

اثر سرعت بالاروی ابر در تولید خرده یخ در دمای ثابت

علیرضا صادقی حسینی *

چکیده

راه اندازی یخ در ابر از مهمترین زمینه‌های پژوهش‌های هواشناسی در خلال ۵۰ سال گذشته بوده است که مورد توجه مخصوص دانشمندان تعدیل ابر می‌باشد. با وجود اینکه موفقیت‌های زیادی در این زمینه‌ها به دست آمده هنوز ابهامات بسیاری در مورد فرایندهای هسته‌بندی وجود دارد. یکی از مهم‌ترین منابع تولید یخ در ابر، فرایند تکثیر یخ حالت - موساپ (H-M) می‌باشد. در این پژوهش فرایند (H-M) در دمای سطح برفک نسبتاً ثابت ($T_s \approx -5^\circ\text{C}$) و آب محتوای ابر (0.93gm^{-3}) از $LWC \approx$ در گستره وسیع‌تری از سرعت‌های بالارو، یعنی از $1/5-12\text{ms}^{-1}$ با دستگاه میله چرخان با شعاع‌های ۱۵-۲۵ cm در یک اتاقک سرد تولید ابر مطالعه شده است. آزمایش‌های انجام شده با تایید نتایج محققین گذشته (هالت و موساپ ۱۹۷۴ و موساپ ۱۹۸۵)، یک بیشینه فرعی در حدود ۳۵ تا ۴۰ خرده یخ بر میلی‌گرم برفک را در سرعت بالارو 3ms^{-1} نشان می‌دهد. افزون بر این برای اولین بار در دنیا، یک بیشینه آهنگ تولید خرده یخ با ۶۰ تا ۷۰ خرده یخ بر میلی‌گرم برفک در سرعت بالارو 6ms^{-1} ثبت شده که احتمالاً به دلیل ترکیب دو اثر تغییر بافت برفک از شکل پر به دانه ذرت و فرایند شکافته شدن پوسته یخی می‌باشد. در این مطالعات همچنین مشخص شده است که در یک سرعت بالاروی ثابت، تغییر شتاب چرخشی اثر قابل ملاحظه‌ای بر تولید خرده یخ ندارد.

کلیدواژه‌ها: راه اندازی یخ در ابر^۱، فرایندهای هسته‌بندی^۲، فرایند تکثیر یخ^۳، برفک^۴، خرده یخ^۵، فرایند شکافته شدن پوسته یخ^۶

۱ مقدمه

در دمای -5°C اتفاق می‌افتد. در کارهای اولیه، موساپ و هالت (۱۹۷۴)، بیان کرده‌اند که آهنگ تولید خرده یخ‌ها به وجود قطره‌هایی با قطر بزرگتر یا مساوی $25\ \mu\text{m}$ بستگی دارد و تولید

هالت و موساپ^۷ (H-M, 1974) اولین کسانی بودند که مطرح کردند وقتی قطرات ابر سرد بر روی زمینه یخی، یخ می‌زنند ذره‌های یخی با دماهای بین -3°C و -8°C از آنها می‌جهند که تولید بیشینه آنها

1. ice initiation in clouds
3. ice multiplication process
5. ice splinters
7. Hallett and Mossop

2. nucleation processes
4. rime
6. ice shell - fracture process

* مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، صندوق پستی ۶۴۶۶-۱۴۱۵۵، تهران.

یخی، آزاد می شود. فشار بیشتر باعث شکسته شدن انتهای میخ و پرش یک یا تعداد بیشتری خرده یخ، می شود.

بر طبق فرضیه شکست پوسته یخی، علت تولید بیشینه خرده یخ در دمای 5°C ، عوامل محدودکننده مربوط به دماهای بالاتر و پایین تر، می باشد. قطرک‌ها در دماهای بالاتر از 3°C ، به پخش شدن روی زمینه، بیشتر از یخ زدن به صورت یک کره مشخص، تمایل دارند (مک لین و پین^۱، ۱۹۶۷). قطع شدگی دمای پایین در حدود 8°C به علت رشد سریع پوسته که قوی تر از آن است که توسط فشار داخلی شکسته شود و در نتیجه قطرک‌ها به سمت داخل یعنی مرکز قطرک، یخ می زنند (گریگز و چولارتون^۲، ۱۹۸۳). بنابراین فقط در محدوده دمایی 3°C تا 5°C ساختمان بخش‌های کوچکی از قطرک‌های یخ زده و جریان‌های حرارتی از آنها برای فرآیند (H-M) مناسب است.

سرعت بهینه برای تولید خرده یخ نیز می تواند بوسیله فرضیه شکسته شدن پوسته توصیف شود. وقتی سرعت نسبی بین برفک‌گیر و قطرک‌ها بالا باشد، قطرک‌ها به پخش شدن در سطح یخ تمایل دارند تا پل را که اساسی است تشکیل دهند. گرچه در سرعت‌های خیلی کم، ساختمان برفک مناسب تر است ولی ممکن است برای تشکیل یک پوسته یخی کامل آهنگ انتقال گرمای همرفتی از قطرک‌های یخ زده، ناکافی باشد و در نتیجه احتمال تولید خرده یخ کاهش یابد.

در اینجا برای بررسی این که گویچه‌های یخی می توانند هم زمان که به مرحله تولید سنگ تگرگ

خرده یخ متناسب با آهنگ جمع آوری قطرک‌های بزرگ می باشد. در دمای 5°C - از هر 250 قطرک با قطر کوچکتر یا مساوی $25\ \mu\text{m}$ ، یک خرده یخ می جهد که این بدون در نظر گرفتن سرعت برفک‌گیر می باشد (موساپ^۱ ۱۹۷۶). بعداً گلد اسمیت^۲ و همکاران (۱۹۷۶)، و موساپ (۱۹۷۸) دریافتند که قطرک‌هایی با قطر کوچکتر یا مساوی $12\ \mu\text{m}$ نیز بر روی فرآیند (H-M) اثر دارند. موساپ (۱۹۷۶) متذکر شد که تولید خرده یخ حداقل در سرعت‌های $1/4\text{--}3\ \text{ms}^{-1}$ تغییری نمی کند و به سرعت برفک‌گیر نیز زیاد حساس نیست.

با انجام یک رشته آزمایش موساپ (۱۹۷۶) و ویشارت^۳ (۱۹۷۷) دریافتند که در سرعت ثابت $1/4\ \text{ms}^{-1}$ ، افزایش شتاب جانب مرکز تا 60% اثر قابل ملاحظه‌ای در تولید خرده یخ ندارد.

بعداً فوستر و هالت^۴ (۱۹۸۲)، نشان دادند که تولید یخ ثانویه حداقل برای افزایش کمتر یا مساوی 2°C بین دمای سطح برفک و دمای ابر، بیشتر تابع دمای سطح برفک است.

نظریه جاری براساس کار چولارتون^۵ و همکاران (۱۹۸۰ و ۱۹۷۸) و موساپ (۱۹۸۵) می باشد که براساس آن قطرک‌های درشت با قطر بزرگتر یا مساوی $25\ \mu\text{m}$ به صورت اتفاقی با این روش برافزایش می شوند که به وسیله یک پل باریک به یک زمینه یخی متصل شده سپس با از دست دادن گرما، شرایط برای تشکیل یک پوسته یخی کامل در اطراف قطرکی که در حال یخ زدن است، فراهم می شود. فشار تولید شده در داخل قطرک، با ترک دادن پوسته و تولید برآمدگی و میخ

1. Mossop
2. Goldsmith
3. Wishart
4. Foster and Hallett
6. Macklin and Payne
7. Griggs and Choullarton

۲ روش‌های آزمایشگاهی

۱.۲ اتاقک ابر

آزمایش‌ها در یک اتاقک ابری که قبلاً توسط کیث و ساندرز^۴ (۱۹۹۰) تشریح شده، با اندکی تغییر، انجام شده است. ابعاد اتاقک $0.95 \times 1.5 \times 2m$ است که دیواره‌های آن از ورقه‌های آلومینیومی است که در چهارچوب فلزی سبکی قرار دارد. این اتاقک در یک اتاق سردکننده قرار گرفته است. ابری از قطره‌های آب ابر سرد که از یک جوش آور در باز که به دیواره اتاقک ابر نصب شده است ایجاد می‌شود. این تمهید برای اطمینان از این مساله است که دمای سقف اتاقک بالای $0^\circ C$ باشد که خطر شمارش بلورهای اضافی فرو افتاده از آن وجود نداشته باشد. برای کمینه کردن گرمای منتقل شده از طرف جوش آور به اتاقک، جوش آور کاملاً عایق‌بندی می‌شود.

آب محتوا و توزیع اندازه قطره‌های ابر به ترتیب به نیروی اعمال شده به جوش آور بخاری و اندازه خروجی جوش آور بستگی دارد (موساپ^۵، ۱۹۸۵). برای سازگاری بهتر توزیع اندازه قطره‌ها برای فرایند تکثیر H-M، قطر خروجی و نیروی اعمال شده به جوش آور در همه آزمایش‌ها به ترتیب در $12cm$ و $600W$ ثابت نگه داشته شده است.

پس از اینکه جوش آور روشن می‌شود، در حدود ۶۰ تا ۹۰ دقیقه طول می‌کشد تا ابر به دمای پایدار و اندازه قطره یکنواخت برسد. در خلال این مدت غلظت قطره‌ها کاهش می‌یابد ولی قطر متوسط آنها افزایش می‌یابد. از این به بعد طیف اندازه قطره‌ها به آرامی تغییر می‌کند و در مدت

نزدیک می‌شوند، به تولید خرده یخ نیز ادامه دهند، اثر سرعت در گستره وسیع‌تری مطالعه شده است. این اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی در دمای سطح برفک $5^\circ C$ - و آب مایع محتوای $(LWC \approx 1 gm^{-3})$ نشان دادند که تولید خرده یخ بر میلی‌گرم برفک، تابع سرعت برفک‌گیر در گستره $12-1/5 ms^{-1}$ است. بیشینه تولید خرده یخ پریده در سرعت $6ms^{-1}$ و به میزان 70 خرده یخ بر میلی‌گرم برفک بوده است.

اخیراً این آهنگ تولید خرده یخ در آزمایشگاه توسط تحلیل دیده‌بانی‌های میدانی از ابرهای کومه‌ای تابستانی روی نیومکزیکو (بلیث و لاتام^۱، ۱۹۹۷) با آهنگ 50 خرده یخ بر میلی‌گرم برفک بر افزایش شده، تایید شده است. همچنین، پژوهشگران هواشناسی (باور^۲ و همکاران، ۱۹۹۶) بوسیله یک هواپیمای تحقیقاتی هرکولوس موفق شده‌اند غلظت‌های بالایی از بلورهای یخی ستونی کوچک را در ابرهای پوشنی، در ناحیه H-M (بین $3^\circ C$ تا $8^\circ C$)، با بالاترین غلظت، تقریباً برابر $50 \cdot 10^{-1}$ که در تراز $6^\circ C$ اتفاق افتاده همراه با بیشینه دیگری در تراز $15^\circ C$ ، ثبت کنند.

