاه سمنان افزایش بارش گزارش شده درحالی که ارزیابی نتایج به دست آمده برای ایستگاه سمیر غیرقابل تشخیص بوده است.



شکل ۵: بارش میانگین بلندمدت، بارش مشاهداتی و بارش برآورد شده در ماه ژانویه ایستگاه‌های شاخص منطقه تهران



شکل ۶: بارش میانگین بلندمدت، بارش مشاهداتی و بارش برآورد شده در ماه فوریه ایستگاه‌های شاخص منطقه تهران

نتایج مدل بیلان در حوضه آب‌ریز منتخب در تهران

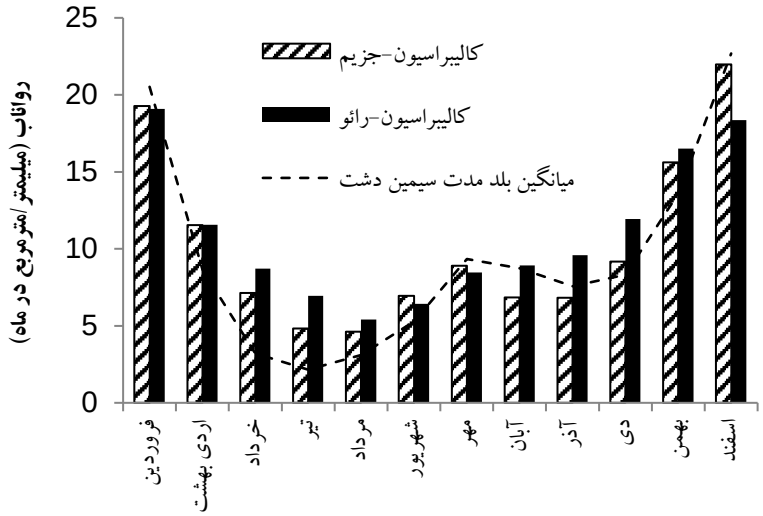
شاخص‌های عملکردی این دو مدل برای دو دوره اطلاعات (کالیبراسیون و ارزیابی)، در جدول(۱) ارائه شده است. در این جدول، دو شاخص عدم تشابه متوسط میانگین نرمال شده مجذورخطا (NMSE) و میانگین مجذورخطا (MSE) و دو شاخص تشابه ضریب همبستگی (CC) و نش ساتکلیف (NS) به‌منظور ارزیابی عملکرد دو مدل و انتخاب مدل مناسب مورد استفاده قرار گرفت. درخصوص دو شاخص عدم تشابه، دامنه تغییرات آن از صفر، تطبیق کامل نتایج و مشاهدات، تا اعداد بزرگ‌تر از یک است

که هرچه عدم تشابه بیش‌تر باشد، این شاخص عدد بیش‌تری را نشان خواهد داد. ضریب همبستگی عددی بین صفر و یک و نش ساتکلیف عدی بین منفی بی‌نهایت تا یک را نشان می‌دهد.

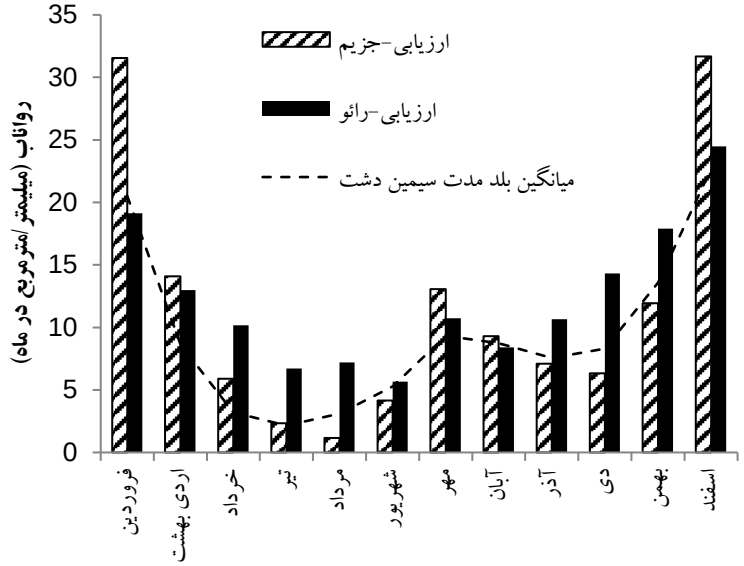
جدول ۱: شاخص‌های آماری در حوضه منتخب برای دو مدل بیلان و دسته اطلاعات کالیبراسیون و ارزیابی

