

مطالعه آهنگ یخبندان قطره‌های باران در اثر هسته‌بندی ناهمگن (در منطقه گیلان)

سید علیرضا صادقی حسینی* و مریم رضازاده*

*موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، صندوق پستی ۶۴۴۴-۱۴۱۵۵

چکیده

مطالعه هسته‌بندی یخبندان ناهمگن یکی از مهم‌ترین زمینه‌های مطالعات هواشناسی در خلال ۲۰ سال اخیر است که مورد توجه دانشمندان فیزیک ابر قرار دارد. گرچه پیشرفت‌هایی در این زمینه‌ها حاصل شده است، هنوز هم ابهاماتی در مورد فرایندهای هسته‌بندی وجود دارد. در این پژوهش مدل بستگی دما - زمان آهنگ یخبندان نمونه باران‌هایی که از منطقه شمال کشور (گیلان) در خلال پاییز و زمستان ۱۳۷۹ تهیه شده با دستگاه‌های صفحه سرد و نخ ماهیگیری بررسی شده است.

غلظت هسته‌های یخبندان غوطه‌وری در ابرهای کومه‌ای و پوشنی به ترتیب ($20/44 - 14/31 \text{ m}^{-3}$) و ($11/9 - 13/8 \text{ m}^{-3}$) برآورد شده است. تعداد این هسته‌ها با آنچه پژوهشگران دیگر از جمله والی (۱۹۹۴) کوپر و لاوسون (۱۹۸۴) و راجرز و یو (۱۹۹۶) به دست آورده‌اند مطابقت دارد. غلظت هسته‌های به دست آمده از مقادیر فراابروری که از پروژه‌های مختلف باروری ابر منتج شده فاصله زیادی دارد بنابراین، ابرهای منطقه گیلان دارای پتانسیل بارورسازی خوبی هستند. این نتایج می‌تواند اطلاعات ارزشمندی را در شناخت سیستم‌های ابری منطقه مورد مطالعه و پیش‌بینی میزان موفقیت‌آمیز بودن بارورسازی آنها را در اختیار پژوهشگران فیزیک ابر قرار دهد.

قبل از انجام هر گونه پروژه بارورسازی مصنوعی ابرها، انجام آزمایش‌های زمینه‌ای، لازم و ضروری است تا هزینه‌های گزافی که صرف بارورسازی ابرها می‌شود اتلاف نگردد.

انجام این آزمایش‌ها با صرف هزینه اندک نه تنها باعث کاهش ضریب اقتصادی هزینه در پروژه‌های کارای بارورسازی ابر می‌شود، بلکه خطر سقوط هواپیمای تحقیقاتی درون ابر را نیز کاهش می‌دهد.

کلیدواژه: هسته‌بندی ناهمگن، آهنگ یخبندان، غلظت هسته‌های یخی، هسته‌های یخبندان غوطه‌وری، فراابروری، کارایی بارورسازی

۱ مقدمه

آزمایش‌های یخبندان با استفاده از تعداد زیادی از قطره‌های کوچک برای مطالعه هسته‌بندی همگن و ناهمگن آب با سایر مواد به طور روزافزون مورد استفاده قرار می‌گیرد.

مطالعه آزمایشگاهی هسته‌بندی یخ از طریق بخار ابر اشباع یا از آب مایع ابر سرد بسیار سودمند بوده و در گستره وسیعی از تحقیقات از جمله تشکیل یخ در ابرها، دانه‌پاشی مصنوعی ابر، آغاز یخبندان گیاهان، زیست‌شناسی سرمایی سلول‌ها، بقای زمستانی حشرات و غیره کاربرد دارد. در ۲۰ سال اخیر پیشرفت‌های زیادی نه تنها در هسته‌بندی یخ از نقطه نظر فیزیک ابر بلکه در ارتباط با سیستم‌های زیست‌شناختی نیز به دست آمده است.

تفسیر آزمایش‌های هسته‌بندی یخ ناهمگن توسط والی و استنبرری در سال ۱۹۶۶ (از این به بعد VS66) به همراه دلایل تجربی آن ارائه شد. به‌ویژه، نتایج آزمایش‌ها به وسیله نمودارهای دما - زمان آهنگ‌های یخبندان نشان داده شده است. آهنگ‌های یخبندان برای اجتماعی از قطره‌های معین که از نمونه اصلی گرفته شده‌اند به وسیله آهنگ هسته‌بندی هسته‌های مجزا و تعداد هسته‌های فعال یخی موجود در قطره‌ها توصیف می‌شود.

بیگ (۱۹۵۳)، دریافت که احتمال آهنگ یخبندان به طور نمایی با افزایش دما کاهش می‌یابد. ونگات و بلدوین (۱۹۸۴)، نتیجه گرفتند که می‌توان آهنگ هسته‌بندی را با احتمال هسته‌بندی در واحد زمان تعریف کرد. این آهنگ نسبتاً آرام بود و با کاهش دما

یخ زده بین زمان t و $t + \delta t$ باشد، برای $J(T)$ داریم:

$$J(T) = -\frac{1}{V} \cdot \frac{1}{N(t)} \cdot \frac{\delta N(t)}{\delta t} \quad (1)$$

علامت منفی به دلیل منفی بودن $\delta N(t)$ است که در واقع کاهش تعداد واحدهای یخ زده را نشان می‌دهد. برای سرمایش ثابت رابطه بدین صورت تصحیح می‌شود

$$J(T) = \frac{-1}{V} \cdot \frac{r(T)}{N(T)} \cdot \frac{\delta N(T)}{\delta T} \quad (2)$$

که $r(T)$ آهنگ سرمایش در دمای T است (δT و $r(T)$ منفی‌اند). معادله ۲ تنها یک تقریب است، به طوری که فرض می‌شود آهنگ سرد شدن آرام‌تر از آهنگ افزایش $J(T)$ با کاهش دماست و به همین دلیل $J(T - \delta T)$ در مقایسه با $J(T)$ ناچیز است. این فرضیه به خوبی با هسته‌بندی یخبندان همگن سازگار است.

۱-۲ آهنگ یخبندان

برای هسته‌بندی یخبندان ناهمگن (مربوط به ذرات معلق در آب)، معادلات ۱ و ۲ به کار نمی‌رود، چون معمولاً واحدهای نمونه را نمی‌توان به صورت مجزا در نظر گرفت، هر چند که از نمونه آب یکسانی گرفته شده باشند.

انواع مختلف هسته‌ها با یک مد تصادفی توزیع می‌شوند و چون آهنگ هسته‌بندی در هر دما مقداری متفاوت است، مفهوم

دیدبانی‌های $\frac{\delta N}{\delta t}$ آشکار نیست. بنابراین اصطلاح آهنگ یخبندان R را به کار می‌بریم

$$R(T, t) = \frac{-1}{N(t)} \cdot \frac{\delta N(t)}{\delta t} \quad (3)$$

که R به طور مشخص تابعی از زمان است.

برای روشن شدن ارتباط R با آهنگ هسته‌بندی، لزوماً آهنگ زمانی تشکیل جنین بحرانی، برای هسته‌های ویژه‌ای تعریف می‌شود. بر اساس کارهای والی و استنزبری (۱۹۶۶)، تابع $J_c(T)$ ، با ابعاد عکس زمان، به صورت احتمال در واحد زمان می‌باشد که

افزایش می‌یافت. فرانک و دیگران (۱۹۸۳)، با مشاهده هسته‌های غوطه‌ور در قطرات آب نتیجه گرفتند که هسته‌بندی ناهمگن ایجاد می‌شود. مدل بستگی زمانی آهنگ یخبندان (TDFR) توسط والی (۱۹۹۴)، مورد بررسی قرار گرفت و ضمن تایید نتایج VS66 برآوردی از تعداد هسته‌های غوطه‌وری در قطره‌های ابر سرد به دست آمد. موضوع بحث این پژوهش نیز بر اساس مقاله والی (۱۹۹۴) و همچنین کارهای پژوهشی صادقی حسینی (۱۹۹۸)، روی آهنگ‌های یخبندان غوطه‌وری هسته‌های مختلف صورت گرفته است.

