

## بررسی آزمایشگاهی نقش یون‌ها در تشکیل ابر گرم

محمد حسین شوشتری<sup>\*</sup>، فائزه ناجی<sup>۱</sup> و عباسعلی علی‌اکبری بیدختی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> کارشناس ارشد هواشناسی، گروه فیزیک فضا، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران  
<sup>۲</sup> استاد، گروه فیزیک فضا، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

(دریافت: ۹۱/۷/۳، پذیرش نهایی: ۹۲/۷/۱۶)

### چکیده

در این مقاله اثر یون‌ها در تشکیل ابر گرم در محیط آزمایشگاه بررسی شده است. همان‌طور که وجود یون‌ها در جو در تشکیل ابرها موثر است این تاثیر در آزمایشگاه بررسی شده است. در آزمایش‌های صورت گرفته، از دو الکتروود که به ولتاژ بالا متصل شدند برای یونیده کردن هوای داخل محفظه شیشه‌ای استفاده شده است، به طوری که ولتاژ زیاد با اعمال یک میدان الکتریکی قوی سبب یونیده شدن هوای داخل محفظه شده است. تشکیل ابر گرم مصنوعی با استفاده از انبساط بی‌دررو در حالت‌های بدون یون و با حضور یون و با غلظت‌های متفاوت بررسی شده است. سامانه اندازه‌گیری غلظت ابر گرم مصنوعی متشکل از یک لیزر (با طول موج ۵۹۸ نانومتر)، آشکارساز، آمپلی‌فایر و یک رایانه مجهز به مبدل (A/D) است، به طوری که پرتو لیزر از میان ابر گرم مصنوعی عبور می‌کند و به آشکارساز می‌رسد و بسته به غلظت ابر تشکیل شده، سیگنال لیزر تغییر می‌کند. این سیگنال و شرایط دیگر آزمایش از قبیل دما و میزان رطوبت داخل محفظه ابر و بیرون از آن با رایانه به صورت مستقیم و پیوسته ثبت می‌شود. همچنین فشار هوای داخل محفظه با یک دستگاه شامل یک پمپ الکتریکی، شیلنگ‌های رابط و یک شیر تخلیه تغییر می‌یابد و با استفاده از یک مانومتر آبی اندازه‌گیری می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که حضور یون به طور چشمگیری در تشکیل ابر در شرایط آزمایشگاهی مؤثر است. به صورت کیفی با افزایش غلظت یون، ابر غلیظ‌تری تشکیل می‌شود ولی افزایش بیش از حد غلظت یون به علت اثر فراباروری، نقش کاهنده در باروری ابر تشکیل شده دارد و ریزش ابر در غلظت‌های بیش از حد بهینه، کاهش پیدا می‌کند.

واژه‌های کلیدی: یون، ابر گرم، هسته میعان ابر، هسته‌سازی ناهمگن، آبراشباع

### A laboratory study of the role of ions in warm cloud formation

Shoushtari, M. H.<sup>1</sup>, Naji, F.<sup>1</sup> and Aliakbari-Bidokhti, A. A.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>M.Sc., Space Physics Department, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran  
<sup>2</sup>Professor, Space Physics Department, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

(Received: 24 Sep 2012, Accepted: 08 Oct 2013)

### Summary

Aerosol formation due to ions in the atmosphere is not well understood, although it seems to play an important role in cloud formation. The ions in the atmosphere can enhance cloud formation and can increase nucleation as well as impeding the evaporation from the surfaces of the droplets. Recently there has been some experimental work to find the relation between ions concentrations and cloud initiation. Experimental and field studies show that the classical nucleation theory cannot explain the formation of the aerosols at their early stages formation. Although some ideas have been given concerning this problem, e.g. ion-induced nucleation (Arnold 1980; Raes et al. 1986; Turco et al. 1998) and ternary nucleation (Kulmala et al. 2000). The experimental considerations of the role of aerosol formation by ions are also not wide spread, particularly those that can be

applicable to the lower atmosphere. Along this line, we have studied this problem in the warm cloud in the laboratory. By warm cloud we mean that the experiments were carried out at room temperature.

In these experiments the role of ions in warm cloud formations is studied in a cloud chamber of 20 liters in the laboratory. Ions were produced by a strong electric field in the chamber. The ion concentration is controlled by the time of ionization of air between two electrodes. The cloud concentration was also measured by the attenuation of a laser beam going through the cloud chamber. With cloud formation the opacity of the chamber was changed, so that with the increase of cloud concentration due the scattering of laser light by cloud droplets less light reached the detector, resulting in smaller laser signal. The laboratory facility for this study includes a cloud chamber, a laser beam (red with 598 nm) with a detector, signal amplifier, pressure gauge (water column manometer), temperature and humidity sensors of which their signals are digitized using a computer with an Analogue to Digital convertor, with typical sampling time of 0.5 of second. Cloud concentration is determined by fluctuations in the laser signal. Some 25 experiments were carried out with different ions concentrations. The warm cloud in the chamber was produced by an adiabatic the expansion of nearly saturated moist air. As soon as the expansion starts the cloud forms, although it takes a few 10s of seconds to clear off. The clearing times also seems to be dependent on the size of the cloud droplets, as they precipitate differently due to gravity.

