نشریه هواشناسی و علوم جوّ
جلد ۴، شماره ۱، بهار ۱۴۰۰ صفحات ۱-۱۴

ارزیابی تأثیر پروژه‌های باروری ابرها در افزایش میزان بارندگی (مطالعه موردی: استان اصفهان)

محمدتقی دستورانی [۱*]، زهرا محمدی مقدم[۲]، امیر اسماعیل‌پور زرمهری[۳]، منصوره سید حسنی[۴]

[۱] استاد دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست ، دانشگاه فردوسی مشهد
[۲] دانش آموخته کارشناسی ارشد مدیریت مناطق خشک و بیابانی، دانشکده منابع طبیعی وکویر شناسی دانشگاه یزد
[۳] دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی آبخیزداری، دانشگاه فردوسی مشهد
[۴] کارشناس ارشد مرکز ملی تحقیقات و مطالعات باروری ابرها

تاریخ دریافت: ۹۹/۰۷/۰۷ ، تاریخ پذیرش: ۹۹/۱۰/۱۵

چکیده

یکی از حساس‌ترین مراحل کار پروژه‌های افزایش بارش به وسیله باروری ابرها پاسخ به سؤال میزان راندمان باروری یا مقدار آب اضافی استحصالی در اثر اجرای پروژه باروری ابرهاست. در این تحقیق جهت ارزیابی این نوع پروژه‌ها از نظر میزان آب استحصالی در اثر اجرای آن در استان اصفهان در سال آبی ۸۸-۸۷، از دو روش کنترل شناور وکنترل ثابت استفاده گردیده و این دو روش در این مقاله با هم مقایسه شده‌اند. در روش کنترل شناور، با توجه به اثر دو ساعته مواد پس از تزریق به ابر، بر روی نقشه مربوطه منطقه حاصل از روی هم اندازی مناطق تحت تأثیر مواد باروری در پروازهای انجام شده در هر ماه به عنوان منطقه هدف لحاظ گردید، سپس نواری به عرض ۵۰ الی ۷۰ کیلومتر از مرز منطقه هدف به‌عنوان منطقه کنترل در نظرگرفته شد. لازم به ذکر است که در روش کنترل ثابت به جای ارتفاع بارش ایستگاه‌های منطقه کنترل؛ حجم بارش ایستگاه‌های کنترل مد نظر قرارگرفت. نتایج به دست آمده از این تحقیق نشان داد که در روش کنترل ثابت در ماه ژانویه هیچ گونه تغییری در روند بارش ایجاد نگردید در صورتی که در ماه‌های فوریه و مارس به ترتیب ۷۶٪ و ۳۱٪ افزایش بارش و در ماه آوریل ۳۳- ٪ کاهش بارش را نشان داده شد. همچنین نتایج با استفاده از روش کنترل شناور در ماه‌های فوریه و مارس به ترتیب ۷۱٪ و ۲۸٪ افزایش بارش و برای ماه‌های ژانویه و آوریل به ترتیب ۵-٪ و ۲۷/۵-٪ کاهش بارش مشخص گردید.

کلمات کلیدی: *باروری مصنوعی ابرها، تأمین آب، ارزیابی باروری ابرها، بارندگی، اصفهان*

* پست الکترونیکی نویسنده مسئول مکاتبه: *dastorani@um.ac.ir*

مقدمه

افزایش میزان استحصال آب در سطح ملی به رشد و تقویت محصولات کشاورزی و اقتصادی کمک کرده و در نهایت منجر به پیشرفت‌های اقتصادی، افزایش فرصت‌های شغلی و بالارفتن استانداردهای زندگی خواهد شد. از این‌رو کشورهای پیشرفته پیوسته به دنبال به روزرسانی و تقویت منابع آبی خود بوده و در این مسیر علاوه بر استفاده از منابع آب‌های سطحی وآب‌های زیرزمینی، از دیگر منابع آبی تجدید پذیر، همچنین منابع آبی غیر متعارف و غیر متمرکز و محدود موجود در جو نیز به صورت باروری ابرها در راستای افزایش منابع آبی استفاده می‌کنند. در دهه‌های اخیر مطالعاتی در ارتباط با افزایش بارش و تولید آب شرب به منظور تأمین آب مصرفی مورد توجه قرار گرفته که از این میان می‌توان به فن آوری بارورسازی ابرها، استحصال آب از مه، شیرین‌سازی آب دریا و ... اشاره نمود که هر یک با توجه به محدودیت‌های فنی و اقتصادی در مناطق مختلفی از جهان مورد توجه قرار گرفته‌اند.

بطورکلی طبیعت برای ایجاد ابرهای باران زا نیاز به سه عامل مهم و اساسی دارد که عبارتند از: رطوبت، صعود هوای حامل رطوبت و ذرات بسیار ریزی به نام آیروسل که نقش پایه‌ای برای رشد قطرک‌های آب یا ایجاد کریستال‌های یخ به‌عهده دارند. یکی از عوامل مؤثر بر راندمان بارش در ابرهای که آنها را به عنوان ابر باران‌زا می‌شناسیم، بهینه‌بودن تعداد، اندازه و نوع آیروسل‌ها می‌باشد. در صورتی که نوع و تعداد موردنیاز این آئروسل‌ها در داخل ابر مناسب نباشد، ابر نمی‌تواند به حداکثر قابلیت خود جهت ایجاد بارش برسد و در واقع راندمان بارش آن کاهش می‌یابد. آیروسل‌ها گستره وسیعی از ذرات بسیار ریز میکرونی را شامل می‌شوند که در طبیعت از طریق گرد و خاک پراکنده شده در هوا، ذرات پراکنده شده در هوا از طریق فعالیت آتشفشان‌ها، ذرات نمک جداشده از آب دریاها و اقیانوس‌ها و حتی برخی باکتری‌ها و موجودات ریز میکروسکوپی و غیره تأمین می‌شوند. از طرف دیگر فرآیندهای ایجاد بارش در ابرهای گرم و سرد با هم تفاوت دارند. در ابرهای گرم رشد یک قطره باران غالباً از طریق تبخیر قطرک‌های کوچکتر و میعان آن بر روی قطرک‌های درشت‌تر شروع و با برخورد قطرک‌های کوچکتر با قطرک‌های بزرگتر ادامه می‌یابد، اما در ابرهای سرد کریستال‌های یخ عامل مورد نیاز جهت شروع فرآیندهای رشد قطرک‌ها هستند. در مواردی که این کریستال‌های یخ به صورت طبیعی در داخل ابر ایجاد نگردد، آنگاه با استفاده از روش‌های مصنوعی می‌توان کریستال‌های یخ را در ابر ایجاد نمود. در واقع با این کار می‌توان شرایط را برای اجرای بهینه فرآیندهایی که منجر به بارش درون ابر می‌شوند تسهیل نمود و در نهایت میزان بارش حاصله از ابر را افزایش داد (سیدحسنی، ۱۳۸۱).

به طور کلی به منظور هسته‌سازی مصنوعی یخ، از عامل‌های باروری شامل عامل‌های هسته‌سازی همگن و ناهمگن استفاده می‌شود. یخ خشک، پروپان مایع و نیتروژن مایع سه نوع عامل هسته‌سازی همگن با شرکت در واکنش‌های گرماگیر می‌باشند. این عامل‌ها نسبتاً مستقل از ذره بوده و عمدتاً در محدوده دمایی ۱- تا ۱۱- درجه سسلسیوس عمل می‌کنند. این عامل‌های یخ‌ساز به دلیل مزایای زیاد خود به ویژه تبدیل سریع قطرک‌های آب ابر سرد و بخار به یخ، مستقیماً درون حوزه ابر سرد تزریق می‌شوند.

شاید جالب توجه‌ترین و بحث انگیزترین موضوع در مسائل تعدیل آب و هوا دستیابی به پاسخ به این سؤالات باشد:

آیا باروری ابرها واقعاً باعث افزایش بارش گردیده است؟

میزان موفقیت در این پروژه ها چقدر است؟

در اثر اجرای پروژه چه مقدار آب اضافی استحصال شده است؟

ارزیابی تأثیر و میزان آن مهمترین و در عین حال پیچیده‌ترین بخش‌های یک برنامه تعدیل آب و هواست. شناخت و اثبات میزان اثر بخشی برنامه نه تنها مدرکی بر میزان موفقیت مدیران و مجریان برنامه در رسیدن به اهداف از پیش تعیین شده‌شان می‌باشد بلکه در صورت اثبات مثبت بودن نتایج پروژه از نظر آماری و محاسباتی ، پشتوانه دلگرم کننده‌ای جهت تداوم و توسعه این برنامه‌ها ایجاد می‌شود. آنچه که بدیهی است اینکه از نظر قانونی اجرای هر پروژه‌ای به ویژه پروژه‌هایی که با سرمایه‌های ملی اجرا می‌شوند می‌بایست علاوه بر توجیه اقتصادی، قابلیت ارزش‌گذاری نیز داشته باشند.

