

مبانی و مفاهیم فیزیکی بارورسازی ابرهای آب سرد

سهیلا جوانمرد^۱

(تاریخ پذیرش نهایی مقاله: ۱۹/۲/۸۶)

از آنجایی که شناخت مبانی فیزیکی بارورسازی ابرها یکی از ضروری ترین مولفه های لازم در پژوهش موفق تعدیل آب و هوا به شمار می آید، لذا در این مقاله به ارایه مبانی و مفاهیم فیزیکی مرتبط با بارورسازی ابرهای آب سرد پرداخته شده است. در این راستا ابتدا فرآیند بارش در ابرهای سرد و علل فرآیندهای متفاوت توسعه بارندگی در آنها مرور شده سپس ارزیابی فرآیند تعدیل آب و هوا بحث گردیده و در بخش دیگر مدل های مفهومی بارورسازی استاتیکی و دینامیکی تشریح و در انتها فرآیند خردفیزیکی در بارورسازی ابر آب سرد با استفاده از دی اکسیدکربن مایع (LC) ارایه شده است.

کلمات کلیدی: بارورسازی ابر آب سرد، هسته بندی یخ، بارورسازی استاتیکی، بارورسازی دینامیکی، فرآیندهای خردفیزیکی، دی اکسیدکربن مایع (LC).

چکیده

*

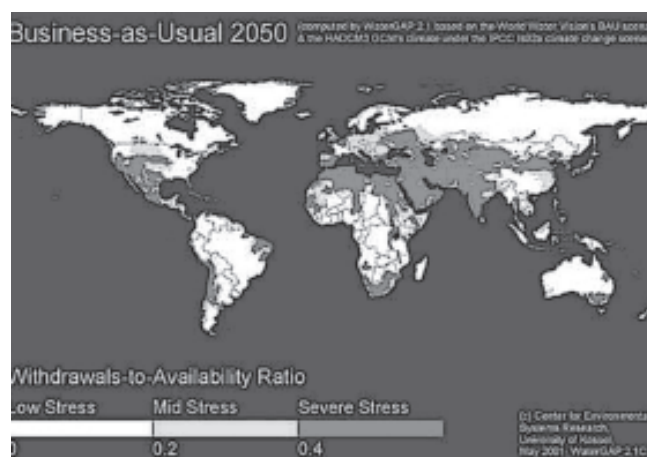
*

*

مقدمه

آب یکی از اساسی ترین مواد مورد نیاز برای ادامه زندگی انسان بر روی زمین است. در بسیاری از نواحی دنیا، منابع قدیمی و ذخائر آب زیرزمینی، رودها و آب انبارها دچار کمبود آب هستند یا در خطر تقاضای روزافزون آب برای مزارع و جمعیت در حال رشد قرار دارند. در اکثر کشورهای دنیا، به علت بروز خشکسالی و یا آلودگی رودخانه ها، منابع آبی تحت تنش قرار می گیرند، این امر

موجب کمبود آب و افزایش بهای آب آشامیدنی شده است. سفره های آب زیرزمینی در بسیاری مناطق در سراسر دنیا دائما در حال کاهش هستند (شکل ۱) و این در حالیست که آب زیرزمینی یکی از منابع اصلی آب شیرین است. در همین راستا و به منظور تامین آب مورد نیاز، یکی از اهداف اصلی تعدیل آب و هوا به عنوان شاخه جدیدی در علوم جو با هدف کنترل شرایط جوی در سه محور کنترل محدود و مقطعی بارش، مه زدایی و کاهش خسارت تگرگ برای محققین و دانشجویان علوم مربوطه مطرح می باشد. اکثر اقدامات پیشرفته ای که در زمینه تعدیل آب و هوا انجام می گیرد از طریق بارورسازی ابرها که در واقع کنترل سلول های ابر با سیستم های ابر جهت دستیابی به نتیجه مطلوب می باشد صورت می گیرد.



شکل ۱- در سال ۲۰۲۵ میلادی سه میلیارد نفر از مردم زمین در کشورهای زندگی می کنند که با کمبود شدید آب مواجه هستند. شکل فوق نشان دهنده میزان بحران در کره زمین در سال ۲۰۲۵ است [۲۱]

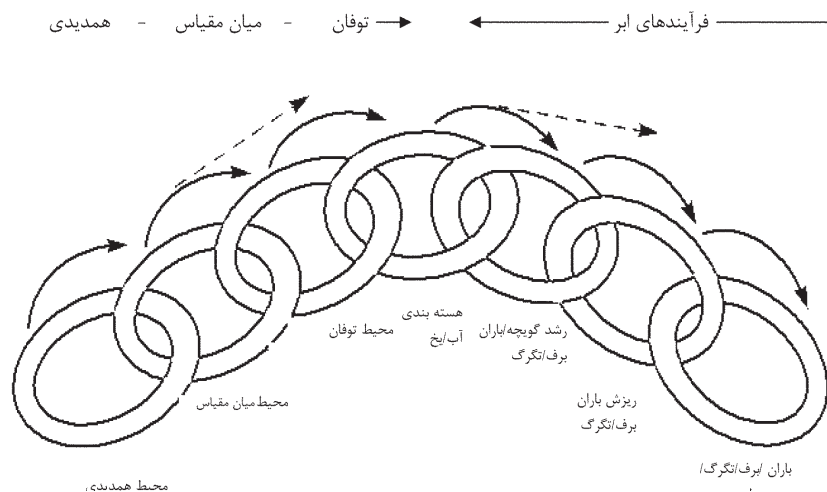
در همین ارتباط به منظور انجام پژوهش موفق در تعدیل آب و هوا، شناخت مبانی فیزیکی بارورسازی ابرها از ضروری ترین مولفه های لازم محسوب می شود. لذا در مقاله حاضر اصول فیزیکی فرآیندهای بارش، ارزیابی فیزیکی فرآیند تعدیل آب و هوا، مدل های مفهومی بارورسازی استاتیکی و دینامیکی، اساس فرآیندهای خرد فیزیکی بارورسازی ابرهای ابر سرد با استفاده از دی اکسیدکربن مایع (LC) ارائه می شود.