In this paper we report the results of experiments concerning ions with different concentration in the cloud chamber. Preliminary results show that as the ion concentration increases to some level the cloud formation is enhanced. But as the ion concentration increases more than a certain (optimum) value the cloud formation is hampered and we acquire less cloud with perceptible droplet sizes. We found that the over seeding process occurs as a result of increasing ion concentration more than the optimum value leading to less perceptible cloud. This leads to an increase of cloud clearing time after an optimum point.

**Keywords:** Warm cloud, Ions, Modification, CCN, Heterogeneous nucleation, Supersaturation

## ۱ مقدمه

سه گانه (کولملا و همکاران، ۲۰۰۰) برای بررسی و حل مسئله هسته‌سازی از سوی دانشمندان و متخصصان علوم جوئی عرضه شده است. به‌طور کلی برای تبدیل بخار آب‌اشباع به فاز مایع، باید گروه‌هایی در فاز بخار تشکیل و رشد کنند. در هسته‌سازی همگن چنین گروهی در میان مولکول‌های ماده در حال میعان تشکیل می‌شود درحالی‌که در هسته‌سازی یونی گروه ترجیحاً اطراف یون تشکیل می‌شود؛ زیرا همواره اثر متقابل الکتروستاتیکی میان یون و مولکول‌های در حال میعان، انرژی آزاد تشکیل گروه را کاهش می‌دهد.

نقش یون‌ها در تولید هوامیزهای جوئی تا حدی ناشناخته است، اما به‌صورت بالقوه، فرایند مهمی در جو محسوب می‌شود. مشاهدات جوئی (هوپل و همکاران، ۱۹۹۴؛ کلارک و همکاران، ۱۹۹۸؛ بیرمیلی و همکاران، ۲۰۰۳؛ لی و همکاران، ۲۰۰۳؛ کولملا و همکاران، ۲۰۰۴) و کار آزمایشگاهی (برنت و همکاران، ۲۰۰۵) نشان می‌دهد که هسته‌سازی ذرات هوامیز جدید در شرایطی رخ می‌دهد که با نظریه هسته‌سازی کلاسیک قابل بیان نیست. ایده‌های بسیاری از جمله هسته‌سازی یونی (آرنولد، ۱۹۸۰؛ رایس و همکاران، ۱۹۸۶؛ ترکو و همکاران، ۱۹۹۸) و هسته‌سازی

واحد سطح  $(s^{-1}m^{-2})$  تقریباً با  $S$  متناسب است و به  $i$  بستگی ندارد. پس انرژی تعامل بین مولکول‌ها با  $i$  افزایش می‌یابد. بنابراین در مورد هسته‌سازی همگن، سرعت تبخیر به‌طور یکنواخت با افزایش  $i$  کاهش پیدا می‌کند، تا این مقدار به سرعت میعان در حالت اشباع ( $S=1$ ) برسد. هنگامی که  $S>1$ ، فقط یک اندازه برای گروه  $i^*$  در شرایط تعادل ناپایدار و فاز بخار وجود دارد که در آن آهنگ تبخیر و میعان برای تولید هسته‌ای بحرانی برابر می‌شوند (سنفلد و پندیس، ۲۰۰۶).

از طرف دیگر، هنگامی که یونی در گروه قرار می‌گیرد یا به عبارتی مولکول‌ها را جذب می‌کند، آهنگ تبخیر در حال کاهش است. از آنجا که نیروی الکتروستاتیکی با عکس مجذور شعاع متناسب است ( $F \propto r^{-2}$ )، کاهش آهنگ تبخیر برای مقادیر اندک  $i$ ، بسیار مهم است و همان‌طور که  $i$  افزایش پیدا می‌کند ( $i \rightarrow \infty$ ) قابل صرف‌نظر می‌شود. زمانی که انرژی تعاملی یون-مولکول به اندازه‌ی کافی بزرگ باشد، حتی اگر  $S \leq 1$  آهنگ میعان با آهنگ تبخیر برابر می‌شود و به این معنی است که آهنگ تبخیر ابتدا با  $i$  افزایش می‌یابد. برای یک مقدار معین  $i$ ، به بیشینه خود می‌رسد و سپس درحالی که به فاز مایع نزدیک می‌شود کاهش می‌یابد. برای  $S>1$ ، دو مقدار  $i$  وجود دارد که در آنها آهنگ تبخیر و آهنگ میعان برابری می‌کند، مقدار کوچک‌تر مربوط به گروهی زیر اندازه بحرانی و پایدار و مقدار بزرگ‌تر مربوط به هسته‌ای با اندازه بحرانی و ناپایدار است (شکل ۱). اگر  $S \geq S'_{\max}$  نیز برای هر اندازه گروه  $i$ ، آهنگ میعان همیشه بزرگ‌تر از آهنگ تبخیر است، بنابراین تشکیل گروه و رشدش به‌صورت خودبه‌خودی صورت می‌گیرد (سنفلد و پندیس، ۲۰۰۶).

