

آزمایش هسته‌های یخ‌ساز مورد استفاده در ایران برای بارورسازی ابرها (PV-26) و معرفی یک محفظه ابر

کیانوش کشاورزیان*

دکتری فیزیک، کارشناس پژوهشی مرکز ملی تحقیقات و مطالعات باروری ابرها، یزد، ایران

(دریافت: ۹۲/۴/۱۸، پذیرش نهایی: ۹۲/۱۱/۱۵)

چکیده

هدف از این تحقیق، عرضه نتایج آزمایش روی مواد مورد استفاده در باروری ابرها (پیروتکنیک‌های PV-26) و گزارش چگونگی عملکرد محفظه‌های ابر و هوامیز و همچنین معرفی این محفظه‌ها به منظور تحقیقات بیشتر است. تاثیر هسته‌های یخ‌ساز تولید شده با پیروپاترون‌های PV-26 - که در مرکز ملی تحقیقات و مطالعات باروری ابرها به صورت مواد بارورساز ابر مورد استفاده قرار می‌گیرد، روی ابر مصنوعی و در شرایط آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته است. این آزمایش‌ها نشان می‌دهد که این مواد، سرعت حد بلورهای یخ را به اندازه ۱۷٫۸٪ در برازش نمایی و ۲۲٪ در برازش خطی افزایش می‌دهند. همچنین، تصاویر واضح گرفته شده از بلورهای یخ با میکروسکوپ، نشان می‌دهد که اندازه این بلورها درون این محفظه در فشار آزمایشگاه، دمای حدود 15°C - و رطوبت کمتر از ۹۵٪ می‌تواند به ۲۰۰ میکرومتر برسد و این موضوع نشان می‌دهد که این محفظه برای تحقیقات علمی کاربردی نیز مناسب است. بیش از ۵۴٪ بلورها، بزرگ‌تر از ۲۰ میکرون هستند و در دسته‌بندی ماگنون-لی جای می‌گیرند. اضافه بر آن، به منظور آزمایش حدود نهایی عملکرد محفظه‌ها (به خصوص محفظه ابر که پیچیده‌تر است) و همچنین توانایی محفظه ابر در تولید داده‌های معتبر، آزمایش‌های بسیاری صورت گرفته و در حال اجرا است. نتایج این آزمایش‌ها نشان می‌دهد که گرادیان دما در محفظه ابر که دارای چهار حس گر دما، یک حس گر رطوبت و یک حس گر فشار است، در محدوده مجاز قرار دارد و شرایط آزمایشگاهی مناسبی برای این گونه تحقیقات فراهم می‌کند.

واژه‌های کلیدی: محفظه ابر، محفظه هوامیز، نمودارهای رشد، هسته‌های یخ‌ساز، سرعت حد

The tests of IN seeding materials used in Iran for cloud seeding (PV-26) and introduction of a cloud chamber

Keshavarzian, K.¹

¹Ph.D. in Physics, Research Staff of National Research Center for Cloud Seeding, Yazd, Iran

(Received: 09 Jul 2013, Accepted: 04 Feb 2014)

Summary

The aim of this research is to report the results of testing of the PV-26 pyro-techniques materials and to report the operating conditions of a cloud and an aerosol chambers and also to introduce and describe these chambers of National Research Center of Cloud Seeding in Iran for further researches. The effect of ice nuclei produced by PV-26 pyro-techniques on artificial clouds has been surveyed under laboratory conditions. These tests show that this materials cause of increase the terminal velocities of ice crystals by 17.8% using an exponential fit, and by 22% using a linear fit. Also having captured using a microscope, the vivid photographs of ice crystals which, in the temperature -15°C and

the relative humidity less than 95%, had grown to the size of about 200 μm , prove the reliability of the cloud chamber for scientific research. More than 54% of crystals have been greater than 20 microns and fit well in Magono-Lee classification.

Numerous tests have been performed to examine the toleration of chambers (especially, the more complicated one, cloud chamber) in extreme conditions and also to examine the capability of cloud chamber to produce reliable data. The results of these tests show that the gradient of the temperature in cloud chamber which is equipped with four temperature, one humidity and one pressure sensor, has a reasonable span. These testes are still being carried out.

In case of cloud chamber, the temperature could be varied from temperature of the environment to -30°C , the pressure, from pressure of environment to 700 hPa below that, and the humidity, from humidity of environment to the maximum value that environmental conditions allow. Both of the chambers have centrifugal pump and filters to clean their internal air from background aerosols. The cloud chamber has an extra pump to keep the inside pressure at the desired value (Langsdorf, 1939; Donnan & wright, 1969). This chamber also has four thermometers to control the chiller compressors and monitor the gradient of the temperature.

At the present, the laboratory is equipped with two separate measurement tools. One of them consist a (Helium-Neon) laser and a digital detector for visible light which measures the intensity of the laser beam (Wagner et al., 2009). This system works like a turbidimeter and measures the transparency inside the cloud chamber. Having had a greater terminal velocity, bigger ice crystals precipitate faster and leave the internal space of cloud chamber for laser beam to pass (Heymsfield 1972, Heymsfield & Kajikawa 1987). When all other quantities are constant, the time interval in which the clarity of the cloud returns to the value corresponding to empty chamber, could be a criterion of the size of ice crystals (Wagner et al., 2006).

The other measurement system consists of an optical microscope and a special chemical gel to inscribe the shape of the crystals. The number of crystals and their shapes could be varied with respect to the physical circumstances like temperature, pressure, the number and type of the aerosols, etc (Mitchell et al., 1990). Although we know the ingredients of this gel, its suitable usage seems to be hard to achieve and there are still difficulties to make it practical. I will give more details in section 5. According to the Magono-Lee classification of natural snow crystals (Magono and Chung 1966), in these experiments, *P1b*, *P1c*, *C1h* and *CP1c* made the major portion amongst other crystals.

Keywords: Cloud chamber, Aerosol chamber, Habit diagrams, Ice nuclei, Terminal velocity

۱ مقدمه

نامناسب می‌سازد. به‌طور کلی، گرادیان دما باید کمتر از 1°C m^{-1} باشد (استتزر و همکاران، ۲۰۰۸؛ روهوتر و همکاران، ۲۰۱۰).

ویژگی‌های محفظه‌ها در جدول ۱ آورده شده است (به‌منظور اطلاع یافتن از چگونگی دسته‌بندی محفظه‌ها، وبگاه www.EuroChamp.org را ببینید). هر دو محفظه، به‌منظور پاک‌سازی هوای درونشان از هوا میزهای

برای محفظه‌هایی که قابلیت کارکرد در دماهای کمتر از 0°C را نیز دارند مهم‌ترین شناسه، گرادیان دما است (لانگسدورف، ۱۹۳۹؛ ساودرا، ۱۹۵۸). افزایش افت و خیزهای دمایی در محفظه ابر، احتمال رخداد ابر اشباع را در نقاط سردتر افزایش می‌دهد و در نتیجه، چگالی تعداد بلورهای یخ در این نقاط به‌طور شدیدی افزایش پیدا می‌کند. این اثر، محفظه را برای آزمایش‌های علمی،

هکتوپاسکال کمتر از فشار محیط و رطوبت نسبی را از رطوبت نسبی محیط تا هر مقدار بیشینه‌ای که شرایط محیطی اجازه دهد تغییر داد. هر دو محفظه، که به شکل مکعب‌اند و هر کدام یک متر مکعب حجم دارند، دارای فیلترهای ویژه به منظور پاک‌سازی هوای درونی آنها از هوامیزهای پس‌زمینه هستند. نحوه کنترل موتورها و کمپرسورها، PLC (Programmable Logic Controller) است که فرمان‌های آن با یک سامانه HMI (Human-Machine Interface) تامین می‌شود. داده‌های چهار حس گر دما، یک حس گر رطوبت و یک حس گر فشار به صورت دیجیتال است و علاوه بر قابلیت نمایش به صورت جدول و نمودار روی HMI، می‌توان آنها را به منظور استفاده در نرم‌افزارهای آماری، به یک حافظه قابل حمل جانبی نیز منتقل کرد. همچنین سامانه HMI به ما اجازه می‌دهد که محفظه‌ها را از راه دور و با استفاده از شبکه اینترنت کنترل کنیم و یا حتی آن را به منظور اجرای خودکار مجموعه آزمایش‌های از پیش تعیین شده، برنامه‌ریزی کنیم.

پس‌زمینه، به پمپ‌های گریز از مرکز (Centrifugal) و فیلتر مجهز هستند. محفظه ابر، به منظور نگه داشتن فشار درونی آن در مقدار دلخواه، دارای یک پمپ اضافی نیز هست (لانگسورف، ۱۹۳۹؛ دونان و رایت، ۱۹۶۹). این محفظه، همچنین، دارای سه حس گر دما واقع روی دیواره عقبی (راست-بالا، میانی و چپ-پایین) است که هر کدام با یکدیگر 0.5 m فاصله دارند، و همچنین یک حس گر روی دیواره جانبی واقع در جلو و نزدیک در واقع است که از حس گر راست-بالا و چپ-پایین، 1.5 m و از حس گر میانی، 1.1 m فاصله دارد. علاوه بر کنترل کمپرسورهای سردساز، این چهار حس گر، گرادیان دمای درون محفظه را نیز پایش می‌کنند. همان‌طور که در بخش ۲ توضیح داده خواهد شد، آزمایش‌ها نشان می‌دهند که گرادیان دمای داخل محفظه در محدوده معتبر قرار دارد و فقط در لحظه تزریق بخار گرم، کمی از مقدار مجاز منحرف می‌شود و مجدداً به محدوده مجاز باز می‌گردد. در مورد محفظه ابر، دما را می‌توان از دمای محیط تا ۳۰- درجه سلسیوس، فشار را از فشار محیط تا ۷۰۰



شکل ۱. تصاویری از محفظه ابر و محفظه هوامیز و محل حسگرها.

جدول ۱. مشخصات محفظه‌های ابر و هوامیز.

محفظة ابر	محفظة هواميز	
cubic	cubic	شکل
$1 m^3$	$1 m^3$	حجم
$1 m^3 / 6 m^2$	n/a	نسبت حجم به سطح
stainless steel 304	flame proof PVC	جنس دیواره
+30 ~ - 30 °C	n/a	محدوده دما
0 ~ 100 %	n/a	محدوده رطوبت
300 ~ 1000 hpa	n/a	محدوده فشار
0.12 μm , 99.9 %	0.12 μm , 99.9 %	نوع فیلتر
hot and cold	n/a	نوع رطوبت
yes	no	سیستم جمع‌آوری داده

مرز قطرک‌ها و یا مرز حباب‌های هوای موجود در قطرک‌ها موجب تبخیر محیط پراکننده می‌شوند (بارراس و همکاران، ۲۰۰۲؛ کریفگانز و همکاران، ۲۰۰۴). به دلایل زیر از دستگاه بخار سرد استفاده نشده است:

الف) چون سرعت تولید بخار با استفاده از این دستگاه کم است، نمی‌توان در مدت‌زمان مناسب برای یک آزمایش، رطوبت بیش از ۱۰۰۰ لیتر هوا را به بیش ۹۰٪ رسانید. علت تجهیز شدن محفظه ابر به این دستگاه، استفاده از آن در آزمایش‌های مربوط به ابر گرم است. هنگامی که دمای محفظه بیش از صفر درجه سلسیوس است و رطوبت گرم تزریق شده است، تزریق بخار سرد سبب می‌شود که قطرک‌های ریز این بخار برای تبخیر، دما را از توده ابر گرم دریافت کنند و باعث یک کاهش جزئی اما سریع در دما (و در نتیجه افزایش در رطوبت نسبی) شوند. چون این مرکز هنوز برنامه‌ای برای تحقیق و یا عملیات بارورسازی روی ابرهای گرم ندارد، از این دستگاه استفاده نمی‌شود.

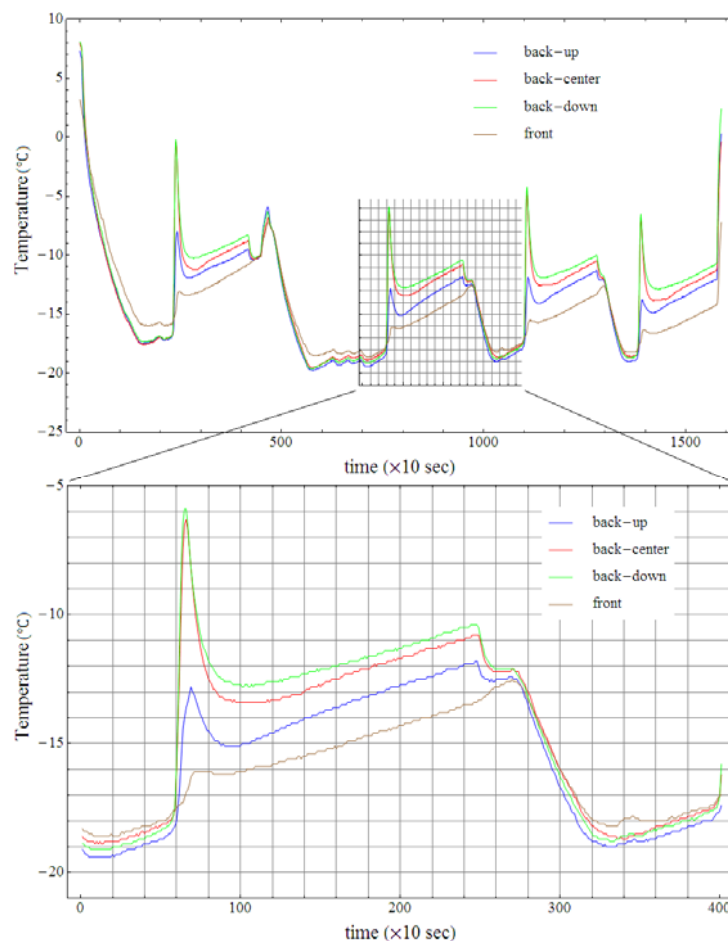
ب) به احتمال بسیار زیاد، طیف قطرک‌هایی که

محفظة ابر، به منظور تولید و تزریق بخار، دارای دو دستگاه مجزا است. یکی از آنها که آب را به کمک امواج فراصوتی تبخیر می‌کند، به بخار سرد معروف است و دیگری که بخار گرم نام دارد، آب را به روش معمول و با انتقال انرژی حرارتی به آن تبخیر می‌کند. در دستگاه اول، آب با امواج فراصوتی به قطرک‌های کوچک تبدیل می‌شود. از آنجا که نسبت سطح به حجم این قطرک‌های ریز (که تقریباً به شکل کره هستند) زیاد است و سرعت تبخیر آب با سطحی از آن که در تماس با ملکول‌های هوا است، متناسب است، به سرعت تبخیر می‌شوند. بعد از تولید، این قطرک‌ها برای تبخیر، حرارت را از هوای پیرامون خود دریافت می‌کنند و به همین علت دمای توده هوای حاوی آنها کاهش می‌یابد. دو نظریه وجود دارد که می‌گوید خود امواج فراصوتی نیز به تبخیر قطرک‌ها کمک می‌کنند. یکی از آنها بیان می‌دارد که امواج فراصوتی مستقیماً با محیط پراکننده (آب) برهم‌کنش می‌کنند و انرژی تبخیر را برای آن فراهم می‌آورند. نظریه دیگر حاکی از آن است که امواج ضربه‌ای ایجاد شده در

(شبه یک کدوری سنج (turbidimeter)) میزان شفافیت فضای داخل محفظه ابر را اندازه‌گیری کند (واگنر و همکاران، ۲۰۰۹). سرعت بازگشت شفافیت به مقدار قبل از تزریق رطوبت، معیاری از سرعت حل بلورهای یخ و در نتیجه معیاری از نسبت جرم به قطر (و یا جرم به سطح مقطع موثر) آنها است و افزایش آن، افزایش این نسبت را نشان می‌دهد (هیمسفیلد، ۱۹۷۲؛ هیمسفیلد و کاجیکاوا، ۱۹۸۷). درحالی که همه کمیت‌های دیگر ثابت هستند، مدت زمانی که طول می‌کشد تا میزان وضوح در محفظه ابر به مقدار قبل از تزریق بخار بازگردد. که این را می‌توان معیاری از اندازه بلورهای یخ دانست (واگنر و همکاران، ۲۰۰۶).

فرصت تبخیر پیدا نکرده‌اند و همراه با بخار وارد محفظه ابر شده‌اند برای دستگاه‌های بخار گرم و بخار سرد متفاوت است. تغییر در این طیف، تاثیری روی اندازه‌گیری‌های مربوط به این تحقیق ندارد، زیرا رطوبت سنج فقط به مقدار بخار آب حساسیت نشان می‌دهد. اما چون این قطرک‌ها در هنگام ورود به محفظه یخ می‌زنند، ستون پنجم از جدول ۲ کمی متفاوت خواهد بود و از آنجا که این قطرک‌ها به روشی غیر طبیعی تولید شده‌اند، نتایج، کاربردی نخواهد بود.

در حال حاضر این آزمایشگاه دارای دو سامانه اندازه‌گیری است. یکی از آنها شامل یک دستگاه لیزر هلیوم-نئون و یک شدت‌سنج نور لیزر است که می‌تواند



شکل ۲. ویژگی‌های دمایی محفظه ابر؛ محور عمودی دما و محور افقی زمان است.

از این نمودار می‌توان دید که اتلاف دمایی (سرعت افزایش دما در حالتی که کمپرسورهای سردساز خاموش هستند) در این محفظه حدود ۰/۱٪ در هر ثانیه است و به خوبی می‌توان آزمایش‌ها را در بازه‌های زمانی نه چندان بزرگ، بی‌دررو در نظر گرفت.

همان‌طور که پیش‌تر ذکر شد، نوع بخار آب استفاده شده، بخار گرم است. در این دستگاه، یک گرم‌کننده الکتریکی آب را تبخیر می‌کند و بخار را در محفظه‌ای تا فشار 4 bars نگه می‌دارد. متصدی می‌تواند با کنترل یک شیر برقی، حجم مشخصی از بخار را وارد محفظه کند. شکل ۳، که از نظر زمانی متناظر با شکل ۲ است، تغییرات رطوبت نسبی در محفظه را در طول این آزمایش نشان می‌دهد.

هدف از نصب دستگاه تغییر فشار روی محفظه ابر، ثابت نگاه داشتن فشار درونی محفظه (با حجم بیش از هزار لیتر) در یک مقدار خاص بوده است. به همین علت، از یک پمپ گریز از مرکز پُر قدرت با دبی مکش زیاد (بیش از ۵۰ لیتر در ثانیه) استفاده شده است. این موضوع سبب شده است که تغییرات فشار در محفظه بسیار سریع‌تر از سرعت نمونه‌گیری داده‌ها در سامانه HMI (هر ۱۰ ثانیه یک‌بار) باشد. این بدان معنا است که در صورت رسم کردن داده‌های مربوط به فشار، فاصله نقاط بسیار زیاد خواهد شد و نمودار ظاهر بامفهومی پیدا نخواهد کرد. به همین علت از رسم کردن نمودار تغییرات فشار خودداری کرده‌ایم. اگرچه این موضوع با اهداف کاربردی این محفظه در تضاد نیست اما در حال اصلاح برنامه HMI هستیم تا داده‌های مربوط به فشار را هر ثانیه یک بار ذخیره کند (با این حال، این کار حجم زیادی از حافظه را اشغال خواهد کرد). همچنین به منظور افزایش دقت داده‌های فشار (که اکنون ۱۰۰ میلی‌بار است) به ۱ میلی‌بار و همچنین ایجاد امکان تغییر در واسنجی (کالیبراسیون) پیش‌فرض شده حس گرها، در حال اعمال تغییراتی در

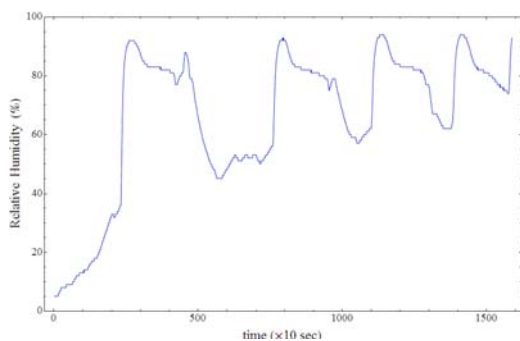
سامانه اندازه‌گیری دیگر شامل یک میکروسکوپ اپتیکی و یک ژل شیمیایی ویژه است (مشخصات آن در بخش ۵ آمده است) که با بلورهای یخ واکنش می‌دهد و تصویر بلورهای ثبت شده روی آن را می‌توان به کمک میکروسکوپ مشاهده کرد. تعداد، اندازه و شکل این بلورها تابعی از دما، رطوبت، فشار و تعداد و نوع هوامیزها هستند (میتچل و همکاران، ۱۹۹۰). این سامانه که دارای محدودیت‌های عملی است، کند و وقت‌گیر است و هنوز به‌طور کامل مورد بهره‌برداری قرار نگرفته است. با این حال تصاویری از بلورهای یخ درون محفظه ابر تهیه شده است. جزئیات بیشتر در بخش ۵ توضیح داده خواهد شد.

۲ ویژگی‌های محفظه ابر

محفظه ابر دارای یک دستگاه جمع‌آوری داده (Data Logger) به منظور جمع‌آوری و ذخیره داده‌های چهار حس گر دما، یک حس گر رطوبت و یک حس گر فشار است. این داده‌ها را نه تنها می‌توان به صورت نمودار خطی و جدول روی HMI مورد بررسی قرار داد بلکه می‌توان آنها را به منظور استفاده در نرم‌افزارهای محاسباتی دیگر (نظیر Excel) به یک حافظه جانبی منتقل کرد. شکل ۲ دمای درون محفظه ابر را در یک آزمایش نوعی نشان می‌دهد. بیشینه‌های موضعی به علت تزریق بخار گرم به درون محفظه رخ داده‌اند. گرادیان دما را به خوبی می‌توان با استفاده از نمودار شبکه‌بندی شده مورد بررسی قرار داد. با توجه به فاصله بین حس گرها که در بخش قبل بیان شد، گرادیان دما که قبل از تزریق رطوبت مقداری کمتر از $1\text{ }^{\circ}\text{C/m}$ داشته است، در اثر تزریق رطوبت، ناگزیر، کمی از این مقدار تجاوز می‌کند و پس از آن به آرامی به مقدار قابل قبول باز می‌گردد. در نمودار شبکه‌بندی شده، در مدت ۲۵۰۰ ثانیه اول، کمپرسورهای سردساز خاموش بوده‌اند. پس از این مدت، کمپرسورها روشن می‌شوند و محفظه را برای آزمایش بعدی آماده می‌سازند. با استفاده

پارامترهای ثابت عبارت‌انداز: $v = 50 \text{ cc}$, $V = 1 \text{ m}^3$ و $v' = 5 \text{ cc}$. محاسبه رابطه بالا که نگارنده آن را عملی ساخته است از لحاظ ریاضی، سراسر است اما طولانی و وقت گیر است. به همین علت، جزئیات روش محاسبه در اینجا آورده نشده است. روش کار به این شکل است: فرض کنید هوایی مخلوط با $m \times N$ ذره هومیز با حجم اولیه V داریم، سپس هوای پاک با حجم v' را به آن اضافه می‌کنیم و حجم v از آن را بر می‌داریم. تعداد هومیزها در این حجم برداشته شده به وضوح برابر است با $(v \times m \times N)/(v' + V)$. سپس مجدداً همین کار را با حجم هوای باقی مانده ادامه می‌دهیم. با نوشتن جملات پشت سر هم، به راحتی می‌توان دید که این جمله‌ها تشکیل یک سری (نه هندسی و نه حسابی) را می‌دهند که هر جمله آن با رابطه بالا قابل محاسبه است.

پیروپاترون‌های مورد استفاده ت مرکز ملی تحقیقات و مطالعات باروری ابرهای ایران، هر کدام حاوی 33 gr ماده بارورساز است که ۴٪ آن را یدید نقره (AgI) تشکیل می‌دهد. دیگر ترکیبات شامل KI، NaI، NH₄I و مقدار مواد آتش‌زا است (بلیس و همکاران، ۱۹۳۷؛ پاسارلی و همکاران، ۱۹۷۴). ترکیبات یددار اضافی، نمک‌های جاذب رطوبت هستند و آستانه دمایی عملکرد یدید نقره را کمی افزایش می‌دهند (دیویس، ۱۹۷۴). هر گرم از مواد باروری 26 - PV می‌تواند $N = 5 \times 10^{12}$ هسته یخ‌ساز تولید کند.



شکل ۳. رطوبت نسبی در محفظه ابر (محور افقی) برحسب زمان (محور عمودی).

برنامه PLC دستگاه هستیم. در تحقیق حاضر، دستگاه تغییر فشار روشن نشده و فشار درون محفظه برابر با فشار آزمایشگاه بوده است.

۳ ویژگی‌های محفظه هومیز

محفظه هومیز، یک اتاقک درزگیری شده با قابلیت پاک‌سازی هوای درون خود از هومیزهای پس‌زمینه است. همچنین در محفظه مورد بحث، یک پروانه برای همگن‌سازی هوا و یک ابزار الکتریکی برای سوزاندن نمونه‌هایی از مولدهای هومیز (مانند پیرو-تکنیک‌ها) وجود دارد. با برداشت مقداری از هوای درون این محفظه و تزریق آن به داخل محفظه ابر می‌توان تأثیر این هومیزها را بر شکل‌گیری قطره‌های ابر و یا بلورهای یخ، مورد بررسی قرار داد. تعداد IN (Ice Nuclei) ها و یا CCN (Cloud Condensation Nuclei) هایی که از محفظه هومیز برداشته می‌شود را می‌توان با استفاده از رابطه زیر محاسبه کرد:

$$n = v \left(1 - \frac{v}{V}\right)^{s-1} \frac{m \times N}{sv' + V}, \quad (1)$$

که در آن، v حجم وسیله‌ای است که با آن نمونه هوا برداشته می‌شود (برای مثال، سرنگ)، V حجم محفظه هومیز است، s عدد ردیف نمونه‌گیری است، m جرم مواد باروری (برحسب گرم) است که در محفظه هومیز سوزانده شده،

N تعداد هومیزهایی است که هر گرم از مواد باروری تولید می‌کنند،

v' حجم هوای (پاک) است که با هر بار نمونه‌گیری به هوای داخل محفظه اضافه می‌کنیم (مانند لوله‌های اضافی که به سرنگ متصل است و یا موارد مشابه).

$m \times N$ تعداد کل هومیزهای درون محفظه است و در صورت استفاده از مواد بارورسازی دیگر، می‌توان آن را با عبارت‌های مناسب برای آن مواد جایگزین کرد. دیگر

۴ اندازه‌گیری‌ها و ارائه نتایج

روش کلی کار به این صورت است: در محفظه هوامیز مقدار معینی هوامیز تولید می‌کنیم (در مورد این مقاله، مواد را می‌سوزانیم) و سپس کمی از هوای داخل آن را با سرنگ به داخل محفظه ابر (که ابر قبلاً در آن ایجاد شده است) منتقل می‌کنیم. سپس پارامترهای موردنظر را اندازه‌گیری و با مقادیری که بدون تزریق هوامیز به دست آمده مقایسه می‌کنیم. تاکنون تعداد زیادی آزمایش صورت گرفته است. در بعضی از آنها هیچ‌گونه هسته یخ‌سازی تزریق نشده و در بعضی دیگر، مقادیر متفاوتی هسته یخ‌ساز به داخل محفظه ابر تزریق شده است. در این نوشتار آنها را به ترتیب *بارور نشده* (non-seeded) و *بارور شده* (seeded) می‌نامیم. در این آزمایش‌ها، $m = 0.2 \text{ gr}$ بوده است و بنابراین تعداد هسته‌های یخ‌ساز در هر سرنگ، با استفاده از رابطه (۱)، برابر می‌شود با $n \cong 5 \times 10^7$. در آزمایش‌های بارور شده از ۰/۵ تا ۸ سرنگ به داخل محفظه ابر تزریق شد.

چگالی تعداد هسته‌های یخ‌ساز تزریق شده با هواپیما در طبیعت، به مقدار تزریق آنها، سرعت باد و سرعت هواپیما بستگی دارد (هیمسفیلد و همکاران، ۲۰۰۴؛ کانترل و هیمسفیلد، ۲۰۰۵). حس‌گرهای نصب شده روی هواپیما همه این کمیت‌ها را اندازه‌گیری می‌کنند. براساس این داده‌ها، این چگالی تاکنون تقریباً بین حد پایینی 2×10^3 و حد بالایی 6×10^5 متغیر بوده است. همه این هسته‌ها فعال نمی‌شوند و کارایی آنها به شدت به دما وابسته است. بلیر و همکاران (۱۹۷۳) این وابستگی را در آزمایشگاه اندازه‌گیری کرده‌اند. شکل‌های ۳، ۴ و ۵ این مرجع به ترتیب کارایی هسته‌سازی یدید نقره به همراه NH_4I ، KI و NaI را نشان می‌دهد. براساس این آزمایش‌ها، کارایی یدید نقره به همراه این سه ماده اضافی، از دمای حدود -8 درجه سلسیوس (دمای لحظه تزریق مواد در

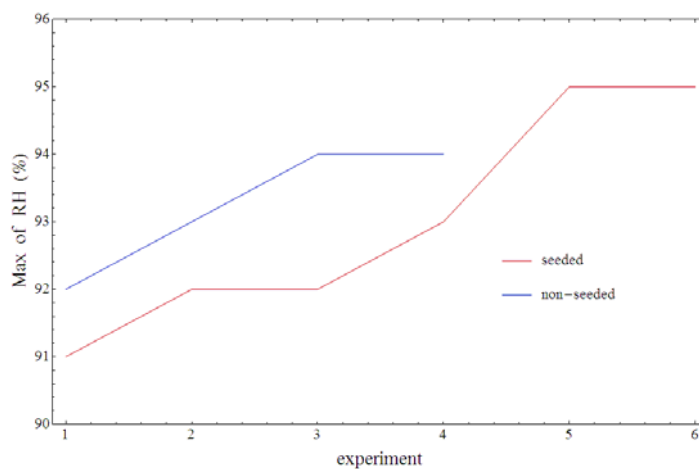
مقاله حاضر) تا دمای حدود -20 درجه (دمای متوسط ابر در عملیات باروری) به ترتیب از مرتبه‌های 10^1 ، 10^2 و 10^3 تغییر می‌کند و چون پیروپاترون‌های مورد استفاده در مقاله حاضر حاوی هر سه ماده هستند می‌توان عدد میانی، یعنی 10^2 را مورد استفاده قرار داد. این بدین معنا است که مقدار تزریقی مواد می‌تواند بسته به دما، از حد پایینی 2×10^3 تا حد بالایی 6×10^7 تغییر کند. در عملیات باروری ابرها، طبق آموزش‌هایی که کارشناسان مرکز تحقیقات و مطالعات باروری ابرها دریافت کرده‌اند و به سبب آنکه تا دو ساعت بعد از تزریق مواد، سرعت و جهت باد و همچنین (تا حد کمتری) دما ممکن است تغییر کند، مقادیری نزدیک به حد پایینی، یعنی حدود 5×10^3 هسته یخ‌ساز تزریق می‌شود. در آزمایشگاه به علت آنکه جریان باد وجود ندارد و حجم، محدود و مشخص است و همان‌طور که گفته شد دما نیز متفاوت است مقدار 5×10^7 هسته یخ‌ساز به‌ازای هر سرنگ انتخاب شده است و با توجه به اینکه از ۰٫۵ تا ۸ سرنگ تزریق شده، مقادیر تزریقی بین 2.5×10^7 تا 40×10^7 هسته یخ‌ساز بوده است. با توجه به اینکه حد بالایی 6×10^7 خود، ممکن است برای سامانه‌های ابری با سرعت بسیار کم (که البته به ندرت اتفاق می‌افتند) تغییر کند و همچنین اینکه محفظه از هوامیزهای پس‌زمینه پاک شده است، نمی‌توان نتیجه‌گیری کرد که مقدار 40×10^7 ابر را فرابارور (over seeded) کرده است. حتی اگر محفظه ابر از هوامیزهای پس‌زمینه نیز پاک‌سازی نمی‌شد این نتیجه‌گیری درست نمی‌بود. به این علت که تعداد و نوع هوامیزها در این آزمایشگاه که در ارتفاع ۸ متری از سطح زمین قرار گرفته است با آنچه که در ارتفاع پروازی عملیات‌های باروری، یعنی ۵۰۰۰ متری وجود دارد متفاوت است (کوهرلر و همکاران، ۲۰۱۰؛ موهرلر و همکاران، ۲۰۰۶). یک دلیل تفصیلی دیگر برای این

می‌کنند. این اثر نشان‌دهنده چگالیده شدن بخار روی بلورهای یخ است (مورفی و کوپ، ۲۰۰۵). شاهد دیگری نیز بر رشد بلورهای یخ وجود دارد و آن شفافیت فضای درونی محفظه ابر است. یک پرتو لیزر می‌تواند با عبور از ابر داخل محفظه، میزان شفافیت آن را تعیین کند (نیکولت و همکاران، ۲۰۰۷؛ نیکولت و همکاران، ۲۰۱۰؛ لیو و لاهور، ۱۹۷۴). شکل ۶ شدت نور لیزر را برحسب زمان، پس از عبور از فضای درونی محفظه برای چند آزمایش بارور شده و بارور نشده نشان می‌دهد. بیشتر منحنی‌های مربوط به آزمایش‌های بارور شده یک رشد ناگهانی را تقریباً بلافاصله پس از تزریق مواد باروری نشان می‌دهند و همه این منحنی‌ها سریع‌تر از منحنی‌های بارور نشده به مقدار بیشینه خود می‌رسند. شکل ۷ متوسط منحنی‌ها را برای آزمایش‌های بارور شده و بارور نشده نشان می‌دهد. با توجه به این شکل، با وجود اینکه در دقایق اولیه، شفافیت برای آزمایش‌های بارور شده کمتر از شفافیت برای آزمایش‌های بارور نشده است، بعد از حدود ۲۰۰ ثانیه پس از تزریق مواد باروری، دو منحنی جای خود را با یکدیگر عوض می‌کنند. این زمان با زمان جابه‌جا شدن نمودارهای رطوبت متناظر است.

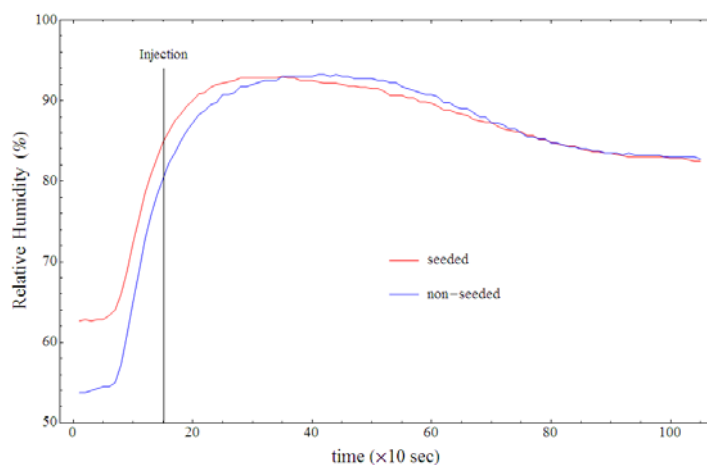
موضوع نیز بعد از رابطه ۴ آورده شده است.

اگرچه رطوبت سنج داخل محفظه ابر می‌تواند شیر (برقی) ورود بخار را کنترل کند اما به علت آنکه مدتی طول می‌کشد تا بخار به رطوبت‌سنج برسد، ممکن است مقدار نهایی بخار آب درون محفظه از آنچه که روی رطوبت‌سنج تنظیم شده بیشتر شود. بنابراین مدت‌زمان باز بودن این شیر را درحکم معیار کنترل رطوبت قرار داده‌ایم. شکل ۴ بیشینه رطوبت را در چند آزمایش مربوط به این نوشتار نشان می‌دهد. این شکل نشان می‌دهد اگرچه مدت‌زمان باز بودن شیر بخار برای همه آزمایش‌ها دقیقاً $01:30''$ بوده است به علت آنکه رطوبت تزریق شده در هر آزمایش به رطوبت به جا مانده از آزمایش قبلی اضافه می‌شود، این نمودار سیر صعودی دارد. اصلاح در برنامه PLC به منظور کنترل خودکار مدت‌زمان باز بودن شیر بخار در حال اجرا است.

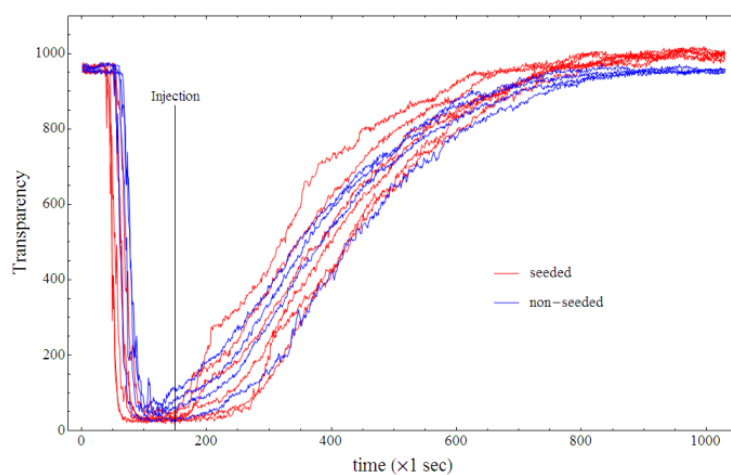
متوسط رطوبت نسبی برای آزمایش‌های بارور شده و بارور نشده در شکل ۵ رسم شده است. در این شکل می‌توان دید که با داشتن مقدار اولیه بیشتر، مقدار رطوبت نسبی برای آزمایش‌های بارور شده بیش از مقدار آن برای آزمایش‌های بارور نشده است اما حدود ۲۰۰ ثانیه پس از تزریق، این دو، جایگاه خود را با یکدیگر تعویض



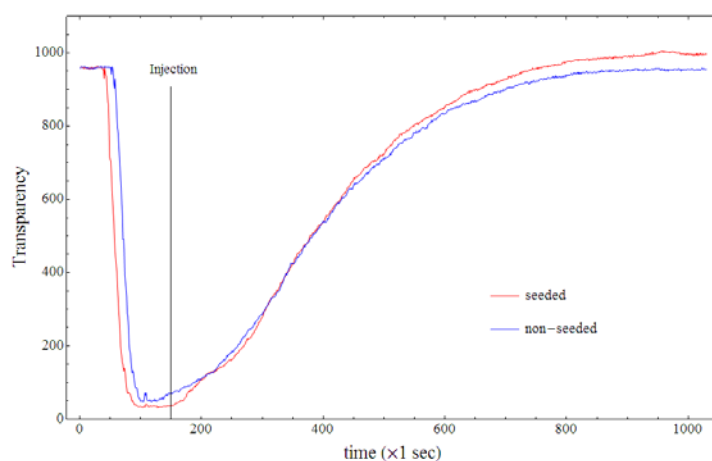
شکل ۴. محور عمودی بیشینه رطوبت نسبی و محور افقی شماره آزمایش بارور شده (سرخ) و بارور نشده (آبی) است.



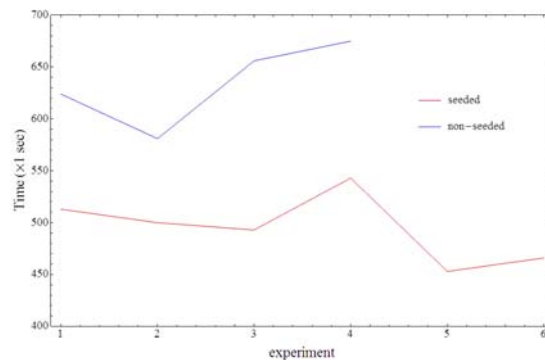
شکل ۵. متوسط رطوبت نسبی برای آزمایش‌های بارور شده و بارور نشده؛ محور عمودی رطوبت نسبی و محور افقی زمان است.



شکل ۶. محور عمودی شدت پرتو لیزر گذر کرده از درون محفظه برحسب هر واحد 9.33 mW/m^2 و محور افقی زمان است.



شکل ۷. متوسط شدت پرتو لیزر برای آزمایش‌های بارور شده و بارور نشده؛ محور عمودی شدت نور و محور افقی زمان است.



شکل ۸ مدت زمان لازم برای آنکه شدت، از ۱۰۰ به ۹۵۰ برسد؛ محور افقی شماره آزمایش و محور عمودی زمان است.

سامانه ترمودینامیکی محفظه ابر در نظر بگیریم، بازگشت شدت به مقدار اولیه خود، یک واهلش (relaxation) است. بهترین تابعی که اختلال و واهلش را توصیف می‌کند، تابع نمایی است (رولند، ۲۰۰۸). جامع‌ترین تابع نمایی مناسب برای مقاصد ما به شکل زیر است:

$$I(t) = -d \exp(-t/\tau) + c, \quad (2)$$

که در آن، t زمان است و c و d ، τ پارامترهای آزاد هستند و قیدهایی بر آنها حاکم است. $c = I(\infty)$ بیشترین مقدار شدت است و با یک پتانسیومتر روی آشکارساز قابل تغییر است. برای این آزمایش‌ها مقدار آن را $c = 980$ تنظیم کرده‌ایم. d را می‌توان با تعیین نقطه شروع نمونه‌گیری تنظیم کرد و همان‌طور که در پاراگراف قبل توضیح داده شد آن را به گونه‌ای انتخاب کرده‌ایم که داشته باشیم $I(0) = 100$. بنابراین خواهیم داشت $d = 880$. با استفاده از این مقادیر و برازش $I(t)$ حاصل روی داده‌های شکل ۷ می‌توانیم مقدار عددی τ را پیدا کنیم. این کمیت به زمان واهلش موسوم است و برابر با زمانی است که یک سامانه مختل شده به $1/e$ مقدار اولیه خود برسد. برای آزمایش‌های بارور شده و بارور نشده مقادیر زیر را به دست می‌آوریم:

$$\begin{cases} \text{seeded:} & \tau = 216.7 \text{ sec} \\ \text{non-seeded:} & \tau = 264.4 \text{ sec} \end{cases} \quad (3)$$

$\Delta\tau = 17.8 \%$

علت این موضوع را باید در اندازه بلورهای یخ جست‌وجو کرد (برد و همسفیلد، ۱۹۸۸؛ میتچل، ۱۹۹۶؛ میتچل و همسفیلد، ۲۰۰۵). بلورهای رشد کرده سریع‌تر سقوط می‌کنند و راه را برای رسیدن پرتو لیزر به آشکارساز، باز می‌سازند. شکل ۸ مدت‌زمان لازم را برای افزایش شدت پرتو لیزر از یک مقدار خاص به یک مقدار خاص دیگر نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۷ می‌توان دید، در طول اولین دقیق آزمایش، بخار به درون محفظه تزریق می‌شود و بنابراین از منظر دما، رطوبت و شفافیت، یک سامانه مختل شده داریم. هنگامی که شدت به حدود $(9.33 \text{ mW/m}^2) \times 100$ می‌رسد شرایط تقریباً پایدار و خروجی آشکارساز نوری از نظر فیزیکی معنی‌دار می‌شود. بنابراین در شکل ۸، دو مقدار خاص ذکر شده را ۱۰۰ و ۹۵۰ قرار داده‌ایم. با توجه به این شکل، همه ابرهای بارور شده سریع‌تر از ابرهای بارور نشده ناپدید می‌شوند و مقدار متوسط این افزایش سرعت برابر با ۲۲٪ است.

اگرچه بازه زمانی که طول می‌کشد تا شدت پرتو لیزر بین دو مقدار خاص گذر کند، به ما می‌گوید که بلورها چقدر سریع به کف محفظه ریزش می‌کنند اما درعین حال، از جزئیاتی که بین این دو نقطه روی می‌دهد، چشم‌پوشی می‌کند. روش دقیق‌تر، برازش یک تابع خاص روی داده‌ها است. اگر تزریق بخار را یک اختلال در

کنیم، به علت بعضی محدودیت‌های عملی و کاربردی و همچنین به این خاطر که همه جزئیات بلورهای یخ روی این ژل ثبت نمی‌شود، به نظر می‌رسد که این روش چندان مؤثر و قابل استفاده نباشد. با این حال موفق شدیم، قبل از آنکه بلورها ذوب شوند، با استفاده از میکروسکوپ، تصاویر خوبی از بلورهای ابر بارور شده تهیه کنیم. به علت مشکلات ذکر شده هنوز نتوانسته‌ایم از بلورهای ابر بارور نشده، به منظور مقایسه، تصویری تهیه کنیم؛ اما در حال توسعه روشی برای تهیه چنین تصاویری هستیم (بایلی و هالت، ۲۰۰۲؛ بایلی و هالت، ۲۰۰۹). شکل ۱۱ نمونه‌ای از تصاویر گرفته شده با استفاده از پایین‌ترین بزرگ‌نمایی میکروسکوپ را نمایش می‌دهد.






با توجه به دسته‌بندی ماگونولی (Magono-Lee) در مورد بلورهای طبیعی برف (ماگونو و چانگ، ۱۹۶۶)، این آزمایش‌ها بلورهای CP1c، C1h، P1c، P1b در میان دیگر بلورها، عمده‌ترین سهم را داشته‌اند. جدول ۲ درصد و تعداد بلورهای شمارش شده را در این دسته‌بندی نشان می‌دهد. اهمیت دسته‌بندی ماگونولی از آن جهت است که می‌توان با تعیین رابطه جرم-ابعاد (mass-size relationship) بلورهای یخ، خواص دیگری از آنها را، مانند سرعت حد، محاسبه کرد (همسفیلد، ۱۹۷۲؛ همسفیلد و کاجیکاوا، ۱۹۸۷؛ برد و همسفیلد، ۱۹۸۸؛ میتچل، ۱۹۹۶؛ میتچل و همسفیلد، ۲۰۰۵؛ میتچل و همکاران، ۱۹۹۰).

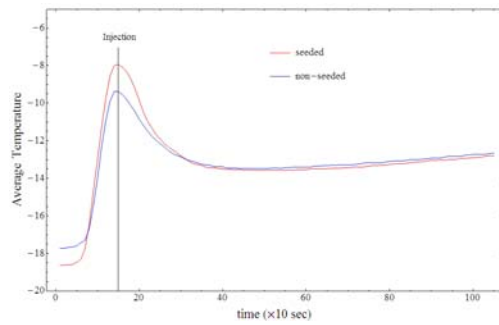
نتیجه برآزش که در شکل ۹ رسم شده است نشان می‌دهد که منحنی‌های متناظر با آزمایش‌های بارور شده، سریع‌تر از بارور نشده‌ها به مقدار نهایی خود می‌رسند. همان‌طور که در بخش ۵ توضیح داده خواهد شد، افزایش زمان واهلش بر افزایش اندازه بلورها دلالت دارد (واگنر و همکاران، ۲۰۰۹؛ نیکولت و همکاران، ۲۰۱۰). دمای متوسط در درون محفظه در شکل ۱۰ رسم شده است. همه آزمایش‌ها بی‌دررو بوده‌اند و ۴۰۰ ثانیه اول در این نمودار به شیوه توزیع بخار در داخل محفظه بستگی داشته است و از لحاظ فیزیکی معنی‌دار نیست. با این حال نزدیکی دو نمودار به هم بعد از ۴۰۰ ثانیه، نشان‌دهنده یکسان بودن مقدار بخار آب تزریق شده به داخل محفظه است.

۵ مشخصات بلورهای یخ و سرعت حد آنها

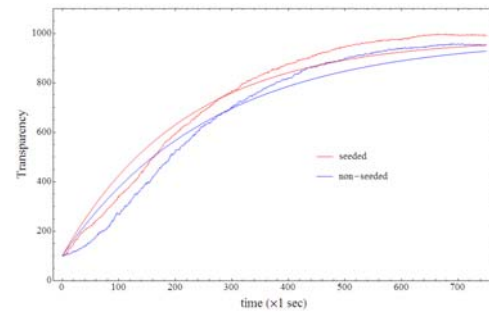
اندازه و شکل بلورهای یخ به دما، رطوبت و فشار درون محفظه ابر بستگی دارد (دتویلر و وونگات، ۱۹۸۱). روش‌های گوناگونی برای اندازه‌گیری شکل و اندازه بلورهای یخ وجود دارد و معمولاً هر آزمایشگاه، ادوات و تجهیزات خاص خود را گسترش داده است (هیرست و همکاران، ۲۰۰۱؛ جونز و همکاران، ۲۰۱۱). یک نمونه از آن شامل بسپار (پلیمر)ی به نام پلی وینیل استات (Poly Vinyl Acetate (PVAc) است که با آب واکنش شیمیایی می‌دهد و رد بلورهای یخ را روی خود ثبت می‌کند. اگرچه بسیار سعی کردیم که از این روش استفاده

جدول ۲. درصد تعداد انواع بلورهای یخ تولید شده براساس جدول ماگونولی.

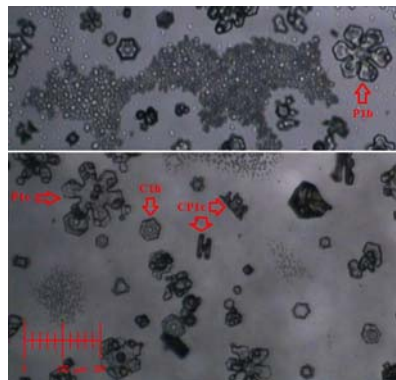
				
P1c	P1b	C1h	CP1c	other
16.3%	4.3%	25.8%	7.7%	45.9%
چگالی کل تعداد بلورها $\cong 3 \times 10^8 \text{ m}^{-3}$				



شکل ۱۰. دمای متوسط در درون محفظه برحسب درجه سلسیوس؛ محور افقی زمان سپری شده است.



شکل ۹. نتیجه برازش تابع نمایی روی داده‌های آشکارساز؛ محور عمودی شدت نور لیزر و محور افقی زمان است.



شکل ۱۱. نمونه عکس‌های گرفته شده از بلورهای یخ.

بستگی دارد که در آن A مساحت تصویر جسم روی سطح افقی است. همان‌طور که توده یک بلور رشد می‌کند جرمش هم به همان نسبت افزایش می‌یابد، اما مساحت تصویر آن روی همه سطح‌ها قطعاً به نسبت کمتری رشد می‌کند (برای اثبات در نظر بگیرید که مثلاً اگر حجم یک کره دو برابر شود مساحت دایره عظیمه آن دو برابر نخواهد شد) و این سبب می‌شود که v_t افزایش یابد. این پدیده را در بخش قبل به صورت افزایش در زمان واهلش مشاهده کردیم. اما آیا ممکن است که سرعت حد v_t (و در نتیجه زمان واهلش) افزایش یابد در حالی که اندازه بلورها کوچک‌تر شده باشد؟ پاسخ از نقطه نظر ریاضی مثبت است. می‌توان فرض کرد که نسبت m/A بزرگ‌تر شده در حالی که m کاهش یافته اما A با نسبت بیشتری کاهش یافته است. این فرض - در مورد تعداد

سرعت حد هر ذره در حال بارش با رابطه زیر داده می‌شود:

$$v_t = \left(\frac{2mg}{\rho A C_D} \right)^{1/2} \quad (4)$$

که در آن، نیروی مقاومت هوای C_D خود، دوباره به v_t وابسته است. یک روش برای حل این معادله استفاده از عدد رینولدز (Reynolds number) است که در میتچل (۱۹۹۶) معرفی شده و در اینجا نیازی به حل مجدد آن نیست. اما جواب نهایی به شکل زیر است:

$$v_t = \frac{a\eta}{\rho D} \left(\frac{2mg\rho D^2}{A\eta^2} \right)^b \quad (5)$$

که در آن، D بیشترین بُعد ذره و η و شکسانی پویای (dynamic viscosity) شماره است. a و b دو ضریب هستند که به صورت عددی تعیین می‌شوند. همان‌طور که از معادلات بالا دیده می‌شود، سرعت حد به نسبت m/A

در هیچ کدام از آزمایش‌های بارور شده، نسبت به آزمایش‌های بارور نشده، افزایش زمان واهلش مشاهده نشده است، بسیار منطقی است که فرضیه‌ای که قطعیت دارد را به این تغییرات نسبت دهیم.

به کمک نمودارهای رشد (بایلی و هالت، ۲۰۰۲؛ بایلی و هالت، ۲۰۰۹) می‌توان از شکل بلورها و سرعت حد متناظر با هر بلور در برآورد وابستگی وضوح ابر به زمان استفاده کرد و نتیجه را با شکل ۷ مورد مقایسه قرار داد. این فعالیت، موضوع تحقیقات بعدی خواهد بود.

۶ نتیجه‌گیری

محفظه‌های ابر و هوامیز مرکز ملی تحقیقات و مطالعات باروری ابرها معرفی شدند. برخلاف ۱۶ محفظه مربوط به اتحادیه اروپا (به www.Eurochamp.org مراجعه شود) که هدف اصلی آنها تحقیق بر روی خواص شیمیایی جو است، هدف اصلی از ساخت این محفظه‌ها، کنترل کیفیت مواد مورد استفاده در باروری ابرها و تعیین چگونگی تأثیر هوامیزهای پس‌زمینه محلی روی خردفیزیک (microphysics) ابر بوده است. طبق تأیید داده‌ها، گرادیان دما در محفظه ابر در محدوده مجاز قرار دارد و بنابراین می‌توان در شرایط طبیعی، رطوبت را برای ابر سرد تا بیش از ۹۵٪ و برای ابر گرم تا ۹۹٪ افزایش داد.

تأثیر مواد باروری (پروتکتیک‌های PV-26) روی رشد بلورهای یخ مورد بررسی قرار گرفت. زمان واهلش برای سامانه ترمودینامیکی ایجاد شده در داخل محفظه، اندازه‌گیری و محاسبه شد و در مورد اینکه این زمان واهلش چه مفهوم فیزیکی می‌تواند داشته باشد بحث شد. نتایج، یک افزایش ۲۲ درصدی را در برآزش خطی و یک افزایش ۱۷٫۸ درصدی در برآزش نمایی برای سرعت بارش بلورهای یخ را نشان می‌دهد. همان‌طور که در بخش آخر مورد بحث قرار گرفت، این اثر به علت افزایش نسبت جرم-قطر بلورهای یخ اتفاق می‌افتد.

زیادی بلور-معادل آن است که فراباروری رخ داده باشد (برای اثبات اینکه فراباروری باعث کاهش جرم بلورها می‌شود لوین و کاتن (۲۰۰۹) را ببینید). اما الزاماً همه آنها (از نظر مساحت) روی کوچک‌ترین سطح خود سقوط نمی‌کنند. اینکه A نسبت به m با نسبت بیشتری کاهش یابد برای یک تک بلور امکان‌پذیر است (برای مثال، بلور کوچک شده در دسته $N1$ تا $N1e$ قرار داشته باشد (ماگونو و چانگ (۱۹۶۶) را ببینید) و به صورت عمودی سقوط کند) اما هنگامی که صحبت از چند صد میلیون بلور در حال سقوط است (جدول ۲ را ببینید) نمی‌توان گفت که همیشه درصد بیشتری از آنها روی وجه کوچک‌تر خود سقوط می‌کنند (نگارنده تاکنون، با وجود جست‌وجوی فراوان، هیچ مرجع و یا منبعی مبنی بر اینکه دسته‌های گوناگون بلورها بیشتر روی کدامین وجه خود سقوط می‌کنند نیافته است. البته از تجربه‌های مشابه می‌دانیم که احتمالاً دسته خاصی از بلورها بیشتر روی وجه خاصی سقوط می‌کنند. به همین علت اندازه‌گیری‌های مربوط به سرعت حد، معمولاً برای دسته خاصی از بلورها صورت می‌گیرد. اما در اینجا بحث بر سر این است که در صورت تغییر شکل (ممکن است شکل نهایی بلور در هیچ دسته‌ای قرار نگیرد) آیا بلور، همیشه روی وجه کوچک‌تر خود سقوط می‌کند؟). برای آنکه بتوان با قطعیت بیشتری نتیجه‌گیری کرد باید آمار آزمایش‌ها را بالا برد. اگر مشاهده شد که در آزمایشی با وجود فراباروری، زمان واهلش کاهش یافته است می‌توان نتیجه گرفت که احتمال دارد که درصد بیشتری از بلورهای ناقص رشد یافته روی وجه کوچک‌تر خود سقوط کنند (و یا معادل با آن A به نسبت بیشتری از m کاهش یابد). اما آنچه که اکنون قطعیت دارد این است که در صورت رشد بلورها، حتماً سرعت حد سقوط آنها افزایش می‌یابد. با وجود آنکه تعداد آزمایش‌های صورت گرفته بیش از پنجاه عدد بوده و در آنها مقادیر مختلفی هسته یخ‌ساز تزریق شده است و

