

بررسی آزمایشگاهی بارورسازی ابرهای گرم

سیدعلیرضا صادقی حسینی* و فروزان ارکیان*

*موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، صندوق پستی ۶۴۴۶-۱۴۱۵۵.

چکیده

در این مقاله نحوه تشکیل ابر در دمای آزمایشگاه در یک محفظه شیشه‌ای و بارورسازی آن توسط ذره‌های مختلفی از قبیل هوامیزهای موجود در آزمایشگاه، نمک و دود حاصل از اشتعال کبریت مورد بررسی قرار می‌گیرد. در ابتدا تاثیر غلظت هوامیزهای موجود در فضای آزمایشگاه در مدت زمان پاک شدن ابر بررسی می‌شود. این زمان به دلیل تغییرات نسبتاً کم غلظت هوامیزها، در یک روز مقدار ثابتی است بنابراین در مقایسه تشکیل ابر و بارش در شرایط محیط با سایر شرایطی که در آنها ابر بارور می‌شود مبنای قرار می‌گیرد. تغییر غلظت هوامیزها در روزهای مختلف در مدت زمان پاک شدن ابر تاثیر دارد به طوری که با افزایش غلظت هوامیزهای ریز، مدت زمان پاک شدن ابر افزایش می‌یابد. در قدم بعدی تاثیر غلظت و نوع هسته‌های نمک و دود به عنوان هسته‌های بارورسازی تزریق شده به محیط روی مدت زمان پاک شدن ابر مطالعه می‌شود. نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد که زمان پاک شدن ابر تشکیل شده به وسیله هسته‌های درشت و نم‌گیر نمک کمتر از زمان مربوط به هوامیزهای نسبتاً ریز محیط آزمایشگاه و ذره‌های دود است و با افزایش غلظت نمک، زمان پاک شدن ابر کاهش می‌یابد. دلیل این امر کارایی هسته‌بندی بیشتر ذره‌های نمک است. به ندرت در شرایطی که فراباروری روی داده، غبار دود مه تشکیل می‌شود.

کلیدواژه: هسته‌های میعان جو، قطره‌های ابر، هسته‌بندی ناهمگن، کارایی بارورسازی، فراباروری، غبار دود مه

۱ مقدمه

امروزه با توجه به رشد جمعیت، تهیه آب شیرین برای استفاده‌های مختلف، یکی از مسائل عمده زمین است. یکی از راه‌های افزایش میزان بارش (به طور پتانسیلی)، بارورسازی مصنوعی ابرها است که این موضوع هنوز تحت بررسی‌های تحقیقاتی قرار دارد. در این کار تحقیقاتی کارایی هسته‌بندی غیرهمگن ذره‌هایی نظیر هوامیزهای محیط شهری، دود و نمک در بارورسازی ابرهای گرم مورد مطالعه قرار گرفت و حاصل کار حاکی از آن بود که ذره‌های نم‌گیر و درشت نمک در ایجاد بارش کارایی بیشتری از ذره‌های ریزتر دود دارند. ذره‌های دود نیز که نسبت به هوامیزهای محیط درشت‌ترند، کارایی بیشتری از آنها دارند. نتایج این آزمایش‌ها با کارهای میدانی انجام شده توسط مایتر (۱۹۹۷) در افریقای جنوبی روی کارایی هسته‌بندی فوق‌العاده زیاد پره‌های نمک حاصل از خمیر کاغذ و همچنین بررسی‌های چانگتون (۱۹۹۷) که روی اثر غیرعمدی آلودگی و دود حاصل از ترافیک ۵۰ ساله در ایلی‌نویز انجام گرفته، کاملاً همخوانی دارد.

۲ روش انجام آزمایش

یک لیتر آب مقطر که با دمای آزمایشگاه در تعادل است به داخل محفظه شیشه‌ای بیست لیتری ریخته می‌شود و در آن با درپوش لاستیکی که از میان آن لوله پلاستیکی شفاف برای ایجاد تغییرات فشار عبور داده شده است، بسته می‌شود. محفظه مطابق شکل ۱ در مقابل دستگاه تولید کننده پرتو لیزری قرار می‌گیرد. تغییرات فشار ایجاد شده با دمیدن هوا به داخل محفظه، با فشارسنج آبی به صورت تغییر ارتفاع آب در لوله U شکل اندازه‌گیری می‌شود. لوله پلاستیکی فشارسنج باید برای ایجاد حداقل ۵۰mb تغییرات فشار (یعنی ۵۰cm اختلاف تراز آب در لوله U شکل) به اندازه کافی بلند باشد.

دما و رطوبت آزمایشگاه و دمای درون محفظه در مجاورت سطح آب و در فاصله ۴۵cm از سطح آب به وسیله دماسنج و رطوبت‌سنج‌های دیجیتالی با دقت ۰/۱ درجه سلسیوس و ۰/۱ درصد اندازه‌گیری می‌شود. محفظه شیشه‌ای در مقابل تولید کننده پرتو لیزری که قبلاً پرتو آن پایدار شده مستقر می‌شود. در سمت مقابل، آشکارساز پرتو لیزری قرار

در محیط هستند یا وارد محیط می‌شوند. ذره‌های نمک از طریق دمیدن به داخل لوله پلاستیکی نازکی که وارد محلول آب نمک شده، به فضای داخل محفظه فرستاده می‌شود. با توجه به اینکه غلظت متوسط محلول نمک اقیانوس‌های جهان تقریباً 30 g/lit است (هاریسون و وان‌گرکن، ۱۹۹۹) بنابراین آزمایش‌های مربوط به ذره‌های نمک با غلظت ۲۰، ۳۰ و ۴۰ گرم در لیتر نمک محلول در آب انجام شد. ذره‌های دود توسط یک کبریت یا دو کبریت مشتعل تولید شده و به داخل محفظه تشکیل ابر فرستاده شد.

