

مبانی نظری بارورسازی ابرها

دکتر کمال امیدوار
عضو هیأت علمی دانشگاه بزد

چکیده

این تحقیق با هدف معرفی مبانی نظری بارورسازی ابرها انجام شده است. ابتدا اهمیت موضوع باروری ارائه شده و سپس منشأ هسته‌های تراکم ابر (CCN)، هسته‌های طبیعی یخی (IN)، انواع باروری، مکانیسم‌های رشد قطره‌های ابر و عامل باروری مورد بحث قرار گرفته است. نتایج مطالعه نشان می‌دهد که بشر از طریق اجرای عملیات بارورسازی ابرها می‌تواند از لحاظ تعداد و نوع هسته‌های تشکیل بارش به طبیعت کمک نماید. براساس قوانین فیزیک ابر، بارورسازی ابرها امکان‌پذیر است. با استفاده از تکنولوژی تخلیق مصنوعی ابرها می‌توان ذرات بسیار ریز یخ‌دانه‌نقره یا مواد دیگری را که می‌توانند همان نقش بلورهای یخ طبیعی (هسته‌های انجاماد) را ایفا کنند به هر میزان تولید و به ابر رسانید و سازوکار فرایند برزون را تسریع بخشید و به این طریق بارش را افزایش داد.

واژگان کلیدی

بارورسازی ابرها، فیزیک ابر، هسته‌های یخ ساز، افزایش بارش

مقدمه

کمبود آب یکی از مشکلات بزرگ قرن جدید است. هرچه درباره منابع آب تحقیق کنیم به کشور و جهان کمک بزرگی کرده‌ایم با افزایش جمعیت جهان و در نتیجه نیاز بیشتر انسان به مواد غذایی و انواع انرژی، ارزش آب

بیشتر شده است و این خود، عاملی برای کاهش و یافتن روشهای بهتر جهت استفاده بهینه و حفاظت از منابع آب گردیده است. کمبود منابع آب حتی در بعضی کشورهای جهان و خاورمیانه باعث ایجاد تنش‌هایی بین دولتها نیز شده است.

در دهه‌های اخیر پیشرفتهای علمی و فنی بشر سبب شده است تا روشها و تکنیک‌های جدیدتری جهت تأمین منابع آب بوجود آید که یکی از این راهکارها بارورسازی ابرهاست. (Cloud Seeding)

در نیم قرن گذشته آزمایشهای باروری ابرها با روشهای مختلف از جمله استفاده از ژنراتورهای زمینی، پرواز هواپیما و پاشیدن مواد تخلیق کننده در ابر، پرتاب موشک و... در مناطق مختلف جهان به مرحله اجرا درآمده است و در بیشتر کشورها موجب افزایش بارش و برف نیز شده است و حتی امروزه طرحهای باروری و مطالعات مکانیابی مربوط به آنها جنبه بین‌المللی نیز پیدا نموده است.

تأثیرگذاری بر فرآیند تحول و تکامل ابرها و وقوع بارش در زمان و مکان مناسب به نحوی که تغییرات مفیدی به دنبال داشته باشد را می‌توان علم و فن افزایش بارش تعریف کرد. (Gagin, 1985)

در دهه‌های اخیر بیش از ۱۰۰ پروژه باروری ابرها و تعدیل وضعیت هوا (Weather Modification Program) در تعداد زیادی از کشورهای جهان به صورت آزمایشی یا اجرایی در دست بررسی و اجراست. (W.M.O, 1992)



ذرات لاینچل رس بوده که توسط باد از زمین بلند می‌شوند. در بین مواد خالص و صمغی و آلی با ساخت بلورین که در دماهای مختلف نقش هسته‌های انجماد ابرها می‌کنند بعد از بلورهای یخی، ذرات پدیدتقره (AgI) در دمای بالاتری (-۴°C) عمل هسته‌سازی را انجام می‌دهند (Dennis, 1980). مشاهدات در مناطق سرد و در ارتفاعات بالا نشان می‌دهد که آب می‌تواند به صورت قطرات کوچک مایع در دماهایی تا ۴°C- وجود داشته باشد. دلیل آن عدم وجود هسته‌های تبلور است (جعفرپور، ۱۳۷۱) هسته‌های ایجادکننده بلورهای یخ در دمای کم‌تر از ۲°C- حدود یک درلیتر است و با کاهش دما تعداد آنها به سرعت افزایش می‌یابد. (Fletcher, 1969) از پدیدتقره برای ایجاد بلورهای یخ در باروری ابرها استفاده می‌شود زیرا بلورهای پدیدتقره شبیه به بلورهای یخ می‌باشند.