میسون^۳ (۱۹۹۸) پیشنهاد کرده‌است که غلظت‌های بالای بلورهای کوچک با قطر کوچکتر از $125\mu m$ که در سطح $15^\circ C$ گزارش شده خرده‌یخهایی هستند که در ناحیه H-M و در غیاب ابر آبدار، بین $8^\circ C$ تا $12^\circ C$ به آرامی رشد کرده‌اند ولی بعداً در سلولهای همرفتی که دارای محتوای آب مایع تقریباً $1 gm^{-3}$ و سرعت‌های تقریباً برابر $1ms^{-1}$ هستند، به سرعت به رشد خود ادامه داده‌اند.

1. Blyth, and Latham
3. Mason
5. Mossop

2. Bower
4. Keith and Sounders

۱/۵ تا $۱۲ms^{-1}$ (شکل ۳)، بچرخند. در ابر سرد، میله‌های استوانه‌ای متحرک، قطره‌هایی را که در برخورد با سطح جلویی آنها به صورت برفک یخ می‌زنند جمع‌آوری می‌کند. بلورهای یخی که در خلال رشد برفک می‌جهند از داخل یک پرتو نورانی که از عرض اتاقک و درست از زیر میله‌های چرخان می‌گذرد، دیده می‌شوند. در جلوی نور پراکنده شده، در حجم قابل رویت اتاقک ابر و از پنجره آن، بلورها قابل رویت هستند (شکل ۴).

در خلال آزمایش‌ها دما و توزیع اندازه قطره‌های ابر (نیروی اعمال شده به جوش‌آور) و سرعت برفک‌گیر تا جایی که ممکن باشد ثابت نگه داشته می‌شود. بلورهایی که در پرتو نور مشخص می‌شوند، در بسامدهای یک دقیقه‌ای پشت سر هم شمارش می‌شوند. متوسط خرده یخ شمارش شده با کم کردن بلورهای زمینه که عمدتاً توسط برفک‌زدن روی بازوهای برفک‌گیر و دیواره‌های اتاقک ابری یا به دلیل عایق نبودن اتاقک حاصل شده است، تصحیح می‌شود.

این بلورهای زمینه در دو آزمایش متوالی دیگری بدون حرکت میله چرخان و یکی پس از هر رشته آزمایش با حرکت بازوها بدون میله چرخان با همان سرعتی که آزمایش‌ها انجام شده، شمارش می‌شوند. هر دو آزمایش‌های اصلی و زمینه‌ای ۱۲ دقیقه طول می‌کشد و شمارش در هر دقیقه تقریباً ثابت باقی می‌ماند (دقت نتایج را ببینید)، و از این شمارشها میانگین گرفته می‌شود.

تعداد بلورهای عبور کرده از پرتو نور در ثانیه (A)، با تعداد کل بلورهای فرو افتاده در اتاقک (A_f) به وسیله ضرب (A) در عامل سنجه به دست می‌آید. این عامل نیز از تقسیم تمام حجم مؤثراتاقک ($V_e = 0.95 \times 1.5 \times 0.5m$) به حجم

زمان باقی مانده (در حدود ۲/۵ ساعت) به شرطی که اتاقک کاملاً عایق‌بندی باشد جوش‌آور می‌تواند بدون پر شدن دوباره، عمل کند. پایداری غلظت قطره‌ها، تعادل بین هسته‌های میعان جدید و قطره‌های فرو افتاده را نشان می‌دهد.

شکل ۱ چگونگی تغییرات طیف قطر قطره با خروجی جوش‌آور در نیروی ثابت اعمال شده ($600W$) را نشان می‌دهد. یک خروجی باریک با قطر ۱cm، غلظت بالایی از قطره‌ها را با یک توزیع اندازه باریکی تولید می‌کند، در صورتی که یک جوش‌آور در باز با خروجی وسیع، ابری با تعداد قطره‌های کمتر ولی طیف پهن‌تری از اندازه قطره‌ها را ایجاد می‌کند. در یک نیروی مشخص اعمال شده به جوش‌آور، با خروجی باریک، ابری با آب محتوای بیشتر ایجاد می‌شود که احتمالاً به دلیل زمان سکونت بیشتر قطره‌های کوچک در اتاقک است.

شکل ۲ طیف متوسط اندازه قطره‌های تولید شده توسط یک جوش‌آور در باز با قطر خروجی ۱۲cm در نیروی ثابت اعمال شده $600W$ را نشان می‌دهد. در این پژوهش میانگین آب مایع محتوای ابر $0.93gm^{-3}$ به کار گرفته شده که این با طیف قطره‌هایی که در شرایط مشابه توسط موساپ (۱۹۸۵) به دست آمده، قابل مقایسه است.

۲.۲ بر افزایش برفک و دیده‌بانی تولید خرده یخ هدف اصلی این پژوهش، مطالعه تولید خرده یخ در دمای ثابت سطح برفک ($5^{\circ}C$) با سرعت‌ها و شتاب‌های چرخشی مختلف می‌باشد. برفک‌گیرها دو میله فولادی به طول ۱۵cm و قطر ۰/۴cm هستند که می‌توانند در داخل ابر حول محور عمودی با شعاع ۱۵ یا ۲۵cm در سرعت‌های

بهرتر است در محاسبات عددی از آن استفاده شود (بروک، ساندرز^۵ و همکاران، ۱۹۹۷).

آهنگ برافزایش برفک (RAR) روی میله برفک‌گیر به EW و سرعت چرخش میله بستگی دارد به طوری که

$$RAR = EW \times V \text{ gm}^{-2}\text{s}^{-1} \quad (2)$$

۳.۲ اندازه‌گیری دمای سطح برفک و ابر

دمای ابر (T_c) از میانگین اندازه‌گیری‌های دو ترموکوبلی که در سمت راست و چپ میله‌های برفک‌گیر متحرک که تقریباً در همان ارتفاع میله‌ها، نصب شده، بدست می‌آید. T_c به سمت بالا افزایش می‌یابد. بیشترین اختلاف دما از بالا تا پایین میله‌های ۱۵cm، 0.5°C بوده است.

به دلیل آزاد شدن گرمای نهان ذوب، دمای سطح برفک برافزایش شده، بیشتر از محیط می‌شود. دمای سطح یخ نهشتی بوسیله مک لین و پین (۱۹۷۶) با در نظر گرفتن توازن بین آهنگ آزاد شدن گرما به وسیله قطرک‌های یخ زده و آهنگ انتقال انرژی به محیط توسط نیروهای همرفتی و تبخیر، محاسبه می‌شود.

برای برفک‌گیرهای استوانه‌ای، بهترین و کامل‌ترین معادله پیشنهاد شده عبارتست از:

$$RAR \{L_f + C_w(T_c - T_m) + C_i(T_m - T_s)\} / \pi = (3)$$

$$\chi R_e^{0.6} \{Pr^{1.3} K(T_s - T_c) + S_c^{1.3} L_v \delta(\rho_s - \rho_e)\} / 2R$$

و فرمول مشابهی که برای سنگ تگرگ‌های کروی به دست آمده به قرار زیر است

قابل رویت اتاقک ($V_v = 0.32 \times 0.5 \times 0.5 \text{ m}$) محاسبه می‌شود. بنابراین $\frac{V_e}{V_v} \approx 9$ لذا $A_f = 9 A$. از آنجا که زمان آزمایش‌ها برای اینکه آهنگ مشاهده بلورها در پرتو نور تقریباً ثابت بماند، به اندازه کافی طولانی (۱۲ دقیقه) انتخاب شده، می‌توان فرض کرد که آهنگ فروریزی بلورها برابر آهنگ تولید آنها است.

در پایان هر رشته آزمایش، برای محاسبه آهنگ برفک‌زنی (RR, gs^{-1}) در یک سرعت بخصوص، میله‌ها با دقت توزین می‌شوند. پهنای برفک بر روی میله‌های ۴mm قبل بر اساس زمان آزمایش اندازه‌گیری و متوسط‌گیری شده است. بنابراین قطر متوسط (D) برفک‌گیرها در هر سرعت مشخصی برای اندازه‌گیری آهنگ برافزایش برفک^۱، ($RAR \text{ gm}^{-2}\text{s}^{-1}$) به کار می‌رود.

$$RAR = RR/D \times L \quad (1)$$

که در اینجا، L طول میله است که مقدارش ثابت می‌باشد ($L = 0.15 \text{ m}$).

ساندرز^۲ و همکاران (۱۹۹۱) از آب مایع محتوای موثر^۳ EW، استفاده کرده‌اند که این خود بخشی از آب مایع محتوای^۴ ابر LWC است که توسط برفک‌گیر براساس کارایی برخوردش، جمع‌آوری شده است. بنابراین EW به اندازه جمع‌کننده، اندازه قطرک و به سرعت‌های نسبی آنها بستگی دارد. غالباً در مدل‌های عددی مقدار EW را معمولاً برابر LWC در نظر می‌گیرند، ولی این فرض برای گویچه‌های یخی کوچکی که با سرعت فروریزی یکی دو متر بر ثانیه فرو می‌افتند، قطعاً نادرست است. به علاوه EW به طور مستقیم از تحلیل‌های آزمایشگاهی به دست می‌آید بنابراین

1. Rime accretion rate 2. Saunders
3. Effective liquid water content
4. Liquid water content 5. Brooks and Saunders

از معادله (۳) برای شعاع مشخص، گستره‌ای از سرعت‌ها ($V \text{ms}^{-1}$)، دمای ابر به عنوان دمای محیط (T_c °C) و آب مایع محتوای موثر ابر ($EW \text{ gm}^{-3}$) است.

به دلیل مقادیر بالاتر RAR در سرعت‌های بیشتر برفک‌گیر، مجموع گرمای نهان آزاد شده به علت برافزایش قطرک‌ها و یخبندان آنها نیز افزایش می‌یابد. بنابراین برای اینکه دمای سطح برفک در دمای حدود 5°C ثابت نگه داشته شود، دمای ابر (T_c) و LWC، همان طوری که در جداول ۱ و ۲ نشان داده شده است، تنظیم شده‌اند.

۳ طیف اندازه قطره و اثر آن در تولید خرده یخ در هر رشته آزمایش در شرایط معین، طیف بهنجار شده اندازه قطره‌ها به وسیله مطالعه میکروسکوپی نمونه‌های شبیه‌سازی شده فرم‌وار با گذراندن ذرات ابر از روی اسلاید پوشیده شده با فرم‌وار ۳٪ در یک لوله که به اتاقک وصل شده، به دست می‌آید.

