مکانیسم باروری ابرها

علی براتیان
دانشجوی دکترای اقلیم‌شناسی دانشگاه اصفهان

مقدمه

بشر از دیرباز و پیش از آنکه به فکر تولید باران باشد، درصدد جلوگیری از رگبارهای سیلابی و طوفان بوده و آرزو داشته که روزی اختیار وضع هوا و وقوع پدیده‌های جوی را در دست داشته باشد.

در سالهای اخیر، مجدداً مباحث زیادی درباره باران مصنوعی مطرح شده است. چنین تصورمی‌رود یا حتی وعده داده می‌شود که می‌توان به دلخواه و صرف‌نظر از مکان و زمان،باران موردنیاز را تولیدنمود.

این امر امیدواری و انتظار بیشتری را درخصوص بارش مصنوعی برای جامعه بشری ایجاد کرده است .امروزه با توصیه سریع دانش هواشناسی و نیز پیشرفتهایی که در فناوری، تبادل داده‌ها روی داده، فکر دخالت در رخدادهای جوی به طور جدی از عالم آرزو وارد قلمرو تحقیق و تجربه شده است. اما تاکنون هواشناسان به این نتیجه رسیده‌اند که تنها در مقیاس محدود و کوچک می‌توان مقدمات تسریع یا تأخیر پاره‌ای از آثار جوی را فراهم آورد.

در دهه‌های اخیر به منظور نیل به اهدافی چون ایجاد مصنوعی بارش، زدودن مه،(به ویژه در فرودگاهها) و نیز سبک کردن تگرگ، کوششها و مطالعات زیادی برای تغییردادن آهنگ طبیعی فرایندهای میعان و بارش به عمل آمده است که تمامی آنها متکی به دانش کنونی بشر در زمینه فیزیک ابر می‌باشد. شروع فرایندهای بارش (جامد یا مایع) به وجود قطرکهای آب و هسته‌های بارش ساز در اندازه‌های مناسب و به تعداد کافی در واحد حجم نیازمند است .

برای بارورسازی و ایجاد باران مصنوعی در ابرهای گرم(ابرهای با دمای بالاتر از صفردرجه‌سلسیوس) از ذرات نمک معمولی و قطره‌های آب و در ابرهای سرد(ابرهای با دمای زیرصفردرجه سلسیوس) از بلورهای یخ، یخ خشک، یدید نقره، خاکهای معدنی و گردوغبار آتشفشانها به عنوان هسته‌های بارش ساز استفاده می‌شود و اخیراً نیز کاربرد شیوه‌های جدیدتری چون استفاده از دی اکسیدکربن مایع تحت آزمایش وبررسی است .

مشکل عمده‌ای که آزمایشهای بارورسازی باآن مواجه هستند، ارزیابی نتایج آنها است. شک نیست که بارش ابرهای منفردرامی‌توان به کمک عملیات بارورسازی، بهبودبخشیدولی نکته مهم این است که خوداز پیش توانایی (یاتقریباً توانایی) تولیدبارش طبیعی راداشته باشندواز آنجاکه بارش طبیعی کاملاً تابع شرایط مکانی وزمانی می‌باشد، نمی‌توان مطمئن بودکه اگرچنین ابری بارورنشده بود، بارش هم نمی‌دادویابرعکس این که آیاابرموردنظر(یامقداری از آن) دراثرعملیات بارورسازی بوده است؟ بنابراین به نظرمی‌رسد، تنهاآزمایشهای کنترل شده به وسیله ارزیابی‌های آماری، مناسب می‌باشد. البته ممکن است قبل از آن که ابربه مرحله رشدوگسترش خود رسیده باشد، به کمک عملیات بارورسازی آن رابه بارش واداشت و یااینکه حتی مقدار بارش راکاهش داد و یا زمان آن را نیز عوض کرد. این روش در عملیات مربوط به جلوگیری از بارش تگرگ و نیز تلاشهایی که برای تضعیف طوفانهای مخرب انجام می‌شود،به کارگرفته شده است .