آزادشدن بخار آب اضافی از طریق سرمایش

مقدار بخار آبی که می‌تواند در یک حجم معین در حال تعادل با یک سطح هموار آب خالص وجود داشته باشد صرفاً تابعی از دماست. به هوایی که این مقدار بخار آب داشته باشد هوای اشباع شده (Saturated) می‌گویند. مقدار بخار آب اضافی بر مقدار لازم برای اشباع شدن هوا در تشکیل ابر به کار می‌رود. آهنگی که بر اساس آن بخار آب لازم برای تشکیل قطره‌های ابر از طریق یک میزان معین سرمایش (Cooling) قابل دسترسی می‌شود. از معادله کلاسیوس - کلاپیرون (Clausius-Clapeyron) قابل محاسبه است که ارتباط فشار بخار اشباع را به دما برحسب درجه کلوین بیان می‌کند.

$$E_s(T) = e_s(T_0) \exp\left\{ \frac{L_v}{R_w T_0} - \frac{L_v}{R_w T} \right\}$$

که در آن $E_s(T)$ فشار بخار اشباع با تعادل در دمای T ، $e_s(T_0)$ فشار بخار اشباع در دمای مبنای T_0 ، L_v گرمای نهان تبخیر و (R_w) ثابت ویژه گازها برای بخار آب است. این معادله را می‌توان هم برای محاسبه $e_s(T)$ بر روی سطوح آب فوق سرد (Supercooled) و همچنین بر روی آب در دماهای بالاتر از انجماد مورد استفاده قرار داد. برای یافتن $e_s(T)$ فشار بخار اشباع بر روی یخ در دمای (T) لازم است که در رابطه مذکور به جای (L_v) گرمای نهان تصعید (Sublimation) را جایگزین کرد. با استفاده از معادله کلاسیوس - کلاپیرون می‌توان افزایش نسبت اشباع آب یا یخ را برای یک بسته هوای در حال سرد شدن که محتوی مقدار معینی بخار آب است را به نحو مقتضی تعیین نمود. به هر حال برای تعیین ویژگی‌های ابری که حاصل می‌شود لازم است تا فرایندهای میکرو فیزیکی که تشکیل و رشد قطره‌های ابر را کنترل می‌کند مورد توجه قرار گیرند. این فرایندها عواملی چون پخش بخار آب، هدایت گرما، آزادشدن گرمای نهان و اثرات کشش سطحی و مواد محلول در قطره‌های منفرد را شامل می‌شود. (Dennis, 1980)

واژه بارورسازی ابرها، برای توضیح تلاشهای انجام شده در راه تعدیل ابرها که توسط هسته‌های مصنوعی انجام می‌گیرد و یا هر هواویزه‌ای (Aerosol) که برای دگرگونی ابرها وارد آن می‌شود به کار می‌رود (Dennis). کاربردهای مختلف باروری ابرها در زمینه افزایش بارش، پراکنده ساختن تگرگ و از بین بردن مه و... می‌باشد (W.M.O, 1987). ریشه و بنیان آن از این اصل ناشی می‌شود که ذرات جامد اضافه شده در هوای فوق اشباع می‌تواند فرایند تراکم و بارش را تسریع بخشد و با اضافه نمودن این ذرات به هوای دارای قطرات آب فوق سرد بتواند با سرعت بخشیدن در انجماد قطرات، تشکیل بلورهای یخ را ممکن سازد. انسان می‌تواند از طریق اجرای عملیات باروری ابرها، از لحاظ تعداد و نوع هسته‌های تشکیل باران به طبیعت کمک نماید. بر مبنای تئوری‌های موجود و بر اساس قوانین فیزیک ابر، باروری ابرها امکان‌پذیر بوده و می‌توان از این طریق روشهای مناسبی را برای افزایش بارش و... به کار گرفت. با توجه به کسری بیلان آبی و بحران منابع آب که در اکثر نقاط کشور و بسیاری از کشورهای جهان وجود دارد، زمان آن رسیده تا موضوع تحقیقات و مطالعات پیرامون باروری ابرها به طور جدی مورد توجه قرار گیرد. با توجه به هزینه بالای اجرای این طرحها لازم است قبل از اجرا، زمینه‌های علمی، تحقیقاتی و شناخت کافی از منطقه مورد نظر فراهم آید. یکی از عوامل کلیدی طراحی بارورسازی ابرها انتخاب مکانی است که شانس رسیدن به هدفهای مورد نظر را به حداکثر برساند (W.M.O, 1975).