۳ تحلیل داده‌ها و بررسی نتایج

۱-۳ تاثیر نوع هسته میعان بر زمان بارش ابر در این‌جا تاثیر سه نوع هسته میعان مختلف (هوامیزهای هوا، نمک و دود) بر زمان بارش ابر مورد بررسی و مقایسه قرار می‌گیرد. تغییرات توان پرتو لیزر بر حسب میلی‌وات و در محدوده کاری ۲۰ میلی‌وات توسط توان‌سنج پرتو لیزری ثبت می‌شود و زمان پاک شدن ابر برای این سه هسته از روی منحنی تغییرات توان پرتو لیزری به دست می‌آید.

در شکل‌های ۲، ۳، ۴ و ۵ نمودار تغییرات توان پرتو لیزری بر حسب زمان برای چهار آزمایش تشکیل ابر به ترتیب به‌وسیله هوامیزهای محیط آزمایشگاه، ذره‌های نمک (20 g/lit) و دود (حاصل از اشتعال دو کبریت) در روز ۷۹/۵/۲۲ مشاهده می‌شود.

وضعیت جوی: در این روز آسمان صاف و بدون ابر، نسبتاً گرم و خشک و همراه با وزش ملایم باد بوده است. دید افقی ۱۰ کیلومتر بود.

۲-۳ بررسی زمان پاک شدن ابر توسط هسته‌های

میعان مختلف

مدت زمان پاک شدن ابر در جدول ۱ ارائه شده است. در آزمایش اول مدت زمان پاک شدن ابر ۱۴۰ ثانیه است. ابری که در حالت حضور هوامیزهای محیط تشکیل می‌شود به سبب اندازه بسیار کوچکی که این ذره‌ها دارند (شعاعی در حدود 0.1 میکرومتر)، قطرک‌های ابر تشکیل شده بسیار ریز خواهند بود و زمان بیشتری به صورت شناور در فضای محفظه باقی می‌مانند. در نتیجه زمان بیشتری لازم است تا به

می‌گیرد به طوری که فاصله بین تولیدکننده و آشکارساز 50 cm باشد.

در این پژوهش ابر در دمای آزمایشگاه به سه روش زیر تشکیل می‌شود:

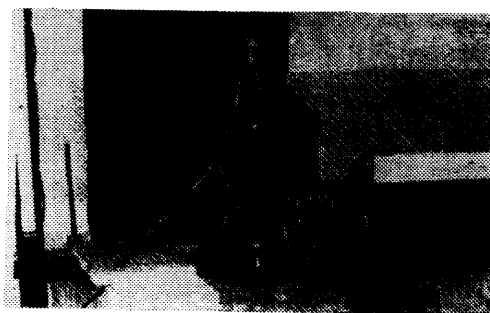
۱- از طریق میعان بخار آب بر روی هوامیزهای طبیعی آزمایشگاه که در محفظه موجود است.

۲- از طریق میعان بخار آب بر روی ذره‌های نمک که به طور مصنوعی وارد محفظه می‌شود.

۳- از طریق میعان بخار آب بر روی ذره‌های دود ناشی از اشتعال کبریت که به داخل محفظه فرستاده می‌شود.

شمای کلی دستگاه در شکل ۱ مشاهده می‌گردد.

در آزمایش‌های انجام شده برای مطالعه کارایی هسته‌بندی غیرهمگن ابر در دمای آزمایشگاه که توسط هوامیزهای محیط آزمایشگاه، ذره‌های نمک و ذره‌های دود صورت گرفت، مراحل کار تقریباً یکسان بوده است. فشار داخل محفظه، از طریق دمیدن به داخل لوله پلاستیکی که وارد محفظه شده 50 mb افزایش می‌یابد. پس از چند ثانیه به طور ناگهانی فشار اضافی قطع و تعادل بار دیگر برقرار می‌شود.

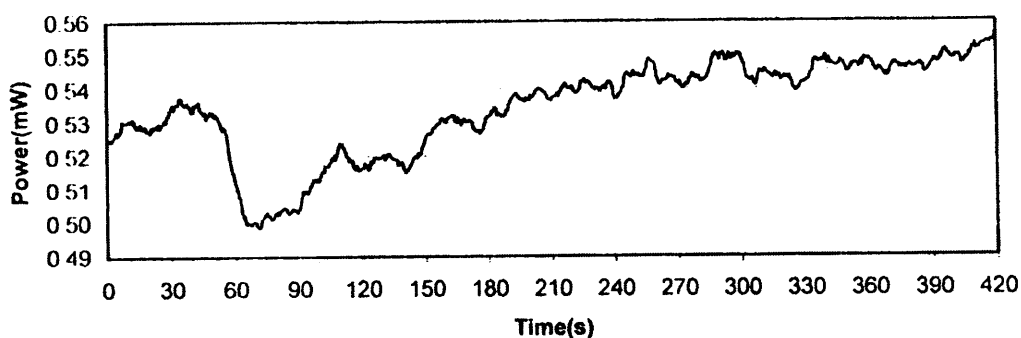


شکل ۱. شمای کلی دستگاه.