از روش هسته پاشی، بررسی انجام عملیات مه زدایی در فرودگاهها، جاده‌ها، زمینهای ورزشی و... نیز استفاده می‌شود. **به طورکلی فناوری بارورسازی ابرها در مقوله تعدیل آب وهوا در سه محور اصلی موردتوجه محققین قرارگرفته است که عبارتنداز :**

۱ - کنترل محدود و مقطعی بارش

۲ - مه زدایی

۳ - تگرگ زدایی

با توجه به تنوع شرایط آب وهوایی مناطق مختلف و همچنین ویژگیهای جغرافیایی و توپوگرافی هر منطقه یک روش همراه با ماده بارورساز منحصربفرد برای همه مناطق جغرافیایی و شرایط آب وهوایی نمی‌توان معرفی کرد.

تاریخچه

انجام آزمایش جهت باروری ابر اولین بار در ۱۳ نوامبر ۱۹۴۶ توسط وین سنت شیفر صورت گرفت. شیفر حدود ۱/۵ کیلوگرم یخ خشک(CO_2) راتوسط یک هواپیمای سبک از قسمت فوقانی ابرکومه‌ای عدسی سا ابرسرد در نزدیکی کوههای برکشایر در غرب ماساچوست رها نموده ۵ دقیقه بعد ابر موجود به دانه‌های برف تبدیل شد که در اینجا دانه‌ها قبل از اینکه فرایند نهشت کاملاً انجام شود درحدود ۶۰۰ متر به درون هوای خشک زیر کف ابر نفوذ کردند.

دانشمندانی چون والتر فیندسن(Findeisen) برژرون و ونر از اولین کسانی بودند که به نقش هسته‌های یخ ساز در بارش پی بردند. مطالعات این دانشمندان، آنها را کم کم به این واقعیت رساند که فرایندهای مهم جوی شامل بارش، گاهی اوقات به علت فراوانی و یا کمبود هسته‌های یخ ساز که در جو وجوددارد و یا ممکن است به طورمصنوعی وارد جو شوند رخ می‌دهند و گاهی نیز به علت کمبود این هسته‌های یخ ساز تحلیل می‌روند. شایان ذکر است در اوایل ۱۹۳۲ اولین انستیتوی باران مصنوعی در کشور شوروی سابق تأسیس شد.

فیندسن درطی جنگ جهانی دوم بر فراز کشور چکسلواکی توسط دانه‌های شن عمل باروری را انجام داد که موفق نبود و نشان داد که این ذرات به عنوان هسته‌های یخ ساز، کارآمد نیستند.

ونگوت(ایالات متحده) یدیدنقره(AgI) را مطلوب‌ترین ترکیب دانست و دریافت بلورهای یدیدنقره در دمای حدود ۳- درجه سانتیگراد به عنوان هسته‌های یخی عمل می‌کنند.

با آزادشدن پروانه بهره‌برداری باروورسازی ابراز انحصار شرکت جنرال الکتریک، افراد و شرکتهای زیادی از بارورسازی ابر به عنوان یک کار تجارتی بهره گرفتند و در سال ۱۹۵۰ حدود ۱۰ درصد از خشکیهای ایالات متحده تحت قرارداد شرکتهای تجاری بارورسازی ابر بودند.اما به دلیل مخالفتهای بسیار از ۳۰ ژوئن ۱۹۷۶ هیچ بودجه‌ای برای پشتیبانی باروری ابرها اختصاص داده نشد. در ایران به منظور افزایش میزان ریزشهای جوی و بالاآمدن سطح آب موجود درپشت سدهای کرج و لتیان، فعالیت ایجاد باران مصنوعی با استفاده از تکنولوژی تلقیح ابرها به وسیله ژنراتورهای تصعید ید و نقره، در سالهای ۱۳۵۷-۱۳۵۴ به مدت چهارسال در قسمتی از حوضه آبی رودخانه‌های کرج و جاجرود به وسعت ۱۵۰۰ کیلومترمربع توسط وزارت نیرو به مرحله اجرادرآمد. این عملیات به وسیله ۳۰ دستگاه(Oceton Generator) که هر دستگاه ۳۰ گرم (AgI) را در هر ساعت تصعید و به زیر ابرهای آسمان منطقه مذکور برای تحریک آنها و ایجاد تسریع در فرایند بارش می‌فرستاد، انجام گردید. براساس ارزیابی توسط مجری طرح در حوضه موردنظر حدود ۱۵-۱۰ درصد افزایش بارش رخ داده است.

