

مطالعه توان بارورسازی ابرهای سرد با هسته‌های یخ بیوژنتیک

علیرضا صادقی حسینی* و آتوسا فردوسی‌انجف‌آبادی*

*موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، صندوق پستی ۲۴۶۶-۱۴۱۵۵

دریافت مقاله: ۸۱/۱/۲۱ پذیرش مقاله: ۸۲/۱۰/۲۳

چکیده

با وجود پیشرفت‌های به دست آمده در ۲۰ سال اخیر، هنوز پدیده هسته‌بندی به خوبی شناخته نشده و بدین جهت مورد توجه بسیاری از دانشمندان فیزیک ابر است. اغلب نظریه‌های مطرح شده در تشریح این پدیده، به دلیل تنوع وسیع آن، قادر به ارائه توضیحات کامل نیستند. در این پژوهش بستگی آهنگ هسته‌بندی یخبندان غوطه‌وری نمونه‌های مواد طبیعی، مانند آب مقطر، دود، خاک رس و خاک برگ، به دما و زمان با استفاده از دستگاه‌های صفحه سرد و نخ ماهی‌گیری بررسی شده و نتایج با هم مقایسه شده‌اند. این نتایج، مدل تغییرات نمایی آهنگ یخبندان را تایید می‌کنند. کارایی دانه‌پاشی مواد طبیعی با استفاده از افشاندن این مواد روی قطره‌های آب مقطر در دستگاه نخ ماهی‌گیری، مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج به دست آمده ضمن تایید نتایج مدل بستگی دما-زمان آهنگ یخبندان هسته‌بندی ناهمگن (والی، ۱۹۹۴)، هسته‌های یخ بیوژنتیک ناشی از باکتری‌ها را به مثابه مواد بسیار مؤثر هسته‌بندی یخبندان در بارورسازی ابرها معرفی می‌نماید. در این آزمایش‌ها، بیشترین فعالیت هسته‌های یخ بیوژنتیکی در دمای 5°C - و کارایی دانه‌پاشی آنها در دمای 9°C - با حذف اثر هسته‌بندی برخوردی، حدود ۸۰٪ به دست آمد. انجام این آزمایش‌ها در شرایط آب و هوایی بهتر از نظر آلودگی و همچنین با کمک روش کشت باکتری‌ها در محیط‌های آزمایشگاهی، نتایج بهتری را نوید می‌دهد. استفاده از این نتایج در طرح‌های بارورسازی ابر، درصد موفقیت آنها را بالاتر می‌برد، از صرف هزینه‌های اضافی جلوگیری می‌کند و خطر پرواز هواپیماهای تحقیقاتی در درون ابر را کاهش می‌دهد.

کلیدواژه‌ها: آهنگ هسته‌بندی ناهمگن، آهنگ یخبندان، هسته‌های یخبندان غوطه‌وری، هسته‌های یخبندان بیوژنتیک، کارایی دانه‌پاشی

۱ مقدمه

آزمایش‌های یخبندان با استفاده از تعداد زیادی از قطره‌های کوچک برای مطالعه هسته‌بندی همگن و ناهمگن، به‌طور روزافزون انجام می‌شود. وجود هسته‌های یخی با فعالیت مختلف در نمونه، با توجه به توزیع دماهای یخبندان در هسته‌بندی ناهمگن توضیح داده شده است.

تفسیر آزمایش‌های هسته‌بندی ناهمگن یخ که والی و استنزبری آن را در ۱۹۶۶ مطرح کردند به واسطه ارائه شواهد آزمایشی و تجربی، اهمیت زیادی پیدا کرد. در این آزمایش‌ها تغییرات یخبندان قطره‌ها با دمای متفاوت نسبت به زمان مقایسه شدند. علاوه بر آزمایش‌هایی با آهنگ سرمایش ثابت و دمای ثابت، تاخیرهای زمانی ناشی از معکوس کردن دما قبل از دوره‌هایی در دماهای ثابت نیز اضافه شده است.

مدل بستگی زمانی آهنگ یخبندان (TDFR) را والی در ۱۹۹۴ مورد بررسی قرار داد و ضمن تایید نتایج والی و استنزبری (۱۹۶۶)، برآوردی از تعداد هسته‌های غوطه‌ور در قطره‌های ابر سرد به دست آورد. مطالعات یخبندان قطرات بر اثر فعالیت هسته‌های یخ بیوژنتیک که شاخه بسیار جدیدی از این علم در فیزیک ابر است، با کارهای والی (۱۹۹۵)، لی و همکاران (۱۹۹۵) پیگیری شد. صادقی حسینی (۱۹۹۸) هسته‌های بیوژنتیک فعال از تخمیر برگ‌های پاییزی درخت زان از تیره بلوط را تا دمای 1°C - در مد هسته‌بندی غوطه‌وری معرفی نمود. صادقی حسینی و رضازاده (۱۳۸۱) با استفاده از مدل TDFR، برآوردی از تعداد هسته‌های یخبندان غوطه‌وری در قطرات باران ناحیه گیلان به دست آوردند. در این پژوهش نیز بر اساس کارهای پژوهشی

هسته‌بندی در دماهای مختلف متفاوت است، مقدار دیده‌بانی‌های $\delta N / \delta t$ مشخص نیست. برای تمایز این شرایط از حالت واحدهای نمونه یکسان که (۱) و (۲) برای آن به کار می‌روند، از "آهنگ یخبندان"، به جای سمت چپ معادله (۱) استفاده می‌شود (والی، ۱۹۹۴):

$$R(T, t) = -\frac{1}{N(T, t)} \times \frac{\delta N(T, t)}{\delta t} \quad (۳)$$

که در آن، R آهنگ یخبندان، به‌طور کلی تابعی از دما و زمان است. $N(T, t)$ و $\delta N(T, t)$ نیز به ترتیب تعداد واحدهای یخ زده و تغییر در تعداد واحدهای یخ زده در دمای T و زمان t را بیان می‌کنند.

۲-۳ روش‌های آزمایش

در این آزمایش‌ها از دو روش استفاده شده است. روش صفحه سرد که در آن بستگی دمایی هسته‌بندی یخبندان بررسی می‌شود. دوم روش نخ ماهی‌گیری که با آن بستگی زمانی هسته‌بندی مورد مطالعه قرار می‌گیرد. و همچنین از این روش برای دانه‌پاشی و مطالعه کارایی بارورسازی مواد مورد آزمایش استفاده شده است. شایان توجه است که آزمایش‌ها روی آب مقطر دوبار تقطیر شده، مخلوط آب و دود، مخلوط آب و خاک رس معمولی و مخلوط آب و خاک برگ انجام شدند.

۲-۳-۱ روش صفحه سرد

دستگاه صفحه سرد شامل یک صفحه مسی صیقلی به قطر ۱۲ سانتی‌متر پوشیده از لایه نازک کروم است که در یک اتاقک از جنس پلاستیک فشرده شفاف قرار دارد. این اتاقک باعث کاهش تبادل گرمایی صفحه مسی با محیط بیرون می‌شود. سرمایش صفحه با لوله‌ای انجام می‌گیرد که به درون فلاکس شیشه‌ای دو جداره حاوی ازت مایع فرو می‌رود. ازت مایع دمایی حدود

صادقی حسینی (۱۹۹۸) و صادقی حسینی و رضازاده (۱۳۸۱) مروری بر آهنگ یخبندان غوطه‌وری هسته‌های به‌دست آمده از مواد طبیعی و کازایی دانه‌پاشی آنها خواهد شد. این پژوهش‌ها از نظر شناخت خصوصیات مواد مختلف موثر در دانه‌پاشی و استفاده از مواد مناسب و سازگار با محیط و اقلیم منطقه در پروژه‌های بارورسازی مصنوعی ابر با ارزش خواهند بود.

۲ روش تحقیق و فنون مورد استفاده

۲-۱ آهنگ هسته‌بندی

احتمال هسته‌بندی در واحد حجم نمونه یا در واحد سطح ماده هسته‌بندی کننده، به مثابه آهنگ هسته‌بندی (J) معرفی می‌شود. از لحاظ تجربی برای آب خالص (هسته‌بندی همگن)، آهنگ هسته‌بندی، تابعی از یخبندان واحدهای نمونه در بازه زمانی مشخص است. در یک دمای ثابت T (به درجه سانتی‌گراد)، اگر $N(t)$ تعداد واحدهای یخ زده باشد که هر یک حجم V را دارند و $\delta N(t)$ تعداد واحدهای یخ زده بین t و $(t+\delta t)$ باشد، $J(T)$ با رابطه زیر داده می‌شود (والی، ۱۹۹۴):

$$J(T) = -\frac{1}{V} \times \frac{1}{N(t)} \times \frac{\delta N(t)}{\delta t} \quad (۱)$$

$$J(T) = -\frac{1}{V} \times \frac{r(T)}{N(T)} \times \frac{\delta N(T)}{\delta T} \quad (۲)$$

که در آن $r(T)$ آهنگ سرمایش در دمای T است (δT) و $r(T)$ منفی هستند.