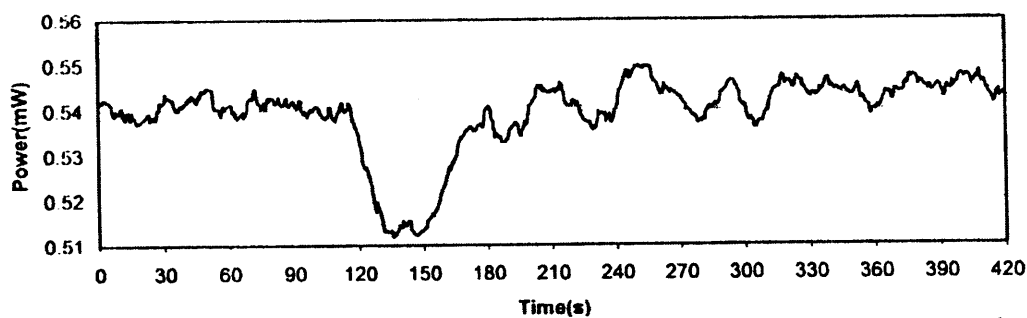
در این لحظه ابر تشکیل می‌شود.

پرتو لیزری که از محفظه شیشه‌ای عبور می‌کند در هنگام تشکیل ابر به‌وسیله قطرک‌های ابر پراکنده می‌شود و شدت آن هنگامی که به آشکارساز می‌رسد کاهش می‌یابد. بنابراین در نمودار تغییرات توان پرتو لیزری که توسط رایانه (برنامه ددیسیم) ثبت می‌شود یک کمینه به چشم می‌خورد. در هنگام پاک شدن ابر، میزان تغییرات توان پرتو لیزر به مقدار اولیه خود باز می‌گردد.

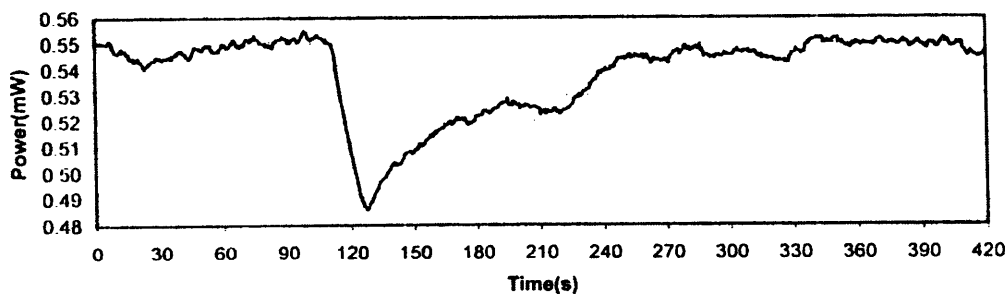
ذره‌های هوامیز محیط، نمک و دود، قبل از ایجاد تغییر فشار



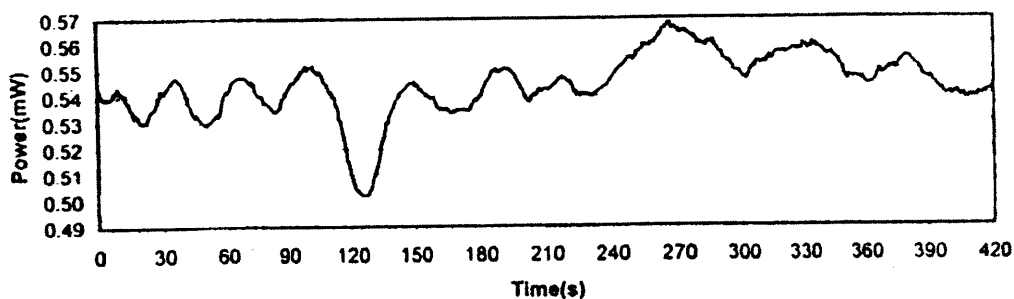
شکل ۲. تغییرات توان پرتو لیزری بر حسب زمان برای ابر تشکیل شده به وسیله هوامیزهای محیط آزمایشگاه (در تاریخ ۷۹/۵/۲۲).



شکل ۳. تغییرات توان پرتو لیزری بر حسب زمان برای ابر تشکیل شده به وسیله ذره‌های نمک از محلول ۲۰ g/lit آب نمک (در تاریخ ۷۹/۵/۲۲).



شکل ۴. تغییرات توان پرتو لیزری بر حسب زمان برای ابر تشکیل شده به وسیله ذره‌های دود حاصل از یک کبریت مشتعل (در تاریخ ۷۹/۵/۲۲).



شکل ۵. تغییرات توان پرتو لیزری بر حسب زمان برای ابر تشکیل شده به وسیله ذره‌های دود حاصل از دو کبریت مشتعل (در تاریخ ۷۹/۵/۲۲).

جدول ۱. مدت زمان پاک شدن ابر.

شماره آزمایش	هسته‌های میعان فعال ابر	مدت زمان پاک شدن ابر (ثانیه)
۱	هوامیزهای محیط آزمایشگاه	۱۴۰
۲	ذره‌های نمک (۲۰ گرم بر لیتر)	۶۰
۳	ذره‌های دود حاصل از یک کبریت مشتعل	۴۵
۴	ذره‌های دود حاصل از دو کبریت مشتعل	۲۴۰

بارش واداشته‌اند. در واقع اگر امکان انجام این آزمایش‌ها به طور کمی مقدور بود و ذره‌های نمک و دود با غلظت مساوی وارد محیط می‌شد، هسته‌های نمک در مدت زمان کم‌تری ابر را پاک می‌کردند (راجرز و یو، ۱۹۹۶).