آب محتوای ابر (LWC) از تقسیم آب محتوای موثر ابر (EW) بر کارایی برخورد قطرک‌ها که برای متوسط وزنی حجم قطر قطرک، پهنای میله و سرعت آن بر طبق داده‌های کارایی برخورد لانگ مویر و بلاگت^۴ (۱۹۴۶) محاسبه شده، به دست می‌آید.

۱.۳ آزمایش‌های اولیه

موساپ (۱۹۷۸) در کار قبلی خود اعلام کرد که آهنگ تولید خرده یخ بر ثانیه (A) از رابطه زیر بدست می‌آید

$$A \approx N_L N_S$$

$$RAR \{L_f + C_w(T_c - T_m) + C_i(T_m - T_s)\} / 4 =$$

$$\chi R_e^{0.5} \{Pr^{1.3} k(T_s - T_c) + S_c^{1.3} L_v \delta(\rho_s - \rho_e)\} / 2R \quad (4)$$

سمت چپ این روابط آهنگ گرمای اعمال شده از قطرک‌های برافزایش شده در واحد سطح و سمت راست آنها، آهنگ گرمای داده شده به محیط اطراف به علت تهویه و تبخیر بر واحد سطح را ارایه می‌کند. χ مقدار ثابتی است که بسته به ناهمواری، برای استوانه 0.28 و برای کره 0.76 می‌باشد و مقدار آن با افزایش ناهمواری سطح و جریان‌های اغتشاشی، زیاد می‌شود. ساندرز و همکاران (۱۹۹۱) دریافتند که بهترین مقدار $\chi = 0.5$ برای آزمایش‌های انجام شده در UMIST توسط میله‌های برفک‌گیر می‌باشد.

RAR عبارتست از آهنگ برافزایش برفک که در واقع برابر حاصل ضرب سرعت برخورد (V) و آب محتوای موثر ابر (EW) می‌باشد. سایر ضرایب نیز به قرار زیر است

C_i گرمای ویژه یخ، C_w گرمای ویژه آب، δ ضریب انتشار مولکولی بخار آب در هوا، k رسانش گرمایی هوا، L_f گرمای نهان ذوب آب، L_v گرمای نهان تبخیر یخ، P_r عدد پранتل، R شعاع استوانه یا کره، R_e عدد رینولدز، S_c عدد اشمیت، T_c دمای محیط (دمای ابر)، T_m دمای ذوب یخ، T_s دمای متوسط سطح برفک برافزایش شده، ρ_e چگالی بخار آب محیط، ρ_s چگالی بخار آب محیط، ρ_s چگالی بخار آب در سطح برفک برافزایش شده و χ ضریب انتقال گرما. جداول (۱) و (۲)، یک رشته کامل از داده‌ها را نشان می‌دهد که شامل دمای سطح برفک (T_s °C) محاسبه شده

1. Prantel's number
3. Schmidt's number

2. Reynold's number
4. Longmuir and Blodgett

که در آن N_L و N_S به ترتیب تعداد قطره های بزرگ (قطر بزرگتر از $24/8 \mu m$) و قطره های کوچک (قطر کوچکتر یا مساوی $12/3 \mu m$) جاروب شده در ثانیه هستند.

در کار بعدی، موساپ (۱۹۸۵) به صورت واضح تری چگونگی تحت تاثیر قرار گرفتن تولید خرده یخ به وسیله آهنگ برافزایش قطره های کوچک (قطر کوچکتر یا مساوی $12/3 \mu m$) را هنگامی که رابطه بین تولید یخ ثانویه و سرعت برفک گیر در گستره سرعت های $0/55 ms^{-1}$ ، $1/8 ms^{-1}$ و $5/0 ms^{-1}$ باشد را کشف کرد. او همچنین پیشنهاد کرد که در سرعت های پایین، تولید خرده یخ بیشتر در $0/55 ms^{-1}$ و در سرعت های بالاتر، تولید خرده یخ بیشتر در سرعت های بیشتر از $5 ms^{-1}$ اتفاق می افتد.

۲.۳ تحقیقات جدید بر روی اثر طیف اندازه قطره ها

آزمایش های جدیدی در سرعت های $1/5 - 12 ms^{-1}$ و شتاب های $96g - 0/9g$ و در دمای نسبتاً ثابت سطح برفک ($5^{\circ}C \approx$) و طیف قطره ثابت (نیروی اعمال شده به جوش آور $600W$) و قطر برفک گیر ثابت ($D = 4 mm$) برای توسعه تحقیقات موساپ طراحی شد.

مقادیر N_L و N_S از توزیع اندازه قطره ها برای هر دسته آزمایش در سرعت های مختلف محاسبه شده است (جداول ۱ و ۲).

تعداد بلورهای یخ ثانویه تولید شده بر قطر بزرگ (قطر بزرگتر یا مساوی $25 \mu m$) بر افزایش شده (A/N_L) به صورت تابعی از N_S/N_L ، نسبت قطره های کوچک (قطر کوچکتر یا مساوی $12 \mu m$) به قطره های بزرگ بر افزایش شده، رسم

شده است.

نتایج آزمایشگاهی از (شکل ۵) روابط زیر را در هفت سرعت مختلف نشان می دهد

$$V = 1,5 ms^{-1} \quad A/N_L = 0,43 \times 10^{-3} + 0,78 \times 10^{-3} \log(N_S/N_L) \quad (5)$$

$$V = 3,0 ms^{-1} \quad A/N_L = 2,78 \times 10^{-3} + 5,31 \times 10^{-3} \log(N_S/N_L) \quad (6)$$

$$V = 4,5 ms^{-1} \quad A/N_L = 3,00 \times 10^{-3} + 5,77 \times 10^{-3} \log(N_S/N_L) \quad (7)$$

$$V = 6,0 ms^{-1} \quad A/N_L = 6,94 \times 10^{-3} + 17,61 \times 10^{-3} \log(N_S/N_L) \quad (8)$$

$$V = 7,5 ms^{-1} \quad A/N_L = 2,89 \times 10^{-3} + 2,80 \times 10^{-3} \log(N_S/N_L) \quad (9)$$

$$V = 9,0 ms^{-1} \quad A/N_L = 2,38 \times 10^{-3} + 8,04 \times 10^{-3} \log(N_S/N_L) \quad (10)$$

$$V = 12,0 ms^{-1} \quad A/N_L = 1,98 \times 10^{-3} + 5,55 \times 10^{-3} \log(N_S/N_L) \quad (11)$$

همانطور که جداول ۱ و ۲ نشان می دهند، این روابط برای دمای سطح برفک در حدود $5^{\circ}C$ به کار می روند. این جداول همچنین اثر مهم غلظت قطره های کوچک را در تولید خرده یخ وقتی که N_S/N_L کوچکتر باشد، را نیز نشان می دهند. دلیل این امر احتمال اساسی تولید خرده یخ که تابع شانس فرو افتادن یک قطره بزرگ بر روی یک قطره کوچک یخ زده است، می باشد.

خطوط در شکل ۵ نشان می دهند که تولید خرده یخ بر قطر بزرگ در سرعت $6 ms^{-1}$ دارای شیب بیشینه است و در سرعت های دیگر به شدت به شیب های کمتر نزول می کند.

با توجه به معادله های ۵، ۶ و ۷، مقادیر A/N_L برای مقادیر میانگین N_S/N_L در سرعت های $1/5$ و $3/0$ و $4/5 ms^{-1}$ به ترتیب برابر $4/3 \times 10^{-4}$

حدود 5°C مشاهده می شود، در خارج از این محدوده سرعت، به مقادیر کمتر که در جدول ۱ و ۲ نشان داده شده است، نزول می کند.

چون این مقادیر به مقادیر معینی از طیف قطرک های به کار رفته مربوط می شوند، لذا نمی توان آنها را به سادگی به صورت دیگر توزیع های مربوط به قطرک های ابر، به کار برد.

چنانچه در بالا تایید شد، آهنگ برافزایش قطرک های بزرگ (قطر بزرگتر یا مساوی $24.7\mu\text{m}$) در تولید خرده یخ نقش مهمی ایفا می کند. بنابراین مقایسه خرده یخ مشاهده شده در پرتو نور، در مقابل قطرک های بزرگ برافزایش شده، از طریق ترسیم مفیدتر خواهد بود. به همین دلیل مقادیر A/N_L به عنوان تابعی از سرعت در 5°C در شکل ۶ رسم شده است.

برای مطالعه بهتر فرایند H-M، مجموع خرده یخ های تولید شده توسط هر ۲ سانتی متر مربع برفک برافزایش شده، به عنوان تابعی از سرعت، تقریباً با همان خصوصیات شکل ۶ در شکل ۷ نشان داده شده است.

شکل های ۶ و ۷ عمدتاً از دو شاخه صعودی و نزولی تشکیل شده است که مبین یک بیشینه کلی در 6ms^{-1} و یک بیشینه فرعی در شاخه صعودی در 3ms^{-1} است. در 7.5ms^{-1} تولید خرده یخ به مقادیر کمتری نزول می کند و در سرعت های بالاتر، آهنگ کاهش خرده یخ به آرامی کاسته می شود و این روند تا سرعت 12ms^{-1} ادامه دارد.

۵ اثر چگالی بر ساختمان برفک برافزایش شده روی جمع کننده های استوانه ای در سرعت های برخورد کم و زیاد

برای درک بهتر فرآیند رشد سنگ تگرگ،

2.88×10^{-3} و 2.54×10^{-3} می باشد. در سرعت 6.1ms^{-1} مقدار میانگین بیشینه A/N_L برابر 6.0×10^{-3} است که این به آن معنی است که به طور میانگین از هر ۱۶۶ قطره بزرگ برافزایش شده، یک خرده یخ جهیده است. معادله های ۹، ۱۰ و ۱۱ در سرعت های 7.5 ، 9.1 و 12.1ms^{-1} به ترتیب مقادیر A/N_L را 2.83×10^{-3} ، 2.33×10^{-3} و 2.12×10^{-3} نشان می دهد.

۴ تولید خرده یخ ثانویه در سرعت ها و

شتاب های مختلف در دمای ثابت سطح برفک

دو میله با قطر ($D = 4\text{mm}$) و شعاع چرخش ($R = 15\text{cm}$ و 25cm) برای جاروب کردن قطرک های آب ابر سرد در سرعت های 1.5 ، 3.1 ، 4.5 ، 6.1 ، 7.5 ، 9.1 و 12.1ms^{-1} به کار رفته است. شتاب های اعمال شده برای $R = 15\text{cm}$ برای هر یک از این سرعت ها به ترتیب برابر 1.5 ، 6.1 ، 13.5 ، 24.1 ، 37.5 ، 54.1 ، 96.1 و برای شعاع $R = 25\text{cm}$ ، به ترتیب برابر 0.9 ، 3.6 ، 8.1 ، 14.4 ، 22.5 ، 32.4 و 57.6 بوده است. همان طور که در ۲.۲ ذکر شد، به علت تغییر ضخامت برفک بر روی میله های برفک گیر با قطر 4mm ، مقادیر میانگین D برای هر سرعت مشخص محاسبه شده است (جدول ۱ و ۲ را ببینید). بنابراین برای هر مقدار میانگین D در هر سرعت مشخص، کارآیی جمع آوری لانگ مویر و بلاگت (۱۹۴۶) به کار رفته است.

