

۱. «باروری ابرها» چیست؟ و چه زمانی کشف شد؟

باروری ابرها به عنوان یک روش تعدیل آب و هوا، افزودن مواد به داخل یک ابر (با استفاده از «ژنراتورهای زمینی»^۱، موشک و یا هواپیما) با هدف تقویت تشکیل و رشد «بلورهای یخ» و در نتیجه افزایش بارش (برف و یا باران) می باشد. به عبارت دیگر باروری ابرها روشی جدید برای تأثیرگذاری بر روی ابرهای طبیعی است که در آن با استفاده از مواد شیمیایی آب بیشتری از ابر به شکل باران یا برف گرفته می شود (DSE,2008; Shivaji,2005). تأثیر بارورسازی ابرها برای اولین بار در تاریخ ۱۲ ژولای ۱۹۴۶ در آزمایشگاه تحقیقاتی شرکت جنرال الکتریک آمریکا توسط «وینسنت شیفر»^۲ مشاهده شد. متعاقب آن در تاریخ ۱۳ نوامبر ۱۹۴۶ همزمان با این تحقیقات، دکتر لانگمویر^۳ برنده جایزه نوبل، یک آزمایش میدانی روی یک ابر پوششی^۴ روی کوه گریولوک^۵ در شرق اسچنکتدی^۶ متعلق به ایالت نیویورک انجام داد. دمای این ابر که در ارتفاعی حدود ۴۲۷۰ متر از سطح زمین قرار داشت ۴۰°C بود. لانگمویر، ۱/۳۶ کیلوگرم یخ خشک را در مسیری خطی با طول حدود ۳ مایل روی این ابر پاشید و مشاهده کرد در مدت ۵ دقیقه تمامی محتوای آب ابر به برف تبدیل شد. برف حاصله در حدود ۲۰۰۰ پا زیر ابر ریزش نمود و به دلیل خشکی هوا قبل از رسیدن به زمین تبخیر شد. تحقیقات بعدی ثابت کرد هسته طبیعی غالب برای تشکیل هسته یخ در طبیعت، ذرات رس معدنی هستند که در دمای حدود ۴۵°C یا پایین تر به عنوان هسته یخ ساز فعال می گردند. «سازمان تحقیقات صنعتی و علمی استرالیا»^۸ نیز در فوریه ۱۹۴۷ پس از اجرای عملیات باروری ابرها گزارش کرد اولین مورد باران ساخته دست بشر در نزدیکی بسارست^۹ رخ داده است (Dennis,1980; Shivaji,2005).

۲. چرا برخی ابرها بطور طبیعی نمی بارند؟

آب و هوای ابری لزوماً به این معنی نیست که باران یا برف خواهد آمد. در واقع ابرها ممکن است تشکیل شوند و حضورشان چند روز تداوم داشته باشد اما هرگز نبارند. برای مثال در ایورکای^{۱۰} کالیفرنیا در ماه آگوست ۵۰ درصد مواقع آسمان از ابر پوشیده است اما متوسط بارش در این ماه ۲/۵ میلی متر است. کلیه ابرها اعم از ابرهای سرد و گرم طی فرایند میعان تشکیل می شوند اما میعان برای بارش کافی نیست. در صورتی که هریک از فرایندهای تشکیل قطره باران و بلور یخ و فرایندهای بعدی مورد نیاز برای رشد آن ها انجام نشود و یا به صورت کامل شکل نگیرد ابر بارش نخواهد کرد. در ابرهای گرم هسته های میعان، بی نهایت کوچک بوده و قطری برابر ۰/۰۰۰۲ میلی متر دارند که ۱۰۰ برابر کوچک تر از قطره باران معمولی می باشد. برای تشکیل قطرات باران ابتدا بایستی به طور متوسط یک میلیون قطرک ابر جمع شوند تا یک قطره باران تشکیل شود و سپس این قطره باران از طریق دیگر فرایندها، بزرگ و سنگین شده تا به صورت بارش سقوط نماید. در شکل ۱ اندازه هسته های میعان، قطرک های ابر و قطره باران مقایسه شده است. در برخی ابرها، تعداد قطرک های ۲۰ میکرونی بسیار کم بوده و این باعث می شود «بارش مؤثر»^{۱۱} کاهش یابد. با وارد کردن مصنوعی ذرات نم گیر شبیه کلرید کلسیم یا کلرید سدیم می توان امکان فرایند میعان و