دسته	شاخص آماری	حوضه سیمین‌دشت	
		جزیم	رائو و الوقدانی
واسنجی (کالیبراسیون)	MSE	۴۳/۶۱	۵۲/۷
	NMSE	۰/۴۴	۰/۵۳
	NS	۰/۵۶	۰/۴۶
	CC	۰/۵۶	۰/۴۷
صحت‌سنجی (ارزیابی)	MSE	۳۰/۴۷	۶۰/۷۸
	NMSE	۰/۵۷	۱/۱۵
	NS	۰/۴۲	۰/۱۶
	CC	۰/۶۹	۰/۵۴

در این حوضه، در هر دو دوره واسنجی و صحت‌سنجی، مدل جزیم دارای مجموع خطای کمتر (دو شاخص عدم تشابه) و هم‌بستگی بیش‌تر (دو شاخص تشابه) با مقادیر مشاهداتی است. با این حساب، مدل جزیم برای ادامه کار انتخاب شد. از منظر نتایج، در شکل (۷) و (۸)، مقایسه عملکرد ماهانه دو مدل بیلان جزیم و رائو-الوقدانی بصورت ماهانه و به تفکیک دوره‌های واسنجی و صحت‌سنجی ارائه شده است. در هر دو مدل در برخی از ماه‌ها با دبی اندک، در دوره ارزیابی تفاوت‌های قابل مقایسه‌ای در پاسخ‌ها قابل تشخیص است. در اغلب ماه‌ها (به‌جز فروردین و اسفند) مدل رائو مقداری بیش از مدل جزیم و مقدار مشاهداتی را نشان می‌دهد. درعین حال در دوره ارزیابی مدل جزیم بجز ماه‌های اسفند و فروردین رفتار نزدیک‌تری را به مقادیر مشاهداتی از خود بروز می‌دهد. لازم به ذکر است که در میان پارامترهای به‌کار گرفته شده برای مدل‌های بیلان فوق، ضریبی به‌منظور تعدیل بارش به‌کار گرفته شده است. استفاده از این ضریب به‌منظور تعدیل مقدار بارش میانگین‌گیری شده درسطح، با توجه اهمیت بارش، به عنوان محرک سیستم بارش-رواناب و همچنین درنظرگرفتن تنوع مکانی بارش و مقادیر رواناب مشاهداتی است. در ادبیات فنی، مقدار این ضریب را بین ۰/۵ تا ۱/۵ در نظر گرفته‌اند که می‌بایست مقدار دقیق آن در یک فرآیند بهینه‌یابی معین شود.



شکل ۷: نمودار رواناب بلند مدت ماهانه محاسباتی و مشاهداتی در حوضه سیمین‌دشت



شکل ۸: نمودار رواناب بلند مدت ماهانه محاسباتی و مشاهداتی در حوضه سیمین‌دشت

ارزیابی نتایج مدل برای دوره بارورسازی ۲۰۱۵:

در این قسمت نتایج مدل‌سازی برای دو وضعیت مجزا مورد بررسی قرار گرفته است. در وضعیت اول، مقادیر مشاهداتی بارش، دما و تبخیر برای این حوضه با استفاده از مدل کالیبره شده مورد ارزیابی قرار گرفته است. در وضعیت دوم، شرایطی که در آن اثرات باروری صورت نگرفته، بررسی شده است. در جدول(۲) مشخصات اقلیمی برای هر یک از دو وضعیت فوق، ارائه شده است. در این جدول، دما و تبخیر در هر دو سناریو ثابت بوده و تنها بارش باتوجه به وضعیت باروری و بدون اثر باروری قید شده است. در این حوضه، بارش در تمامی دو ماه میلادی موردنظر نسبت به شرایط بدون اثر باروری افزایش را نشان می‌هد. اطلاعات موجود در کل سال‌های گذشته در سال ۲۰۱۳ و ۲۰۱۴ دارای نقص اطلاعاتی است و دسته اطلاعات ورودی مدل بیلان را نداشته و این امر مانع از مدل‌سازی پیوسته بیلان در طول سال‌های گذشته تا انتهای ماه‌های مد نظر سال ۲۰۱۵ خواهد شد. لذا باید با استفاده از یک رویکرد ابتکاری اثر فقدان اطلاعات در دو سال اخیر که عمدتاً وابستگی به شرائط اولیه مدل، رطوبت اولیه خاک، را باعث می‌شود، درنتایج ملحوظ نمود. باتوجه به شرایط فوق و با توجه به اینکه مدل بیلان رائو-الوقدانی در قسمت قبل انتخاب شده و در این مدل رطوبت خاک در ماه قبل به عنوان ورودی مدل است، لذا رطوبت ماه دسامبر در سال‌های قبل (مورد استفاده در واسنجی و صحت‌سنجی مدل بیلان) در دو سناریو کمینه و بیشینه به‌منظور ارزیابی استفاده خواهد شد.