با استفاده از مدل TDFR و داده‌های تجربی به دست آمده از محتوای هسته‌های یخ موجود در قطره‌های نمونه باران‌هایی که از منطقه شمال کشور (گیلان) در خلال پاییز و زمستان ۱۳۷۹، گرفته شده است، تعداد هسته‌های یخبندان غوطه‌وری در ابرهای مربوطه برآورد می‌شود و این تعداد با آنچه دانشمندان بزرگی از جمله والی به دست آورده‌اند، مقایسه می‌شود و در نهایت مشخص می‌شود که غلظت هسته‌های یخی در این ابرها زیر مقدار بهینه‌اند که از حالت فراباروری فاصله زیادی دارند. این نتایج می‌تواند اطلاعات ارزشمندی را در شناخت سیستم‌های ابری موجود از نظر پیش‌بینی احتمال قابلیت بارورسازی موفقیت‌آمیز آنها با در نظر گرفتن مسیر حرکت و نوع این سیستم‌های ابری در اختیار پژوهشگران هواشناسی و فیزیک ابر در کشورمان قرار دهد.

۲ آهنگ هسته‌بندی

میزان فعالیت هسته‌بندی، احتمال رشد جنین تحت شرایط خاصی در واحد زمان است. احتمال هسته‌بندی در واحد حجم نمونه یا در واحد سطح ماده هسته‌ای، عموماً به عنوان آهنگ هسته‌بندی J تعریف می‌شود. به طور تدریجی برای آب خالص (هسته‌بندی همگن) آهنگ هسته‌بندی تابعی از یخبندان واحدهای نمونه بر بازه زمانی داده می‌شود. در دمای ثابت $T(^{\circ}C)$ ، اگر $N(t)$ تعداد واحدهای یخ زده نمونه در حجم V و $\delta N(t)$ تعداد واحدهای

این معادله بستگی به دما و زمان نمونه دارد.

مشاهده شده که حتی با کسر بزرگی از واحدهای نمونه که هنوز یخ نزده‌اند، آهنگ یخبندان R به سرعت به صفر کاهش می‌یابد. این نتایج توسط والی و استنزبری (۱۹۶۶)، برای آب ابر سرد به دست آمده است. با فرض‌های بالا، تابع غلظت مستقل از زمان با اختلاف طیف هسته‌ها $k(T)$ ، توسط والی (۱۹۷۱) به صورت زیر تعریف شده است:

$$k(T) = \frac{1}{V} \cdot \frac{1}{N(T)} \cdot \frac{\Delta N}{\Delta T} \quad (6)$$

که در آن $k(T)$ غلظت هسته‌هایی است که در بازه زمانی واحد در دمای T فعال‌اند و طیف انبوهی $k(T)$ غلظت هسته‌هایی را که در دماهای گرم‌تر از T فعال هستند بیان می‌کند

$$K(T) = \frac{1}{V} \text{Log}_e \frac{N(T)}{N_0} \quad (7)$$

که در آن $N(T)$ تعداد قطراتی است که در دمای T هنوز یخ نزده‌اند، ΔN تغییر در تعداد قطرات یخ نزده در بازه ΔT (توجه شود که ΔN و ΔT منفی هستند) و N_0 تعداد کل قطرات است. اگر آهنگ سرمایش در T ، $r(T)$ باشد، طرف راست معادله ۶ مساوی $R(T)/[-V \cdot r(T)]$ است. واحد $k(T)$ به صورت $\text{cm}^{-3} \cdot \text{C}^{-1}$ بیان می‌شود و واحد $K(T)$ ، cm^{-3} است. غلظت دیفرانسیلی، چگالی حجم هسته‌های فعال را در بازه دمایی T نشان می‌دهد و طیف انبوهی، چگالی حجم هسته‌های فعال را در دمای گرم‌تر از T بیان می‌کند. طبیعتاً، طیف انبوهی انتگرال طیف دیفرانسیلی از T تا 0°C است.

۲-۲ برآورد هسته‌های یخ در ابرها

این تحقیق به مطالعه آهنگ هسته‌بندی یخبندان روی هسته‌های یخبندان غوطه‌وری مربوط است. این مدل هسته‌بندی تنها یکی از راه‌هایی است که یخ در جو شکل می‌گیرد. قانون نسبی این مدل، شناخته نشده است و از موقعیتی به موقعیت مشابه دیگر قابل تغییر است. اگر چه تخمین تعداد و نوع هسته‌های یخ موجود در جو

به شکل حادثه هسته‌بندی در بین هسته‌های به‌خصوصی در دمای T تعریف می‌شود. این تعریف مربوط به هسته‌های ویژه‌ای است یا به طور دقیق‌تر برای مکان هسته‌بندی خاصی است که ابعاد آن قابل مقایسه با اندازه جین بحرانی باشد. به همین دلیل تعداد زیادی از توابع $J_c(T)$ برای توصیف نمونه‌ای که شامل مجموعه‌ای از هسته‌های مختلف باشد، لازم است. در توابع $J_c(T)$ برای هسته‌های مختلف، کمیت دیگری برای تعریف احتمال هسته‌بندی لازم است که غلظت هسته‌ها در دماهای مشخصه مختلف است. این تابع را $K(T_c, t)$ می‌نامیم، که دارای ابعاد $[L^{-3}T^{-1}]$ است.

با توجه به این که رابطه $\{K(T_c) \delta V \delta T_c\}$ احتمال حجم δV هسته‌هایی با دمای مشخصه بین T_c و $T_c + \delta T_c$ را نشان می‌دهد و هنوز حادثه هسته‌بندی در زمان t آغاز نشده است، آهنگ یخبندان مشاهده شده $R(T, t)$ ، به طور کلی تابعی از دما و زمان است. برای $N(T, t)$ که تعداد قطره‌های یخ نزده در دمای T و زمان t است، آهنگ یخبندان با جمله‌های $J_c(T)$ و $K(T_c, t)$ مربوطه به شکل زیر بیان می‌شود

$$R(T, t) = \frac{-1}{N(T, t)} \cdot \frac{\delta N(T, t)}{\delta t} = V \int_{T_h}^0 J_c(T) K(T_c, t) dT_c \quad (4)$$

که در آن V حجم هر قطره و حدود انتگرال از نقطه ذوب (0°C) تا دمای هسته‌بندی همگن (T_h) است. بستگی زمانی تابع غلظت $K(T_c, t)$ عبارت است از

$$K(T_c, t) = K(T_c, 0) - \int_0^t J_c(T) K(T_c, t) dt \quad (5)$$

با شروع انتگرال در $t=0$ و $T=0^\circ \text{C}$ سمت راست معادله ۴ این واقعیت را بیان می‌کند که آهنگ یخبندان با جمع آهنگ هسته‌بندی روی تمام هسته‌های نمونه تعیین می‌شود. بنابراین برای برآورد تعداد هسته نوع T_c (با دمای مشخصه T_c) تنها آن کسری از تعداد منشأ $K(T_c, 0)$ لازم است که سبب هسته‌بندی در زمان t نشده‌اند. این مسئله بستگی زمانی در معادله ۵ را می‌دهد. جواب

غوطه‌وری به دست می‌آید

$$N_{ice}(t) = N_{ice}(T) \int_0^t 0.46e^{-0.23t} dt = 2N_{ice}(T)(1 - e^{-0.23t}) \quad (10)$$

که $t=0$ شروع بازه دمایی ثابت است. این عدد به آن چه در طول سرمایش شکل گرفته اضافه می‌شود

$$N_{ice}^{total} = N_{ice}(T) + N_{ice}(t) \quad (11)$$

با $LWC = 1g/m^3$ و با به کار بردن انتگرال \int برای N_{ice} ابرهای پروزه دشت‌های مرتفع در دمای $10^\circ C$ ، $1/1$ تا 67 بر مترمکعب است. باید توجه داشت که محتوای هسته‌های غوطه‌وری بارش نسبت به مقیاس‌های جهانی و محلی قابلیت تغییر بیشتری دارد و این هسته‌ها در هنگام وقوع رویداد بارش در دمای بیش از $5^\circ C$ حضور ندارند.