1 - Cloud Seeding

2 - Ground Based Generators

3 - Vincent J. Schaefer

4 - Irwing Langmuir

5 - Stratiform

6 - Greylock

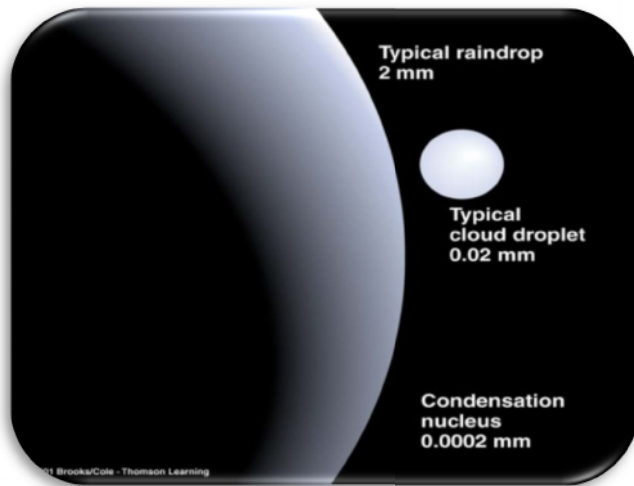
7 - Schenectady

8 - Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization (CSIRO)

9 - Bathurst

10 - Eureka

تشکیل قطره‌های بزرگ و سپس رشد آن‌ها از طریق هم‌آمیزی در این ابرها را فراهم نمود (Wallace & Hobbs,2006; Shivaji,2005, Ahrens,2007).



بارش از ابرهای سرد به‌طور مستقیم به تعداد هسته‌های یخ طبیعی بستگی دارد. تعداد هسته‌های یخی که به‌طور طبیعی در ابر موجود می‌باشند معمولاً بسیار کمتر از تعداد بهینه موردنیاز برای تشکیل مؤثر باران است. بنابراین طی عملیات باروری، با رهاسازی هسته مصنوعی مانند ذرات «یدیدنقره»^{۱۲} به درون ابر می‌توان تعداد هسته‌های انجمادی را افزایش داد (Wallace & Hobbs,2006; Shivaji,2005).