۳-۲-۱ تاثیر غلظت هوامیزها در زمان پاک شدن ابر همان‌گونه که تشریح شد، زمان پاک شدن ابر با هوامیزهای محیط آزمایشگاه به عنوان مبنای مقایسه برای حالت‌های مختلف باروری ابر مورد استفاده قرار گرفت. مدت زمان پاک شدن ابر در هر روز کاری ثابت است. اما پس از بررسی آزمایش‌های مربوط به تشکیل ابر با هوامیزهای محیط، مشاهده شده است که مدت زمان پاک شدن ابر با هوامیزهای محیط آزمایشگاه، ضمن تغییر غلظت هوامیزهای موجود در محیط که با پارامتر دید افقی همبستگی دارد تغییر می‌کند. برای مشخص شدن این مسئله زمان پاک شدن ابر با هوامیزهای محیط، در روزهایی که دید افقی متفاوتی دارند مورد بررسی قرار گرفت.

در شکل ۶ نمودار تغییرات توان پرتو لیزری مربوط به ابر تشکیل شده با هوامیزهای محیط با دید افقی ۷km، ۸ km و ۱۰km به ترتیب در روزهای ۷۹/۴/۲۵، ۷۹/۴/۶ و ۷۹/۵/۳۱ رسم شده است.

زمان پاک شدن ابر مربوط به سه آزمایش تشکیل ابر توسط هوامیزهای محیط با دیدهای افقی مختلف در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲. مدت زمان پاک شدن ابر.

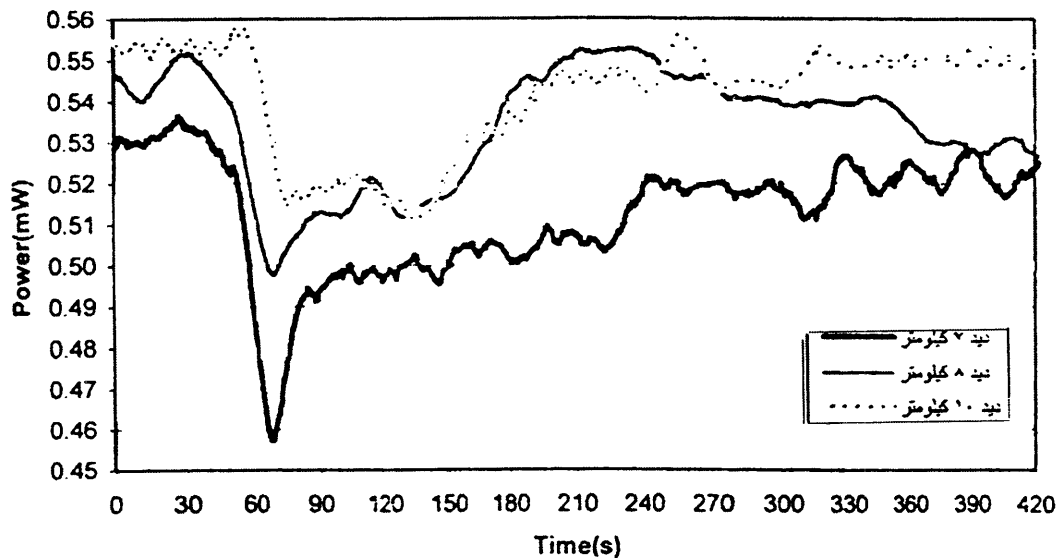
دید افقی	نوع هسته‌های میعان ابر	مدت زمان پاک شدن ابر (ثانیه)
۷	هوامیزهای محیط آزمایشگاه	۱۹۵
۸	هوامیزهای محیط آزمایشگاه	۱۸۰
۱۰	هوامیزهای محیط آزمایشگاه	۱۵۰

پارامتر دید معیاری از غلظت آلودگی در محیط است زیرا با افزایش آلودگی، دید افقی کاهش می‌یابد. طبق جدول ۲ با افزایش دید افقی مدت زمان پاک شدن ابر کاهش می‌یابد.

از آنجا که بخار آب موجود در محفظه در دمای یکسان

اندازه قطره‌های قابل بارش ابر رشد کنند و زمان پاک شدن ابر نسبتاً طولانی خواهد بود. این زمان به دلیل ثابت بودن غلظت هوامیزها در یک روز مقدار تقریباً ثابتی است، بنابراین در مقایسه تشکیل ابر و بارش در شرایط محیط با سایر شرایطی که در آنها ابر بارور می‌شود مبنای قرار می‌گیرد. در آزمایش دوم مدت زمان پاک شدن ابر ۶۰ ثانیه و کمتر از آزمایش اول است. هنگامی که ذره‌های نمک از راه دمیدن در آب نمک وارد محیط می‌شوند، اکثراً از نوع هسته‌های میعان با اندازه بزرگ یا در حد غول هسته‌ها هستند و چون ذره‌های نمک نم‌گیر نیز هستند، نسبت به هوامیزهای داخل محفظه کارایی هسته‌بندی بیشتری دارند و سریع‌تر محتوای رطوبت ابر را کاهش می‌دهند. بنابراین قطرک‌های ابر در زمان کم‌تری به اندازه کافی که بتوانند فروافتند، رشد می‌کنند. در نتیجه ابر زودتر بارش می‌کند و زمان پاک شدن ابر نسبت به آزمایش اول سریع‌تر است.