۳ روش‌های آزمایش

از دو نوع دستگاه برای انجام آزمایش‌ها استفاده شده است. یکی دستگاه صفحه سرد که بستگی زمانی هسته‌بندی یخبندان در دمای ثابت در یک فریزر با آن بررسی می‌شود. آزمایش‌ها روی آب مقطر، آب شهر و نمونه‌های آب بارانی که از منطقه شمال کشور (گیلان - بندرانزلی) تهیه شده، تکرار می‌شود و نتایج با یکدیگر مقایسه می‌شوند.

۱-۳ روش دستگاه صفحه سرد

دستگاه صفحه سرد شامل یک صفحه مسی صیقلی پوشیده از لایه نازک کروم به قطر $12cm$ است که در یک اتاقک از جنس پلاستیک فشرده قرار داده شده است. این اتاقک باعث می‌شود تا تبادل گرمایی صفحه مسی با محیط بیرون به کمترین مقدار خود برسد. برای سرد کردن صفحه، لوله‌ای به صفحه سرد متصل شده که این لوله درون یک فلاکس شیشه‌ای دو جداره حاوی نیتروژن مایع قرار می‌گیرد. نیتروژن مایع می‌تواند دما را تا $180^\circ C$ پایین ببرد. نیتروژن مایع در دمای آزمایشگاه به سرعت تبخیر می‌شود.

خیلی پیچیده است، ولی کافی است که مد یخبندان غوطه‌وری را با تقریب‌های ساده‌ای برآورد کنیم.

در شرایط سرمایش ممتد، از چند دهم تا چند درجه بر دقیقه (در ابرهایی با سرعت بالای 10 متر بر ثانیه) نتایج به دست آمده از آزمایشات یخبندان قطره مستقیماً قابل اجرا هستند. تقریب اول آن است که اثر آهنگ سرمایش در نظر گرفته نشود و تعداد ذرات یخ تنها به عنوان تابعی از دما پیش‌بینی شود.

طیف دیفرانسیلی و انبوهی از هسته‌ها وقتی از غلظت بر cm^3 آب به غلظت بر واحد حجم هوا (توسط آب مایع محتوا LWC) برگردانده می‌شود، یک جواب مستقیم می‌دهد

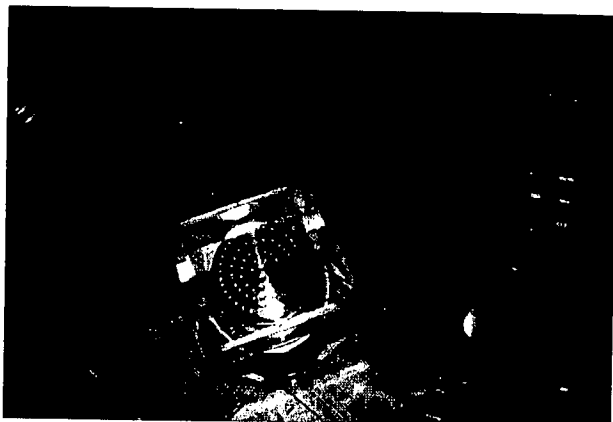
$$N_{ice}(T) = \int_0^T \frac{K(T)}{\rho w} LWC dT = \frac{K(T)}{\rho w} LWC \quad (8)$$

که در آن $\rho w = 1g/cm^3$ (چگالی آب)، $K(T)$ طیف انبوهی هسته‌ها، LWC بر حسب g/m^3 و N_{ice} بر حسب تعداد بر متر مکعب است. برآورد N_{ice} با در نظر گرفتن آهنگ سرمایش تصحیح می‌شود. بر اساس والی و استنزبری (۱۹۶۶)، به ازاء دو برابر شدن آهنگ سرمایش، میانگین دمای یخبندان $0.2^\circ C$ تغییر می‌کند، در حالی که هیچ تغییر قابل مشاهده‌ای در شکل طیف دیده نمی‌شود. بنابراین، معادله ۸ به این صورت اصلاح می‌شود

$$N_{ice}(T) = \int_0^T \frac{K(T)}{\rho w} LWC dT = \frac{K(T-\alpha)}{\rho w} LWC \quad (9)$$

که در آن $\alpha = 0.66 \log_{10} |T|$ ، مقدار قدرمطلق آهنگ سرمایش بر حسب $min^{-1} C$ است. آهنگ سرمایش با یک جایگزینی ساده از سرعت بالارو و آهنگ افت دما با ارتفاع در ابر به دست می‌آید. در واقع با معادله ۹ دمای واقعی ابر با آهنگ‌های سریع سرمایش (N_{ice} کم‌تر) به مقدار بیشتری منتقل می‌شود و با آهنگ‌های آرام یخبندان به مقدار کمتری (N_{ice} بیشتر) گرایش پیدا می‌کند. باید در نظر گرفت که اگر زمان در دسترس بیشتر باشد تعداد رویداد هسته‌بندی نیز بیشتر می‌شود.

با نگهداشتن ابرها در یک دمای ابر سرد ثابت در بازه زمانی چند دقیقه (حداکثر تا ده دقیقه)، تعداد ذرات یخ مربوط به یخبندان



شکل ۱. قطره‌های روی صفحه سرد در هنگام آزمایش.

فراوانی تکرار مربوط به توزیع قطره‌های یخ زده با نمونه‌های آب مقطر، آب شهر و آب باران در شکل‌های ۲، ۳ و ۴ آورده شده است. ملاحظه می‌شود که بیشترین تعداد قطره‌های یخ زده برای ۵ بار تکرار آزمایش با آب مقطر در دمای 18°C - و برای آب شهر تهران 16°C - و برای نمونه باران منطقه گیلان 14°C - است.

اگر آهنگ سرمایش r از $1^{\circ}\text{Cmin}^{-1}$ بیشتر باشد قطرات تازمانی که به دمای صفحه سرد برسند، یخ نمی‌زنند در حالی که اگر r کم‌تر از $1^{\circ}\text{Cmin}^{-1}$ باشد قطره‌ها در دماهای گرم‌تر یخ می‌زنند. و این به دلیل هدایت گرمایی بالای صفحه مسی نسبت به قطره‌هاست و قطره‌ها برای رسیدن به تعادل گرمایی با صفحه مسی نیاز به زمان دارند.

در آهنگ‌های سرمایش سریع، به عنوان مثال اگر دمای صفحه مسی 12°C - باشد، دمای قطره‌ها بیشتر است و در آهنگ‌های سرمایش کندتر، وقتی قطره‌ها مدتی در یک دمای ثابت باقی می‌مانند، زمان کافی برای هسته‌بندی قطره وجود دارد و قطره‌ها در دماهای بیشتر یخ می‌زنند. در نتیجه ثابت نگه‌داشتن آهنگ سرمایش در $1^{\circ}\text{Cmin}^{-1}$ ، بسیار حائز اهمیت است. این مسئله باعث می‌شود که هر آزمایش برای رسیدن به آهنگ سرمایش مورد نظر چندین بار تکرار شود. مقایسه آهنگ یخ‌بندان در سرمایش ممتد برای نمونه‌های آب مقطر، آب شهر و آب باران

اما فلاکس شیشه‌ای دو جداره به مدت ۸ تا ۱۰ ساعت نیتروژن مایع را در خود نگه می‌دارد. بنابراین برای استفاده بهینه از نیتروژن مایع بایستی آزمایش‌ها در همان روزی که نیتروژن مایع تهیه شده، انجام شود.