از سال ۱۳۶۷ طرح باروری ابرها دراستان یزد مطرح گردید. در سال ۱۳۷۴ به هواشناسی یزد واگذارگردید و در منطقه‌ای به وسعت ۱۰۰۰ کیلومترمربع در ارتفاعات شیرکوه در فاصله زمانی پاییز تا اواخر بهار بررسی گردید. در سال ۱۳۷۵-۱۳۷۴، ۷۶/۴ درصد موارد تلقیح ابرها منجر به وقوع بارش شده است و میانگین بارش سالیانه استان حدود ۱۰-۱۵ درصد افزایش حاصل گردیده است.

در تابستان ۱۳۷۸ در استانهای حاشیه دریای خزر عملیات باروری ابرها اجراگردید و تاکنون گزارشی از تأثیر و موفقیت آن اعلام نشده است.

در بهمن ماه ۱۳۷۵ مرکز ملی تحقیقات و مطالعات باروری ابرها توسط وزارت نیرو در یزد تأسیس و رسماً فعالیت خود را آغاز کرد. در طول زمستان و اوایل بهار سال ۱۳۷۷ عملیات بارورسازی ابرها به منظور افزایش بارش با ۲۸ پرواز در ارتفاعات شیرکوه و بخشی از استانهای کرمان و فارس به مرحله اجرادرآمد ولی گزارشی در مورد تأثیر آن منتشرنگردید.

در سال ۱۳۷۷ نیز سازمان هواشناسی با تشکیل شورای پژوهشی هواشناسی فیزیکی و تعدیل آب وهوا فعالیت خود را در زمینه مطالعات باروری ابر شروع نمودکه دبیرخانه این شورا در مرکز تحقیقات هواشناسی فیزیکی و تعدیل آب وهوای استان یزد مستقرمی‌باشد.

ساز وکاربارش

توده هوایی ابر درحال صعود، ممکن است به سطح دمای صفردرجه جو نرسد، یعنی بخارآب در اثر چگالش به صورت قطرکهایی که از نظر شکل و اندازه ناهمگن هستند باقی بماند که در این حالت آن را ابرگرم گویند. یا اینکه دراثر رشدقائم، بخشی از آن و یا نمای آن در بالای تراز انجماد(صفردرجه) رسیده، و در این شرایط، حالات مختلف آب، یعنی بخار، قطرک و بلوریخی به صورت آزاد، در مجاورت هم قرارگیرند. این نوع ابرها را ابرهای سرد یا ابرهای آمیزشی گویند. البته عمل انجماد قطرک‌ها و یا تصعید بخارآب و تبدیل آنها به یخ در ابرهای سرد، به آسانی صورت نگرفته، و در شرایطی ممکن است که ابر تا حدود ۵- تا ۱۵- درجه سانتیگراد و حتی بیش از این سرد شود، اما بلورها و ذرات یخ ظاهرنشوند که به این شرایط فراسردی گویند.