در آزمایش سوم که با دود ناشی از یک کبریت انجام شد مدت زمان پاک شدن ابر نسبت به هوامیزهای محیط و نمک کم‌تر است و این نشان می‌دهد که هسته‌های دود نسبت به هوامیزهای محیط و هسته‌های نمک بهتر عمل می‌کند و ابر را زودتر به بارش واداشته است. اما نتایج آزمایش‌های انجام شده برای بررسی کارایی هسته‌بندی قطرک‌های ابر با ذره‌های نمک و دود نشان می‌دهند که کارایی هسته‌بندی قطرک‌های آب ابر با هسته‌های نم‌گیر و درشت نمک، نسبت به هسته‌های کوچک‌تر دود بیشتر است. ولی با توجه به اینکه غلظت ذره‌های نمک فرستاده شده در محیط خیلی کم‌تر از ذره‌های دود بوده است، مشاهده می‌شود که ذره‌های دود با غلظت زیاد در زمان نسبتاً کم‌تری ابر را به



شکل ۶. نمودار تغییرات توان پرتو لیزری مربوط به ابر تشکیل شده با هوامیزهای محیط با دیدهای متفاوت.

سرعت کاهش دادند و قطرک‌های ابر را در ابراشباع نسبتاً ناچیزی پدید آوردند. در حالت دود ناشی از دو کبریت گاهی غلظت ذره‌های ریز خیلی زیاده‌تر از مقدار بهینه برای ایجاد بارش است و در واقع فراباروری ایجاد می‌شود بنابراین هر کدام از این ذره‌ها سهم کم‌تری در مسابقه جذب محتوای آب ابر خواهند داشت و قطره‌های کوچک‌تری تشکیل می‌شوند. در نتیجه مدت زمان لازم برای رشد آنها تا اندازه قابل بارش زیاده‌تر خواهد بود و ابر دیرتر بارش می‌کند و در ضمن کاملاً پاک نمی‌شود. از آن‌جا که اندازه قطرک‌های غبار دودمه کوچک است، سرعت فروریزی آنها کم‌تر می‌شود، مدت زمان بیشتری به صورت شناور باقی می‌مانند و پتانسیل بارش ابر در مجموع کاهش می‌یابد (صادقی‌حسینی، ۱۹۹۸). این مسئله یعنی کاهش بارش به دلیل وجود ذره‌های ریز دود توسط وارنر (۱۹۶۸) مورد بررسی قرار گرفت او با مطالعه بر روی ۶۰ سال بارندگی در منطقه‌ای از استرالیا نشان داد که یک کاهش در میزان بارندگی منطبق با آتش‌سوزی مزارع نیشکر وجود دارد که علت آن غلظت بالای هسته‌های میعان فعال ناشی از دود است که باعث کاهش اندازه قطرک‌های ابر می‌شود.

ثابت فرض می‌شود، با کاهش دید افقی یعنی افزایش غلظت هوامیزهای ریز، هر یک از هسته‌های میعان در هنگام تشکیل ابر سهم کم‌تری از بخار آب موجود در محیط را به خود اختصاص می‌دهد. بنابراین قطرک‌های تشکیل شده ابر در این شرایط کوچک‌تر خواهند شد و به زمان بیشتری برای ریزش و پاک شدن کامل نیاز دارند. در نتیجه قطرک‌های ریز غبار مه در این شرایط زمان استقرار بیشتری را در محفظه خواهند داشت (راجرز و یو، ۱۹۹۶).

۲-۲-۳ تاثیر غلظت ذره‌های دود در زمان پاک شدن ابر

با مقایسه شکل‌های ۴ و ۵ در آزمایش روز ۷۹/۵/۲۲ می‌توان همبستگی مدت زمان پاک شدن ابر به مقدار دود فرستاده شده در محفظه تشکیل ابر را مشاهده کرد. در آزمایش تشکیل ابر با شعله‌ور کردن یک کبریت، مدت زمان پاک شدن ابر ۴۵ ثانیه و با دو کبریت ۲۴۰ ثانیه است. در حالت دود ناشی از یک کبریت غلظت ذره‌های دود به اندازه بهینه‌ای بود که می‌توانست ابر را با موفقیت بارور سازد. در نتیجه ابر سریع‌تر پاک شد. ذره‌های دود در این‌جا به صورت هسته‌های میعان موثر عمل کردند، آب محتوای ابر را به

۳-۲-۳ تاثیر غلظت ذره‌های نمک روی مدت زمان

پاک شدن ابر

در آزمایش‌های انجام شده، برای بررسی تاثیر غلظت نمک حل شده در آب بر مدت زمان پاک شدن ابر، غلظت نمک در روزهای مختلف یکی از اعداد ۲۰ g/lit، ۳۰ g/lit و ۴۰ g/lit اختیار شد.

شکل ۷ تغییرات توان پرتو لیزری را بر حسب زمان برای غلظت‌های متفاوت نمک در روز ۷۹/۵/۳۱ نشان می‌دهد. وضعیت جوی: آسمان صاف بدون ابر با وزش باد ملایم، دید افقی ۱۰ km.

مدت زمان پاک شدن ابر برای سه غلظت مختلف نمک در جدول ۳ آورده شده است. پس از آزمایش‌های مکرر، زمان پاک شدن ابر برای ذره‌های نمک حاصل از محلول نمک با غلظت ۲۰ g/lit بیشتر از نمک ۳۰ g/lit و این یکی نیز بیشتر از ۴۰ g/lit به دست آمد.