فرآیندهای بارش

پژوهش در زمینه تعدیل آب و هوا، به علت ماهیت چندجانبه موضوع و مقیاس های وسیع آن، نیاز به محدوده وسیعی از تخصص ها دارد. دینامیک میان مقیاس و بزرگ مقیاس مشخصات سیستم های ابر تا خردفیزیک کوچک مقیاس ویژگی های رشد و هسته بندی قطرات ریز آب و ذرات یخ را تعیین می کند. همه اینها بخشی از زنجیره فرآیندهای توسعه بارندگی را تشکیل می دهند (شکل ۲). اگرچه علم ما در مورد زنجیره در ۲۰ سال گذشته به طور قابل ملاحظه ای افزایش یافته است، اما براساس ارزیابی های فیزیکی صورت گرفته هنوز خللهایی در درک فرآیندهای فیزیکی وجود دارد.

فرآیندهای فیزیکی

آغاز و توسعه بارندگی از طریق مسیرهای فیزیکی مختلفی انجام پذیر است، از قبیل فرآیندهای خردفیزیکی گوناگون که به طور همزمان اما در آهنگ های متفاوتی اجرا می شوند. این امر درحالی صادق است که تحت شرایط جوی معین، یک مسیر به دلیل کارایی بالاتر خود غالب می شود. بازده بانوع ابرهایی که در سطح زمین بارندگی ایجاد می کند به شدت تغییر می کند.



شکل ۲ - زنجیره فرایند بارندگی [۴]

بازده بارندگی به صورت نسبت بین باران رسیده به سطح زمین به شار بخار آب در حال عبور از پایه ابر تعریف می شود [۲۴] و محدوده آن می تواند از صفر در ابرهای بدون بارندگی تا بیشتر از واحد در سیستم های همرفتی خیلی شدید، کوتاه مدت و وابسته به زمان باشد [۱۱]. بعضی از مطالعات اولیه نشان داده اند که طوفان های تندری معمولی کمتر از ۲۰٪ شار بخار آب را در سطح زمین به باران تبدیل می کنند [۷].

مبنای اصلی بیشتر فرضیه های افزایش بارش ریشه در این عوامل موثر دارد که عموماً برای بهبود بازده مسیر تحول بارندگی پژوهش می شود. مدل های مفهومی بارورسازی (فرضیه فیزیکی) نشان می دهد که چگونه این کار توسط بارورسازی انجام می شود و به چه دلیل و چگونه شروع و توسعه بارندگی در ابرهای بارور شده با ابرهای نابارور تفاوت دارد و بر دینامیک ابر اثر می گذارد.

فرآیندهای رشد بارندگی از یک مکان به مکان دیگر می تواند بسیار متفاوت باشد و در یک مکان بستگی به وضعیت جوی دارد. ایجاد بارندگی بسته به نوع ابر که ابر گرم باشد یا ابر سرد از طریق همامیزی یا از طریق فرآیند ایجاد بلور یخ یا ترکیبی از هر دو انجام می شود. بارش در ابرهای گرم نتیجه ریزش قطرات بزرگ آب و برخورد و ادغام آن با قطرات کوچکتر که دارای سرعت سقوط کمتری هستند، می باشد. اما در فرآیند بارش ابر سرد حضور ذرات یخ ضروری است. ابر سرد در نواحی حاره ای یا سایر نقاط، ترکیبی از تعداد زیادی قطره های ابر سرد و تعداد کمی ذرات یخ می باشد. بلورهای یخ در یک ابر فاز آمیخته به سرعت توسط نهشت بخار آب رشد می کنند، همزمان با آن قطره های آب ابر سرد تبخیر شده و باعث می شود که رطوبت نسبی در حد ۱۰۰٪ حفظ گردد که این امر سبب رشد بلورهای یخ می شود. سپس رشد ذرات در حال سقوط توسط برخورد با ذرات کوچکتر بلور یخ و قطره های ابر در مسیرشان ادامه می یابد. اندازه، نوع و تراکم هسته ها در جو در تعیین کارایی سیستم ابری باران را بسیار حائز اهمیت است.

غلظت و طیف اندازه قطره های ابر نیز می توانند بسته به توزیع اندازه هسته های تراکم ابر (CCN)^۱ بسیار متفاوت باشند. طیف قطره های دریایی شامل ذرات با غلظت کمتری می باشد اما نسبت به طیف قاره ای قطرات بزرگتری دارد [۲۸].

تفاوتی که در اغلب ابرهای همرفتی تابستانی مشاهده می شود سطوح دمایی است که در آنها هسته بندی بلورهای یخ انجام می شود [۸]. در ابرهایی با «پایه سرد» ($+10^{\circ}\text{C}$) و طیف باریک قطره

1. Cloud Condensation Nuclei

ابر، یخ در سطوح ۹- تا ۱۲- تمایل به رشد دارد [۲۲]. در ابرهایی با «پایه گرم» ($+10^{\circ}\text{C}$) هم‌امیزی معمولاً در نواحی ۵- درجه سانتیگراد تا ۸- همراه با فرآیند تکثیر یخ اتفاق می‌افتد [۱۸]. رفتار غالب بلورهای یخ در هر دو حالت متفاوت خواهد بود، در حالت اول نطفه‌های گویچه برف^۱ (تگرگ نرم) غالب بوده و در حالت دوم قطرات بزرگ منجمد شده ستونی شکل و ستون‌های کلاهکی شکل غالب هستند. در حالت دوم توسعه بارندگی از طریق فاز یخ زودتر آغاز شده است و کارآیی بالاتری از حالت اول دارد [۲۰]. تراکم بلورهای یخ در حالت دوم معمولاً بالاتر از حالت اول است. روشن است که واکنش نسبت به بارورسازی با توجه به سازوکار بارشی که در آن زمان عمل می‌کند متفاوت خواهد بود.