۲-۲ آهنگ یخبندان

برای هسته‌بندی یخبندان ناهمگن معادله‌های (۱) و (۲) قابل استفاده نیستند، زیرا واحدهای نمونه، علی‌رغم این‌که از یک نمونه یکسان آب تهیه می‌شوند، عموماً نمی‌توانند به صورت پدیده‌های همانند در نظر گرفته شوند. هسته‌های متفاوت در میان واحدها به شکل تصادفی توزیع می‌شوند و چون آهنگ

در فواصل مساوی از هم و با حجم‌های مساوی با سرنگ روی صفحه چیده می‌شوند. با شروع آزمایش، دما و تعداد قطره‌های یخ زده در هر دقیقه یادداشت می‌شود و این کار تا هنگام یخ زدن تمامی قطره‌ها ادامه می‌یابد. یخ زدن قطره‌ها با شیری شدن یا تار شدن آنها قابل دیدبانی است.

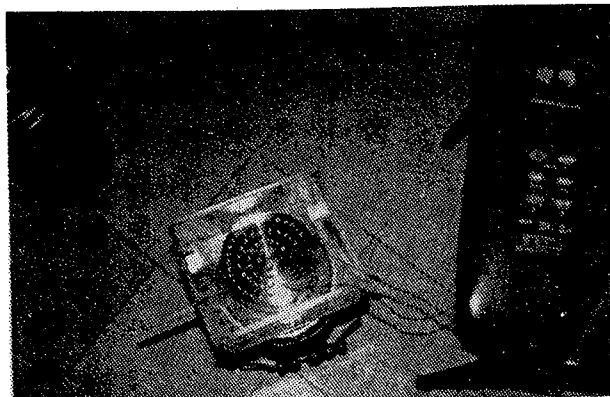
نمودارهای ستونی مربوط به توزیع قطره‌های یخ زده با نمونه مخلوط آب مقطر و خاک برگ در روزهای اول تا هشتم پس از تهیه مخلوط، در شکل ۲ آورده شده است. مشاهده می‌شود که روزهای پنجم تا هفتم گرم‌ترین دمای هسته‌بندی را نشان می‌دهند. نمودارهای ستونی مربوط به توزیع قطره‌های یخ زده با نمونه‌های آب مقطر، مخلوط‌های آب مقطر با دود، خاک رس معمولی و خاک برگ، در شکل‌های ۳ و ۴ آورده شده است. ملاحظه می‌شود که بیشترین تعداد قطره‌های یخ زده برای آب مقطر دوبار تقطیر شده در دمای 21°C - و برای مخلوط آب مقطر با دود، خاک رس معمولی و خاک برگ به ترتیب در دماهای $10/5^{\circ}\text{C}$ -، $6/5^{\circ}\text{C}$ - و $0/5^{\circ}\text{C}$ - است.

شکل‌های ۵ و ۶ خط‌های بهترین برازش با ویژگی‌های نگاه‌شده در هر شکل از آهنگ یخبندان آب مقطر، دود، خاک رس معمولی و خاک برگ را نشان می‌دهند. در این شکل‌ها آهنگ یخبندان محلول قطرات آب مقطر، آب مقطر و دود، آب مقطر و خاک رس و آب مقطر و خاک برگ از دماهای سردتر به محدوده دماهای گرم‌تری با آهنگ کاهش دمای 1°C بر دقیقه منتقل می‌شود.

۲-۳-۲ روش نخ ماهی‌گیری

در این تحقیق علاوه بر بررسی بستگی دمایی آهنگ یخبندان، بستگی زمانی آهنگ یخبندان از نظر رسیدن به تصور مناسب برای بررسی کارایی دانه‌پاشی مواد مورد نظر، آزمایش شد. از آنجا که احتمال دارد آهنگ سرمایش در روش صفحه سرد دقیقاً مساوی

180°C - دارد و می‌توان با کمک آن به دماهای بسیار سرد رسید. چون ازت مایع به سرعت تبخیر می‌شود، لازم است که آزمایش‌ها در همان روز که ازت مایع تهیه می‌شود، انجام گیرد. از آنجا که حجم قطره‌های مورد آزمایش دارای اهمیت است، لازم است که حجم قطره‌ها با هم مساوی و مقدار آن مشخص باشد. برای این کار، حجم 100 قطره خارج شده از سرنگ به دست آمد که مساوی با 1cm^3 بود و بدین ترتیب حجم هر قطره معادل 1cm^3 ٪ در نظر گرفته شد. در هر آزمایش دقت لازم برای مساوی بودن حجم قطره‌ها به عمل آمده است. دمای صفحه سرد با اتصال دو دماسنج دیجیتالی که یکی به مرکز و دیگری نزدیک به محیط صفحه متصل است، اندازه‌گیری می‌شود. در طول آزمایش‌ها دمای میانگین به عنوان دمای قطره‌ها منظور شده است.

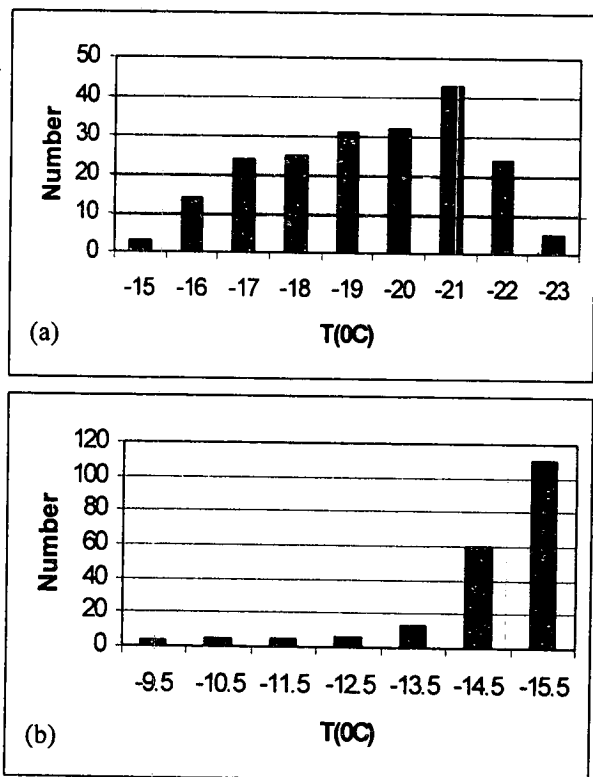


شکل ۱. نمایی از دستگاه صفحه سرد استفاده شده.

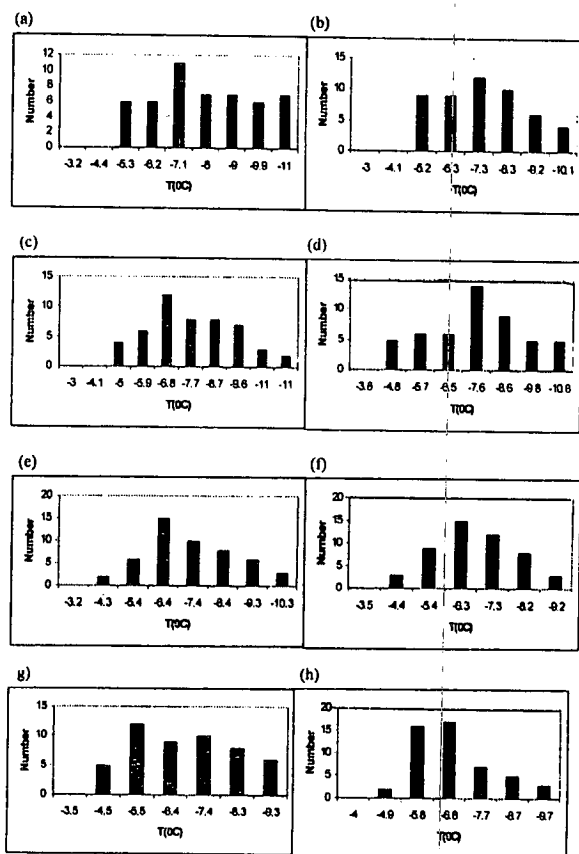
برپایه کار والی (۱۹۹۴)، در هر آزمایش، میزان سرمایش $1^{\circ}\text{C min}^{-1}$ مورد نیاز است. به این دلیل باید دستگاه برای این آهنگ سرمایش کالبد زنی شود. به این منظور آزمایشی خشک (بدون حضور قطره‌ها) انجام شد و حجم ازت مایع مورد نیاز برای این میزان سرمایش به دست آمد. در هر نوبت آزمایش، ۵۰ قطره از نمونه مورد آزمایش

خاک رس معمولی و خاک برگ) با سرنگ روی نخ‌ها قرار می‌گیرد. مزیت این دستگاه در این است که ارتباط قطره‌ها به

$1^{\circ}\text{C min}^{-1}$ نباشد، به این دلیل بستگی زمانی و دمایی آهنگ یخ‌زدان، جداگانه بررسی می‌شود.