جدول ۳. مدت زمان پاک شدن ابر

شماره آزمایش	هسته‌های میعان فعال ابر	مدت زمان پاک شدن ابر (ثانیه)
۱	ذره‌های نمک (۴۰ g/lit)	۴۵
۲	ذره‌های نمک (۳۰ g/lit)	۵۷
۳	ذره‌های نمک (۲۰ g/lit)	۸۰

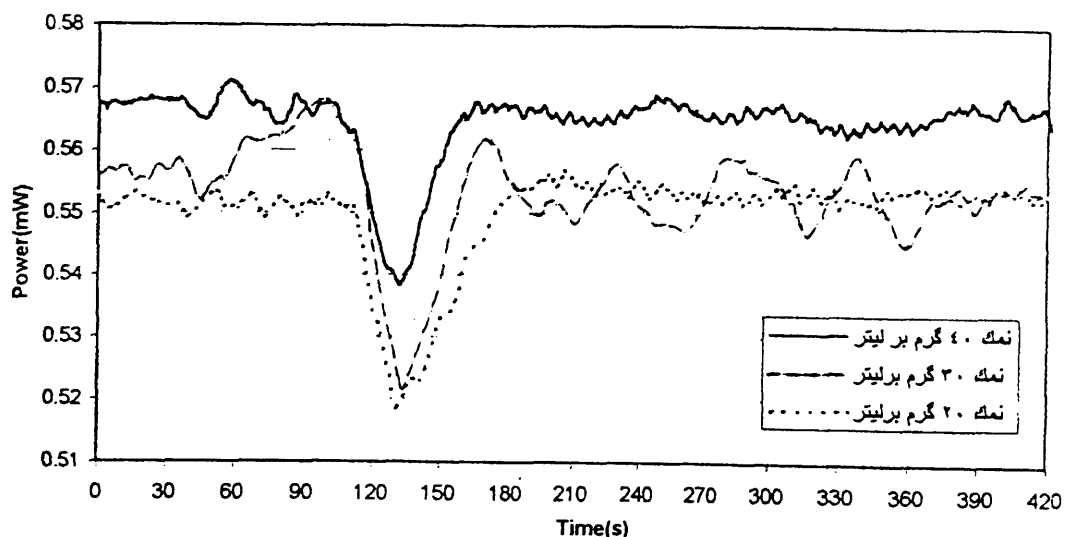
در آزمایش نمک، هر چه غلظت نمک حل شده در آب بیشتر باشد، در هنگام دمیدن در آب و ایجاد جاب، مقدار بیشتری نمک وارد محیط می‌شود و در نتیجه، غلظت هسته‌های میعان فعال نم‌گیر در زمان تشکیل ابر بیشتر خواهد شد، هر چند که از مقدار بهینه برای باروری موفقیت‌آمیز، کم‌تر است.

به طوری که آزمایش‌ها نشان می‌دهند، ذره‌های طبیعی نمک حاصل از امواج دریاها با غلظت ۳۰ g/lit هنوز برای تشکیل ابر و بارش به اندازه بهینه نرسیده و حتی غلظت ۴۰ g/lit ابر را سریع‌تر به بارش وامی‌دارد. در نتیجه حتی می‌توان ابرهای دریایی را برای افزایش پتانسیل بارش با ذره‌های نمک به صورت موفقیت‌آمیزی دانه‌پاشی کرد.

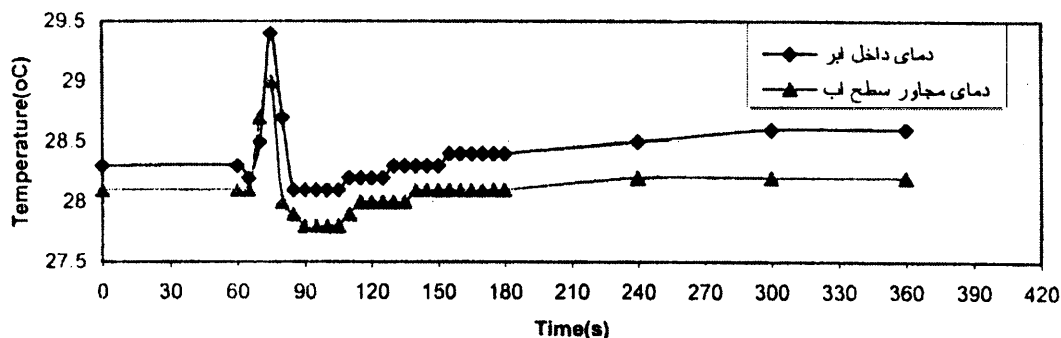
۴ بررسی تغییرات دما در زمان تشکیل ابر

در تمام آزمایش‌ها روند تغییرات دمایی مشاهده شده یکسان است. به طور نمونه منحنی تغییرات دما مربوط به چهار آزمایش روز ۷۹/۵/۱ آورده شده است. دقت اندازه‌گیری دما در حد 0.1°C است.

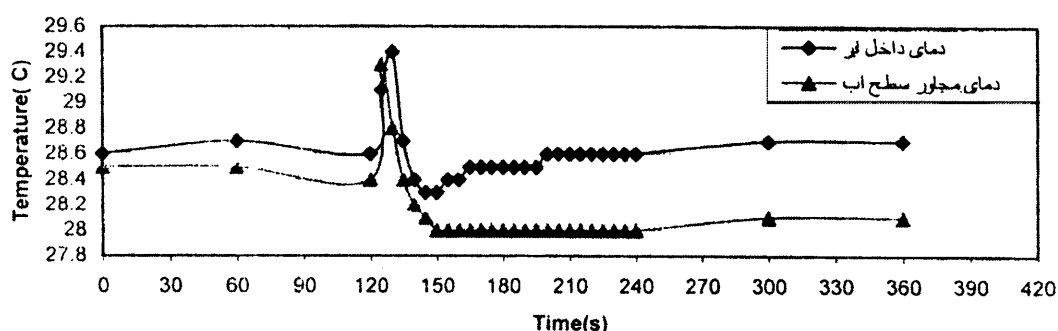
منحنی تغییرات دمای مجاور سطح آب و دمای داخل ابر در شکل‌های ۸، ۹ و ۱۰ نشان داده شده است. زمانی که فشار داخل محفظه افزایش می‌یابد به‌طور همزمان یک روند