بحث

زمانی که دمای هوا از طریق تابش یا اختلاط با هوای سردتر یا در اثر صعود ناشی از انبساط آن در جو به پایین‌تر از نقطه شبنم سرد شوند، ابرها شکل می‌گیرند. (Dennis, 1980)

منشأ هسته‌های تراکم ابر (Cloud Condensation Nuclei)

ذرات هواویزه در جو از منابع مختلفی چون آتش سوزی جنگلها، آتشفشانها، شهاب‌های دنباله‌دار، آلودگی‌های صنعتی و سایر منابع انسانی، گردوغبار بلند شده توسط باد از سطح زمین، گرده‌ها و هاگ‌ها و قطره‌هایی که از سطوح دریایی داخل هوا می‌شوند، تولید می‌گردند. اغلب ذرات هواویزه در جو هرگز مثل ذرات جامد یافت نمی‌شوند، اما در جو توسط فرایند تبدیل گاز به ذرات حاصل می‌گردند. ذرات بزرگ معلق در جو به نام هسته‌های تراکم، تحت شرایط عادی جو شکل می‌گیرند. (سازمان هواشناسی کشور، ۱۳۷۷)

منشأ هسته‌های طبیعی یخی (Ising Nuclei)

ذرات غیر محلول در هواویزه‌های جوی که نقش مهمی در هسته‌سازی یخی دارند دارای منشأ متفاوتی از ذرات نم‌گیر (Hygroscopic) هستند. مواد پخش شده صنعتی، باکتری‌ها، هاگ‌ها، غبارهای آسمانی در موقع لزوم به عنوان هسته‌های یخ عمل می‌کنند، ولی بیشتر هسته‌های یخی طبیعی،

در ابرهای پوششی (Stratiform) به وجود می‌آورد. زمان مناسب برای افزایش گسترش ابر با نتایج باروری از زمانهایی با مختصر افزایش در دمای ابر با توجه به محیط ابر و در نتیجه شناوری ابر را افزایش می‌دهد. دمای ابرکومولوس، چند دهم درجه سلسیوس افزایش پیدا می‌کند و می‌تواند منجر به افزایش رشد ابر شود. (Kahan, 1995)

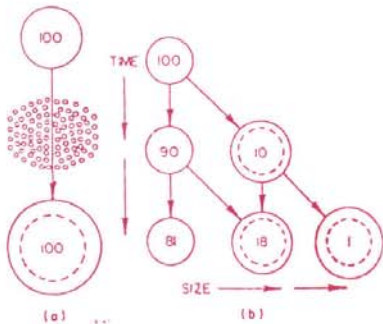
مکانیسم‌های رشد قطرات ابر

اختلاف اصلی بین ابر و بارش در اندازه ذرات است و مسئله‌ای که فیزیک بارش باید به آن پاسخ دهد این است که توضیح دهد که چگونه رشد ذرات در توده هوا بیش از یک میلیون مرتبه از اندازه قطره ابر به اندازه بارش بزرگتر می‌شود. با تعدادی از هسته‌هایی که فعال هستند بخار آب موجود کافی نیست تا اندازه قطرات بارش به صورت میعان شکل بگیرند. (Neiburger, 1969)

رشد قطرات ابر به بارش طی دو طریق تصادم و به هم آمیختگی و فرایند برژون صورت می‌گیرد. (Fletcher, 1969)

الف) رشد از طریق هم‌امیزی (Coalescence) و تصادم (Collision)