شکل ۳. نمودارستونی توزیع یخ‌زدان قطره‌های (a) آب مقطر و (b) مخلوط آب مقطر با دود با آهنگ سرمایش $1^{\circ}\text{Cmin}^{-1}$ در ۵ آزمایش.

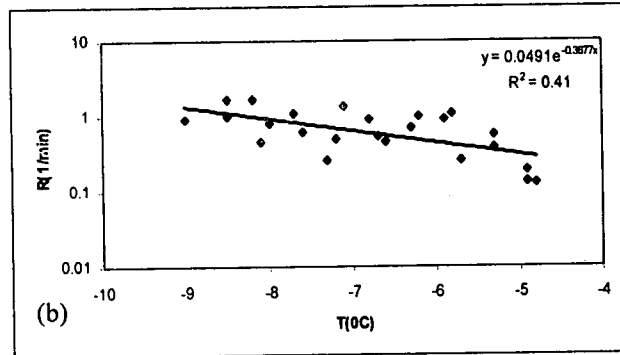
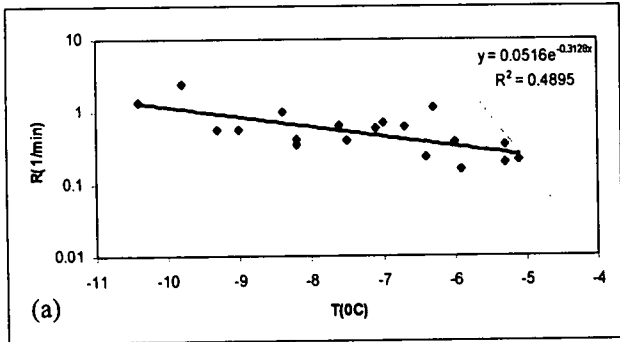


شکل ۴. توزیع قطره‌های یخ زده نمونه مخلوط آب مقطر با خاک برگ (a) روز ۱، روز ۲ (b)، روز ۳ (c)، روز ۴ (d)، روز ۵ (e)، روز ۶ (f)، روز ۷ (g)، روز ۸ (h) روز، پس از تهیه مخلوط.

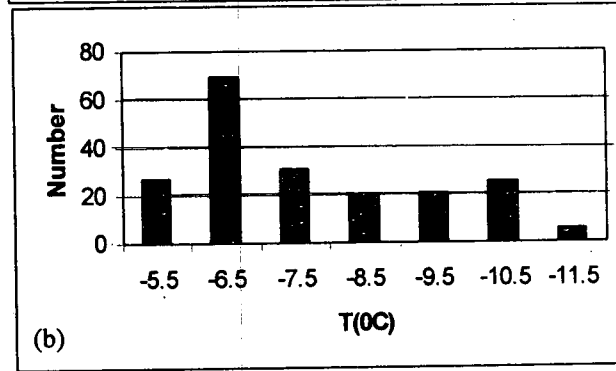
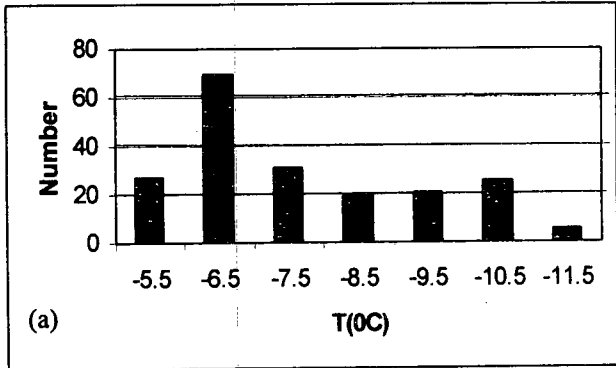
حداقل می‌رسد و نیز کنترلی روی اندازه قطره‌ها وجود دارد. زیرا اگر قطره‌ها بزرگ‌تر از حد معین باشند، از روی نخ سقوط می‌کنند. علاوه بر این قطره‌ها مستقیماً از راه محیط اطراف سرد شده و بر خلاف روش صفحه سرد، عوامل محیطی تأثیرگذار روی هسته‌بندی، مانند ناپاکی زمینه و یا تغییر شکل قطره‌ها به حداقل می‌رسند. به هنگام قرار دادن پایه پلاستیکی در داخل فریزر، همه قطره‌ها تغییرات دمایی یکسانی را تحمل می‌نمایند و شرایط برای همه آنها یکسان است. آشکارسازی یخ‌زدان نیز با توجه به شیری (تار) شدن قطره‌ها انجام می‌شود.

در روش نخ ماهی‌گیری از یک فریزر برای ایجاد سرمایش استفاده می‌شود. سه رشته نخ ماهی‌گیری به یک پایه پلاستیکی بسته شده و دو ترموکوپل نیز درست در سطح نخ‌ها واقع می‌شوند. این دو ترموکوپل در سمت راست و چپ نخ‌ها قرار می‌گیرند تا دمای میانگین آنها به منزله دمای قطره‌ها در نظر گرفته شود. در هر نوبت آزمایش، ابتدا نخ‌ها با الکل تمیز می‌شوند و سپس ۵۰ قطره از ماده مورد آزمایش (آب مقطر و مخلوط‌های آب مقطر و دود،

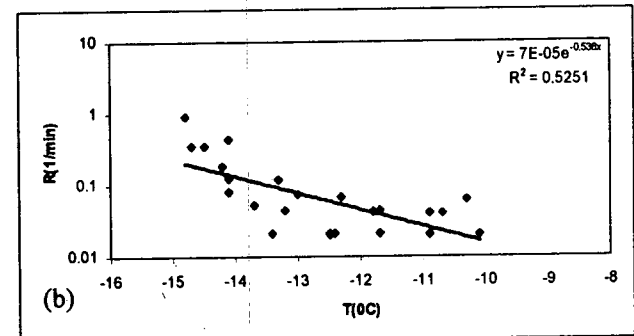
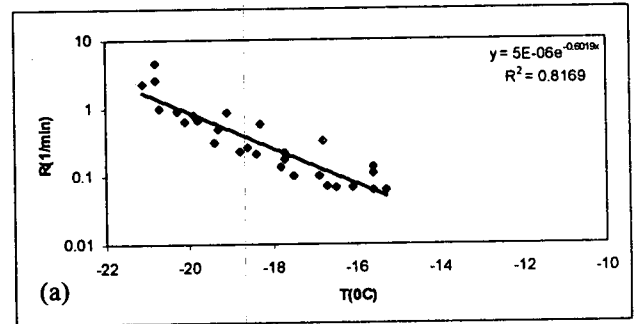
۲-۳-۳ اندازه گیری آهنگ یخبندان تابع زمان (TDFR) در ادامه آزمایش‌های والی (۱۹۹۴)، در مورد بستگی آهنگ یخبندان تابع زمان در خصوص ماده آب، ابتدا لازم است که فریزر کالبنزی شود و درجه‌های مورد نیاز برای دماهای مورد آزمایش به دست آید. این دماها عبارت‌اند از -5°C ، -7°C و



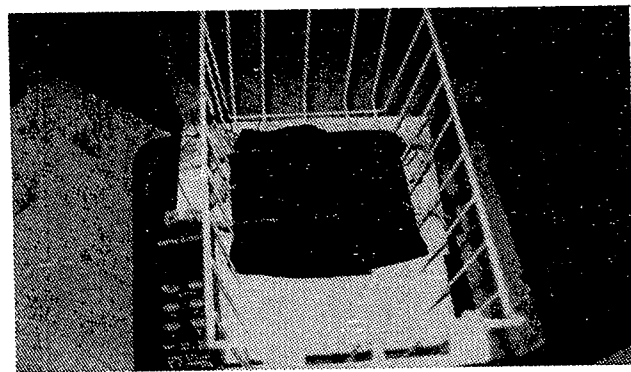
شکل ۶. بستگی دمایی آهنگ یخبندان R در آزمایش سرمایش منند برای نمونه مخلوط آب مقطر با (a) خاک رس معمولی و (b) خاک برگ.



شکل ۴. نمودارستونی توزیع یخبندان قطره‌های مخلوط آب مقطر با (a) خاک رس معمولی و (b) خاک برگ با آهنگ سرمایش $1^{\circ}\text{Cmin}^{-1}$ در ۵ آزمایش.



شکل ۵. بستگی دمایی آهنگ یخبندان R در آزمایش سرمایش منند برای نمونه (a) آب مقطر و (b) مخلوط آب مقطر با دود.



شکل ۷. نمای از دستگاه نغ ماهی‌گیری مورد استفاده در آزمایش.

در هر نوبت آزمایش برای هر یک از مواد مورد نظر، قطره‌ها به مدت ۳۰ دقیقه در فریزر و در دمای ثابت قرار می‌گیرند و در هر دقیقه دما و تعداد قطره‌های یخ‌زده یادداشت می‌شود. از آنجا که ثابت نگه‌داشتن دمای فریزر تقریباً غیر ممکن است، برای هر دما محدوده خطای بیشینه $\pm 0.5^\circ\text{C}$ در نظر گرفته شده است و دقت می‌شود که تغییرات دمایی از این بازه تجاوز نکند. در شکل‌های ۸ تا ۱۴، تغییرات دما با زمان، کسر یخبندان و آهنگ یخبندان برای هر یک از نمونه‌های مورد آزمایش ترسیم شده است.