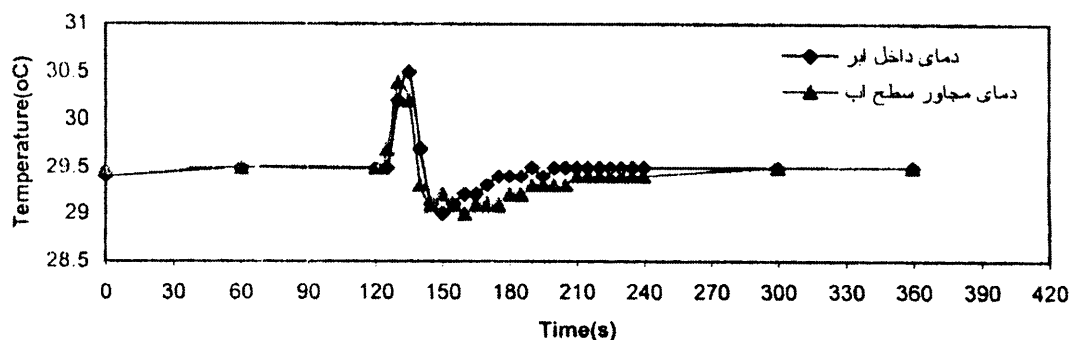
شکل ۷. تغییرات توان پرتو لیزری بر حسب زمان برای غلظت نمک ۲۰ g/lit، ۳۰ g/lit و ۴۰ g/lit.



شکل ۸. نمودار تغییرات دمای مجاور سطح آب و داخل ابر بر حسب زمان برای ابر تشکیل شده به وسیله هوامیزهای محیط آزمایشگاه (در تاریخ ۷۹/۵/۱).



شکل ۹. نمودار تغییرات دمای مجاور سطح آب و داخل ابر بر حسب زمان برای ابر تشکیل شده به وسیله ذره‌های نمک از محلول ۳۰ g/lit آب نمک (در تاریخ ۷۹/۵/۱).



شکل ۱۰. نمودار تغییرات دمای مجاور سطح آب و داخل ابر بر حسب زمان برای ابر تشکیل شده به وسیله ذره‌های دود حاصل از دو کبریت مشتعل (در تاریخ ۷۹/۵/۱).

به‌خصوصی مطرح شود. عامل دیگر افزایش دما، متراکم شدن هوای داخل محفظه است که مقدار آن را می‌توان با استفاده از معادله حالت و معادله انرژی برای حالت بی‌دررو و خشک به دست آورد:

$$\frac{dT}{T} = \frac{R}{C_p} \frac{dP}{P} \quad (1)$$

افزایشی در تمام منحنی‌های دما مشاهده می‌شود. از آنجا که افزایش فشار با دمیدن صورت می‌گیرد، مقداری گرما و هوای مرطوب در محفظه تولید می‌شود. بنابراین یک عامل افزایش دما می‌تواند گرمای تولید شده در اثر دمیدن به داخل محفظه باشد. ولی چون این عمل برای همه آزمایش‌ها تکرار می‌شود، نمی‌تواند به عنوان منبع خطا برای آزمایش

۵ نتیجه‌گیری

۱- مدت زمان پاک شدن ابر به نوع، اندازه و غلظت هسته‌هایی که برای بارورسازی ابر به کار می‌روند بستگی دارد. تغییر غلظت هوامیزها در مدت زمان پاک شدن ابر تاثیر می‌گذارد بنابراین هنگامی که غلظت هوامیزها بیشتر است (دید افقی کم‌تر) زمان پاک شدن ابر نسبتاً بیشتر از مواقعی است که غلظت هوامیزها کم‌تر (دید افقی بیشتر) است. و این به دلیل زمان استقرار بیشتر قطره‌های ریز غبارمه حاصل از چگالش مولکول‌های بخار روی هسته‌های ریز هوامیز با غلظت زیاد است.

۲- در تمام آزمایش‌ها مدت زمان پاک شدن ابر تشکیل شده توسط هسته‌های درشت و نم‌گیر نمک کم‌تر از زمان مربوط به هوامیزهای ریز محیط آزمایشگاه است. این مسئله نشان می‌دهد که ذره‌های نمک کارایی زیادی در بارورسازی ابر دارند.

۳- در آزمایش بارورسازی ابر با هسته‌های درشت و نم‌گیر نمک، مشاهده شد که با افزایش غلظت نمک حل شده در آب حتی به مقدار ۴۰ گرم بر لیتر، مدت زمان پاک شدن ابر کاهش می‌یابد. زیرا هنوز تعداد این هسته‌ها در محیط به مقدار بهینه نرسیده و در نتیجه ابرهایی که منشأ دریایی دارند نیز می‌توانند با موفقیت بارور شوند، افزایش ذره‌های نمک در ابر پتانسیل بارش را در آن افزایش داده و ابر با شدت بیشتر در مدت زمان کم‌تر بارش می‌کند.

۴- در اکثر موارد، افزایش غلظت دود باعث افزایش بارش می‌شود و به ندرت نیز مشاهده می‌شود که افزایش فوق‌العاده زیاد دود باعث فراباروری ابرها شود.