ساز وکار و چگونگی وقوع بارش از هر یک از ابرهای سردوگرم تاحدودی متفاوت است. درابرهای گرم پس از عمل تراکم، قطرک‌های ناهمگن، در اثر برخورد در حین سقوط یکی شده و بدین ترتیب رشدمی‌یابند.وقتی که قطرک‌ها، از نیم میلیمتر تجاوزکنند، دراین صورت فرایند ادغام نقش مهمی را در تشکیل و رشد قطرات باران ایفامی‌کنند. به هرصورت هسته‌های چگالش نقش مهمی را در تشکیل نطفه‌های بارش به عهده دارد. اما درمورد ابرهای سرد و فوق سرد و چگونگی تشکیل بارش در آنها نظریه‌های دیگری ارائه شده که مهمترین آنها نظریه برژرون است. براساس این نظریه در واقع دومین منشأ نطفه‌های بارش، ابرهای آمیزشی هستند. در دماهای پایین تاحد تقریبی ۴۰- درجه سانتیگراد به علت کمبود هسته های طبیعی انجماد، قطرک‌های ابر، غالباً به صورت فراسرد باقی می‌مانند دراین صورت ذرات یا بلورهای موجود در ابر فراسرد به علت اختلاف در فشاربخار اشباع درروی قطرک‌های آب و ذرات آب حاصله برروی ذرات مذکور می‌نشیند. از این رو به آنها هسته‌های انجماد(Icing Nuclui) نیزمی‌گویند. آزمایشها و تجربیات متعددی نشان داده‌اند که یک قطرک کروی ۱۰ میکرومتری موجود در یک ابرآبی، با دمای ۱۵- درجه سانتیگراد، می‌توان در مدتی کمتر از ۱۰ دقیقه رشدکرده و به شکل یک بلور دندانه‌ای با شعاع بیش از ۲۵۰ میکرون درآید. این بلور از این پس هم به صورت نهشته و هم از طریق انباشت می‌تواند به رشد خود ادامه دهد. فرایندهای انبوهش(Aggregation) تجمع(Collection) ویخزدگی (Riming) مراحل پیچیده‌تری هستند که در تبدیل نطفه‌های بارش مذکور به دانه‌های برف یا باران، نقش مهمی را بازی می‌کنند. به هر صورت وقوع

بارش طبق نظریه مذکور منوط به دوشرط زیراست:

اولاً: تعداد بی‌شماری قطرکهای درحال تأخیر در انجماد، در ابر وجودداشته باشد.

ثانیاً تعداد زیادی بلورهای یخی نیز در ابر موجود باشند تا فعل و انفعالات زنجیره‌ای بعدی را شروع نمایند.

با توجه به نوع ابر فرضیه‌هایی که براساس آنها ابرهای سردوگرم بارورمی‌شوند، نیز با یکدیگر تفاوتهای اساسی دارند:

در مورد ابرهای گرم فرض این است که با پراکندن و ورود موادشیمیایی و مخصوص چون نمک طعام، قطرات ریزآب و یا مواد دیگری که جاذب‌الرطوبه هستند به درون ابر، می‌توان در ویژگیهای خود ساختاری، فیزیکی و ترمودینامیکی و به خصوص بیناب بخارآب و قطرکهای ابر، چنان تغییراتی را ایجاد نمودکه به این طریق بتوان در میزان و توسعه زمانی- مکانی رخداد بارش تحولاتی را ایجادنمود. در کشورهای مداری و جنب مداری اغلب ابرهای دارای پتانسیل بارش همرفتی بوده و طبیعتاً به تراز انجماد نمی‌رسند. از این رو امکان افزایش بارش از چنین ابرهای گرمی، از طریق تقویت کارآیی فرایندهای تصادم- همامیزی، موضوعی است که در دهه‌های اخیر موردتوجه این کشورها قرارگرفته است.

در بعضی از ابرهای گرم توسعه و بسط قطرکهای بزرگ، ممکن است آنقدر آهسته و کند صورت پذیرد که تا مراحل آغازین رشد به وسیله تصادم- همامیزی تا زمانی که ابر مرحله بلوغ خود را بگذراند، به تأخیر افتد. دراصل امکان افزایش بارش از این چنین ابرهایی یا بارورسازی آنها توسط ذرات جاذبه‌الرطوبه و یا قطرات آب، در جهت تسریع فرایندهای مذکور رشد وجوددارد. به هرحال تاکنون درمورد تأئید و کارایی این تکنیک‌ها به اندازه کافی و لازم آزمایش و تجربه به عمل نیامده است. در واقع تحقیقات انجام شده عمدتاً راجع به بارشهای سرد بوده و در این زمینه هنوز ابهامات زیادی وجوددارد. مثلاً یکی از مسائل مربوطه، این است که برای بارورسازی ابرهای گرم، به مقادیر زیادی مواد جاذب‌الرطوبه نیاز است. به عنوان مثال اگر عمل تلقیح ابر با ذرات نمک با قطر ده میکرون و چگالی دوگرم درسانتیمترمکعب انجام گیرد و هر ذره بتواند نهایتاً قطراتی به قطر دوونیم میلیمتر را ایجادنماید، دراین صورت بیش از صدکیلوگرم نمک طعام برای تولید یک میلیون مترمکعب باران(معادل با یک میلیمتر باران برروی هزارکیلومترمربع) لازم باشد، به هرصورت در این زمینه تجربیات کمی به دست آمده که در اکثر آنها، براساس شواهد فیزیکی و آماری به نظرمی‌رسد چندان توفیقی در افزایش میزان بارش حاصل نشده است.