براساس گزارش‌های منتشر شده از طرف سازمان جهانی هواشناسی، در حال حاضر بیش از ۵۰ کشور دنیا در حال اجرای پروژه‌های تحقیقاتی و اجرایی در زمینه تکنولوژی باروری ابرها

هستند. در این میان می‌توان به کشورهای روسیه و آمریکا به عنوان دو کشور پیشگام که تحقیقات مفصل و دامنه‌داری در این زمینه انجام داده‌اند و دارای سابقه طولانی در اجرای پروژه‌های تحقیقاتی و اجرایی در این زمینه می‌باشند اشاره کرد (استانلی و همکاران، ۱۹۹۰). برخی از کشورهای خاورمیانه مثل سوریه، اردن، لیبی، مغرب و حتی کشورهایی مانند چین نیز از این فن‌آوری از جهات گوناگون استفاده می‌کنند (خطیبی، ۱۳۸۱).

در کشور چین در استان جیلین با استفاده از آنالیز رگرسیون تاریخی هدف – کنترل در ۶۲ عملیات در طول سال های ۱۹۸۷-۱۹۸۰ افزایش بارش ۴۰ درصدی در بارندگی روزانه بدست آمد (پارکینسون، ۱۹۹۵). وزارت نیروی ایالتی آیداهو در آمریکا اجرا و تحقیقات باروری ابر را در سال ۱۹۹۳ آغاز کرد. تخمین ریاضی هدف/کنترل بر روی هشت فصل پروژه زمستانی حاکی از افزایش بین ۵٪ تا ۸٪ در بارندگی بود. در پروژه دیگری که از اول نوامبر تا ۱۵ آوریل ۲۰۰۳ انجام شده ، تأثیر فصلی (سه فصل) باروری را از نظر میانگین در حدود ۷٪ تا ۹٪ افزایش نشان داده است (شیواجیرائو، ۲۰۰۵ و گریفیت و همکاران، ۲۰۰۱). در مورد ارزیابی اثرات این نوع پروژه‌ها در کشورهای عربی باید ذکر نمود که عواملی همچون توپوگرافی متفاوت، دوره آزمایشات و فقدان مناطق هدف و کنترل باعث دشواری ارزیابی در این آزمایشات بوده است. به غیر از کشور سوریه، مدارک مستند در مورد نحوه ارزیابی و اثبات نتایج مثبت از آزمایشات باروری ابر در کشورهای عرب وجود ندارد و اغلب به تخمین‌های کلی بسنده شده است. اما گزارشات از اردن حاکی از افزایش ۱۳ درصدی بارش در ۱۰ فصل بارانی روی کل کشور می باشد. همچنین از آزمایش باروری ابر در عربستان سعودی نیز به نتایج مثبت اشاره شده است (دلن، ۲۰۰۹ و الفندای، ۲۰۰۱). باروری ابرها در کشور ترکیه از سال ۱۹۸۹ تا ۱۹۹۲ در شهرهای آنکارا، استانبول و ازمیر اجرا شد. بطور کلی حاصل اجرای پروژه باروری ابرها در چهار حوزه اصلی آبریز استانبول افزایش بارشی معادل ۲۲٪ برآورد گردیده است (سلاحتین، ۲۰۰۱). سیلورمن (۲۰۱۰)، تاثیر یازده عملیات باروری ابرها بر روی جریان رواناب حوزه‌های منطقه کوهستانی سی یرا در نوادای آمریکا را مورد ارزیابی قرار داد. در این ارزیابی از بررسی آماری داده‌های مناطق هدف و کنترل استفاده گردید. نتایج ارزیابی نشان داد که در شش حوزه اصلی از یازده حوزه تاثیر عملیات باروری در افزایش میزان رواناب کاملا مشهود و مشخص است. جالب اینکه تمام این شش حوزه در جهت غربی رشته کوه‌های سی‌یرا و در جهت باد غالب (رو به باد) منطق قرار دارند. در رابطه با پنج حوزه دیگر که سه حوزه آن‌ها در خلاف جهت باد غالب (پشت به باد) هستند ارزیابی آماری قادر به رد یا تایید تاثیر قابل توجه باروری روی میزان جریان رواناب نبود. سیلورمن نهایتا ارزیابی اثرات باروری روی بارش و جریان رودخانه‌ای را دارای پیچیدگی‌ها و عدم قطعیت‌های فراوانی دانسته و پیشنهاد می‌کند که علاوه بر بررسی‌های فیزیکی و آماری، بررسی میزان تغییرات یدید نقره (که برای باروری استفاده می‌شود) در آب و خاک مناطق هدف و کنترل نیز مورد بررسی قرار گیرد تا بتوان به نتیجه واضح‌تری در این مورد دست یافت. بوینتجز (۱۹۹۹)، نیز پس از ارزیابی تجارب ده ساله آمریکا در زمینه باروری ابرها نتیجه‌گیری می‌کند که هرچند در اغلب پروژه‌های انجام شده شواهد حاکی از تاثیر مثبت باروری ابرها در افزایش بارش است ولی عدم قطعیت‌ها و پیچیدگی های موجود در ارزیابی اثرات مانع از آن است که بتوان در این خصوص نظر صحیح و قاطع ارائه نمود. ارزیابی‌های آماری در بخش‌هایی از استرالیا نیز نشان داد که ابرهای بارور شده در مقایسه با موارد بارور نشده از نظر بارندگی سطح بیشتری را در برگرفته و مدت طولانی‌تری نیز بارندگی آنها ادامه پیدا کرده است. البته لازم به ذکر است که میزان تاثیر بسته به نوع مواد باروری، فصل و نیز نوع ابرها بسیار متفاوت بوده و به دلیل پیچیدگی‌های موجود در ارزیابی دقیق نتایج لازم است تحقیقات مفصل‌تری در رابطه با هر یک از عملیات باروری انجام گیرد (NCAR, ۲۰۰۹). در ضمن با توجه به نوع انتخاب و تعداد مناطق هدف و کنترل در یک پروژه و نیز تعداد دفعات باروری انجام شده در طول یک دوره مشخص، لازم است در تجزیه و تحلیل و مقایسه داده‌های بارش از نسبت‌ها و آزمون‌های مناسب آماری استفاده گردد (گابریل، ۱۹۹۹). گیرت و همکاران (۲۰۱۰)، تاثیر فرآیند باروری ابرها را روی میزان بارش برف در مناطق کوهستانی در فصل زمستان مورد بررسی قرار دادند. آنها در این تحقیق از داده‌های راداری استفاده کردند و به این نتیجه رسیدند که

باروری ابرها خصوصا با استفاده از یدور نقره باعث افزایش بارش برف گردیده است. مانتون و وارن (۲۰۱۱)، میزان تاثیر باروری ابرها را در میزان بارندگی در مناطق برف‌گیر استرالیا مورد ارزیابی قراردادند و نتیجه‌گیری کردند که در اثر انجام این پروژه حدود ۱۴ درصد افزایش بارش حاصل شده است. وزارت نیروی جمهوری اسلامی ایران نیز از سال ۱۹۹۸ تاکنون قراردادهایی را با مؤسسه رصدخانه مرکزی آب و هواشناسی روسیه به منظور افزایش بارندگی در مناطق خشک محدوده مرکزی کشور مبادله نموده و در این راستا، نسبت به اجرای ۵ پروژه عملیاتی در سال‌های گذشته اقدام نموده است. بدین لحاظ طی سال‌های ۱۳۷۷ تاکنون مبادرت به اجرای پروژه‌های باروری ابرها با همکاری رصدخانه مرکزی آب و هواشناسی روسیه در مناطق مرکزی کشور گردیده است. لازم به ذکر است که هر ساله شعاع عملیات باروری ابرها افزایش یافته و در پروژه سال آبی ۸۶-۸۵ به ۴۵۰ کیلومتر از مرکز یزد رسیده است و استان‌های یزد، کرمان، اصفهان، فارس، کهگیلویه و بویراحمد، چهار محال و بختیاری و بخش‌هایی از استان‌های قم، سمنان، خراسان جنوبی و خراسان رضوی تحت پوشش عملیات باروری ابرها قرارگرفته است. البته تاکنون دو پروژه نیز در استان‌های شمالی کشور اجراگردیده است (مهندسین مشاور آب‌آوران دشت کویر، ۱۳۸۹). گلکار و همکاران (۱۳۹۳)، به منظور بهبود فرآیند باروری ابرها با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای سنجنده مد ۰۶ (سنجنده مدیس) و نقشه‌های هواشناسی در طی فوریه سال ۲۰۰۹ در استان فارس تحقیقی را انجام دادند. نتایج نشان دادکه استفاده از اطلاعات سنجده مدیس سبب می‌شود که فرآیند باروری ابرها از ۸ روز ابری با وضعیت نامشخص به ۳ روز مفید کاهش‌یابد. لازم به ذکر است که استفاده از این روش ضمن کاهش هزینه‌ها و افزایش دقت در اجرای پروژه فرصتی را برای بهره‌مندی از آن در دیگر مناطق کشور فراهم خواهدکرد. دانگ و همکاران (۲۰۲۱)، تاثیر فرآیند بارورسازی ابرها بر مقدار بارش در منطقه شیجی‌یانگ چین را برای بیست و یکمین روز از ماه نوامبر ۲۰۲۰ با استفاده از سایت‌های زمینی، مشاهده‌های هواپیمایی و اطلاعات بدست آمده از روش‌های سنجش از دور را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج حاصل از مشاهده‌های هواپیمایی افزایش معنی‌دار تراکم و تعداد ذرات یخی، کاهش تراکم و تعداد ذرات آب، بازتاب بیشتر امواج رادار در سایت‌های زمینی ، کاهش بازتاب ابر در مشاهده‌های سنجش از دور را نشان دادند. کالکارنی و همکاران (۲۰۱۸)، فرآیند بارورسازی ابرها را در طی بیست و یکمین روز از ماه اگوست تا هفتمین روز از ماه نوامبر سال ۲۰۱۷ در منطقه کارانتاکا هند مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان داد که مقدار بارندگی پس از ۴ ساعت از فرآیند بارورسازی در تمامی ایستگاه‌ها به طور میانگین ۲۷/۹ ٪ افزایش داشت. زهرایی و همکاران(۱۳۹۹)، تاثیر پروژه باروری ابرها بر مقدار بارش ایستگاه‌های مناطقی از فلات مرکزی ایران شامل استان‌های یزد، فارس،کرمان، اصفهان و برخی از مناطق مجاور و نیز تاثیر این فعالیت بر حجم بارش استان های مذکور با استفاده از رگرسیون چندگانه گام به گام در سال آبی ۹۳-۹۴ (برای ماه‌های ژانویه، مارس و فوریه سال ۲۰۱۵ میلادی) ارزیابی کردند. نتایج ارزیابی در بین ایستگاه‌های محدوده هدف نشان داد که بیشترین مقدار بارش در بین ماه‌های ژانویه، مارس و فوریه به ترتیب در مناطق جنوب غربی و غرب حوزه، قسمت‌های شمال و شرق حوزه و تمامی قسمت‌ها غیر از جنوب شرقی حوزه است. همچنین ارزیابی زهرایی و همکاران (۱۳۹۹) نشان دادکه بیشترین حجم بارش در ماه ژانویه برای استان‌های فارس، چهار محال بختیاری و اصفهان در ماه مارس تنها برای استان چهارمحال بختیاری و در ماه فوریه برای استان‌های فارس، چهار محال بختیاری، اصفهان، یزد و کرمان بوده است.