در این فرایند، قطرات بزرگتر هنگام سقوط سرعت بیشتری می‌گیرند و در بین مسیرشان قطرات کوچکتر را جمع می‌کنند و در نتیجه بزرگتر می‌شوند. باز هم هنگام سقوط سرعت بیشتری می‌گیرند و قطرات کوچکتر را سریعتر جذب می‌کنند. تصادم مؤثر بستگی به نسبت اندازه بزرگی و کوچکی قطرات دارد. این فرایند می‌تواند تا حدی که با سرعت کافی نزول کند و به شکل باران به زمین برسند، ادامه پیدا کند. (نگاره ۱)



نگاره ۱: در این نگاره ماهیت تصادفی فرایند هم‌امیزی نشان داده شده است. افزایش جرم قطره‌های جمع آورنده همانند مدل پیوسته به طور یکنواخت توزیع نمی‌شود. (a) و تنها شامل برخی از قطره‌های خوش شانس می‌شود (b) که در این صورت احتمال افزایش بعدی آنها در اثر هم‌امیزی افزایش می‌یابد. (Dennis, 1980)

حجم و اندازه خود را به نفع ذرات بخی از دست داده و ذرات بخی پس از بزرگ شدن کافی و کسب شرایط لازم برای خود به شکل باران یا... به سوی زمین فرو می‌آیند. بنابراین در ابرهایی که هسته‌های انجماد به تعداد کافی وجود ندارد، می‌توان با تلقیح مصنوعی آن توسط مواد باروری، شرایط دلخواه و مناسب را ایجاد نمود.

انواع باروری ابرها

پایه علمی برای باروری ابرها که سبب افزایش بارش می‌شود بر این فرض استوار است که پاکارایی بارش ابر طبیعی را افزایش دهد. (باروری ایستا) (Static Seeding) یا این که می‌تواند موجب گسترش ابرها شده و ابرهای بیشتر و پربارتر ایجاد نماید. (باروری حرکتی) (Dynamic Seeding) از آنجایی که در باروری ابرهای فوق سرد با دماهای کمتر از صفر درجه سلسیوس مشاهده می‌شود که قطره‌های مایع فراوانی به صورت آب فوق سرد وجود دارد که هنوز مقادیر زیادی از آنها به بارش تبدیل نشده و سرانجام تبخیر می‌شوند و این ابرها به سبب کافی نبودن هسته‌های انجماد در آنها بارش کمی داشته و در نتیجه از پاکارایی پایینی برخوردار می‌باشند. این ابرها را می‌توان از دو طریق بارور کرد:

الف) بارورسازی ایستا (میکرو فیزیکی)

هدف از این نوع باروری، افزایش پاکارایی بارش به وسیله از زیاد تعداد بلورهای یخ می‌باشد. اندازه ابر بیشتر به وسیله مقدار رطوبت موجود، ساختار دمای جوی و صعود موانع کوهستانی برای ابرهای کوهساری یا شناوری (Buoyancy) برای ابرهای همرفتی (Convective) کنترل می‌شود. زمان موجود برای یک رشد ذره ابر در یک ابر کوهساری بیشتر با سرعت باد در سطح ابر و گسترش افقی ابر کنترل می‌شود. زمان موجود در ابرهای همرفتی به وسیله مقدار شناوری ابری که جریانه‌های هوا را ایجاد می‌کند که کند یا سریع، ذرات را به ابر می‌رساند، کنترل می‌شود.

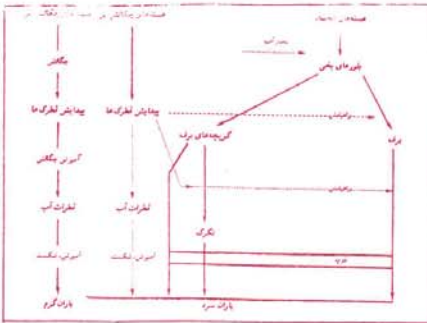
باروری یخ زدایی (Glaciogenic) به صورت طراحی باروری با افزایش ذرات یخ به ابرها یا بخشهایی از هوای صاف تعریف شده است. محاسبات مدل ابر نشان می‌دهد که ۱۰ تا ۱۰۰ بلور یخ در هر لیتر عموماً برای استفاده مؤثر تراکم ابر به وسیله فرایند یخ مورد نیاز می‌باشد. فرضیه باروری ایستا به وسیله سیلورمن (Silver man) در سال ۱۹۸۶ مورد تجدیدنظر قرار گرفته است و استفاده از هسته‌های یخ جهت افزایش بارش از ابرهای کوهساری به وسیله رینولدز (Reynolds) در سال ۱۹۸۸ آزمایش شدند و این تکنولوژی در سالهای اخیر پیشرفت داشته، اما هنوز بسیاری مسائل ناشناخته باقی مانده است. (Kahan, 1995)