در مورد ابرهای سرد و بارورسازی آنها غالباً مشاهده می‌شودکه ابرهای فوق سرد، در دماهای سردتر از صفردرجه سانتیگراد هنوز هم مقادیری قطرک‌های مایع به صورت آب فراسرددارند. اندازه گیریهایی که توسط هواپیماهای تحقیقاتی صورت گرفته، و جالبتر از آن، تبدیل قطرکهای فراسرد آب به ذرات یخی برروی شیشه این هواپیماها، مبین آن است که مقادیر متنابهی از آب فراسرد در این چنین ابرهایی، به بارش تبدیل نشده، و نهایتاً تبخیرمی‌شوند. این وضع نشانه‌ای از کارایی پایین ابر برای تولید بارش، به علت ناکافی بودن هسته‌های انجماد است. درواقع این مقدار آب فراسرد را می‌توان به عنوان ذخایری از آب تلقی نمودکه هنوز از سامانه‌های ابری طبیعی اخذ نشده‌اند. در مورد بارورسازی این گروه از ابرها به منظور افزایش بارش، درحال حاضر از دوطریق می‌توان ابر را بارورنمود:

۱- باروی ایستایا(میکروفیزیکی) (Static Seeding)

۲- باروری حرکتی (Dynamic Seeding)

کارآیی بارش

کارایی بارش رامی‌توان به عنوان درصدی از آب متراکم شده درداخل یک سیستم ابرکه به صورت بارش به زمین می‌رسد تعریف کرد. مابقی آب متراکم شده در ابراز طریق فرایندهای مختلفی به بخار تبدیل می‌شوند اگر با باروری ابرها، کارایی بارش زیادشود می‌تواند افزایش بارش تشخیص داده شود. باروری ابرها به دو روش زیر انجام می‌پذیرد:

۱ - بارورسازی ایستا(میکروفیزیکی)

هدف از این نوع باروری افزایش کارایی بارش به وسیله ازدیاد تعداد بلورهای یخ می‌باشد. مقدار ابر، زمان مناسب برای رشد ذرات ابر و تقویت سرعت قائم جریان هوا در ارتباط با سرعت سقوط ذرات بارش، همه برای رشداندازه ذرات بارش، دترمینال قابل ملاحظه‌ای راتشکیل می‌دهند.

اندازه ابر بیشتر به وسیله مقدار رطوبت موجود، ساختار دمای جوی و صعود موانع کوهستانی برای ابرهای کوهساری، یا شناوری برای ابرهای همرفتی کنترل می‌شود. زمان موجود برای رشد ذره ابر در ابرهای همرفتی به وسیله مقدار شناوری ابر که جریان‌های هوا را ایجادمی‌کند، که کند یا سریع ذرات را به ابرمی‌رساند کنترل می‌شود. سرعت قائمی که به سرعت سقوط آب شهابها ارتباط دارد به وسیله صعود مانع کوهساری و مقدارشناوری ابرهمرفتی، یا هر دوکنترل می‌شود. اینها تماماً مشخص می‌کندکه به طورکلی نمی‌توانند با روشهای باروری ایستا مؤثرباشند.