- University of Wyoming.
- Detwiler, Andrew, G. and Vonnegut, B., 1981, Humidity required for ice nucleation from the vapor onto silver iodide and lead iodide aerosols over the temperature range, *Journal of Applied Meteorology*, **20** 1006-1012.
- Donnan, J. A. and Wright, D. A., 1969, A wind tunnel-cloud chamber facility for research on cloud modification materials, Rept. **69-8**, Inst. Atmos. Sci., South Dakota School of Mines and Technology, Rapid City, 31 pp.
- Heymsfield, A., 1972, Ice crystal terminal velocities, *Journal of the Atmospheric Sciences*, **29**, 1348-1357.
- Heymsfield, A. J. and Kajikawa, M., 1987, An improved approach to calculating terminal velocities of plate-like crystals and graupel, *Journal of the Atmospheric Sciences*, **44**, 1088-1099.
- Heymsfield, A. J., Bansemer, A. and Schmitt C., 2004, Effective ice particle densities derived from aircraft data, *Journal of the Atmospheric Sciences*, **61**(9), 982-1003.
- Hirst, E., Kaye, P. H., Greenaway, R. S., Field, P. and Johnson, D. W., 2001, "Discrimination of micrometre-sized ice and super-cooled droplets in mixed-phase cloud, *Atmospheric Environment*, **35**(1), 33-47.
- Jones, H. M., Flynn, M. J., DeMott, P. J. and Mohler, O., 2011, Manchester ice nucleus counter (MINC) measurements from the 2007 international workshop on comparing ice nucleation measuring systems (ICIS-2007), *Atmos. Chem. Phys*, **11**(1), 53-65.
- Koehler, K. A., Kreidenweis, S. M., DeMott, P. J., Petters, M. D., Prenni, M. D. and Mohler, O., 2010, Laboratory investigations of the impact of mineral dust aerosol on cold cloud formation, *Atmos. Chem. Phys*, **10**(11), 11955-11968.
- Kripfgans, O. D., Fabiilli, M. L., Carson P. L., and Fowlkes, J. B., 2004, On the acoustic vaporization of micrometer-sized droplets, *J. Acoust. Soc. Am.*, **116**, 272-281.
- Langsdorf, A. Jr., 1939, A continuously sensitive diffusion cloud chamber, *Rev. Sci. Instrum.*, **10**, 91-103.
- Levin, Z. and Cotton, W. R., 2009, *Aerosol pollution impact on precipitation*, Springer Press. ISBN: 978-1-4020-8689-2, 239.
- Liou, K. N. and Lahore, H., 1974, Laser sensing of cloud composition: a backscattered depolarization technique, *Journal of Applied Meteorology*, **13**, 257-263.
- Magono, C. and Chung, W., 1966, Meteorological شکل بلورها مورد بررسی قرار گرفت. توانایی محفظه‌های ابر در تولید گونه‌های ویژه‌ای از بلورها در یک رطوبت، فشار و دمای خاص، اهمیت ویژه‌ای دارد. طبق دسته‌بندی ماگونو-لی، اکثریت بلورها در آزمایش‌هایی که تاکنون صورت گرفته است از نوع P1b، P1c، C1h و CP1c بوده‌اند. تولید انواع دیگر که در مقادیر دیگری از رطوبت، دما و فشار رخ می‌دهد، در دست اقدام است.
- برآورد زمان موردنیاز برای واضح شدن فضای درون محفظه ابر با استفاده از روابط نظری مربوط به سرعت حد، امکان‌پذیر است که خود، موضوع تحقیقات آتی است. این زمان به دست آمده را می‌توان با زمان اندازه‌گیری شده مقایسه و نتایج را اصلاح (و یا تأیید) کرد.
- مراجع
- Bailey, M. and Hallett, J., 2002, Nucleation effects on the habit of vapour grown ice crystals from -18 to -42°C , *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **128**(583), 1461-1483.
- Bailey, M. and Hallett, J., 2009, A comprehensive habit diagram for atmospheric ice crystals: confirmation from the laboratory, AIRS II, and other field studies, *Journal of the Atmospheric Sciences*, **66**(9), 2888-2899.
- Barreras, F., Amaveda, H. and Lozano, A., 2002, Transient high-frequency ultrasonic water atomization, *Experiments in fluids*, **33**(3), 405-413.
- Beard, K. V. and Heymsfield, A. J., 1988, Terminal velocity adjustments for plate-like crystals and graupel, *Journal of the Atmospheric Sciences*, **45**, 3515-3518.
- Blair, D. N., Davis, B. L. and Dennis, A. S., 1973, Cloud chamber tests of generators using acetone solutions of AgI-NaI, AgI-KI and AgI-NH₄I, *Journal of Applied Meteorology*, **12**, 1012-1017.
- Cantrell, W. and Heymsfield, A., 2005, Production of ice in tropospheric clouds: a review, *Bulletin of the American Meteorological Society*, **86**(6), 795-807.
- Davis, Charles I., 1974, The ice-nucleating characteristics of various AgI aerosols, Diss.

- with the depolarization detector IODE, *Atmos. Chem. Phys.*, **10**(2), 313-325.
- Passarelli, Jr., Chessing, H. and Vonnegut, B., 1974, Ice nucleation in a supercooled cloud by CuI-3AgI and AgI aerosols, *Journal of Applied Meteorology*, **13**(8), 946-948.
- Rohwetter, Ph., Kasparian, J., Stelmaszczyk, K., Hao, Z., Henin, S., Lascoux, N., Nakaema, W. M., Petit, Y., QueiBer, M., Salame, R., Salmon, E., Woste, L. and Wolf, J. P., 2010, Laser-induced water condensation in air, *Nature Photonics*, **4**(7), 451-456.
- Roland, C. M., 2008, Characteristic relaxation times and their invariance to thermodynamic conditions, *Soft Matter*, **4**(12), 2316-2322.
- Saavedra, I., 1958, On the theory of the diffusion cloud chamber, *Nucl. Instrum.*, **3**, 85-89.
- Stetzer, O., Baschek, B., Lüönd, F. and Lohmann, U., 2008, The Zurich ice nucleation chamber (ZINC)-a new instrument to investigate atmospheric ice formation, *Aerosol Science and Technology*, **42**(1), 64-74.
- Wagner, R., Benz, S., Mohler, O., Saathoff, H. and Schurath, U., 2006, Probing ice clouds by broadband mid-infrared extinction spectroscopy: case studies from ice nucleation experiments in the AIDA aerosol and cloud chamber, *Atmos. Chem. Phys.*, **6**(12), 4775-4800.
- Wagner, R., Linke, C., Naumann, K. H., Schnaiter, M., Vragel, M., Gangl, M. and Horvath, H., 2009, A review of optical measurements at the aerosol and cloud chamber AIDA, *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, **110**(11), 930-949.
- classification of natural snow crystals, *Journal of the Faculty of Science, Hokkaido University*, **7**, Geophysics 2.4, 321-335.
- Mitchell, David L., 1996, Use of mass-and area-dimensional power laws for determining precipitation particle terminal velocities, *Journal of the Atmospheric Sciences*, **53**(12), 1710-1723.
- Mitchell, David L. and Heymsfield, A. J., 2005, Refinements in the treatment of ice particle terminal velocities, highlighting aggregates, *Journal of the Atmospheric Sciences*, **62**(5), 1637-1644.
- Mitchell, David L., Zhang, R. and Richard, L. Pitter., 1990, Mass-dimensional relationships for ice particles and the influence of riming on snowfall rates, *Journal of Applied Meteorology*, **29**(2), 153-163.
- Möhler, O., Field, P. R., Connolly, P., Benz, S., Saathoff, H., Schnaiter, M., Wagner, R., Cotton, R., Kramer, M., Mangold, A. and Heymsfield, A. J., 2006, Efficiency of the deposition mode ice nucleation on mineral dust particles, *Atmos. Chem. Phys.*, **6**(10), 3007-3021.
- Murphy, D. M. and Koop, T., 2005, Review of the vapour pressures of ice and supercooled water for atmospheric applications, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **131**(608), 1539-1565.
- Nicolet, M., Olaf, S. and Lohmann, U., 2007, Depolarization ratios of single ice particles assuming finite circular cylinders, *Applied Optics*, **46**(20), 4465-4476.
- Nicolet, M., Stetzer, O., Luönd, F., Mohler, O. and Lohmann, U., 2010, Single ice crystal measurements during nucleation experiments