در این آزمایش‌ها از آنجا که برای نمونه، آب مقطر، در همه دماهای آزمایش شده قطره‌ها یخ نزدند (آب مقطر در دماهای بالای -15°C یخ می‌زند)، و نیز نمونه مخلوط آب مقطر با دود تنها در دمای -9°C فعالیت ضعیفی را نشان می‌دهد، نمودارهای مربوط به آنها در دماهای زیر -9°C حذف شده‌اند.

مشاهده می‌شود که همه نمونه‌ها پس از ۱۵ دقیقه به آهنگ یخبندان صفر و کسر یخبندان ثابت می‌رسند. این زمان ۱۵ دقیقه برای بخش بعدی آزمایش‌ها یعنی دانه‌پاشی، انتخاب می‌شود.

جدول ۱. دیده‌بانی آهنگ‌های یخبندان آب مقطر.

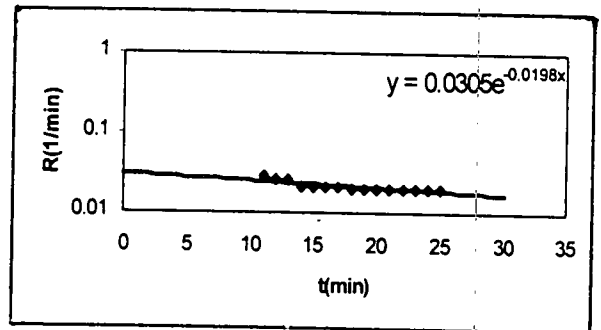
نوع آزمایش	تعداد قطره‌ها	a	b
سرمایش ممتد	۲۵۰	5×10^{-6}	-۰/۶

در تمام شکل‌های مربوط به آهنگ یخبندان، تعداد قطره‌های مورد آزمایش و ضرایب ثابت a و b مربوط به منحنی رگرسیون $R=a.\exp(bt)$ در جدول‌های ۱ تا ۴ مورد بررسی قرار گرفته است.

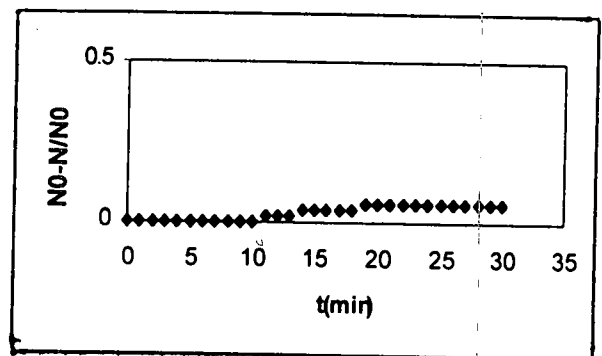
۳ بررسی کارایی دانه‌پاشی (SE) برخی مواد طبیعی برگ‌های کاملاً پوسیده دمای هسته‌بندی گرم‌تر و غلظت هسته‌های یخی بیشتری را حتی نسبت به یخ‌زده نقره از خود آشکار می‌سازند (اشنل و والی، ۱۹۷۲).

-9°C که دو دمای اول به ترتیب دمای بیشترین فعالیت هسته‌بندی برای خاک برگ و خاک معمولی است و دمای سوم برای مقایسه دماهای بالای -9°C جایی که هسته‌بندی یخبندان برخورداردی به مرور قابل توجه می‌شود، با دماهای کم‌تر از آن، انتخاب شده است.

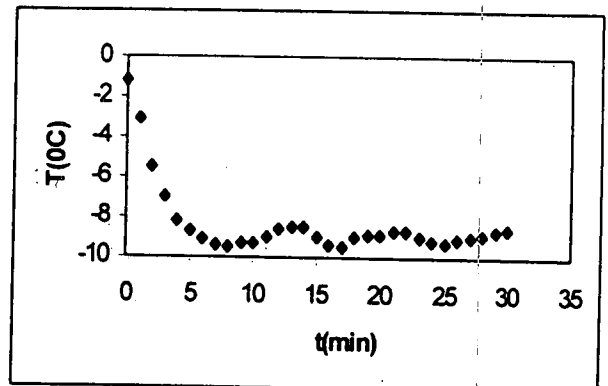
آهنگ یخبندان



کسر یخبندان

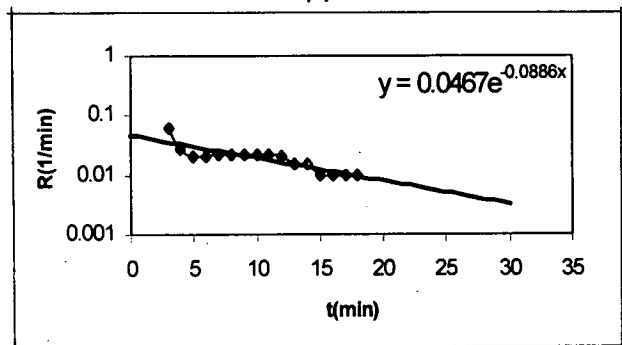


تغییرات دما با زمان

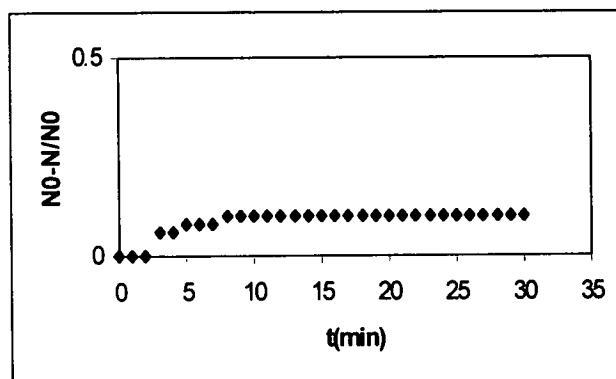


شکل ۸. تغییرات دما، کسر یخبندان و آهنگ یخبندان نمونه مخلوط آب مقطر با دود در دمای ثابت -9°C .

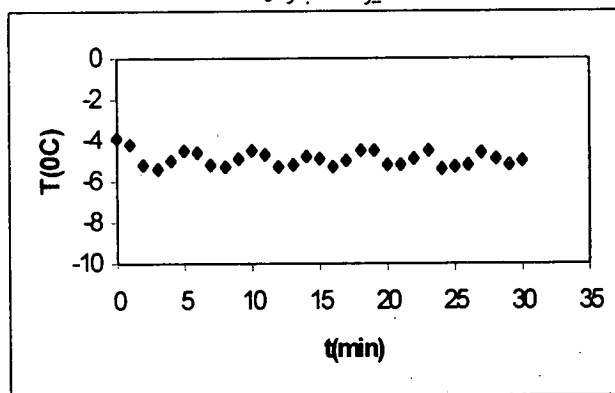
آهنگ یخبندان



کسر یخبندان



تغییرات دما با زمان



شکل ۹. تغییرات دما، کسر یخبندان و آهنگ یخبندان نمونه مخلوط آب مقطر با خاک رس معمولی در دمای ثابت ۵°C-

۳-۱ فرایند آزمایش

در این آزمایش‌ها مانند بررسی تغییرات زمانی آهنگ یخبندان، از دستگاه نخ ماهی‌گیری استفاده شده است. در ابتدای کار نخ‌ها با الکل تمیز می‌شوند و با کمک سرنگ هر بار ۵۰ قطره از آب

هسته‌های یخبندان فعال در (LDN) با غلظت ۱۰ گرم برگ خشک در لیتر آب مقطر، تقریباً قطری به اندازه ۰/۰۲μm دارند و در دماهای سردتر، فعالیت بیشتری را آشکار می‌سازند. این هسته‌های کوچک، حتی در غلظت‌های بسیار کم محلول LDN و در ابرسرمایش‌های کم، دارای فعالیت خوبی دارند و فعالیت آنها ناشی از نوعی باکتری به نام pseudomonas syringae است.

جدول ۲. دیده‌بانی آهنگ یخبندان دود.

نوع آزمایش	تعداد قطره‌ها	a	b
سرمایش ممتد	۲۵۰	7×10^{-7}	-۰/۵۳
دمای ثابت ۹°C-	۲۰۰	3×10^{-7}	-۰/۰۲

جدول ۳. دیده‌بانی آهنگ یخبندان خاک.

نوع آزمایش	تعداد قطره‌ها	a	b
سرمایش ممتد	۲۵۰	5×10^{-7}	-۰/۳۱۳
دمای ثابت ۹°C-	۲۰۰	۰/۲۵	-۰/۰۷۲
دمای ثابت ۷°C-	۲۰۰	۰/۱	-۰/۰۷۷
دمای ثابت ۵°C-	۲۰۰	$4/6 \times 10^{-7}$	-۰/۰۸۸

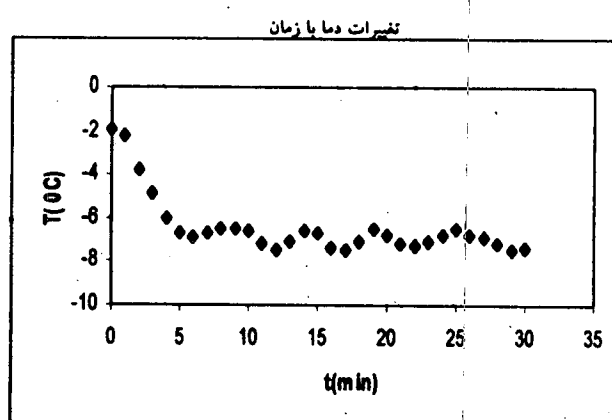
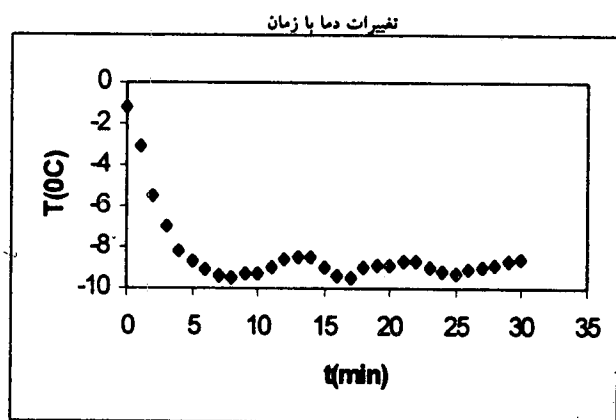
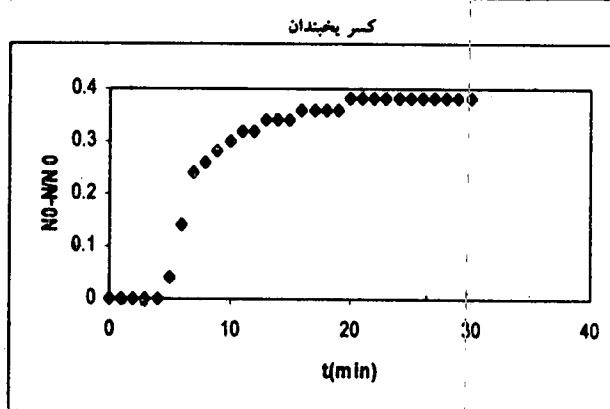
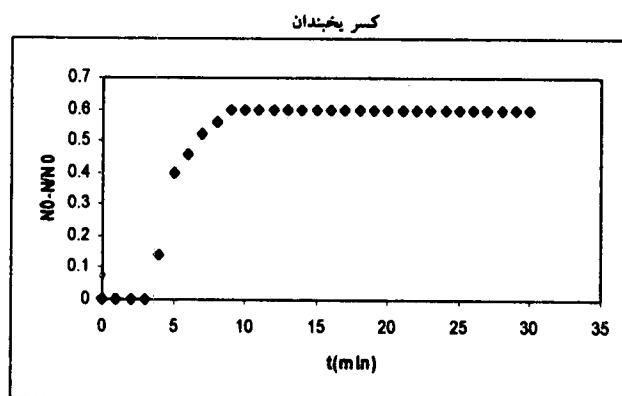
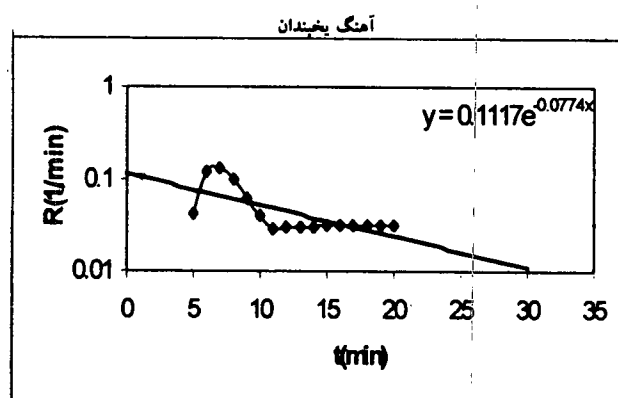
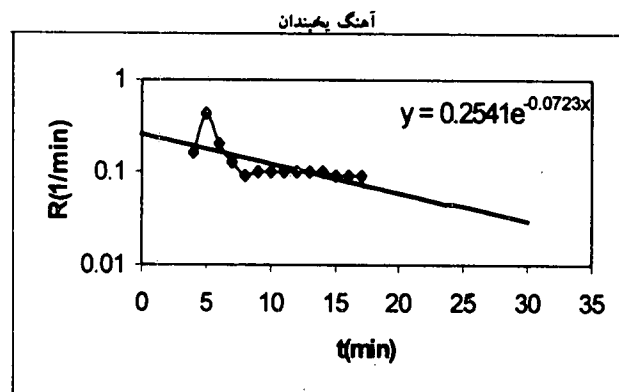
جدول ۴. دیده‌بانی آهنگ یخبندان خاک برگ.

نوع آزمایش	تعداد قطره‌ها	a	b
سرمایش ممتد	۲۵۰	5×10^{-7}	-۰/۳۶
دمای ثابت ۹°C-	۲۰۰	۰/۲۹	-۰/۱۲۶
دمای ثابت ۷°C-	۲۰۰	۰/۱۸	-۰/۱۲
دمای ثابت ۵°C-	۲۰۰	۰/۳۴	-۰/۰۴۴

بررسی کارایی دانه‌پاشی هسته‌های ناشی از برگ‌های خشک با استفاده از روش نخ ماهی‌گیری انجام شد (صادقی‌حسینی، ۱۹۹۸). در این پژوهش، در ادامه کارهای انجام شده، کارایی دانه‌پاشی مواد طبیعی مانند دود، خاک و خاک برگ نیز با استفاده از دستگاه نخ ماهی‌گیری بررسی شده و نتایج مورد تحلیل قرار گرفته‌اند.

قطره‌های یخ زده (قبل از دانه‌پاشی) یادداشت می‌شود. بعد از این زمان، ماده مورد آزمایش با کمک آب‌فشان به صورت قطره‌های میکرونی روی قطره‌های آب مقطر افشانه می‌شود.

مقطر روی نخ‌ها قرار می‌گیرد. این قطره‌ها به مدت ۱۵ دقیقه در دمای مورد آزمایش (-9°C و -7°C ، -5°C) در فریزر باقی می‌مانند تا با محیط اطراف تعادل برقرار کنند. در این مدت تعداد



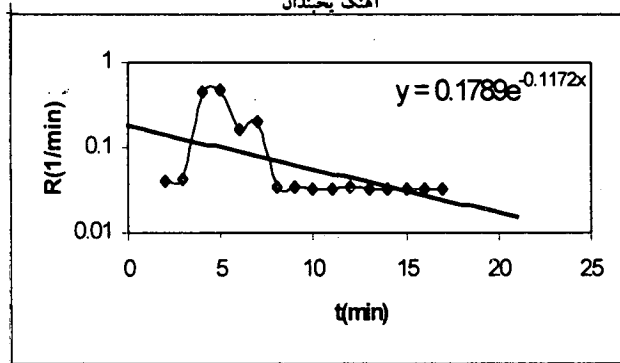
شکل ۱۱. تغییرات دما، کسر یخبندان و آهنگ یخبندان نمونه مخلوط آب مقطر با خاک رس معمولی در دمای ثابت -9°C .

شکل ۱۰. تغییرات دما، کسر یخبندان و آهنگ یخبندان نمونه مخلوط آب مقطر با خاک رس معمولی در دمای ثابت -7°C .

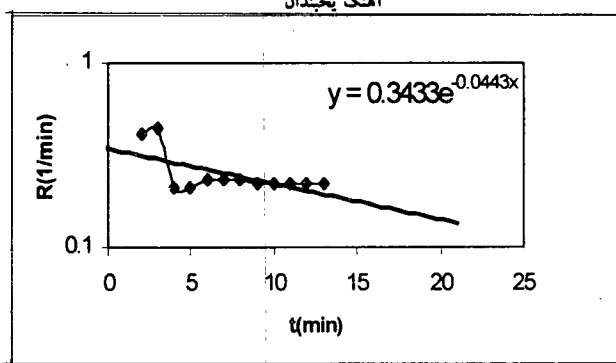
پخش شود. از آنجا که در حین انجام این کار، هوای محیط وارد فریزر می‌شود و دما بالا می‌رود، لازم است که دوباره قطره‌ها در فریزر به دمای مورد نیاز برسند. در این جا نیز تعداد قطره‌های

که این کار در هر نوبت سه بار و در سه جهت مختلف، با زاویه ۱۲۰ درجه نسبت به هم انجام می‌گیرد. در هر بار دقت می‌شود که ماده استفاده شده برای دانه‌پاشی به صورت مساوی روی قطره‌ها

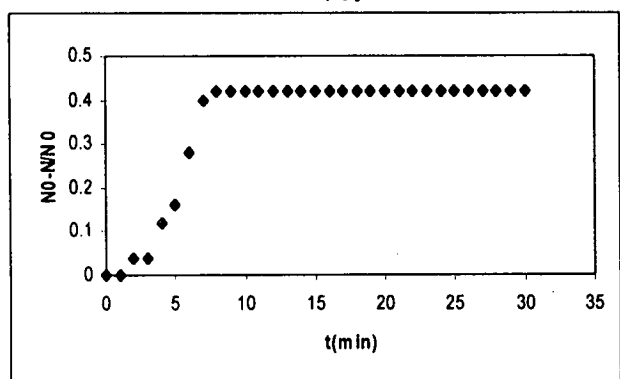
آهنگ یخبندان



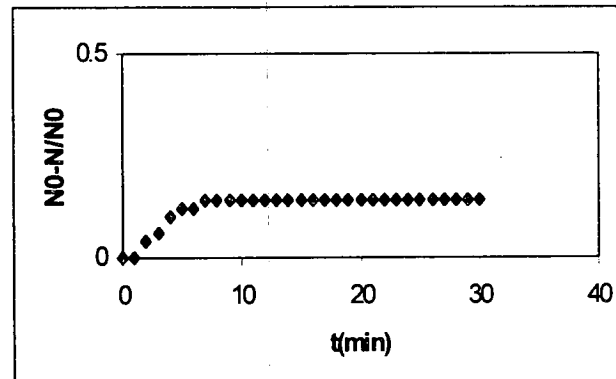
آهنگ یخبندان



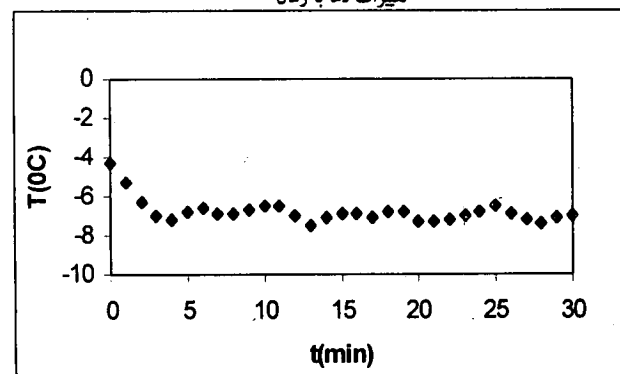
کسر یخبندان



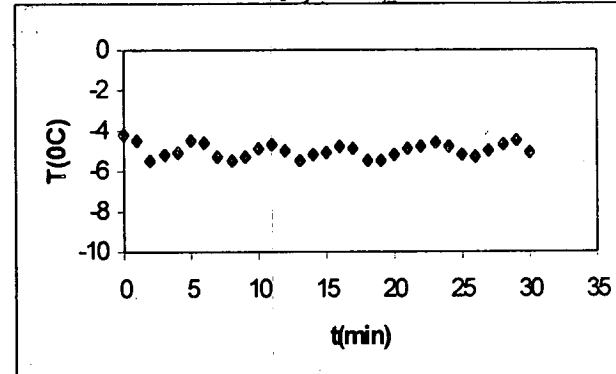
کسر یخبندان



تغییرات دما با زمان



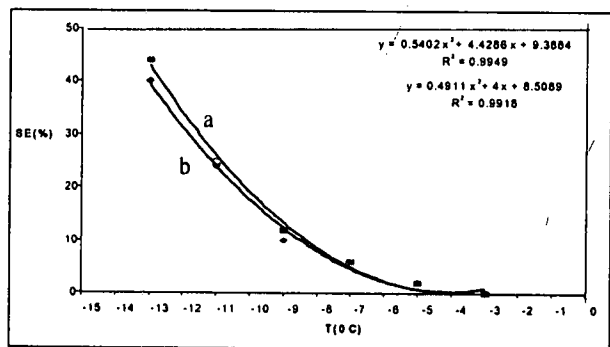
تغییرات دما با زمان



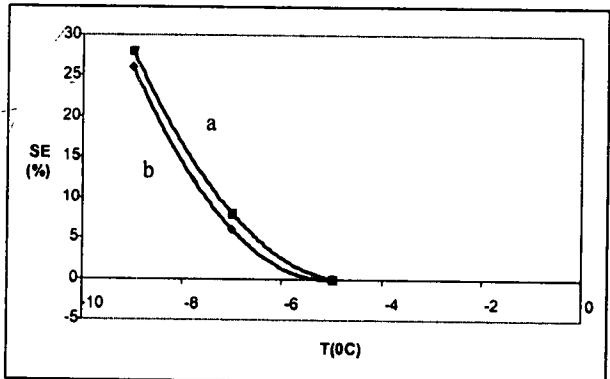
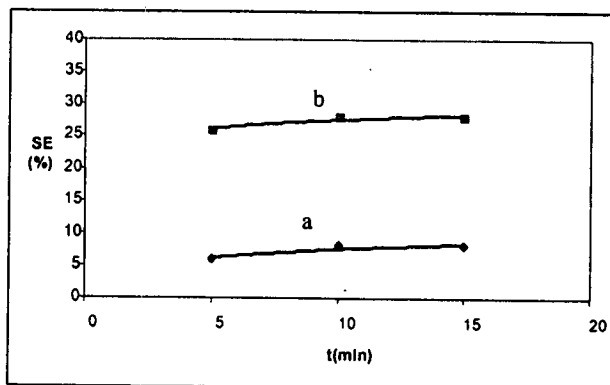
شکل ۱۳. تغییرات دما، کسر یخبندان و آهنگ یخبندان نمونه مخلوط آب مقطر با خاک برگ در دمای ثابت -7°C .

شکل ۱۲. تغییرات دما، کسر یخبندان و آهنگ یخبندان نمونه مخلوط آب مقطر با خاک برگ در دمای ثابت -5°C .

کارایی دانه پاشی کمینه و در ۵ دقیقه آخر نشان دهنده کارایی دانه پاشی بیشینه است. این آزمایش در دماهای 5°C ، 7°C و 9°C و برای آب مقطر و مخلوط آب مقطر با دود، خاک رس

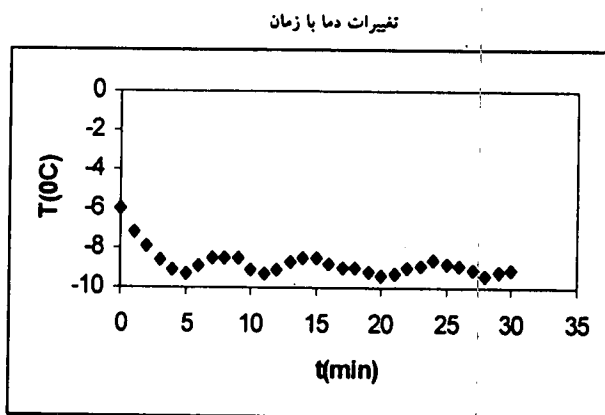
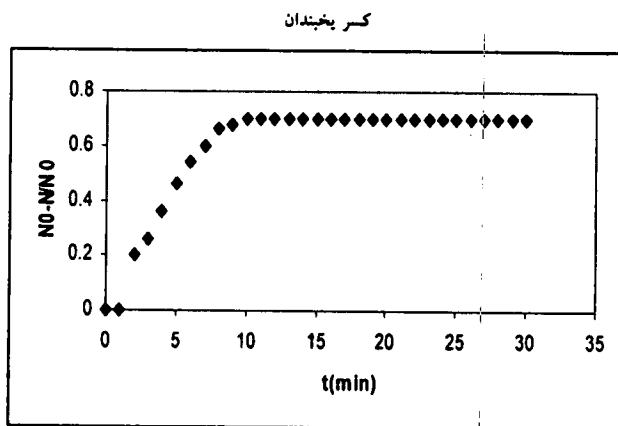
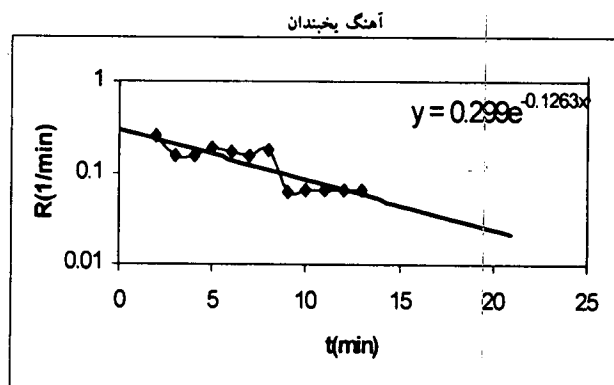


شکل ۱۵. کارایی دانه پاشی بیشینه (a) و کمینه (b) آب مقطر در دماهای 3°C ، 5°C ، 7°C ، 9°C ، 11°C و 13°C (اثر هسته بندی برخورداری).



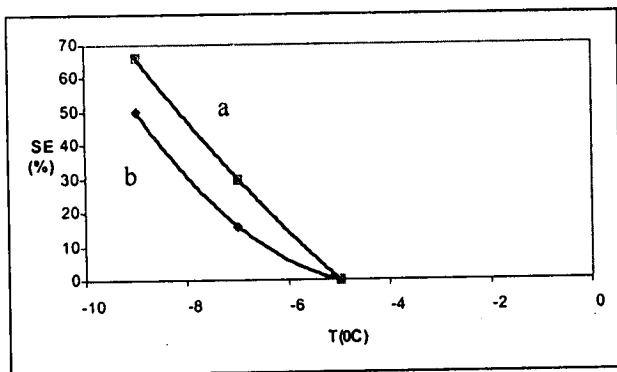
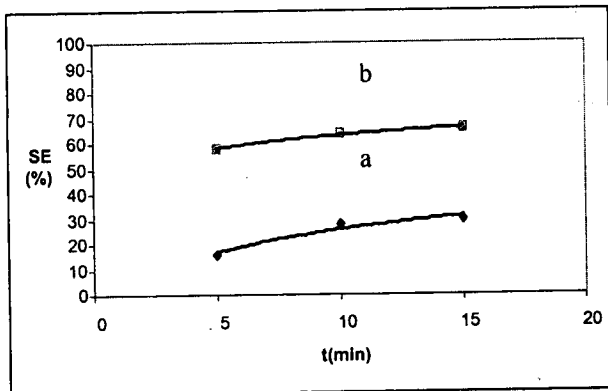
شکل ۱۶. سمت چپ) کارایی دانه پاشی بیشینه (a) و کمینه (b) دود در دماهای 5°C ، 7°C و 9°C پس از حذف اثر هسته بندی برخورداری، سمت راست) و تغییرات کارایی دانه پاشی دود در دمای 7°C (a) و 9°C (b) در زمانهای ۵، ۱۰ و ۱۵ دقیقه بعد از دانه پاشی و پس از حذف اثر هسته بندی برخورداری.

یخ زده یادداشت می شود. از زمانی که قطره ها دوباره به دمای ثابت مورد آزمایش رسیدند، به مدت ۱۵ دقیقه در آن دما باقی می ماند. تعداد قطره های یخ زده در این مدت در هر ۵ دقیقه یادداشت می شود که این تعداد در ۵ دقیقه اول نشان دهنده



شکل ۱۴. تغییرات دما، کسر یخبندان و آهنگ یخبندان نمونه مخلوط آب مقطر با خاک برگ در دمای ثابت 9°C .

شکل ۱۶ تغییرات کارایی دانه‌پاشی با دما و زمان را برای دود نشان می‌دهد. از آنجا که کارایی دانه‌پاشی دود در دمای 0°C - صفر بود، نمودار تغییرات زمانی SE برای این دما حذف شده است.



شکل ۱۷. سمت چپ) کارایی دانه‌پاشی بیشینه (a) و کمینه (b) خاک رس معمولی در دماهای 0°C - 7°C و 9°C - پس از حذف اثر هسته‌بندی برخوردی، سمت راست) تغییرات کارایی دانه‌پاشی خاک رس معمولی در دماهای 0°C - 9°C (a) و 9°C - (b) در زمان‌های ۵، ۱۰ و ۱۵ دقیقه بعد از دانه‌پاشی پس از حذف اثر هسته‌بندی برخوردی.

شکل ۱۷ تغییرات کارایی دانه‌پاشی با دما و زمان را برای خاک رس معمولی نشان می‌دهد. در این‌جا نیز تغییرات زمانی مربوط به 5°C - حذف شده است. مشاهده می‌شود که SE بیشینه در 9°C - به ۷۰٪ می‌رسد در حالی که SE بیشینه و کمینه

معمولی و خاک برگ به عنوان مواد دانه‌پاشی انجام شد که در هر مورد نیز ۴ بار تکرار گشت.

برای بالا بردن دقت آزمایش‌ها لازم است که اثر هسته‌بندی برخوردی با افشانه میکرونی آب مقطر روی قطره‌های آب مقطر قرار گرفته روی نخ ماهی‌گیری، بررسی و حذف شود. تعداد قطره‌های یخ‌زده در بازه‌های زمانی ذکر شده، نشان دهنده اثر هسته‌بندی برخوردی ناشی از برخورد قطره‌های ماده دانه‌پاشی با قطره‌های آب مقطر است. این تعداد قطره‌های یخ‌زده در هر دما از تعداد کل قطره‌های یخ‌زده مربوط به دانه‌پاشی با مواد مورد آزمایش کسر خواهد شد تا اثر هسته‌بندی برخوردی حذف شود. آزمایش دانه‌پاشی با آب مقطر در دماهای 3°C -، 5°C -، 7°C -، 9°C -، 11°C - و 13°C - انجام شد.

کارایی دانه‌پاشی (SE) تابعی از دما و زمان است. برای $N(T, t)$ قطره یخ زده در دمای T و زمان t، بعد از دانه‌پاشی SE به صورت زیر محاسبه می‌شود (صادقی حسینی، ۱۹۹۸):

$$SE(T, t) = \frac{\delta N(T, t)}{N(T, t)} \quad (4)$$

که $\delta N(T, t)$ تعداد قطره‌های یخ زده در دمای T و زمان t بعد از دانه‌پاشی است. به عبارت دیگر SE می‌تواند به صورت زیر بیان شود:

$$SE(T, t) = (N_{As} - N_{Bs}) / (N_0 - N_{Bs}) \quad (5)$$

که N_{Bs} و N_{As} تعداد قطره‌های یخ زده بعد و قبل از دانه‌پاشی هستند و N_0 تعداد کل قطره‌ها در هر آزمایش است.

در شکل ۱۵ تغییرات SE با دما برای آب مقطر نشان داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود در دماهای بیش از 8°C - اثر یخ‌بندان برخوردی زیاد می‌شود و در دمای 13°C - به حدود ۴۵٪ می‌رسد. از این رو محاسبه و حذف اثر هسته‌بندی برخوردی از نتایج حاصله از دانه‌پاشی سایر مواد روی قطره‌های آب مقطر برای بالا بردن دقت آزمایش‌ها الزامی است.

۶ آورده شده است.

جدول ۵. SE کمینه برای مواد آزمایش شده.

خاک برگ	خاک رس معمولی	دود	آب مقطر	
-	-	-	۰٪	-۳°C
۴٪	۰٪	۰٪	۲٪	-۵°C
۲۸٪	۱۶٪	۳٪	۶٪	-۷°C
۷۴٪	۵۰٪	۲۶٪	۱۰٪	-۹°C
-	-	-	۲۴٪	-۱۱°C
-	-	-	۴۰٪	-۱۳°C

۴ بحث نتایج

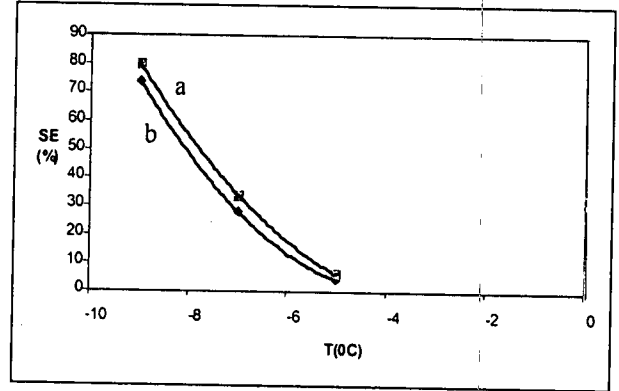
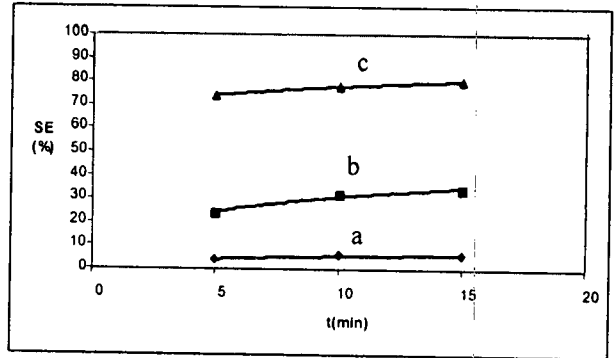
در این پژوهش بر استفاده از مواد طبیعی مانند خاک رس و خاک برگ (LDN) به علت کارایی بارورسازی بالایی که دارند، تاکید شده است. علاوه بر این، در آزمایش های مربوط به بستگی دمایی و زمانی دیده شد که LDN دارای دمای آغازین حدود ۴/۳°C- در هسته بندی غوطه وری است که این دما در آزمایش های مربوط به برگ های پوسیده به حدود ۱/۰°C- می رسد (صادقی حسینی، ۱۹۹۸).

جدول ۶. SE بیشینه برای مواد آزمایش شده.