ب) باروری حرکتی

در نظر گرفتن باروری ابر به منظور ایجاد ابرهای گسترده و فعال به طور طبیعی عمدتاً محدود به ابرهای نوع همرفتی (کومولوس) می‌باشد. اگرچه نتایج مدل‌سازی ابر در دهه ۱۹۸۰، امکان تحریک تشکیل ابرهای همرفتی را



ب) فرآیند برژرون (Berjeron)



نگاره (۲): نمودار فرایندهای باران گرم و سرد که از هسته‌های تراکم ابر (CCN) و هسته‌های یخی (IN) موجود در ابر آغاز می‌گردد. (List, 1992)

مواد باروری ابرها

مطالعات و بررسیهای زیادی در مورد عوامل باروری و موادی که می‌توانند به عنوان هسته‌های یخ ساز مصنوعی عمل کنند صورت گرفته است و مواد مختلفی چون یخ خشک (دی اکسید کربن جامد)، پروپان مایع، نیتروژن مایع (LN)، ذرات یخ‌دینقره، یدیدسرب، سولفیدسرب، مواد نامگرم (نمک معمولی، اوره و نیترات آمونیم)، مواد آلی (ترکیبات کربن) و... مواد دیگر پیشنهاد شده است. مناسبترین مواد باروری موادی هستند که از آن، قابل دسترس، نگرانی زیست محیطی آن کمتر و قابلیت هسته‌سازی بالاتری داشته باشند و ثابت شده است که یدیدنقره این شرایط را داراست زیرا ساختار تبلور و تشکیل آن مانند بلور یخ طبیعی می‌باشد. در دمای حدود ۵°C فعالیت تولید یخ آن آغاز می‌گردد و با کاهش دمای ابر، این فعالیت افزایش شدیدی پیدا کرده و در دمای ۱۰°C تا ۲۰°C هر گرم آن ۱۰ تا ۱۵ هسته یخ تولید می‌کند. (Lamb, 1992). امروزه می‌توان گفت که در ۹۵ درصد باروری ابرها، از یدیدنقره استفاده می‌شود و چون یدیدنقره خالص به عنوان هسته‌های انجماد فعالیتی ندارند باید به صورت مایع درآید. تحقیقات دیموت (Demott) در سال ۱۹۸۳ در آزمایشهای اتاقک ابر ثابت کرد که اضافه کردن پرکلرات آمونیم و پرکلرات سدیم به یدیدنقره استاندارد یا یدیدآمونیم محلول در استن (Acetone) تعداد هسته انجماد مؤثر تولید شده در هر گرم یدیدنقره را افزایش می‌دهد و ترکیب ایجاد شده از طریق سوزاندن این مخلوط به طور قابل ملاحظه‌ای نسبت به سایر عوامل ایجادکننده هسته انجماد، یدیدنقره تأثیر سریع‌تری را در تولید بلورهای یخ نشان می‌دهد. (Kahan, 1995)