انرژی آزاد گروه، درحکم تابعی از مولکول‌های  $i$  در داخل گروه، برای موقعیت هسته‌سازی یونی در شکل ۱ نشان داده شده است. منحنی‌های انرژی آزاد در حقیقت با

به‌صورت تجربی نشان داده شده است که حضور یونها میزان هسته‌سازی قطرک‌های مایع را در بخار آب‌اشباع افزایش می‌دهد. برای مثال، کتز و همکاران (۱۹۹۴) روشن ساختند که میزان هسته‌سازی در اتاقک ابری که در آن بسته هوا به‌صورت بی‌دررو منبسط می‌شود و چگالی یونی در آن حدود  $10^6 \times 16$  یون بر سانتی‌متر مکعب است، ۲۵۰۰ مرتبه نسبت به حالتی که یون وجود ندارد افزایش می‌یابد. به‌علاوه این محققان به‌صورت تجربی تأیید کردند که میزان هسته‌سازی با چگالی یون متناسب است.

پدیده‌ی هسته‌سازی یونی نقش مهمی در میعان جوئی، به‌ویژه در یون‌سپهر ایفا می‌کند. در حقیقت یون، یک میدان نیرو در مرکز گروه ایجاد می‌کند که تبخیر را دشوارتر می‌سازد. چگالی کم و نیروی دافعه بین یونها تضمین می‌کند که تقریباً همه این گروه‌ها فقط شامل یک یون هستند. اندازه بحرانی برای گروه نیز مانند هسته‌سازی مولکول‌های منفرد با برابر قراردادن آهنگ تبخیر و آهنگ رشد به‌دست می‌آید. تأثیر یونی که در گروه قرار گرفته بر آهنگ رشد (فرار) مولکول‌های بخار به‌صورت قابل‌ملاحظه‌ای ضعیف‌تر از تأثیر آن بر آهنگ تبخیر است. این تفاوت منجر به کاهش چشمگیری در اندازه بحرانی گروه در حضور یونها در مقایسه با آنچه که برای هسته‌سازی همگن رخ می‌دهد، خواهد شد. آهنگ رشد (فرار) کوچک‌تر به این معنی است که نسبت اشباع کمتری برای مولکول‌های بخار لازم است تا به اندازه مشابه هسته‌سازی بدون حضور یونها برسند.

از دیدگاه سینماتیک، اندازه گروهی که تشکیل می‌شود با تبخیر و میعان مولکول‌ها تغییر می‌کند. در یک دمای معین، سرعت تبخیر (در واحد زمان واحد سطح  $s^{-1}m^{-2}$ ) مولکول‌ها به  $S$  بستگی دارد، اما در دجه اول با  $i$  تعیین می‌شود، درحالی که سرعت میعان (در واحد زمان

$$\left(\frac{e}{e_s}-1\right)\times 100 \quad (1)$$

که در آن،  $e_s$  فشار بخار اشباع است. ابرها وقتی تشکیل می‌شوند که هوا آبراشباع شود. رایج‌ترین راه تولید آبراشباع استفاده از صعود بسته هوا است که در نتیجه آن، هوا منبسط و به صورت بی‌دررو سرد می‌شود. در این آزمایش برای تشکیل ابر، شرایط آبراشباع را در داخل یک محفظه ایجاد کردیم و چون امکان صعود بسته هوا وجود ندارد هوا را در داخل یک محفظه، به صورت بی‌دررو منبسط کردیم تا براساس حالت بی‌دررو معادله انرژی:

$$\frac{dT}{T} = \frac{R}{C_p} \frac{dP}{P} \quad (2)$$

که در آن،  $T$  دما و  $P$  فشار هوا است، دمای هوای آبراشباع را به صورت بی‌دررو کاهش دهیم و در نتیجه، ابر مصنوعی تشکیل شود. براساس این معادله، تغییر کوچکی در دما و فشار به طور مستقیم با هم متناسب هستند و ثابت تناسب  $\frac{R}{C_p}$  است که مقدار آن برای هوای خشک و هوای مرطوب در زیرین کره بسیار نزدیک به عدد  $0/285$  است (صادقی حسینی و ارکیان، ۱۳۸۰). قطرک‌های تشکیل شده روی هواویزهای جو و در این آزمایش با هسته‌سازی ناهمگن تشکیل می‌شود. هدف از این آزمایش‌ها بررسی میزان نقش یون‌ها به صورت کیفی در تشکیل و کیفیت ابر گرم تشکیل شده است.