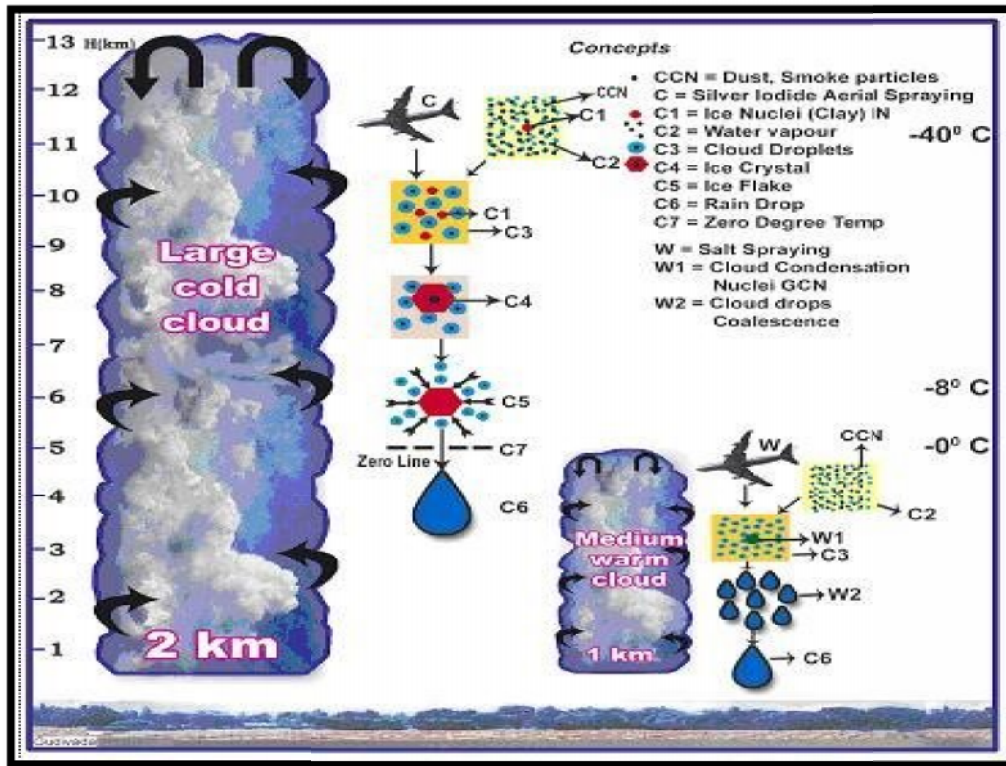
شکل ۱: اندازه نسبی قطره باران، قطره‌های ابر و هسته میعان (Ahrens,2007)

۳. ۴ آیا باروری ابرها برای ابرهای مختلف متفاوت است؟

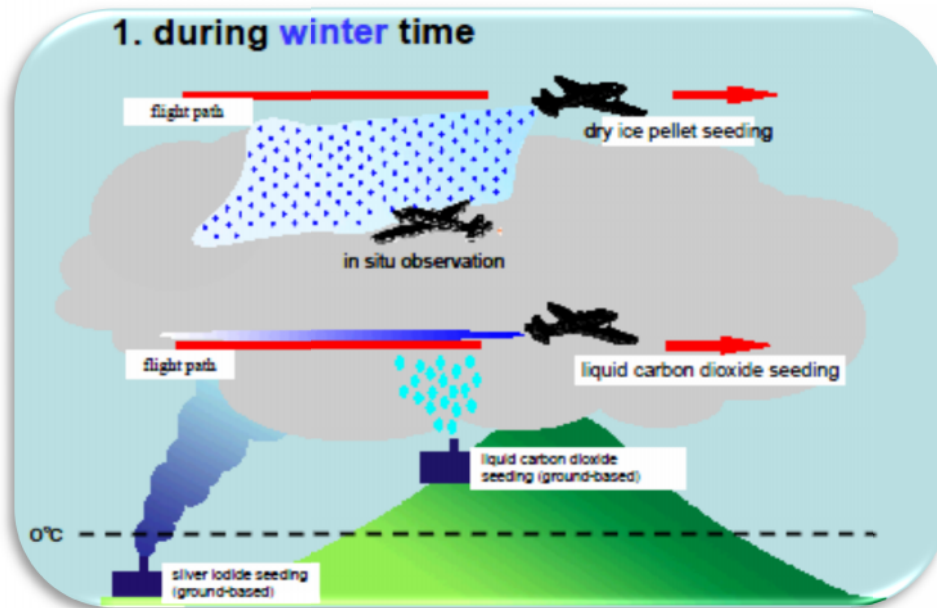
بسته به نوع ابرها، باروری ابرها به «باروری گرم»^{۱۳} (باروری نم‌گیر) و «باروری سرد»^{۱۴} دسته‌بندی می‌شود (DSE,2008). در حال حاضر بیشتر آزمایشات و برنامه‌های عملیاتی باروری ابرها از نوع سرد است. باروری سرد عبارتست از رهاسازی عامل‌های یخ‌ساز از قبیل قرص‌های یخ‌خشک و هسته‌های یدیدنقره از طریق ژنراتورها و پرتابه‌های زمینی یا هواپیما به درون ابر به‌منظور تسریع زمان آغاز و نیز افزایش فرایند تشکیل هسته‌های یخی نسبت به آنچه که در حالت طبیعی رخ می‌دهد. باروری گرم عبارتست از اضافه‌کردن یا افشاندن^{۱۵} ذرات کوچکی از قبیل نمک (کلرید سدیم و کلسیم) یا هواویزه‌های بزرگ نم‌گیر به داخل پایه ابرهای همرفتی قاره‌ای. این نوع باروری با دو هدف اصلی یعنی آغاز و تسریع فرایند باران گرم انجام شده و بیشتر بر روی ابرهای کومولوس گرم در مناطق حاره‌ای و جنب‌حاره‌ای صورت می‌گیرد (ASCE,2006; DSE,2008).