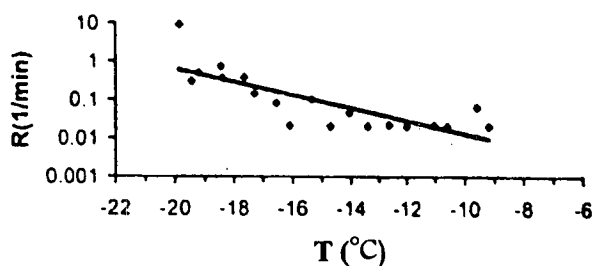
در ابتدا بایستی حجم هر قطره به دست آید. به این ترتیب که حجم مشخصی از یک سرنگ 10cc با نمونه پر می‌شود و بعد حجم 100 قطره از آن به دست می‌آید. که برای 100 قطره از هر نمونه حجم 1cm^3 به دست آورده شد و حجم هر قطره 0.01cm^3 در نظر گرفته شد. البته بایستی دقت شود که اندازه قطره‌ها یکسان باشد.

دمای صفحه سرد به وسیله دو دماسنج رقمی اندازه‌گیری می‌شود که یکی دمای مرکز صفحه و دیگری دمای نزدیک به کناره‌های صفحه را می‌دهد. در طول آزمایش دمای میانگین به عنوان دمای قطره در نظر گرفته می‌شود.

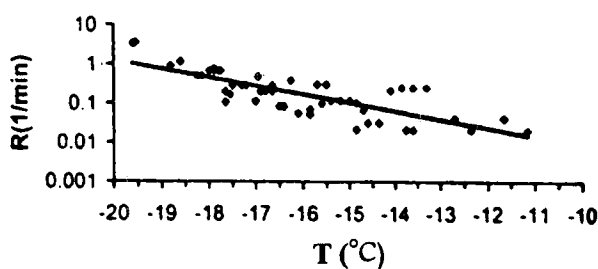
برای مطمئن بودن از درستی کار دستگاه، بایستی دستگاه کالیبره شود و میزان نیتروژن مایع لازم برای سرمایش $1^{\circ}\text{Cmin}^{-1}$ بر اساس والی (۱۹۹۴)، به دست آید. سپس تعداد ۵۰ قطره از نمونه به طور منظم روی صفحه سرد چیده شود. به طوری که اندازه قطره‌ها و فاصله آنها از یکدیگر یکسان باشد.

دما و تعداد قطره‌های یخ زده در هر دقیقه یادداشت می‌شود و این کار تا یخ زدن تمام قطره‌ها دنبال می‌شود. یخ‌بندان قطره‌ها با تار شدن (شیری شدن) آنها روی صفحه سرد قابل رویت است. تار شدن قطره‌ها به دلیل خارج شدن حباب‌های هوای حل شده از ساختار بلورین یخ است. چون در دماهای گرم‌تر میزان حباب‌های هوا کم‌تر است قطره‌هایی که در دماهای گرم‌تر یخ می‌زنند شفافیت کم‌تری نسبت به قطره‌هایی دارند که در دماهای سردتر یخ می‌زنند. بعد از انجام هر بار آزمایش، صفحه سرد با الکل تمیز می‌شود. شکل ۱ نمایی از صفحه سرد را در هنگامی نشان می‌دهد که تعدادی از قطره‌ها یخ زده‌اند و تعدادی هنوز یخ نزده باقی مانده‌اند.

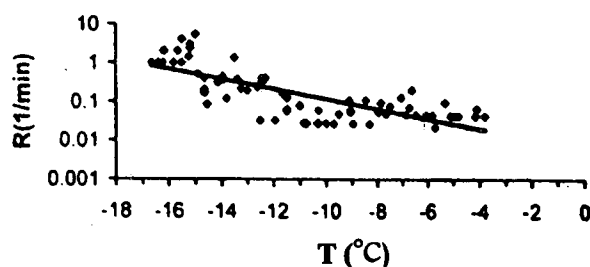
آهنگ یخبندان آب مقطر



آهنگ یخبندان آب شهر



آهنگ یخبندان نمونه باران ۷۹/۸/۱۱

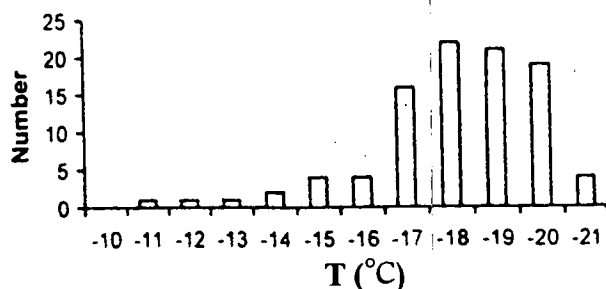


شکل ۵. بستگی دمایی آهنگ‌های یخبندان R در آزمایش سرمایش ممتد برای نمونه آب مقطر (تصویر بالایی)، آب شهر (تصویر میانی)، آب باران (تصویر پایینی).

۲-۳ روش نخب ماهیگیری

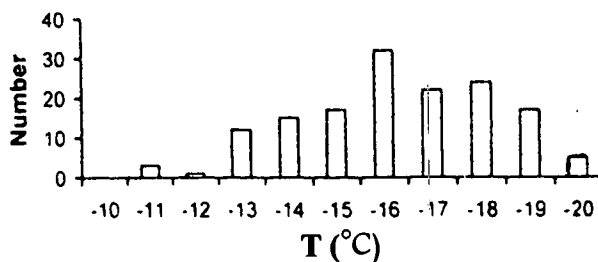
علاوه بر بستگی دمایی آهنگ یخبندان، بایستی مدت زمانی که طول می‌کشد تا قطره به دمای یخبندان برسد نیز بررسی شود و این با مطالعه بستگی زمانی آهنگ یخبندان به دست می‌آید. ممکن است آهنگ سرمایش ممتد در روش صفحه سرد دقیقاً مساوی $1^{\circ}\text{Cmin}^{-1}$ نباشد به همین دلیل بستگی زمانی و دمایی آهنگ

توزیع یخبندان قطرات آب مقطر



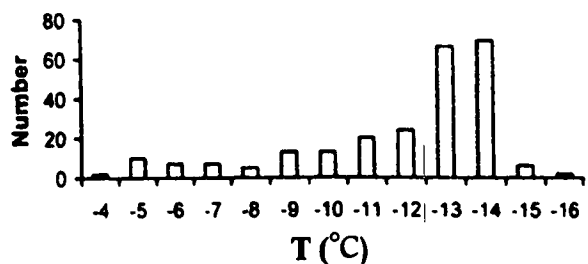
شکل ۲. فراوانی تکرار توزیع یخبندان قطره‌های آب مقطر با آهنگ سرمایش $1^{\circ}\text{Cmin}^{-1}$ در ۵ آزمایش.

توزیع یخبندان قطرات آب شهر



شکل ۳. فراوانی تکرار توزیع یخبندان قطره‌های آب شهر با آهنگ سرمایش $1^{\circ}\text{Cmin}^{-1}$ در ۵ آزمایش.

توزیع یخبندان قطرات باران



شکل ۴. فراوانی تکرار توزیع یخبندان قطره‌های آب باران با آهنگ سرمایش $1^{\circ}\text{Cmin}^{-1}$ در ۵ آزمایش.

در شکل ۵ آمده است. آزمایش در مورد هر نمونه، ۵ بار تکرار شده است و تعداد قطره‌ها برای آب مقطر ۱۵۰ عدد، آب شهر ۱۵۰ عدد و آب باران ۲۵۰ عدد است.