باروری یخ سازی به صورت طراحی باروری یا افزایش ذرات یخ به ابرها یا بخشهایی از هوای صاف تعریف شده است. این هدف می‌تواند از دوطریق انجام پذیرد:

یکی از طریق سردکردن هوا تا دمای پایین تراز ۴۰- درجه سانتیگراد که هسته بندی همگن به وجودمی‌آید. یا به قدرکافی هسته یخ طبیعی موجود را فعال می‌سازد و دیگر با افزودن هسته یخ مصنوعی مناسب تولید ذرات یخ به وسیله رسوب میعان- یخبندان، یا یخبندان قطرکهای ابر یا قطرات باران موجود در ابرهای طبیعی تجمع هسته یخ که می‌تواند بلورهای یخ را در دمای ۱۲- درجه سانتیگراد تولیدکند به طور نمونه نزدیک(L) ۱/۱۰۰ هوامی‌باشند. تراکم هسته یخ فعال طبیعی در ۲۰- درجه سانتیگراد، به طورنمونه تقریباً (L)۱ در ۲۸- درجه سانتیگراد تجمع هسته یخ فعال طبیعی تقریباً (L)۱۰۰ می‌باشد. محاسبات مدل ابر نشان می‌دهدکه ۱۰ تا ۱۰۰ بلور یخ درهر لیتر عموماً برای استفاده مؤثر تراکم ابر به وسیله فرایند یخ موردنیاز می‌باشد.

روشهای به کار رفته برای این نوع بارورسازی، عموماً فرایندهای

انجماد مانندیخ زدگی، انبوهش بلورهای یخی، انجماد قطرک‌های ابر و یا تکثیر مصنوعی و طبیعی ذرات یخ را دربرمی‌گیرد و به همین دلیل به آنها روشهای گلاسیوژنیک می‌گویند.

۲ - بارورسازی حرکتی:(نقش باروری جهت افزایش وتوسعه ابر)

مفهوم واقعی بارورسازی حرکتی، تلقیح ابرفراسرد با مقادیر کافی هسته‌های انجماد و یا سردکننده‌های دیگر در جهت تسریع در فرایندهای یخ سازی ابراست دراین صورت انرژی رهاشده حاصل از رشد بلورهای یخی در اثر تبخیر قطرکهای ابر و یا انجماد قطره‌های فراسرد، موجب افزایش شناوری ابرهای مذکور و نهایتاً رشد قائم آنهامی‌شوند. در شرایط مساعد این امر باعث رشد و ضخیم‌تر شدن ابر، انتقال قائم آب موجود به ترازهای فوقانی جو، و افزایش ضخامت ابرشده و نهایتاً ممکن است افزایش بارش دریافتی در سطح زمین رادرپی داشته است.

درنظرگرفتن باروری ابر به منظور ایجاد ابرهای گسترده و فعال به طورطبیعی عمدتاً محدود به ابرهای نوع همرفتی(کومولوس) می‌باشد. اگرچه نتایج مدلسازی ابر در دهه ۱۹۸۰ امکان تحریک تشکیل ابرهای همرفتی را در ابرهای پوشنی به وجودمی‌آورد. زمان مناسب برای افزایش گسترش ابر با نتایج باروری از زمانهایی با مختصر افزایش در دمای ابر با توجه محیط ابر و درنتیجه شناوری ابر را افزایش می‌دهد. دمای ابرکومولوس چند دهم درجه سانتیگراد افزایش پیدامی‌کند و می‌تواند منجر به افزایش رشدابر شود. در ابرهای لایه‌ای، جو موجود معمولاً حالت ترمودینامیکی دارد به طوری که چنین تغییرات دمایی که انسان به وجودمی‌آورد، بالارودهای یک چندسانتیمتر در هرثانیه تا یک متردرثانیه به کندی تغییر خواهدکرد. بنابراین ابرهای همرفتی ضخیمی را به وجودمی‌آورد. هنوز باروری ایستا که دربارش تأثیرمی‌گذارد بیشترین روش رایج برای کاربرروی ابرهای پوشنی است.

شیوه‌های مختلف هسته بندی

شیوه‌های مختلف هسته بندی و انجماد و سرعت رهاسازی گرمای نهان و انجمادبه شرح زیرمی‌باشد:

۱ - هسته بندی تصادمی یا(Scavening) که اثرات مرتبط باهسته بندی از طریق مهاجرت ذرات به طرف قطرات آب به وسیله حرکت وزشی(Bremnian) صورت می‌گیرد.