ارزیابی فیزیکی فرآیند تعدیل آب و هوا

در چند سال گذشته پژوهش در مورد فیزیک ابر و بارورسازی ابرها با عدم قطعیت‌هایی روبرو شده است که این عدم قطعیت‌ها به تاثیر فرآیندهای خرد فیزیکی ابر بر آب و هوا و اقلیم و به ویژه شبیه‌سازی فرآیندهای فیزیکی ابر در مدل‌های پیش‌بینی اقلیمی، مربوط می‌باشد. به علت وجود همین عدم قطعیت‌ها و یک سری مشکلات و مسایل در مواردی نظیر نقش ابر در اقلیم، هواشناسی میان مقیاس و شیمی جو، میدان دید پژوهش فیزیکی نیز بسیار وسیع تر شده است. در این قسمت ابتدا یک ارزیابی فیزیکی در فرآیند تعدیل آب و هوا خواهیم داشت و سپس به عدم قطعیت‌ها و مشکلات موجود در پژوهش فیزیک ابر و بارورسازی ابرها اشاره کرده و سرانجام به ارابه راه حل‌هایی برای پرکردن خلأهای موجود در پژوهش مورد نظر خواهیم پرداخت. ارزیابی فیزیکی عبارت است از تفسیر مشاهدات با توجه به تئوریهای معتبر گذشته و گسترش تئوری جدید که بر اساس آزمایش‌ها و تجربیات انجام شده در جو می‌باشد. به عنوان یک مثال خوب از یک ارزیابی فیزیکی می‌توان به یک مدل عددی فیزیکی-دینامیکی کامل و جامع از یک سیستم ابری (بذرپاشی شده یا بدون بذرپاشی) اشاره کرد. اگر هواشناسان توانایی پیش‌بینی‌های بی‌نقص و کاملی را داشتند، با مقایسه نتایج آزمایش‌ها و پیش‌بینی‌ها قادر به تخمین تاثیرات بارورسازی بودند، در صورتی که یک چنین قدرت پیش‌بینی نیازمند یک مدل فیزیکی-دینامیکی بسیار قوی در مورد سیستم‌های ابر می‌باشد. در درك نقش تعدیل آب و هوا در علوم جوی، باید دانست که بسیاری از

1. Grooupel

عدم قطعیت ها در فرآیندهای فیزیکی - دینامیکی ابرهای بذرپاشی شده مشابه آن سری مواردی هستند که پیش بینی بارش در مدل های پیش بینی آب و هوا و پارامترسازی در مدل های اقلیمی را محدود می کنند [۲۷].

قسمتهایی از ابر همرفتی که برای بذرپاشی مناسب است طول عمر مشخصی ندارد و ممکن است با قسمت هایی که بذرپاشی در آنها هیچ تاثیری ندارد، درهم آمیخته و پراکنده شوند. به همین دلیل و دلایل بسیار دیگر دانشمندان فیزیک ابر قادر به تعقیب تاثیرات فیزیکی از زمان بذرپاشی تا انتهای فرآیند بارش بر روی سطح زمین، نیستند. بعضی از مهمترین عدم قطعیت های موجود در دانش فیزیک ابر به کار گرفته شده در بارورسازی ابرها عبارتند از [۲۷ و ۳۰]:

- ۱- غلظت پس زمینه، اندازه و ترکیب شیمیایی ذرات معلقی که در فرآیندهای ابر شرکت دارند.
- ۲- برهم کنش های ابر-ابر و میان مقیاس که جریان های بالارو و پایین رو ساختارها و تحول ابر و طول عمر نقش اساسی دارند.
- ۳- مقایسه مدل های ابر با سیستم های مشاهداتی پیشرفته در آزمایش های دقیق میدانی.
- ۴- برهم کنش های فیزیکی، ترمودینامیکی و دینامیکی داخل ابر.
- ۵- مقایسه مدل های ابر با تحلیل های آماری.
- ۶- هسته بندی یخ (اولیه و ثانویه).

هرچند وجود این عدم قطعیت ها کار را برای محققان و دانشمندان فیزیک ابر کمی مشکل می سازد، اما همانطور که قبلاً نیز گفته شد، وجود این مشکلات خود باعث گسترش بیشتر علم فیزیک ابر شده است، به طوری که وجود این مسایل و گسترش علم با یکدیگر رابطه ای متقابل دارند.

با گسترش و توسعه هر چه بیشتر علم، هر روز شاهد تجهیزات و سازوکارهای جدیدتری هستیم که با استفاده بهینه و مناسب از این امکانات به وجود آمده است که می توان تا حد زیادی بر این مشکلات فائق آمد و خلاهای موجود در پژوهش فیزیک ابر را پر نمود. در دهه گذشته شاهد گسترش روزافزون ابزارهای جدید در اندازه گیری و مدلسازی فرآیندهای فیزیکی ابر و سیستم های طوفان بودیم. بدین ترتیب مطالعه جزئیات زنجیره رخدادهای فیزیکی در تحول یک سیستم ابر عملاً امکان پذیر شده است که این امر به بررسی و ارزیابی دقیق تر تاثیرات بذرپاشی، پالایش و بهبود فرضیه های فیزیکی و جمع آوری اطلاعات برای بذرپاشی مناسب منجر می شود. برخی از این تجهیزات و سازوکارها

عبارتند از: انواع رادار شامل رادار دوپلری^۱، رادار قطبش سنجی^۲، رادار موج میلیمتری ابر^۳، رادیومتری میکروموج GPS^۴، سنجش از دور و تصاویر ماهواره ای.

یکی دیگر از مسایل فراروی بارورسازی که اتفاقاً یکی از مهمترین موضوعات مرتبط با این فرآیند می باشد این است که هر ابری دارای قابلیت بارورسازی نیست. همچنان که در بخشهای قبلی ذکر شد، تعدیل آب و هوا با استفاده از فناوری بارورسازی ابرها با سه هدف اصلی، افزایش بارندگی به طور مقطعی و محدود، تگرگ زدایی و مه زدایی یکی از شاخه های پژوهش هواشناسی فیزیکی می باشد. براساس گزارش مراکز معتبر بین المللی اقلیمی، پدیده گرم شدن زمین در دو دهه اخیر سرعت بیشتری یافته و طبق اظهار نظر کارشناسان منابع آب، شاید یکی از بحران های جدی اکثر کشورها در دهه های آتی مسئله تامین آب برای عموم مردم باشد (شکل ۱).