۵- کارایی هسته‌بندی قطره‌های آب ابر با هسته‌های نم‌گیر و درشت نمک نسبت به هسته‌های ریزتر دود بیشتر است. زیرا اگر امکان انجام این آزمایش‌ها به طور کمی مقدور بود و ذره‌های نمک و دود به تعداد و اندازه مساوی وارد محیط می‌شد، هسته‌های نمک در مدت زمان کم‌تری ابر را پاک می‌کردند.

۶- توسعه شهرنشینی و آلودگی. گاهی پتانسیل بارش را در ابر کاهش می‌دهد. زیرا توسعه شهرنشینی و استفاده از سوخت‌های فسیلی باعث افزایش غلظت ذره‌های هوامیزها و

تراکم بی‌درروی هوا در محفظه (dp مثبت) با گرم شدن (dT مثبت) همراهی می‌شود و انبساط بی‌دررو با سرد شدن محیط همراه است. T در معادله حالت دمای مطلق هوای محیط و P فشار کل آن است.

بر اساس این معادله تغییر کوچکی در دما و فشار به طور مستقیم با هم متناسب هستند و ثابت تناسب R/C_p است که مقدار آن برای هوای خشک و هوای مرطوب در زیرین کره بسیار نزدیک به عدد ۰/۲۸۵ است.

زمانی که دمیدن به داخل محفظه (افزایش فشار) قطع می‌شود فشار به طور ناگهانی کاهش می‌یابد. عبور هوای فشرده از روی آب موجود در کف محفظه باعث تبخیر و سرمایش در قسمت پایین می‌شود. سپس بخار آب ایجاد شده، در مجاورت هسته‌های میعان موجود چگالیده می‌شوند، گرمای نهان آزاد و ابر تشکیل می‌شود. در عمل مقدار سرمای ایجاد شده به وسیله تبخیر و گرمای ایجاد شده به وسیله آزاد شدن گرمای نهان در دراز مدت یکدیگر را خنثی می‌کنند ولی در لحظه تشکیل ابر، تفاوت اندکی بین دمای بالا و پایین ایجاد می‌شود که به علت بزرگی محفظه نسبت به مقدار ناچیز اختلاف دما گاهی این تغییرات اندک دما قابل اندازه‌گیری نیست. به طور کلی مقدار گرمای نهان آزاد شده از میعان روی هسته‌های نم‌گیر و بزرگ‌تر نمک بیشتر از ذره‌های ریزتر هوامیز و دود است، زیرا قطره‌هایی که روی هسته‌های نمک به وجود می‌آیند درشت‌تر و سنگین‌تر از قطره‌های ایجاد شده روی ذره‌های هوامیز و دودند و در نتیجه گرمای نهان بیشتری نیز از میعان آنها آزاد می‌شود. بنابراین تغییرات دمایی ایجاد شده که به نوع هسته نیز بستگی دارد می‌تواند مشخص شود.

به طور خلاصه این آزمایش‌ها نشان داد که ابر می‌تواند به سرعت در محیطی که تنها به میزان کمی ابر اشباع شده، تشکیل شود. در این کار، تغییر فشار به میزان ۵۰ mb صورت گرفت و با توجه به نمودارهای تغییرات دما، این میزان تغییر فشار با حدوداً $2-1/5^{\circ}C$ تغییر دما همراه بود. بنابراین نتیجه گرفته شد که عامل اصلی در تغییرات ناگهانی دما به سبب گرم شدن ناشی از تراکم و سرد شدن ناشی از انبساط است که از معادله ۱ برای هوای نمناک پیروی می‌کند.

- Changnon, S.A., Jr., and Huff, F.A., 1997, Atmospheric sciences at illinois state water survey: Five decades diverse activities and achivments: Bull. Am. Meteorol soc., 78, 22.
- Harrison, R.M., and Van Grieken, R.E., 1999, Atmospheric particles, John Wiley and Sons.
- Mather, G.K., and Terblanche, D.E., 1997, Results of the south African could-seeding experiments using hygroscopic flares: Jour. Appl. Meteor., 36, 1433-1447.
- Rogers, R.R., and Yau, M.K., 1996, A short course in cloud physics, Butterworth - Heinemann.
- Sadeghi Hosseini, S.A., 1998, Ice initiation in clouds: PhD Thesis, University of Manchester Institute of Technology (UMIST).
- Warner, J., 1968, A reduction in rainfall associated with smoke from suger-cane fire. An inadvertent weather modification: Jour. of Appl. Meteor., 7, 247-215.

دود شده و به دلیل فراباروری ابر در مجموع پتانسیل بارش ابر کاهش می‌یابد.

تشکر و قدردانی

از شورای پژوهشی دانشگاه تهران به‌خاطر کمک مالی در قالب طرح پژوهشی "مطالعه آزمایشگاهی بارورسازی ابرهای گرم" به شماره ۶۵۲/۱/۴۵۴ سپاسگزاری می‌شود.

منابع

- ریتالاک، بی.جی.، ۱۳۶۵، هواشناسی فیزیکی، ترجمه علیرضا صادقی حسینی، مرکز نشر دانشگاهی، چاپ اول.
- راحلی سمیعی، ج.، ۱۳۸۰، اثر غبار دود مه بر روی فرایند بارش در تهران: پایان‌نامه کارشناسی ارشد، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران.
- واژه‌نامه ژئوفیزیک و هواشناسی، ۱۳۷۷، مرکز نشر دانشگاهی و پژوهشکده هواشناسی، ویرایش دوم.
- ارکیان، ف.، ۱۳۷۹، مطالعه فیزیکی نحوه تشکیل قطره‌های ابر در دمای آزمایشگاه: پایان‌نامه کارشناسی ارشد، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران.