Archive of SID

بررسی نقش بارورسازی ابرهای سطح پایین به منظور ارتقاء ایمنی در جاده های کوهستانی

جواد بداق‌جمالی، استادیار، پژوهشکده هواشناسی ، تهران، و مرکز تحقیقات هواشناسی کاربردی فارس، شیراز
سهیلا جوانمرد، استادیار، مرکز تحقیقات هواشناسی کاربردی فارس، شیراز، صندوق پستی ۱۱۹٤-۷۱۵۵۵
محمد حیدری، کارشناس، هواشناسی هوانیروز، تهران، ایران
E-mail:jbodagh@yahoo.com

چکیده

مه یکی از پدیده‌های هواشناسی است که با تشکیل آن دید افقی و عمودی کاهش می‌یابد. با وجود مفید بودن آن در کشاورزی از نظر جلوگیری از یخ زدگی گیاهان میوه‌دار، در بروز خسارات جانی و مالی در بخش حمل و نقل نقش مهمی را ایفا می‌کند. این پدیده طبیعی و مخرب در هوانوردی مشکلات عمده‌ای ایجاد کرده و از عملیات پروازی جلوگیری می‌نماید. به طور کلی برای پراکنده کردن مه و به دنبال آن شفاف نمودن هوای سطح زمین ابتدا باید از نحوه شکل‌گیری و انواع آن شناخت لازم را کسب کرد و سپس در مورد نحوه بکارگیری فنآوریهای نوین برای پراکنده کردن آن اقدام نمود. در این مقاله پس از مروری بر نحوه شکل‌گیری و ساختار فیزیکی مه، اطلاعات، آمار و نمودارهای روزهای مه‌آلود سی شهر کشور تهیه و نقشه‌های پهنه‌بندی آن ها به دست آمدند، سپس نتایج تحقیقات میدانی و عملیات مه‌زدایی که در نقاط مختلف کشور ایران انجام شده اند، مورد بحث و بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از انجام آزمون‌های میدانی نشان دهندهٔ موفقیت روش بارورسازی با استفاده از دی‌اکسیدکربن مایع توسط خودروی سیار جهت پراکنش مه‌های اَبَرسرد به عنوان یکی از بهترین روشهاست که در فاصله ۳۰ دقیقه بعد از بذرپاشی موجب شفاف شدن هوا و باز شدن میدان دید می‌شود. نتایج موفق این آزمون میدانی مؤید این واقعیت است که روشهای موفق بارورسازی می توانند در به منظور پراکنش مه و شفاف‌سازی جو به کار گرفته شود. در بخش پایانی از مقاله مدل‌سازی عددی فرآیندهای خردفیزیکی بارورسازی ابر اَبَرسرد مورد بحث و بررسی قرار گرفته است.

واژه‌های کلیدی: تعدیل آب و هوا، بارورسازی ابرها، مه، پراکنش مه، دی‌اکسید کربن مایع.

۱. مقدمه

تعدیل آب و هوا به عنوان شاخه جدیدی در علوم جو با هدف اصلی کنترل شرایط جوی و با سه هدف کنترل محدود و مقطعی بارش، مه‌زدایی و کاهش خسارات تگرگ برای محققین و دانشمندان علوم مربوطه از اهمیت بسیاری برخوردار است. اکثر فعالیت هایی که در این زمینه انجام می‌گیرند از طریق بارورسازی ابرها که در واقع کنترل سلولهای ابر سیستم‌های بارانزا برای دستیابی به نتیجه مطلوب است، صورت می پذیرند.

با وجود پیشرفتهای فنآوری، مه هنوز به عنوان یک خطر جدی برای بخش‌های مختلف حمل و نقل (هوانوردی، دریانوردی وجاده‌ای) به شمار می رود. طبق تعریف، مه به ابری اطلاق می شود که میدان دید ناظر را کاهش داده و آن را از بیش از ۱۰۰۰ متر، به ۱۰۰ و حتی ۱۰ متر محدود کند. مه می‌تواند از چند ساعت تا چندین روز پایدار باشد و به طور طبیعی تحت تأثیر نیروی عمودی قوی و گرمای خورشیدی پراکنده گردد. آمار موجود معرف خسارات ناشی از مه غلیظ در سراسر جهانند.

www.SID.ir

Archive of SID

کشورهای پیشرفته جهان نظیر آمریکا، روسیه، ایتالیا و چین در مورد مقابله با پدیده مه آزمایش‌ها و نوآوریهایی را انجام داده‌اند که در اکثر این موارد با استفاده از بارورسازی، پدیده مه از بین می‌رود. به عنوان مثال می توان به موارد ذیل اشاره کرد:

هاگتون و رادفورد در سال ۱۹۳۸ چندین روش عملی قابل اجرا را برای پراکندگی مه گرم برروی فروردگاه معرفی کردند[۱] . بعضی آزمایش‌ها موفقیت‌آمیز بود، اما نه همهٔ آنها. مه و مشکلات ناشی از آن در جنگ جهانی دوم، انگلستان را برای تدوین مدل پراکندگی مه که FIDO نامیده می‌شد، برانگیخت.

سیستم FIDO که در سال ۱۹۵۳ مطرود شده بود از آن به بعد در انگلستان و ایالات متحده آمریکا توسعه یافت و عمدتاً به عنوان تضمینی برای استفاده در هوانوردی و هواپیمایی بازرگانی بسیار با اهمیت به نظر می‌رسید.

با وجود جت‌های قدیمی، مشکل مه دوباره حاد شد و فعالیت در جهت تحقیق در زمینه پراکندگی مه گرم افزایش یافت. اگر چه دنبال کردن مفهوم کلی مه و پراکندگی مه گرم، موضوع جدیدی نیست، اما با توجه به فنآوری موتورهای جدید، این تکنیکهای قابل اجرا به کار برده می‌شوند. نقطهٔ عطف دیگری در تاریخ پراکندگی مه و در واقع علم تعدیل آب و هوا در سال ۱۹٤٦ اتفاق افتاد.

در این زمان دکتر و.ج. شیفر و همکارانش در شرکت جنرال الکتریک اثبات کردند که برف و به دنبال آن وضوح ابر می‌تواند در ابرهای استراتوس ابر سرد توسط هسته‌های یخ خشک ، ایجاد شود. نتایج اساسی در تئوری آنها پایه ای برای تلاش‌های بیشتر در علم تعدیل آب و هوا گردید که علم امروزی آنرا دنبال می‌کند [۲].

فناوری عملیات پراکندگی مه آبَرسرد از دهه ۱۹۵۰ در دسترس بوده است. این برنامه تا سال ۱۹٦۰ قابلیت بهره‌برداری در فرودگاه‌ها را نداشت.

دو روش بارورسازی یخ خشک در آسمان و سیستم‌های زمینی پروپان که در سطح زمین بنا نهاده شده‌اند و در ایالات متحده آمریکا، فرانسه و شوروی اجرا شده‌اند، قابل استفاده بودند. به علت فراوانی بسیار زیاد رخداد مه در دماهای بیش از ۲۳°F (۵°C)، از روش بارورسازی با یدورنقره در آسمان، به عنوان یک روش عملیاتی استفاده نمی‌شد.

عملیات بارورسازی مه توسط هواپیمایی که مجهز به یخ خشک بود انجام می‌شد. قالب‌های یخ خشک برروی سکوی پرتاپ هواپیما در داخل یک پاشنده قرار می گرفتند و در طول عملیات بارورسازی به کار برده می شدند.

روش بارورسازی با یخ خشک در آسمان، به منظور پراکندگی مه توسط سرویس هوایی یا AWS در پایگاه‌های نیروی هوایی آلاسکا و اروپای غربی و نیز توسط انجمن حمل و نقل هوایی در فرودگاه‌های تجارتی ایالات متحده آمریکا و همچنین در فرودگاه‌های روسیه انجام می شد.

در طول سالهای ۱۹۷۲- ۱۹٦۸، حجم عملیات پراکندگی مه توسط AWS به ۷۳٦ هواپیما در هنگام شروع پرواز و ٦۸٦ هواپیما در هنگام فرود در پایگاه نیروی هوایی المندرف (Elmendorf) در آلاسکا رسید[۳]. همچنین آنها مسئولیت موفقیت ۲۵٦ هواپیما در هنگام شروع پرواز و ۱۷۲ هواپیما در هنگام فرود را در ۹ پرواز عملیاتی در اروپا، طی سالهای ۱۹۷۲-۱۹۷۰ بر عهده داشتند.

عملیات بارورسازی با یخ خشک در مورد پراکنده کردن مه آبَرسرد در ۱۳فرودگاه شمال مرکزی و شمال غربی ایالات متحده آمریکا مورد استفاده قرار گرفته و نتیجهٔ آن کاهش قابل ملاحظه در هزینه‌ها را نشان داده است.

روش پراکندگی مه آبَرسرد با استفاده از یک پایگاه زمینی سیستم پروپان مایع توسط سرویس هوایی واقع در واشنگتن و فرودگاه ارلی در پاریس هدایت می‌شد.

سیستم‌های AWS شامل ۲۱ واحد پخش‌کننده در نزدیکی ٤ فرودگاه برای مکانهایی که در وضعیت باد آرام و در مسافت‌های متفاوت در راستای باد غالب هستند، قرار داشتند. سیستم فرود از سال ۱۹٦٤ در فرودگاه ارلی پاریس راه‌اندازی شد.

در طول زمستان سال ۱۹۷۱-۱۹۷۰ امکان ۳٤۰ فرود و مجوز ۲۸٤ برخاست به وسیله سیستم فرودگاه ارلی پاریس فراهم شد.

فوکوتا در سال ۱۹۹٦ روش بذر پاشی افقی دی اکسید کربن مایع در تراز پائین ابر آبَرسرد را ابداع نمود . در این روش تعداد بلورهای یخ که توسط بذرپاشی LC تولید می‌شوند تقریباً به دما بستگی ندارد و بلورهای یخ نهاده شده به طور افقی از انتقال عمودی نیروی شناور جلوگیری می‌کند[٤]. بلورهای یخ، ضمن آن که می‌چرخند، صعود می‌کنند و

www.SID.ir

Archive of SID

گسترش می‌یابند و درون آمیختگی با ابر آبَرسرد باعث می‌شود 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 به دست آورند. بنابراین در این روش با استفاده از انرژی تغییر فاز اثرات بارورسازی در ابر آبَرسرد بهینه می شوند [5].

در این مقاله ضمن معرفی و ارائه مفاهیم نظری مرتبط با موضوع مه، فنآوری بارورسازی در خصوص بکارگیری امکان‌سنجی ابرها در ایران، با هدف مه‌زدایی و کاهش خسارات ناشی از آن به همراه نتایج آزمایشهای میدانی با استفاده از روش پروفسور فوکوتا مورد مطالعه قرار گرفته است.

۲. اصول مفاهیم فیزیکی مه زدایی با استفاده از فنآوری بارور سازی ابرها

الف – ساختار فیزیکی مه

با وجود این که تحقیقات بسیاری در طول سه دهه اخیر در مورد پدیده مه انجام گرفته‌اند، اما میزان اطلاعات موجود در زمینه ساختار مه بسیار ناچیز است، این کمبودها ناشی از ابزارهای کافی و تا حدی به علت تغییرپذیری زیاد در خواص مه با توجه به نوع و طول عمر آن است. به طور کلی مه‌ها به دو دسته طبقه‌بندی می‌شوند:

۱- مه آبی ۲- مه یخی.

خواص فیزیکی این مه‌ها در جدول ۱ خلاصه گردیده اند [٦].

بیشتر مشاهده‌های انجام گرفته در مورد مه یخی در ناحیه عرضهای جغرافیایی واقع در آلاسکا به دست آمده اند که برای مثال می توان به پژوهشهای اتاک اشاره کرد [۳]. به طور کلی مه یخی بیشتر ناشی از تزریق بخار آب به داخل جو بوده است که به علت فعالیتهای بشری نظیر کاربرد وسایل و ابزار صنعتی گرمایی، وجود کارخانه‌ها، منفذهای رطوبتی هوا، سوختن روغن و زغال سنگ برای ایجاد گرما تولید می شود. غلظت، مقدار ورود و گنجایش آب جامد در ذرات مه یخی در مکانهای مختلف به درجه حرارت، رطوبت و مقدار رطوبت در آن مکان بستگی دارد.

مه را با توجه به نحوه شکل‌گیری آن طبقه‌بندی می‌کنند، برای شکل‌گیری مه هوای اشباع شده و وجود هسته‌های میعان ضروری‌اند. مه زمانی شکل می‌گیرد که هوا به نقطه اشباع خود و یا توسط سرمایش یا افزایش رطوبت به نقطه شبنم رسیده باشد. در جوجابه‌جایی‌های مختلف و ساز و کارهای سرمایش انجام می شوند. به طور کلی انواع مه‌ها برحسب نحوه تشکیل آن به شرح زیرند:

جدول ۱. خواص فیزیکی مه [٦]

پارامتر	مه آبی		مه یخی
قطر متوسط ذره (میکرون)	فرارفتی	تابشی	۸
	۲۰	۱۰	
محدوده اندازه ذره (میکرون)	۷-٦۵	۵-۳۵	۲-۳۰
محتوی آب (گرم بر متر مکعب)	۰/۱۷	۰/۱۱	۰/۱۰
چگالی ذرات (تعداد در سانتی‌متر مکعب)	٤۰	۲۰۰	۱۵۰
دید افقی (متر)	۳۰۰	۱۰۰	۲۰۰

۱- مه جبهه‌ای: هنگامی که مه توسط سرمایش محسوس هوا تشکیل می‌شود، به وجود می‌آید.

۲- مه فرارفتی: هنگامی که هوا در ناحیه‌ای دارای اختلاف دمایی باشد، ایجاد می شود.

۳- مه بخاری: هنگامی که هوای سرد از یک توده زمینی سرد در زمستان بر روی سطوح آب گرم اقیانوس‌ها، دریاچه‌ها و رودخانه‌ها جابجا شود، به وجود می‌آید.

٤- مه تابشی: زمانی که هوای ساکن و مرطوب در نزدیک زمین پایدار و راکد شده باشد، به وجود می‌آید.

۵- مه فراشیبی: زمانی که هوا هنگام صعود از تپه یا کوه به صورت بی دررو (آدیاباتیک) تا نقطه اشباع سرد شود، به وجود می‌آید.

ب – پراکنش مه با استفاده از فنآوری بارورسازی ابرها

تمام تلاش‌ها برای تعدیل مه، برای بهبود میدان دید در فرودگاه‌ها انجام می شوند. بهبود میدان دید در شاهراه‌ها یا خطوط کشتیرانی نیز دارای اهمیت است و تنها تفاوت آنها میزان مساحتی است که باید میدان دید آن بهبود یابد، اما در واقع به عملیات هوایی بیشتر توجه می‌شود. در عملیات پراکندگی مه، شرایط

www.SID.ir

Archive of SID

وجود باد به ویژه تغییرات سرعت و جهت آن، عوامل بسیار مهمی هستند.

سرعت باد نه تنها عامل تعیین کنندهٔ سرعت پاکسازی یا ماندگاری است، بلکه تعیین نوع تجهیزات مورد نیاز برای مه‌زدایی نیز به آن بستگی دارد. مه هرگز در هوای کاملاً آرام پدیدار نمی‌شود و عمدتاً با سرعت بادی حدود ۱ تا ۲۰ متر بر ساعت همراه خواهد بود [۷]. وسعت و زمان لازم برای پراکنش مه با هر روشی که صورت گیرد به مقدار زیادی به شدت آشفتگی در لایه مه بستگی دارند. یکی از روشهای بسیار مهم برای پراکنش مه آبَرسرد استفاده از فنآوری بارورسازی ابرها است. تعدیل مه آبَرسرد یا ابرهای استراتوس از همه پدیده‌های آب و هوایی ساده‌تر است. دلیل این سادگی نسبی در حقیقت ناپایداری ترمودینامیکی آن است.

از آنجا که مه همان ابر نزدیک به سطح زمین است، بنابراین فرایند بارورسازی آن مشابه بارورسازی ابر است و ساز و کار تعدیل مه مشابه ابر است. بارورسازی مه توسط هسته‌های میعان بزرگ امکان‌پذیر است، اما چون مقدار مواد مورد نیاز زیاد است، این روش به ندرت عملی است. یدیدنقره و یخ خشک به منظور تحریک مه که دمای قله آن زیر ۵°C- است، به کار برده می‌شوند. هدف از این نوع بارورسازی افزایش تعداد ذرات یخ در قسمت‌های آبَرسرد مه است. احاطه شدن بلورهای یخ توسط قطرات آبَرسرد، سبب رشد سریع بلورهای یخ شده و برخی از آنها به اندازه ذرات قابل نزول در سطح زمین می‌شوند. اگر ذرات یخ، طی ریزش از دمای بیشتر از °C صفر عبور کنند، ذوب شده و به شکل قطرهٔ باران فرو می‌ریزند.

اگر شرایط مناسب باشد، به طور مثال مه می‌تواند تحریک شود تا بیشتر رشد کرده و دوام طولانی‌تری یابد. وارد کردن یدیدنقره یا یخ خشک به قسمت‌های آبَرسرد یک مه، سبب انجماد قطرات می‌شود. در اثر انجماد، گرمای نهان انجماد به مقدار زیادی آزاد شده، گرمای آزاد شده، شناوری مه را بیشتر کرده و سبب می‌شود مه بیشتر رشد کند (بلندتر یا عریض‌تر). به منظور بررسی اثرات دینامیکی، بارورسازی اغلب توسط پره‌های آزاد شده پیروتکنیک پرتابی هواپیما شامل یدیدنقره از قله ابرهای هدف انجام می‌شود. زنجیرهٔ فرآیندهای فیزیکی بارش در ابرهای غیر بارورشده و همچنین ابرهای بارورشده در شکل ۱ نشان داده شده است [۸].

همان طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود در زنجیره ابر غیر بارورشده از طریق بذرپاشی از کف ابر ابتدا شاهد رشد ابر کومولوس و تشکیل تعداد بیشتری قطرات بزرگ هستیم، سپس قطرات بزرگ‌تر شده و ابر به حداکثر ارتفاع خود می‌رسد. در مدت ۳۰ دقیقه بلورهای یخ با استفاده از قطرکهای ابر رشد بیشتری می‌کند و ابر شروع به ریزش و ایجاد بارش ملایم می‌کند. در زنجیره ابر بارورشده نیز در دقایق اولیه شاهد آغاز رشد ابرکومولوس و تشکیل تعداد بیشتری قطرات بزرگ هستیم، پس از آن بذرپاشی از کف ابر شروع می‌شود و قطرات آبَرسرد منجمد و سپس گرمای نهان آزاد می‌گردد، ۳۰ دقیقه پس از آن در ابر رشد یافته مقدار آب بیشتر و بر مقدار بارش در سطح زمین افزوده می‌شود.

پخش مواد بارورساز نیز در ابر به طرق مختلفی صورت می‌گیرد که عبارتند از: بارورسازی از قله ابر، بارورسازی در درون ابر، بارورسازی از کف ابر، بارورسازی از زمین به هوا از طریق موشک و بارورسازی از طریق ژنراتور زمینی. روشهای مختلف پخش مواد بارورساز در ابر، درشکل ۲ نشان داده شده اند. بارورسازی مه آبَرسرد یا یک ابر استراتوس یکی از کاربردهای فناوری تعدیل آب و هوا است که تاثیرات آن به طور واضح و آشکار نشان داده می‌شوند. هواپیماهای سبک اغلب برای پرواز بالای مه فرستاده می‌شوند و قرص‌های یخ خشک را بر روی مه رها می‌کنند. در نتیجه بلورهای یخ رشد می‌کنند و طی ۱۰ الی ۱۵ دقیقه تبدیل به برف سبک شده و فرو می‌ریزند. بارش برف وضوح موقتی ایجاد می‌کند که این وضوح می‌تواند روی باند فرودگاه تأثیر بگذارد.

شکل ۳ شکاف بزرگ ایجاد شده در ابر استراتوس در اثر بارورسازی با استفاده از یخ خشک در پروژهٔ Cirrus را نشان می‌دهد [۹]فنآوری بارورسازی ابرها در عملیات پراکندگی مه آبَرسرد از دهه ۱۹۵۰ در دسترس بوده است. این برنامه‌ها تا سال ۱۹۶۰ قابلیت بهره‌برداری عملیاتی در فرودگاه‌ها را نداشتند.

در حال حاضر به طور عمده روشهای بارورسازی مه عبارتند از :

۱- بارورسازی توسط یخ خشک،

۲- بارورسازی توسط پروپان مایع،

۳- بارورسازی توسط ازت مایع،

٤- بارورسازی توسط دی‌اکسید کربن مایع.

در یکی از روش‌های بذرپاشی افقی در تراز پایین مه آبَرسرد با استفاده از دی‌اکسید کربن مایع (LC) که توسط پروفسور نوریهیکو فوکوتا از دانشگاه یوتا معرفی شده است [4]، مشکلات دیگر روشهای بذرپاشی قابل حل هستند. در این روش فرض بر این است که بلور یخ در مسیر بذرپاشی شکل استوانه‌های دوتایی

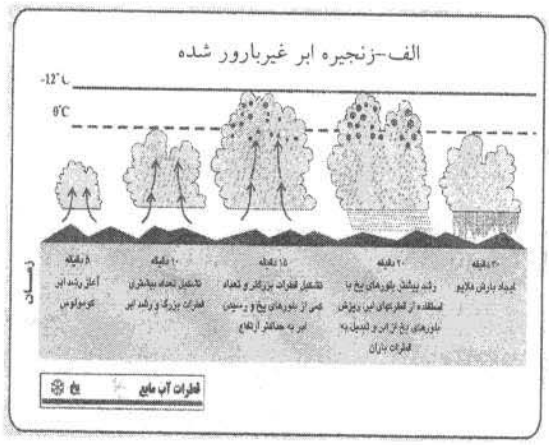
www.SID.ir

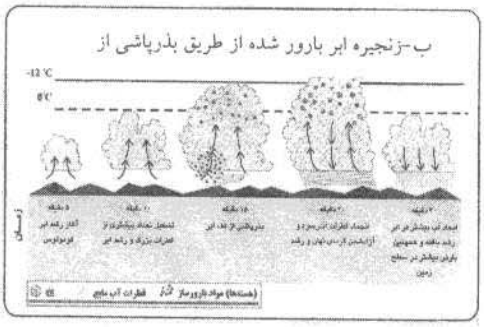
Archive of SID

را می‌گیرد و همچنین فرض شده که حجم بلور یخ با زاویه نیم قائم ۱۵ درجه که منطبق بر نتایج میدانی است منبسط می‌شود و همراه با درون آمیختگی با مه آبَرسرد و در اثر رها شدن گرمای نهان صعود می‌کند [4].

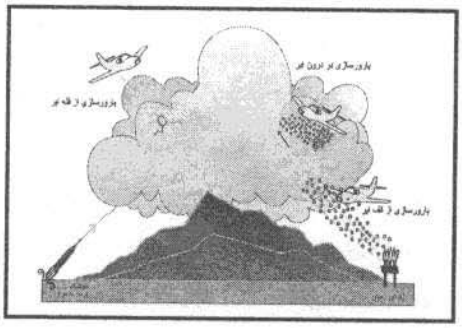
برای بهینه کردن زمان واکنش با مه آبَرسرد بلورهای بذرپاشی شده در تراز پایین مه آبَرسرد دقیقاً بالای ایزوترم صفر درجه تولید می‌شود، سپس اثر دینامیکی بذرپاشی، حرکت آهسته و بزرگی ایجاد می‌کند که هوای مرطوب لایه زیرین را افزایش می دهد و حجم مه را زیاد می کند، بنابراین باعث بهره‌گیری مؤثر از انرژی ایجاد شده در تغییر فاز می‌شود[10,11].

با استفاده از این روش، دی‌اکسیدکربن مایع مستقیماً به درون ابرهای استراتوس آبَرسرد در منطقه گریت سالت لیک[1] تزریق شد که این منجر به یک اثر اپتیکی به نام آندرسان[2] گردید و سپس ابر در مساحتی به پهنای یک کیلومتر به طور کامل محو شید.

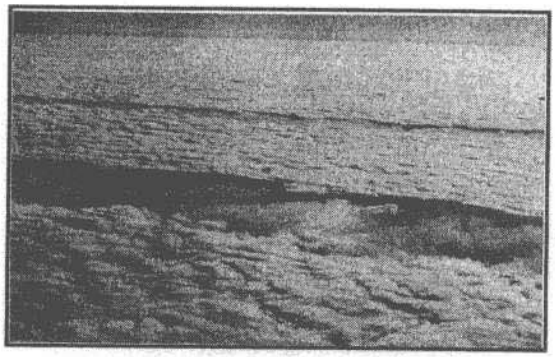




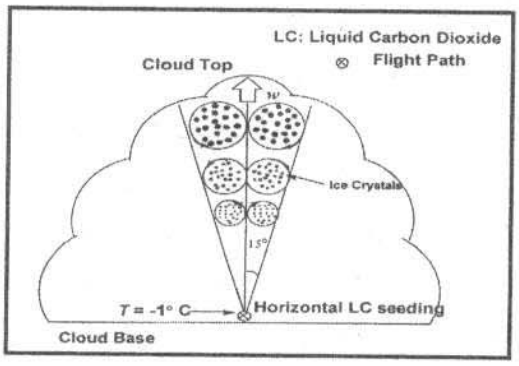
شکل ۱. زنجیره فرآیندهای بارش در ابر غیر بارورشده و ابر بارورشده از طریق بذرپاشی از کف ابر [۸] .



شکل ۲. روشهای مختلف پخش مواد بارورساز در ابر[۸].



شکل ۳ . شکاف بزرگ مستطیلی در میان ابر استراتوس که در اثر استفاده از یخ خشک با نرخ ۱kg/km ایجاد شده است. چنین شکافهایی کمتر از یک ساعت ایجاد شده و پهنای آن‌ها حداقل به ۲km می‌رسد (پروژهٔ Cirrus) [9]



شکل ٤. حرکت بلور یخ در ابر آبَـرسرد[10].

1 -Great Salt Lake
2 -Under sun

www.SID.ir

Archive of SID

ج . مدل عددی بارورسازی ابر آبَرسرد با استفاده از دی اکسید کربن مایع

همان طور که در بخش های قبل اشاره شد فوکوتا در سال ۱۹۹۹ اساس فیزیکی استفاده از انرژی تغییر فاز به منظور بهینه‌سازی اثرات بارورسازی ابر آبَرسرد با استفاده از دی‌اکسید کربن مایع را ارائه کرد. به این ترتیب که اساس فرایندهای خردفیزیکی بارورسازی، بر هم‌کنش‌های خردفیزیکی - دینامیکی، بهینه‌سازی بارورسازی و روش مدل‌سازی عددی بارورسازی ارائه شده و نشان داده شد که روش تزریق به صورت افقی در تراز پایین ابر آبَرسرد با استفاده از انرژی تغییر فاز اثرات بارورسازی ابر، ابر آبَرسرد را بهینه می‌سازد [12].

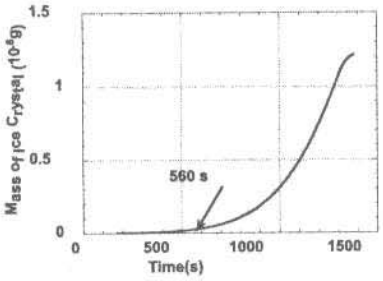
در این بخش اشارهٔ مختصری به شبیه‌سازی عددی بارورسازی ابر آبَرسرد می‌گردد. فرایند دینامیکی حرکت بلورهای یخ در ابر آبَرسرد پس از بذرپاشی اساساً مشابه حرکت ابر همرفتی بر اساس تئوری اسکورر است به طوری که سرعت قائم و مرکز بلورهای یخ مطابق تئوری حباب به صورت زیر محاسبه می‌گردد [۱۳].

$$w = c(gBR)^{1/2} \qquad (1)$$

$$B = \frac{T_\rho - T_e}{T_e} \qquad (2)$$

در معادلات فوق B فاکتور شناوری، T_P دمای یخ، T_e دمای ابر و R قطر استوانه است، c برابر $\frac{1}{2}$ فرض می‌شود که مطابق آزمایشهای تانک آب تقریباً ثابت است. در فرایند خردفیزیکی مدل رشد بلورهای یخ با استفاده از آب آبَرسرد مدل برژرون محاسبه گردیده است. مدل طراحی شده دو بعدی و وابسته به زمان است و مساحتی حدود ۲٤ کیلومتر مربع را می‌پوشاند.در این مدل فرض می‌شود که قبلاً ابر آبَرسرد تشکیل شده است و محتوی آب مایع ابر با ارتفاع ثابت است، هم‌چنین فرض می‌شود که بلورهای یخ دارای شکل کروی هستند.

نتایج اجرای مدل بارورسازی ابر آبَرسرد با استفاده از دی‌اکسیدکربن مایع در نزدیکی کف ابر نشان می‌دهد که آب آبَرسرد ابر در نتیجه رشد بلورهای یخ ایجاد شده در اثر تزریق دی‌اکسید کربن مایع به عنوان مادهٔ هسته‌ساز همگن، مصرف گردید و ابر گرم شده پس از مدتی از بین می‌رود. در نتیجه جرم بلورهای یخ پس از حدود ۱۵ دقیقه از بارورسازی مه‌ابر به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد [15 ،۱٤].



شکل ۵. جرم بلور یخ ایجاد شده دراثر بارورسازی با LC [۱۵،۱٤]

۳. تحقیق میدانی

۳-۱ گردآوری و تحلیل روزهای مه‌آلود در کشور

به منظور تحقیق میدانی برای پیرایش پدیده مخرب مه با استفاده از بارورسازی ابرها به روش دی‌اکسیدکربن مایع در ایران، ابتدا به جمع‌آوری آمار و اطلاعات آن پرداخته شد[٦،۱٦] .

اطلاعات روزهای مه‌آلود ایستگاه‌های مختلف کشور جمع‌آوری و به صورت نمودار میله‌ای رسم شد. به عنوان نمونه شکلهای ٦ الی ۹ معرف فراوانی روزهای مه‌آلود طی دورهٔ آماری ۱۹۹۹-۱۹٦۱ به ترتیب در مشهد، بجنورد، اردبیل و تهران هستند.

پهنه‌بندی میانگین روزهای مه‌آلود کشور به طور ماهانه طی دورهٔ آماری ۱۹۹۹-۱۹٦۱ انجام گردیده است، به طوری که به عنوان نمونه شکل‌های ۱۰ الی ۱۳ به ترتیب مربوط به ماههای ژانویه، فوریه، نوامبر و دسامبر هستند. بررسی نمودارهای روزهای مه‌آلود شهرهای کشور نشان می‌دهد که عمدتاً بیشترین میزان مه مربوط به مناطق کوهستانی کشور است و تقریباً در تمامی شهرها، ماههای ژانویه، فوریه، مارس، نوامبر و دسامبر دارای بیشترین روزهای مه‌آلود هستند. تحلیل نقشه‌های نواحی مختلف کشور نیز نشان می‌دهد که میانگین روزهای مه‌آلود کشور بیشتر مربوط به ناحیه شمال غرب و غرب کشور یعنی همان نواحی کوهستانی است.

www.SID.ir

Archive of SID

۳-۲ تحقیقات عملیات میدانی مه‌زدایی در ایران

بر اساس مستندات موجود هیچگونه سابقه مدون از آزمایش مه‌زدایی در کشور ایران گزارش نشده است، بنابراین می‌توان گفت که این تحقیقات اولین گروه آزمایشهای میدانی مربوط به مه‌زدایی هستند.

با توجه به نتایج علمی پروژه‌های موفق و معتبر در کشورهای مختلف، بذرپاشی با استفاده از دی‌اکسید کربن مایع به روش ژنراتور متحرک [٤] یا به عبارتی دیگر مطالعات میدانی با نصب سیلندرهای حاوی دی اکسید کربن مایع بر روی یک خودرو و حرکت آن با سرعت بسیار کم انجام شده اند.

برای اعتبار بخشی به نتایج تحقیقات و کسب اطمینان بیشتر از صحت این نتایج آزمایشهای مربوطه در سه منطقه متفاوت انجام شده‌اند. این مناطق شامل گدوک (در فیروزکوه)، نمین (در اردبیل)، گردنهٔ بدرانلو (در بجنورد) بودند [٦]. در ادامه این بخش شرح انجام هر یک از آزمایشهای میدانی و نتایج حاصله ارایه می‌گردند.

الف- منطقه گدوک (فیروزکوه)

منطقه گدوک ۱۰ کیلومتر بعد از شهر فیروزکوه به طرف شمال قبل از گردنه که ۱۲ مایل تا فیروزکوه فاصله دارد قرار گرفته است. در شکل ١٤ موقعیت این منطقه نشان داده شده است.

طول جغرافیایی منطقه ´۱۹ و°۵۲ و عرض جغرافیایی آن ´۳۷و°۳۵ است.

دلایل انتخاب این منطقه برای آزمون میدانی عبارتند از:

۱- در گردنه گدوک اختلاف دما در روز و شب کم است،

۲- نزدیکی آن به ایستگاه فیروزکوه،

۳- در فصلی که برای آزمون میدانی انتخاب شده بود گردنه گدوک از مه‌خیزترین نقاط منطقه است،

٤- نزدیکی این گردنه به تهران.

انجام عملیات آزمون میدانی در این منطقه ساعت ۱۵:۷ دقیقه روز ۸۲/۱۲/٤ صورت گرفت.

عملیات بذرپاشی در جاده فیروزکوه با شیب ملایم، بر روی کف جاده گردنه به طوری که عبور و مرور در کف دره قابل رؤیت نبود به طول یک کیلومتر به صورت سیار با سرعت ۱۵-۱۰ کیلومتر در ساعت انجام گردید.

سرعت خروجی گاز حدود ۲۵ g/s و ارتفاع خروجی گاز از کف زمین در حدود ٤ متر صورت گرفت. مشاهده‌ها ۱۵ دقیقه پس از عملیات بذرپاشی به ترتیب زیر بودند:

۱- دانه‌های یخی برفی با چشم غیر مسلح به وضوح شروع به ریزش کردند و دانه‌های ریز منجمد شده قابل دیدن بودند.

۲- دید افقی از ۲۰ متر به ٤۰۰ متر رسید.

۳- با وجود سردی هوا گرمایی بر روی پوست احساس می‌گردید که ناشی از فرایند آزاد شدن گرمای نهان به هنگام عملیات بذرپاشی بود.

در ساعت ۷:۳۰ در کنار پرتگاه جاده، کپسول ۷ کیلوئی گاز را به صورت ایستگاه زمینی ثابت قرار دادیم، شیر گاز را باز کرده و عملیات بذرپاشی را انجام دادیم. ساعت ۷:۵۰ کپسول کاملاً تخلیه شد و در این هنگام ذرات برفی در پایین پرتگاه شروع به ریزش نمودند. در همین زمان عبور و مرور اتومبیل‌ها در کف دره مشخص گردید و مه به تدریج رقیق و رقیق‌تر و تقریباً برطرف گردید.

در نتیجهٔ این آزمون میدانی به نظر می‌رسد که:

۱- در مکانهایی که دره وجود داشته و مه کاملاً دره را پوشانده باشد، قراردادن ایستگاه ثابت زمینی مفیدتر خواهد بود و شاید بتوان گفت که عمل بارورسازی در بالای دره (بالای ابر) به وسیله هواپیما هم می‌تواند مفید واقع شود، آزمایش فوق (کپسول ثابت) این موضوع را کاملاً اثبات می‌کند.

۲- در مناطق مسطح مانند کف باند فرودگاهها و جاده‌های بدون شیب، عملیات ایستگاههای سیار بسیار مفید ند.

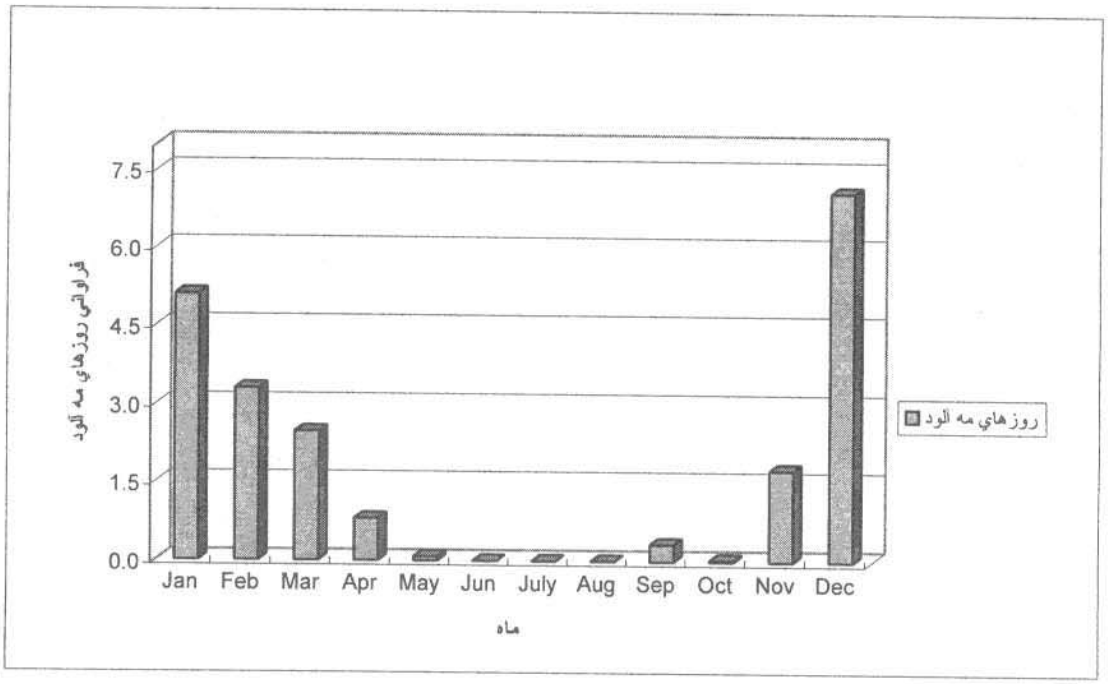
۳- عملیات آزمون میدانی فوق این نوید را دادند که در مه‌های مناطق سردخیز، بذرپاشی با دی اکسید کربن بسیار مناسب و مقرون به صرفه خواهد بود.

ب- منطقه نمین (اردبیل)

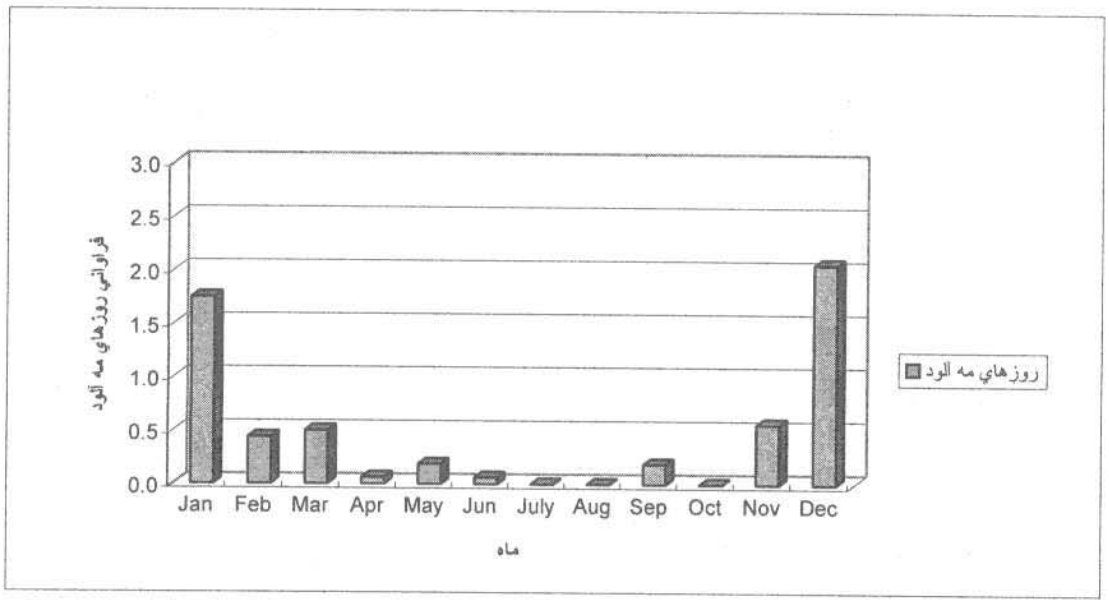
استان اردبیل با مساحت ۳۵۱٦/٦ کیلومتر مربع در طول جغرافیایی ´۱۵ و °٤۸ و عرض جغرافیایی ´۱۹ و °۳۸ دقیقه واقع شده است. در شکل ۱۵ موقعیت این منطقه نشان داده شده است. دلیل انتخاب استان اردبیل برای انجام دومین آزمایش آزمون میدانی این بود که این استان یکی از مه‌خیزترین شهرهای ایران است و همان طور که در نمودار روزهای مه‌آلود شهرستان اردبیل مشاهده می‌شود، در تمام فصول سال مه را می‌توان در این شهرستان مشاهده کرد و دیگر این که این شهرستان دارای آب و هوای نسبتاً معتدلی است. اختلاف بیشینه و کمینه درجه حرارت کم و یکی از پایگاههای هوانیروز در حاشیه فرودگاه این شهرستان قرار گرفته است.

www.SID.ir

Archive of SID



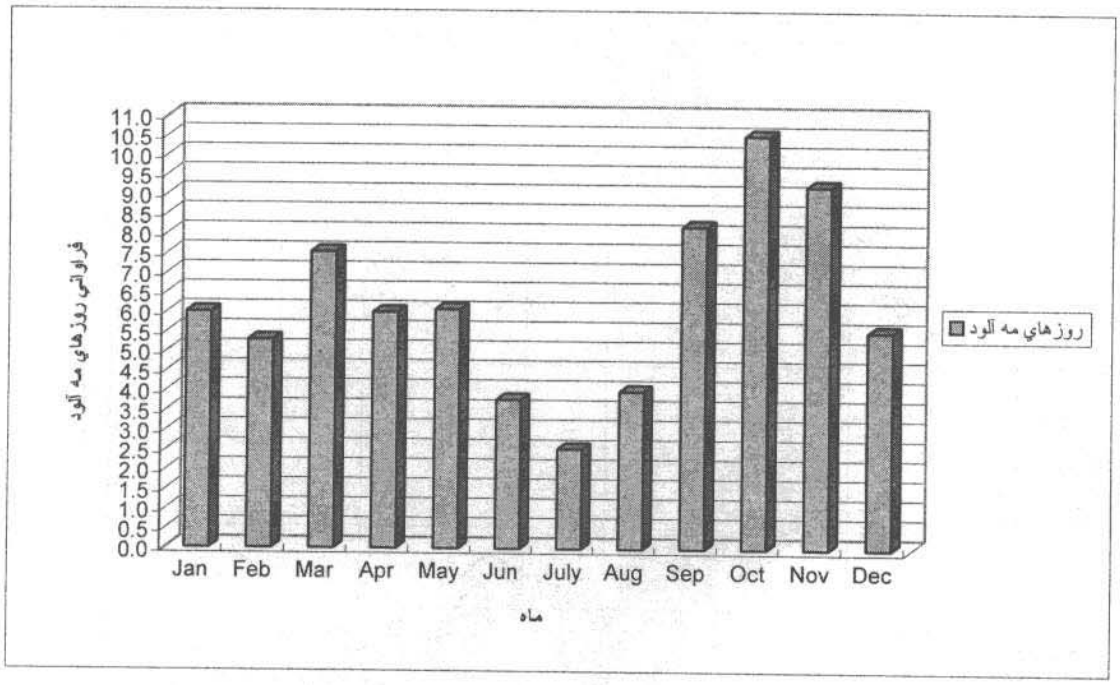
شکل ٦ . فراوانی روزهای مه‌آلود ایستگاه مشهد (۱۹۹۹ – ۱۹٦۱).



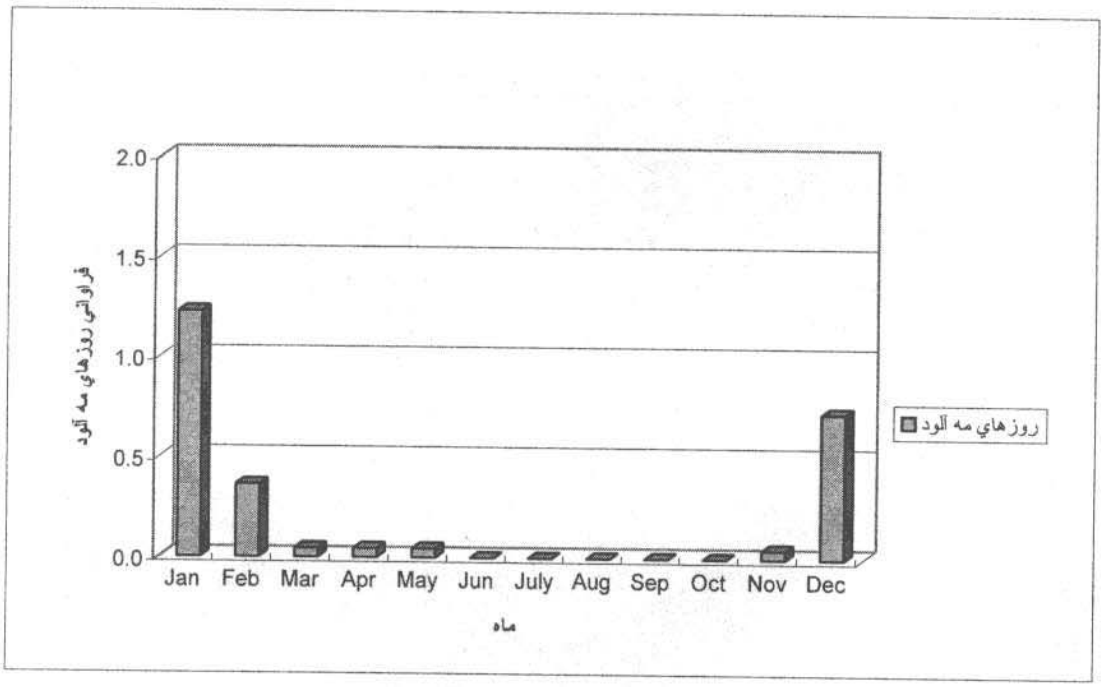
شکل ۷. فراوانی روزهای مه‌آلود ایستگاه بجنورد (۱۹۹۹-۱۹٦۱).

www.SID.ir

Archive of SID



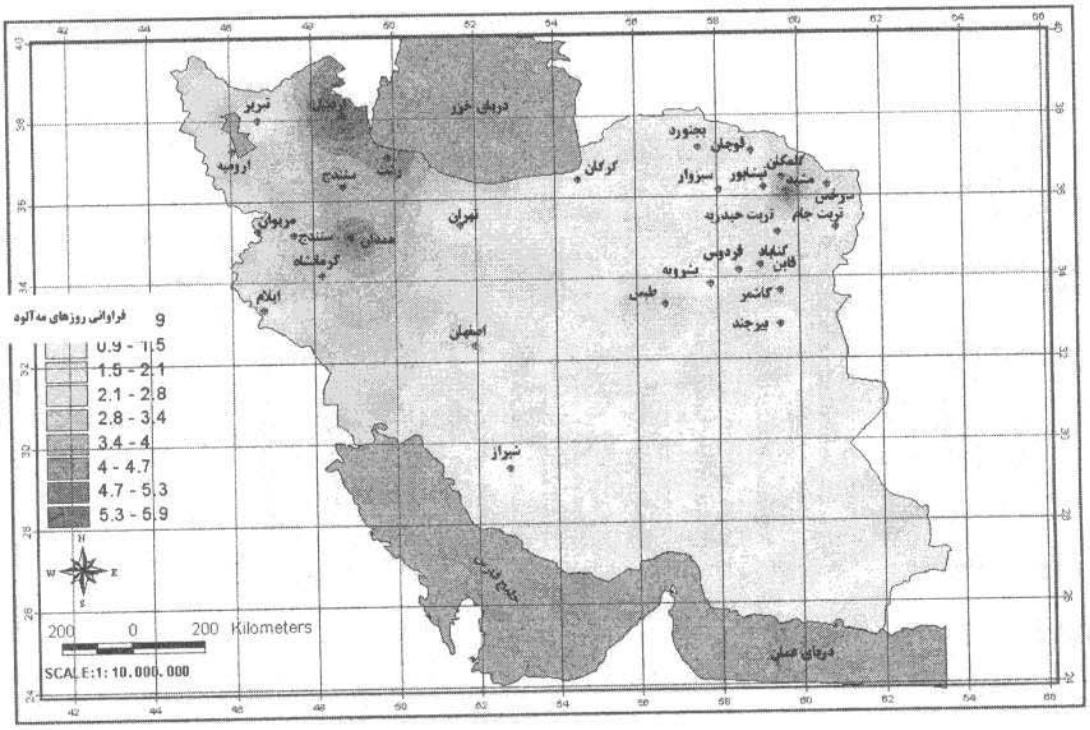
شکل ۸ . فراوانی روزهای مه‌آلود ایستگاه اردبیل (۱۹۹۹-۱۹۶۱)



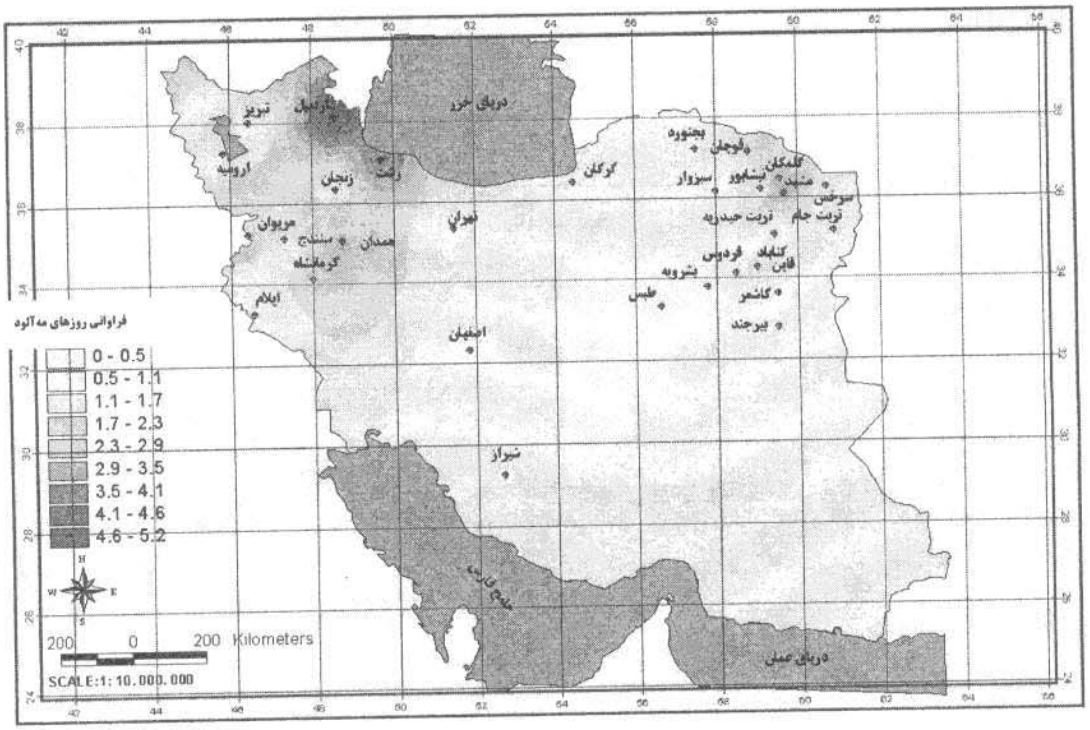
شکل ۹. فراوانی روزهای مه‌آلود ایستگاه تهران (۱۹۹۹-۱۹۶۱)

www.SID.ir

Archive of SID



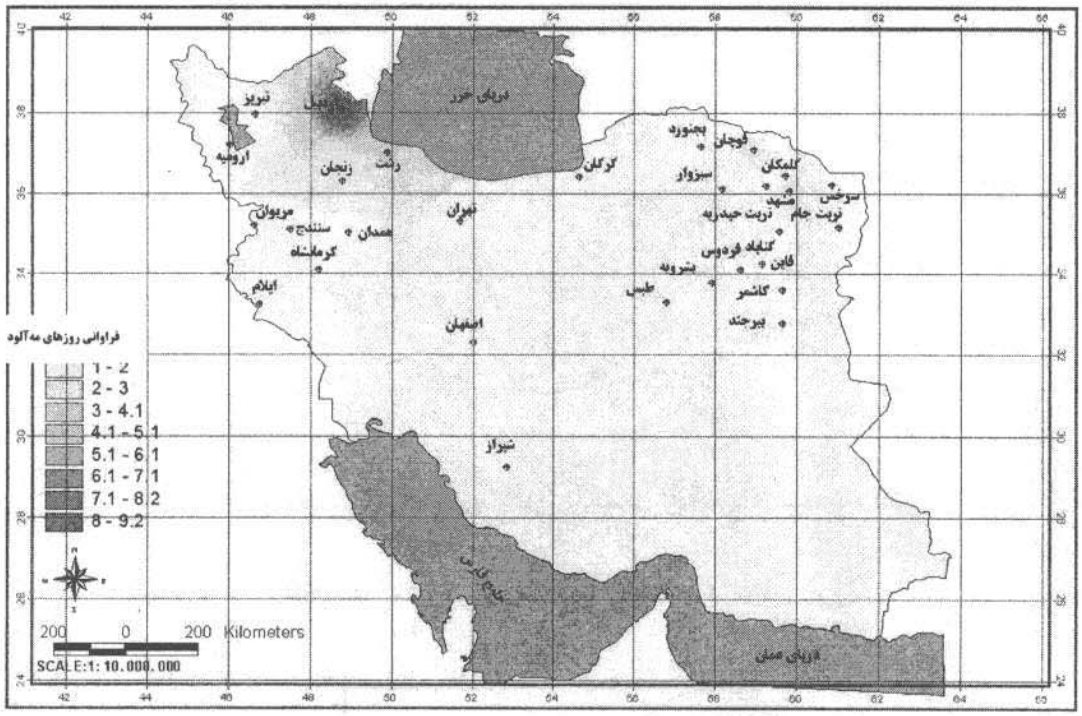
شکل ۱۰. فراوانی روزهای مه‌آلود کشور در ماه ژانویه (۱۹۹۹-۱۹۶۱).



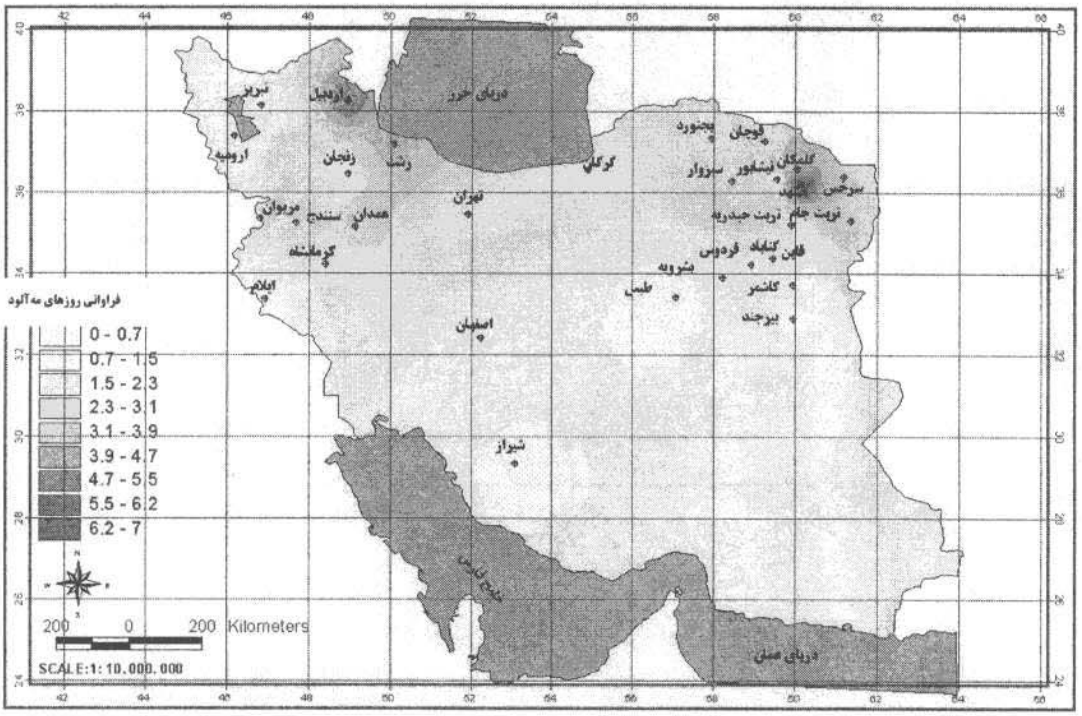
شکل ۱۱. فراوانی روزهای مه‌آلود کشور در ماه فوریه (۱۹۹۹-۱۹۶۱)

www.SID.ir

Archive of SID



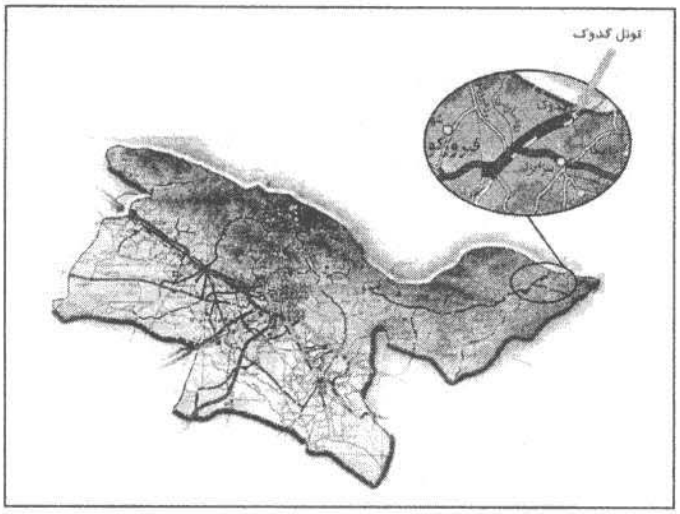
شکل ۱۲. فراوانی روزهای مه‌آلود کشور در ماه نوامبر (۱۹۹۹-۱۹۶۱)



شکل ۱۳. فراوانی روزهای مه‌آلود کشور در ماه دسامبر (۱۹۹۹-۱۹۶۱)

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۱۴. نقشه استان تهران و موقعیت فیروزکوه – گدوک

شکل ۱۵. نقشه شهرستان اردبیل

انجام عملیات بذرپاشی ساعت ۶:۱۵روز ۸۲/۱۰/۱۰ در این منطقه صورت گرفت. قبل از عملیات بذرپاشی در نور اتومبیل سیّار عملیاتی، از ذرات معلق در پدیده مه فیلم ویدئویی تهیه گردید. ذرات بسیار ریز معلق در هوا در نور مشخص بودند.

در ساعت ۶:۴۰ از ذرات معلق در پدیده نیز فیلم تهیه شد. مشاهدات عینی نمایانگر ذرات درشت منجمد شدهٔ در حال ریزش به زمین بودند،

دید افقی به ۲۰۰ متر رسید.

در ساعت ۶:۴۵ ریزش ذرات منجمد شده در نور چراغ حتی با چشم غیر مسلح قابل رؤیت بودند.

در ساعت ۷ نیز منطقه بذرپاشی شده کاملاً صاف و سمت راست جاده عاری از مه شد. بر اساس تئوری دی‌اکسید کربن مایع (LC) و نتایج قابل انتظار از مدلهای رقومی، این آزمایش بر اهمیت قابل توجه LC در شرایط مه اَبَرسرد تأیید و تأکید دارد. بر اساس

www.SID.ir

Archive of SID

یافته‌های فوق در اثر عملیات بذرپاشی بار دیگر اهمیت LC به عنوان مناسب‌ترین مادهٔ بارورساز برای پیرایش مه اَبَـرسرد [۱۷] تایید شد.

ج- منطقهٔ بدرانلو (شهرستان بجنورد)

شهرستان بجنورد با مساحت ۱۷,۲٤٥ کیلومتر مربع در طول جغرافیایی ´۱۹ و °۵۷ و عرض جغرافیایی ´۲۸ و °۳۷ و منطقه بدرانلو در طول جغرافیایی ´٤ و °۵۷ و عرض جغرافیایی ´٤ و °۳۷ در شمال غربی استان خراسان واقع شده است. در شکل ۱٦ موقعیت این منطقه نشان داده شده است.

دلایل اُنتخاب شهرستان بجنورد- گردنه بدرانلو برای انجام سومین آزمایش میدانی عبارتند از:

۱- شهرستان بجنورد – بدارنلو در مسیر بازگشت گروه از استان اردبیل به مشهد قرار داشت،

۲- اکثر مواقع در گردنه بدرانلو به دلیل سرد شدن ناگهانی هوا در شب پدیده مه را شاهد هستیم،

۳- با توجه به بارندگی روز و صاف بودن آسمان در بعد از ظهر آن روز و رطوبت کافی به میزان ۹۸٪ مه آلود شدن در آن ناحیه به راحتی ممکن بود.

انجام عملیات آزمون میدانی در این منطقه ساعت ۲۰:۵۰ مورخ ۸۲/۱۰/۱٤ صورت گرفت. قبل از عملیات بذرپاشی از ذرات شناور در پدیده مه فیلم‌برداری گردید، ذرات بسیار ریز و شناور بودند. پس از آن مرتباً از ذرات فیلم تهیه گردید و ما شاهد درشت‌تر شدن ذرات بودیم. در پایان عملیات بذرپاشی یعنی ساعت ۲۲:۳۰ فیلم ویدئویی تهیه گردید که نشان می‌داد ذرات منجمد درشت به سطح زمین ریزش نموده و هر لحظه بر غلظت مه افزوده و دید افقی کمتر می‌شد. همین امر باعث گردید که پس از هر عملیات بذرپاشی، مجدداً مه، منطقه بذرپاشی شده را بپوشاند.

کپسولها به دلیل خروج گاز، یخ زده و لولهٔ خروجی گاز که از جنس گالوانیزه بود، پوشیده از یخ گردید. مقدار خروجی گاز نیز به اندازه‌ای نبود که شفافیت جو را بهبود بخشد. دهانه خروجی گاز برای عملیات بذرپاشی در چنین پدیدهٔ غلیظی مناسب نبوده و باید برای خودرو گروه سیار، چارهٔ بهتری می اندیشیدیم تا خروجی گاز به مقدار معین و مورد نیاز انجام شده و عملیات بذرپاشی به صورت مداوم صورت گیرد، کپسول‌ها و لولهٔ خروجی گاز نیز باید عایق‌بندی می‌شد تا از یخ زدن کپسولها و تجهیزات جلوگیری به عمل می‌آمد. نتایج عملیات بذرپاشی با اساس تئوری بذرپاشی LC مطابقت داشت، توزیع اندازه ذرات یخ در زمانی حدود ۳۰ الی ٤۵ دقیقه پس از عملیات بذرپاشی توسط چشم غیر مسلح در مسیر نور پروژکتور مشاهده گردید که حدوداً ۱۰ برابر بزرگ‌تر شده و دانه های درشت ذرات یخی به مقدار زیاد ریزش نمودند . نتیجه آزمایش میدانی پیرایش مه اَبَرسرد با استفاده از LC در گردنه بدرانلو تا حدود زیادی موفقیت آمیز بود [٦].

٤. نتیجه‌گیری

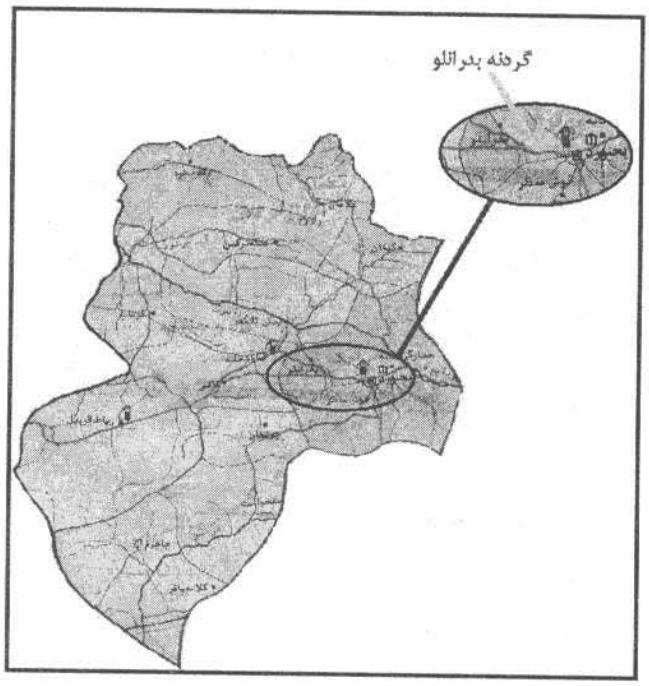
نتایج این پروژهٔ مطالعاتی مؤید این واقعیتند که روشهای موفق بارورسازی ابرها می‌توانند برای پراکنش مه و شفاف‌سازی جو به کار گرفته شوند.

در این تحقیق روشهای مختلف رفع مه بررسی شدند که با توجه به موقعیت طبیعی کشور و اقلیم‌های متفاوت آن و همچنین گستردگی طول و عرض جغرافیایی، بهترین، موفق‌ترین و همچنین کم‌هزینه‌ترین آن بذرپاشی با LC است که برای مه‌زدایی در مناطق سردسیر (دمای زیر صفر) انتخاب گردید. مشاهدات آزمون میدانی این تحقیق نشانگر این واقعیت است که پس از حدود ۳۰ دقیقه از زمان اولین بذرپاشی دی‌اکسیدکربن مایع در منطقه مه‌آلود، ذرات یخی ایجاد شده ناشی از تزریق LC درون مه، درشت‌تر شده و به اندازه حدود ۱۰ برابر ذرات محیط جو بدون بارورسازی رسید. حرکت شناور این دانه‌های یخی به صورت بارش ذرات یخ به سوی سرازیر تبدیل شد.

طبق نظریه مفاهیم فیزیکی بارورسازی ابرها و همچنین مدل‌های رقومی فرآیندهای خرد فیزیکی و دینامیکی مربوطه، این چنین نتیجه تجربی بهترین وضعیت برای یک عملیات بذرپاشی موفق بود [۱۷ و٤] . شایان ذکر است که نتایج این تحقیق می‌تواند به عنوان پایه و راهگشای پروژه‌های کاربردی مه‌زدایی در بخشهای مختلف نظامی و غیرنظامی مورد توجه قرار گیرد.

www.SID.ir

Archive of SID



شکل :١٦نقشه شهرستان بجنورد (گردنه بدرانلو)

مراجع

1.Houghton, H.G. and W.H. Radford(1938) "On the local dissipation of natural fog. I. on the possibility of fog dissipation", Papers Phys., Oceanosr , Meteorol.,. 6 (3).13-26.

2. Schaefer, V.J. (1946) "The production of ice crystals in a cloud of super cooled water droplets", Nature , 104 ,No.2707 , 457-459.

3. Ohtake, T. (1970) "Studies on ice fog, Final Report on National Center for Air Pollution Control", Public Health Service Contract No. AP-00449, University of Alaska Report UAG R-211, Geophysical Institute, University of Alaska, Fairbanks, Alaska, P. 177.

4. Fukuta, N. (1996a) "Project mountain valley sunshine-progress in science and technology", J. .Appl. Meteor., 35,1483-1493.

5. Fukuta, N. (1996 b) "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.

٦. بداق جمالی،جواد [و همکاران] (١٣٨٢)" گزارش نهایی پروژه تحقیق و بررسی در مورد چگونگی مه زدایی در مناطق مه آلود به هنگام پرواز ارتفاع پایین بالگردهای هوانیروز "، پژوهشکده اقلیم شناسی، مشهد.

٧. جوانمرد، سهیلا [و همکاران]، (١٣٨١). "گزارش نهایی پروژهٔ مطالعات مرتبط با تعدیل مصنوعی آب و هوا" ،پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو.

٨. بداق‌جمالی، جواد و جوانمرد، سهیلا (١٣٨٢) "بروشور آموزشی مفاهیم مقدماتی تعدیل آب و هوا با استفاده از فن‌آوری بارورسازی ابرها"، پژوهشکدهٔ اقلیم‌شناسی، مشهد.

9. Schaefer V. J. (1948) "The formation of ice crystals the library and the atmosphere", Chem. Revs., 44, 291 – 320.

10. Fukuta N.(1998a) "Conceptual structure for optimal utilization of phase energy RETHIT-FILAS feed back seeding mechanism" . 14th

www.SID.ir

Archive of SID

Conf. on Planned and Inadvertent Wea. Mod. Everett , WA, 618 – 621.

11. 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.

12. Javanmard. S. BodaghJamali, J. (2002) "Numerical modeling for optimal utilization of phase change energy in ice thermal induced by cloud seeding, Proc. of 9th Regional Conf. of Fluid Dynamics, Esfehan Univ., Esfehan, I.R. of Iran.

13. Scorer. R. S. (1957) "Experiments of convection of isolated masses of buoyant fluid", J. Fluid Mech., 2, 583-596.

١٤. جوانمرد، سهیلا [و همکاران] (١٣٨٠). "شبیه‌سازی عددی حرکت بلور یخ در بارورسازی ابر همرفتی آبَر سرد با استفاده از دی‌اکسید کربن مایع". مجله نیوار، شماره (٤٣-٤٢)، صفحه ٧١.

15. Javanmard, S., Nishiyama,K., Fukuta, N. Wakimiza, K. and Suzuki, Y (1998) "Numerical modeling for roll-up expansion of twin horizontal ice crystal thermals in liquid carbon dioxide seeding." Proc. of 14th Conf. on Planned and Inadvertent Weath. Mod. Everret, WA., 622-625.

١٦. سالنامه هواشناسی، (٢٠٠٠)، انتشارات سازمان هواشناسی کشور.

17. Fukuta, N. (1998b) "Cloud seeding clears the air" , Physics World, 11, 25 – 26.

www.SID.ir