یکی از موارد مهم در پروژه‌های افزایش بارش به وسیله باروری ابرها پاسخ به سؤال میزان راندمان باروری یا مقدار آب اضافی استحصالی در اثر اجرای پروژه باروری ابرهاست. مهم‌ترین مسئله‌ای که در ارزیابی پروژه‌های افزایش بارش وجود دارد ماهیت متغیر پدیده‌های جوی و به ویژه بارش است. وجود تغییرات فراوان در روند بارش، عدم وجود روش‌های قابل اعتماد جهت تعیین میزان و حوزه بارش طبیعی با دقت مورد نیاز و نیز کارآیی متفاوت پروژه‌های افزایش بارش در اقلیم‌های مختلف، کار ارزیابی و برآورد این پروژه‌ها را پیچیده ساخته است. در این مقاله سعی می‌گردد تا ضمن معرفی مکانیزم‌ها و روش‌های باروری ابرها، ارزیابی مناسبی از اجرای این پروژه ها در ایران و در استان اصفهان با دو روش کنترل شناور وکنترل

ثابت به عمل آید، تا بدین وسیله میزان تاثیر فناوری باروری مصنوعی ابرها در افزایش بارندگی، رطوبت خاک و توسعه منابع آبی مشخص‌تر گردد.

مواد و روش‌ها

این تحقیق در طول ماه‌های ژانویه، فوریه، مارس و آوریل سال ۲۰۰۹ دراستان اصفهان انجام گرفت. استان اصفهان با مساحت۱۰۶۱۷۹ کیلومتر مربع حدود ۶/۲۵ درصد از مساحت کل کشور را به خود اختصاص داده است. این استان بین ۳۰ درجه و ۴۲دقیقه تا ۳۴ درجه و ۳۰ دقیقه عرض شمالی و ۴۹ درجه و ۳۶ دقیقه تا ۵۵ درجه و ۳۲ دقیقه طول شرقی در ایران مرکزی قرار دارد. میزان متوسط بارندگی سالانه در اصفهان ۱۲۲/۸ میلی‌متر است. متوسط سالانه دمای اصفهان ۱۶/۲ درجه سلسیسوس و میانگین سالانه رطوبت نسبی آن ۳۹/۹ درصد است. اقلیم استان براساس روش دومارتن، اقلیم خشک می باشد. در اجرای پروژه باروری ابرها در منطقه مورد تحقیق از دو فروند هواپیمای آنتونوف ۲۶ استفاده شده است. برخی از سنسورهای هواشناسی نظیر سنسور های دما، رطوبت سنج، محتوی آب مایع ابرها و فشار سنج در روی بدنه هواپیماها نصب بوده‌اند. اطلاعات و اندازه‌گیری‌های این سنسورها به صورت پیوسته به یک کامپیوتر منتقل‌شده و بصورت لحظه‌ای و یا پس از اتمام پرواز مورد پردازش قرار می‌گرفتند. با استفاده از این پردازش‌ها مسیر پروازی هواپیما و نقاط شلیک پیروپاترون‌های یدید نقره برروی صفحه نمایش کامپیوتر مشخص می‌شود. عملیات باروری ابرها با استفاده از سیستم پرتاب پاترون‌های حاوی یدید نقره و دستگاه کنترل شلیک و گلوله‌های پیروتکنیک یدید نقره PV-26 درون ابر رها شدند. پس از انجام عملیات برای بررسی میزان تغییرات بارش ابتدا آمار روزانه بارندگی در ماه‌هایی که باروری انجام شده در ایستگاه‌های منتخب و آمار بارندگی ۳۴ ساله در ایستگاه‌های مورد ارزیابی جهت محاسبه حجم بارش در ایستگاه‌های منطقه هدف اخذ گردید. سپس برای ارزیابی مقدار حجم افزایش بارش در مناطق کنترل از روش‌های کنترل ثابت و کنترل شناور استفاده‌شد. در شکل ۱ خلاصه مراحل اجرای پژوهش به صورت یک فلوچارت نشان داده شده است.

به طور کلی دو روش جهت ارزیابی پروژه های باروری ابرها وجود دارد که در این تحقیق مورد استفاده قرارگرفته است و به شرح زیر می باشند:

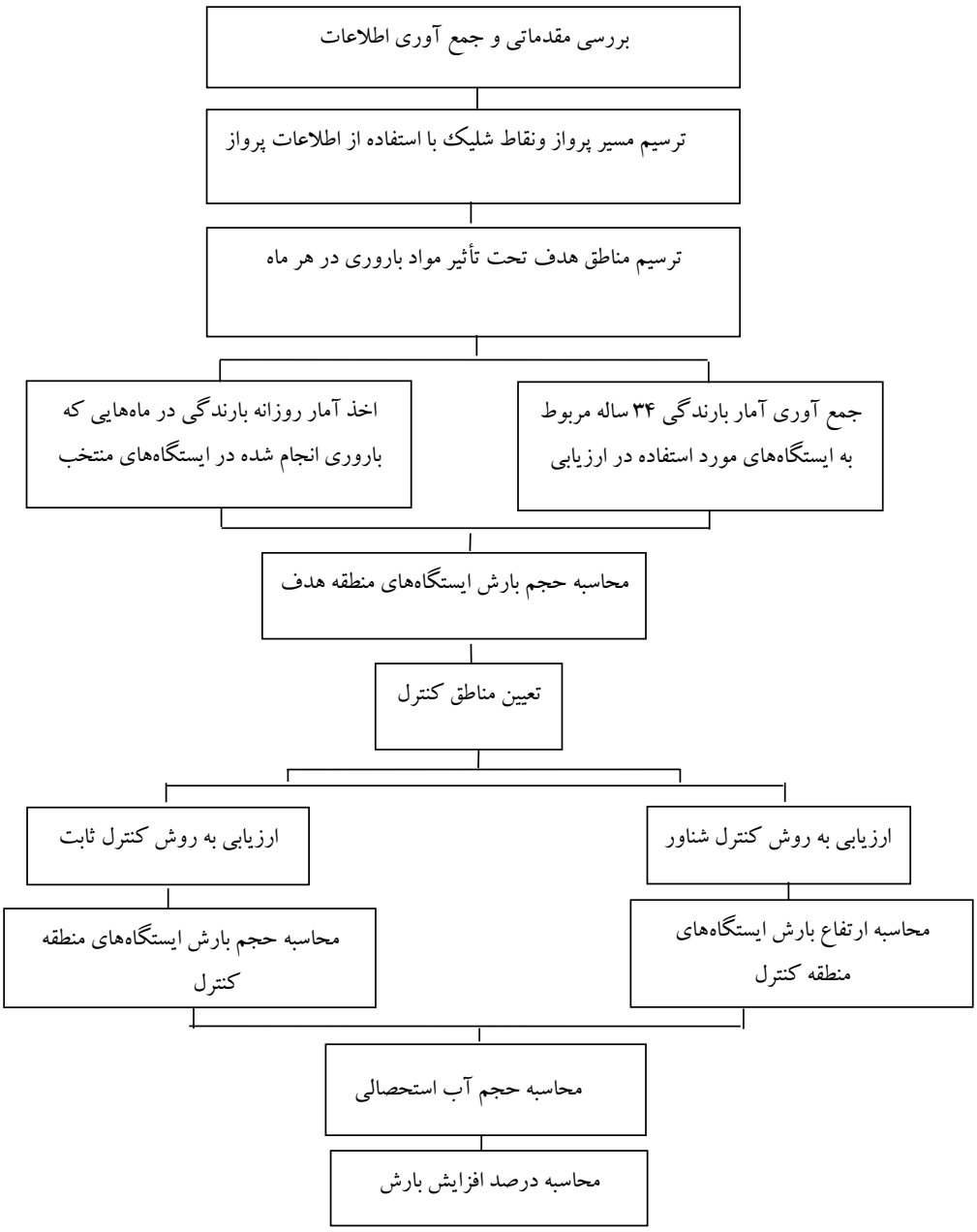
الف-روش کنترل شناور

اغلب در پروژه‌های باروری ابرها به دلیل لزوم از دست ندادن کلیه فرصت‌های باروری و در نتیجه بزرگ‌شدن منطقه هدف یا منطقه تحت تأثیر مواد باروری، در بیشتر موارد امکان تعیین یک منطقه به عنوان منطقه کنترل با موقعیت مناسب از نظر جهت باد و نزدیک بودن به منطقه هدف و دارای مشابهت از لحاظ خصوصیات اقلیمی، جغرافیایی، بارش و غیره وجود ندارد . همین علت باعث گردیده که در ایران اجباراً از روش ابداعی کارشناسان روسیه با نام کنترل شناور (FCM)[1] جهت ارزیابی پروژه های باروری ابرها استفاده گردد. لازم به ذکر است روش FCM قبلا در مراکش و سوریه نیز مورد استفاده قرار گرفته است (گلکار، ۱۳۷۷). در این روش حمل دو ساعته مواد پس از تزریق بر روی نقشه تصویر شده و منطقه حاصل از روی هم اندازی بخش‌های تحت تأثیر مواد باروری در پروازهای انجام شده در هر ماه به عنوان منطقه هدف لحاظ می شود (شکل۲) که البته این روش تعیین منطقه هدف خود جای بحث داشته و نیاز به بررسی و تحقیق لازم دارد.

سپس نواری به عرض ۵۰ الی ۷۰ کیلومتر از مرز منطقه هدف به عنوان منطقه کنترل در نظر گرفته می‌شود (شکل۳). با داشتن آمار بلند مدت بارندگی ماهیانه (ترجیحاً ۳۰ ساله)، یک معادله رگرسیونی بین ارتفاع بارش ایستگاه‌های منطقه کنترل و منطقه هدف در هر ماه تعیین می‌گردد که با انتخاب بهترین معادله و جای‌گذاری مقادیر بارش در دوره عملیاتی ترجیحاً با تفکیک ماه، حجم بارش قابل انتظار در منطقه هدف تخمین زده می‌شود. تفاضل حجم بارش واقعی در ماه عملیاتی مربوطه و حجم بارش قابل انتظار، حجم آب اضافی در دوره عملیاتی را نشان می‌دهد که به نتایج اجرای پروژه باروری ابرها نسبت داده می‌شود (مهندسین مشاور کاریزاب، ۱۳۸۹).

در انجام ارزیابی پروژه‌های باروری ابرها در ایران و با توجه به روش FCM قبل از رسیدن به مرحله پردازش آماری،

1 Float Control Method

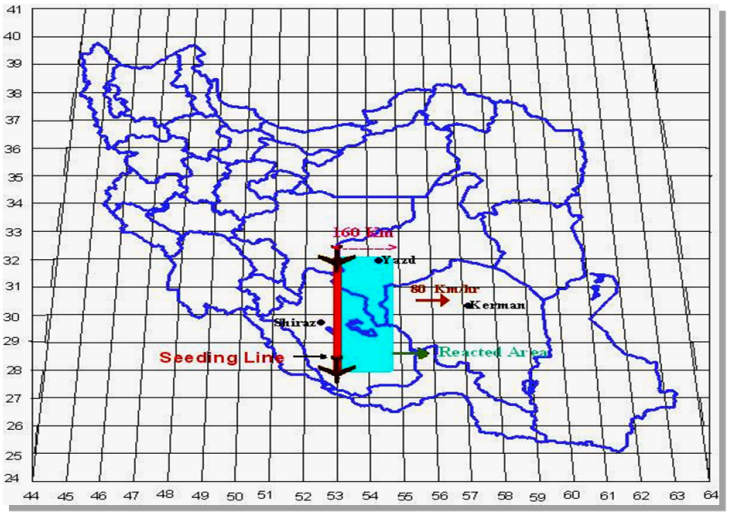


شکل ۱. فلوچارت مراحل تحقیق

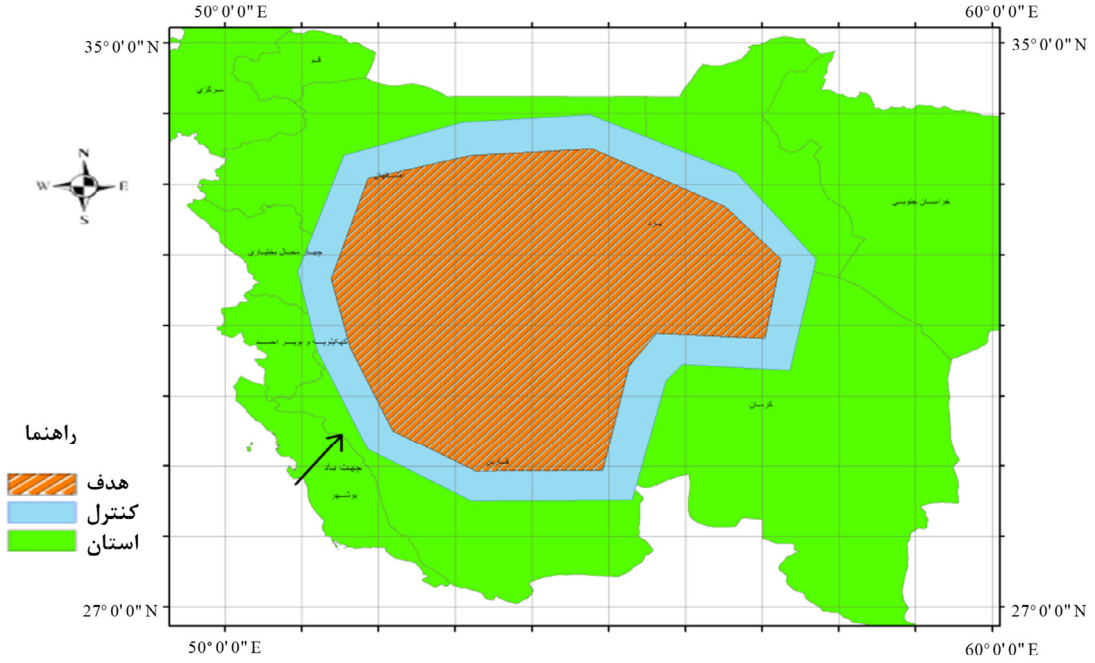
بایستی منطقه هدف و کنترل برای هر ماه جداگانه تعیین شود. ضمنا به منظور مقایسه نتایج پروژه های انجام شده در ایران با دیگر کشورها و ارائه آن به مجامع علمی، و از طرف دیگر پایه ریزی ارزیابی ها بر اساس ماه میلادی، ارزیابی کلیه پروژه‌های باروری ابرها در ایران بر اساس ماه‌های میلادی انجام می‌شود.

ب-روش کنترل ثابت

در روش کنترل ثابت، پس از تعیین منطقه هدف ماهیانه، یک منطقه با پراکنش مناسب ایستگاه‌های دارای سابقه تاریخی و در بالادست منطقه هدف و تا حد امکان نزدیک به آن با داشتن ضریب همبستگی بالا و ترجیحاً بیش از ۹۵٪ با



شکل۲. منطقه تحت تأثیر مواد در یک مسیر باروری که با توجه به حمل دو ساعته باد تعیین می‌شود.