خاک برگ	خاک رس معمولی	دود	آب مقطر	
-	-	-	۰٪	-۳°C
۶٪	۰٪	۰٪	۲٪	-۵°C
۳۴٪	۳۰٪	۸٪	۶٪	-۷°C
۸۰٪	۶۶٪	۲۸٪	۱۲٪	-۹°C
-	-	-	۲۵٪	-۱۱°C
-	-	-	۴۴٪	-۱۳°C

در دانه پاشی با مواد طبیعی و در دماهای بیشتر از ۸°C-، یخبندان غوطه وری مد غالب در هسته بندی بود. در حالی که در دماهای سردتر، مد یخبندان برخوردی اثر قابل ملاحظه ای را نشان می داد و به این دلیل در عمل دانه پاشی قطره های باران با مواد طبیعی، اثر هسته بندی برخوردی حذف شد. ولی با وجود این کارایی های دانه پاشی بالایی تا حد ۸۰٪ بر طبق جدول ۶ مشاهده

اختلاف نسبتاً زیادی با هم دارند. این نشان می دهد که خاک رس معمولی برای رسیدن به کارایی زیاد دانه پاشی نیاز به زمان بیشتری دارد.



شکل ۱۸. سمت چپ) کارایی دانه پاشی بیشینه (a) و کمینه (b) خاک برگ در دماهای ۵°C-، ۷°C- و ۹°C- پس از حذف اثر هسته بندی برخوردی، سمت راست) تغییرات کارایی دانه پاشی خاک رس معمولی در دماهای ۵°C- (a)، ۷°C- (b) و ۹°C- (c) در زمان های ۵، ۱۰ و ۱۵ دقیقه بعد از دانه پاشی پس از حذف اثر هسته بندی برخوردی.

شکل ۱۸ تغییرات کارایی دانه پاشی با دما و زمان را برای خاک برگ نشان می دهد. مشاهده می شود که SE بیشینه در دمای ۹°C- به بیش از ۸۰٪ رسیده و نیز SE بیشینه و کمینه اختلاف کمی با هم دارند. این نشان می دهد که خاک برگ در دانه پاشی نسبت به خاک رس معمولی سریع تر به تعادل با محیط اطراف می رسد.

خلاصه نتایج کارایی دانه پاشی کمینه و بیشینه نمونه های آب مقطر، دود، خاک رس معمولی و خاک برگ در جدول های ۵ و

۵ خلاصه نتایج

نتایج به دست آمده از آزمایش‌های ذکر شده را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد.

۱- در آزمایش‌های انجام شده، بیشترین فعالیت هسته‌های یخ بیوزنتیکی مشتق شده از خاک برگ در دمای حدود 0°C به دست آمد. کارایی دانه‌پاشی آنها نیز در دمای 9°C با حذف اثر هسته‌بندی برخورداری، در روز ششم غوطه‌وری، حدود ۸۰٪ مشاهده شد که در مقایسه با نتایج به دست آمده از آزمایش‌های مواد معدنی مانند یدید نقره، قابل قبول‌تر است.

۲- از آن‌جا که هسته‌بندی یخبندان غوطه‌وری بیولوژیکی در دماهای گرم‌تری نسبت به سایر مدهای یخبندان رخ می‌دهد، محتمل‌ترین مسیر برای آغاز یخبندان در سامانه‌های بیولوژیکی است.

۳- هسته‌های بیوزنتیک مانند LDN ها نقش عمده‌ای در سامانه‌های جوی داشته و به دلیل دارا بودن دماهای هسته‌بندی تا حدود 10°C - (صادقی‌حسینی، ۱۹۹۸) و سازگاری با محیط زیست، می‌توانند به مثابه مواد مناسب در دانه‌پاشی ابر مورد بررسی قرار گیرند.

ترابری این مواد به خاطر لزوم غوطه‌ورسازی آنها در حجم‌های آب، مشکلاتی از نظر اقتصادی به همراه دارد.

آلودگی هوا در شهرهای بزرگ، عامل مهمی در از بین بردن هسته‌های باکتری و بالا بردن غلظت هومیزها در ابر احتمالاً ایجاد فراباروری است.

در طرح‌های بارورسازی هر منطقه، برآوردی از غلظت هسته‌های یخی و شناسایی سامانه‌های ابر آن منطقه ضروری است. در کشور ما نیز انجام این طرح‌ها نیازمند مطالعات میکروفیزیکی آزمایشگاهی و درون ابری و مطالعات کافی روی اقلیم منطقه به منظور ممانعت از بارورسازی‌های ناموفق و صرف هزینه‌های اضافی است.

شد. در این آزمایش‌ها نقش مهم هسته‌های ناشی از باکتری (LDN) در سامانه‌های بیولوژیک و کاربرد آنها در زمینه‌های مختلف مانند بارورسازی ابرها، به واسطه دمای هسته‌بندی بالای آنها و سازگاری با محیط زیست، روشن است.

در حال هنوز مشکلاتی در استفاده از LDN برای طرح‌های بارورسازی ابر وجود دارد. اول این که ایجاد هسته‌های یخی در ابر، تمام مدهای یخبندان را در بر می‌گیرد و تاکید بر یک مد خاص از کلیت موضوع می‌کاهد. دوم، استفاده از LDN مشکل ترابری ماده را در طرح‌های بارورسازی ابر با هواپیما به همراه خواهد داشت. برای تخمین مقدار کمی ماده بارورساز LDN به کار رفته با توجه به جدید بودن زمینه تحقیقاتی فعالیت هسته‌های بیوزنتیک یخ‌ساز در ابرها کارهای چندان موثقی در زمینه بارورسازی میدانی انجام نشده و فقط می‌توان به یک مورد از تحقیقات میدانی از آبخشانی ابرهای کومه‌ای تابستانی محلی با هواپیمایی که با سرعت ۸۰ متر بر ثانیه قطراتی به شعاع $400\mu\text{m}$ را در طول ۱۵ متر لوله آبخشان تعبیه شده در بال‌های هواپیما در درون ابر می‌افشاند می‌کند و به ازای هر متر طول مسیر ۱Kg آب را به داخل ابر تزریق می‌کند اشاره کرد (راجرز، ۱۹۹۵). به این ترتیب اگر سطح مقطع ابر محلی 9 km^2 ($3 \times 3\text{ km}$) در نظر گرفته شود، برای دانه‌پاشی ابر در صورتی که پهن‌شدگی آبخشانی در این شرایط از ۱۵ متر به ۱۵۰ متر در ابر افزایش یابد (یانگ، ۱۹۹۳)، مقدار آبخشانی تخمینی فقط در یک سطح بارورسازی ابر به ۶۰ تن یا ۶۰ متر مکعب ماده بارورسازی LDN با غلظت ۱۰ گرم بر لیتر و زمان پرواز $12/5$ دقیقه نیاز است که حمل آن با یک هواپیمای کوچک تحقیقاتی سسنا (SESNA) یا King Air کاری بس مشکل است و باید از تعداد بیشتری از این هواپیماها برای بارورسازی در یک سطح استفاده کرد که در آن صورت ریسک پرواز بیشتر می‌شود و حتی اگر عمل بارورسازی موفقیت‌آمیز باشد، از نظر اقتصادی نمی‌تواند نتیجه قابل قبولی داشته باشد.

منابع

- Schnell, R. C. and Vali, G., 1972, Atmospheric ice nuclei from decomposing vegetation: *Nature*, **236**, 163-165.
- Schnell, R. C. and Vali, G., 1973, World-wide source of leaf-derived freezing nuclei: *Nature*, **246**, 212-220.
- Vali, G., 1994, Freezing rate due to heterogeneous nucleation: *J. Atmos. Sci.*, **51**, 1843-1856.
- Vali, G., 1995, Principle of ice nucleation, from biological ice nucleation and its applications, edited by Richard, E., Lee, Jr., Gareth, J., Warren, L. V., Gusta, Aps press, 315pp.
- Vali, G. and Stansbury, E. J., 1966, Time-dependent characteristics of the heterogeneous nucleation of ice: *Canadian J. of Phys.*, **44**, 477-502.
- Young, K. C., 1993., *Micro physical process in clouds*: Oxford University Press, 427 pp.
- صادقی حسینی، س. ع. و رضازاده، م.، ۱۳۸۱، مطالعه آهنگ یخبندان قطره‌های باران در اثر هسته‌بندی ناهمگن (در منطقه گیلان)، نشریه تحقیقاتی فیزیک زمین و فضا، جلد ۲۸، شماره ۱، ۱۳۸۱، ص ۱ تا ۱۲.
- Lee, R. E. Jr., Warren, G. J. and Gusta, L. V., 1995, *Biological ice nucleation and its applications*: APS Press, the American Phytopathological Society, St. Paul, Minesota, 370 pp.
- Rogers, R. R., 1995, *A short course in cloud physics*: Butterworth-Heinemann Press, 290 pp.
- Sadeghi Hosseini, S. A., 1998, *Ice initiation in clouds*: Ph. D. Thesis, UMIST, 207pp.
- Schnell, R. C., 1976, Bacteria acting as natural ice nucleants at temperatures approaching -1°C : *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, **57**, 1356-1363.