اگر تولید خرده یخ بر میلی گرم برفک برافزایش شده بعنوان تابعی از سرعت رسم شود، یک بیشینه تولید در حدود ۷۱ (برای شعاع $R = 15\text{cm}$) و ۶۴ (برای شعاع $R = 25\text{cm}$) خرده یخ بر میلی گرم برفک در سرعت 6ms^{-1} در دمای سطح برفک

فرآیند برافزایش، مخصوصاً در مورد جمع کننده‌های چرخان، قبلاً مطالعه شده است. ساختمان گویچه‌های تگرگ، حرکت آنها را در ابر که تحت تاثیر چرخش یا غلتیدن است مشخص می‌کند به ویژه موقعی که سرعت‌ها و شتاب‌های بالا اعمال می‌شود. اندازه‌گیری چگالی یخ روی میله‌های چرخان و یا ذراتی که به صورت آزاد فرو می‌افتند توسط مک لین^۱ (۱۹۶۲) و برای استوانه‌ای ثابت نیز توسط لوی و پرودی^۲ (۱۹۹۱) انجام شده است.

چگالی یخ نهشتی گستره‌ای بین $0.7-0.9 \text{ g cm}^{-3}$ دارد و با افزایش مقادیر سرعت باد (سرعت برخورد)، دمای محیط، قطر قطره و غلظت آب مایع در ابر سرد افزایش می‌یابد ولی با افزایش پهنای برفک‌گیر کاهش می‌یابد.

مک لین و پین (۱۹۶۷)، فرمولی به دست آوردند که رابطه نسبتاً ساده‌ای را بین چگالی ρ (g cm^{-3})، شعاع حجمی میانه r (برحسب میکرون)، سرعت برخورد V_0 (ms^{-1}) و دمای متوسط سطح برفک T_s ($^{\circ}\text{C}$) نشان می‌دهد.

$$\rho = 0.11(-tV_0 / T_s)^{0.76} \quad (12)$$

در سیستم یک‌گانه‌های c.g.s ضریب تناسب برابر ۳/۶۴ خواهد بود. این رابطه برای T_s بین ۵- و 20°C و ضریب مک لین $X = -(r V_0 / T_s)$ بین ۰/۸ تا حدود ۱۰ صادق است.

این رابطه برای دمای سطح برفک نزدیک 0°C ، پیچیده می‌شود به ویژه موقعی که دمای محیط نیز نزدیک 0°C باشد.

در دماهای کمتر از -20°C ، جرم حجمی فقط

به 0.7 بستگی دارد. به عنوان اولین تقریب، چگالی که توسط معادله (۱۲) داده شده برای مقادیر X کمتر از ۱۷ صادق است، و برای مقادیر بیشتر، مقدار آن برابر 0.9 g cm^{-3} خواهد شد (خط چین مستقیم در شکل ۸). برای مقادیر X بزرگتر از ۱۰، که چگالی نمی‌تواند به صورت مشخصی کم شود، منحنی کم کم تخت می‌شود. برای محاسبه مقادیر چگالی براساس داده‌های آزمایشگاهی کار اخیر و مقادیری که در جدول ۳ آرایه شده، خطی که بر داده‌های پراکنده مک لین (۱۹۶۲) در T_s ‌های مختلف برازش می‌یابد، مورد استفاده قرار گرفته است.

کلارک^۳ (۱۹۴۸)، اولین فردی بود که برفک نهشتی را به دو خانواده اصلی تقسیم کرد. خانواده‌های یخ شفاف و خانواده‌های برفک که گروه اول ظاهری براق و شفاف دارد ولی گروه دوم فاقد چنین ظاهری هستند. این دو نوع یخ خودشان به شش زیر مجموعه تقسیم میشوند: یخ زلال، که به صورت مجازی در آن هوایی محصور نشده است، یخ شفاف، که مقادیر متوسطی از هوا بصورت حبابهای بزرگی در آن محصور شده است، یخ شیری، که در آن مقادیر زیادی هوا به صورت حباب‌های ریزی ضمیمه شده، برفک کدر، تیره و سفید است و به جای اینکه شکافته شود خرد می‌شود، برفک هسته‌ای شکل که ظاهری مثل ذرات ذرت روی چوب ذرت دارد و برفک پر مانند که ظاهری مانند برفک هسته‌ای شکل دارد ولی بافتی بازتر و شکننده‌تر دارد.

کلارک نشان داد که در این محدوده نوع یخ به چگالی بستگی دارد (چگالی از 0.9 g cm^{-3} برای یخ زلال تا حدود 0.2 g cm^{-3} برای برفک پر

مانند کاهش می‌یابد).

شفافیت یخ نهستی برای دما و آب مایع محتوای ابر، عمدتاً به سرعت برخورد بستگی دارد. اگر سرعت‌های برخورد قطرات کم باشد مکان‌های ابتدایی نهشت، محل‌های مناسبی برای رشد به علت افزایش منطقه‌ای کارایی می‌شود، همینطور در دماهای پایین‌تر بافت برفک طبیعی پرماند و شکستنی است و قطرک‌ها به صورت منفرد یخ می‌بندند. در اثر افزایش سرعت برخورد یا افزایش اندازه قطرک‌ها مکان‌های اولیه نهشت کمتر مناسب می‌شود، لذا شکاف‌های بین پره‌ها کم کم پر می‌شود و پره‌ها کلفت‌تر شده و ظاهری شبیه دانه‌های ذرت روی چوب آن را پیدا می‌کند. در سرعت‌های بالاتر بافت فشرده‌تر و چگالی بیشتری پیدا می‌کند و دیگر به شکل پریا دانه ذرت نیست بلکه به شکل توده‌ای غیر شفاف می‌شود. اعضاء خانواده برفک در یک گستره وسیعی از جرم حجمی بسته به شرایط حاکم، شکلی از غیر شفاف، دانه ذرتی و پر مانند خواهند داشت که به ترتیب دارای چگالی 0.7 تا 0.9 ، 0.6 تا 0.8 و 0.1 تا 0.6 gcm^{-3} خواهند بود (مک‌لین^۱، ۱۹۶۲، لوی و همکاران^۲، ۱۹۹۱).

۶ بحث و نتایج

هدف اصلی این پژوهش مطالعه تولید ذرات ثانویه یخی در سرعت‌های برفک‌گیر بالاتر از 3 cm^{-1} بوده است. لذا سایر متغیرها تا جایی که امکان داشت ثابت نگه داشته شده است (مثلاً، دمای سطح برفک $T_s \approx -5^\circ \text{C}$ ، شعاع حجمی میانه قطرک $r \approx 11/2 \mu\text{m}$ ، با استفاده از یک جوش آور باز با خروجی 12 cm و نیروی اعمال شده

600 W). در نتیجه در دمای سطح برفک ثابت و شعاع حجمی میانه قطرک، چگالی برفک و در نتیجه شکنندگی برفک فقط بستگی به سرعت برخورد دارد (مک‌لین^۱، ۱۹۶۲، لوی و همکاران^۲، ۱۹۹۱).

برای آسان کردن مطالعه تولید خرده یخ در شکل‌های ۵، ۶ و ۷ سرعت‌های برفک‌گیر 12 ms^{-1} - $1/5$ به ناحیه تقسیم می‌شود.

ناحیه (۱)، سرعت‌های 3 ms^{-1} - $1/5$

روند تولید خرده یخ در این ناحیه افزایش می‌یابد و بیشینه تولید خرده یخ در 3 ms^{-1} مشاهده می‌شود که با نتایج گزارش شده توسط موساپ (۱۹۸۵)، و فوستر و هالت (۱۹۸۲) همخوانی دارد. رشد بافت نازک و شکننده پر مانند برفک در این ناحیه ($\rho = 0.27 - 0.45 \text{ gcm}^{-3}$)، جدول ۳ را ببینید) با روند افزایش تولید خرده یخ که با افزایش سرعت برفک‌گیر امکان‌پذیر است، ادامه می‌یابد.

ناحیه (۲)، سرعت‌های $4/5 \text{ ms}^{-1}$ - ۳

تولید خرده یخ در این ناحیه عمدتاً با شیب ملایمی کاهش می‌یابد. چگالی برفک در این ناحیه از $0.45 - 0.54 \text{ gcm}^{-3}$ افزایش می‌یابد. در نتیجه بافت شاخه‌ای برفک پر مانند نازک، کلفت‌تر و قوی‌تر می‌شود تا مکان‌های مناسب‌تری را برای فرآیند خرده یخ در این سرعت‌ها به وجود آورند.

ناحیه (۳)، سرعت‌های 6 ms^{-1} - $4/5$

در این ناحیه یک بیشینه تیزی از تولید خرده یخ در 6 ms^{-1} مشخص می‌شود (شکل ۶ و ۷). توضیح چنین بیشینه‌ای به قرار زیر است در این

خرده یخ اساسی است.

مطالعه فرآیند H-M در گستره وسیعی از سرعت‌ها از ۱/۵ تا ۱۲ms^{-۱} با شعاع‌های دوران ۱۵ و ۲۵cm، شتاب‌های چرخشی از ۰/۹ تا ۹۶g را اعمال می‌کند. شکل‌های ۶ و ۷ نشان می‌دهد که در یک سرعت ثابت، تغییر شتاب چرخشی اثر قابل ملاحظه‌ای بر روی تولید خرده یخ ندارد ولی این سرعت‌ها و شتاب‌های بالا می‌تواند برای شبیه سازی حرکت و چرخش‌های گویچه‌ها در ابرهای کومه‌ای به کار رود.

تحلیل‌های اخیر دیدبانی‌های هواپیمایی و زمینی از ابرهای کومه‌ای تابستانی روی نیومکزیکو (بلیث و لاتام، ۱۹۹۷)، با بیشینه ۵۰ خرده یخ بر میلی‌گرم برفک بر افزایش شده در هنگام عبور از مرز دمایی H-M (۳- تا ۸-°C) با سرعت بالا روی حدود ۵ms^{-۱} می‌تواند چهارچوبی مناسب برای مقایسه کارهای اخیر باشد. سرعت بالارو در آنجا از ۲ms^{-۱} در پایه ابر به بیشینه ۱۰ms^{-۱} در ارتفاع z = ۷ km رسیده است.

ذرات گویچه برای گذر از مرحله رشدتر و تبدیل شدن به سنگ تگرگ باید با سرعت‌های فروریزی بالا (بیشتر از ۵ms^{-۱}) در ناحیه‌ای از ابر با LWC بالا عبورکنند به طوری که دمای سطح آن به حدود ۰°C افزایش یابد. این ذره‌ها در ابتدا دارای دمای سطحی در گستره ۲- تا ۸-°C بوده‌اند و در این مرحله بدون توجه به دمای ابر قادر به تولید ذره‌های ثانویه یخی بوده‌اند.

اخیرا محققین در هواپیمای تحقیقاتی هواشناسی هرکولوس، بوور و همکاران^۱ (۱۹۹۶)، غلظت‌های زیادی از بلورهای یخی ستونی کوچک را در ابرهای پوشنی در ناحیه دمایی H-M (۳- تا

ناحیه چگالی برفک ۰/۶gcm^{-۳}-۰/۵۴ تغییر می‌کند ولی تغییرات قابل ملاحظه‌ای در ساختار برفک در ناحیه (۲) و (۳) وجود ندارد در حالی که سرعت برفک‌گیر دو برابر شده، بنابراین در شرایط موجود دمای سطح برفک (T_s ≈ -۵°C) و شعاع حجمی میانه قطرک‌ها (r ≈ ۱۱/۲ μm)، تولید خرده یخ به بهینه مقدارش که در حدود ۷۰ خرده یخ بر میلی‌گرم برفک است می‌رسد.

ناحیه (۴)، سرعت‌های ۶-۷/۵ms^{-۱}

در این ناحیه چگالی متوسط برفک ۰/۷۱gcm^{-۳}-۰/۶ و سرعت برخورد ۶-۷/۵ms^{-۱} افزایش می‌یابد. ظاهر بافت برفک از حالت پر به هسته‌ای شکل که ظاهری شبیه دانه‌های ذرت بر روی چوبش می‌باشد تغییر می‌کند. شکنندگی بافت برفک به دلیل تمایل به پر شدن شکاف‌های بین پرها در این سرعت‌های بالا، شدیداً کم می‌شود. در نتیجه مکان‌های مناسب نهشت برای تولید خرده یخ توسط فرآیند H-M کمتر پیدا می‌شود.

ناحیه (۵)، سرعت‌های ۷/۵-۱۲ms^{-۱}

در این ناحیه چگالی متوسط ۰/۸۲-۰/۷۱gcm^{-۳} و سرعت برخورد ۷/۵-۱۲ms^{-۱} افزایش می‌یابد. بافت برفک کم‌کم ضخیم و ضخیم‌تر می‌شود تا عاقبت ظاهری بشکل توده کدر هسته‌ای شکل پیدا کند. بنابراین تولید خرده یخ در این ناحیه به تدریج به همان دلیل که در ناحیه (۴) ذکر شد، کاهش می‌یابد. به‌علاوه باید متذکر شد که در این سرعت‌ها و شتاب‌های بالا قطرک‌های بیشتر تمایل به پخش شدن روی سطح یخی دارند تا تشکیل یک پل باریک بدهند که این برای تولید

سرعت‌های بالاتر از 6ms^{-1} دقت شمارش خرده یخ‌ها کاهش می‌یابد و خطای احتمالی به ۲۱٪ در 12ms^{-1} افزایش می‌یابد که عمدتاً به علت ابری شدن و یخبندان داخلی پنجره اتاقک سرد می‌باشد.

(ب) اندازه‌گیری تعداد قطره‌های برافزایش شده در ثانیه

طیف اندازه قطره‌های بهنجار شده در ابر، توسط تحلیل‌های میکروسکوپی اسلایدهایی که با محلول فرم‌وار ۳٪ پوشیده شده و در معرض ابر، به وسیله مکش ابر از یک لوله جداگانه که به اتاقک متصل شده، اندازه‌گیری می‌شود. چشمه اصلی خطا در استفاده از این روش از اختلاف بین کارایی جمع‌آوری قطره‌های کوچک و بزرگ ناشی می‌شود. قطره‌های کوچک اکثراً در نواحی حاشیه‌ای به اسلاید برخورد می‌کنند در صورتیکه قطره‌های بزرگتر در نواحی مرکزی به اسلاید برخورد می‌کنند. برای بهبود تحلیل‌های میکروسکوپی، نمونه‌ها به طوری بررسی می‌شوند که مسیر تقطیع و میدان دید قطره‌ها بر روی اسلایدها، در نواحی مرکزی و نواحی حاشیه‌ای اسلایدها تقریباً یکسان باشد.

برای اطمینان بیشتر، طیف قطره‌های آزمایش‌های زیادی مورد مطالعه قرار گرفته است که بر طبق آنها شش اندازه‌گیری برای هر دسته آزمایش و در مجموع مطالعه در حدود ۱۲۰ اسلاید میکروسکوپی را شامل می‌شود. در بدترین حالات خطای احتمالی $13/6\%$ در N_L و $14/9\%$ در نسبت N_S/N_L وجود داشته است.

(ج) از (الف) و (ب) دیده می‌شود که در بدترین حالات (سرعت $1/5\text{ms}^{-1}$) مقدار A/N_L می‌تواند خطای احتمالی برابر 34% را نشان دهد.

8°C) ثبت کرده‌اند. بیشترین غلظت‌های با مقدار تقریباً $1^{-1} 500$ با قطر کوچکتر از $125\ \mu\text{m}$ در سطح 6°C اتفاق افتاده و در ضمن یک بیشینه دیگر نیز در 15°C دیده شده است.

میسون (۱۹۹۸) پیشنهاد کرده است که غلظت‌های بالا از بلورهای کوچک با قطر کوچکتر از $125\ \mu\text{m}$ که در سطح 15°C گزارش شده، خرده یخ‌هایی هستند که از ناحیه H-M منشاء گرفته و در غیاب ابر آبدار بین 8 تا 12°C به آرامی رشد کرده‌اند ولی بعداً در اثر ورود به ابرهای همرفتی که دارای آب و سرعت‌های بالاروی بزرگ‌تر از تقریباً 1ms^{-1} بوده، رشد سریع‌تری انجام شده است.

نتایج به دست آمده در این قسمت نشان می‌دهد که هنوز نکات مبهمی در رابطه با فرآیند H-M با در نظر گرفتن محدودیت‌های دما، سرعت، اندازه قطره و آب مایع محتوای ابر وجود دارد که به تحقیقات نظری و کارهای آزمایشگاهی، در آزمایشگاه و در ابرهای طبیعی نیازمند است.

۱.۶ دقت نتایج

(الف) اندازه‌گیری ذرات یخی ثانویه تولید شده در ثانیه تعداد خرده یخ‌های مشاهده شده در پرتو نور (A)، برای شمارش‌های یک دقیقه‌ای در ۱۲ دقیقه پشت سر هم برای آزمایش‌های اصلی و هم زمینه‌ای آزمون شده است.

در دمای نسبتاً ثابت دمای سطح برفک (5°C) $T_S \approx$ آزمایش‌ها در $1/5\text{ms}^{-1}$ خطای احتمالی 31% را برای شمارش کریستالها نشان می‌دهد. در سرعت‌های بالاتر تا 6ms^{-1} با افزایش آهنگ تولید، دقت به طور مداوم افزایش می‌یابد در نتیجه خطای احتمالی به 11% در 6ms^{-1} کاهش می‌یابد. در

د) اندازه‌گیری‌های دما

دمای ابر (T_c) در هر آزمایش از میانگین قرائت ۱۲ دقیقه پشت سر هم (هر دقیقه یک بار) دو ترموکوپل که در سمت راست و چپ میله برفک گیر و در حدود همان ارتفاع میله‌ها نصب شده، بدست آمده است. این ترموکوپل‌ها بوسیله یک دماسنج جیوه‌ای با دقت $\pm 0.2^\circ\text{C}$ کالیبره شده‌اند. برای نایل شدن به دمای سطح برفک ثابت برابر $T_s = -5^\circ\text{C}$ ، موقعی که سرعت برفک‌گیر افزایش می‌یابد بسته به سرعت برفک‌گیر، دمای ابر باید اندکی پایین‌تر آورده شود (جدول ۱ و ۲ را ببینید). مجموع دقت دما در مجموعه آزمایش‌ها بین $\pm 0.4^\circ\text{C}$ تا $\pm 0.49^\circ\text{C}$ با میانگین $\pm 0.45^\circ\text{C}$ بوده است.

برفک در سرعت بالاروی 6ms^{-1} مشاهده شده که احتمالاً به دلیل تغییر بافت برفک از شکل پر به شکل هسته‌ای در سرعت‌های بالاتر می‌باشد (شکل‌های ۷ و ۹).

هر چند در این تحقیقات سرعت‌های بین $1/5$ تا 12ms^{-1} با شعاع‌های چرخش ۱۵ و 25cm به کار رفته که شتاب‌های چرخشی از 0.9 تا 96g را ایجاد می‌کند (جدول ۱ و ۲ را ببینید)، ولی دز هر سرعت مشخص شده شتاب چرخشی اثر قابل ملاحظه‌ای بر تولید خرده یخ ندارد (دقت نتایج را ببینید).

۷ نتیجه‌گیری

هدف اصلی این پژوهش مطالعه اثر سرعت بالاروی ابر روی فرآیند H-M در دمای سطح برفک ثابت $T_s \approx -5^\circ\text{C}$ بوده است.

تولید خرده یخ ثانویه در خلال رشد برفک در ابر سرد در حدود -5°C ، اساساً به برافزایش قطرک‌های بزرگ (قطر بزرگتر یا مساوی $25\mu\text{m}$) و همچنین آهنگ برافزایش قطرک‌های ریز (قطر کوچکتر یا مساوی $12\mu\text{m}$) بستگی دارد. رابطه بین تولید خرده یخ بر قطرک‌های بزرگ در گستره وسیع‌تری از سرعت‌های برخورد نسبت به سابق (از 12ms^{-1} تا $1/5$) ارایه شده (معادلات ۵ تا ۱۱) و رسم شده است (شکل ۶).

آزمایش‌ها با تایید کارهای محققین گذشته یک بیشینه فرعی با حدود ۳۵ تا ۴۰ خرده یخ بر میلی‌گرم برفک در سرعت بالاروی 3ms^{-1} نشان می‌دهد. مضافاً برای اولین بار در دنیا، یک بیشینه دیگر با مقدار بهینه ۶۰ تا ۷۰ خرده یخ بر میلی‌گرم

جدول ۱. جزئیات تولید ذرات یخ ثانویه در سرعت‌های مختلف برای $R = 15 \text{ cm}$

V [ms^{-1}]	D [mm]	a [g]	T [$^{\circ}\text{C}$]	T [$^{\circ}\text{C}$]	A [s^{-1}]	A [s^{-1}]	RR [gs^{-1}]	RAR [$\text{gm}^{-1}\text{s}^{-1}$]	EW [gm^3]	A/RR [mg^{-1}]	A/RAR [$\text{cm}^{-1}\text{mg}^{-1}$]	Splinters per mg time	N_0/N_1	A/N_1 [s^{-1}]	LWC [gm^{-3}]
1.5	4.00	1.5	-5.4	-4.9	0.013	0.117	5.47×10^{-4}	0.456	0.30	0.21	2.57	30.79	30/32	4.06×10^{-4}	0.90
3.0	4.30	6.0	-5.6	-4.7	0.060	0.510	1.96×10^{-3}	1.630	0.54	0.26	3.13	40.38	22/22	2.73×10^{-3}	1.04
4.5	4.83	13.5	-5.6	-4.6	0.070	0.640	2.98×10^{-3}	2.480	0.53	0.21	2.56	37.10	23/27	2.59×10^{-3}	0.94
6.0	5.12	24.0	-5.7	-4.6	0.150	1.350	3.50×10^{-3}	2.920	0.49	0.39	4.62	71.03	24/31	4.84×10^{-3}	0.82
7.5	5.40	37.5	-5.5	-4.3	0.070	0.660	4.75×10^{-3}	3.960	0.53	0.14	1.66	26.89	21/27	2.59×10^{-3}	0.81
9.0	5.80	54.0	-5.7	-4.6	0.060	0.570	4.66×10^{-3}	3.890	0.43	0.12	1.46	25.40	29/33	1.82×10^{-3}	0.70
12.0	6.00	96.0	-5.8	-4.7	0.050	0.450	5.41×10^{-3}	4.510	0.38	0.08	1.00	18.00	24/29	1.72×10^{-3}	0.69

شتاب نسبت به g ($g = 10 \text{ ms}^{-2}$) = a ، قطر میله چرخان (که برای آزمایش‌های مربوط به عنوان ضخامت متوسط بر یک تصمیم شده) = D ، سرعت میله چرخان = V ، شعاع چرخش = R میانگین تعداد خنده
 یخ‌های مشاهده شده در پرتو نور و برای مجموع حجم موثر اتاقک پس از کاهش میانگین بلورهای زمینه = A_H و A_H و A_H دمای سطح بر یک (محاسبه شده از مک این و بین $T_s = 1967$)، دمای ابر T ، درصد قطره‌های بزرگ
 (قطر کوچکتر یا مساوی $74 \mu\text{m}$) و کوچک (قطر کوچکتر یا مساوی $12 \mu\text{m}$) غوطه‌ور شده در ثانیه N_0 ، میانگین آنگ بزرگ بر یک زنی = RAR ، میانگین آنگ بزرگ زنی = R ، میانگین آب مایع موثر
 محتوای ابر = EW آب مایع محتوای ابر = LWC

اثر سرعت بالاروی ابر در تولید خرده یخ
جدول ۲. جزئیات تولید ذرات یخ ثانویه در سرعت های مختلف برای $R = ۲۵ \text{ cm}$

V [ms^{-1}]	D [mm]	a [g]	T_c [$^{\circ}\text{C}$]	T_s [$^{\circ}\text{C}$]	T [$^{\circ}\text{C}$]	A_s [S^{-1}]	A_t [S^{-1}]	RR_1 [g^{-1}]	RAR_1 [$\text{gm}^{-2}\text{S}^{-1}$]	EW_3 [gm^{-3}]	A_v/RAR_1 [$\text{cm}^3 \text{mg}^{-1}$]	Splinters per mg time	N_s/N_t	AN_t [S^{-1}]	LWC [gm^{-3}]
1.5	4.00	0.9	-5.6	-5.00	0.1125	0.0125	0.1125	7.76×10^{-4}	0.647	0.43	0.145	1.74	20.88	4.166×10^{-4}	1.31
3.0	4.26	3.6	-5.8	-4.85	0.0500	0.0500	0.4500	2.13×10^{-3}	1.770	0.59	0.210	2.54	32.46	2.000×10^{-3}	1.24
4.5	4.84	8.1	-5.6	-4.50	0.0700	0.0700	0.6300	3.30×10^{-3}	2.650	0.59	0.190	2.38	34.56	2.500×10^{-3}	1.08
6.0	5.45	14.4	-5.4	-4.30	0.1300	0.1300	1.1700	3.62×10^{-3}	3.010	0.50	0.320	3.89	63.60	5.650×10^{-3}	0.91
7.5	5.83	22.5	-5.7	-4.35	0.0700	0.0700	0.6300	5.10×10^{-3}	4.260	0.57	0.120	1.48	25.88	3.040×10^{-3}	1.00
9.0	6.10	32.4	-6.1	-4.80	0.0600	0.0600	0.5400	5.37×10^{-3}	4.480	0.50	0.100	1.21	22.14	2.730×10^{-3}	0.82
12.0	6.32	57.6	-6.5	-5.20	0.0500	0.0500	0.4500	6.26×10^{-3}	0.210	0.43	0.070	0.86	16.30	2.083×10^{-3}	0.77

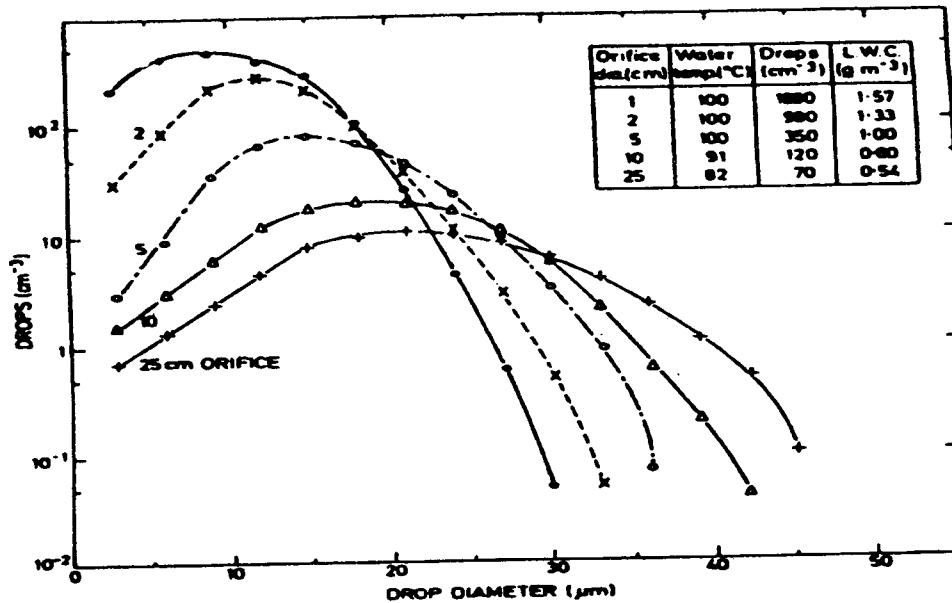
شتاب نسبت به g ($g = ۱۰ \text{ ms}^{-2}$)، a ، قطر میله چرخان (که برای آزمایش های مربوطه به عنوان ضخامت متوسط برفک تصحیح شده) D ، سرعت میله چرخان V ، شعاع چرخش R ، میانگین تعداد خورده یخ های مشاهده شده در پرتو نور و برای مجموع حجم موثر اتاقک پس از کاهش میانگین بلورهای زمینه A_t و A_s ، دمای سطح برفک (محاسبه شده از یک لاین و بین $T_s = (۱۹۶۷)$ دمای ابر T_c ، درصد قطره های بزرگ (قطر کوچکتر یا مساوی $۲۴ \mu\text{m}$) و کوچک (قطر کوچکتر یا مساوی $۱۲ \mu\text{m}$) غوطه ور شده در ثانیه N_s ، میانگین آهنگ بر افزایش برفک RAR ، میانگین آهنگ برفک زنی R ، میانگین آب مایع موثر محتوای ابر EW = مایع محتوای ابر LWC

جدول ۳. مقادیر محاسبه شده چگالی‌های برفک با توجه به شکل ۸

$v_0 \text{ ms}^{-1}$	$r \text{ } \mu\text{m}$	$T_s \text{ } ^\circ\text{C}$	$X \text{ } -\mu\text{m sec}^{-1}\text{ } ^\circ\text{C}$	$\rho \text{ g cm}^{-3}$
1.5	11.2	-5.0	3.36	0.27
3.0	11.3	-4.8	7.06	0.45
4.5	11.3	-4.6	11.05	0.54
6.0	11.0	-4.5	14.67	0.60
7.5	10.9	-4.4	18.58	0.71
9.0	11.0	-4.7	21.06	0.76
12.0	11.4	-4.9	27.91	0.82

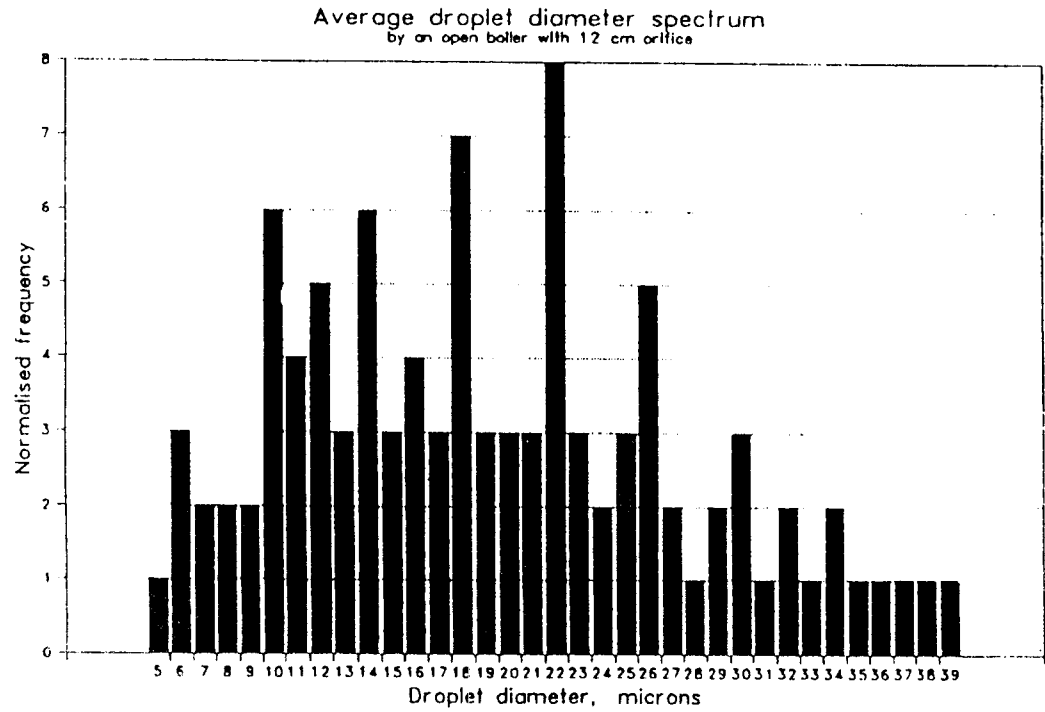
میانگین دمای سطح برفک T_s ، شعاع حجمی میانه قطره r ، سرعت برخورد v_0