نتیجه

یکی از راههای نوین تأمین استحصال منابع آب در بسیاری کشورها

منشأ دیگر نطفه‌های (Embroys) بارش، ابرهای آمیخته (Mixed Couds) یا ابرهایی هستند که حاوی یخ و آب فوق سردند. اولین فردی که درباره چگونگی تشکیل بارش از این ابرها توضیحات کاملی داد. برژرون در سال ۱۹۲۵ بود که به نام فرآیند ابر سرد نیز معروف است. قطره‌های ابر به سبب کمبود هسته انجماد در دماهای پایین تا حدود ۴۰- غالباً به صورت فوق سرد (Supercooled) باقی می‌مانند هنگامی که ذرات یخ در کنار تعداد زیادی از قطره‌های آب فوق سرد قرار می‌گیرند به سبب اختلاف فشار بخار اشباع ذرات یخ و قطره‌های ابر، قطره‌های آب تبخیر شده و بر روی ذرات یخی قرار می‌گیرد و سبب رشد آنها می‌شود. به عنوان مثال یک قطره کروی ۱۰ میکرونی در دمای ۱۵-۵°C در یک ابر آبی، می‌تواند رشد کرده و در زمانی کمتر از ۱۰ دقیقه به شکل یک بلور دندانه‌ای با شعاع بیش از ۲۵۰ میکرون درآید و رشد این ذره از این به بعد از طریق نهشت (Depositon) و انباشت (Accretion) ادامه خواهد یافت. (Deenis, 1980) همانگونه که برای تشکیل قطرات آب، هسته تراکم لازم است، برای تشکیل ذرات یخ نیز به هسته یخ نیاز داریم. (Barry and Chorley, 1992)

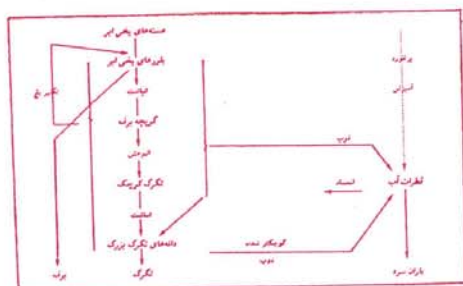
بنابراین برای بارش از ابرها می‌توان دو نوع مکانیسم (روند باران گرم و روند باران سرد) نام برد. بعد از توجه هواشناسان به این موضوع که در مناطق حاره باران از ابرهایی می‌بارد که هرگز دمای آنها زیر صفر درجه سلسیوس نیست، آن را باران گرم نامیدند. و مکانیسم اصلی بارش در این ابرهای گرم، فرآیند برخورد و هم‌آمیزی است که به صورت طبیعی صورت می‌گیرد و سبب رشد قطرات و تشکیل دانه‌های باران شده و بسته به شدت وضعیت حرکتهای داخل ابر این فرآیند سریع یا آرام صورت گرفته و باران شدید یا ملایم را سبب می‌شود.

در روند باران سرد یعنی موقعی که دمای ابر یا قسمتی از آن زیر صفر درجه سلسیوس باشد در آن بارهای ابر از قطرات آب و بلورهای یخ تشکیل شده، در این عمل بلورهای یخ با جذب رطوبت اطراف خود به طور سریع شروع به رشد کرده تا این که وزن آنها باعث سقوط آنها می‌شود (فرآیند برژرون). این بلورها هنگام فرود با گذشتن از مناطق گرم‌تر ذوب شده و به قطرات کوچک آب معلق در جو تبدیل می‌شوند و به این ترتیب مانند روند باران گرم، بارش را به وجود می‌آورند. اگر مناطقی زیر ابر سرد باشد و بلورهای یخ ذوب نشوند به رشد خود ادامه داده و به صورت برف فرود می‌آیند. (نگاره‌های (۳ و ۲)).

انسان می‌تواند از طریق برنامه باروری ابرها از لحاظ تعداد و نوع هسته‌های تشکیل بارش به طبیعت کمک نماید. باروری بوسیله هسته‌های تراکم در اندازه‌های بزرگ (به عنوان مثال عناصر جذب کننده رطوبت مثل کریستالهای نمک و اوره) می‌تواند برای سرعت دادن به روند بارش گرم به کار رود.

باروری بوسیله هسته‌های انجماد (از قبیل یدیدنقره و یخ خشک) در افزایش بارش در روند بارش سرد به ابرهایی که دارای کمبود هسته هستند کمک قابل توجهی می‌کند.

به ویژه آنهایی که با بحران آب روبرو هستند، بارورسازی ابرها مطرح شده است. این موضوع به طور جدی مورد توجه فیزیکدانان جو قرار گرفته و تحقیقات وسیعی در زمینه تعدیل وضعیت هوا و فیزیک ابر انجام شده است و مواد مختلف باروری و تأثیرات آنها مورد آزمایش قرار گرفته است. امروزه در بسیاری از کشورها، پروژه‌های باروری ابرها به صورت اجرایی یا آزمایشی در دست مطالعه و بررسی می‌باشد.