در این خصوص بکارگیری فناوری بارورسازی ابرها بدون برنامه ریزی، نه تنها کمکی در حل مشکلات نخواهد کرد، بلکه موجب هدر رفتن سرمایه و اتلاف انرژی خواهد شد. لذا برای به اجرا در آوردن پروژه های موفق، ایجاد ارتباط بین مطالعات نظری و آزمایشگاهی با پروژه های اجرایی ضروری و اجتناب ناپذیر است. این حلقه ارتباط به عنوان مرحله امکان سنجی پروژه های تعدیل آب و هوا مطرح می باشند. در حقیقت امکان سنجی تعدیل آب و هوا شامل طیف گسترده ای از عوامل مؤثر در موفقیت عملیات اجرایی است. برای مثال می توان به اقلیم، شرایط آب و هوایی زمان بارورسازی، سیستم های جوی که منطقه را تحت تاثیر قرار می دهند، ناهمواری و پوشش گیاهی منطقه، منابع و تاسیسات آبی منطقه بارورسازی، تنوع کشاورزی منطقه و بسیاری موارد دیگر اشاره کرد.

همچنین قبل از انجام هر پروژه یا برنامه تعدیل آب و هوا، پژوهش در مورد تعیین فناوری حمل مواد بارورساز، تجهیزات مورد نیاز، برآورد هزینه و بررسی درصد موفقیت روش مورد نظر در منطقه هدف از مراحل مهم آزمایش های بارورسازی ابرها است. تعدیل آب و هوا نیاز به فناوری پیشرفته ای دارد که مواد بارورساز را تولید و داخل ابر پراکنده کند بهره وری از این فناوری از لحاظ اقتصادی بسیار پرهزینه می باشد. به همین دلیل بروز هرگونه خطا و اشتباه در روش بارورسازی، ماده

-
1. Coppler Radar
 2. Polarimetrie Radar
 3. Millimeter- Wave Cloud Radar
 4. Microwave Radiometry

بارورسازی، زمان و یا محل بارورسازی موجب اتلاف هزینه می شود. در این خصوص به منظور بهینه سازی روش و شرایط بارورسازی و کسب نتایج بهتر از آزمایش مورد نظر، شبیه سازی و مدلسازی عددی فرایندهای فیزیکی و دینامیکی مراحل مختلف بارورسازی به عنوان یک روش کم هزینه و مطمئن در پژوهش تعدیل آب و هوا در بسیاری از کشورها مورد استفاده قرار می گیرد. به طوری که با بهره گیری از مدل های عددی چند بعدی، امکان بررسی تغییرات ممکن در ابر پس از عملیات بارورسازی شامل تاثیرات استاتیکی و دینامیکی فراهم می گردد.

در سالهای اخیر و در راستای استفاده از فن آوری بارورسازی ابرها به عنوان یکی از روش های تعدیل آب و هوا در کشور، امکان سنجی نیز به عنوان یک ضرورت مطرح شده است و هم اکنون پروژه های متعددی در سطح کشور در این زمینه توسط اساتید دانشگاه ها و کارشناسان پژوهشکده هواشناسی در دست اجرا است.

مفاهیم فیزیکی بارورسازی ابر آبرسد

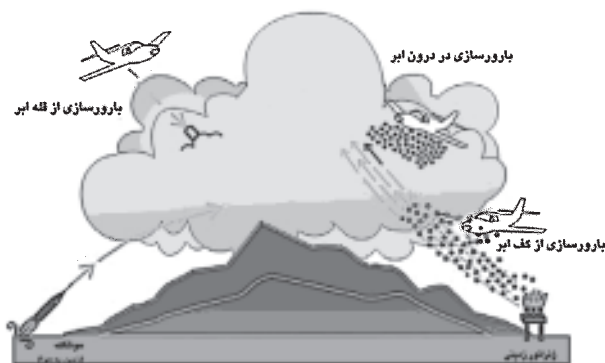
پخش مواد بارورساز می تواند توسط ژنراتورهای زمینی، از طریق هواپیما از کف ابر، از طریق موشک زمین به هوا از قله ابر و درون ابر از طریق هواپیما صورت گیرد (شکل ۳). بارورسازی ابرهای سرد عمدتاً با استفاده از مواد بارورساز از قبیل یخ خشک، ترکیبات عالی، یدید نقره، دی اکسیدکربن مایع انجام می گیرد [۲]. آب مایع ابر سرد می تواند با استفاده از مقداری یخ خشک یا یدیدنقره به بلورهای یخ تبدیل شود [۳۴]. مدل های مفهومی براساس موارد زیر بنا شده اند:

(الف) مشاهدات عینی ابرهای بدون بارندگی، (ب) حضور آب آبرسد، (ج) تشابه بین ابرهایی که در مناطق دیگر به بارورسازی واکنش مثبت داده اند، (د) داده های جمع آوری شده توسط هواپیما و رادار [۳۳].

از زمان کشف مواد یخ ساز در بیش از ۴۰ سال پیش، هنوز در سراسر جهان یدیدنقره و یخ خشک بیشترین کاربرد را برای مواد بارورسازی دارند. هر دو ماده با هسته بندی بلورهای جدید یا انجماد قطرکهای ابر، غلظت بلورهای یخ را در ابر افزایش می دهند. براساس توانایی آنها در هسته بندی یخ، دو مفهوم بارورسازی در گذشته پیشنهاد شده بود که عبارت بودند از مفاهیم بارورسازی استاتیکی و دینامیکی [۸] اما استفاده از این مواد با مشکلاتی نیز همراه بود، به عنوان مثال بذریابی یدیدنقره از ژنراتورهای زمینی مشکلات جدی دینامیکی و خرد فیزیکی به همراه دارد [۵ و ۳۲]. مسیر دود یدیدنقره

از سطح زمین در جو را نمی توان پیش بینی کرد زیرا فرآیند پخش این ماده در جو پیچیده است. همچنین تعداد بلورهای یخ که به وسیله بذریابی یدیدنقره تولید می شوند به شدت به دما وابسته است (شکل ۳) از آنجایی که دما با افزایش ارتفاع کم می شود، تعداد بلورهای یخ تولید شده بطور قابل ملاحظه ای افزایش می یابد. بذریابی یدیدنقره حتی از طریق هواپیما نیز مشکل جدی هسته بندی بیش از حد بلورهای یخ را ایجاد می کند، به طوری که احتمال بروز فراباروری بیشتر می شود. تخلیه رطوبت قابل دسترس در دماهای پایین باعث می شود که بلورهای یخ نهایی هرگز به طور موثر به اندازه مطلوب رشد نکنند.

مشکلات از پیش گفته با روش نوین بذریابی افقی در تراز پایین ابر با استفاده از دی اکسیدکربن مایع (LC)^۱ قابل حل می باشد. تعداد بلورهای یخ که به وسیله بذریابی LC تولید می شود تقریباً به دما بستگی ندارد [۱۵]. فرآیند اخیر گسترش و انبساط ترمالهای بلورهای یخ در حالیکه می چرخند و بالا می روند را نشان می دهد، که نشانگر فرآیند بین تراز بذریابی و قله ابر است. ترمال بلورهای یخ، ضمن آن که می چرخند، صعود می کنند و گسترش می یابند و درون آمیختگی با ابر سرد باعث می شود که بلورهای یخ متعدد و متناسبی که در ابتدا تولید شده اند به حد کافی رشد کنند و سرعت سقوط لازم را در قله ابر بدست آورند. فیزیک استفاده از انرژی تغییر فاز به منظور بهینه سازی اثرات بارورسازی ابر آبرسرد با استفاده از دی اکسیدکربن مایع توسط فوکوتا ارائه شده است [۱۶].



شکل ۳- روشهای مختلف پخش مواد بارورساز درون ابر [۳]

1. Liquid Carbon Dioxide

مدل مفهومی بارورسازی استاتیکی

الف) ابرهای همرفتی

برخی از مراحل اولیه در این زنجیره رویدادها در اندازه گیری های میدانی، مطالعات آزمایشگاهی و مدل سازی آشکار شده است. این مراحل شامل افزایش تراکم بلورهای یخ و تولید سریع تر ذرات بارندگی در ابرهای کومه ای می باشند. در آزمایش HIPLEX-1 جزئیات فرضیه بارورسازی همراه با برنامه میدانی مناسب که هر مرحله را توسط فرضیه فیزیکی کنترل می کرد، هدایت شد.

این نکته جالب توجه است که اگرچه فرضیه بارورسازی آزمایش HIPLEX-1 برای تبدیل بلورهای یخ ایجاد شده توسط بارورسازی گویچه برف نامیده شد، اندازه گیریهها در ۶- درجه سانتیگراد در ابرهای آزمایش HIPLEX-1 تعداد زیادی بلور یخ توده ای شکل را نشان دادند [۱۰]. این امر به دلیل طبیعت عمر کوتاه ابرهای آزمایش HIPLEX-1 و کاهش سریع در آب مایع آب سرد که منبع اولیه برای گویچه برف هستند، می باشد. بلورهای یخ توده ای شکل، که به عبارت دیگر، سرعتهای نزول کمتری نسبت به ذرات گویچه برف دارند، معلق باقی مانده و تبخیر شده و افزایشی در بارندگی ایجاد نمی کنند. این نتایج نشان می دهند که تمام ابرها قابل بارورسازی نیستند و یک بازه مکان-زمان معینی وجود دارد. برای مفهوم بارورسازی استاتیکی این بازه، محدود به ابرهایی با پایه سرد بری با دماهای قله تقریباً بین ۱۰- و ۲۰- درجه سانتیگراد است و همچنین محدود به زمانی است که مقدار قابل توجهی از آب مایع آب سرد برای رشد توسط برفکی شدن کریستالهای یخ از طریق بارورسازی وجود داشته باشد [۱۰]. سیستم های همرفتی پیچیده به طور قابل توجهی بیشتر در ابرهای کومه ای انبوه نیمه بی دررو در بارندگی مناطقی که بخش اصلی بارندگی سالانه آنها نتیجه فعالیت همرفتی است، نقش دارند [۹]. این سیستم ها به علت اینکه تا حد زیادی فرآیندهای دینامیکی بزرگ مقیاس و میان مقیاس را بروز می دهند از نظر دینامیکی از ابرهای کوچکتر پیچیده تر هستند. افزایش بارندگی در سطح زمین به علت مفهوم بارورسازی استاتیکی در ابرهای کومه ای همرفتی عموماً قطعی نبوده و در این زمینه دید محتاطانه تری جایگزین خوش بینی اولیه شده است.

نتایج آزمایشهای بارورسازی اتفاقی با استفاده از یخ خشک در جنوب آفریقا [۲۶] کاملاً با فرضیه بارورسازی استاتیکی مطابقت ندارد، اما شامل انجماد قطرات بزرگی که سریعتر از ذرات گویچه برف رشد می کنند می باشد [۱۹]. نتایج بررسی ۱۲۷ توفان با استفاده از داده های رادار نشان می دهد

که شار باران اندازه گیری شده توسط رادار و مکان طوفان در ابرهای بارور شده به طور قابل توجهی بزرگتر از ابرهای غیربارور شده است. اگرچه این نتایج، افزایش باران را از توفانهای ویژه نشان می دهند اما افزایش بارندگی در مکان هدف در سطح زمین را ابراهه نکردند. نتایج این مطالعه همچنین نشان می دهد که ابرهای مکانهایی که فرآیند همامیزی در آنها فعال بوده است، به نظر می رسد که تمایل بیشتری به بارورسازی دارند [۲۵].

ب) ابرهای کوهساری زمستانی

از زمان اولین مدل‌های مفهومی [۶ و ۲۳]، کوشش هایی برای افزایش برف زمستانی در رشته کوه ها توسط بارورسازی ابرها آغاز شد و بسیاری از برنامه های عملیاتی و پژوهشی بارورسازی ابر زمستانی در جهان اجرا شده است. مطالعات نشان داده اند که بارورسازی، بارندگی را تحت شرایط مطلوب افزایش می دهد و می تواند باعث افزایش برف شود. به هر حال، هنوز پرسش های بسیاری بی پاسخ مانده اند. بخصوص، تغییر پذیری ابرها و تغییرات زمانی و مکانی جریان باد و نواحی آب مایع آبرسرد، مشکلاتی را در هدف گیری و انتشار مواد بارورسازی و تعیین موقعیت های مناسب بارورسازی ایجاد می کند. مواجه شدن با تغییر پذیری ابر به عنوان مثال در مناطق کوهستانی ایالات متحده رقابت شدیدی را برای پیش بینی فرصت های بارورسازی و تعیین استراتژی عملیات، به ویژه هنگامی که فرصت های بارورسازی کوتاه مدت است، ایجاد می کند [۳۰]. در بیشتر مطالعات، اندازه گیری آب محتوای ابر^۱ (CLW) با راديو مترهای میکروویو، موارد بسیاری از CLW که دارای پتانسیل بارورسازی هستند را نشان داده است [۱۹]. تغییر پذیری زمانی و مکانی CLW همچنین یک مسئله جدی برای هدف گیری نواحی CLW با مواد بارورسازی را در بردارد. این امر به ویژه در آزمایشهای بارورسازی در سیرانوادا^۲ [۱۲]، جاییکه زنجیره کاملی از فرآیندها از زمان بارورسازی تا ایجاد بارندگی تنها در ۲ آزمایش از ۳۶ آزمایش توانست مستند شود، برجسته بود. شکست ها به مشکلات تکنیکی و محدودیت های لجیستیکی تغییر پذیری حتی سیستم های ساده ابر نسبت داده شدند و نه لزوماً به مدل مفهومی بارورسازی. این به ویژه در توزیع های زمانی و فضایی CLW و نوسانات طبیعی تراکم بلور یخ مشهود بود.

1. Cloud Liquid Water

2. Sierra Nevada

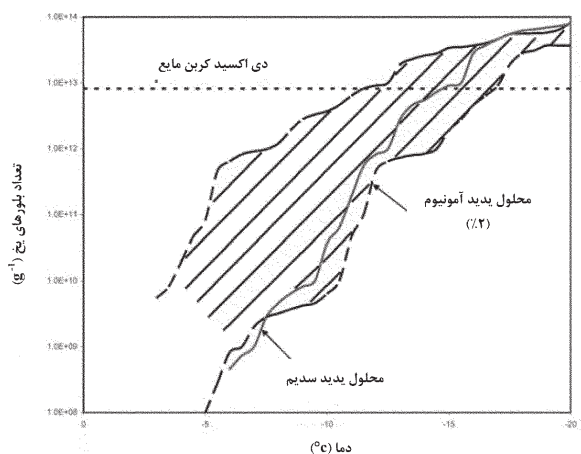
مدل مفهومی بارورسازی دینامیکی

بارورسازی دینامیکی عبارت است از بارورسازی ابرهای آب سرد با مقادیر کافی هسته یخ یا خنک کننده به منظور انجماد سریع ابر. در نتیجه بارورسازی، آب مایع ابر سرد به ذرات یخ تبدیل می شود، گرمای نهان را آزاد می کند و شناوری را افزایش داده و بدین طریق حرکت صعودی ابر را تقویت می کند که این امر در شرایط مناسب، باعث رشد بیشتر ابر، بخار آب بیشتر و بازده بیشتر بارندگی می شود. علاوه بر آن، ایجاد بارندگی ممکن است سبب حرکت نزولی شدیدتر شود و فعل و انفعال با محیط همرفت فعال تری را ایجاد کند.

فرآیند خردفیزیکی بارورسازی ابرهای آب سرد با استفاده از LC

در بارورسازی ابرهای آب سرد، هسته بندی یخ و رشد بلور یخ به عنوان دو فرآیند اساسی خردفیزیکی این عملیات میدانی مورد توجه می باشد. در هسته بندی یخ، دو ساز و کار هسته بندی مهم شناخته شده اند، هسته بندی یخ همگن و غیر همگن. اختلاف اساسی در توان هسته بندی آنها در بارورسازی بدین صورت است که در اولی اساساً هسته بندی یخ مانند یخ خشک، به دما بستگی ندارد [۱۳ و ۱۴]. در حالی که در دومی مانند پدورنقره شدیداً به دما وابسته است (شکل ۴) [۱۷ و ۲۸].

وابستگی دمایی توان هسته بندی یخ منجر به تشکیل تعداد ناکافی هسته های یخ در ارتفاع پایین یا



شکل ۴- مقایسه بین تولید بلورهای یخ در هسته بندی یخ همگن و غیر همگن [۱۷ و ۲۸]

درجه آب سردی ملایم می شود که برای تولید گرمای کافی توسط گرمای نهان تغییر فاز یا رشد بلور یخ با شکست مواجه می شود. از طرف دیگر، در ارتفاع بالاتر یا درجه آب سردی بالا، تعداد زیادی از هسته بندی یخ منجر به تشکیل بلورهای یخ که نمی توانند به خوبی سقوط کنند، می گردد. فرآیند اساسی دیگر، رشد بلور یخ می باشد. بلورهای یخ ایجاد شده بایستی رشد کنند که باعث ایجاد اثرات بارورسازی قابل ملاحظه ای شود. برای رشد دو عامل اساسی بایستی همزمان ارضاء شوند، یکی زمان و دیگری مجاورت با قطرات آب سرد [۱]. زمانی که بلورهای یخ با قطرات آب آب سرد وجود دارند، سیستم تغییر می یابد. از آنجاییکه فشار بخار اشباع بر فراز یخ کمتر از فشار بخار اشباع بر فراز آب در همان دما است، قطرات تبخیر می شوند و بلورهای یخ بوسیله فرآیند پخش بخار مطابق تئوری برزرون رشد می کنند [۶]. هنگامی که تعادل ترمودینامیکی برقرار شد، پس از اتمام قطرات و تولید گرمای تغییر فاز، فرآیند متوقف می شود. بلورهای یخ مطابق تئوری ماکسولین^۱ با فرض اینکه شکل بلور یخ کروی می باشد، رشد می کنند. همچنین نباید مقدار رشد یافته در واحد حجم از حد ترمودینامیکی تجاوز کند.

بحث و نتیجه گیری

در آغاز و توسعه بارندگی، فرآیندهای خرد فیزیکی گوناگونی دخیل هستند که تحت شرایط جوی معین یک فرآیند، فرآیند غالب محسوب می شود. توسعه بارندگی بسته به نوع ابر (گرم یا سرد) از طریق همامیزی یا از طریق فرآیند یخ یا ترکیبی از هر دو انجام می پذیرد. بلورهای یخ در یک ابر فاز آمیخته توسط نهشت بخار آب به سرعت رشد می کنند و طی چند دقیقه به اندازه ای رشد می کنند که دارای سرعت سقوط قابل ملاحظه ای می گردند. در همین زمینه وجود یک سری مسایل و عدم قطعیت ها که بر اساس ارزیابی های فیزیکی پدیدار گردیده اند، پژوهش و مطالعه فیزیک ابر را با مشکلاتی روبرو کرده است که با استفاده از تجهیزات و سازوکارهای نوین می توان تا حد زیادی بر این مشکلات فائق آمد و خلاهای موجود را پر کرد. همچنین بر اساس فرآیند امکان سنجی دیده شد که هر ابری قابل بارورسازی نیست و برای اخذ نتیجه موفقیت آمیز می بایست شرایط بسیاری بررسی و تامین گردد. به عبارت دیگر بارورسازی تنها راه حل مقابله با خشکسالی نیست.

در بارورسازی ابرهای آب سرد عمدتاً از چهار ماده بارورساز معروف یخ خشک، یدیدنقره،

1. Maxwellian

ترکیبات عالی و دی اکسیدکربن مایع استفاده می کنند. در بارورسازی ابرهای ابر سرد استفاده از LC بر دیگر مواد بارورساز ترجیح داده می شود، چراکه در بارورسازی های جدید با استفاده از ماده بارورساز LC، اولاً مشکل هسته بندی بیش از حد بلورهای یخ وجود ندارد و ثانیاً بذریاشی LC توسط هواپیما از کف ابر صورت می گیرد که این روشها را نمی توان در بذریاشی با دیگر مواد نظیر دیدنقره که مسیر دود آن از سطح زمین در جو غیر قابل پیش بینی است، اجرا نمود. در نتیجه فرآیند بارورسازی، آب مایع ابر سرد پس از تبدیل شدن به ذرات یخ، گرمای نهان را آزاد می کند و بدین ترتیب شناوری افزایش می یابد. افزایش شناوری باعث تقویت حرکت صعودی ابر و در نتیجه رشد بیشتر ابر و بازده بیشتر بارندگی می شود. در بارورسازی استاتیکی، سیستم های همرفتی پیچیده به طور قابل توجهی بیشتر در ابرهای کومه ای انبوه نیمه بی دررو در بارندگی مناطقی که بخش اصلی بارندگی سالانه آنها نتیجه فعالیت همرفتی است، نقش دارند. هرچند افزایش بارندگی در سطح زمین در ابرهای کومه ای همرفتی قطعی نمی باشد. هسته بندی یخ همگن و غیر همگن دو سازوکار مهم و اصلی هسته بندی یخ می باشند که نقش بنیادی در انتخاب ماده بارورساز و فرآیند بارورسازی دارند. در هسته بندی یخ غیر همگن، تعداد بلورهای یخ شدیداً به دما وابسته است، درحالیکه تعداد بلورهای یخ در هسته بندی همگن با دما ثابت است. در بارورسازی ابر ابر سرد با استفاده از LC (ماده هسته ساز همگن)، ترمال بلور یخ در جهت مسیر پرواز شکل استوانه ای دوتایی را می گیرد، حجم این ترمال با زاویه نیمه عمودی (۱۵) متناسب و همراه درون آمیختگی با ابر ابر سرد و در اثر رها شدن گرمای نهان صعود می کند. این ترمال به علت گرم شدن هوای ناشی از گرمای نهان ایجاد شده توسط رشد بلورهای یخ شکل می گیرد.

دو فرآیند اساسی خردفیزیکی و برهم کنش های خردفیزیکی-دینامیکی در بهینه سازی محتوای آب ابر سرد در بارورسازی نقش مهمی را ایفا می کنند. با حداکثر کردن مسافت صعود ترمال یخ و به حداقل رساندن سرعت رو به پایین ترمال می توان بلورهای یخ را تا حد امکان رشد داد، فرآیند رشد بلور یخ زمانی آغاز می شود که فشار بخار اشباع بر فراز یخ کمتر از فشار بخار اشباع بر فراز آب در همان دما باشد، در این لحظه قطرات آب تبخیر می شوند و بلورهای یخ رشد می کنند.

تشکر و قدردانی

این مقاله از بخشی از پروژه «مطالعات مرتبط با تعدیل مصنوعی آب و هوا» که با حمایت مالی

سازمان هواشناسی کشور انجام شده است، استخراج گردیده و بدینوسیله از مسئولین سازمان هواشناسی کشور و پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو و کارشناسان پژوهشکده اقلیم شناسی، خصوصاً سرکار خانم مهندس خزانه داری تشکر و قدردانی به عمل می آید.

منابع

- ۱- بداق جمالی، جواد و سهیلا، جوانمرد، ۱۳۸۱، مقاله نامه کنفرانس سالانه فیزیک ایران، انجمن فیزیک ایران.
 - ۲- بداق جمالی، جواد و سهیلا، جوانمرد، ۱۳۸۲، مقاله نامه کنفرانس سالانه فیزیک ایران، انجمن فیزیک ایران.
 - ۳- بداق جمالی، جواد، سهیلا، جوانمرد، ۱۳۸۲، کتابچه مفاهیم مقدماتی تعدیل آب و هوا با استفاده از فناوری بارورسازی ابرها.
 - ۴- پروژه «مطالعات مرتبط با تعدیل مصنوعی آب و هوا»، گزارش ۱، ۱۳۸۱، پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو، سازمان هواشناسی کشور.
 - ۵- جوانمرد، سهیلا، جواد، بداق جمالی، نوربیهیکو، فوکوتا، ۱۳۷۹ و ۱۳۸۰، مجله نیوار، شماره ۴۲ و ۴۳.
6. Bergeron, T., 1949, The Problem of Artificial Control of Rainfall on the Globe, I., General Effects of Ice-nuclei in Clouds, *Tellus*, 1, 32-43.
 7. Braham, R.R.Jr., 1952, The Water and Energy Budgets of the Thunderstorm and their Relation to Thunderstorm Development, *J. Meteorology*, 9, 227-242.
 8. Braham, R.R., Jr., 1986, Precipitation Enhancement-A Scientific Challenge, R.R., Braham, Jr., Ed., *Meteor. Monogr.*, 21, No.43, Am. Meteor., Soc., Boston, pp.1-5.
 9. Bureau of Reclamation, 1979, The Design of HIPLEX-1, Rep., Division of Atmospheric Resources Research, Bureau of Reclamation, U.S. Dept. of the Interior, Denver, 271 pp.
 10. Cooper, W.A. and R.P., Lawson, 1984, Physical Interpretation of Results from the

- HIPLEX-1 Experiment, *J. Climate Appl. Meteor.*, 23, 523-540.
11. Cotton, W.R. and R.A. Anthes, 1989, *Storm and Cloud Dynamics*, Academic Press, San Diego, 880 pp.
 12. Deshler, Terry, D.W., Reynolds and A.W., Huggins, 1990, Physical Response of Winter Orographic Clouds over the Sierra Nevada to Airborne Seeding Using Dry Ice or Silver Iodide, *J. Appl. Meteor.*, 29, 288-330.
 13. Fukuta, N., Schmeling and L.F., Evans, 1971, Experimental Determination of the Ice Nucleation by Falling Dry Ice Pellets, *J. Appl. Meteor.*, 10, 1174-1179.
 14. Fukuta, N., 1987, The Surface Temperature of Dry Ice, *Solid CO₂ J. Wea. Mod.*, 19, 99-101.
 15. Fukuta, N., 1996, Low-level Penetration Seeding with Homogeneous Ice Nucleant for Optimization of the Induced Microphysics, Dynamics Interaction, *Proceeding 13th Conf. on Planned and Inadvertent Wea. Mod.*, Atlanta, 164-171.
 16. Fukuta, N., 1999, Feed Backed Utilization of Phase Change Energy for Lifting, Turbulence Generation and Spreading of Seeding Ice Thermal and Optimization of the Seeding Effect, *Proceeding of the WMO Scientific Conf. on Wea. Mod.*, Chiang Mai, Thailand, 363-366.
 17. Garvey, D.M., 1975, Testing of Cloud Seeding Materials at the Cloud Simulation and Aerosol Laboratory, 1971-1973, *J. Appl. Meteor.*, 14, 883-890.
 18. Hallet, J. and S.C., Mossop, 1974, Production of Secondary Ice Particles During the Riming Process, *Nature*, 104, 26-28. 10.
 19. Huggins, A.W., 1995, Mobile Microwave Radiometer Observations: Spatial Characteristics of Super Cooled Cloud Water and Cloud Seeding Implications, *J. Appl. Meteor.*, 34, 432-446.
 20. Johnson, D.B., 1987, On the Relative Efficiency of Coalescence and Riming, *J. Atmos. Sci.*, 44, 1672-1680.

21. Kasse, 1991, Alcamo, Henriches, Roesch: "World Water in 2025".
22. Krauss, T.W., R.T., Bruintjes and J., Verlinde, 1987, Microphysical and Radar Observations of Seeded and Nonseeded Continental Cumulus Clouds, *J. Climate Appl Meteor.*, 26, 585-606.
23. Ludlam, F.H., 1955, Artificial Snowfall from Mountain Clouds, *Tellus*, 7, 277-290.
- Marwitz, J.D., 1972, Precipitation Efficiency of Thunderstorms on High Plains, *J. Rech. Atmos.*, 6, 367-370.
24. Mather, G.K., B.J., Morrison and G.M., Morgan, Jr., 1986, A Preliminary Assessment
25. of the Importance of Coalescence in Convective Clouds of the Eastern Transvaal, *J. Climate Appl. Meteor.*, 25, 1780-1784.
26. Mather, G.K., M.J., Dixon and J.M., de Jager, 1996, Assessing the Potential for Rain Augmentation- The Nelspruit Randomized Convective Cloud Seeding Experiment, *J. Appl. Meteor.*, 35, 1465-1482.
27. National Academy of Sciences, 2003, Critical Issues on Weather Modification, 45-67.
28. Plooster, M.N. and N., Fukuta, 1975, A Numerical Model of Precipitation from Seeded and Unseeded Orographic Clouds, *J. Appl. Meteor.*, 14, 859-867.
29. Pruppacher, H.R. and J.D., Klett, 1978, *Microphysics of Clouds and Precipitation*, D., Reidel Publishin, 714 pp.
30. Rangno, Arthur, L., 1986, How Good are Conceptual Models of Orographic Cloud Seeding Precipitation Enhancement-A Scientific Challenge, Roscoe, R., Braham, Jr., Ed., *Meteor., Monogr.*, 21, No. 43, Am. Meteor. Soc., Boston, pp. 115-126.
31. Ryan, B., 2000, Progress in Cloudphysics Research Relevant to the rde of Clouds in Climate, the Anthropogenic Modification of Cloud Structure and Development of Preeipitation Processes in Clouds, Report of the Executive Councel Panel of Experts/CAS Working Group on Physics Clouds, WMO, Geneva, 71-82.

32. Suzuki, Y., 1997, Kyushu Univ., Research Report of Artificial Rain project, Fukuoka Prefecture, Japan.
33. Vali, G., L.R., Koenig and T.C., Yoksas, 1988, Estimate of Precipitation Enhancement Potential for the Duero Basin of Spain, J. Appl. Meteor., 27, 829-850.
- Vonnegut, B., 1947, The Nucleation of Ice Formation by Silver Iodide, J. Appl Phys., 18, 593-595.