## ۲ روش تحقیق

ابر گرم در یک محفظه شیشه‌ای با حجم ۲۰ لیتر که در آن با درپوش لاستیکی بسته شده است، به روشی که توضیح داده خواهد شد، تشکیل می‌شود. در درپوش لاستیکی سوراخ‌هایی برای عبور سیم‌های الکترودها، دما و رطوبت‌سنج و لوله‌ی شیشه‌ای که با شیلنگ پلاستیکی به مانومتر و پمپ هوا متصل می‌شود، ایجاد شده است. یک لیزر و آشکارساز به فاصله ۵۰ سانتی‌متر از آن، طوری قرار

دیدگاه سینماتیک که در بالا گفته شد سازگارند. بنابراین برای مقدار مناسب آبراشباع، منحنی انرژی آزاد یک کمینه و یک بیشینه برای وضعیت هسته‌سازی یونی، نشان می‌دهد که به ترتیب مربوط به گروه زیر اندازه بحرانی و پایدار و گروه در اندازه بحرانی و ناپایدار است. کمینه در هسته‌سازی همگن از بین می‌رود.

تحقیقات آزمایشگاهی که نقش یون‌ها در تولید هوامیزهای جو را مورد بررسی قرار دهد نیز بسیار اندک‌اند و تحقیقات صورت گرفته نیز اغلب مربوط به یون‌سپهر و لایه‌های بالای جو است و لایه‌های پایین جو را شامل نمی‌شود.

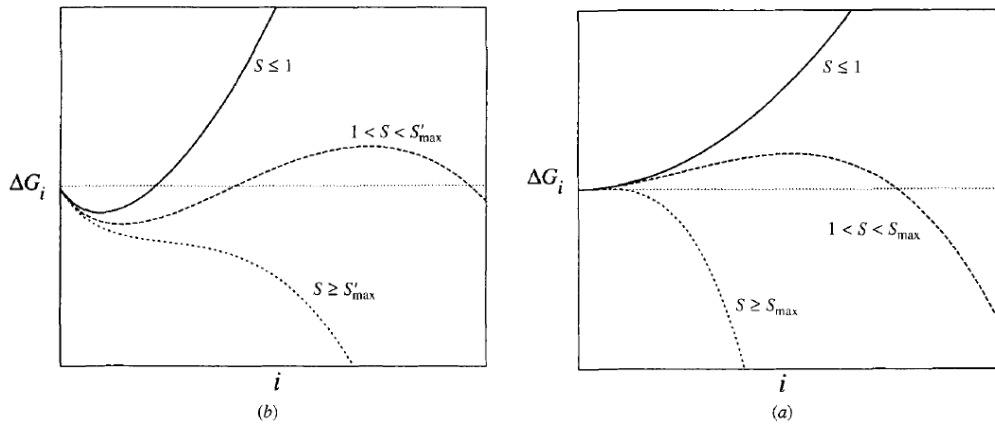
این پژوهش در راستای تحقیق و بررسی‌های آزمایشگاهی اسونسمارک و همکاران (۲۰۰۷) در ارتباط با بررسی نقش یون‌ها در هسته‌سازی ذرات هوامیز جدید تحت شرایط جوئی است. آن‌ها روشن ساختند که تولید این ذرات با غلظت یون در شرایط آزمایشگاهی و مشابه آنچه که در جو پایین و سطح اقیانوس‌ها رخ می‌دهد، متناسب است. آهنگ تولید یون با شعاعی حدود ۳ نانومتر، ۱-۱۰ سانتی‌متر مکعب بر ثانیه است، از طرفی شبیه‌سازی‌های عددی نشان می‌دهد که آهنگ هسته‌سازی گروه‌های پایدار اولیه تقریباً  $1-0/1$  سانتی‌متر مکعب بر ثانیه است. بنابراین یون‌ها در تولید متوالی منبعی از گروه‌های پایدار ترمودینامیکی که در حضور بخار قابل میعان به سرعت رشد می‌کنند، فعال‌اند. بنابراین یون‌ها نقش مهمی در تولید ذرات هوامیز جدید در جو خواهند داشت. به علاوه یون‌ها با کنترل گردوغبار و هواویزهای جوئی، هسته‌های نم‌گیری در جو تولید می‌کنند که می‌توانند به منزله هسته‌های میعان رشد کنند و در فرایند تشکیل ابر و بارش موثر واقع شوند (هاریسون و کارسلاد، ۲۰۰۳).

اگر فشار بخار هوا را  $e$  بنامیم، آبراشباع (به درصد) در ارتباط با آب مایع از رابطه (۱) محاسبه می‌شود:

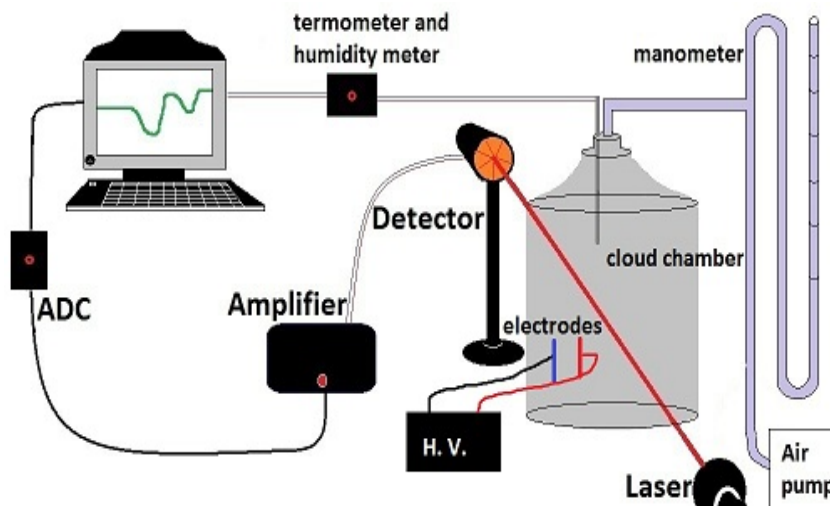
توسط دو الکتروود که به ولتاژ زیاد متصل هستند، استفاده می‌شود که این کار قبل از مرحله افزایش فشار هوای داخل محفظه صورت می‌گیرد. برای این منظور الکتروودها، داخل محفظه و در مجاورت سطح آب قرار داده می‌شوند و جریان الکتریکی بین دو الکتروود که در فاصله کمی از یکدیگر قرار گرفته‌اند ایجاد می‌شود؛ به طوری که یکی از الکتروودها نقش کاتد و دیگری نقش آند را ایفا می‌کند. بنابراین تعداد بسیار زیادی از الکترون‌ها از کاتد به سمت آند حرکت می‌کنند و یک قوس الکتریکی بین دو قطب کاتد و آند ایجاد می‌شود. این الکترون‌ها در مسیر خود از کاتد به سمت آند به مولکول‌های هوا برخورد و آنها را تحریک می‌کنند، به طوری که یا به مولکول‌ها می‌چسبند و یون منفی تولید می‌کنند و یا باعث جدا شدن الکترون از مولکول‌ها و در نتیجه تولید یون مثبت می‌شوند. به این ترتیب با گذشت زمان معین، یون‌های مثبت و منفی، فضای داخل محفظه را پر می‌کنند. آزمایش‌ها بدون حضور یون و با حضور یون با غلظت‌های متفاوت تکرار می‌شود. به این صورت که با تغییر زمان برقراری میدان الکتریکی به مدت ۳۰، ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ ثانیه، غلظت یون‌ها تغییر داده می‌شود. برای از بین بردن خطای اندازه‌گیری، هر آزمایش تکرار می‌شود تا اینکه میانگین اندازه‌گیری‌ها به یک مقدار میل کند. به همین خاطر هر آزمایش ۵ مرتبه صورت گرفت تا خطای میانگین به صفر میل کرد. در شکل ۲ نمونه‌ای از نمودار شدت پرتو لیزر نسبت به زمان، برای آزمایش با یون‌های ایجاد شده به مدت ۹۰ ثانیه است که ناوه در نمودار، مربوط به زمان تشکیل ابر است. همچنین نمودار تغییرات دمای همان آزمایش در شکل ۴ آورده شده است که بیشینه آن مربوط به تراکم بی‌دررو و فرایند تبخیر و هوای اشباع داخل محفظه و کمینه بر اثر انبساط بی‌دررو و فرایند میعان و در نهایت تشکیل ابر است. بعد از هر فرایند بی‌دررو، دما به صورت نمایی تغییر می‌کند تا پایدار شود.

داده شده است که پرتو لیزر از میان محفظه ابر عبور می‌کند و به آشکارساز می‌رسد. شدت پرتو لیزر با آشکارساز اندازه‌گیری و با یک امپلی فایر تقویت می‌شود، از راه یک برد مبدل آنالوگ به دیجیتال به رایانه انتقال می‌یابد و هر ۰/۵ ثانیه ثبت می‌شود. داده‌های دما و رطوبت سنج نیز به صورت هر ثانیه یک‌بار با رایانه ثبت می‌شود. مانومتر طوری طراحی شده است که اختلاف فشار ۱۸۰ میلی‌بار را اندازه بگیرد و دقت آن یک میلی‌بار است. شمای کلی آزمایش در شکل ۲ آمده است.

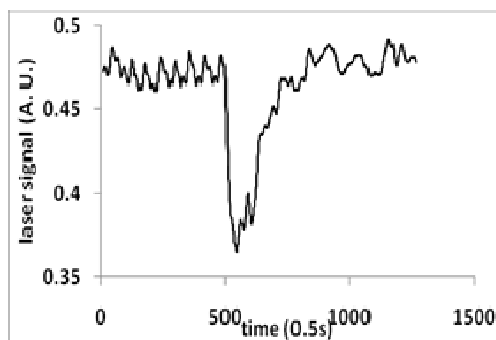
در داخل محفظه یک لیتر آب مقطر ریخته می‌شود تا رطوبت لازم برای ایجاد شرایط آبراشباع در آن مهیا شود. برای تشکیل ابر قبل از هر آزمایش درپوش محفظه به مدت ۵ دقیقه برداشته می‌شود تا غلظت هوامیزهای داخل آن با محیط به تعادل برسد. این زمان به صورت تجربی به دست آمده است و به اندازه قطر در ورودی محفظه ابر و شرایط محیط مثل میزان تلاطم هوای محیط و دما بستگی دارد. سپس درپوش محکم بسته می‌شود و دستگاه‌های اندازه‌گیری روشن می‌شوند. فشار هوای داخل محفظه با یک پمپ تا ۱۵۰ میلی‌بار افزایش داده می‌شود. فشار با مانومتر آبی اندازه‌گیری می‌شود. دمای داخل محفظه به علت تراکم بی‌دررو طبق رابطه ۲ افزایش می‌یابد. سپس به صورت ناگهانی فشار هوای داخل محفظه را با باز کردن شیر که در مسیر پمپ هوا قرار دارد، به صورت بی‌دررو کاهش می‌دهیم و در نتیجه آن، دما نیز طبق رابطه (۲) کاهش می‌یابد. به سبب تشکیل ابر و آزاد شدن گرمای نهان بخار آب در هنگام تشکیل قطره‌های ابر، کاهش دمای اندازه‌گیری شده کمتر از مقدار به دست آمده از رابطه (۲) است، چون معادله مربوط به هوای خشک است و برای هر آزمایش بسته به غلظت ابر، متفاوت و حدود ۲ تا ۳ درجه است. ابر تشکیل شده به تدریج بر اثر ریزش قطره‌ها به داخل محفظه و تبخیر پاک می‌شود. برای تشکیل یون‌ها در محفظه از یک میدان الکتریکی قوی که



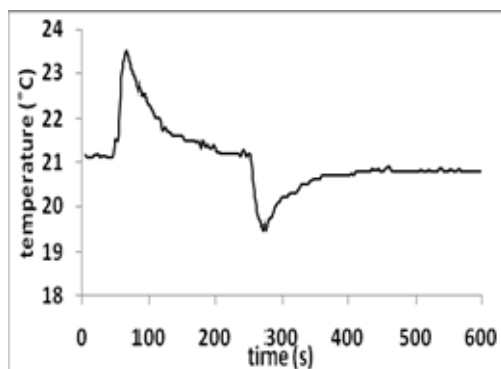
شکل ۱. (a) انرژی آزاد تشکیل گروه در هسته‌سازی همگن و (b) انرژی آزاد تشکیل گروه در هسته‌سازی یونی. مقادیر پیشینه نسبت اشباع به ترتیب در هسته‌سازی یونی و همگن (سنفلا و پندیس، ۲۰۰۶).



شکل ۲. شمای کلی آزمایش.



شکل ۳. نمودار سیگنال لیزر نسبت به زمان برای آزمایش یون در ۹۰۵ (۹۱/۴/۱۲).



شکل ۴. نمودار تغییر دما نسبت به زمان برای آن.

### ۳ نتایج و بحث

با توجه به نمودار شکل ۳ توان پرتو لیزر هنگام تشکیل ابر در حضور یونها در مقایسه با حالت بدون یون به صورت قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد که این نشان‌دهنده افزایش غلظت ابری است که در این حالت تشکیل می‌شود. بنابراین مشاهدات نیز تأیید می‌کنند که یونها تأثیر چشم‌گیری در تشکیل ابر گرم در شرایط آزمایشگاهی دارند. همان‌طور که مشاهده می‌شود غلظت ابر تشکیل شده با غلظت یونها موجود در داخل محفظه متناسب است به طوری که با افزایش مدت زمان برقراری میدان الکتریکی و در نتیجه افزایش تعداد یونها، غلظت ابر تشکیل شده افزایش می‌یابد و عمق ناوه سیگنال لیزر بیشتر می‌شود.

در حقیقت با برقراری جریان الکتریکی بین دو الکترود و به وجود آمدن قطب‌های کاتد و آند، الکترودها در مسیر خود از کاتد به سمت آند با مولکول‌های هوا برخورد کرده و آنها را تحریک می‌کنند. به این ترتیب مولکول‌های هوا یا الکترون گرفته یا الکترون از دست می‌دهند و تعداد زیادی یون مثبت و منفی، فضای داخل محفظه را پر می‌کند. با توجه به اینکه طول عمر یونها کمتر از دو ثانیه است (اسونسمارک و همکاران، ۲۰۰۷)، بنابراین مشابه آنچه که در یونش ناشی از پرتوهای کیهانی و یونش مصنوعی رخ می‌دهد، ممکن است تعدادی از

یونها با گرفتن یا از دست دادن الکترون دوباره به مولکول تبدیل شوند، بعضی از آنها به ذرات هومیز محیط که در محفظه وجود دارند پیوندند و هومیز باردار به وجود آید.

تعدادی از یونها نیز در اثر نیروی الکتروستاتیکی بین یون و مولکول، با قرار گرفتن در مرکز گروهی که اطراف آن با مولکول‌های هوا احاطه شده مجموعه‌ای از گروه-های پایدار ترمودینامیکی و دارای بار الکتریکی ایجاد می‌کنند که به مثابه هومیز و ذرات جدید در سازوکار هسته‌سازی ناهمگن شرکت می‌کنند (اسونسمارک و همکاران، ۲۰۰۷). به این صورت که یون با ایجاد نیروی جاذبه در مرکز گروه، آهنگ تبخیر مولکول‌ها و انرژی لازم برای رسیدن به اندازه‌ی بحرانی برای هسته میعان را کاهش می‌دهد. انرژی آزاد برای تشکیل یک هسته بحرانی به شعاع  $R$  اطراف یونی به شعاع  $R_i$  از رابطه (۳) به دست می‌آید:

$$\Delta G_{ii}^* = \Delta G_{\text{hom}}^* + \frac{q^2}{8\epsilon\epsilon_0} \left( \frac{1}{R_i} - \frac{1}{R} \right) \left( 1 - \frac{1}{\epsilon} \right) \quad (3)$$

که در آن،  $q$  بار یون،  $\epsilon_0$  ضریب گذردهی خلأ و  $\epsilon$  ثابت دی‌الکتریک نسبی هسته است.

با توجه به رابطه (۳) انرژی آزاد تشکیل گروه با حضور یون از انرژی آزاد تشکیل گروه در حالت بدون یون کمتر است. در حقیقت گروه‌های مولکولی و هومیزهای

نتایج این تحقیق به صورت کیفی است ولی با نتایج نظری که در ادامه می‌آید همخوانی دارد. همان‌طور که گفته شد حضور یون‌ها منجر به کاهش چشمگیری در اندازه بحرانی هسته‌های میعان متناسب با آنچه که برای هسته‌سازی همگن رخ می‌دهد، خواهد شد و نسبت اشباع کمتری لازم است تا به اندازه مشابه هسته‌سازی بدون حضور یون‌ها برسیم (سن‌فلد و پندیس، ۲۰۰۶). میزان هسته‌سازی در هسته‌سازی کلاسیک از رابطه (۵) محاسبه می‌شود:

$$J = Z\varphi a^* c \exp\left(\frac{-\Delta G^*}{k_B T}\right), \quad (5)$$

که نشان می‌دهد:

$$J = \infty \exp\left(\frac{-\Delta G^*}{k_B T}\right) \quad (6)$$

از طرفی انرژی آزاد تشکیل گروه در هسته‌سازی یونی از رابطه (۷) محاسبه می‌شود (سنفلد و پندیس، ۲۰۰۶):

$$\Delta G^*_{ii} = \Delta G^*_{\text{hom}} + \frac{q^2}{8\epsilon\epsilon_0} \left( \frac{1}{R_i} - \frac{1}{R} \right) \left( 1 - \frac{1}{\epsilon} \right) \quad (7)$$

با جای‌گذاری  $\Delta G^*_{ii}$  در رابطه (۵) می‌توان میزان هسته‌سازی در هسته‌سازی یونی را به دست آورد:

$$J = Z\varphi a^* c \exp\left(\frac{-\Delta G^*_{ii}}{k_B T}\right) \quad (8)$$

بنابراین:

$$J \propto \exp\left(\frac{-\Delta G^*_{ii}}{k_B T}\right) \quad (9)$$

به این ترتیب میزان هسته‌سازی یونی با انرژی آزاد تشکیل گروه که با  $q^2$  نسبت مستقیم دارد به صورت نمایی متناسب است. هنگامی که میزان  $q^2$  با افزایش مدت زمان برقراری جریان الکتریکی در داخل محفظه افزایش می‌یابد، انرژی آزاد تشکیل گروه در هسته‌سازی یونی طبق رابطه (۷) کاهش می‌یابد و در نتیجه میزان هسته‌سازی یونی با جای‌گذاری در رابطه (۸) به صورت نمایی رشد می‌کند. به همین علت همان‌طور که در نمودار شکل ۵

باردار می‌توانند به صورت قابل ملاحظه‌ای سریع‌تر از گروه‌های خنثی مشابه و هوامیزهای بدون بار رشد کنند و به اندازه بحرانی برسند (هاریسون و کارسلا، ۲۰۰۳).

گروه‌های مولکولی که اندازه آنها از ۳ نانومتر تجاوز می‌کند یا به سرعت به هوامیز می‌پیوندند و یا به رشد میعانی خود ادامه می‌دهند تا به اندازه بحرانی برسند. آهنگ رشد میعانی جرم قطرک نیز با استفاده از رابطه (۴) محاسبه می‌شود:

$$\frac{dM}{dT} = 4\pi r^3 v \frac{d\rho_v}{dr} \quad (4)$$

که در آن،  $r$  بیانگر شعاع دلخواه معرف شار جرم است و  $M = \frac{4}{3}\pi a^3 \rho_w$  و  $\rho_w$  چگالی قطرک آب است.

به این ترتیب گروه‌ها و هوامیزهای بارداری که اندازه آنها به محدوده اندازه ذرات ایتکن و حدود ۳-۸۰ نانومتر برسد می‌توانند رشد کنند و به هسته میعان ابر ( $> 100 \text{ nm}$ ) تبدیل شوند (هاریسون و کارسلا، ۲۰۰۳).