نگاره (۳): نمودار تشکیل ابر، تگرگ و باران سرد حاصل از وجود هسته‌های یخی (IN) در یک ابر حاوی قطره‌های آب فوق سرد (List, 1992)

در کشور ما تحقیقات علمی و پژوهشی در این زمینه در مراحل ابتدایی است و پروژه‌های باروری ابرها هم که در بعضی مناطق کشور به مرحله اجرا درآمده، زیربنای مطالعاتی و علمی و تحقیقاتی کاملی نداشته است.

انسان می‌تواند از طریق اجرای عملیات باروری ابرها، از لحاظ تعداد و نوع هسته‌های تشکیل بارش به طبیعت کمک نماید. رطوبت موجود در جو بیشتر از آن مقداری است که در ابرها مشاهده گردیده و یا این که به صورت بارش بر زمین فرود می‌آید. اندازه، نوع و تراکم هسته‌های موجود در جو نقش بسیار مهمی در تشکیل یک سیستم ابری و در نتیجه بارش برف یا باران دارند. بر مبنای تئوری‌های موجود و بر اساس قوانین فیزیک ابر، باروری ابرها امکان‌پذیر بوده و می‌توان از این طریق روش‌های مناسبی را برای افزایش بارش، پراکنده ساختن مه یا ناپودی تگرگ به کار گرفت، هسته‌های یخ ساز مصنوعی داخل شده در قطره‌های فوق سرد به منظور تحریک و تسریع انجماد آنها نمونه‌ای از ذرات بارورکننده ابر می‌باشد.

منابع و مآخذ

- ۱- امیدوار، کمال (۱۳۸۰)، امکان‌سنجی باروری ابرها در ارتفاعات جنوبی کرمان، رساله دکتری اقلیم‌شناسی، دانشگاه تربیت مدرس، ص ۱.
- ۲- جعفرپور، ایراهیم (۱۳۷۱)، اقلیم‌شناسی، انتشارات دانشگاه تهران، ص ۱۹۸.

۳- سازمان هواشناسی کشور (۱۳۷۷)، واژه‌نامه ژئوفیزیک و هواشناسی، مرکز دانشگاهی تهران.

۴- سازمان هواشناسی کشور (۱۳۷۷)، پروژه تعدیل مصنوعی آب و هوا، گزارش شماره ۴، صص ۲۵-۲۳.

۵- سرداری، محمدعلی (۱۳۷۴)، بررسی آماری به دست آمده از عملیات باران‌زایی مصنوعی در حوضه آبریز رودخانه‌های کرخ و جاجرود، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، رشته هواشناسی، دانشگاه تهران.

۶- مبین، محمدحسین (۱۳۷۸)، بررسی وضعیت بارش و امکان افزایش آن در حوضه زاینده رود، رساله دکتری جغرافیای طبیعی، دانشگاه اصفهان.

۷- مرکز ملی تحقیقات و مطالعات باروری ابرها (۱۳۷۷)، گزارش شماره ۴.

8 - Barry and Chorley (1992) Atmosphere, Weather and Climate, p.75.

9 - Dennis, A. (1980). Weather Modification by cloud seeding 00.5-55.

10 - Fletcher, N.H. (1969) The physics of Rainclouds, pp.29-34.

11 - Garvey D.M (1973). Testing of Cloud seeding materials at the Cloud simulation and Aerosol Laboratory, J. Appl. Meteorol. vol 14.

12 - Graaig, A. (1985). Cloud seeding Technology, PED Design Document No.34, p.30.

13 - Kahan A.M. (1995). Guidelines for cloud seeding American society of civil Engineers. pp.73-92.

14 - Neburger, M. (1969). Artificial Modification of clouds, W.M.O, vol 149, TP.

15 - W.M.O. (1978). Survey of the climatology, PEP No. 10.

16 - W.M.O. (1992) World meteorology organization Statement on the statue of Weather Modification, p.10.

17 - W.M.O. (1987) Weather Modification Programme PED No.9, pp.13-20.

18 - W.M.O. (1975) Precipitation Enhancement Projects. Report No.1.

19 - W.M.O. (1978) Operations plan for site - Selection, report No.11, pp 34-38.

20 - W.M.O. (1979) Preliminary Environmental Impact study of the site proposed for PED, WMP, PEP No 12, p.35.