شکل ۶. نمایی از دستگاه نخ ماهیگیری.

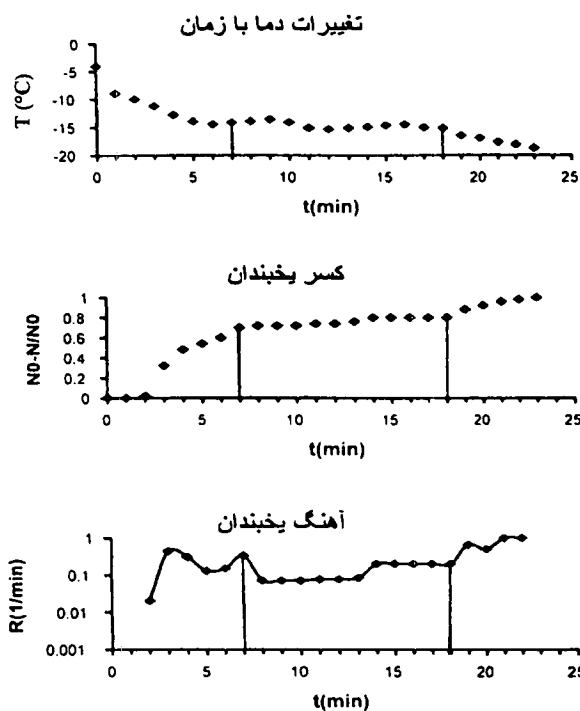
روش دمای ثابت قطره‌ها به مدت ده دقیقه در دمای ثابت درون فریزر نگه‌داشته می‌شود و سپس با آهنگ سرمایش $1^{\circ}\text{Cmin}^{-1}$ دما پایین آورده می‌شود و در هر دقیقه با استفاده از کروномتر و دماسنج، دما اندازه‌گیری و یادداشت می‌شود. این آزمایش‌ها در دو دمای 12°C و 14°C برای نمونه‌های باران جمع‌آوری شده از بندرانزلی تکرار می‌شود.

در روش فراجش، بعد از رسیدن دمای قطره به 13°C ، دما به صورت ناگهانی به اندازه 1°C افزایش می‌یابد و سپس قطره‌ها در دمای 12°C به مدت ده دقیقه ثابت نگه‌داشته می‌شوند. و بعد از این مدت، نمونه با آهنگ $1^{\circ}\text{Cmin}^{-1}$ سرد می‌شود. آزمایش‌های فراجش دما تنها برای نمونه‌های آب باران انجام می‌شود. این آزمایش‌ها بیانگر حرکات بالارو و پایین‌رو ناگهانی قطره‌ها در درون ابرند. در این آزمایش‌ها، تغییرات دما با زمان، کسر یخبندان و آهنگ یخبندان قطره‌های باران در دمای ثابت 12°C و 14°C به وسیله دستگاه نخ ماهیگیری اندازه‌گیری شده است. در شکل ۷، دما به مدت ۱۰ دقیقه در 12°C ثابت نگه‌داشته شده است در این مدت حدود ۳۰٪ قطره‌ها یخ زده‌اند و آهنگ یخبندان تغییرات کمی دارد. بعد از شروع سرمایش، R به طور نمایی با کاهش دما افزایش می‌یابد. خطوط عمودی در این شکل، بیانگر محدوده دمای ثابت است و برای مقایسه در همه

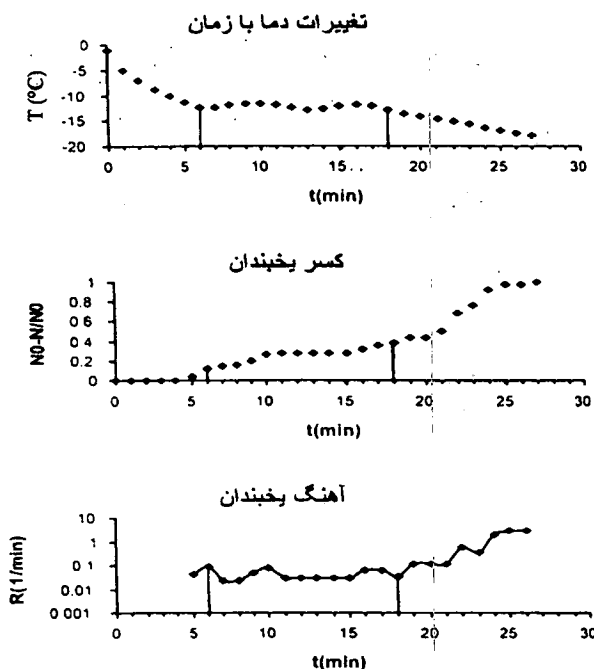
یخبندان به طور جداگانه بررسی می‌شود. در این روش از یک فریزر برای ایجاد سرمایش استفاده می‌شود. سه ردیف نخ ماهیگیری به یک چهارچوب پلاستیکی بسته می‌شود و دو ترموکوپل نیز در همان سطح قطره‌ها به چهارچوب متصل می‌شود تا دمای قطره‌ها در خارج از فریزر به وسیله دماسنج دو کاناله رقمی اندازه‌گیری شود. در هر آزمایش ۵۰ قطره هر کدام به حجم 0.1cm^3 با یک سرنگ 10cc به دقت روی نخ ماهیگیری قرار داده می‌شود و این چهارچوب با احتیاط طوری که قطره‌ها از روی نخ‌ها جدا نشوند، داخل فریزر گذاشته می‌شود. مزیت نخ ماهیگیری آن است که ارتباط قطره‌ها با یکدیگر به حداقل می‌رسد و در ضمن اگر اندازه قطره‌های معلق بزرگ باشد از روی نخ ماهیگیری پایین می‌افتد. همچنین قطره‌ها مستقیماً با هوای محیط سرد می‌شوند و برخلاف روش صفحه سرد، عوامل تقویت کننده هسته‌بندی مربوط به ناپاکی زمینه و تغییر شکل قطره روی صفحه سرد کاهش می‌یابد. وقتی قطره‌ها توسط چهارچوب از محیط بیرون به داخل فریزر برده می‌شوند تغییرات دمایی یکسانی را تحمل می‌کنند و شرایط آزمایش برای قطره‌ها یکسان است. شکل ۶ نمایی از آزمایش به روش نخ ماهیگیری را نشان می‌دهد. یخبندان قطره‌ها به دلیل تار شدن آنها قابل مشاهده است.

۳-۲-۱ اندازه‌گیری آهنگ‌های یخبندان تابع دما و زمان قبل از شروع آزمایش بایستی فریزر کالیبره شود و شرایط آزمایش برای ده دقیقه دمای ثابت با فریزر بررسی شود. سپس آزمایش‌های بستگی زمانی آهنگ‌های یخبندان به وسیله نخ ماهیگیری، با آب مقطر، آب شهر و آب باران تکرار می‌شود. قطره‌های آب مقطر در محدوده دمایی 13°C تا 21°C و آب شهر در 11°C تا 19°C و آب باران در 10°C تا 20°C یخ می‌زنند.