جدول ۲: اطلاعات اقلیمی سال ۲۰۱۵ در شرایط با و بدون اثر باروری

حوضه و زمان / پارامتر	حوضه سیمین‌دشت	
	ژانویه	فوریه
دما	۰/۳۸	۲/۴۲
تبخیر	۵/۹۳	۱۲/۰۱
بارش مشاهداتی (با اثر باروری)	۲۲/۰۷	۵۰/۹۶
بارش برآورد شده (بدون اثر باروری)	۱۴/۸	۴۳/۸۱

نتایج این مدل‌سازی در جدول (۳) ارائه شده است. در این جدول، مقدار رواناب در این حوضه آب‌ریز در دو سناریو بدون باروری و با باروری ارائه شده و در ضمن بر اساس وضعیت محتمل (کمینه و بیشینه)، رطوبت خاک در این دو حوضه به تفکیک مقدار مزبور مورد شبیه‌سازی قرار گرفته است. لازم به ذکر است، اطلاعات موجود در کل سال‌های گذشته در سال ۲۰۱۳ و ۲۰۱۴ داری نقص اطلاعاتی است و این امر مانع از مدل‌سازی پیوسته بیلان در طول سال‌های گذشته تا انتهای ماه‌های مد نظر سال ۲۰۱۵ شده است. به‌همین دلیل دو وضعیت محتمل رطوبت خاک درنظر گرفته شده است. ضریب تغییر (معادل مقدار رواناب محاسبه شده متناظر با بارش مشاهداتی به رواناب محاسبه شده متناظر با بارش بدون اثر بارورسازی) نیز در Error! Reference source not found.جدول (۳) ارائه شده است. بر این اساس، در این حوضه در هر دو ماه شبیه‌سازی و در هر دو وضعیت بهبود مقدار رواناب تولیدی نشان داده شده است. با توجه به عدم دسترسی به اطلاعات رطوبت خاک ماه دسامبر سال

۲۰۱۴ (ماه قبل از پروژه باروری)، بررسی نتایج با فرض دو وضعیت حداقل و حداکثر رطوبت خاک در این ماه انجام شده است. بر اساس نتایج به دست آمده با فرض مقدار حداقل برای رطوبت اولیه (رطوبت صفر) میزان افزایش رواناب در دو ماه ژانویه و فوریه به ترتیب ۶٪ و ۲۶٪ برآورد شده است. در صورت فرض مقدار بیشینه رطوبت خاک نیز میزان افزایش رواناب در این دو ماه به ترتیب ۱٪ و ۱۱٪ محاسبه شد.

جدول ۳: رواناب محاسباتی (میلی‌متر/مترمربع در ماه) در دو ماه از سال ۲۰۱۵ در شرایط با و بدون اثر باروری

ماه باروری	حوضه سیمن‌دشت					
	رطوبت اولیه صفر		ضریب تغییر	رطوبت اولیه ۴۵/۱۹		ضریب تغییر
	مشاهده شده	بدون باروری		مشاهده شده	بدون باروری	
ژانویه	۲/۶۳	۲/۴۹	۱/۰۶	۱۶/۵۴	۱۶/۴	۱/۰۱
فوریه	۸/۲۶	۶/۵۶	۱/۲۶	۱۷/۴۵	۱۵/۷۵	۱/۱۱

آن‌گونه که قبلاً مطرح شد، مدل بیلان منتخب جزیم دارای بیلان آب زیرزمینی است. براساس مدل کالیبره شده، میزان تغذیه منابع آب زیرزمینی در منطقه سیمین دشت در سناریو رطوبت اولیه خاک صفر در شرایط بارش مشاهداتی ۲۵ درصد بی‌تر از شرایط بدون انجام عملیات باروری است. این شاخص برای وضعیت رطوبت اولیه خاک برابر ۴۵/۱۹ نشان دهنده ۴ درصد افزایش نسبت به شرایط بدون باروری بوده است.

نتایج برآورد رواناب:

در جدول (۴) میزان رواناب تولیدی حاصل از افزایش بارش در اثر انجام پروژه باروری ابرها در منطقه تهران در سال ۲۰۱۵ (سال آبی ۹۳-۹۴)، براساس دو روش SCS و روش استدلالی ارائه شده است. مقادیر رواناب ارائه شده برحسب میلیون مترمکعب هستند. لازم به ذکر است در این بخش، تنها استان‌هایی مدنظر هستند که براساس بررسی‌های آماری، افزایش معنی‌دار حجم بارش در آن‌ها تشخیص داده شده است.