شکل۳. منطقه هدف و کنترل در روش کنترل شناور ارزیابی پروژه های باروری ابرها

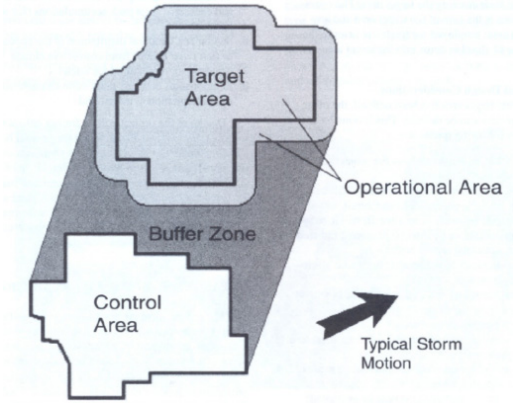
منطقه هدف انتخاب شده است. در معادلات به جای ارتفاع بارش ایستگاه‌های کنترل، حجم بارش منطقه کنترل منظور می‌شود. معیار نزدیک بودن دو منطقه تا حد امکان یکسان بودن اقلیم دو منطقه و نیز تحت تأثیر قرار گرفتن هر دو آن‌ها با سیستم‌های ابری مشابه می‌باشد. در عین حال فاصله بین منطقه کنترل و منطقه هدف بایستی به اندازه‌ای باشد که اطمینان از عدم آلودگی منطقه کنترل به مواد باروری وجود داشته باشد. علاوه بر این بایستی کنترل‌های لازم برای مشابه بودن روند بارش در ایستگاه‌های منطقه هدف و منطقه کنترل انجام شود (دنیس، ۱۹۸۰). لازم به ذکر است که برای

تعیین بهترین منطقه کنترل چند منطقه کنترل در نظرگرفته شد و پس از ترسیم مناطق هدف وکنترل، بین ارتفاع بارش ایستگاه‌های مناطق هدف وکنترل از سال ۱۹۷۳ تا ۲۰۰۶ ضریب همبستگی محاسبه شده است. هر منطقه‌ای که ضریب همبستگی بیشتری با منطقه هدف داشت به عنوان منطقه کنترل در نظرگرفته شد و بقیه مناطق کنترل حذف شدند. برای به دست آوردن حجم بارش مناطق هدف وکنترل از نقشه های رستری ارتفاع بارش از سال ۱۹۷۳ تا ۲۰۰۶ که در مرکز ملی باروری ابرها موجود است، استفاده شده است. به این ترتیب که نقشه رستری ارتفاع بارش هر سال بر روی نقشه منطقه هدف – کنترل به دست آمده قرار داده شد وحجم بارش محدوده هدف وکنترل برای هر سال به دست آمد. به این ترتیب حجم بارش ۳۴ سال برای هریک از مناطق هدف وکنترل در هرماه به دست آمده است. برای سال ۲۰۰۹ نیز به همین روش حجم بارش مناطق هدف وکنترل محاسبه گردید. سپس برای حجم‌های محاسبه شده با استفاده از نرم افزار Spss یک فاصله اطمینان به دست آمده است.

برای محاسبه میزان بارش قابل انتظار از فرمول‌هایی که دارای رابطه خطی هستند و از نرم افزار Spss به دست آمده است استفاده شد. در این فرمول‌ها به جای x حجم بارش واقعی منطقه کنترل مربوط به سال ۲۰۰۹ قرار داده شده و حجم بارش قابل انتظار منطقه هدف به دست آمده است. برای اطمینان از صحت حجم‌های قابل انتظار به دست آمده از این فرمول‌ها، حجم قابل انتظار را با فاصله اطمینان مقایسه می‌کنیم. اگر این حجم در محدوده فاصله اطمینان قرار گیرد صحت آن تأیید می‌شود. به منظور تعیین تأثیر باروری بر میزان بارش، حجم واقعی منطقه هدف در سال ۲۰۰۹ با فاصله اطمینان مقایسه‌گردید. اگر این حجم در محدوده فاصله اطمینان دو منطقه هدف وکنترل قرار گرفت به این معنی می باشد که افزایش بارش رخ نداده است واصطلاح reject به معنای رد شده برای آن استفاده می‌شود. اگر این میزان کمتر از حد محدوده فاصله اطمینان دومنطقه باشد کاهش بارش، و اگر بیشتر باشد افزایش بارش حاصل‌شده است. در نهایت با محاسبه اختلاف حجم بارش واقعی و حجم بارش قابل انتظار محاسبه نهایی حجم آب استحصالی از پروژه باروری ابرها انجام شده است، و سپس درصد افزایش بارش ناشی از اجرای پروژه باروری ابرها محاسبه گردیده است.

لازم به ذکر است که در روش استاندارد که در دنیا استفاده می‌شود منطقه کنترل از نظر اقلیمی، هواشناسی و ترجیحاً توپوگرافی و ابعاد شبیه منطقه هدف بوده و از نظر سرعت و جهت باد در موقعیتی قرار دارد که در معرض آلودگی مواد قرارنگرفته و در مسیر حرکت سیستم بارورشده نباشد. شکل ۴ نحوه تعیین انتخاب منطقه کنترل را نشان می‌دهد.

فرض اولیه این است که بخشی از بارش واقعی که در هر ماه در استان اصفهان در سال آبی ۸۸-۱۳۸۷ رخ داده است حاصل اجرای پروژه باروری ابرهاست. البته این یک فرضیه است که هدف اصلی ارزیابی نیز در مرحله اول آزمون آن و در صورت اثبات، محاسبه مقدار این بخش از بارش می باشد. در



شکل ۴. نحوه استاندارد انتخاب منطقه کنترل (وودی و روزنفلد، ۲۰۰۴)

این تحقیق برای رسیدن به این هدف فرآیندهای متعدد زمان بر و پیچیده‌ای انجام شده و از نرم افزارهای مختلفی که به همین منظور طراحی شده است نیز استفاده گردیده است. به طور کلی وخلاصه مراحلی که جهت انجام ارزیابی پروژه باروری ابرها در استان اصفهان (سال آبی ۸۸-۱۳۸۷) در این تحقیق طی شده به شرح زیر می‌باشد:

۱- ترسیم مسیرهای پروازی و نقاط شلیک برای هر پرواز بصورت جداگانه

۲- ترسیم منطقه هدف یا منطقه تحت تأثیر پروژه برای هر پرواز

۳- ترسیم منطقه هدف بصورت ماهیانه

۴- انتخاب شبکه مناسب باران‌سنجی در استان‌های واقع در محدوده پروژه و مناطق مجاور

۵- گردآوری، تکمیل و تصحیح آمار ماهیانه ایستگاه‌های منتخب (حذف داده‌های پرت و بازسازی داده‌های مفقوده) برای دوره ۳۴ ساله از سال ۱۹۷۳ لغایت ۲۰۰۶ میلادی با حذف سال‌های باروری.

۶- اخذ آمار روزانه ایستگاه‌های منتخب از سازمان‌های متولی(سازمان آب منطقه ای و سازمان هواشناسی استان) و تبدیل آمار آن‌ها از روز و ماه شمسی به روز و ماه میلادی برای ماه‌های ژانویه، فوریه، مارس و آوریل.

۷- ارزیابی به روش کنترل شناور : تعیین محدوده منطقه کنترل و سپس انتخاب بهترین ایستگاههای کنترل برای هر زون با توجه به نقشه‌های همباران تاریخی و با رعایت فاصله ۷۰ کیلومتری از مرز منطقه هدف در این فرآیند سعی‌گردیده است ایستگاه‌های کنترل در منطقه‌ای مشابه با منطقه هدف از نظر بارندگی قرار داشته باشند. تخمین و به عبارتی پیش بینی حجم بارش قابل انتظار در زون‌های هدف انتخابی در صورت عدم انجام پروژه باروری ابرها با استفاده از بهترین معادله رگرسیون تاریخی چند متغیره خطی با توجه به حجم ماهیانه تاریخی ایستگاه‌های واقع در منطقه هدف (متغیر وابسته) و ارتفاع بارش ایستگاه‌های کنترل (متغیر مستقل) با استفاده از نرم افزار Statgraph.

۸- محاسبه حجم بارش واقعی در زون‌های هدف انتخابی و مناطق هدف استانی با استفاده از آمار اخذشده با استفاده از نرم افزار Surfer.

۹- ارزیابی به روش کنترل ثابت(دنیس، ۱۹۸۰: ۴): در این روش پس از تعیین منطقه هدف ماهیانه یک منطقه‌ای با پراکنش مناسب ایستگاه‌های دارای سابقه تاریخی و در بالادست منطقه هدف و تا حد امکان نزدیک به آن با داشتن ضریب همبستگی بالا و ترجیحاً بیش از ۹۵٪ با منطقه هدف انتخاب شده و در معادلات به جای ارتفاع بارش ایستگاه‌های کنترل، حجم بارش منطقه کنترل منظور می‌شود. معیار نزدیک بودن دو منطقه، تا حد امکان یکسان بودن اقلیم دو منطقه و نیز تحت تأثیر قرار گرفتن هر دو آن‌ها با سیستم‌های ابری مشابه می باشد. در عین حال فاصله بین منطقه کنترل و منطقه هدف بایستی به اندازه‌ای باشد که اطمینان از عدم آلودگی منطقه کنترل به مواد باروری وجود داشته باشد. علاوه بر این بایستی کنترل های لازم برای مشابه بودن روند بارش در ایستگاه‌های منطقه هدف و کنترل انجام شود. در صورت بزرگ بودن منطقه هدف، این منطقه به مناطق مختلف اقلیمی تقسیم شده و برای هر کدام از آنها به صورت مجزا منطقه کنترل انتخاب می‌شود. با این روش نقش بسیار زیاد یک ایستگاه در نتایج ارزیابی کاهش می‌یابد.