۴. ۴ چگونه با انجام باروری می‌توان بارش ابرهای سرد را افزایش داد؟ در بیشتر ابرهای سرد، مقدار قطره‌های مایع به میزان قابل‌ملاحظه‌ای بالا و غلظت بلورهای یخ در آن بسیار کم است چرا که هسته‌های یخ نسبت به هسته‌های میعان در طبیعت فراوان نیستند. لذا می‌توان با انجام باروری، با افزودن یک عامل هسته یخ‌ساز از جمله یدیدنقره به مناطق مناسب ابر امکان یخ‌زدگی قطره‌های آب مایع آب‌سرد را فراهم نمود. علاوه بر این باروری ابرها تأثیر دیگری نیز بر ابر دارد. یخ‌زدگی قطره‌های آب در اثر انجام باروری ابرها باعث آزادسازی گرمای نهان ذوب می‌شود. این گرمای اضافی، در شرایط مناسب باعث می‌شود ابرهای بارور شده به میزان قابل توجهی رشد نموده و طول عمر آن‌ها نیز بیشتر از طول عمر ابر در حالت طبیعی شود (Dennis,1980; ASCE,2006; Wallace and Hobbs,2006). وقتی مقدار زیادی آب آب‌سرد به ذرات یخ تبدیل می‌شوند گرمای نهانی به میزان ۸۰ کالری بر گرم آب یخ‌زده به ابر آزاد می‌شود و این باعث می‌گردد دمای ابر ۰/۵^{oC} تا ۱^{oC} افزایش یافته و ابر را بیشتر به‌طرف آسمان رشد دهد. (شکل ۳ و ۲) (Shivaji,2005).

12 - Silver Iodide (AgI)
13 - Warm Seeding or Hygroscopic Seeding
14 - Cold Seeding
15 - Spray