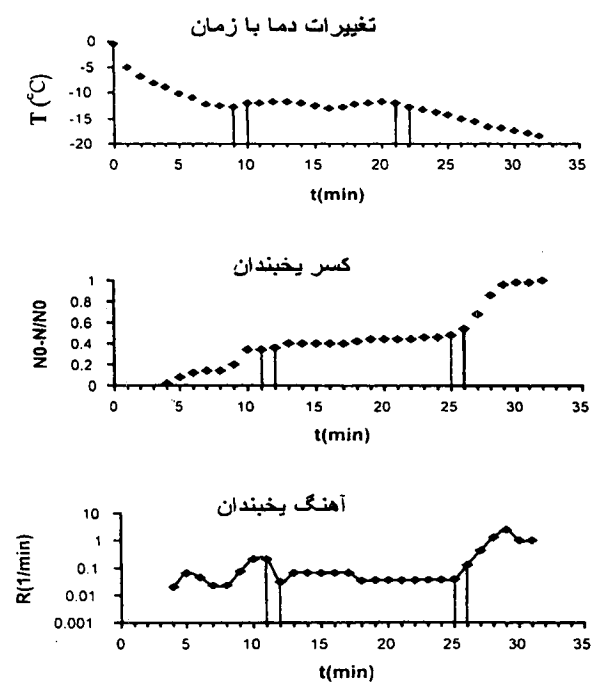
با استفاده از دستگاه‌های صفحه سرد و نخ ماهیگیری روش‌های سرمایش ممتد، دمای ثابت و فراجش دما انجام می‌شود. در



شکل ۸ تغییرات دما با زمان، کسر یخبندان و آهنگ یخبندان قطره‌های باران انزلی (نمونه مورخ ۷۹/۱۰/۳۰) در دمای ثابت 14°C -.



شکل ۷ تغییرات دما با زمان، کسر یخبندان و آهنگ یخبندان قطره‌های باران انزلی (نمونه مورخ ۷۹/۸/۱۹) در دمای ثابت 12°C -.



شکل ۹ تغییرات دما با زمان، کسر یخبندان و آهنگ یخبندان قطره‌های باران انزلی (نمونه مورخ ۷۹/۸/۱۹) با فرآهش 1°C در دمای ثابت 12°C -.

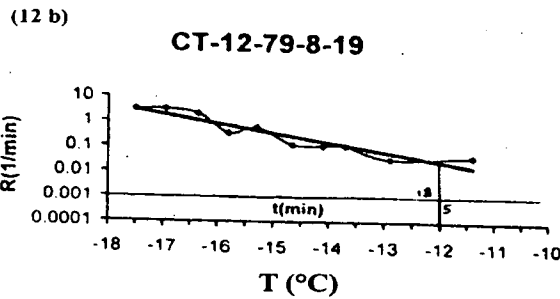
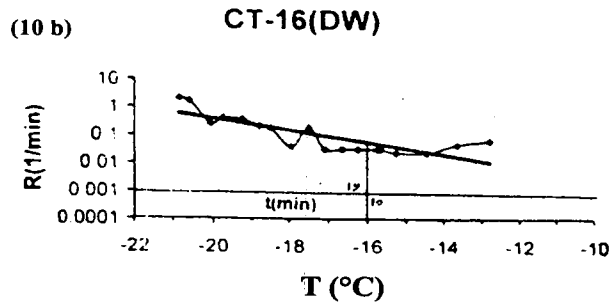
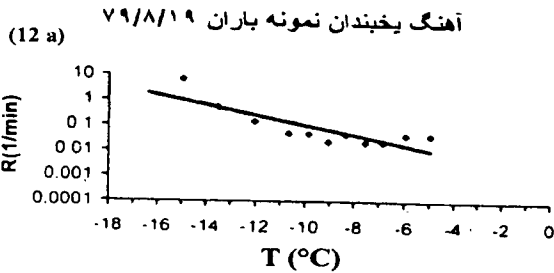
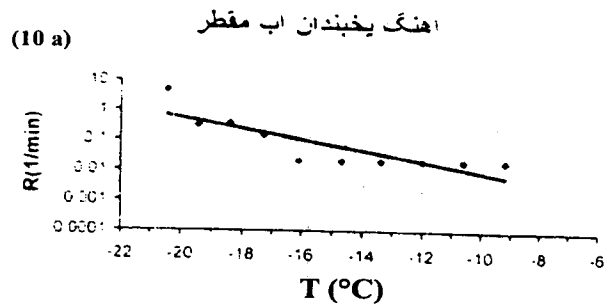
شکل‌ها کشیده شده است. میزان خطا در ابتدا و انتهای آزمایش بیشتر از بقیه نقاط است چرا که تعداد قطره‌های یخ زده و یخ نزده در این نقاط کم است.

شکل ۸ همانند شکل ۷ است با این تفاوت که آزمایش در دمای ثابت 14°C - انجام شده است. شکل ۸ همان نتایج مربوط به شکل ۷ را تایید می‌کند.

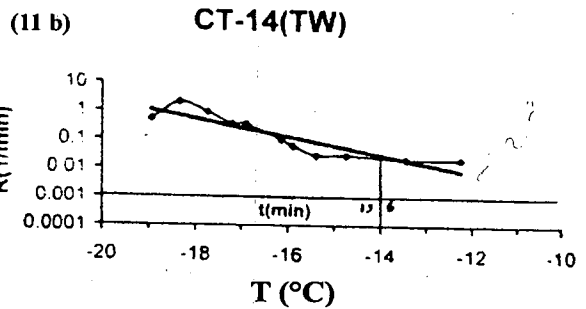
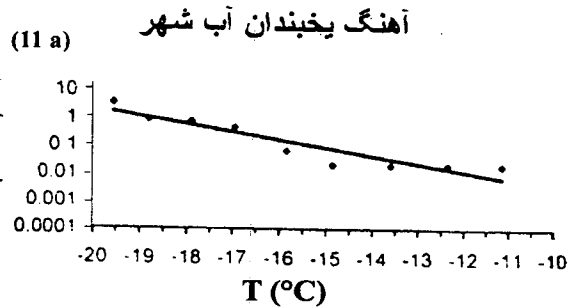
در شکل ۹ آزمایش بستگی زمانی آهنگ یخبندان قطره‌های باران با فرآهش 1°C در دمای ثابت 12°C - انجام شده است. ملاحظه می‌شود که با گرم شدن ناگهانی 1°C کاهش شدیدی پیدا می‌کند و سپس وقتی دما در 12°C - ثابت نگه‌داشته می‌شود تغییرات R خیلی کم است تا جایی که دوباره سرمایش از سر گرفته می‌شود و R با کاهش دما، افزایش می‌یابد.

شکل‌های ۱۰، ۱۱ و ۱۲ آهنگ‌های یخبندان آب مقطر و آب شهر و آب باران را در روش سرمایش ممتد، دمای ثابت و فرآهش دما با حذف بازه دمای ثابت نشان می‌دهد و برای مقایسه محور

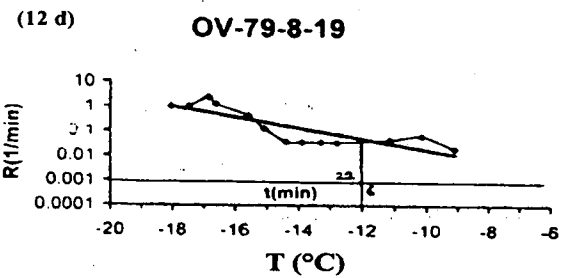
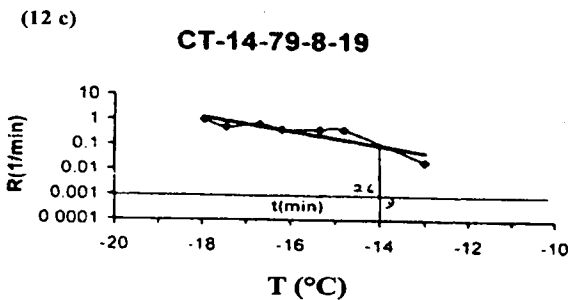
زمان نیز رسم شده است. خطوط قائم توقف سرمایش را نشان می‌دهند. مشاهده می‌شود که خطوط رگرسیون حاصل بعد از حذف بازه دمایی ثابت با خطوط رگرسیون سرمایش ممتد سازگار است.