۱۰- محاسبه اختلاف حجم بارش واقعی و بارش قابل انتظار در زون‌های هدف انتخابی و محاسبه نهایی حجم آب استحصالی از پروژه باروری ابرها در استان (در هر دو روش این کار انجام می شود).

۱۱- محاسبه درصد افزایش بارش ناشی از اجرای پروژه باروری ابرها در استان (در هر دو روش این کار انجام می شود).

نتایج و بحث

نتایج به دست آمده از ارزیابی پروژه باروری ابرها در استان اصفهان در دوره چهارماهه ژانویه تا آوریل ۲۰۰۹ با استفاده از دو روش کنترل شناور و کنترل ثابت به ترتیب در جداول شماره ۱و ۲ نشان داده شده است. جدول۱ نشان می‌دهد که در بین ماه‌های ژانویه تا آوریل، برای ماه‌های فوریه و مارس افزایش بارش و برای ماه‌های ژانویه و آوریل کاهش مقدار بارش را با استفاده از روش کنترل شناور داریم. در مجموع چهار ماه ذکر شده مقدار افزایش بارش با استفاده از این روش برابر

جدول ۱. نتایج نهایی ارزیابی پروژه باروری ابرها در استان اصفهان در دوره چهارماهه ژانویه تا آوریل ۲۰۰۹ با روش کنترل شناور

ماه	مساحت تحت پوشش KM^2	تعداد پرواز	حجم بارش واقعی (هزار متر مکعب)	حجم بارش قابل انتظار (هزار متر مکعب)	درصد افزایش بارش
ژانویه	۲۹۶۸۸	۲	۵۹۸۰۰/۵۲	۶۳۱۲۷/۳۳	-۵
فوریه	۲۸۷۸۶	۳	۱۲۴۱۶۱	۷۰۵۴۶/۰۱	۷۱
مارس	۱۹۷۲۰	۲	۱۳۵۳۳۱	۱۰۳۳۰۶/۱	۲۸
آوریل	۱۷۴۶۵	۳	۶۸۷۶۹/۲۳	۱۰۲۶۴۰/۶	-۲۷/۵
مجموع ۴ ماه	۹۵۶۵۹	۱۰	۳۸۸۰۶۱/۷	۳۳۹۶۲۰/۱	۱۲/۴

جدول ۲. نتایج نهایی ارزیابی پروژه باروری ابرها در استان اصفهان در دوره چهارماهه ژانویه – آوریل ۲۰۰۹ باروش کنترل ثابت

ماه	حجم بارش واقعی (هزار متر مکعب)	حجم بارش قابل انتظار (هزار متر مکعب)	درصد افزایش بارش
ژانویه	-	-	Reject
فوریه	۱۲۴۱۶۱	۱۳۰۶۹۵/۸	۷۶
مارس	۱۳۵۳۳۱	۷۹۱۴۰۹۱	۳۱
آوریل	۶۸۷۶۹/۲۳	۵۳۷۹۵۹۶	-۳۳
۴ماه	۳۲۸۲۶۱/۲	۲۶۳۵۶۲/۶	۲۴/۵

با ۱۲/۴٪ بدست آمد. همچنین جدول ۲ نشان می‌دهد که با استفاده از روش کنترل ثابت برای ماه‌های فوریه و مارس افزایش بارش و برای ماه آوریل کاهش مقدار بارش را داریم و در ماه ژانویه تغییری در مقدار بارش رخ نداده است. در مجموع چهار ماه ذکر شده مقدار حاصل از افزایش بارش برای روش کنترل ثابت برابر با ۲۴/۵٪ بدست آمد. نکته مهم در این‌جا این است که در مجموع چهار ماه مورد نظر و بر اساس هر دو روش ذکرشده در پروژه باروری ابرها در اصفهان افزایش بارندگی اتفاق افتاده است هر چند میزان این افزایش در دو روش با هم متفاوت است.

در شکل ۵ درصد تغیرات بارش محاسبه شده با دوروش کنترل ثابت وکنترل شناور نشان داده شده است. با توجه به این شکل بیشترین مقدار افزایش درصد بارش مربوط به ماه فوریه در روش کنترل ثابت است.

در این تحقیق میزان تغییرات بارندگی حاصل از باروری ابرها با استفاده از روش‌های کنترل ثابت و کنترل شناور در طول ماه‌های ژانویه، فوریه، مارس و آوریل سال ۲۰۰۹ (سال آبی ۱۳۸۸-۱۳۸۷) در استان اصفهان مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد با استفاده از روش کنترل شناور در ماه‌های ژانویه و آوریل به ترتیب برابر با ۵ - و ۲۷/۵- درصد کاهش بارش و در ماه‌های فوریه و مارس به ترتیب برابر با ۷۱٪ و ۲۷٪ افزایش بارش ایجاد شده که در مجموع ۴ ماه ۱۲/۴ درصد افزایش بارش به وقوع پیوسته است. همچنین با روش کنترل ثابت در ماه‌های فوریه ، مارس و آوریل به ترتیب برابر ۷۶٪ و ۳۱٪ افزایش بارش و در ماه آوریل برابر با ۳۳ - درصد کاهش بارش داشتند که در مجموع چهار ماه ۲۴/۵ درصد افزایش بارش فراهم شده است. بررسی طرح‌های باروری ابرها در مناطق مختلف توسط پور محمدی (۱۳۹۰)، مجومرد و همکاران (۱۳۹۴) و مانتون و وارن(۲۰۱۱) نشان می‌دهد که در بیشتر موارد بازخورد مثبتی در افزایش بارش وجود دارد.که پور محمدی(۱۳۹۰) در حوزه آبریز گاو خونی ۴۶ ٪ افزایش بارش، مجومرد و همکاران (۱۳۹۴) در استان فارس ۱۵٪ افزایش بارش و مانتون و وارن (۲۰۱۱) در استرالیا برابر با ۱۴٪ افزایش بارش در اثر اجرای این طرح‌ها گزارش کردند.

شکل ۵. نمودارردصد تغییرات بارش با دو روش کنترل ثابت وشناور در استان اصفهان

نتایج حاصل از این تحقیق نشان‌دهنده آن است که فناوری باروری مصنوعی ابرها جهت تولید بارش می‌تواند به عنوان یک راهکار موثر در افزایش بارندگی مد نظر قرار گیرد. افزایش حدود ۲۰ درصد بارندگی در سال علاوه بر تقویت منابع آبی منطقه می‌تواند تاثیر بسزایی در افزایش رطوبت خاک داشته که این خود هم چسبندگی خاک را افزایش داده و آن را در مقابل فرسایش مقاوم‌تر می‌نماید و هم باعث توسعه بیشتر پوشش‌گیاهی زمین (تنوع گونه‌ای و درصد تاج پوشش گیاهی) و نیز میزان مواد آلی خاک می‌گردد که خود نقش بسزایی در حاصل‌خیزی و پایداری خاک ایفا خواهد کرد. در بسیاری از مناطق خشک و حتی نیمه‌خشک که میزان بارندگی و رطوبت خاک اصلی‌ترین عامل محدودکننده توسعه منابع آب ، توسعه کشاورزی خصوصا دیم کاری و تجدید حیات پوشش گیاهی است افزایش ۲۰ درصدی بارش می‌تواند تحول قابل ملاحظه‌ای ایجاد نماید و این در کاهش فرایند بیابانزایی که اصلی‌ترین مشکل مناطق خشک ایران است می‌تواند تاثیر قابل توجهی داشته باشد. البته از نظر میزان تاثیر این افزایش بارش روی منابع آب زیرزمینی ، رژیم جریان‌های سطحی و .... نیاز به تحقیق و بررسی جداگانه وجود دارد و در حال حاضر نمی‌توان در این خصوص اظهار نظر قطعی نمود. با بررسی روی نتایج بدست آمده در مورد ارزیابی پروژه‌های باروری ابرها اولین نکته‌ای که قابل توجه است، این است که، نتایج حاصل از ارزیابی ارتباط زیادی به روش اجرای ارزیابی و شرایط و امکانات موجود بستگی دارد. همان طور که مشاهده شد نتایج ارزیابی در آمریکا وچین مقدار قابل توجهی را نشان می‌دهد. اما در کشورهایی مانند کشورهای عربی، ترکیه و ایران، این مقدار افزایش بارش در مقایسه با کشورهایی که افزایش بارش چشمگیری داشته‌اند، کم است.