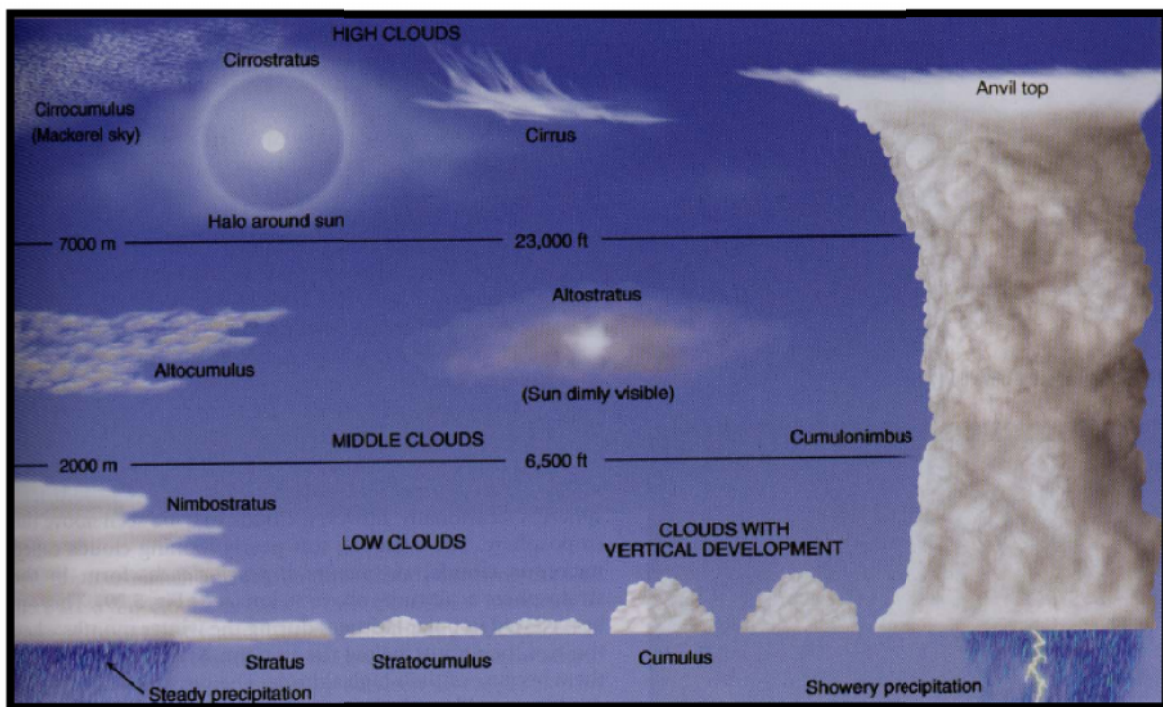
شکل : تأثیر باروری بر ابرهای گرم و سرد با مواد نم‌گیر و یخ‌ساز (Shivaji, PPT).



شکل : های باروری باژنراتور زمینی و هواپیما در ابر سرد زمستانه (Oriksa, PPT).

۴ ۵. آیا می توان همه ابرها را بطور مؤثر بارور نمود؟

همه ابرها برای باروری مناسب نیستند. تنها ابرهایی را می توان بارور نمود که دارای معیارهای اصلی باروری باشند. علاوه بر این بدیهی است اگر ابری در جو وجود نداشته باشد عملیات باروری نمی تواند انجام شود (Shivaji,2005) (Darin,2011). معمولاً ابرهای کومولونیمبوسی که طبیعت همرفتی داشته و اختلاط عمودی در آنها زیاد باشد گزینه های مناسبی برای باروری هستند. ابرهای نیمبواستراتوس و کومولوسی که خاکستری تیره هستند نیز برای باروری مناسبند. ابر باید به قدر کافی ضخیم بوده و در بازه دمایی مناسبی برای باروری قرار داشته باشد. علاوه بر این باید دارای مقدار قابل توجهی آب مایع آبرسرد باشد. سرعت باد نیز باید کمتر از مقدار معینی بوده و پایه ابر ۱/۵ تا ۲ کیلومتر از زمین فاصله داشته باشد. از طرفی مناسب بودن جریانات صعودی در منطقه نیز باعث بهبود فرایند افزایش بارش می شود (Shivaji,2005). این معیارها و شرایط محیطی که بر اساس آن بارورپذیری سامانه ابری تعیین می گردد به معیارهای باروری معروف بوده و در مورد ابرهای سرد و گرم و روش زمینی و هوایی باروری با هم تفاوت دارد.



شکل : انواع اصلی ابر براساس ارتفاع از سطح زمین، و رشد عمودی آنها (Ahrens,2007)

۶. آیا باروری ابرها می‌تواند باعث رفع خشکسالی شود؟

گرچه خشکسالی را می‌توان انگیزه‌ای جهت اجرای برنامه‌های باروری ابرها دانست اما از کاربرد این فناوری تنها جهت رفع خشکسالی استقبال نمی‌شود. ثابت شده است باروری ابرها در دوره‌های غیرخشکسالی مؤثرتر است چرا که خشکسالی حاصل دوره‌های طولانی بدون وجود ابرهای باران‌زا می‌باشد و باروری ابرها بر اساس وجود ابرها به‌ویژه انواع همرفتی آن‌ها انجام می‌گیرد. بنابراین فرصت‌های باروری در طول دوره‌های خشکسالی بسیار محدود است. از طرف دیگر مدارک زیادی وجود دارد که حتی در خشکسالی‌های شدید، فرصت‌هایی برای بارورکردن ابرها وجود دارد لذا تأکید می‌شود باروری ابرها به‌عنوان استراتژی مدیریت طولانی‌مدت و قابل‌دوام برای افزایش منابع آب و نه به‌عنوان یک درمان سریع و کوتاه مدت جهت رفع مشکلات خشکسالی در نظر گرفته شود. به‌عبارتی تعدیل آب و هوا باید به‌عنوان "یک ابزار در جعبه ابزار" مدیریت منابع آب قرار داشته باشد. گرچه پتانسیل باروری ابرها برای تأمین منابع آب، بیشتر متعلق به سال‌های با بارندگی متوسط یا فصل‌های مرطوب می‌باشد اما با طراحی مناسب برنامه‌های درازمدت می‌توان به‌طور بالقوه تأثیر خشکسالی را کاهش داده و با افزایش تولید بارش قبل و پس از خشکسالی، کمبود بارش را در طول این دوره جبران نمود. لذا متولیان باروری ابرها تأکید دارند باروری ابرها را نه فقط برای چند ماه بلکه باید در دوره حداقل چندین سال انجام داد. به عقیده آنان اگر باروری ابرها در وسط یک دوره خشکسالی انجام شود نتایج مطلوبی به‌همراه نداشته و لذا باید متوقف گردد. بدون اغراق باید گفت خشکسالی از بهترین دوره‌ها برای باروری ابرها محسوب نمی‌شود (AMS,2010; WMO,2010; BR,2006; [2]).

۷. آیا باروری ابرها می‌تواند طبیعت دائمی آب و هوا را تغییر دهد؟

باروری ابرها می‌تواند موجب تغییراتی در ابرهای منفرد و یا گروهی از ابرها گردد اما الگوهای آب و هوایی متأثر از شرایط بزرگ‌مقیاس جوی می‌باشند که باروری ابرها نمی‌تواند آن‌ها را تحت تأثیر قرار دهد (Langerud,2011).

۸. سابقه و اهداف باروری ابرها در ایران چه بوده و وضعیت کنونی آن چگونه است؟

باروری ابرها نخستین بار در ایران در سال ۱۳۵۳ توسط یک شرکت کانادایی بر روی حوزه رودخانه کرج و جاجرود به مرحله اجرا درآمد. پس از آن از سال ۱۳۷۷ با تأسیس "مرکز ملی تحقیقات و مطالعات باروری ابرها" وابسته به وزارت نیرو واقع در استان یزد مقدمات انتقال فناوری باروری ابرهای سرد با استفاده از هواپیما از کشور روسیه به ایران فراهم گردیده و از سال ۱۳۸۷ فعالیت‌های باروری ابرها به‌طور مستمر و جدی منحصراً توسط کارشناسان ایرانی و تنها با هدف افزایش بارش در نقاط مختلف کشور اجرا می‌شود. در صورتی که در نظر باشد از این فناوری با اهداف دیگر همانند افزایش بارش ابرهای گرم، جلوگیری از تگرگ و یا مه‌زدایی نیز استفاده گردد بایستی تجهیزات ویژه مربوط به هرکدام از این فناوری‌ها فراهم گردیده و آموزش‌های لازم به کارشناسان ایرانی داده شود. شکل زیر نمایی از ساختمان مرکز ملی تحقیقات و مطالعات باروری ابرها و هواپیمای‌های تجهیز شده به امکانات باروری ابرها در ایران را نشان می‌دهد.