جدول ۴: رواناب استحصالی ناشی از افزایش بارش ناشی از باروری ابرها در منطقه تهران ماه ژانویه و فوریه (MCM)

روش	ژانویه			فوریه
	نام استان			
	قزوین	سمنان	تهران	البرز
روش **SCS**	۲/۱	۵/۸	۴۵/۹	۱۰/۱
روش استدلالی	۰/۹	۲/۱	۳۹/۹	۸/۳

درمجموع در پروژه تهران، رواناب استحصالی برآورد شده براساس روش SCS میزان ۶۳/۹ میلیون مترمکعب بوده است. ولی در روش استدلالی، میزان رواناب استحصالی برآورد شده ۵۱/۲ میلیون مترمکعب بوده است. براساس مقادیر ضریب نفوذ، مقدار افزایش نفوذ آب زیرزمینی در استان‌های مختلف محاسبه شده است که این مقادیر برای استان‌های مختلف در جدول (۵) ارائه شده است.

جدول ۵: مقادیر افزایش نفوذ به آب زیرزمینی در اثر افزایش بارش ناشی از باروری ابرها در سال ۲۰۱۵ (MCM)

ماه	سمنان	قزوین	تهران	البرز
ژانویه	۰/۳	۳/۱	۰/۰	۰/۰
فوریه	۰/۰	۰/۰	۳۲/۶	۴/۶

به این ترتیب در پروژه تهران در ماه‌های ژانویه و فوریه مجموعاً به ترتیب ۳/۴ و ۳۷/۱ میلیون مترمکعب افزایش نفوذ به آب زیرزمینی تعیین می‌شود.

نتیجه‌گیری

نتایج این تحقیق نشان داد که بر اساس نتایج به‌دست آمده با فرض مقدار حداقل برای رطوبت اولیه (رطوبت صفر) میزان افزایش رواناب تحت‌تاثیر فرایند باروری ابرها در دو ماه ژانویه و فوریه به ترتیب ۶٪ و ۲۶٪ برآورد شده است. میزان تغذیه منابع آب زیرزمینی نیز در منطقه سیمین دشت در سناریو رطوبت اولیه خاک برابر با صفر در شرایط بارش مشاهداتی ۲۵ درصد بیش‌تر از شرایط بدون انجام عملیات باروری بارورها بوده است. این شاخص برای وضعیت رطوبت اولیه خاک برابر با ۴۵/۱۹ نشان دهنده ۴ درصد افزایش نسبت به شرایط بدون باروری بوده است. تغییرات اقلیمی اثر به‌سزایی بر رفتارهای سیستم آب و هوایی دارند. از همین‌رو مناسب است در آینده با تعیین نقطه شکست اقلیمی در مناطق مدنظر پروژه، روابط رگرسیون براساس وضعیت اقلیمی منطقه موردنظر برآورد شوند که این مساله می‌تواند اثر چشم‌گیری بر بهبود ارزیابی داشته باشد. درنهایت می‌توان گفت با توجه به اثرات سوء تغییر اقلیم بر بارش چه از نظر مقدار و چه از لحاظ رژیم آن، علم تعدیل وضع هوا (که باروری ابرها یکی از زیرمجموعه‌های آن می‌باشد) می‌تواند اثرات به‌سزایی بر سازگاری با این تغییرات داشه باشد. لذا پیشنهاد می‌شود جهت گسترش کاربردی علم تعدیل وضع هوا در ایران جهت سازگاری و کاهش اثرات آن مطالعات، تحقیق و عملیات گسترده‌ای صورت گیرد.

قدردانی

نویسندگان این مقاله برخود واجب می‌دانند که از پژوهشکده تحقیقات آب دانشگاه تهران جهت انجام مطالعات ارزیابی اثرات بارورسازی ابرها در سال آبی ۹۴-۹۳ کمال تشکر و قدردانی را داشته باشند.

منابع

بحری، م.، دستورانی، م. ت. و گودرزی، م. (۱۳۹۴). بررسی خشک‌سالی‌های دهه ۲۰۳۰-۲۰۱۱ تحت اثر تغییر اقلیم، مطالعه موردی: حوزه آب‌خیز اسکندری استان اصفهان. مجله مهندسی و مدیریت آبخیز، دوره ۷، شماره ۲، ص ۱۵۷-۱۷۱.