۲ - هسته‌های اسارتی یا(Cap tare) زمانی پدیدمی‌آیدکه قطرات فوق سرد نسبتاً زیادی سقوط کند و بلورهای یخ بسیار کوچکتر راکه قبلاً از طریق هسته بندی شکل گرفته‌اند به اسارت درآورد.

۳ - تشکیل بلورهای یخ از طریق نهشته شدن (Deposition) بخار و رشد پی درپی آنها در محیط اشباع شده از آب.

۴ - به هم پیوستگی(Accretion) یا هسته بندی الحاقی زمانی اتفاق می‌افتد که قطرات آب فوق سرد نسبتاً کوچک به طور دینامیکی از طریق ذرات برف دانه به طرف بالا جاروب می‌شوند.

تکنیکهای باروری ابر

درحال حاضر تقریباً اکثر تکنیکهای تغییر شرایط جوی به منظور افزایش بارش مبتنی بر انتشار هسته‌های انجماد در برون و یا در زیر ابرهاست که این عمل به سه روش اجرامی‌شود.

۱ - تکنیکهای روسی: که در آنها از راکت برای پرتاب از سطح زمین تا ارتفاع ۷۰۰۰ تا ۸۰۰۰ متراستفاده می‌شود.

۲ - تکنیکهایی که هسته‌های انجماد را از طریق ژنراتورهای تصعید که در سکوی زمین نصب شده به درون ابر منتشرمی‌شود.

۳ - استفاده از هواپیما جهت بذرپاشی در قسمتهای مختلف ابر.

کنترل کیفی عملیات باروری(زیست محیطی)

استفاده از مواد ردیاب که به طور همزمان با بالونها رهامی‌شوند و اندازه‌گیریهای بالونهای آزمایش برای تعیین بهتر سطح اثر روی بعضی موقعیتهای ویژه هواشناسی پیشنهادمی‌شود. برای این منظور اندازه‌گیری حجم نقره آب باران کاملاً مفیداست.

از سویی اثرات سمی احتمالی(AgI) در آزمایشاتی که جهت اثرات میکروفیزیکی پخش می‌گردد بعیدنیست .اثرات معکوس چنین تکنیکهای باروری قطعی شمرده شده است. از سویی ملاحظه می‌شود که بی اثرساز فتولتیک نقره اثر ناچیزی برعوامل باروری دارد و پایداری مواد باروری و اثرات باد هنوز موضوع پژوهشهای گسترده دیگری هستند.

گاهی اوقات احتمال آلودگی سیستماتیک نواحی تحت کنترل با مواد باروری که برای اثرگذاری روی نواحی هدف رهاشده‌اند نیز وجوددارد. شرایط هواشناسی و تغییرات شدیدباد، جهت باد را به طور ناگهانی تغییرمی‌دهد و غالباً به دام افتادن مواد باروری تحت تأثیر اینورژن و اثرات ناهمواری برروی جهت باد می‌تواند وضعیت ناخواسته‌ای به بارآوردکه نتایج آزمایش را تحت تأثیر قراردهد.

منابع

۱ - امکان سنجی باروری ابرها در ارتفاعات جنوبی کرمان، کمال امیدوار، پایان نامه دکتری دانشگاه تربیت مدرس، بهار ۱۳۸۰.

۲ - گزارش نهایی پروژه مطالعات مرتبط با تعدیل مصنوعی آب وهوا، پژوهشکده هواشناسی سازمان هواشناسی کشور، پاییز ۱۳۸۱.

۳ - خبرنامه شماره یک، شورای پژوهشی هواشناسی فیزیکی وتعدیل آب وهوا، سازمان هواشناسی کشور، بهار ۱۳۷۸.

۴ - بررسی وضعیت بارش وامکان افزایش آن در حوضه آبی زاینده رود، محمد حسین مبین، پایان نامه دکتری دانشگاه اصفهان، زمستان ۱۳۷۸.

5 - Abbas,A.,Mustafa.A(1999),syrian Rain Enhancement Project,1991-1998,WMO,Report NO.31.