شکل ۱۰. مقایسه بستگی زمانی و دمایی آهنگ یخبندان با حذف بازه دمایی ثابت برای آب مقطر (a) سرمایش ممتد، (b) بازه دمایی ثابت -16°C .



شکل ۱۱. مقایسه بستگی زمانی و دمایی آهنگ یخبندان با حذف بازه دمایی ثابت برای آب شهر (a) سرمایش ممتد، (b) بازه دمایی ثابت -14°C .



شکل ۱۲. مقایسه بستگی زمانی و دمایی آهنگ یخبندان با حذف بازه دمایی ثابت برای باران بندرانزلی (نمونه مورخ ۷۹/۸/۱۹) (a) سرمایش ممتد، (b) بازه دمایی ثابت -12°C ، (c) بازه دمایی ثابت -14°C ، (d) فراجش دما در -12°C .

مقادیر آب مایع محتوای ابر برای ابرهای کومه‌ای برابر ۰/۷ تا ۱ گرم بر مترمکعب و برای ابرهای پوشنی مقادیر ۰/۶ تا ۰/۷ گرم بر مترمکعب برآورد شد. این مقادیر با توجه به سیستم ابری منطقه گیلان، برای ابرهای کومه‌ای و پوشنی مورد تایید دانشمندان فیزیک ابر است (راجرز و یو، ۱۹۹۶).

در مرحله بعد با استفاده از ثابت‌های a و b به دست آمده از خطوط رگرسیون $R = a \exp(bT)$ ، مقادیر \bar{a} و \bar{b} که با میانگین وزنی نسبت به تعداد قطره‌ها به دست می‌آید، برای ابرهای پوشنی $\bar{a} = 1.3 \times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$ و $\bar{b} = 0.4$ و برای ابرهای کومه‌ای $\bar{a} = 6.3 \times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$ و $\bar{b} = 0.25$ است.

سپس، غلظت انبوهی با استفاده از معادله V به دست آمد. در این معادله $r = 1^\circ \text{C min}^{-1}$ ، $T = -10^\circ \text{C}$ و $V = 0.01 \text{ cm}^3$ است (والی، ۱۹۹۴). برای ابرهای پوشنی، $K(T) = 7.1 \text{ cm}^{-3}$ و برای ابرهای کومه‌ای، $K(T) = 7.3 \text{ cm}^{-3}$ به دست آمد. برای تعیین $N_{ice}(T)$ از معادله ۸ استفاده شد که برای ابرهای پوشنی، $N_{ice}(T) = 4.3 - 4.9 \text{ m}^{-3}$ و برای ابرهای کومه‌ای $N_{ice}(T) = 5.11 - 7.3 \text{ m}^{-3}$ محاسبه شد که در این معادله $\rho_w = 1 \text{ g cm}^{-3}$ است.

$N_{ice}(t)$ از معادله ۱۰ به دست می‌آید که در آن $t = 10 \text{ min}$ است و مقادیر $N_{ice}(t) = 7.6 - 8.8 \text{ m}^{-3}$ برای ابرهای پوشنی و $N_{ice}(t) = 9.2 - 13.14 \text{ m}^{-3}$ برای ابرهای کومه‌ای تخمین زده می‌شود. در نهایت، برای برآورد تعداد هسته‌های یخی موجود در

ابر، معادله ۱۱ به کار می‌رود و مقادیر زیر به دست می‌آید

$$N_{ice}^{total} = 11.9 - 13.8 \text{ m}^{-3} \quad \text{برای ابرهای پوشنی}$$

$$N_{ice}^{total} = 14.31 - 20.44 \text{ m}^{-3} \quad \text{برای ابرهای کومه‌ای}$$

۵ سیستم ابرهای روی ایران در پاییز و زمستان

منشأ و مسیر حرکت توده‌های هوایی که در فصل زمستان به سمت ایران هجوم می‌آورند در شکل ۱۳ نمایش داده شده است (صادقی حسینی، ۱۹۹۸). در منطقه مورد بحث ما (شمال ایران -

۴ برآورد هسته‌های یخی در ابر

با استفاده از نمودارها و خطوط رگرسیون $R = a \exp(bT)$ ، تعداد هسته‌های یخ موجود در ابر مورد نظر، با معادله‌های ۸، ۱۰ و ۱۱ برآورد می‌شود. قبل از هر چیز بایستی با استفاده از نمودار Skew-T مربوط به روز بارانی آن منطقه میزان آب مایع محتوای ابر (LWC) به دست آید. به دلیل موجود نبودن داده‌های جو بالا در منطقه مورد مطالعه (گیلان) در این تحقیق، نقشه‌های Skew-T تبریز مورد استفاده قرار گرفت و سیستم‌هایی در نظر گرفته شد که از شمال غربی وارد کشور می‌شوند و از منطقه تبریز می‌گذرند و به منطقه گیلان می‌رسند و در آنجا بارش می‌دهند. تعدادی از روزها وجود داشت که نشان می‌داد بارندگی در منطقه گیلان با بارندگی و ناپایداری روی تبریز همراهی نمی‌کند. مخصوصاً مواقعی که توده هوا از طرف قفقاز به شمال ایران وارد شده بود و یا پرفشار محلی روی منطقه حاکم بود. در این روزها LWC از روی Skew-T به دست نیامد.

نمودارهای Skew-T با اختلاف ۲۴ ساعت قبل و بعد از روز نمونه‌گیری در گیلان بررسی شد و برای سیستم‌های ابری گوناگون، میزان آب مایع محتوای ابر (LWC) با استفاده از معادله زیر (راجرز و یو، ۱۹۹۶) به دست آمد.

$$LWC = (r_0 - r_1) \frac{\bar{P}}{2.87T} \quad (12)$$

که در آن r_0 نسبت آمیختگی اشباع در پایه لایه ابری و r_1 نسبت آمیختگی اشباع در قله لایه‌ای است که با تغییرات قابل ملاحظه دما در روی نمودار Skew-T مشخص می‌شود. واحد نسبت آمیختگی اشباع روی نمودار، گرم بر کیلوگرم است. \bar{P} ، فشار میانگین لایه بر حسب هکتوپاسکال و \bar{T} ، دمای میانگین لایه بر حسب درجه کلوین است.

برای هر لایه از منحنی T ، آب مایع محتوای لایه ابری به دست می‌آید و سپس برای به دست آوردن آب مایع محتوای ابر از پایه تا قله ابر، میانگین وزنی گرفته می‌شود و مقدار آب مایع محتوای ابر بر حسب گرم بر مترمکعب به دست می‌آید.

تایید می‌کنند. این مدل نه تنها نقش ذرات خارجی را در هسته‌بندی یخبندان غوطه‌وری بیان می‌کند، بلکه بستگی زمانی را که در رشد جنین ایجاد می‌شود، تایید می‌کند.

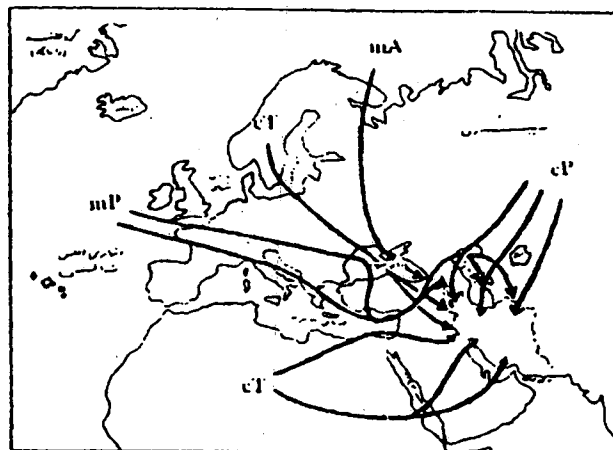
در آزمایش سرمایه‌ش ممتد با کاهش تدریجی دما، آهنگ یخبندان به صورت نمایی کاهش می‌یابد. به دلیل کم بودن تعداد قطره‌های یخ زده و یخ زده به ترتیب در نقاط ابتدایی و انتهایی آزمایش، خطا در این نقاط بیشتر از اواسط آزمایش است.

