مرکز پژوهش‌های مجلس شورای اسلامی
دفتر مطالعات زیربنایی
مسلسل: ۲۰۷۹۱ ■ خرداد ۱۴۰۴

بررسی علمی و کارشناسی ابعاد مختلف استحصال آبهای جوی: اثربخشی و ملاحظات

بسم الله الرحمن الرحيم

تاریخ انتشار:
۱۴۰۴/۳/۱۷

شماره مسلسل: ۲۰۷۹۱
کد موضوعی: ۲۵۰

مرکز پژوهش های
مجلس شورای اسلامی

عنوان گزارش:
بررسی علمی و کارشناسی ابعاد مختلف استحصال آب‌های جوی: اثربخشی و ملاحظات

نوع گزارش: طرح/ لایحه ☐ راهبردی ■ نظارتی ☐ پیش نویس قانونی ☐

نام دفتر:
مطالعات زیربنایی(گروه آب)

تهیه و تدوین :
نرجس عبدالمنافی جهرمی (گروه آب)

مدیر مطالعه:
مهدی مظاهری

ناظران علمی:
محمد حسن معادی رودسری ، میثم پیله‌فروش

ناظر علمی خارج از مرکز:
احد وظیفه(رئیس مرکز ملی اقلیم و مدیریت بحران خشکسالی)

ویراستار ادبی:
اکرم وحدانی‌فر

گرافیک و صفحه آرایی:
حمیده سادات وفایی

واژه‌های کلیدی:
۱. بارورسازی ابر
۲. استحصال آب جوی
۳. تعدیل وضع هوا
۴. ابرهای کوهساری
۵. یدور نقره

تاریخ شروع مطالعه:
۱۴۰۳/۰۹/۱۵

دفتر مطالعات زیربنایی

فهرست مطالب

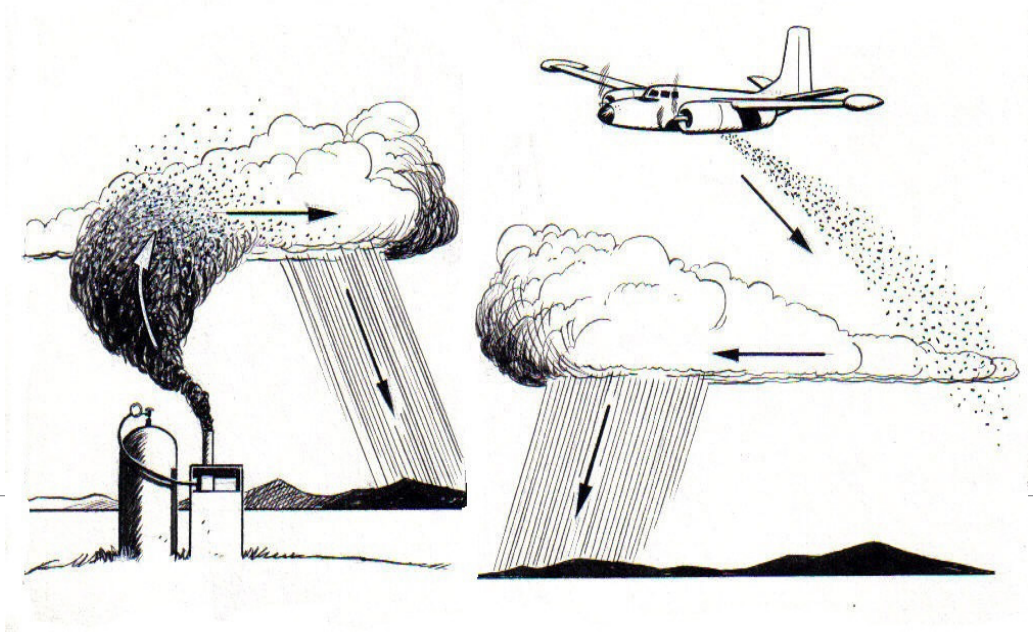
چکیده ۶
خلاصه مدیریتی ۷
۱. مقدمه ۸
۲. برخی مبانی علمی بارورسازی ابرها و تعدیل وضع هوا ۹
۳. انواع روش‌های بارورسازی ابرها ۱۰
۳-۱. بارورسازی در سیستم‌های ابر کوهساری زمستانی ۱۰
۳-۲. بارورسازی در سیستم‌های ابر همرَفتی ۱۱
۴. کارایی و آثار بارورسازی ابرها ۱۳
۴-۱. میزان موفقیت بارورسازی ابرها ۱۳
۴-۲. اثر بارورسازی ابرها بر بارش پایین‌دست جریان ۱۴
۴-۳. ملاحظات ارزیابی طرح‌های بارورسازی ابرها ۱۴
۵. روش‌های نوظهور تعدیل وضع هوا ۱۵
۶. دیدگاه‌های بین‌المللی درباره ابرها و تعدیل وضع هوا ۱۶
۷. بررسی تجارب برخی کشورها و نتایج پروژه‌های بارورسازی ابرها ۱۷
۷-۱. چین ۱۷
۷-۲. امارات متحده عربی ۱۸
۷-۳. ایالات متحده آمریکا ۲۱
۷-۴. استرالیا ۲۳
۷-۵. هند ۲۴
۸. بارورسازی ابرها و تعدیل وضع هوا از دیدگاه حقوقی و قانونی ۲۵
۸-۱. قوانین و مقررات مربوط به تعدیل وضع هوا در آمریکا ۲۵
۸-۲. کنوانسیون ژنو (۱۹۷۷) درباره تعدیل وضع هوا ۲۶
۹. آینده بارورسازی زمستانی ابرهای کوهستانی (بارورسازی یخ‌زا) ۲۷
۱۰. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری ۲۹
منابع و مآخذ ۳۱

فهرست جداول

جدول ۱. گزیده‌ای از نظرها و توصیه‌های مراجع معتبر علمی در خصوص تعدیل وضع هوا و بارورسازی ابرها ۱۶
جدول ۲. مشخصات ایستگاه‌های هدف و کنترل آزمایشات بارورسازی کشور امارات ۲۰

فهرست اشکال

شکل ۱. فرایند بارورسازی در ابرهای کوهساری زمستانی ۱۰
شکل ۲. بارورسازی یخ‌زا در ابر همرفتی ۱۲
شکل ۳. بارورسازی جاذب رطوبت یک ابر همرفتی ۱۳



بررسی علمی و کارشناسی ابعاد مختلف استحصال آب‌های جوی: اثربخشی و ملاحظات

چکیده

اثرگذاری انسان بر جو از طریق پروژه‌های تعدیل وضع هوا و در قالب طرح‌های بارورسازی ابرها و یونیزاسیون جو صورت می‌گیرد. در حال حاضر فناوری بارورسازی ابرها روش رایج‌تر تعدیل وضع هواست که طی آن اهداف افزایش بارش یا کاهش آثار مخرب جوی (مانند تگرگ) دنبال می‌شود. اثرگذاری بارورسازی ابرها بر افزایش بارش محدود است و از طرفی دیگر این پروژه‌ها باید تحت شرایط مختلف مناسب انجام شوند. برای آشکارسازی تأثیر بارورسازی ابرها در منطقه هدف و دوره زمانی قابل ملاحظه، نیاز به تحلیل آماری قوی و مؤثر با استفاده از داده‌های مربوط به تعداد زیادی عملیات بارورسازی در بازه‌های زمانی تعریف شده است. همچنین لازمه تداوم مطالعات و به‌کارگیری تمامی روش‌ها و فناوری‌های در دسترس، انجام مطالعات آماری اطمینان‌بخش با پشتیبانی مطالعات فیزیکی و مشاهدات هواشناسی برای بیان بدون ابهام تأثیر بارورسازی ابرهاست. یونیزاسیون جو، از دیگر روش‌های تعدیل وضع هوا، با هدف اثرگذاری بر جو و تغییرات آب و هوایی عمدی انجام می‌شود که هنوز آثار آن اثبات نشده است و از نظر علمی ابهام‌های جدی در این خصوص وجود دارد. نکته حائز اهمیت آن است که با توجه به ابهامات و عدم قطعیت‌های حاکم بر پروژه‌های بارورسازی ابرها و با توجه به وقوع دوره‌های کم‌بارش و خشک‌سالی‌های متوالی در کشور، در حال حاضر به‌کارگیری این روش‌ها، راهکار مؤثری برای مقابله با خشک‌سالی محسوب نمی‌شود و به نظر می‌رسد تمرکز بر روش‌های مدیریت مصرف منابع آب، به‌مراتب اثرگذاری بیشتری در عبور از چالش‌های موجود خواهد داشت.

خلاصه مدیریتی

بیان / شرح مسئله

رشد روزافزون تقاضا برای منابع آب و محدودیت منابع با کیفیت، کشورهای مختلف را به‌سمت استفاده از روش‌های جدید استحصال آب سوق داده است. محدودیت‌ها و چالش‌های موجود در زمینه منابع آب تجدیدشونده، استفاده از منابع آب نامتعارف را به‌عنوان ضرورت در کشورهایی که با کمبود این منابع مواجه‌اند، مطرح کرده است. یکی از روش‌های دستیابی به منابع آب‌های نامتعارف، استفاده از روش‌های بارورسازی ابرها و مدیریت بارش است. بیش از هشت دهه است که فناوری بارورسازی ابرها در برخی از کشورهای دنیا مورد استفاده قرار می‌گیرد. استفاده از این روش‌ها در کشورهای مختلف نتایج متفاوتی را نشان می‌دهد و پس از گذشت سالیان متمادی از شروع استفاده از این فناوری‌ها، همچنان در مستندات و مقالات علمی وحدت‌نظر در خصوص میزان اثربخشی این روش‌ها وجود ندارد. در کنار برخی گزارش‌ها، که حاکی از موفقیت این روش‌هاست، گزارش‌های بسیاری نیز از مجامع علمی مبنی‌بر محدودیت‌ها و چالش‌های استفاده از این روش‌ها منتشر شده است. در انتخاب روش و فناوری مربوط به بارورسازی ابرها، عواملی مانند شرایط اقلیمی، جغرافیای منطقه، نوع ابر، امکانات موجود و برخی عوامل دیگر نقش تعیین‌کننده دارند. علاوه‌بر روش‌های مبتنی‌بر استفاده از هسته‌های تراکم در بارورسازی ابرها، در سال‌های اخیر روش دیگری برای باران‌زایی تحت عنوان فناوری یونیزاسیون نیز مورد استفاده قرار گرفته است. مستندات قابل اتکای چندانی از این روش بارورسازی ابرها در دسترس نیست؛ اگرچه گزارش‌هایی از تلاش‌های صورت‌گرفته ازسوی برخی کشورها در این زمینه منتشر شده است.

نقطه‌نظرات / یافته‌های کلیدی

در کنار تلاش به‌منظور توسعه دانش و فناوری مربوط به بارورسازی ابرها و استحصال آب‌های جوی، یکی از حساس‌ترین مراحل انجام پروژه‌های بارورسازی ابرها، وجود سیستم‌های نظارتی، ارزیابی برای برآورد دقیق کارایی بارورسازی ابرها و تعیین میزان بارش اضافی ناشی از این پروژه‌هاست. علاوه‌بر این، ارزیابی اقتصادی نتایج بارورسازی ابرها نیز باید بررسی و تحلیل شود. همچنین در استفاده از فناوری بارورسازی ابرها، لازم است این نکته مدنظر قرار گیرد که هرگونه تغییر در چرخه آب، ممکن است سبب تغییرات زنجیره‌ای در فرایندهای زیست‌محیطی شود. از جمله بارورسازی ابرها در یک منطقه می‌تواند آثار غیرقابل قابل کنترلی در بارش مناطق مجاور داشته باشد.

نکته حائز اهمیت آن است که در حال حاضر، کشور فاقد سیستم و ساختار هماهنگ و جامع برای مطالعه، اجرا و ارزیابی نتایج به کارگیری فناوری بارورسازی ابرهاست و تاکنون هیچ‌گونه مستند علمی در این خصوص در کشور منتشر نشده است. به‌منظور آشکارسازی تأثیر بارورسازی ابرها در منطقه هدف و دوره زمانی قابل ملاحظه، نیاز به تحلیل آماری قوی و مؤثر با استفاده از داده‌های مربوط به تعداد زیادی عملیات بارورسازی در بازه‌های زمانی تعریف شده است. همچنین لازمه تداوم مطالعات و به‌کارگیری تمامی روش‌ها و فناوری‌های در دسترس، انجام مطالعات آماری اطمینان‌بخش با پشتیبانی مطالعات فیزیکی و مشاهدات هواشناسی برای بیان بدون ابهام تأثیر بارورسازی ابرهاست.

پیشنهاد راهکارهای تقنینی، نظارتی یا سیاستی

به‌دلیل تغییرپذیری سامانه‌های ابر و مقیاس انرژی بسیار زیاد درگیر در فرایندهای درون ابرها، علی‌رغم گذشت بیش از هشت دهه از فعالیت‌های بارورسازی، هنوز توافق جامعی درباره تأثیر بارورسازی ابرها و افزایش مصنوعی بارش وجود ندارد. به‌منظور آشکارسازی تأثیر بارورسازی ابرها در منطقه هدف و دوره زمانی قابل ملاحظه، نیاز به تحلیل آماری قوی و مؤثر با استفاده از داده‌های مربوط به تعداد زیادی عملیات بارورسازی در بازه‌های زمانی نسبتاً طولانی است. همچنین برای ارزیابی تأثیر بارورسازی در افزایش بارش، تداوم تحقیق و مطالعه با

به‌کارگیری تمامی روش‌ها و فناوری‌های در دسترس، شامل مطالعات آماری با داده‌های مشاهداتی زمین‌پایه و دورسنجی با طول دوره زمانی مناسب (شامل داده و اطلاعات تعداد زیادی عملیات بارورسازی مشابه و مطالعات فیزیکی و مدل‌سازی گروهی هواشناسی برای شبیه‌سازی بهینه فرایندهای فیزیکی و دینامیکی ابر) برای شناخت و ارزیابی اطمینان‌بخش تأثیر بارورسازی ابرها لازم و ضروری است. در این راستا، لازم است پروژه‌های بلندمدت مطالعاتی (فصلی یا سالیانه) در گستره و مقیاس حوضه‌های مجزای آبریز تعریف و ارزیابی شود. هنگام طراحی پروژه‌های بارورسازی ابرها، لازم است تمایز بین فازهای طراحی، عملیات، جمع‌آوری و تحلیل داده مورد توجه دقیق و جدی قرار گیرد تا ضمن اجتناب از خطای احتمالی، تحلیل نتایج و ارزیابی تأثیر احتمالی بارورسازی در منطقه هدف امکان‌پذیر باشد.

۱. مقدمه

تعدیل وضع هوا تلاشی برای ایجاد تغییرات کوتاه‌مدت در آب و هوا به‌منظور کاهش خسارت یا افزایش مصنوعی بارش است. بارورسازی ابرها در برخی مناطق دنیا به‌منظور افزایش مصنوعی بارش، انتشار امواج صوتی یا پخش مواد بارورکننده ابر با هدف کاهش احتمال وقوع تگرگ ناشی از طوفان‌های تندری و کاهش تأثیر منفی آن و مه‌زدایی در فرودگاه‌ها و بزرگ‌راه‌ها، نمونه‌های شناخته شده تعدیل وضع هوا محسوب می‌شوند [۱]. مطابق برخی گزارش‌ها، بارورسازی ابر در شرایط مناسب، پتانسیل احتمالی افزایش ۵ تا ۲۰ درصد بارش را برای موارد بارورسازی شده دارد که این امر منوط به وجود ابرهای مناسب برای بارورسازی است. گزارش‌هایی نیز وجود دارند که بیانگر تأثیر اندک یا تأثیر نداشتن بارورسازی در افزایش بارش است [۲، ۳ و ۴]. در فرهنگ هواشناسی از تعدیل وضع هوا اغلب به مفهوم بارورسازی ابر استفاده می‌شود [۵]. بارورسازی ابر با پخش و انتشار مواد شیمیایی مانند یدور نقره[1] یا ذرات نمک در اندازه‌های مختلف در ابرها توسط هواپیما یا ژنراتورهای زمینی سعی بر ایجاد شرایطی در محیط ابر دارد که موجب تسریع آغاز بارش یا طولانی‌تر شدن زمان بارندگی و گسترش ابر خواهد شد. همچنین در چند سال اخیر، برخی کشورها آزمایش‌هایی را با به‌کارگیری روش یونیزه کردن جو یا ابر و ایجاد میدان‌های الکتریکی انجام داده‌اند و تلاش می‌کنند تا با هدایت سامانه‌های ابری یا ایجاد ابر، سبب افزایش مصنوعی بارش در مناطق هدف شوند. شایان ذکر است که مجامع علمی جهانی در خصوص آثار و عملکرد این نوع روش سکوت کرده یا آن را مورد تردید قرار داده‌اند. گزارش علمی و فنی برنامه تحقیقات اقلیمی سازمان جهانی هواشناسی[2] نیز هنوز این روش را به‌لحاظ مؤثر بودن تأیید نکرده‌اند و براساس گزارش مربوطه در سال ۲۰۱۸، روش یونیزاسیون جو برای افزایش بارش فاقد مستندات لازم علمی برای تأیید عنوان شده است [۶].

1. AgI
2. World Meteorological Organization (WMO)

۲. برخی مبانی علمی بارورسازی ابرها و تعدیل وضع هوا

بارورسازی ابرها به‌عنوان یک روش تعدیل وضع هوا، افزودن مواد به داخل یک ابر با هدف تقویت تشکیل و رشد بلورهای یخ (در ابرهای سرد) و تسریع و تقویت فرایند میعان با عرضه هسته‌های میعان (ابرهای گرم) درنتیجه افزایش بارش (باران یا برف) است. به‌عبارت دیگر، بارورسازی ابرها روشی برای تأثیرگذاری بر ابرهای طبیعی و افزایش احتمالی بارش است که در آن مواد شیمیایی استفاده شده در رقابت با ذرات طبیعی موجب تسریع تشکیل باران از قطرک‌های ابر و توسعه سامانه ابری و در نهایت دریافت بیشتر آب از سامانه ابری می‌شود. این روش ابتدا در دهه ۱۹۴۰ میلادی در ایالات متحده آمریکا و در ایالت‌های نسبتاً خشک جنوب غرب این کشور آغاز شد.

بارورسازی ابر به دو روش متفاوت در ابرهای گرم و سرد انجام می‌شود. ابرهای سرد یعنی سامانه‌های ابری که بخش قابل توجهی از ابر در دمای زیر صفر درجه سانتی‌گراد قرار دارد و ستون ابر حاوی مقدار قابل توجهی آب در دمای زیر صفر است و اصطلاحاً آب اَبَرسرد[1] نامیده می‌شود. این روش با پخش ذرات شیمیایی شبیه بلورهای طبیعی یخ مانند یدور نقره (ذرات یخ‌دوست) به درون ابر انجام می‌شود. ابرهایی که تمام یا بیشتر ضخامت آنها در ارتفاعی با دمای بالاتر از صفر درجه سانتی‌گراد قرار داشته باشد، ابر گرم نامیده می‌شود. در ابرهای گرم از ذرات آب‌دوست مانند نمک برای بارورسازی استفاده می‌شود. پخش و انتشار هسته‌های میعان (ذرات بارورکننده) به درون سامانه ابر توسط هواپیما یا ژنراتورهای زمینی در دامنه مناطق کوهستانی انجام می‌شود.

آب و هوای ابری لزوماً همیشه منجر به بارش باران یا برف نمی‌شود. در واقع ممکن است ابرها تشکیل شوند و چند روز نیز تداوم داشته باشند، اما منجر به تشکیل قطره‌های باران نشود. کلیه ابرها اعم از سرد و گرم طی فرایند میعان تشکیل می‌شوند؛ اما فقط میعان برای بارش کافی نیست، درصورتی‌که هریک از فرایندهای پیچیده مربوط به تشکیل قطره باران و بلور یخ و فرایندهای بعدی مانند برخورد و به‌هم‌چسبندگی قطرک‌ها و سایر تغییرات فیزیکی مورد نیاز برای رشد انجام نشود یا به‌صورت کامل شکل نگیرد، ابر ناکی منجر به بارش نخواهد شد [۷].

در حال حاضر بیشتر آزمایش‌ها و برنامه‌های عملیاتی بارورسازی ابرها از نوع سرد است. بارورسازی سرد عبارت است از: رهاسازی عامل‌های یخ‌ساز از قبیل قرص‌های یخ خشک و هسته‌های یدور نقره از طریق ژنراتورها و پرتابه‌های زمینی یا هواپیما به درون ابر، به‌منظور تسریع زمان آغاز و نیز افزایش فرایند تشکیل هسته‌های یخی نسبت به آنچه در حالت طبیعی رخ می‌دهد. باید توجه داشت که همه ابرها برای بارورسازی مناسب نیستند. فقط ابرهایی مناسب‌اند که معیارهای اصلی لازم را برای بارورسازی دارا باشند. علاوه‌بر این، بدیهی است که اگر ابری در جو وجود نداشته باشد، عملیات بارورسازی قابل انجام نیست.

اگرچه خشک‌سالی را می‌توان انگیزه‌ای برای اجرای برنامه‌های بارورسازی ابرها دانست، ثابت شده است که بارورسازی ابرها در دوره‌های غیرخشک‌سالی مؤثرتر است؛ زیرا خشک‌سالی حاصل دوره‌های طولانی‌مدت بدون وجود ابرهای باران‌زاست و بارورسازی ابرها براساس وجود ابرها به‌ویژه انواع همرَفتی آنها انجام می‌گیرد. بنابراین فرصت‌های بارورسازی طی دوره‌های خشک‌سالی بسیار محدود است. **نکته مهم این است که اصولاً بارورسازی ابرها روشی برای مقابله و برطرف کردن خشک‌سالی و آثار تغییر اقلیم نیست و نهایتاً ابزاری در جعبه ابزار مدیریت آب در یک حوضه محسوب می‌شود** [۶].

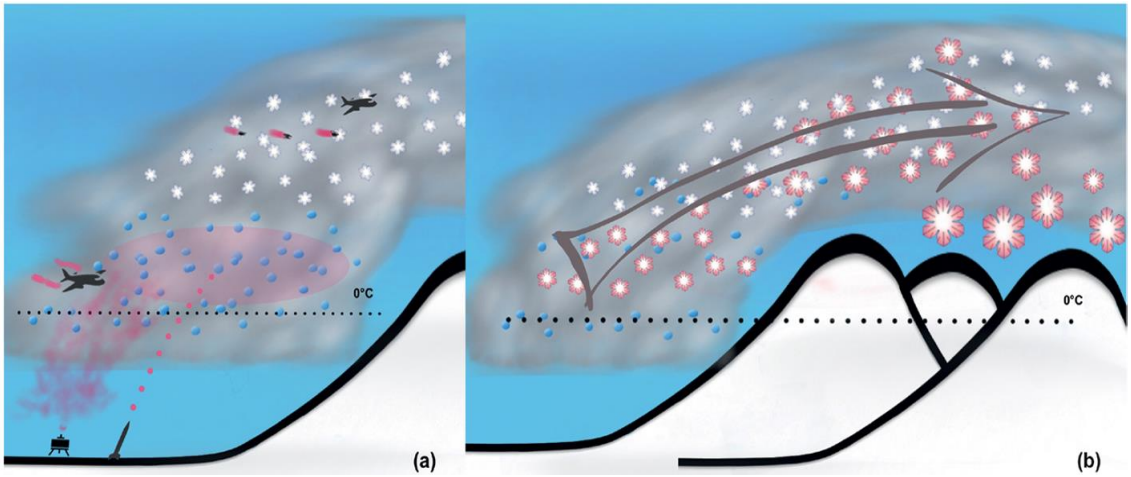
1. Supercold

۳. انواع روش‌های بارورسازی ابرها

۳-۱. بارورسازی در سیستم‌های ابر کوهساری زمستانی

در ابرهای کوهساری (اوروگرافی) زمستانی، بارش تحت تأثیر عوارض زمین‌شناختی محلی قرار دارد و به تولید آب مایع فوق سرد و همچنین مقدار آب فوق سرد هنگام صعود و بالا رفتن هوای مرطوب نزدیک سطح انجماد بر فراز رشته کوه‌ها وابسته است. فرض اساسی بارورسازی ابرهای کوهساری این است که با وارد کردن ذرات یا هستک‌های یخ خشک و یدور نقره به آب ابرسرد یا فوق سرد، موجب تسریع تشکیل ذرات یخ در دمای نسبتاً گرم (حدود ۵- درجه سانتی‌گراد) را ترویج می‌کند و این ذرات در نهایت با برخورد و رسوب، رشد می‌کند و منجر به افزایش بارندگی روی زمین بر فراز رشته کوه‌ها می‌شوند. تصویر شماتیک زیر این فرایند را نشان می‌دهد [۸].

شکل ۱. فرایند بارورسازی در ابرهای کوهساری زمستانی



در شکل ۱، بخش سمت چپ (a)، بارورسازی یخ‌دوست یا یخ‌زا در ابر کوهساری زمستانی را نشان می‌دهد. رنگ قرمز نشان‌دهنده منطقه فوق سرد بارورسازی شده و ماده بارورسازی است که باید توسط هواپیما، مشعل یا موشک اضافه شود. بخش سمت راست (b)، نتیجه مورد انتظار بارورسازی (قرمز) را نشان می‌دهد. زمانی که هسته‌های تراکم اضافه می‌شوند، بلورهایی را تشکیل می‌دهند که از طریق اثر برژرون-فایندسن[1] و یخ‌زنی و فرونهشت بخار آب رشد می‌کنند و دانه‌های برف را تشکیل می‌دهند. آزاد شدن اضافی گرمای نهان موجب تقویت جریان‌های قائم و تقویت ابر می‌شود. پیکان رسم شده در شکل سمت راست، جهت تکامل فضا و زمان را نشان می‌دهد.

در پژوهشی که در سال ۲۰۱۸ انجام شده، بررسی تفصیلی از فرایندهای مرتبط با افزایش بارندگی از سیستم‌های ابر کوهساری زمستانی ارائه شده است [۸]. در این پژوهش، دو استراتژی برای بارورسازی هوایی با استفاده از یدور نقره توصیف شده است. یکی از این راهکارها، سوزاندن یدور نقره در محل، توسط هواپیمای مخصوص با توان پروازی بالا و مقاوم در برابر شرایط مخرب جوی و در ارتفاع پروازی مناسب با انتظار بارورسازی مؤثر است. در این رویکرد، ذرات مصنوعی مانند یدور نقره از طریق مشعل‌های استون یا شعله‌های سوزاننده در محل،

1. Bergeron-Findeinsen

اساساً به‌صورت افقی از هواپیما به داخل ابر منتقل می‌شود. در روش دوم، هواپیما با پرتاب شعله‌های قابل پرتاب در یا بالای ارتفاعی که حاوی آب فوق سرد است پرواز می‌کند. این رویکرد در مناطق کوهستانی به‌وضوح مزیت دارد؛ به شرطی که هواپیما در ارتفاع خیلی بالا نباشد؛ زیرا ممکن است شعله‌ها قبل از افتادن به سطح بهینه بسوزند.

راهکار سوم، برای تزریق ماده بارورساز به ابر شامل تکنیک‌های مختلف زمینی است. علاوه‌بر مشعل‌های استون زمینی، از پوسته‌های توپخانه و موشک‌ها (از جمله آتشبارهای ارتفاع بالا) برای بارورسازی ابر استفاده می‌شود. چالش اصلی در تمامی تکنیک‌های زمینی، اطمینان از رسیدن مواد و هستک‌های بارورسازی به سطح مناسب ابر برای بارورسازی است. با استفاده از سنجنده‌های دورسنجی مانند رادار و ماهواره‌های هواشناسی امکان رصد انتشار مواد بارورسازی و رشد قطرک‌ها در ابر فراهم می‌شود. مطالعات انجام شده، مشاهدات و نتایج مدل‌سازی‌ها نشان می‌دهند که بارورسازی با هواپیما و تزریق مستقیم مواد بارورسازی به درون ابرها مؤثرتر از ژنراتورهای زمینی‌اند.

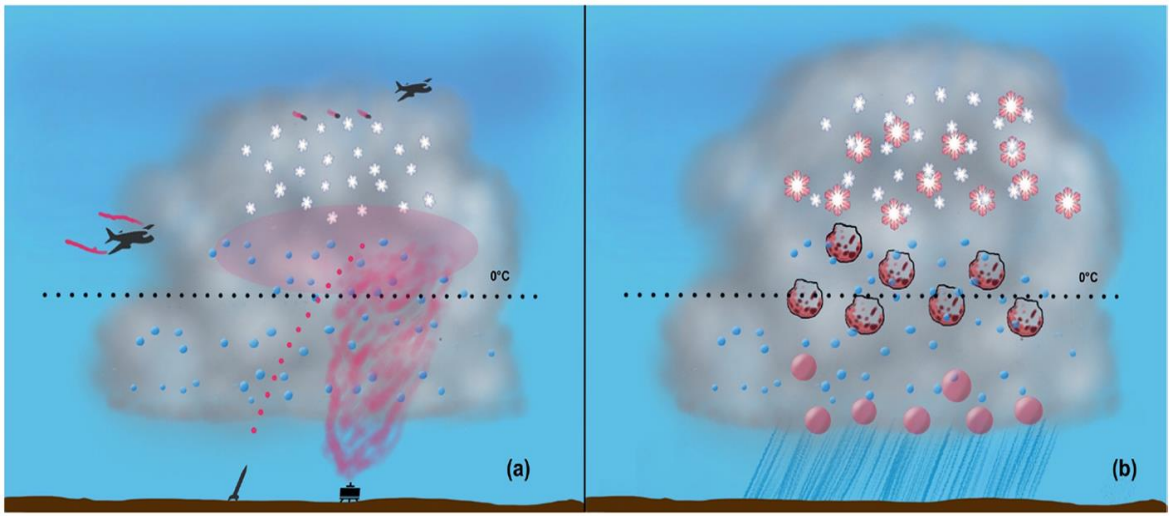
۲-۳. بارورسازی در سیستم‌های ابر همرَفتی

بارورسازی در ابرهای همرَفتی که توسط گرمایش سطح زمین هدایت می‌شوند، تعاملات پیچیده بین دینامیک و میکروفیزیک می‌تواند منجر به طیف متنوعی از فرصت‌های بالقوه برای افزایش بارندگی شود. دو استراتژی اصلی معمولاً برای بارورسازی این ابرها استفاده می‌شود. در این نوع ابرها از مواد جاذب رطوبت یا رطوبت‌دوست مانند ذرات نمک استفاده می‌شود. بارورسازی جاذب رطوبت شامل تزریق هسته‌های تراکم ابر نسبتاً بزرگ برای تقویت تشکیل قطره‌های بزرگ نزدیک پایه ابر و فعال‌سازی فرایندهای همجوشی ذرات است. در بارورسازی یخ‌زایی (ابرهای سرد کوهساری) شامل تزریق ذرات یخ‌دوست مانند یدور نقره می‌شود که شکل آن شبیه یخ طبیعی و سبب توسعه فرایندهای مرتبط با یخ و فاز مخلوط آب و یخ است.

ذرات بارورسازی جاذب رطوبت معمولاً ذرات نمک با اندازه‌هایی در محدوده یک تا ۱۰ میکرومتر هستند و از هواپیما به‌صورت میکروپودر از طریق شعله‌های سوزاننده در محل یا از طریق شعله‌های قابل پرتاب از هواپیما پراکنده می‌شوند یا توسط شعله‌های زمینی مانند موشک‌های زمینی و پوسته‌های توپخانه نیز به داخل ابرهای همرفتی تزریق می‌شوند. در این نوع بارورسازی به‌طور بالقوه برای سیستم‌های ابری با ضخامت بیش از حدود یک کیلومتر و در زیر سطح انجماد (تراز دمای صفر) که با کمبود هسته‌های تراکم بزرگ مواجه است و ذرات معلق طبیعی کافی ندارد و همچنین با جریان‌های صعودی در نزدیکی پایه ابر بیش از یک متر بر ثانیه باشد، قابل اجراست. پیش‌بینی می‌شود ذرات بارورسازی، که بزرگ‌ترند و جاذب رطوبت بیشتری نسبت به ذرات پس‌زمینه طبیعی دارند، از طریق چگالش و سپس از طریق برخورد با سایر قطره‌ها سریع‌تر رشد کنند. درصورتی‌که ضخامت ابر بالاتر از سطح انجماد گسترش یابد، آنگاه اثرات ذرات مصنوعی در ابرهای فاز گرم می‌توانند به فازهای مخلوط و یخ ابر گسترش یابند.

در بارورسازی یخ‌زایی، موادی مانند یدور نقره و یخ خشک به داخل ابر تزریق می‌شود تا غلظت ذرات یخ‌دوست را افزایش دهند و نیروی شناوری ابر را از طریق آزاد شدن گرمای نهان ناشی از فرایند انجماد آب فراسرد افزایش دهند و سبب رشد بیشتر و صعود جریان و چگالش بیشتر و رشد ذرات یخ در اثر فرایندهایی مانند فرونهشت بخار آب، یخ‌زدگی و برخورد شوند تا با به‌هم‌چسبندگی ذرات در حین سقوط، موجب تقویت بارش شود (فرایند برژرون). شکل ۲ به‌صورت شماتیک، مراحل بارورسازی ابر همرفتی را نشان می‌دهد.

شکل ۲. بارورسازی یخزا در ابر همرفتی

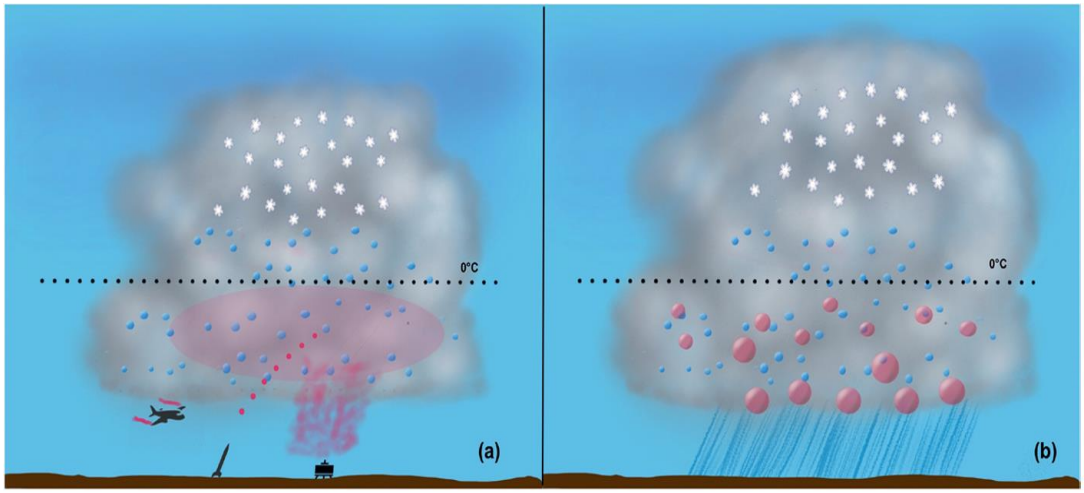


در شکل ۲، تصویر سمت چپ (a) نشان‌دهنده فرایند بارورسازی یخزا[1] در ابر همرفتی است. بخش قرمزرنگ، نشان‌دهنده منطقه بارورسازی شده و ماده بارورسازی است که باید توسط هواپیما، مشعل یا موشک اضافه شود. تصویر سمت راست (b)نتیجه مورد انتظار بارورسازی (قرمز)، زمانی که ذرات یخ‌دوست اضافه شده، بلورهایی را تشکیل می‌دهند که از طریق فرایند برژرون-فایندسن و فرونهشت بخار آب رشد می کنند و سپس زیر منطقه هم‌دمای صفر درجه سانتی گراد ذوب می‌شوند. آزاد شدن اضافی گرمای نهان ممکن است سبب رشد و تقویت ابر شود.

در شکل ۳ نیز مراحل بارورسازی جاذب رطوبت در یک ابر همرفتی نشان داده شده است. در تصویر سمت چپ (a)، قسمت‌های قرمزرنگ، نشان‌دهنده منطقه بارورسازی شده و ماده بارورسازی است که باید توسط هواپیما، مشعل یا موشک اضافه شود. تصویر سمت راست(b)، نشان‌دهنده نتیجه مورد انتظار بارورسازی (رنگ قرمز) است. وقتی هسته‌های تراکم بزرگ اضافه شده، قطره‌های بزرگی را تشکیل می‌دهند که از طریق چگالش رشد می کنند و سپس برخورد و همجوشی را برای تشکیل باران تحریک می کنند. آزاد شدن اضافی گرمای نهان ممکن است ابر را تقویت کند.

1. Glaciogenic

شکل ۳. بارورسازی جاذب رطوبت یک ابر همرفتی



هنگامی که بارورسازی سیستم‌های ابر همرفتی به رژیم فرایندهای فاز مخلوط گسترش می‌یابد، تعاملات بین دینامیک ابر، میکروفیزیک ابر و محیط ابر (جذب) پیچیده‌تر می‌شوند. باوجود آزمایش‌های متعدد در طول چند دهه گذشته و مطالعات بسیار زیاد، مستندسازی و درک کامل و با جزئیات زنجیره فرایندهای درون ابر از وجود ذرات معلق تا بارندگی روی زمین همچنان به‌عنوان چالشی برجسته مطرح است. به‌عنوان مثال، ادغام ابرهای مجزا منجر به افزایش قابل توجه بارندگی و افزایش ناحیه پوشش ابری و تقویت بازتابش رادار می‌شود که تأثیر بارورسازی بر این فرایندها به‌خوبی درک نشده یا مستند نشده است.

۴. کارایی و آثار بارورسازی ابرها

۴-۱. میزان موفقیت بارورسازی ابرها

تحقیقات علمی نشان داده است که اجرای مناسب برنامه‌های بارورسازی ابرها می‌تواند تا حد معینی بارندگی را در یک منطقه افزایش دهد و در صورت استفاده از روش‌های مناسب، می‌تواند سبب مه‌زدایی و کاهش خسارت‌های تگرگ شود. براساس نتایج ارائه شده از تحقیقات صورت گرفته در سراسر دنیا نیز بیشترین موفقیت بارورسازی و تعدیل هوا در مه‌زدایی و کاهش تگرگ تجربه شده است [۱۰]. همچنین تحت شرایط مناسب معین، بیشترین افزایش بارش نسبت به مقادیر مورد انتظار طبیعی از ابرهای کوهستانی و سرد حاصل شده است [۵]. به‌طور کلی مقدار قابل قبول و قابل انتظار افزایش بارش از طرح‌های بارورسازی ابرها برای ابر سرد با طراحی و اجرای مناسب و در شرایط مناسب، دامنه ۵ تا ۲۰ درصد برای هر مورد بارورسازی گزارش شده است. انجمن هواشناسی آمریکا اعلام کرده، درصورتی که پروژه‌های بارورسازی ابرها به‌طور طولانی‌مدت و مستمر و نه‌فقط در زمان خشک‌سالی اجرا شود و طراحی و اجرای آنها مناسب باشد، می‌تواند بارش را تا حدود ۱۰ درصد افزایش دهد [۱۱]. لازم به توضیح است که برای بررسی میزان اثربخشی پروژه‌های بارورسازی ابرها در کشور آمریکا، از سال ۲۰۰۱، سازمان کشاورزی و اخیراً سازمان تنظیم مقررات و صدور مجوز تگزاس، کلیه فعالیت‌های بارورسازی ابرها را به‌طور مستقل ارزیابی می‌کنند. گزارش‌های معتبر و متعددی از موفقیت و عدم موفقیت روش‌های بارورسازی در گزارش‌های سازمان جهانی هواشناسی و مجلات علمی انجمن هواشناسی آمریکا وجود دارد [۹ و ۱۲].

گرچه عوامل مؤثر بر توانایی بارورسازی ابرها (مانند دینامیک ابر، خواص میکروفیزیکی ابر، میزان رطوبت و میزان آب ابرسرد ابر و برخی پارامترهای دیگر) در افزایش منابع آب، متعدد و پیچیده‌اند؛ اما به‌طور کلی در دو دسته عوامل محیطی و عوامل انسانی قرار می‌گیرند. عوامل محیطی شامل کمّیت‌های جوی مانند دما، رطوبت، باد، پایداری و غیره، کمّیت‌های جغرافیایی مانند پستی و بلندی، رطوبت خاک و پوشش گیاهی و وضعیت پوشش برخی مناطق است. عوامل انسانی نیز شامل مشخصات و کیفیت بارورسازی از جمله ترکیب و نوع ماده بارورسازی و نرخ توزیع آن در جو، مکان‌ها و زمان‌ها و مدت آزادسازی مواد بارورساز است [۱۱]. در هر پروژه بارورسازی ابرها، وسعت منطقه افزایش بارش بستگی به دفعات بارورسازی، پوشش مکانی سامانه‌های ابری مناسب و نیز توانایی بارورسازی تمام ابرهای مناسب دارد. تأثیر بارورسازی معمولاً از سی تا نود دقیقه در مناطق پایین‌دست و مسیر جریان باد پس از منطقه یا خط بارورسازی ادامه می‌یابد [۱۳]. شایان ذکر است که تأثیر بارورسازی ابرها محدود به مرزهای ثابت منطقه هدف نیست و تأثیر آن در جهت باد به خارج از این منطقه نیز می‌تواند کشیده شود. این امر به شدت و جهت جریان باد در سطوح مختلف جو بستگی دارد.

۲-۴. اثر بارورسازی ابرها بر بارش پایین‌دست جریان

این عقیده که افزایش بارش در یک منطقه باعث کاهش بارش در جای دیگر به‌ویژه مناطق پایین‌دست می‌شود، هنوز به‌طور دقیق پاسخ داده نشده است. برخی مجامع علمی دلایلی را برای رد چنین تأثیری مطرح کرده‌اند که برخی از این دلایل عبارتند از [۱۰ و ۱۴]:

- محاسبات علمی نشان می‌دهد که مقدار رطوبت جوی عبوری از روی هر نقطه با یک رشته کوه که به بارش تبدیل می‌شود، کمتر از ۱۰ تا ۱۵ درصد است. اگر این بارش طبیعی توسط بارورسازی ابرها تا ۱۰ درصد افزایش یابد، تنها ۱ درصد منابع رطوبت اصلی جوی می‌تواند تخلیه شود.
- طول عمر بسیاری از سامانه‌های ابری کوتاه بوده و در حدی نیست که به مناطق پایین‌دست برسد و به‌عبارتی دیگر تبخیر می‌شود. بنابراین در مواردی، ضمانتی برای باقی‌ماندن کارایی ابر در طی عمر ابر برای ایجاد بارش در دیگر مناطق پایین‌دست منطقه هدف ممکن است وجود نداشته باشد.
- نشان داده شده است که با فرض امکان صعود هوا، حدود ۲۰ درصد بخار آب در حین صعود متراکم شده و ابر را تشکیل می‌دهد. همچنین حدود ۲۰ درصد بخار آب موجود در ابر نیز به‌صورت باران می‌بارد. بنابراین در حالت‌های معمول حدود ۴ درصد بخار آب ابر گرفته می‌شود. اگر عملیات بارورسازی ابرها به افزایش ۲۰ درصدی بارش منجر شود، می‌توان نتیجه‌گیری کرد که عملیات بارورسازی ابرها حدود ۰/۸ درصد از بخار آب اضافی را تخلیه می‌کند که رقم ناچیزی بوده و لذا کاهش بسیار جزئی در بخار آب ابرهای مناطق پایین‌دست منطقه هدف رخ خواهد داد [۷].
- معمولاً پروژه‌های بارورسازی ابرها در مقیاس‌های مکانی محدود انجام می‌شوند، عبور سامانه‌های ابری به سمت پایین‌دست و در مقیاس بین کشوری در مقیاس‌های مکانی بسیار فراتر صورت می‌گیرد و از این منظر و با توجه به موارد فوق‌الذکر امکان اثرگذاری معنادار بر بارش پایین‌دست بعید به‌نظر می‌رسد. در عین حال نمی‌توان این موضوع را کاملاً رد کرد و به تحقیقات بیشتر نیاز دارد.

شایان ذکر است که علی‌رغم موارد گفته شده و با توجه به پیچیدگی‌ها و عدم‌قطعیت‌های موجود در فرایندهای جوی، سازمان هواشناسی جهانی در بیانیه سال ۲۰۱۰ تأکید کرده است که اگرچه پیامدهای ناخواسته بارورسازی ابرها از جمله آثار پایین‌دست ثابت نشده‌اند اما نمی‌توان آنها را رد کرد.

۳-۴. ملاحظات ارزیابی طرح‌های بارورسازی ابرها

ارزیابی برنامه‌های تعدیل وضع هوا بسیار دشوار است. برخی از علل دشواری مذکور را به این شرح می‌توان بیان کرد:

- ماهیت پدیده‌های جوی به‌ویژه بارش بسیار متغیر است. به‌عبارتی، بین مقدار بارش در یک منطقه و منطقه دیگر تغییرات طبیعی زیادی وجود دارد. به‌عبارت دیگر، میزان انرژی سامانه‌های ابری بسیار عظیم و تغییرات آن بسیار زیاد است؛ بنابراین تغییرات ناشی از بارورسازی کاملاً قابل تفکیک از تغییرپذیری طبیعی بارش نیست.
- هنوز دانش کافی و لازم درخصوص فرایندهای ریزمقیاس و بزرگ‌مقیاس طبیعی جو وجود ندارد و پیش‌بینی رفتار طبیعی ابرها و مقدار طبیعی بارش دشوار است.
- افزایش بارش حاصل از بارورسازی در مقایسه با تغییرات طبیعی بارش کوچک است و میزان آن در دامنه تغییرات طبیعی بارش قرار می‌گیرد؛ لذا تفکیک اثر بارورسازی از تغییرات طبیعی بارش دشوار است.
- معمولاً بارورسازی ابرها زمانی صورت می‌گیرد که ابرهای موجود آماده بارش باشند؛ لذا تعیین مقدار بارش حاصل از بارورسازی ابرها دشوار و در مواردی غیرممکن است [۱۵].
- پروژه‌های بارورسازی ابرها به‌دلیل وجود نداشتن سامانه‌های مشابه ابری قابلیت تکرارپذیری و بررسی ندارند.
- موضوع تغییر اقلیم، ارزیابی آثار بارورسازی ابرها را مشکل می‌کند؛ بدین معنا که باوجود پدیده تغییر اقلیم، رفتار سیستم‌های جوی با وضعیت میانگین آنها متفاوت خواهد بود و تفکیک اثرگذاری بارورسازی از آثار تغییر اقلیم دشوار و لذا امکان ارزیابی پروژه‌های بارورسازی ابرها نیز مشکل خواهد بود [۱۶].

هرچه ارزیابی پروژه‌های بارورسازی ابرها با بی‌طرفی بیشتری صورت پذیرد، نتایج با اعتماد بیشتری قابل پذیرش خواهد بود. براساس بیانیه سال ۲۰۱۰ سازمان جهانی هواشناسی، اکیداً توصیه شده است که ارزیابی برنامه‌های بارورسازی ابرها توسط افراد ذی‌صلاح غیروابسته به طرف عملیاتی انجام شود [۵]. در طراحی هر برنامه بارورسازی ابرها، طرح ارزیابی باید بخشی از برنامه باشد [۱۷]، اما چون ارزیابی علمی آثار بارورسازی ابرها باعث افزایش هزینه پروژه‌های عملیاتی خواهد شد، لذا در بیشتر مواقع در نظر گرفته نمی‌شود.

۵. روش‌های نوظهور تعدیل وضع هوا

دانشمندان و محققان زیادی تحقیقات و پژوهش‌های متعددی را در زمینه تعدیل وضع هوا انجام داده‌اند. در فناوری‌های نوظهور تعدیل وضع هوا، تلاش می‌شود که با یونیزه کردن جو پایین یا گرم کردن لایه‌های بالای جو، تعادل جو به‌گونه‌ای به‌هم ریزد که در منطقه مورد نظر افزایش یا کاهش رطوبت اتفاق افتد. در این نوع فناوری‌ها، به‌کارگیری آثار فیزیکی امواج الکترومغناطیس و الکتریکی و استفاده از خواص یون‌ها برای اثرگذاری بر جو و سامانه‌های بارش‌زا جایگاه مهمی دارد. فرایندی را که در آن مولکول‌ها و اتم‌های طبیعی موجود در جو غالباً به‌وسیله ذرات پرانرژی باردار می‌شوند یونیزاسیون جو می‌گویند [۱۸].

براساس گزارش‌های منتشر شده، فناوری‌های باران‌زایی نوظهور را می‌توان عمدتاً به انواع جو پایین با استفاده از بوسترهای زمینی و جو بالا با استفاده از گرم‌کننده‌های یونسفری تقسیم کرد [۱۸]. ازآنجاکه درحال حاضر اثربخشی و آثار جانبی ناشی از اجرای این نوع فناوری دارای ابهام‌های جدی است و سکوت یا عدم تأیید مراجع جهانی ذی‌ربط در خصوص آثار این فناوری به ابهام‌های آن بیشتر می‌افزاید، لازم است که توسعه این دست پروژه‌ها با اجرای طرح‌های پایلوت و مطالعات کتابخانه‌ای و احتیاط لازم صورت گیرد تا از اتلاف احتمالی منابع ملی جلوگیری شود. براساس نتیجه‌گیری گزارش سازمان جهانی هواشناسی، که در سال ۲۰۱۸ منتشر شد، هنوز شواهد کمی برای اثربخشی فرایندهای میکروفیزیکی پیشنهادی یونیزاسیون در تأثیرگذاری بر راندمان بارندگی ابر وجود دارد [۱۹].

۶. دیدگاه‌های بین‌المللی درباره ابرها و تعدیل وضع هوا

مهم‌ترین انجمن‌های علمی و معتبر دنیا در زمینه تعدیل وضع هوا عبارت‌اند از: سازمان جهانی هواشناسی، انجمن مهندسان عمران آمریکا، انجمن تعدیل وضع هوا و انجمن هواشناسی آمریکا. این انجمن‌ها در دوره‌های زمانی مختلف بیانیه‌هایی در زمینه تعدیل وضع هوا صادر می‌کنند که علاوه‌بر دستاوردهای جدید، منتخبی از نظرهای خود را در آن اعلام می‌کنند که ممکن است در برخی موارد اتفاق‌نظر داشته و در برخی موارد نیز متفاوت باشد. جدول ۱ مهم‌ترین نکته‌نظرها و توصیه‌های این چهار گروه را در زمینه بارورسازی ابرها و تعدیل وضع هوا نشان می‌دهد.

جدول ۱. گزیده‌ای از نظرها و توصیه‌های مراجع معتبر علمی درخصوص تعدیل وضع هوا و بارورسازی ابرها [۱۷، ۵، ۲۰ و ۲۱]

مرجع علمی	نظرها و توصیه‌ها
سازمان هواشناسی جهانی	ـ انرژی موجود در سامانه‌های آب و هوایی به‌قدری زیاد است که خلق سامانه‌های ابری باران‌زا، تغییر الگوی باد به‌منظور جابه‌جایی بخار آب به یک منطقه یا حذف کامل پدیده‌های جوی شدید غیرممکن است؛ لذا فناوری‌های تعدیل وضع هوا، که مدعی حصول این آثار بزرگ‌مقیاس و چشمگیرند (روش‌های یونیزاسیون)، پایه علمی محکمی ندارند و باید با تردید با آنها برخورد کرد. ـ به‌دلیل اینکه تغییرپذیری طبیعی بارش، عموماً کمی بیشتر از افزایش یا کاهش بارش ادعا شده برای تعدیل مصنوعی وضع هواست، لذا برنامه‌های آزمایشی باید به مدت چندین سال اجرا و دقت شود در طراحی این آزمایش‌ها از کارشناسان خبره استفاده شود.
انجمن تعدیل آب و هوا	ـ تحقیقات نشان داده است که سامانه‌های ابری کوهستانی زمستانه، قابلیت خوبی برای افزایش بارش دارند. ـ تعداد زیادی از برنامه‌های عملیاتی، حاکی از افزایش بین ۵ تا ۱۵ درصدی بارش فصلی هستند.
انجمن هواشناسی آمریکا	ـ برای بارورسازی موفق یک ابر مناسب باید مقادیر کافی مواد مناسب بارورسازی در زمان مناسب و هدف‌گیری دقیق به ابر وارد شود. ـ تحلیل‌های آماری داده‌های بارش در بعضی پروژه‌های طولانی‌مدت حاکی از افزایش فصلی تقریباً ۱۰ درصدی بارش است. ـ درصورتی امکان اثر بارورسازی ابرها به‌عنوان ابزاری برای مبارزه با خشکسالی وجود دارد که این فعالیت به‌عنوان یک استراتژی مدیریت منابع آب به‌طور پیوسته و طولانی‌مدت انجام شود.
انجمن مهندسان عمران آمریکا	ـ این انجمن حفاظت و توسعه منابع آب جوی (با نام تعدیل وضع هوا یا باروری ابرها) را برای کاربردهای سودمند حمایت می‌کند. ـ مدیریت و طراحی مناسب منابع آب جوی می‌تواند پتانسیلی برای افزایش منابع آب جدید باشد.

۷. بررسی تجارب برخی کشورها و نتایج پروژه‌های بارورسازی ابرها

۷-۱. چین

در یک مطالعه تأثیر بارورسازی بر ویژگی‌های ماکرو و میکروفیزیکی ابر و تفاوت تأثیر در مناطقی با پوشش ابرهای همرفتی و ابرهای لایه‌ای در استان شاندونگ چین در ماه مه ۲۰۱۸ بررسی شد [۲۲]. پایش نتایج و مشاهدات به‌وسیله رادار هواپیما، ماهواره NPP[1] و ماهواره هیماواری ۸ ژاپن (H۸) انجام گرفت. مشاهدات هواپیما نشانگر توسعه و تعمیق همرفت در منطقه بود و پژواک امواج رادار از منطقه قله ابر در ارتفاع بالاتر ابر به‌طور قابل توجهی افزایش یافت. فرایند تعمیق و توسعه قائم لایه ابر همرفتی با تبدیل قطره‌های آب فوق سرد به بلورهای یخ و آزاد شدن گرمای نهان مرتبط است و منجر به تقویت جریان‌های صعودی و تقویت پژواک‌های رادار، افزایش ارتفاع قله ابر و تشدید بارش (افزایش اندازه و تعداد قطره‌های باران) می‌شود. برعکس آن، در منطقه ابر لایه‌ای، پس از بارورسازی با یدور نقره، پژواک‌های راداری در ارتفاعات نزدیک به لایه بذرپاشی به‌طور قابل توجهی ضعیف‌تر شدند و قله‌های پژواک رادار حدود ۱/۵ کیلومتر کاهش یافت و حفره‌ای با عمق و ارتفاع قابل توجه به وجود آمد و ویژگی‌هایی مانند یخ‌زدگی مسیرهای بذرپاشی ظاهر شدند. این امر نشانگر تسریع تبدیل قطره‌های آب به ذرات یخ در ابر لایه‌ای بر اثر بارورسازی است. تأثیر بارورسازی در مشاهدات ماهواره‌های NPP و H۸ نشانگر تقویت فعالیت همرفتی در منطقه همرفت پس از بذرپاشی است؛ درحالی‌که در منطقه ابر لایه‌ای، پانزده دقیقه پس از بذرپاشی با یدور نقره، مسیر بذرپاشی با ابرهایی به عرض یک تا سه کیلومتر در فاصله ۱۰ کیلومتری پایین‌دست منطقه بذرپاشی مشخص شد و با افزایش عرض اکوی رادار (به‌سبب واگرایی و پخش توسط جریان) در جهت باد حرکت کرد.

در این تحقیق از مشاهدات هواپیمای مجهز به رادار[2] برای ردیابی و مطالعه پاسخ‌های فیزیکی مختلف به بارورسازی و بذرپاشی در مناطق همرفتی و لایه‌ای ابرهای مختلط همرفتی- لایه‌ای استفاده شد. از نظر منطقه همرفتی، پژواک‌های راداری با عمق متراکم‌تر قوی‌تر شدند و ارتفاع قله پژواک ۰/۱ تا ۰/۵ کیلومتر افزایش یافت. میانگین اکوی بازگشتی بین ۵ تا ۷ dBZ[3] بالاتر از قبل از بذرپاشی بود و شدت اکوی بازگشتی نزدیک سطح از ۱۲ به ۲۸ dBZ افزایش یافت که بیانگر افزایش اندازه ذرات است و نشان می‌دهد که بذرپاشی با یدور نقره در منطقه همرفتی، تشکیل ذرات بارش بزرگ‌اندازه را از طریق فرایندهای برزرون، یخ‌زدگی و برخورد- تخریب تسریع کرده است. در منطقه لایه‌ای، پس از عملیات بارورسازی، مسیرهای بذرپاشی، یخ‌زدگی واضحی وجود داشت و این امر نشان می‌دهد که پس از بذرپاشی با یدور نقره، تبدیل رطوبت ابر به آب تسریع می‌شود و همچنین کاهش دمای قله ابر نشانگر تشدید همرفت و تقویت جریان صعودی و افزایش ارتفاع قله ابر است. بااین‌حال، در منطقه لایه‌ای، مکانیسم بذرپاشی استاتیکی نقش غالب را ایفا کرد و آب فوق سرد محیط با بذرپاشی یدور نقره به بلورهای یخ متراکم شد و با رسوب بلورهای یخ رشد یافت و بر سطح زمین بارید.

سؤال چالش‌برانگیزی که باید مورد توجه قرار گیرد، این است که سهم نسبی تأثیر بارورسازی ابر در مقایسه با تغییرات و نوسان‌های طبیعی در پدیده مشاهده شده پس از بذرپاشی ابر چیست؟ در اصل، با این نوع آزمایش‌ها نمی‌توان به این سؤال پاسخ دقیق داد و تقریباً غیرممکن است که صرفاً با استفاده از داده‌های مشاهده‌ای مشابه رادار زمینی و هواپیما و بدون لحاظ منطقه هدف بارورسازی و منطقه شاهد برای مقایسه و همچنین لحاظ چینش باد در لایه‌های مختلف، به آن پاسخ داده شود؛ زیرا برای پاسخ به این سؤال دو سامانه ابر مشابه (با ویژگی‌های ماکرو و میکروفیزیکی یکسان) برای مقایسه تأثیر بارورسازی ابر نیاز است تا تأثیر بارورسازی و عدم بارورسازی در سامانه‌های ابری در شرایط مشابه

1. Suomi National Polar-Orbiting Partnership
2. KPR

۳. واحد سنجش شدت اکوی رادار.

بررسی و ویژگی‌ها و شدت اکوهای رادار و اندازه‌گیری آهنگ و میزان بارش تجمعی در سطح زمین ارزیابی شود. بنابراین، در اینجا به‌سادگی تغییرات ویژگی‌های ابر عمدتاً به بارورسازی ابر نسبت داده شده است که پذیرش آن با اطمینان بیشتر، مستلزم تحقیقات بیشتر در آینده با شبیه‌سازی‌های مدل‌های آب و هوای میان‌مقیاس است.

تحقیق دیگری در خصوص عملیات بارورسازی در مرکز چین به‌منظور افزایش بارش و غلبه بر مشکلات کم‌آبی، مستندسازی تکامل مسیر بذرپاشی یخزا در ابرهای لایه فوق سرد بر فراز چین مرکزی انجام شده است. مشاهدات با استفاده از ماهواره، رادار هواشناسی زمینی و باران‌سنج لیزری[1] انجام شد تا شاهد محکم‌تری برای تکوین فضایی و زمانی خط بذرپاشی باشد که تاکنون برای مکانیزم‌های بذرپاشی یخزا و فرایندهای تشکیل بارش در چین ارائه شده است. مشاهدات ترکیبی، شواهد فیزیکی از فرایندهای بذرپاشی ابر تا تقویت بارش و رسیدن آن به زمین را ارائه می‌دهند [۲۳].

تجزیه و تحلیل داده‌های اندازه‌گیری شده توسط گذر ماهواره مادیس[2] در بازه زمانی مشخص در ۱۹ مارس ۲۰۱۷ نیز خط بذرپاشی را پس از شروع بذرپاشی نشان داد که هم‌زمان رادار هواشناسی نیز تأیید کرد. مسیر بذرپاشی در محیط ابری با دمای فوق سرد قرار داشت. مشاهدات ماهواره‌ای در آن زمان نشان داد که مسیر بذرپاشی با تشکیل بلورهای یخ و انجماد مسیر بذرپاشی و صعود هوا به‌دلیل آزاد شدن گرمای نهان مشخص می‌شود. اکوی راداری تقویت شده چهل دقیقه پس از شروع بذرپاشی، هنگام عبور از محل باران‌سنج لیزری به سطح رسید و تأثیر بذرپاشی با دریافت قطره‌های بزرگ‌تر باران (در مقایسه با قطره‌های کمتر از یک میلی‌متر قبل و بعد از عبور تأثیر بارورسازی) نشان داده شد. به نظر می‌رسد که به‌سبب افزایش آهنگ بارش در بازه عبور باند اکوی قوی‌تر راداری از مکان باران‌سنج، فقط بزرگ‌ترین قطره‌های باران فرصت کافی برای رسیدن به زمین در محل ایستگاه باران‌سنج لیزری را داشته‌اند. این زنجیره رویدادها پس از بذرپاشی ابرهای لایه فوق سرد، زنجیره کامل میکروفیزیکی رویدادها را به‌دلیل بذرپاشی یخزا در ابرهای کوهساری نشان می‌دهد و نتایج سایر پژوهش‌های انجام شده در این زمینه را پشتیبانی می‌کند [۲۴]. در انتهای پژوهش تأکید می‌شود که با توجه به این یافته‌ها و اهمیت آنها، ضروری است که از تجهیزات مشاهده میکروفیزیکی ابر استفاده شود و آزمایش‌های علمی و میدانی کاملی در مطالعات آینده طراحی شود. چنین مطالعاتی امکان درک جامع‌تر عملیات افزایش مصنوعی بارش را برای انجام بهتر عملیات علمی و بهبود اثربخشی برنامه فراهم خواهد کرد.

۲-۷. امارات متحده عربی

در پاسخ به کمبود منابع آب، که به‌دلیل افزایش جمعیت و تغییرات آب و هوا تشدید شده است، تعداد فزاینده‌ای از کشورها در تحقیقات و کاربردهای تعدیل آب و هوا و عمدتاً به‌منظور افزایش مصنوعی بارش سرمایه‌گذاری کرده‌اند. امارات متحده عربی از جمله این کشورهاست. هدف بارورسازی در این کشور با توجه به اقلیم و نوع سامانه‌های غالب آن، بارورسازی ابرهای گرم است که شامل وارد کردن ذرات بزرگ مصنوعی با قطر بزرگ (فراتر از آنچه از جمعیت طبیعی ذرات آئروسل پس‌زمینه با اندازه‌های قطر نسبتاً کوچک‌تر) به ابرها برای افزایش جذب آب مایع موجود در ابر است. پیش‌بینی می‌شود ذرات بذرپاشی بزرگ‌تر رطوبت‌زا[3] در اثر رقابت با ذرات کوچک‌تر زمینه، بتوانند قطره‌های بزرگ‌تر تولید کنند که موجب فعال شدن فرایند برخورد- تجمع درون ابر شود و به تولید بارش بینجامد یا بارش طبیعی را تقویت کند. فرض اساسی این است که افزایش شناوری ابر، که از طریق تبدیل محتوای آب ابر (بخار) به قطره‌های مایع از طریق چگالش می‌شود، باعث تقویت آزاد شدن گرمای نهان، صعود هوا و افزایش عمق ابر می‌شود و در نهایت به افزایش گستره، طول عمر ابر و شدت بارش خواهد انجامید.

ارزیابی اثربخشی برنامه‌های عملیاتی بارورسازی ابر و ارائه معیارهای هزینه- فایده واقع‌بینانه به سیاستگذاران امری حیاتی است و طبق

1. Disdrometer
2. MODIS
3. Hygroscopic

بررسی‌های انجام شده توسط تیم مربوطه کارشناسی سازمان جهانی هواشناسی درباره فعالیت‌های جهانی افزایش بارندگی، به‌طور کلی بارورسازی ابر با استفاده از هواپیما نسبت به سایر تکنیک‌ها مانند ژنراتورهای زمینی، راکت‌های خاص و گلوله‌های توپخانه زمینی مؤثرتر است. به‌طور کلی تغییرات پیچیده فضایی- زمانی خواص ابر و بارندگی حاصل، عامل اصلی عدم قطعیت در ارزیابی‌های تأثیر بارورسازی است. به‌عنوان مثال، آزمایش‌های میدانی یک رخداد، اثرهای بذرپاشی در طول عمر سامانه ابری خاص را ارائه می‌دهند که ممکن است با یک ابر بدون هسته تراکم (به‌عنوان کنترل) تفاوت قابل توجهی داشته باشد. در واقع، روش‌شناسی آزمایش، تصادفی‌سازی و تحلیل آماری مورد نیاز برای برنامه‌های بارورسازی ابر است. با توجه به اینکه ابرها واحدهای نمونه گذرا و کمتر قابل دسترس‌اند، تکرارپذیری آزمایش‌های بارورسازی تصادفی را چالش‌برانگیز می‌کند. برای غلبه بر محدودیت‌های آزمایش‌های میدانی، چندین تحلیل آماری بلندمدت برای ارزیابی تأثیرات بارورسازی با استفاده از رگرسیون کنترل- هدف (یعنی بدون بارورسازی- بارورسازی) مشتق شده از سوابق بارندگی تاریخی دنبال شده است. از سوابق بارندگی در مناطق هدف و کنترل در دوره‌های بدون بارورسازی برای ایجاد معادله رگرسیون استفاده می‌شود که بارندگی طبیعی (بدون بارورسازی) را در منطقه هدف در طول دوره بارورسازی شبیه‌سازی می‌کند. تأثیرات بالقوه بارورسازی با مقایسه بارندگی طبیعی مبتنی‌بر رگرسیون (پیش‌بینی شده) در منطقه هدف با بارندگی واقعی مشاهده شده در دوره‌های بارورسازی تعیین می‌شود. الزامات اولیه این است که سوابق بارندگی در مناطق هدف و کنترل به‌طور معقولی مرتبط باشند و بارندگی در سنجه‌های کنترل توسط عملیات بارورسازی در منطقه هدف آلوده نشود. چالش بزرگ روش‌های آماری در این است که تحلیل‌های آماری صرفاً به اندازه‌گیری‌های محلی (سنجش باران) متکی‌اند و نمی‌توانند تغییرات بالقوه گردش‌های آب و هوا را، که ممکن است رژیم‌های بارندگی محلی را فراتر از آثار بارورسازی تحت تأثیر قرار دهند، تشخیص و ثبت کنند. بااین‌حال، تشخیص سازوکارهای فیزیکی مرتبط با تغییرات بالقوه در خواص ابر بارور شده برای تفسیر یافته‌های آماری ضروری است.

رادارهای هواشناسی برآوردهای با وضوح بالا و بی‌درنگ از خواص ابر و بارندگی را با انتشار امواج الکترومغناطیسی و تجزیه و تحلیل امواج بازگشتی به رادار بر اثر پراکنش از پدیده‌های درون ابر مانند قطره‌های باران یا تگرگ ارائه می‌دهند. کاوش حجمی پیوسته سامانه‌های راداری، اطلاعات حیاتی درباره تکوین میکروفیزیکی و ترمودینامیکی ابرها در طول عمر آنها تولید می‌کند. در سال‌های اخیر، اسکن‌های حجمی رادارهای داپلری به‌طور فزاینده برای شناسایی تفاوت‌های فیزیکی و شناسایی خواص ابر بذرپاشی شده و بدون بذر از جمله حجم طوفان، پوشش منطقه، طول عمر، شار و جرم باران، ارتفاع و محتوای آب قابل بارش استفاده شده است. گاهی سنجش رادار زمینی، توسط سنجش رادار هواپیما از درون ابر، در صورت وجود، مقایسه و تکمیل می‌شود.

آزمایش‌های معمول بارورسازی با هواپیما به‌صورت تصادفی، تفاوت خواص دینامیکی و میکروفیزیکی بین ابرهای هدف را، که در محیط‌های بیابانی به‌ویژه با تراکم‌های متنوع گرد و غبار و آئروسل هستند، در نظر نمی‌گیرد. کشور امارات با بارش متوسط سالیانه کمتر از ۱۲۰ میلی‌متر در طول دو دهه گذشته یک برنامه عملیاتی بارورسازی رطوبت‌زا را از طریق هواپیما اجرا کرده است. در امتداد ساحل شرقی شبه‌جزیره عربستان در یک نقطه داغ و با فراوانی گرد و غبار منطقه‌ای، تأثیر توده‌های هوای قاره‌ای در مناطق ساحلی و کوهستانی آن هم‌گرا می‌شوند. آزمایش یکپارچه با اندازه‌گیری‌های بسیار، فراوانی آئروسل‌های ریز غالباً سولفات را نشان می‌دهد که ممکن است به‌طور قابل توجهی بر تشکیل ابر و بارندگی تأثیر بگذارد. بنابراین، امارات به‌عنوان «آزمایشگاه طبیعی» برای مطالعه هر دو ویژگی‌های مزومقیاس و فرایندهای میکرومقیاس آئروسل -ابر -بارندگی در یک منطقه جغرافیایی محدود در نظر گرفته می‌شود. بررسی اثرات بارورسازی با ترکیب هر دو تحلیل فیزیکی و آماری، جامع‌ترین رویکرد برای ارزیابی آزمایش‌های بارورسازی ابر در نظر گرفته می‌شود. اینجا، اولین نتایج برنامه بذرپاشی ابر امارات با مقایسه سوابق سنجش بارندگی فصلی برای دوره‌های بدون بارورسازی (۲۰۰۲-۱۹۸۱) و بارورسازی شده (۲۰۱۹-۲۰۰۳) ارائه می‌شود. رگرسیون تاریخی هدف - کنترل پسینی، تشخیص نقطه تغییر و تحلیل‌های سری زمانی برای جدا کردن آماری بارندگی طبیعی و

بارندگی‌های ناشی از بارورسازی انجام شد. ارزیابی‌های آماری با یک بررسی فیزیکی مبتنی‌بر رادار مورد مقایسه قرار گرفت.
در جدول ۲ مشخصات ایستگاه‌های هدف و کنترل در امارات متحده عربی آورده شده است. ایستگاه‌های سنجش بارش در منطقه ساحلی و ایستگاه‌های هدف در منطقه کوهستانی شرق امارات قرار دارند.

جدول ۲. مشخصات ایستگاه‌های هدف و کنترل آزمایش‌های بارورسازی کشور امارات [۲۵]

Area	Gauge Name	Lat (°N) × Lon (°E)	Elevation (m)
Control Area	Dubai Airport	25.25 × 55.37	19
	Sharjah Airport	25.35 × 55.4	34
	Ras Al Khaimah	23.58 × 54.75	1
	Umm Al Quwain	25.6 × 55.58	20
Target Area 1	Masafi	25.3 × 56.17	516
	Al Malaiha	25.13 × 55.88	150
	Falaj Al Moalla	25.51 × 56.32	105
Target Area 2	Al Shiweb	24.78 × 55.80	306
	Al Faqa	24.72 × 55.62	215
	Swiehan	24.47 × 55.33	179

پژوهش انجام شده، اولین تلاش برای ارزیابی عینی تأثیرات برنامه بارورسازی ابرها در امارات متحده عربی است. روش‌شناسی این مطالعه ترکیبی از رویکردهای آماری و فیزیکی است که از سوابق بلندمدت داده‌های باران‌سنجی در دوره‌های بدون بارورسازی (۲۰۰۲-۱۹۸۱) و بارورسازی (۲۰۱۹-۲۰۰۳) و همچنین داده‌های رادار قطبشی استفاده شده است (برای تشخیص میکروفیزیک ابر). با ایجاد رگرسیون با استفاده از داده‌های تاریخی گذشته بین ناحیه هدف - کنترل در بازه زمانی بدون بارورسازی و به‌کارگیری این روابط رگرسیونی بین مناطق هدف و کنترل در بازه زمانی بارورسازی، تأثیر عملیات بارورسازی در یک بازه زمانی بیست‌ساله مشخص شد. استفاده از این روابط و مقایسه داده‌های باران‌سنجی در ناحیه هدف و کنترل، نشان‌دهنده افزایش متوسط ۲۳ درصد در بارندگی مرتبط با بارورسازی ابرهاست.
آنالیز فیزیکی مبتنی‌بر رادار، بایگانی ویژگی‌های طوفان را بین طوفان‌های غیربارورسازی (۸۷ مورد) و بارورسازی (۶۵ مورد) مقایسه کرده است. نتایج نشان‌دهنده بهبودهای سازگار و منظم در ویژگی‌های طوفان ظرف ۱۵ تا ۲۵ دقیقه پس از بارورسازی ابرهاست. درحالی‌که محدودیت‌ها و عدم قطعیت‌ها نیاز به توجه و بررسی بیشتر دارند، نتایج کلی مطابق با ارزیابی‌های مشابه بارورسازی رطوبت‌زای عملیاتی در مناطق دیگر است. شواهد ترکیبی آماری - فیزیکی ارائه شده در این مطالعه، بینش‌های مهمی درباره تأثیرات بلندمدت عملیات بارورسازی ابرها بر امارات متحده عربی و سهم آن در منابع آب کشور ارائه می‌دهد. برنامه تحقیقاتی امارات متحده عربی برای تقویت بارندگی در سال ۲۰۱۵ تحت نظارت مرکز ملی هواشناسی امارات تأسیس شد تا پیشرفت علمی و توسعه فناوری‌های جدید را در این زمینه تقویت و ترویج کند. مطالعات بیشتر با استفاده از اندازه‌گیری‌های ابری در محل همراه با مدل‌سازی میکروفیزیکی می‌تواند به ارزیابی و اصلاح عملیات بارورسازی ابرها کمک کند. تحقیقات هدفمند و هدایت‌شده بین‌المللی در چارچوب چنین برنامه‌هایی، می‌تواند نقش تقویت بارندگی را به‌عنوان ابزاری قوی برای حمایت از تلاش‌ها برای امنیت آبی توسعه دهد [۲۵].

۳-۷. ایالات متحده آمریکا

در آمریکا آزمایش‌های بسیاری برای بارورسازی ابر و افزایش مصنوعی بارش صورت گرفته است. این نوع عملیات علاوه‌بر اینکه به‌صورت کمپین‌های تحقیقاتی ملی برای دوره‌های تعریف شده در مناطق هدف انجام می‌شود، توسط برخی شرکت‌های آب منطقه‌ای و به کاربری شرکت‌های خصوصی در بارورسازی ابرها صورت می‌گیرد. به‌خصوص در ایالت‌های مرکزی، غربی و جنوب غرب این کشور در ایالت‌هایی مانند وایومینگ، تگزاس و کالیفرنیا که کم‌وبیش مشابه اقلیم‌های ایران‌اند و کمبود آب یکی از مشکلات دائمی آنها بوده و با تغییر اقلیم در دهه‌های گذشته تشدید نیز شده است.

از جمله پروژه‌های بارورسازی که در کشور آمریکا انجام شده، پروژه‌های مربوط به بارورسازی ابرها در ایالت وایومینگ است که طی ۶ سال انجام شده و نتایج آن در مجله‌های علمی معتبر انجمن هواشناسی آمریکا به چاپ رسیده است. انتخاب این پروژه‌ها به دو دلیل انجام شده است: اول اینکه از سابقه زمانی نسبتاً طولانی برخوردار است (۶ سال) و دوم اینکه با روش‌های مختلف، نتایج بارورسازی ارزیابی شده است و این امر اطمینان به نتایج تحقیقات را بیشتر می‌کند. پروژه آزمایشی اصلاح آب و هوای وایومینگ آزمایش آماری تصادفی بارورسازی ابر بود که در دو رشته‌کوه در شرق وایومینگ انجام شد و ۶ سال (۲۰۱۳-۲۰۰۸) به طول انجامید. هدف از این آزمایش، پاسخ به این سؤال بود که آیا بارورسازی ابرهای کوهساری می‌تواند بارش برف و برف‌چال را افزایش دهد؟ طراحی آزمایشی شامل برف‌سنج‌های مشابه مستقر در پیکربندی منطقه کنترلی و هدف و برف‌سنج‌های هم‌متغیر برای حسابداری تغییرات بارش و بارورسازی ابر زمینی با یدور نقره بود. نتایج این آزمایش با طراحی آزمایش آماری - فیزیکی و با مدل‌سازی گروهی ارزیابی شده است.

نسبت رگرسیون ریشه اعمال شده بر ۱۱۸ مورد آزمایشی (تعداد آزمایش‌ها در این ۶ سال)، شواهد آماری کافی برای رد فرضیه صفر مبنی‌بر نبود اثر بارورسازی ابر زمینی ارائه نکرد. تخمین‌های مدل‌سازی گروهی از تأثیر بارورسازی زمینی (با استفاده از ژنراتورهای زمینی)، ارزیابی جایگزینی از آزمایش ۶ساله را ارائه می‌دهند. نتایج رویکرد مدل‌سازی گروهی با و بدون بارورسازی، میانگین افزایش بارندگی ۵ درصد با دامنه بین ۳ تا ۷ درصد را تخمین زد. تخمین تأثیر بر بارندگی سالیانه در این رشته کوه‌ها نیازمند نتایج مطالعه دیگری است که نشان می‌دهد تقریباً ۳۰ درصد از بارندگی سالیانه ناشی از ابرهایی است که در آزمایش بارورسازی قابل بارورسازی تشخیص داده شده‌اند. بنابراین، تأثیر بارورسازی در حدود ۱/۵ درصد از بارندگی سالیانه است، در مقایسه با ۱ درصد برای آزمایش آماری-فیزیکی که برای رد فرضیه صفر کافی نبود. این نتایج، برآوردی از تأثیر بارورسازی زمینی در رشته‌کوه‌های سیرامادره و مدیسین‌بو را در وایومینگ ارائه می‌دهند که تغییرات در شرایط اولیه و فیزیک مدل را نیز در نظر می‌گیرند. در این تحقیقات، ابتدا ارزیابی آماری آزمایش تصادفی بارورسازی ابر در پروژه توصیف شد. از جمله توصیف تفصیلی از فرایندهای کنترل کیفیت مورد استفاده برای غربالگری داده‌های برف‌سنج انجام شد. به‌عنوان بخشی از تلاش کنترل کیفیت، روش جدید و قوی برای تصحیح داده‌های برف‌سنجی توسعه یافت و ۱۱۸ واحد آزمایشی از کل تعداد آزمایش‌ها انتخاب شد که معیارهای کنترل کیفیت و بارورسازی را برآورده می‌کرد. نتایج آماری با استفاده از این ۱۱۸ واحد آزمایشی، که در ۶ سال جمع‌آوری شده است، نشان داد که شواهد آماری کافی برای رد فرضیه صفر مبنی‌بر نبود اثر بارورسازی زمینی وجود ندارد. درحالی‌که ممکن است با جمع‌آوری حدود هزار مورد بتوان فرضیه صفر را رد کرد. زمان و هزینه مورد نیاز برای افزایش تعداد موارد آزمایش و کنترل، انجام موارد بیشتر را غیرممکن می‌کند. بنابراین به‌جای جمع‌آوری موارد اضافی با هزینه‌های بسیار زیاد، یک رویکرد مدل‌سازی گروهی برای تخمین تأثیر بارورسازی زمینی انجام شد و در بخش دوم این تحقیق، رویکرد مدل‌سازی این مزیت را دارد که شرایط با و بدون بارورسازی را می‌توان شبیه‌سازی کرد. این کار امکان تعیین تفاوت شبیه‌سازی‌های مدل برای تخمین اثر بارورسازی را فراهم می‌کند. رویکرد مدل‌سازی گروهی فرصت بهتری را برای تعیین عدم قطعیت در شرایط اولیه، انحرافات مدل و خطاهای تصادفی در شبیه‌سازی‌های مدل فراهم می‌کند. بااین‌حال، پیش‌نیاز برای استفاده از یک مدل این است که شبیه‌سازی‌ها باید واقعیت را به‌طور معقول نشان دهند. داده‌های جامع برف‌سنج،

داده‌های حاصل از ارسال بالون‌های هواشناسی و رادیومتری برای انجام این تحقیق مورد استفاده قرار گرفت و مقایسه شبیه‌سازی‌های گروهی مدل‌ها و داده‌های برف‌سنجی در هر واحد آزمایشی، توافق معقولی را بین آنها نشان داد. بااین‌حال، باید توجه داشت درحالی‌که در اکثریت موارد میانگین نتایج مدل‌سازی گروهی تخمین بارش را نسبت به یک شبیه‌سازی قطعی بهبود می‌بخشد، در برخی موارد بارش مشاهده شده به‌طور قابل توجهی با میانگین مدل‌سازی گروهی متفاوت بود. ازآنجایی‌که اثر بارورسازی از اختلاف یک شبیه‌سازی بارورسازی شده و بدون بارورسازی محاسبه می‌شود، اثر تخمین زده شده بارورسازی ممکن است همچنان معقول باشد.

اثر بارورسازی گروهی با یک مدل‌سازی ۲۴عضوی برای هریک از سه مجموعه داده در مجموع ۸۹۴۶ شبیه‌سازی برای شبیه‌سازی هریک از ۱۱۸ واحد آزمایشی انتخابی را ایجاد کرد. این رویکرد انحرافات بالقوه ناشی از تغییر زمان بارش برای هر واحد آزمایشی را به حداقل رساند و مؤلفه واداشت کوهساری بارش را به‌خوبی پوشش داد. نتایج مدل‌سازی گروهی که در آن اثر جفت شده بارورسازی برای هر عضو مدل‌سازی گروهی تخمین زده شد، افزایش میانگین بارندگی ۵ درصد با دامنه بین ۳ تا ۷ درصد را نشان داد و این نتایج برآوردی از تأثیر بارورسازی زمینی در رشته‌کوه‌های سیرامادره و مدیسین‌بو در وایومینگ را برای واحدهای آزمایشی vh ارائه می‌دهند که تغییرات کلیدی در شرایط اولیه و فیزیک مدل در آنها در نظر گرفته شد. براساس نتایج به‌دست‌آمده، موارد انتخابی فقط ۳۰ درصد از کل موارد بارندگی را تشکیل می‌دهند؛ بنابراین تأثیر کلی بارورسازی بر بارندگی سالیانه در این منطقه حدود ۱/۵ درصد از بارش سالیانه است [۲۶].

همچنین در پژوهش علمی دیگری، مطالعات ارزیابی و نتایج مقالات علمی متعدد مرور و نتایج بارورسازی در آمریکا و به‌خصوص در ایالت‌های جنوب غربی و مرکزی این کشور بررسی شده است. مروری بر نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که در آمریکا نیز غالباً پروژه‌های بارورسازی ابر و افزایش مصنوعی بارش در پاسخ به کمبود منابع آب قابل اعتماد و نیازهای دیگر جامعه، که اغلب در اثر تغییر اقلیم تشدید می‌شوند، انجام گرفته است و سابقه طولانی دارد. براساس این تحقیق، که برمبنای مرور مطالعات قبلی است، تعداد بیشتری از کشورها درحال برنامه‌ریزی یا اجرای فعالیت‌های افزایش بارندگی‌اند و گاهی اقدامات ناامیدانه براساس وعده‌های غیرواقعی به‌جای دلایل علمی دقیق، اساس انجام چنین عملیاتی قرار می‌گیرند. در دو دهه گذشته، پیشرفت‌های عمده‌ای در قابلیت‌های مدل‌سازی، تحلیلی و مشاهده‌ای حاصل شده است که درک ما را از فرایندهای مجزای ابر و تعاملات بالقوه آنها افزایش می‌دهد. به‌دلیل مطالعات متعدد درباره تعامل ذرات معلق و ابر برای اهداف اقلیمی، اکنون بهتر می‌توان تأثیر ذرات معلق موجود در هوا را هنگام عمل به‌عنوان هسته‌های تراکم ابر و ذرات هسته‌زایی یخ، و تأثیر تعداد و توزیع اندازه ذرات معلق و درنتیجه زنجیره سازوکارهای مؤثر بر بارش را درک کرد. بااین‌حال، انرژی عظیم مرتبط با سیستم‌های طبیعی ابر به این معنی است که هرگونه تلاش برای افزایش بارندگی در سطح زمین باید براساس دانش دقیقی از سیستم و شامل مداخله‌ای دقیق (مانند بارورسازی با ذرات معلق مناسب که تراکم ذرات طبیعی را افزایش می‌دهند یا جایگزین می‌کنند) باشد.