روش استاندارد انجام عملیات باروری و ارزیابی آن به این صورت است که ابتدا مناطق هدف وکنترل را با توجه به شرایط واستانداردهای موجود برای مناطق هدف وکنترل مانند شرایط توپوگرافی، اقلیمی، پراکنش ایستگاه‌ها و... مشخص‌گردد وسپس با توجه به وجود شرایط مناسب برای باروری، اقدام به انجام عملیات باروری ابرها شود. اما در ایران به منظور استفاده از تمام فرصت‌های باروری (بنا بر اظهار مجریان این پروژه ها)، عملیات باروری بدون در نظر گرفتن مناطق هدف وکنترل و با توجه به وجود شرایط مساعد، مانند وجود سیستم ابری مناسب برای باروری، این عملیات انجام می‌گیرد. در این حالت پس از اتمام عملیات باروری، مراحل ارزیابی انجام می شود و طبیعتا مناطق هدف وکنترل پس از باروری مشخص می‌شوند

که در این صورت مشکلات فراوانی نیز به وجود می آید. به طور مثال ممکن است باروری در مناطقی انجام شود که پراکنش ایستگاه‌ها وضعیت مناسبی را نداشته باشند که این امر تأثیر زیادی بر نتیجه ارزیابی دارد. در بسیاری از موارد هنگام ارزیابی، مشکل کمبود تعداد ایستگاه‌ها ارزیابی را با مشکل مواجه می‌کند. در ادامه تعدادی از محدودیت‌ها ومشکلات موجود در ارزیابی پروژه باروری ابرها در استان اصفهان در سال ۲۰۰۹ که موضوع این تحقیق بوده است ذکر شده است:

۱- حمل دو ساعته مواد تزریق شده به ابر: فرض حمل دوساعته مواد، فرضی است که با استفاده از تجارب موجود در پروژه‌های خارج از کشور به دست آمده است و لزوماً نمی‌توان گفت در کلیه شرایط جوی فرض درستی است. زیرا انتقال مواد در اتمسفر به عوامل متعددی از جمله چگالی ماده، سرعت باد و شرایط تلاطمی اتمسفر بستگی دارد. بنابراین اولاً منطقه‌ای که به عنوان منطقه هدف در نظر گرفته می‌شود نمی‌تواند به درستی نشان دهنده منطقه هدف واقعی باشد و ثانیاً نمی‌توان ادعا کرد ایستگاه‌هایی که به عنوان کنترل در نظر گرفته شده‌اند کاملاً خارج از منطقه تاثیر مواد باروری هستند.

۲- کمبود ایستگاه بارانسنجی: ایستگاه‌های هواشناسی مورد استفاده شامل ایستگاه‌های همدیدی، اقلیم شناسی و باران‌سنجی سازمان هواشناسی، و ایستگاه‌های بارانسنجی و تبخیرسنجی وزارت نیرو است. ایستگاه‌های وزارت نیرو معمولاً در نزدیکی رودخانه‌ها و ایستگاه‌های سازمان هواشناسی معمولاً در داخل شهرها یا فرودگاه‌ها تأسیس می شوند. معمولاً در مناطق مرتفع به دلیل صعب العبور بودن و نبود متصدی، ایستگاه به تعداد کافی تأسیس نمی‌شود. علاوه بر آن در مناطق بیابانی نیز به دلیل تغییرات کم بارش، تعداد ایستگاه‌های کمتری تأسیس‌شده و بنابراین تراکم ایستگاه‌ها پایین است. این مسأله باعث شده تا در این پروژه در داخل بخش‌های زیادی از مناطق هدف ایستگاهی برای ارزیابی عملیات باروری وجود نداشته باشد که این مسئله دقت ارزیابی را کاهش می‌دهد.

۳- نوع ایستگاه‌ها: کلیه ایستگاه‌های موجود(سینوپتیک، باران‌سنجی،کلیماتولوژی و تبخیرسنجی) دارای دقت یکسانی در اندازه‌گیری و ثبت داده‌های بارش نیستند. ایستگاه‌های سینوپتیک به دلیل بهره‌گیری از متصدی آموزش دیده و رعایت استانداردهای لازم معمولا از دقت بالاتری برخوردارند ولی متأسفانه تراکم کمتری نسبت به ایستگاه‌های دیگر دارند.

۴- دسترسی به آمار و اطلاعات

دسترسی به آمار و اطلاعات و کمبود اطلاعات هواشناسی علاوه بر اینکه در پیشرفت پروژه‌های ارزیابی خلل ایجاد می‌کند، باعث‌شده تا در بحث ارزیابی اثرات نیز در مواردی به ناچار به دلیل نبود داده‌های ماهانه از تعدادی از ایستگاه‌ها (در منطقه هدف یا منطقه کنترل) صرف نظر شود. این مسأله باعث بروز نوعی خطا در نتایج می‌شود.

۵- محاسبه حجم بارش: دقت در محاسبه حجم بارش، رابطه مستقیم با توزیع ایستگاه‌ها در منطقه هدف دارد و توزیع نامناسب ایستگاه‌ها می‌تواند باعث بروز خطا در حجم بارش شود.

۶- اثرات ارتفاعی در بارش: با توجه به اینکه تراکم ایستگاه‌ها در مناطق مرتفع پایین می‌باشد و از طرفی حجم بالایی از بارش‌ها در مناطق مرتفع رخ می‌دهد، بنابراین میزان افزایش بارش تحت تأثیر مواد باروری کمتر برآورد می‌شود، زیرا بیشترین تأثیر مواد باروری در مناطق مرتفع است. همه این محدودیت‌ها و مشکلات تأثیر زیادی بر روش اجرای ارزیابی و نتایج حاصل از آن دارند، به طوری‌که ممکن است نتیجه ارزیابی در یک ماه به طور محسوسی خیلی بالا و در یک ماه منفی به دست‌آید. همانطور که مشاهده شد نتیجه ارزیابی در اصفهان در ماه آوریل در هر دو روش منفی بود و در ماه فوریه افزایش چشمگیری داشت که در قبول کردن این نتایج باید کمی احتیاط کرد و تمام شرایط، امکانات ومحدودیت‌ها را در پذیرش نتایج مورد بررسی قرار داد. بهترین راه برای کاهش اثر محدودیت‌ها و خطاها در ارزیابی این است که بخش اجرای عملیات باروری و بخش ارزیابی قبل از انجام عملیات ارزیابی با هم هماهنگ باشند و تا جایی که امکان دارد مناطق هدف وکنترل قبل از اجرای عملیات باروری به روش استانداردی که موجود است، مشخص شوند.

جمع‌بندی

نتایج تحقیق حاضر با استفاده از روش‌های کنترل ثابت و

کنترل شناور نشان دادند که اجرای طرح باروری ابرها در استان اصفهان سبب افزایش بارش شده است. بیشترین مقدار افزایش بارش در ماه فوریه با استفاده از روش کنترل ثابت بدست آمده است. برای مقایسه روش‌های کنترل شناور وکنترل ثابت به موارد زیر می‌توان اشاره کرد:

۱- در روش کنترل شناور، انتخاب ایستگاه‌های کنترل از مناطق پایین دست منطقه هدف که احتمال بالایی از آلودگی به مواد باروری در آنها وجود دارد، باعث عدم اطمینان به نتایج بدست آمده می‌شود. گرچه در این پروژه سعی‌شده تا حد امکان از این ایستگاه‌ها استفاده نگردد اما بعضاً به دلیل عدم وجود ایستگاه هواشناسی ناگزیر ایستگاه‌های پایین دست مورد استفاده قرار گرفتند. ولی در روش کنترل ثابت منطقه کنترل نباید در پایین دست منطقه هدف باشد تا از آلودگی به مواد باروری در امان باشد.

۲- یکسان نبودن شرایط اقلیمی و هواشناسی منطقه کنترل با منطقه هدف در روش کنترل شناور به هر حال مسئله ای است که می‌تواند موجب خطا گردد.

۳- عدم تشابه کامل شرایط توپوگرافی مناطق هدف وکنترل که باعث ایجاد شرایط بارشی غیر مشابه بین مناطق هدف و کنترل می‌گردد. اما در روش کنترل ثابت منطقه کنترل تا حد امکان از نظر شرایط اقلیمی بویژه بارش, توپوگرافی و تراکم ایستگاه‌های دارای سابقه تاریخی بایستی مشابه با منطقه هدف باشد.

۴- نقش بسیار زیاد یک ایستگاه: در روش کنترل شناور یک معادله رگرسیون بین ارتفاع بارش ایستگاه‌های منطقه کنترل و حجم بارش در منطقه هدف در هر ماه تعیین می‌گردد که در این مورد انتخاب ایستگاه‌ها نقش مهمی در نتیجه ارزیابی دارد به طوری که با حذف یا اضافه کردن ایستگاهی نتیجه تغییر می‌کند. امادر روش کنترل ثابت به دلیل این‌که این معادله بین حجم بارش منطقه کنترل وحجم بارش منطقه هدف تعیین می‌گردد این مشکل تا حدی کمتر است. با تمام این دلایل باز هم نمی‌توان به طور قطعی اظهار داشت که کدام روش بهتر است. با توجه به اینکه ارزیابی با روش کنترل ثابت تنها در سال ۲۰۰۹ صورت گرفته است، لازم است تا این روش چندین بار تکرار شود تا نتیجه بهتری از لحاظ مقایسه این دو روش ارائه گردد. همان طور که در نتایج ارزیابی مشاهده‌شد، در ماه ژانویه نتایج متفاوتی از اجرای دو روش به دست آمد. در روش کنترل ثابت نتیجه ارزیابی این گونه بود که هیچ گونه تغییری در روند بارش در این ماه دیده نشد. این در حالی است که روش کنترل شناورکاهش درصد بارش در این ماه را نشان می‌دهد. بنابراین بهتر است برای اثبات برتری یک روش بر روش دیگر برای پروژه‌های مختلف این دو روش ارزیابی در کنار هم مورد استفاده قرار گیرند و با داده‌های مشاهداتی موجود و ممکن مقایسه شده و سپس با توجه به نتایج به دست آمده در پروژه‌های متعدد با شرایط و موقعیت‌های مختلف نسبت به برتری این روش‌ها نسبت به هم قضاوت جامع‌تری صورت گیرد.