پورمحمدی، س. و گلکار، ف. (۱۳۹۲). برآورد اقتصادی افزایش منابع آب به کمک فن‌آوری باروری ابرها در حوزه آب‌ریز رفسنجان. پنجمین کنفرانس مدیریت منابع آب ایران، دانشگاه شهید بهشتی، ۳۰-۲۹ بهمن ۱۳۹۲، تهران، ایران.

پورمحمدی، س. و رحیمیان، م. ح. (۱۳۹۳). ارزیابی اثرات تغییر اقلیم و بارورسازی ابرها بر عملکرد گندم دیم (مطالعه موردی: استان خوزستان). دومین کنفرانس ملی تغییر اقلیم و امنیت غذایی، ۲۹ خرداد ۱۳۹۳، اصفهان، ایران.

پورمحمدی، س. و جوادیان‌زاده، م. م. (۱۳۹۳). ارزیابی تأثیر بارورسازی ابر بر میزان بارش در حوضه‌های آب‌ریز ایران در سال آبی ۸۹-۸۸ (مطالعه موردی: حوضه‌های آب‌ریز بختگان- طشک و گاوخونی). نشریه منابع آب و توسعه، دوره ۶، شماره ۳، ص ۱۰۵-۹۳.

پورمحمدی، س.، جوادیان‌زاده، م. م. و گلکار، ف. (۱۳۹۳). بررسی افزایش منابع آب به کمک فن‌آوری باروری ابرها و برآورد اقتصادی آن در حوضه آبریز کوهدشت و رومیشگان. نشریه منابع آب و توسعه، دوره ۴، شماره ۱، ص ۹۵-۸۱.

پورمحمدی، س. (۱۳۹۰). بارورسازی ابرها، تکنیک نوینی جهت کاهش اثرات خشک‌سالی و تغییرات اقلیمی (مطالعه موردی حوضه آبریز گاوخونی). مجموعه مقالات هفتمین همایش ملّی علوم و مهندسی آب‌خیزداری، گروه مهندسی مرتع و آب‌خیزداری دانشکده منابع طبیعی دانشگاه صنعتی اصفهان، ۷ اردیبهشت ۱۳۹۰، اصفهان، ایران.

علومی مجومرد، م.، زارع، م. و پورمحمدی، س. (۱۳۹۵). ارزیابی نقش بارورسازی ابرها در افزایش استحصال آب در استان فارس با استفاده فنون سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی. مجله سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی طبیعی، دوره ۷، شماره ۲، ص ۸۵-۷۷.

Woodley, W. and Rosenfeld, D. (2004). The Development and Testing of a New Method to Evaluate the Operational Cloud-Seeding Programs in Texas. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 43 (2), pp: 249-263.

Yun, J., Jeong, S., Ho, C., Park, C., Park, H. and Kim, J. (2018). Influence of winter precipitation on spring phenology in boreal forests. Global Change Biology, 24 (11), pp: 5176-5187.

Weather modification, solving way to climate change adaptation

Samaneh Poormohammadi[1*], Mehran Fatemi[2]

1) Ph.D of watershed science and engineering, Iran Water and Power Resources Development Co.
2) Faculty member, Meibod University.

***Corresponding author:** s.poormohammadi@gmail.com

Received Date: 2021. 04. 03 **Accepted Date: 2021. 08. 25**

Abstract

One of way to improving countries is using optimum and useful of natural resources. Among vital and important of natural resources are water resources. Increasing growth of population, industrial developing, economical and also public healthy and comfortable level, have caused to increasing water supply. On the other hand, global warming and abnormal climate change impact have effected on natural harmony of climate in countries, especially in Iran. There are many ways to climate change adaptation and mitigation, that international weather organization have suggest applying of approval and scientific method that it is weather modification. Aim of this research is assessment of cloud seeding effective to surface and ground water resources to climate change adaptation and mitigation in Tehran province in 2015. For this purpose, we were using several steps to achieve goals. At the first, we were prepared needed data and information. In the second step, cloud seeding operation had evaluated with provided data and local regression method. After that to determination of cloud seeding impact on surface and ground water was used to hydro climatic budget modeling. In fourth step, runoff and ground water discharge affected by cloud seeding operation was estimated. Result show that cloud seeding operation could increase runoff 63.9 million cubic meters (with SCS equation) or 51.2 million cubic meters (with logical equation) and 40.5 million cubic meters was increased to ground water resources in Tehran in 2015.

Keywords: Climate change adaptation, Cloud seeding, Water resources, Weather modification.