این پژوهش به‌طور انحصاری براساس شواهد و مستندات علمی افزایش بارندگی تمرکز دارد. در این بررسی دو نوع ابری که در گذشته بیشتر در بارورسازی ابر مورد توجه بوده‌اند، در نظر گرفته شدند (ابرهای زمستانی کوهساری یا ابرهای با دمای پایین و سرد و ابرهای همرفتی یا ابرهای گرم). بارورسازی ابرهای زمستانی کوهستانی با ذرات هسته‌زایی یخ، پتانسیل ایجاد بارش برف را برای افزایش انباشت برف (تقویت برف‌چال‌ها) در مناطق مخزن آب کوهستانی دارد. نوع دوم مربوط به ابرهای همرفتی فاز مایع و مختلط است که با ذرات جاذب رطوبت یا هسته‌زایی یخ انجام می‌شوند تا بارندگی فاز مایع یا مختلط را تحریک کنند؛ مانند عملیات بارورسازی ابر کشور امارات که با توجه به اقلیم آن بیشتر با این نوع سامانه‌های ابری سروکار دارد. ابرهای همرفتی فاز مخلوط با ذرات جاذب رطوبت یا هسته‌زایی یخ به‌منظور ایجاد بارش فاز مایع یا مخلوط بارورسازی شده‌اند. ازآنجایی‌که این ابرها عموماً تحت تأثیر گرم شدن سطح زمین قرار می‌گیرند، تغییرپذیری بارش طبیعی آنها به این معنی است که شناسایی هرگونه افزایش بارش محلی ناشی از بارورسازی دشوار است و پیچیدگی سیستم‌های ابر به این معنی است که هر استراتژی بارورسازی نیازمند دانش دقیق از سیستم و تزریق دقیق ذرات معلق مناسب است که ذرات طبیعی را برای تقویت بارش

طبیعی افزایش یا جایگزین کند. از طرفی برای مستند کردن فرایندهای مرتبط با بارش طبیعی در منطقه مورد نظر و تخمین حساسیت آنها به بارورسازی، مطالعات اکتشافی مورد نیاز است. پس از تکمیل و موفقیت‌آمیز بودن طیف مطالعات اکتشافی، بارورسازی می‌تواند برای به دست آوردن منافع اقتصادی به مناطق و دوره‌های زمانی وسیع‌تری گسترش یابد. انجام عملیات بارورسازی در مقیاس حوضه آبریز، نیازمند بررسی‌های جامع است. قبل از انجام آزمایش در مقیاس حوضه آبریز، داده‌های تاریخی باید برای تخمین احتمال تشخیص تقویت بارش تجزیه و تحلیل شوند؛ بدین معنا که برای تعیین حداقل مدت آزمایش، تصادفی‌سازی بارورسازی و روش‌شناسی سازگار برای پشتیبانی از یک تحلیل آماری دقیق از داده‌های جمع‌آوری شده در طول آزمایش ضروری است. مدل‌سازی با وضوح بالا می‌تواند برای پشتیبانی از تمام مراحل آزمایش استفاده شود. علاوه‌بر این، مسائل احتمالی آلودگی، اکولوژیکی، جامعه‌شناختی و حقوقی و همچنین اثرات خارج از منطقه نیازمند بررسی است.

اگرچه درک کلی از ابرها در محیط سینوپتیکی آن پیشرفت کرده است، بااین‌حال، مسائل حل نشده‌ای در خصوص تعاملات بین ذرات معلق طبیعی و ذرات مصنوعی یا هسته‌های میعان و تراکم وجود دارند. به‌طور خاص، اساس فرایندهای تکثیر ثانویه یخ در ابر به‌خوبی درک نشده است. تعاملات بین میکروفیزیک ابر و دینامیک و پیامدهای آنها برای راندمان بارندگی و همچنین با دینامیک درباره تمام مقیاس‌ها، نیازمند انجام تحقیقات بیشتر است. مکان، زمان و روش بارورسازی باید با شرایط محلی سازگار شود. ظرفیت‌های مشاهده (از جمله نرم‌افزارهای منبع باز قوی) و مدل‌سازی میان‌مقیاس سه‌بعدی با وضوح بالا از دینامیک، میکروفیزیک و فرایندهای ذرات معلق به‌ویژه در خصوص رقابت بین ذرات طبیعی و ذرات بارورسازی باید پیشرفت کند. درحالی‌که کمبود آب در گذشته انگیزه‌ای برای ابتکارات بارورسازی ابر بوده، در حال حاضر، شتاب گرفتن تغییرات اقلیمی در کنار عدم قطعیت‌های موجود، منجر به پیچیدگی بیشتر این موضوع شده است [۲۷].

۴-۷. استرالیا

بارورسازی ابر کوهساری زمستانی برای دهه‌ها بر فراز کوه‌های برفی استرالیا برای تأمین منابع آب انجام شده است. بااین‌حال، از جمله پژوهش‌هایی که شبیه‌سازی بارورسازی ابر را برای یک ارزیابی قوی و مبتنی‌بر رویداد از تأثیر بارورسازی مطالعه می‌کند، در سال ۲۰۲۳ انجام شده است [۲۸]. کوه‌های برفی استرالیا، سرچشمه چندین رودخانه بزرگ‌اند و انباشت برف ناشی از بارش کوهساری زمستان برای تولید برق‌آبی، آبیاری و فعالیت‌های تفریحی زمستانی در این حوضه حیاتی است. مطالعات نشان داده است که روند بارش برف در منطقه نزولی است و این موضوع سبب علاقه‌مندی به بارورسازی یخزا به‌عنوان راه‌حلی بالقوه برای این چالش‌ها شده است. از سال ۲۰۰۴، شرکتی خصوصی در کوه‌های برفی استرالیا برای افزایش بارش برف در حوضه آبریز مربوطه، طی ماه‌های سرد بذرپاشی ابر یخزا را اجرا کرده و طبق تحلیل داده‌های مشاهداتی بلندمدت، تأثیر مثبت بارورسازی را بر منطقه هدف، به‌ازای هر عملیات بارورسازی یخزا، منجر به افزایش بارش بین ۰/۳۷ تا ۰/۵۵ میلی‌متر بین سال‌های ۲۰۰۵ و ۲۰۰۹ شده است. براساس نتایج ارائه شده در پژوهش مربوطه، دسترسی به آب فوق سرد پیش‌نیازی مهم برای مؤثر بودن بارورسازی ابر است. بنابراین وجود آب فراسرد عاملی کلیدی است که برای شناسایی پتانسیل بارورسازی باید در عملیات میدانی بارورسازی قبل از انجام عملیات مورد سنجش و ارزیابی قرار گیرد.

این مطالعه اولین شبیه‌سازی‌های عددی ابرهای بذرپاشی شده بر فراز کوه‌های برفی استرالیاست که با استفاده از مدل‌سازی با استفاده از یک نسخه خاص مدل عددی WRF(مدل میان‌مقیاس منطقه محدود با کاربرد گسترده جهانی در هواشناسی) انجام گرفت. مدل بارورسازی یخزای جدید برای شبیه‌سازی پاسخ ابر به بذرپاشی کوهساری زمستانی تحت شرایط مختلف هواشناسی مورد استفاده قرار گرفت. سه مورد طی دوره‌های بارورسازی در سال ۲۰۱۸ برای ارزیابی مدل انتخاب شدند که هم‌زمان با یک شبکه اندازه‌گیری گسترده زمین‌پایه همراه بود و داده‌های شبکه اندازه‌گیری برای اعتبارسنجی و ارزیابی مدل استفاده شد.

مقایسه بین شبیه‌سازی‌ها و مشاهدات نشان داد که مدل عددی ساختارهای ابر، مسیر آب مایع و بارندگی را به‌طور واقع‌بینانه شبیه‌سازی کرد و آزمایش‌های حساسیت برای مشخص کردن عدم قطعیت‌های کلیدی در شبیه‌سازی ابرهای طبیعی و بذرپاشی شده و فرایندهای بارندگی انجام شد. این مطالعه نشان می‌دهد که در سناریوهای بدون بارورسازی، انحرافات گرم و سرد در مجموعه داده‌های مختلف آغازگری، می‌توانند شدت و فاز بارندگی طبیعی را به‌شدت تحت تأثیر قرار دهند و اثر بارورسازی در درجه اول به شرایط آئروسل و فرایند هسته‌سازی یخ طبیعی حساس است و هر دو عامل یعنی وجود آب مایع فوق سرد و فاز بارندگی را تغییر می‌دهند و درنتیجه بر سرعت هسته‌سازی یدور نقره تأثیر می‌گذارند. علاوه‌بر این، حساسیت مدل در برخی موارد ناسازگار بود که نشان می‌دهد هیچ پیکربندی واحدی از مدل به‌طور بهینه هر سه مورد را نشان نمی‌دهد. این امر ضرورت استفاده از رویکرد چند مدلی را برای ارزیابی جامع‌تر و دقیق‌تر تأثیر بارورسازی برجسته می‌کند.

۵-۷. هند

در چند دهه گذشته، با تغییر آب و هوا و افزایش میانگین دما، تقاضا برای روش‌های مؤثر افزایش بارندگی در مناطق خشک هند افزایش یافته است. در آزمایش تعامل ابر و ذرات هوا و افزایش بارندگی، تحقیقی علمی در یک منطقه سایه‌باران از کوه‌های گات غربی هند انجام شده است. هدف اصلی، بررسی اثربخشی بارورسازی رطوبت‌دوست، در ابرهای همرفتی و توسعه یک پروتکل بارورسازی ابرها بوده است. در این عملیات، توصیه‌های سازمان جهانی هواشناسی رعایت شد و تحقیقات فیزیکی، آماری و عددی را در برداشت. نتایج اولیه این تحقیقات، در دوره باران‌های موسمی ۲۰۱۹-۲۰۱۸ و با استفاده از دو هواپیمای مجهز، یک رادار دوقطبی Cباند زمینی، یک شبکه بارش‌سنجی، رادیوسوندها و سنجنده‌های ذرات سطحی انجام شد. در این بارورسازی آب‌دوست، قطره‌های ابر و فرایندهای کلیدی میکروفیزیکی ابر با فرضیه بارورسازی ردیابی شد. چالش‌های قابل توجه ارزیابی تأثیرات بارورسازی در ابرهای همرفتی و نتایج ۱۵۰ نمونه بارورسازی و ۱۲۲ نمونه بدون بارورسازی آزمایش‌های تصادفی نشان داده شد. بیش از پنج هزار گذر ابر در شبکه هوایی مشاهده شد و جزئیات مربوط به خواص ابر همرفتی به‌عنوان شاخص‌های کلیدی برای استراتژی بارورسازی و پروتکل ارزیابی مدنظر قرار داشت. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهند که برای کاهش عدم قطعیت در بارورسازی ابرها، باید عملیات بارورسازی به‌صورت علمی انجام شود. در این پژوهش توصیه شده است که نتایج این مطالعه باید مورد توجه جامعه علمی و سیاستگذاران قرار گیرد که نگران تأثیر تغییرات آب و هوا بر بارندگی و کاهش کمبود بارندگی هستند.

در این پروژه فرضیه‌های بارورسازی در ابرهای پایه گرم به این شرح بود:

- در بارورسازی با هستک‌های آب‌دوست (نمک) با ذرات با اندازه شعاع یک تا ۱۰ میکرومتر، طیف اندازه قطره‌های ابر در نزدیکی پایه ابر گسترده می‌شود که منجر به تشکیل قطره‌های باران تقویت‌شده در ارتفاع می‌شود.
- ذرات با شعاع زیر میکرومتر تشکیل قطره‌های باران را تا بالای سطح انجماد به تأخیر می‌اندازند، سپس با تشکیل گویچه‌های یخی سرعت یخ‌زدگی را افزایش می‌دهند و بارش را تسریع می‌کنند.
- ممکن است در محیط باران‌های موسمی تحت بادهای قوی، بارورسازی منجر به تأثیر بیشتر در خارج از منطقه هدف شود.

در این مطالعه، استراتژی بارورسازی در ابرهای پایه گرم (ابرهای جوششی در فصل تابستان مانند منطقه مونسون)، براساس ارزیابی اندازه‌گیری‌های قبلی در منطقه از تراکم هسته‌های میعان در محیط و پروفایل عمودی دما، رطوبت و بادها، معیارهای بارورسازی به این شرح تعیین شد:

۱. پایه ابر کاملاً تعریف شده بدون بارش در زمان بارورسازی،

۲. حداکثر مقدار محتوای آب مایع مساوی یا بیشتر از ۰/۵ گرم بر متر مکعب در ۳۰۰ متر بالاتر از پایه ابر،

۳. جریانات صعودی بیش از ۱/۵ متر بر ثانیه در پایه ابر باشد،

۴. عمق لایه گرم بیش از یک کیلومتر باشد،

۵. در لایه بین ۲ تا ۶ کیلومتر جو رطوبت نسبی بیش از ۴۰ درصد باشد.

یکی دیگر از آثار قابل توجهی که بررسی شد، عمق لایه گرم (لایه بین سطح انجماد و ارتفاع پایه ابر) بود که به‌صورت خطی با شعاع مؤثر قطره‌های ابر مرتبط است. در این آزمایش‌ها اغلب ابرهای انباشته با ارتفاع بیش از ۹ کیلومتر و معیار تعیین شده آن بود که عمق لایه گرم ابرها باید بیش از یک کیلومتر باشد تا عملیات بارورسازی با ابرهای همرفتی در نظر گرفته شود.

در ارزیابی تأثیر بارورسازی، هدف، شناسایی تغییرات در خواص ابر قابل تشخیص از اندازه‌گیری‌های در محل است. ابتدا، هواپیما در سیصدمتری بالای پایه ابر نفوذ می‌کرد تا محتوای آب مایع را بررسی کند و در پی جریانات صعودی نزدیک پایه ابر بیش از ۱/۵ متر بر ثانیه بود. هنگامی که شرایط مکمل برای بارورسازی مطابق معیارهای بارورسازی تعریف شده برقرار بود، ابری که دارای شرایط ذکر شده بود، انتخاب و بارورسازی با دو شعله سوزان در هر بال به مدت تقریبی چهار دقیقه با پرواز هواپیما در یک مسیر حلقوی در زیر پایه ابر انجام می‌شد. شعله‌های سوزاننده مواد بارورسازی ابرها در جریانات صعودی پایه ابر سوزانده می‌شوند تا ذرات بذر با حداقل پراکندگی وارد ابرها شوند. در این آزمایش چندین نفوذ ابر با جریانات صعودی بیشتر از دو متر بر ثانیه و محتوای آب گرم بیشتر از ۰/۵ گرم بر متر مکعب انجام شده است. مشاهدات نشان داد که قطره‌های با قطر میانگین حجمی ۱۰ میکرومتر نزدیک پایه ابر در اکثر مشاهدات، مربوط به غلظت تعداد قطره‌های بیش از ۵۰۰ عدد در سانتی‌متر مکعب است. اغلب غلظت‌های بالای آئروسل‌ها مربوط به پایه ابرهاست. رشد قطره‌های در محیط با غلظت آئروسل بالا (موارد بارورسازی) کُند می‌شود، ابرها عمق بیشتری دارند و بارش از ارتفاعاتی که دما زیر صفر است می‌آید. ابرهای تمیز (با غلظت تعداد قطره‌های کمتر از ۵۰۰ بر سانتی‌متر مکعب) قطره‌های باران را در ارتفاع پایین‌تر ایجاد می‌کنند. قطره‌های کوچک و بزرگ پس از بارورسازی به‌طور قابل توجهی بزرگ‌تر از نمونه‌های بدون بارورسازی هستند. این یافته نشان می‌دهد که بارورسازی، غلظت قطره‌های کوچک و بزرگ را افزایش می‌دهد که برای برخورد- تجمع ایدئال است. این رفتار برای طیف وسیعی از ارتفاعات پایه ابر مشاهده می‌شود.

در خصوص غلظت قطرک‌های ابر، به‌دلیل تأخیر در توسعه بارش غلظت‌های بالاتر قطرک‌ها نسبت به غلظت‌های کمتر قطرک‌ها، به‌سبب مشاهده قطره‌های بزرگ‌تر در فاز مختلط (وجود آب و یخ) ارجحیت دارند. بارورسازی در پایه ابر سبب افزایش غلظت ذرات بزرگ و کوچک می‌شود و ابتدا کاهش فرایند برخورد - تجمیع در سطوح پایین‌تر ابر و سپس سبب برخورد و چسبندگی بیشتر و افزایش آب مایع فوق سرد می‌شود و توسعه بارش را به تأخیر می‌اندازد [۲۹].

۸. بارورسازی ابرها و تعدیل وضع هوا از دیدگاه حقوقی و قانونی

۸-۱. قوانین و مقررات مربوط به تعدیل وضع هوا در آمریکا

آمریکا به‌دلیل سابقه زیاد در اجرای برنامه‌های تعدیل وضع هوا، وسعت زیاد و تنوع آب و هوایی، سیستم اداره سیاسی کشور به‌صورت فدرالی و وجود قوانین متعدد، باسابقه‌ترین کشور دنیا از نظر قوانین و مقررات تعدیل وضع هوا محسوب می‌شود؛ به‌طوری که اولین همایش در زمینه موضوعات قانونی تعدیل وضع هوا در سال ۱۹۷۶ توسط کانون وکلای آمریکا در این کشور برگزار شد.

در آمریکا قوانین مربوط به تعدیل وضع هوا همانند دیگر فعالیت‌ها، توسط سه بخش، کنگره، مجالس ایالتی و نهادهای قانونی و دادگاه‌ها تنظیم می‌شود. از دلایل مهمی که براساس آنها وظیفه قانونگذاری درخصوص تعدیل وضع هوا را برعهده نهادهای دولتی گذاشته شده است می‌توان به این صورت بیان کرد [۳۰]:

۱. آب و هوا بخشی از محیط زیستی است که مردم در آن زندگی می‌کنند.
۲. به‌دلیل اینکه تخصیص سایر منابع آب از جمله رودخانه‌ها توسط دولت، قانونگذاری شده است؛ لذا بدیهی است که وظیفه قانون‌مند کردن آب‌های جوی نیز برعهده دولت باشد.

به‌طور کلی تأمین حقوق و خسارات قانونی ناشی از تعدیل وضع هوا در برخی از ایالات آمریکا در قراردادهای قانونی لحاظ می‌شود. در این ایالات از هر پنج مورد دادرسی حقوقی مربوط به مسائل آب، دست‌کم یک مورد مربوط به مسائل حقوقی آب جوی و خسارات وارد آمده از طرف تعدیل کنندگان وضع هواست.

در آمریکا رعایت یا عدم رعایت ملاحظات محیط زیستی تعدیل وضع هوا به‌شدت کنترل می‌شود. در قانون سیاست‌های محیط زیستی آمریکا، مؤسسات مربوطه باید مسئولیت پروژه‌های اثرگذار بر کیفیت محیط زیست را برعهده بگیرند و گزارش‌های مربوطه را ارائه کنند. همچنین در آمریکا وظیفه صدور مجوز بارورسازی ابرها برعهده نهاد نظارتی است که توسط مجلس تعیین می‌شود. برای مثال، در ایالت تگزاس، که سابقه دیرینه‌ای در اجرای برنامه‌های بارورسازی ابرها دارد، مسئولیت نظارت و صدور مجوز ابتدا برعهده وزارت کشاورزی و اداره منابع طبیعی بوده و در چند سال اخیر برعهده سازمان صدور مجوز و تنظیم مقررات تگزاس نهاده شده است.

۲-۸. کنوانسیون ژنو (۱۹۷۷) درباره تعدیل وضع هوا

در سال ۱۹۷۴ به‌دنبال تنفر عمومی نسبت به استفاده از تعدیل وضع هوا در جنگ ویتنام توسط ارتش آمریکا، کنگره آمریکا قانون منع استفاده از فناوری بارورسازی ابرها و دیگر روش‌های مشابه در جنگ را تصویب کرد. پس از آن در سال ۱۹۷۶ از طرف اتحاد جماهیر شوروی و آمریکا راه‌حلی بین‌المللی در زمینه منع استفاده غیردوستانه از فناوری‌های تعدیل وضع هوا پیشنهاد شد. به‌دنبال این پیشنهاد در مجمع عمومی سازمان ملل مباحث عمیقی درباره پیش‌نویس کنوانسیونی در این خصوص، که بعدها به کنوانسیون ۱۹۷۷ ژنو نام‌گذاری شد، صورت گرفت و مفاد این کنوانسیون با ۹۶ رأی موافق در مقابل هشت رأی مخالف و سی رأی ممتنع برای امضا به تصویب رسید. کنوانسیون مذکور درمجموع به امضای ۵۱ کشور دنیا رسید که کشور ایران یکی از آنهاست [۳۱].

موضوع کنوانسیون ۱۹۷۷ ژنو منع استفاده از فناوری‌های تعدیل یا تغییر محیط‌زیستی توسط ارتش یا دیگر نیروهای متخاصم بوده و تعهدات اصلی آن این است که هر دولتی که متعهد به این کنوانسیون می‌شود، نباید از روش‌های تعدیل و تغییر محیط‌زیستی به‌صورت گسترده و طولانی‌مدت یا با هدف صدمات جدی برای تخریب، ایجاد خسارت یا صدمه زدن به دیگر کشورها یا با اهداف نظامی و خصمانه استفاده کند. منظور از گسترده و طولانی‌مدت به‌ترتیب عبارت‌اند از: ناحیه‌ای با مساحت چند صد کیلومتر مربع و فواصل زمانی چند ماه یا تقریباً فصلی و منظور از صدمات جدی، صدمه مهمی به زندگی انسان، طبیعت و منابع اقتصادی یا دیگر دارایی‌هاست.

۹. آینده بارورسازی زمستانی ابرهای کوهستانی (بارورسازی یخ‌زا)

در شرایطی که منابع آبی به‌ویژه در برخی نقاط با نیاز آبی فراوان و کمبود آب مانند مناطق غربی ایالات متحده و خاورمیانه، در مواجهه با تغییرات آب و هوایی، روزبه‌روز محدودتر می‌شوند، تحقیقات و فناوری‌های بارورسازی ابرها به‌طور فزاینده‌ای دنبال می‌شوند. بااین‌حال، درک علمی اثربخشی بارورسازی ابرها، از جمله فرایندهای میکروفیزیکی مرتبط با ابرها مدت‌هاست که دارای عدم قطعیت بالایی بوده است. باوجود این، برنامه‌های متعدد عملیاتی و تحقیقاتی تعدیل آب و هوا ادامه یافت و نتایج چندین برنامه تحقیقاتی بزرگ در بیستمین کنفرانس تعدیل آب و هوایی در ژانویه سال ۲۰۱۵ در آریزونا ارائه شد. این نشست در پی انتشار نتایج مورد انتظار پروژه آزمایشی تعدیل آب و هوای وایومینگ (در بخش تجارب ایالت متحده آمریکا تشریح شد) برگزار شد. پروژه وایومینگ، پروژه‌ای چندساله و حمایت شده توسط ایالت وایومینگ بود که شامل آزمایش‌های بارورسازی تصادفی برای ارزیابی آماری اثربخشی بارورسازی ابرهای کوهستانی یخزا با یدور نقره برای افزایش برف در مناطق کوهستانی این ایالت بود. علاوه‌بر آزمایش آماری، مطالعات مدل‌سازی فیزیکی و عددی نیز با استفاده از رویکردهای نوآورانه انجام شد. مطالعه اصلی فرایندهای فیزیکی، برنامه تحقیقاتی، که توسط بنیاد ملی علوم تأمین مالی شده، به نام تحقیقات تأثیر بارورسازی ابرها بود که در پروژه تعدیل آب و هوای وایومینگ تلفیق شد و اندازه‌گیری‌های بی‌سابقه‌ای با استفاده از رادار ابر و لیدار، از ابرهای بارور شده و بدون بارورسازی انجام شد. هم‌زمان با پروژه وایومینگ، دو برنامه بارورسازی تصادفی پشت سر هم در کوه‌های برفی استرالیا انجام شد و نتایج به‌دست‌آمده در این نشست ارائه شد. نتایج برنامه‌های تحقیقاتی نوآورانه مختلف بر بارورسازی ابرهای کوهستانی زمستانی متمرکز بود. نکات کلیدی خروجی این نشست به این شرح بود:

فرصت‌ها: باوجودی که بودجه فدرال برای تحقیقات تعدیل آب و هوا در اواخر دهه ۱۹۸۰ به‌سرعت کاهش یافت، بااین‌حال، در سال‌های بعد، تعدادی پیشرفت کلیدی در فناوری مرتبط با مطالعه باروری ابرهای کوهستانی زمستانی به وجود آمد. درحالی‌که برنامه‌های تحقیقاتی بارورسازی ابرها سابقه‌ای بیش از شصت‌ساله دارد و هنوز ادامه دارند، پیشرفت‌های زیادی نیز در این زمینه حاصل شده است که این امر تا حدودی به‌دلیل نوآوری‌های جدید در فناوری، مانند استفاده از رادار ابر باند W و مدل‌سازی ابر با وضوح بالا در تحقیقات باروری ابرها بوده است. تحقیقات مدل‌سازی ابر به‌ویژه با افزایش چشمگیر قابلیت‌های محاسباتی و همچنین توسعه فراسنج‌های بارورسازی ابرها با یدور نقره در مدل تحقیقات و پیش‌بینی آب و هوا (WRF) توسعه یافته است. علاوه‌بر این، از مدل‌های با تفکیک بالا برای شبیه‌سازی فرایندهای فیزیکی دخیل در ابرهای کوهستانی زمستانی استفاده می‌شود. همچنین با کمک مدل‌سازی می‌توان به‌سرعت یک دنباله تصادفی از رویدادهای تاریخی را شبیه‌سازی کرد که درنتیجه زمان مورد نیاز برای ایجاد برآوردهای آماری قوی از تأثیر بارورسازی بر یک منطقه یا حوضه آبریز در طول چندین سال عملیات را کاهش می‌دهد. ظهور داده‌های ماهواره‌ای با به‌روزرسانی سریع و تفکیک بالا، از جمله نسل بعدی ماهواره‌های زمین ثابت، مانند GOES-R آمریکا و H۸ ژاپن و ارائه محصولات ارزشمند مانند مسیر آب مایع ابر و ماهواره مادیس، نیز پیشرفت مرزی جدیدی بوده است که می‌تواند برای عملیات و تحقیقات بارورسازی ابرها مفید باشد.

از دیدگاه عملیاتی، قابلیت‌های مدل‌سازی جدید نیز پیشرفتی مهم است؛ زیرا مدل‌های بهبودیافته برای بارورسازی ابرها برای کمک به برنامه‌ریزی، انجام و بهینه‌سازی عملیات بارورسازی ابرها و همچنین برای ارزیابی مزایای برنامه‌های عملیاتی مورد استفاده قرار می‌گیرند. پیشرفت کلیدی دیگر، که تا حدودی به‌دلیل قابلیت‌های بهبود یافته مدل‌سازی و فناوری‌های مشاهده‌ای است، توانایی تعریف بهتر پنجره‌های فرصت بارورسازی و تشخیص پاسخ بارورسازی است. علاوه‌بر این، استفاده از مجموعه داده‌های بازتحلیل مدل یا خروجی مدل‌های آب و هوای منطقه‌ای با تفکیک بالا برای مطالعه اقلیمی شرایط بارورسازی در مناطق با موانع کوهستانی با داده‌های مشاهداتی محدود یا

بدون مشاهدات، در ارزیابی طوفان‌های زمستانی قابل بارورسازی بسیار مفید است.

چالش‌ها: در حالی که قطعاً جنبه‌های جدید و مهمی در خصوص آینده بارورسازی ابرهای کوهستانی زمستانی وجود دارد، چالش‌های جدی نیز در این زمینه وجود دارد که لازم است مورد توجه و بررسی قرار گیرند. این موارد می‌توانند چالش‌هایی برای ارزیابی بارورسازی ابرها ایجاد کنند. از محدودیت‌های اندازه‌گیری و مدل‌سازی گرفته تا چالش‌های لجستیکی و روابط عمومی در خصوص محدودیت‌های اندازه‌گیری و مدل‌سازی، ویژگی‌های مقیاس کوچک مانند ابرهای همرفتی ادغام شده و سلول‌های مولد درون ابر که ممکن است آغازگر تشکیل یخ طبیعی باشند و پیچیدگی‌های سیستم‌های طوفان در مناطق با توپوگرافی پیچیده به‌عنوان مناطق چالش‌برانگیز برای مدل‌سازی و تأیید مشاهدات را شامل می‌شوند. همچنین از نظر لجستیکی و روابط عمومی، بودجه و بهبود درک عمومی از بارورسازی ابرها به‌عنوان چالش‌های همیشگی شناسایی شدند. علاوه‌بر این، باید در مدیریت این پروژه‌ها تداوم وجود داشته باشد تا عملیات سازگار و طراحی شده به‌خوبی حفظ شوند؛ اما این هدف به‌دلیل محدودیت‌های بودجه و عدم قطعیت‌های موجود، غالباً چالش‌برانگیز خواهد بود.

آینده‌نگری: مدل‌سازی عددی به‌عنوان روشی کارآمد برای شبیه‌سازی رویدادهای بارش طبیعی و تأثیرات بارورسازی بر ابرها اثبات شده است. بااین‌حال، مدل‌سازی دارای عدم قطعیت‌هایی است که باید بیشتر درک و کمّی‌سازی شوند. برخی عدم قطعیت‌های کلیدی در مدل‌سازی آب و هوا و درک علمی کلی مربوط به آغاز و تکثیر یخ طبیعی، تقسیم‌بندی مایع و یخ ابر و توزیع اندازه قطره‌هاست که بر مکانیسم‌های رشد برف تأثیر می‌گذارند. تحقیقات تعدیل آب و هوا در واقع می‌توانند با آزمایش‌ها و عملیات نسبتاً کنترل شده برای درک بهتر میکروفیزیک ابرها و مشاهده بارش انجام شوند. علاوه‌بر این، ماهیت آشفته آب و هوا در مقیاس‌های فضایی و زمانی مختلف، که بارورسازی انجام می‌شود، به‌وضوح آشکار است؛ یعنی حتی باوجود داده‌ها با وضوح بالا، شبیه‌سازی توزیع واقعی کمیت‌هایی مانند آب فوق سرد مایع یا بارش در مقیاس‌های چند ده کیلومتری و چند ساعته دشوار است. بنابراین، لازم است دنباله‌ای از شبیه‌سازی‌ها انجام شود تا تأثیر بلندمدت مورد انتظار بارورسازی در مکانی خاص براساس مدل‌سازی، کمّی‌سازی شود. این فرایند باید با مطالعات ارزیابی مدل پیشرفته باشد تا قابلیت اساسی مدل برای ثبت ویژگی‌های کلیدی بارش طبیعی و اثرات بارورسازی بر فیزیک ابر محلی را تأیید کند.

کمّی‌سازی عدم قطعیت‌ها برای جوامع تحقیقاتی و عملیاتی ضروری است. اعتبار علمی بارورسازی ابرها در جامعه تحقیقاتی تا زمانی که فیزیک اصلی مسئله بسیار بیشتر از آنچه در حال حاضر است، درک و کمّی‌سازی نشود و تا وقتی عدم قطعیت‌های واقعی در تأثیرات بارورسازی درک و کمّی‌سازی نشود، ایجاد نخواهد شد.

با توجه به اینکه توجیه بارورسازی ابرها برحسب نیاز به منابع آبی بیشتر (برای مصارف شهری، کشاورزی، تولید برق آبی و غیره) هدایت می‌شود، تأثیر نهایی بارورسازی ابرها باید در مقیاس حوضه آبریز در طول یک فصل اندازه‌گیری و نشان داده شود. تمرکز بر تغییر جریان آب و تأثیرات بارورسازی بر جریان آب رودخانه‌ها تا به امروز در بسیاری از برنامه‌های تحقیقاتی بارورسازی ابرها تا حد زیادی نادیده گرفته شده است. پروژه وایومینگ یکی از استثناهاست، که در آن تغییرات جریان آب ناشی از بارورسازی ابرها با استفاده از اندازه‌گیری‌ها از یک حوضه آبریز کوچک برای آزمون مدل هیدرولوژیکی و تخمین‌های کلی افزایش بارندگی از آزمایش تصادفی تخمین زده شد. بااین‌حال، تخمین‌های توزیع فضایی تأثیر بارورسازی ابرها بر بارش می‌توانند با مدل بارورسازی ابرها شبیه‌سازی شوند و سپس از مدل‌های هیدرولوژیکی مبتنی‌بر فرایند، برای ارائه تخمین‌های دقیق‌تر درباره تأثیرات جریان آب استفاده کرد. با اینکه مدل‌ها می‌توانند در این ارزیابی کمک کنند، اندازه‌گیری‌های بارش و جریان آب همچنان برای تعیین حد و تأیید مدل‌ها ضروری‌اند. برای تحقق این امر، آزمایش‌های پایدار مورد نیاز است و بنابراین نیاز به یک حوضه آبریز مجهز به ابزار (در حالت ایده‌آل) به‌عنوان بستر آزمایش، که برای سال‌ها حفظ شود، پیشنهاد می‌شود. چنین سرمایه‌گذاری بلندمدت که به‌طور مداوم فرایند تأثیر بارورسازی ابرها بر بارش را از آسمان تا زمین و رودخانه‌ها دنبال می‌کند و تأثیر بارش را بر زمین نشان می‌دهد، برای ذی‌نفعان بیشترین اهمیت را دارد [۳۲].

۱۰. جمع‌بندی و نتیجه گیری

درحال حاضر پروژه‌های تعدیل وضع هوا به دو صورت بارورسازی ابرها و یونیزاسیون جو در برخی از کشورها انجام می‌شود. از این دو حالت، بارورسازی ابرها و با روش بارورسازی مستقیم با هواپیما یا ژنراتورهای زمینی و به‌خصوص برای ابرهای کوهساری حاوی آب فرا سرد رایج‌تر است و با اهداف افزایش بارش یا کاهش خسارات جوی انجام می‌شود. یونیزاسیون جو با هدف اثرگذاری بر تغییرات آب و هوا کمتر رایج بوده و آثار و کاربرد آن برای مجامع علمی هنوز به‌طور کافی مشخص و کارآمدی آن اثبات نشده است. از طرف دیگر، تأثیر بارورسازی ابرها بر افزایش بارش، محدود است و حداکثر حدود ۱۵ تا ۲۰ درصد و تحت شرایط مناسب (در ابرهایی حاوی آب فراسرد به مقدار مناسب) و برای یک ابر یا سامانه ابری معین در مقیاس یک حوضه آبریز محدود می‌شوند (بدون افزایش بارش قابل ملاحظه در سال). **نکته حائز اهمیت آن است که اغلب فعالیت‌های انجام شده در کشورها برای بارورسازی ابرها و یونیزاسیون جو، براساس رهیافت علمی و فنی نیستند و برخی از این پروژه‌ها صرفاً براساس فشارهای اجتماعی و از روی استیصال برای تأمین آب انجام می‌شوند و فاقد الزامات لازم برای اجرای این پروژه‌ها از جمله سیستم‌های ارزیابی‌اند** [۳۳].

به‌دلیل تغییرپذیری سامانه‌های ابر و مقیاس انرژی بسیار زیاد درگیر در فرایندهای درون ابرها، با گذشت بیش از هشت دهه از فعالیت‌های بارورسازی، هنوز توافق جامعی درباره تأثیر بارورسازی ابرها و افزایش مصنوعی بارش وجود ندارد. به‌منظور آشکارسازی تأثیر بارورسازی ابرها در منطقه هدف و دوره زمانی قابل ملاحظه، نیاز به تحلیل آماری قوی و مؤثر با استفاده از داده‌های مربوط به تعداد زیادی عملیات بارورسازی در بازه‌های زمانی نسبتاً طولانی است. همچنین برای ارزیابی تأثیر بارورسازی در افزایش بارش، تداوم تحقیق و مطالعه با به‌کارگیری تمامی روش‌ها و فناوری‌های در دسترس، شامل مطالعات آماری با داده‌های مشاهداتی زمین‌پایه و دورسنجی با طول دوره زمانی مناسب شامل داده و اطلاعات تعداد زیادی عملیات بارورسازی مشابه و مطالعات فیزیکی و مدل‌سازی گروهی هواشناسی برای شبیه‌سازی بهینه فرایندهای فیزیکی و دینامیکی ابر به‌منظور شناخت و ارزیابی اطمینان‌بخش تأثیر بارورسازی ابرها لازم و ضروری است. در این راستا لازم است پروژه‌های بلندمدت مطالعاتی (فصلی یا سالیانه) در گستره و مقیاس حوضه‌های مجزای آبریز تعریف و ارزیابی شود. هنگام طراحی پروژه‌های بارورسازی ابرها لازم است تمایز بین فازهای طراحی، عملیات، جمع‌آوری و تحلیل داده مورد توجه دقیق و جدی قرار گیرد تا ضمن اجتناب از خطای احتمالی، تحلیل نتایج و ارزیابی تأثیر احتمالی بارورسازی در منطقه هدف امکان‌پذیر باشد. براساس نتایج ارزیابی تیم تخصصی سازمان جهانی هواشناسی از عملیات بارورسازی ابرها در کشورهای مختلف، این موارد گفتنی است [۱۹]:

قبل از شروع آزمایش بزرگ‌مقیاس، ضروری است که طیف وسیعی از مطالعات مقدماتی انجام شود که مناسب بودن محیط هواشناسی محل پیشنهادی برای افزایش بارندگی پایدار را نشان دهد. چنین مطالعات اکتشافی ضروری است؛ زیرا شرایط برای بارورسازی ابر مؤثر، محدود به مکان‌های مناسب از نظر جغرافیایی و فصلی‌اند.

یک مطالعه مقدماتی مهم شامل استفاده از داده‌های تاریخی برای مستندسازی تغییرپذیری بارندگی و تخمین زمان مورد نیاز برای تشخیص افزایش قابل توجه بارندگی طبیعی در سراسر منطقه هدف در مقیاس زمانی فصلی لازم است؛ زیرا تغییرپذیری طبیعی فرایندهای ابر، از جمله بارندگی روی زمین، بسیار زیاد است. طراحی و مدیریت دقیق برای بهینه‌سازی احتمال تشخیص و تأیید اساس فیزیکی افزایش بارندگی از بارورسازی ابر ضروری است. برای تشخیص اثرات بارورسازی، باید آزمایش‌های تصادفی انجام شود که در آن خواص رویدادهای بارورسازی شده مشخص با رویدادهای مشابه اما بدون بارورسازی مقایسه شوند. مقایسه‌ها نه‌فقط درباره مقدار بارندگی در رویدادهای بارورسازی شده و بدون بارورسازی، بلکه در خصوص طیف وسیعی از خواص که دنباله فرایندهای فیزیکی منجر به هرگونه افزایش بارندگی را شناسایی می‌کنند، مورد نیاز است. قابلیت‌های سیستم‌های مشاهده در تمام مقیاس‌ها از میکروفیزیکی تا هواشناسی در مقیاس همدیدی (سینوپتیکی) بسیار

قابل توجه‌اند؛ به‌طوری که استفاده از ابزارهای زمینی، مبتنی‌بر رادار و هواپیما و ماهواره برای مشاهده سیستماتیک این خواص فیزیکی (و شیمیایی) امکان‌پذیر است.

برای اینکه تحلیل آماری تأثیر بارورسازی قوی و کارآمد باشد، ضروری است که ساختار و روشی دقیق برای انتخاب رویدادها به‌عنوان نمونه بارورسازی شده و برای بارورسازی رویدادهای تصادفی تهیه شود. به‌ویژه مهم است که این پروتکل‌ها به‌طور دقیق و مداوم در طی آزمایش دنبال شوند. یک جنبه از پروتکل‌ها، اندازه‌گیری دقیق و مداوم متغیرهای کلیدی مانند بارندگی در سراسر منطقه مورد آزمایش است، به‌ویژه برای ابر همرفتی، این اندازه‌گیری‌ها شامل رادارها خواهد بود که باید در طول آزمایش به‌طور معمول و مداوم کالیبره شوند.

ارزیابی یک آزمایش بارورسازی ابر باید براساس درک علمی زنجیره فرایندهای دینامیکی و میکروفیزیکی منجر به افزایش بارندگی روی زمین باشد. درحالی که زنجیره فرایندها برای ابرهای کوهساری زمستانی اکنون در حد قابل قبولی درک شده است، همچنان عدم قطعیت‌های قابل توجهی در فرایندهای مرتبط با افزایش بارندگی در ابر همرفتی فاز مخلوط (آب و یخ) وجود دارد. این عدم قطعیت‌ها به این معنی است که ارزیابی کامل یک آزمایش افزایش بارندگی در مقیاس حوضه آبریز در ابر همرفتی فاز مخلوط اگر غیرممکن نباشد، قطعاً دشوار خواهد بود.

عوامل بارورسازی مانند یدور نقره سمی‌اند، اما مقدار مواد شیمیایی خارجی مورد استفاده در بارورسازی ابر معمولاً بسیار کم است تا سطح این مواد شیمیایی در محیط به سطح «محرک» برای نگرانی‌های بهداشتی نزدیک نشود. باوجود این، برای هر آزمایش بزرگ‌مقیاس، نظارت و ارزیابی دقیق خطرهای زیست‌محیطی نیز مهم است.

لزوم انجام آزمایش‌های در مقیاس حوضه آبریز با هدف نشان دادن مزیت اقتصادی بارورسازی ابر اجتناب‌ناپذیر است و به‌دلیل تغییرپذیری زیاد بارش طبیعی، چنین تحلیل‌هایی برای محاسبه هزینه-فایده اقتصادی ساده نیستند؛ حتی برای بارورسازی ابرهای کوهساری زمستانی، که سیستم ابر و منطقه هدف به‌وضوح قابل شناسایی و ثابت‌اند، نیز چندان ساده نیست. بنابراین ادعاهای تأثیر بارورسازی و افزایش بارش بدون مستندات علمی قابل پذیرش نیست.

مقیاس‌بندی اثرات بارورسازی ابرهای همرفتی فاز مخلوط همچنان به‌عنوان چالشی اساسی است که علت اصلی در این امر به عدم قطعیت‌ها در اساس فیزیکی روش‌شناسی و همچنین به‌دلیل تغییرپذیری شدید ابرهای همرفتی در فضا و زمان مربوط است. عدم قطعیت‌های قابل توجهی که در حال حاضر در چارچوب علمی بارورسازی ابر وجود دارد، به‌ویژه برای ابرهای همرفتی فاز مخلوط، تأثیر بارورسازی را محدود می‌کند؛ اما انتشار داده‌ها و نتایج تحقیقات مرتبط علمی بین‌المللی در این خصوص مفید و کمک‌کننده خواهد بود.

منابع و مآخذ

[1] Hunter, Steven M. (2011). Answers to frequently asked questions about cloud Seeding to augment snow-packs. North American Interstate Weather Modification Co.

[2] Riley, C. L. (1985). Mortuary Customs and Social Organization: Theory and Method (Doctoral dissertation, Western Washington University).

[3] Yoo, C., Na, W., Cho, E., Chang, K. H., Yum, S. S., & Jung, W. (2022). Evaluation of cloud seeding on the securement of additional water resources in the Boryeong Dam Basin, Korea. Journal of Hydrology, 613, 128480.

[4] Wehbe, Y., Griffiths, S., Al Mazrouei, A., Al Yazeedi, O., & Al Mandous, A. (2023). Rethinking water security in a warming climate: rainfall enhancement as an innovative augmentation technique. npj Climate and Atmospheric Science, 6(1), 171.

[5] WMO (2010). Documents on weather modification.

[6] Flossmann, A., Manton, M., Abshaev, A., Bruintjes, R., Murakami, M., Prabhakaran, T., & Yao, Z. (2018). Peer Review Report on Global Precipitation Enhancement Activities, WWRP (2018-1). World Weather Research Programme, WMO Research Department Switzerland.

[۷] سیدحسنی، منصوره (۱۹۳۱). باروری ابرها از باور تا واقعیت، وزارت نیرو، مؤسسه تحقیقات آب، مرکز ملی تحقیقات و مطالعات باروری ابرها.

[8] J.R. French, K. Friedrich, S.A. Tessendorf, R.M. Rauber, B. Geerts, R.M. Rasmussen, L. Xue, M.L. Kunkel, & D.R. Blestrud (2018). Precipitation formation from orographic cloud seeding, Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. 115 (6) 1168-1173, https://doi.org/10.1073/pnas.1716995115.

[9] Rauber, R. M., Geerts, B., Xue, L., French, J., Friedrich, K., Rasmussen, R. M., & Parkinson, S. (2019). Wintertime orographic cloud seeding—A review. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 58(10), 2117-2140.

[10] WMA (1996). Weather modification: Some facts about seeding clouds. 3rd. edition, Fresno, California.

[11] Bureau of Reclamation (2006). Optimizing cloud seeding for water and energy in California. US Technical Center.

[12] American Meteorological Society (2019). DOI:10.1175/JAMC-D-18-0341.1/

[13] Deshler, T.L. and Reynolds, D.W. (1990). The persistence of seeding effects in winter orographic cloud seeded with silver iodide burned in acetone. Journal of Applied Meteorology, 29, 477-488.

[14] Shivaji, R. (2005). Cloud seeding for India. Vijaywada, Cauntur.

[15] WMO report 2010.

[16] Executive summary of the WMO statement on weather modification (2015).

[17] ASCE, (2006). Guidelines for Cloud to augment precipitation.

[۱۸] وزارت نیرو، مؤسسه تحقیقات آب، مرکز ملی تحقیقات و مطالعات باروری ابرها، نقشه راه مدیریت منابع آب جوی کشور (۱۳۹۴).

[19]): Andrea I. Flossmann, Michael Manton, Ali Abshaev, Roelof Bruintjes, Masataka Murakami, Thara Prabhakaran And Zhan Yau. (2018). Peer Review Report on Global Precipitation Enhancement Activities.

[20]. AMS (2010). Planned weather modification through cloud seeding.

[21] WMA (2005). Weather modification association capability statement.

[22] Dejun Li, et.al (2022). Macro- and Micro-physical Characteristics of Different Parts of Mixed Convective-strati form Clouds and Differences in Their Responses to Seeding, ADVANCES IN ATMOSPHERIC

SCIENCES, VOL. 39, DECEMBER 2022, 2040–2055.
[23] Wang, J., Yue, Z., Rosenfeld, D., Zhang, L., Zhu, Y., Dai, J., et al. (2021). The Evolution of an AgI Cloud-Seeding Track in Central China as Seen by a Combination of Radar, Satellite, and Disdrometer Observations, Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 126, e2020JD033914. https://doi. org/10.1029/2020JD033914/.
[24] French, J. R., Friedrich, K., Tessendorf, S. A., Rauber, R. M., Geerts, B., Rasmussen, R. M., et al. (2018). Precipitation formation from orographic cloud seeding. Proceedings of the National Academy of Sciences, 115(6), 1168–1173. https://doi.org/10.1073/pnas.1716995115/
[25]. Al Hosari, T.; Al Mandous, A.; Wehbe, Y.; Shalaby, A.; Al Shamsi, N.; Al Naqbi, H.; Al Yazeedi, O.; Al Mazroui, A.; Farrah, S. (2021). The UAE Cloud Seeding Program: A Statistical and Physical Evaluation. Atmosphere 2021, 12, 1013. https://doi.org/ 10.3390/atmos12081013/
[26]. Ritzman, J. M., Deshler, T., Ikeda, K., & Rasmussen, R. (2015). Estimating the fraction of winter orographic precipitation produced under conditions meeting the seeding criteria for the Wyoming Weather Modification Pilot Project. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 54(6), 1202-1215.
[27] Flossmann, andrea. et.al (2019). Americal Meteorology Society; DOI:10.1175/BAMS-D-18-0160.1
[28] Sisi Chen, et. al, (2023), Simulating Wintertime Orographic Cloud Seeding over the Snowy Mountains of Australia, Journal of Applied Meteorology and Climatology September 2023 DOI: 10.1175/JAMC-D-23-0012.1/
[29] Thara Prabhakaran, et al. (2023) CAIPEEX- Indian Cloud Seeding Scientific Experiment, American Meteorology Society, https://doi.org/10.1175/BAMS-D-21-0291.1/
[30] S. A. teSSendorf, b. boe, b. GeertS, M. J. Manton, S. ParkinSon, and r. raSMuSSen, (2015). AMERICAN METEOROLOGICAL SOCIETY-2015, DOI:10.1175/BAMS-D-15-00146.1/
[31] Standler, R, (2002). Weather modification law in USA.
[32] Convention on the Prohibition of Military or Any Other Hostile Use of Environmental Modification Techniques (ENMOD), (1978).
[33] Peer Review Report on Global Precipitation Enhancement Activities. World Meteorological Organization.) WWRP 2018). (https://uca.hal.science/hal-01917801/document).es, Masataka 2018 Murakami, Thara Prabhakaran and Zhanyu

گزیده سیاستی

با گذشت چندین دهه از شروع بارورسازی ابرها در دنیا، همچنان در خصوص میزان اثربخشی این روش‌ها وحدت رویه وجود ندارد. با توجه به محدودیت‌ها و عدم قطعیت‌های موجود، مقیاس عملکرد بارورسازی ابرها محدود است و راه‌حلی برای مقابله و برطرف کردن خشکسالی نخواهد بود.

مرکز پژوهش‌های مجلس شورای اسلامی

تهران، خیابان پاســـداران، روبروی پـــارک نیاوران (ضلع جنوبی، پلاک ۸۰۲)

تلفن: ۷۵۱۸۳۰۰۰ صندوق پستی: ۵۸۵۵-۱۵۸۷۵ پست الکترونیک: mrc@majles.ir

وب‌سایت: rc.majles.ir