چگالی برفک ρ و ضریب مک لین X

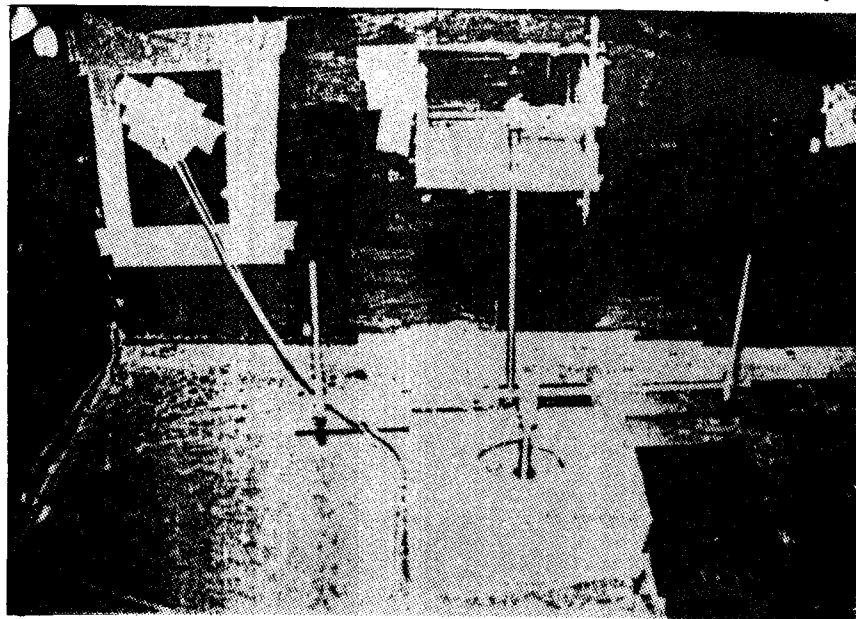


شکل ۱. طیف قطرک تولید شده با اندازه‌های متفاوت خروجی جوش‌آور در نیروی اعمال شده ثابت (۶۰۰W) از موساپ

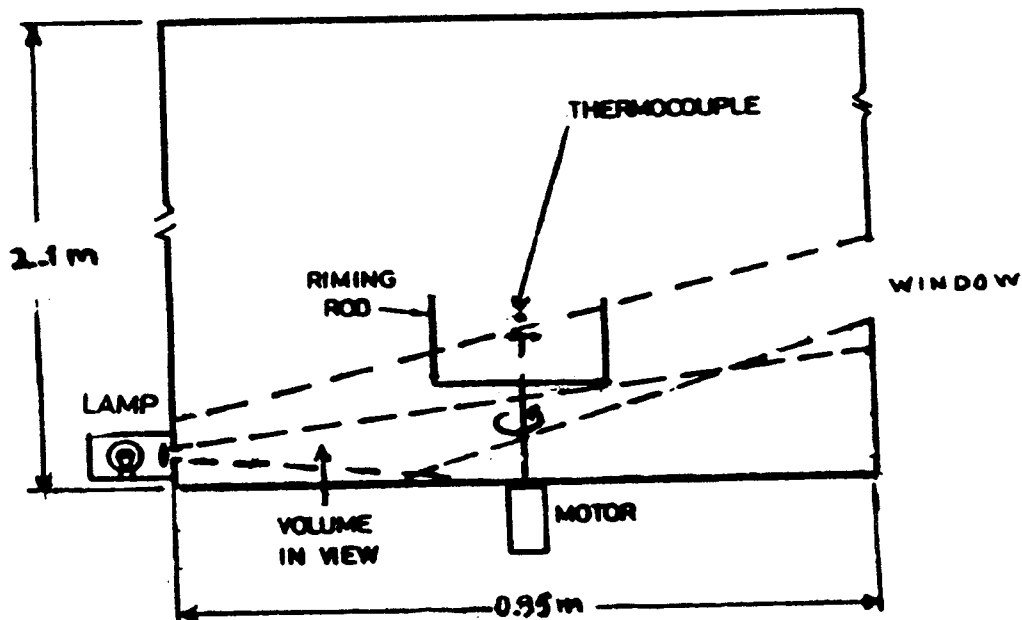
(۱۹۸۵).



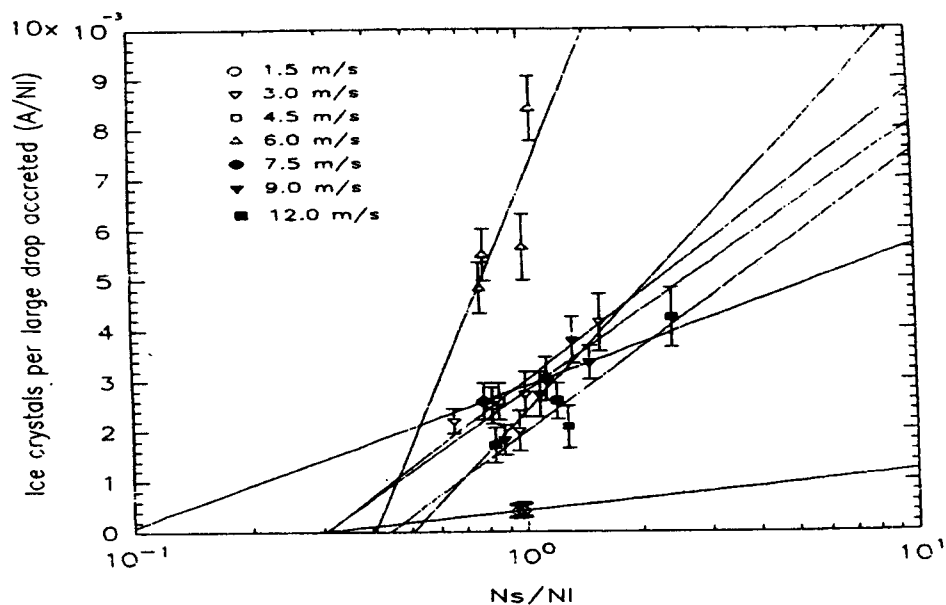
شکل ۲. طیف اندازه قطره‌های تولید شده بوسیله یک جوش‌آور در باز با قطر ۱۲cm در نیروی اعمال شده ثابت ۶۰۰W با آب مایع محتوای 0.93 gm^{-3}



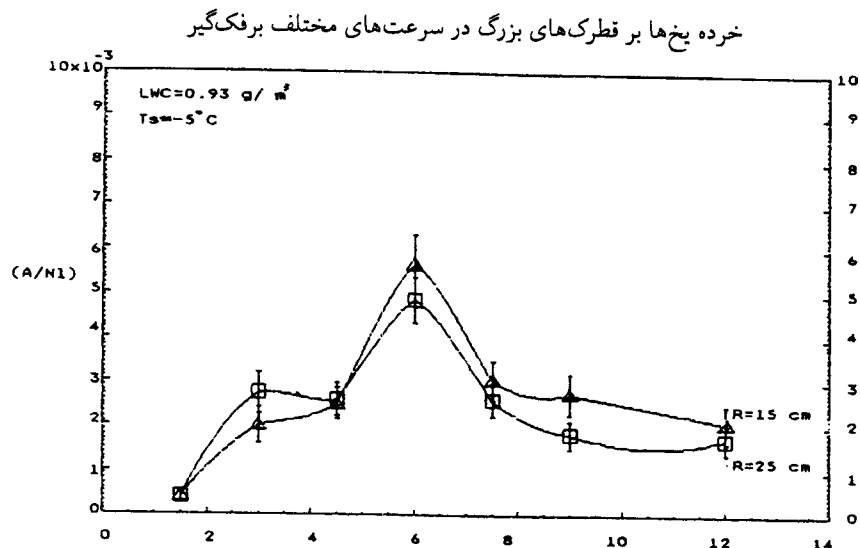
شکل ۳. تصویری از دستگاه میله چرخان که در اتاقک ابر نصب شده است



شکل ۴. طرح نمایشی اتاقک ابر و تجهیزات وابسته آن

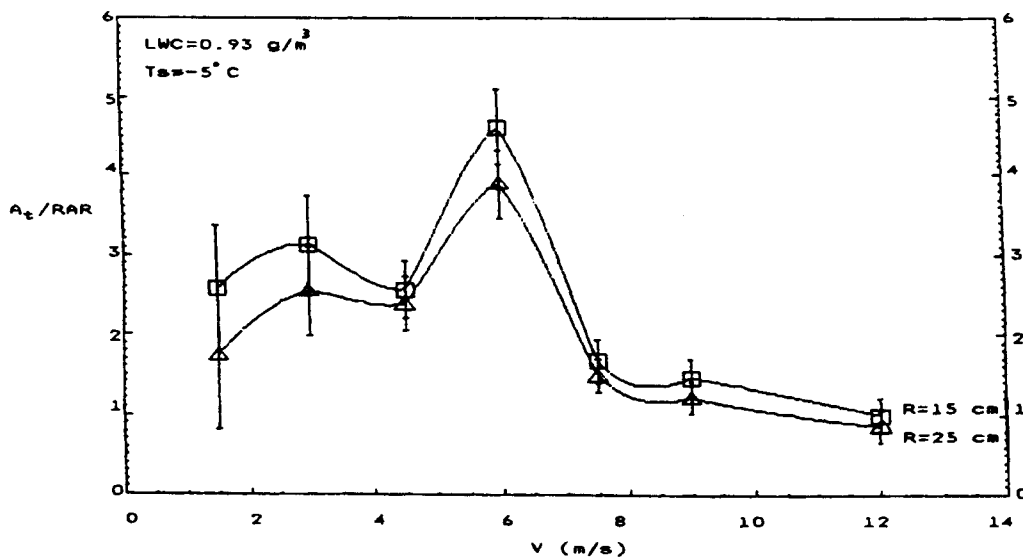


شکل ۵. تعداد خرده یخ‌های ثانویه تولید شده بر قطرک بزرگ (قطر کوچکتر یا مساوی $25\mu\text{m}$) بر افزایش شده (A/N_L) ، که براساس تابع N_s/N_L نسبت قطرک‌های کوچک (قطر بزرگتر یا مساوی $12\mu\text{m}$) به قطرک‌های بزرگ برافزایش شده، رسم شده است. خطوط عمودی خطای احتمالی این مقادیر متوسط را نشان می‌دهد. خطوط براساس فرابرد کمترین مربع‌ها بر نقاط برازش شده در سمت راست هر نشانه سرعت‌ها در خلال دوره آزمایش نشان داده شده است.