در آزمایش بستگی زمانی، تا زمانی که دما کاهش می‌یابد آهنگ یخبندان افزایش می‌یابد و وقتی دما ثابت می‌ماند. آهنگ یخبندان تغییرات کمی می‌کند و سپس با از سر گرفتن سرمایه‌ش، آهنگ یخبندان نیز زیاد می‌شود. در این حالت، تعداد رویداد هسته‌بندی به سرعت با زمان زیاد می‌شود تا جایی که به مقداری می‌رسد که دو برابر حالت سرمایه‌ش ممتد در آن دماست.

نتایج به دست آمده از هسته‌های یخبندان حاصل از نمونه‌های باران باریده در منطقه گیلان در خلال پاییز و زمستان ۱۳۷۹، به هسته‌بندی یخ به وسیله هسته‌های یخبندان غوطه‌وری مربوط می‌شوند که اینها هسته‌هایی خارجی‌اند که در آب غوطه‌ور هستند. این نوع هسته‌بندی تنها یکی از روش‌های تشکیل یخ در جو است که قانونمندی نسبی این مد یخبندان هنوز کاملاً شناخته نشده و احتمال دارد که از مکانی به مکان دیگر تغییر کند. با این حال به طور کلی تعیین تعداد و نوع هسته‌های یخی موجود در جو نیز بسیار پیچیده است. بنابراین به مدل در آوردن مد هسته‌های یخبندان غوطه‌وری به شکل معادلات و ساده‌سازی‌های ارائه شده برای تعیین تعداد هسته‌های یخبندان غوطه‌وری در سیستم‌های ابری بسیار مفید است. یک پروژه موفق باروری ابر مستلزم انجام آزمایش‌های مربوط به تعیین میکرو فیزیک ابر در آزمایشگاه و درون ابر با هواپیما است. که در این صورت جدا از هزینه‌های فوق‌العاده زیاد مربوط به این تحقیقات از قبیل تجهیز هواپیماهای مخصوص به وسایل مدرن و گران، مخاطره پرواز در درون ابرها به ویژه ابرهای کومه‌ای که همراه با توفان‌های تندرانی‌اند، انجام

گیلان) توده هواهای موثر CP و MA و MP است که در این بین CP از همه مهم‌تر است.

توده هوای MP در صورتی تاثیرگذار است که از روی دریای مدیترانه بگذرد. با توجه به مسیر حرکت آن که از روی خشکی‌های زیادی می‌گذرد انتظار می‌رود به نسبت توده هوای CP که از روی سبیری و دریای خزر می‌آید هسته‌های یخبندان بیشتری داشته باشد.



شکل ۱۳. توده‌های هوای مهاجمی روی ایران در فصل زمستان.

نتیجه‌گیری

یکی از عوامل ماکروسکوپی موثر در هسته‌بندی یخبندان، بستگی زمانی آهنگ یخبندان است. در این حالت دو بخش اساسی وجود دارد. اول، مرحله رشد جنین تا اندازه بحرانی است که با برخورد‌های تصادفی و حرکت ملکول‌ها در حالت همگن یا با یک مکان هسته‌بندی در حالت ناهمگن ایجاد می‌شود. بنابراین هسته‌بندی به طور ذاتی وابسته به زمان است. دوم، به دلیل این که احتمال هسته‌بندی در یک مکان به شدت وابسته به دماست، بستگی زمانی تنها موقعی آشکار می‌شود که تغییرات دما با زمان خیلی آرام باشد. این نکات با جزئیات بیشتر توسط والی (۱۹۹۴)، در مدل بستگی زمانی آهنگ یخبندان توضیح داده شده است. نمودارهای آهنگ یخبندان مدل بستگی زمانی آهنگ یخبندان را

منابع

- Bigg, E. K., 1953, The supercooling of water: proc. Phys. Soc. B., **56**, 688-691.
- Cooper, W. A., and Lawson, R. P., 1984, Physical interpretation of results from the HIPLEX-1 experiment: Jour. Clim. App. Meteorol., **23**, 523-535.
- Franks, F., Mathias, S. F., Galfre, P., Webster, S. D., and Brown, D., 1983, Ice Nucleation and Freezing in undercooling Cells: Cryobiol., **20**, 298-309.
- Rogers, R. R., and You, M. K., 1996, A short course in cloud physics, Third edition, Buherworth-Heinemann, 290p.
- Sadeghi Hosseini, S. A., 1998, Ice initiation in clouds: Ph.D. Thesis, UMIST.
- Vali, G., 1994, Freezing rate due to heterogeneous nucleation: Jour. Atmos. Sci., **51**, 1843-1856.
- Vali, G., and Stansbury, E. J., 1966, Time-dependent characteristics of the heterogeneous nucleation of ice: Canadian Jour. of Phys., **44**, 477-481.
- Vonnegut, B., and Baldwin, M., 1984, Repeated nucleation of supercooled water sample that contains silver iodide particles: Jour. Climate. Appl. Meteor., **23**, 486-490.
- Young, K. C., 1993, Microphysical process in clouds: Oxford University press, 427P.

این پروژه‌ها را با مشکلات جدی مواجه می‌کند. در این پژوهش سعی شده است تا با چند آزمایش ساده، تعداد هسته‌های یخ‌بندان غوطه‌وری ابرها تخمین زده شود و اطمینان نسبی از موفقیت پروژه باروری به دست آید که در این صورت تقریباً از انجام عملیات داخل ابر برای شمارش این هسته‌ها بی‌نیاز می‌شویم و این خود بسیار ارزشمند است.

سیستم‌هایی که از سمت شمال و شمال غرب کشور در فصل پاییز و زمستان ۱۳۷۹ وارد گیلان می‌شوند، با توجه به تعداد هسته‌های برآورد شده برای ابرهای پوشنی و کومه‌ای (10^{-3} - 10^{-2}) و (10^{-3} - 10^{-2})، می‌توانند دارای پتانسیل باروری خوبی باشند. زیرا تعداد هسته‌های یخی برآورد شده حتی از مقدار بهینه هسته‌های یخی (10^{-1} - 10^{-2} یا 10^{-3} - 10^{-5}) و حالت فراباروری (حدود 10^{-1} - 10^{-2}) تخمین زده شده (یانگ، ۱۹۹۳)، در نقاط مختلف جهان نیز فاصله بسیار زیادی دارد.

اگر این آزمایش‌ها روی نمونه‌های بارش از ابرهای شهرهای صنعتی و آلوده مثل تهران انجام شود به دلیل غلظت فوق‌العاده زیاد ذرات و هواپیماها ممکن است گاهی حالت فراباروری مشاهده شده و در مجموع پتانسیل بارش کاهش یابد.

با توجه به نتایج باروری موفقیت‌آمیز، ابرهای دشت‌های رفیع در جنوب مونتانا (صادقی حسینی، ۱۹۹۸) که دارای غلظت هسته‌های غوطه‌وری و شرایط قابل مقایسه با تعداد هسته‌های غوطه‌وری این آزمایش‌ها هستند، می‌توان نسبت به بارور نمودن موفقیت‌آمیز ابرهای منطقه گیلان در مواقع ضروری اطمینان داشت.

تشکر و قدردانی

بدین‌وسیله از شورای محترم پژوهشی دانشگاه تهران و موسسه ژئوفیزیک به دلیل حمایت مالی برای انجام این مطالعه (طرح پژوهشی شماره ۶۵۱/۱/۵۳۳) و در اختیار گذاردن امکانات آزمایشگاهی تشکر و قدردانی می‌شود.