مراجع

۱- پورمحمدی، س.، ۱۳۹۰، بارورسازی ابرها تکنیک نوینی جهت کاهش اثرات خشکسالی و تغییرات اقلیمی (مطالعه موردی حوضه آبریز گاوخونی)، هفتمین همایش ملّی علوم و مهندسی آبخیزداری ایران، دانشگاه صنعتی اصفهان، ۷ الی ۸ اردیبهشت ماه ۱۳۹۰.

۲- خطیبی، و.، ۱۳۸۱، تأثیرات باروری وتأثیر متقابل گرد وغبار بیابانی ومرزهای جنوبی سیستم‌های ابری بارانزا در اسرائیل، مرکز ملی تحقیقات و مطالعات باروری ابرها، یزد.

۳- زهرایی، ب.، پور سپاهی سامیان.ح.، ناصری، م. و طاهری، م.، ۱۳۹۹، ارزیابی آماری عملیات بارورسازی ابرهای فلات مرکزی ایران در سال آبی ۹۴-۹۳، م. فیزیک زمین و فضا، ۴۷، ۲۰۳-۱۸۷.

۴- سیدحسنی، م.، ۱۳۸۱، تشکیل و رشد کریستال‌های یخ، مرکز ملی باروری ابرها، یزد.

۵- علومی مجومرد، م.، زارع، م. و پورمحمدی، س.، ۱۳۹۴، ارزیابی نقش بارور سازی ابرها در افزایش استحصال آب در استان فارس با استفاده فنون سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی، نشریه سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی، ۷، ۸۶-۷۷.

۶- گلکار، ف.، ۱۳۷۷، ارزیابی عملیات باروری ابرها، رصد خانه مرکزی آب وهواشناسی روسیه، مرکز ملی تحقیقات و مطالعات باروری ابرها، یزد.

۷- گلکار، ف.، حجام، س. و وظیفه دوست، م.، ۱۳۹۳، بکارگیری محصولات سنجنده مدیس با هدف کمک به اجرای باروری ابرها، م. پژوهش‌های اقلیم شناسی، ۱۹، ۱۱۱-۹۳.

۸- مهندسین مشاور آب آوران دشت کویر.، ۱۳۸۹، ارزیابی پروژه باروری ابرها در استانهای اصفهان ، قم، مرکزی و مناطق مجاور (پروژه زاگرس) در سال آبی ۸۸- ۱۳۸۷.

۹- مهندسین مشاور کاریزاب.، ۱۳۸۹، ارزیابی پروژه باروری ابرها در استان‌های یزد،کرمان، فارس ومناطق مجاور (پروژه فلات مرکزی) در سال آبی۸۸- ۱۳۸۷.

10- Al-Fenadi, Y.. 2001, Cloud seeding experiments in Arab countries: History and results

Libyan National Meteorological Centre (LNMC)., Tripoli, Libya.

11- Bruintjes, R.T.. 1999, A review of cloud seeding experiments to enhance precipitation and some new prospects. Bulletin of the American Meteorological Society., 80, 805-820.
12- Delene, D.. 2009,Case study of the 9 April 2009 brown cloud: Observations of Unusually High Cloud Droplet Concentrations in Saudi Arabia., Atmospheric Sciences Department, University of North Dakota.
13- Dennis, A.S., I980, Weather Modification by Cloud Seeding. Institute of Atmospheric Sciences. South Dakota School of Mines and Technology, USA.
14- Dong, X., Zhao, C., Huang, Z., Mai, R., Lv, F., Xue, X., Zhang, X. H., Hou. S., Yang.Y., Yang,Y and Sun.Y., 2021, Increase of precipitation by cloud seeding observed from a case study in November 2020 over Shijiazhuang China. Atmospheric Research, 262, 1057-1066.
15- Gabriel, K. R., 1999, Ratio statistics for randomized experiments in precipitation stimulation. Appl Meteor, 38, 290-301.
16- Geerts, B., Miao, Y. Q., Yang, R., Rasmussen, R. M and Breed, D., 2010. An airborne profiling radar study of the impact of glaciogenic cloud seeding on snowfall from winter orographic clouds., J. Atmos Sci, 67, 3286 – 3302.
17- Griffith, A and Solak, M. E., 2002, Economic feasibility assessment of winter Cloud seeding in the Boise
river drainage Idaho., Journal of Weather Modification, 34, 39-46.
18- Kulkarni, J. R., Morwal, S. B and Deshpande, N. R., 2018, Rainfall enhancement in Karnataka state cloud seeding program Varshadhare 2017., Atmospheric Research, 219, 65-76.
19- Parkinson, S.. 1995, Idaho Power Company's Cloud Seeding Program.
20- Selahattin, I., 2001, A Review of cold cloud Rain Enhancement Program in Turkey: 1990-1993, Istanbul Technical Univercit., Department of Meteorology, Istanbul Turkey,
21- Shivaji Rao, T., 2005, Cloud Seeding For India. India.
22- Silverman, B. A.. 2010, An evaluation of eleven operational cloud seeding programs in the watersheds of Sierra Nevada Mountains., J. Atmospheric Research ,97, 526-539.
23- Stanley, A., Changnon, J and Head, A., 1990, Review of Methods To Evaluate Precipitation Modification In North America., Atmospheric Sciences Section.
24- Manton, M and Warren, L., 2011, A Confirmatory Snowfall Enhancement Project in the Snowy Mountains of Australia. Part II: Primary and Associated Analyses., Appl, Meteor Climatol, 50, 1448-1458.
25- National Center for Atmospheric Research (NCAR).. 2009, Southeast Queensland cloud seeding research program. Report prepared by NCAR for the State Government of Qeensland.
26- Umran Komuscu. A.. 1999, Weather Modification Activities in Turkey: Some Selected Projects Implemented in Major Urban Areas .,Turkish state Meteorological Service, Research Department Kalaba, Ankara 06120, Turkey.
27- Woodley, W. L and Rosenfeldb, D., 2004, The Development and Testing of a New Method to Evaluate the Operational Cloud-Seeding Programs in Texas., Journal of Applied Meteorology, 43, 249-263.

Journal of Meteorology and Atmospheric Sciences *Volume 4, Issue 1, Spring 2021*

Evaluation of the effects of cloud seeding projects in precipitation increase (Case study: Isfahan Province)

Mohammad Taghi Dastorani[1*], Zahra Mohammadi Moghadam[2], Amir Esmailpour Zarmehri[3] Mansoureh Seyedhasani[4]

*[1]Professor, Faculty of Natural Resources and Environment, Ferdowsi University of Mashhad**

[2] MSc Graduate in Arid Land and Desert Management, Faculty of Natural Resources, Yazd University

[3] MSc Graduate in Watershed Management, Faculty of Natural Resources and Environment, Ferdowsi University of Mashhad

[4] Senior expert, National cloud seeding research center

*Corresponding Author Email: *dastorani@um.ac.ir*

Received: 28 September 2020, accepted: 04 January 2021

ABSTRACT

One of the key questions about cloud seeding projects is the real effects of these projects on regional precipitation increase. In the other word, answer to the question: "How much rainfall would be obtained in addition to the normal condition due to execution of cloud seeding projects?" This research was designed to evaluate the effects of cloud seeding on precipitation increase in Isfahan province in year 2008-2009 using and also comparing the float control and constant control methods. In float control method, based on the assumption of two hours effects for the injected materials, the cumulated target area is specified by over-laying the maps of seeding flights carried out in each month. Then a strip of 50 to 70 km width from the target area border is considered as the control area. It needs to be mentioned that in constant control method, precipitation volume of the control area is used instead of precipitation height of the stations. Results obtained from this research show that the constant control method indicates no variation of precipitation in comparison to the normal condition for Jan. 2009, where it shows 76% and 31% increase of precipitation respectively for Feb. and March and 33% decrease for the April. For the float control method, the results show respectively 71% and 28% increase in Feb. and March, but 5% and 27.5% decrease respectively for the Jan. and April.

Keywords: *Cloud seeding, Water generation, Cloud seeding evaluation, Precipitation, Isfahan*

HOW TO CITE THIS ARTICLE

Dastorani, M.T.; Mohammadi Moghadam, Z.; Esmailpour Zarmehri, A.; Seyedhasani; M. (2021). Evaluation of the effects of cloud seeding projects in precipitation increase (Case study: Isfahan Province). J. Meteorol. Atmos. Sci., 4(1): 1-14

COPYRIGHTS

Copyright for this article is retained by the author(s), with publication rights granted to the JMAS Journal. This is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution License (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).