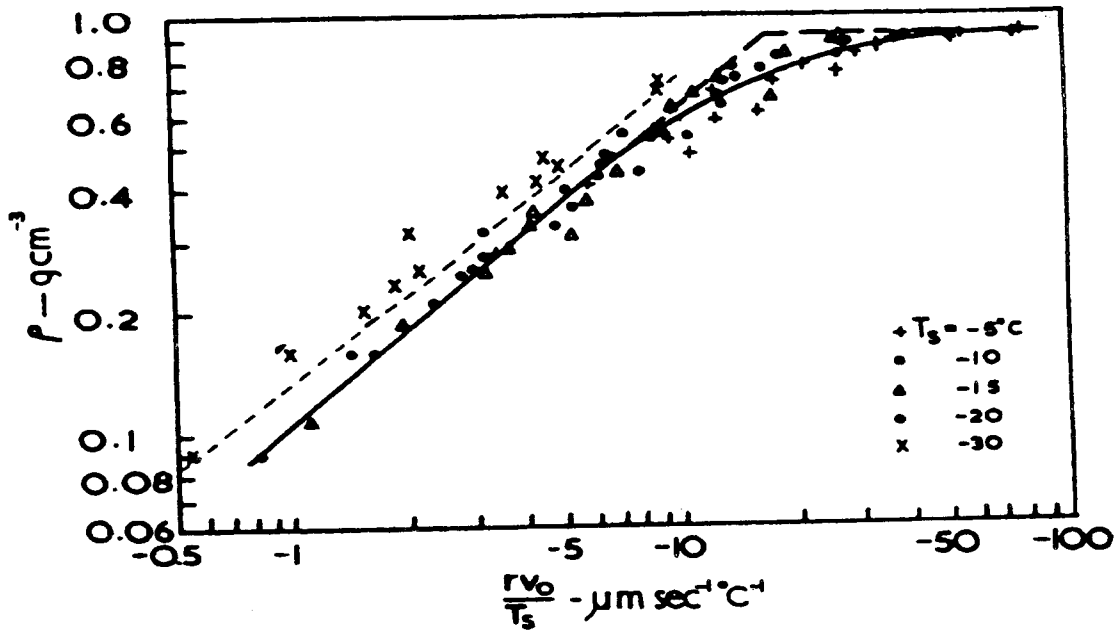


شکل ۶. تعداد خرده یخ های ثانویه تولید شده در پرتو نور برای هر قطرک بزرگ (قطر کوچکتر یا مساوی $25\mu\text{m}$) برافزایش شده (A/N_L) که در مقابل سرعت برفک گیر رسم شده. خطوط عمودی خطای احتمالی مقادیر میانگین را مشخص می کند. مثلث ها برای آزمایش هایی که در آنها شعاع برفک گیر $R = 15\text{cm}$ و مربعها برای آزمایش هایی که در آنها شعاع $R = 25\text{cm}$ است به کار رفته است.

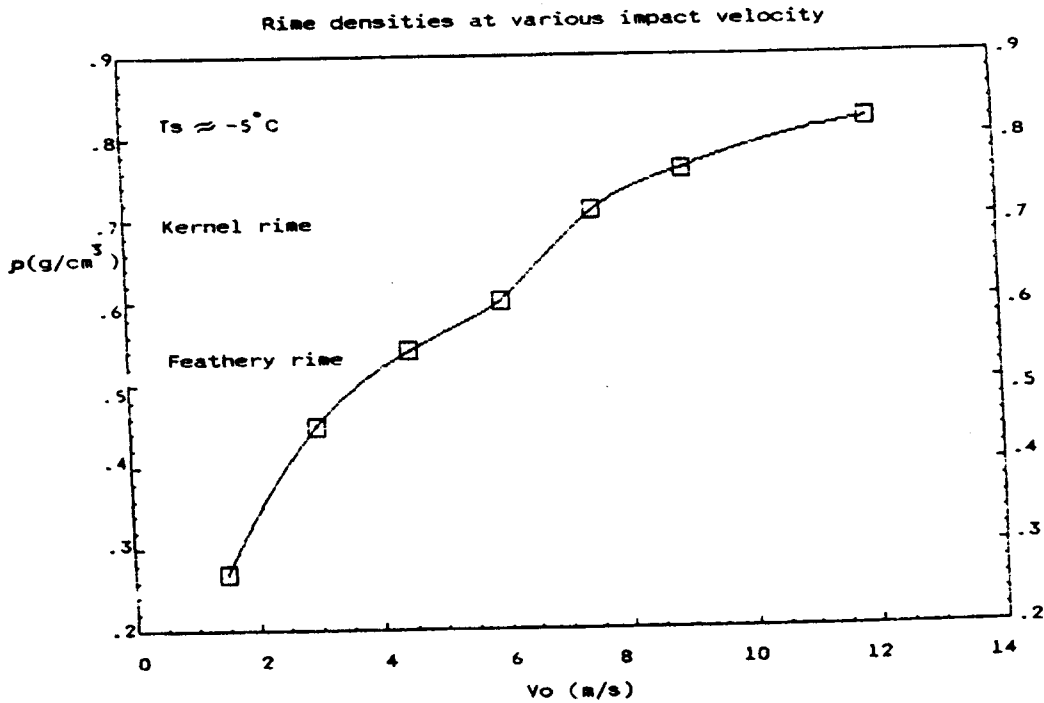
خرده یخها بر $\text{cm}^{-2} \text{mg}^{-1}$ برفک در سرعت های مختلف برفک گیر



شکل ۷. نسبت مجموع خرده یخ های ثانویه بر آهنگ بر افزایش برفک (برحسب تعداد بر $\text{cm}^{-2} \text{mg}^{-1}$ برفک) به عنوان تابعی از سرعت برفک گیر در دمای سطح برفک ثابت (-5°C) و متوسط آب مایع محتوای 0.93mg^{-3} خطوط عمودی، خطای احتمالی این مقادیر متوسط را نشان می دهد. منحنی هایی که از مثلث ها و مربعها می گذرد بترتیب به شعاع های $R = 25\text{cm}$ و $R = 15\text{cm}$ مربوط می شود.



شکل ۸. چگالی به عنوان تابعی از ضریب $\Gamma V_0/T_s$ برای رسم منحنی هموار شده از نقاط مربوط به $T_s = -30^\circ\text{C}$ صرف نظر شده است. از مک لین^۱ (۱۹۶۲).



شکل ۹. مقادیر محاسبه شده چگالی برفک به عنوان تابعی از سرعت بالاروی ابر. خمیدگی در حدود سرعت 6ms^{-1} ناحیه جدایی بین بافت برفک پر شکل و ذرتی شکل برای تولید بیشینه خرده یخها در این ناحیه است.

1. Macklin

منابع

- 415.
- Foster, T., and Hallett, J., 1982, A Laboratory investigation of the influence of liquid water content on the temperature dependence of secondary ice crystal production during soft hail growth: Preprints, Cloud phys. Conf., Chicago, 123-126. A. M. S., Boston
- Goldsmith, P., Gloster, J., and Hume, C., 1976, The ice phase in clouds: Preprints. Int. Conf. Cloud phys., boulder, Colorado, 163-167. A. M. S., Boston.
- Griggs, D. J., and Choulaton, T. W., 1983, Freezing modes of riming droplets with application to ice splinter production: Quart. J. R. Met. Soc. **105**, 243.
- Hallett, J., and Mossop, S. C., 1974, Production of secondary ice particles during the riming process: Nature, **249**, 26.
- Keith, W. D., and Saunders, C. P. R., 1990, Further laboratory studies of the charging of graupel during ice crystal interactions: Atmos. Res., **25**, 445.
- Levi, L., Nassello, O. B., and Prodi, F., 1991, The effect of liquid water on thunderstorm charging: Quart. J. R. Met. Soc., **117**, 761.
- Longmuir, I., and Blodgett, K. B., 1946, A Blyth, K. M., and Latham, J., 1997, A multi-thermal model of cumulus glaciation via the Hallett - Mossop process: Quart. J. R. Met. Soc. **123**, 1185.
- Bower, K. N., Moss, S. J., Johnson, D. W., Choulaton, T. W., Latham, J., Brown, P. R. A., Blyth, A. M., and Cardwell, J., 1996, A parametrization of the ice water content observed in frontal and convective clouds: Quart. J. R. Met. Soc. **122**, 1815.
- Brooks, I. M., Saunders, C. P. R., Mitzeva, R. P., and peck, S. L., 1977, The effect on thunderstorm charging of the rate of rime accretion by graupel: J. Atmos. Res., **43**, 277.
- Choulaton. T. W., Latham, J. and Mason, B. J., 1978, A possible mechanism of ice splinter production during riming: Nature, **274**, 791.
- Choulaton. T. W., Griggs, D. J., Humood, B. Y., and Latham M. J., 1980, Laboratory studies of riming and its relation to ice splinter production: Quart. J. R. Met. Soc., **106**, 367.
- Clark, V., 1948, Icing nomenclature. Harvard - Mount., Washington Icing Res. Rep. 1946 - 47, U. S. A. F.: Tech. Rep., 5676,

- Geophys. Res., **96**, 11007.
- Wishart, E. R., 1977, An instrument for measuring liquid water content of laboratory supercooled clouds: *J. de Recherches Atmospheriques*, **11**, 191.
- mathematical investigation of water droplet trajectories: Rep. 5418, US Army Dayton. OH.
- Macklin, W. C., 1962, The density and structure of ice formed by accretion. *Quart. J. R. Met. Soc.*, **87**, 413.
- Macklin, W. C., and Payne, G. S., 1967, Some aspects of the accretion process: *Quart. J. R. Met. Soc.*, **94**, 167.
- Mason, B. J., 1998, The production of high ice crystal concentrations in stratiform clouds: *Quart. J. R. Met. Soc.*, **125**, 486.
- Mossop, S. C., and Hallett. J., 1974, Ice crystal concentration in cumulus clouds: Influence of the drop spectrum: *Science*, **186**, 632.
- Mossop, S. C., 1976, Production of secondary ice particles during the growth of graupel by riming: *Quart. J. R. Met. Soc.*, **102**, 45.
- Mossop, S. C. 1978, The influence of drop size distribution on the production of secondary ice particles during graupel growth. *ibid*, **104**, 323.
- Mossop, S. C., 1985, Secondary ice particle production during rime growth: the effect of drop size distribution and rimer velocity: *Quart. J. R. Met. Soc.*, **111**, 1113.
- Saunders, C. P. R., Keith, W. D., and Mitzeva, R. P., 1991, The effect of liquid water on thanderstorm charging: *J.*