هرچه زمان برقراری میدان الکتریکی افزایش پیدا کند، تعداد یون‌ها افزایش می‌یابد. بنابراین تعداد گروه‌های مولکولی و هوامیزهای باردار نیز افزایش می‌یابد و می‌توان انتظار داشت که تعداد هسته‌های میعان بیشتری برای جذب رطوبت و گرفتن بخار آب در فضای آبراشباع داخل محفظه رقابت کنند تا با رشد میعانی به اندازه بحرانی برسند و به قطرک ابر تبدیل شوند. به این ترتیب ابری که تشکیل می‌شود غلیظ‌تر خواهد بود و می‌توان گفت غلظت ابر تشکیل شده با غلظت یون‌های موجود در محفظه متناسب است و حضور یون‌ها میزان هسته‌سازی قطرک‌های مایع در بخار آبراشباع را به میزان قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌دهد (سن‌فلد و پندیس، ۲۰۰۶؛ اسونسمارک و همکاران، ۲۰۰۷). بنابراین همان‌طور که در نمودار مقایسه‌ای تغییرات غلظت ابر مشاهده می‌شود، منحنی روند صعودی دارد و با افزایش غلظت یون‌ها در داخل محفظه ابر غلیظ‌تری تشکیل می‌شود.



آزمایش رسم شده است که در محور افقی شماره ۱ مربوط به آزمایش‌های بدون حضور یون و به ترتیب شماره ۲، ۳، ۴ و ۵ در محور افقی مربوط به آزمایش‌های بعد از تولید یون به مدت ۳۰، ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ ثانیه است. با توجه به رابطه سرعت نهایی سقوط هواویزهای جامد یا مایع کروی (والاس و هابز، ۲۰۰۶):

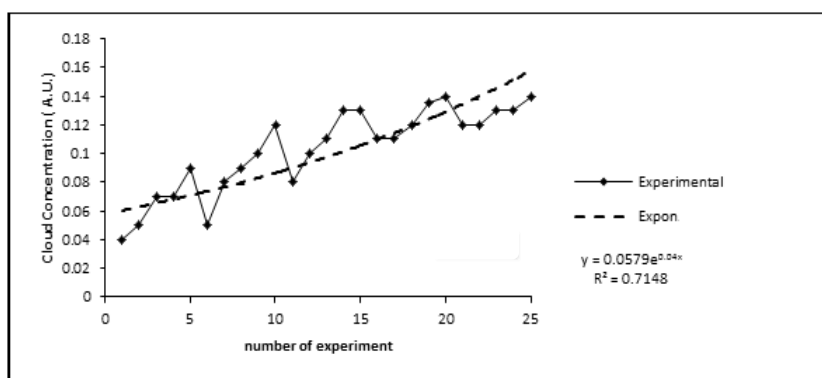
$$v = \frac{2}{9} \frac{g \rho r^2}{\eta} \quad (10)$$

که در آن،  $g$  شتاب جاذبه،  $\rho$  چگالی قطره،  $r$  شعاع قطره و  $\eta$  و شکسانی هوا است، قطره‌های ایجاد شده حول یونها با هر اندازه‌ای یک سرعت سقوط دارند که با افزایش شعاع قطره افزایش می‌یابد. در نتیجه هرچه محفظه ابر زودتر پاک شود، نشانگر آن است که قطره آب بزرگ‌تری تشکیل شده است و ابر ایجاد شده باروری بیشتر و بارش بیشتری دارد. با افزایش میزان یونها سرعت پاک شدن ابر به صورت معنی‌داری کاهش می‌یابد که نشانه افزایش اندازه قطره‌های ایجاد شده است. البته تفاوتی که بین زمان پاک شدن ابر در حالت حضور یون و بدون حضور یون وجود دارد به این علت است که در حالت اول ابر ایجاد شده غلیظ‌تر است و به زمان بیشتری برای پاک شدن نیاز دارد.

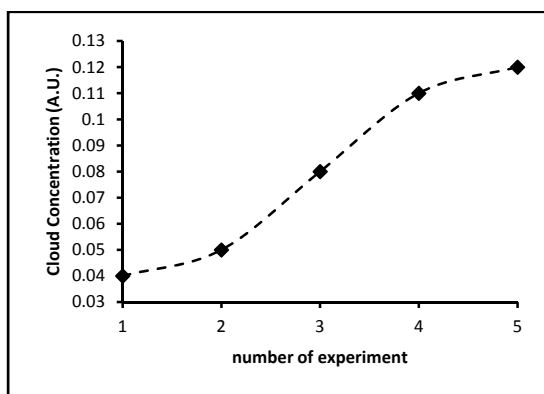
به صورت کیفی مشاهده می‌شود نمودار منحنی تغییرات غلظت ابر تقریباً به صورت نمایی رشد می‌کند که ۵ آزمایش اول مربوط به حالت بدون حضور یون و به ترتیب هر ۵ سری آزمایش‌های بعدی مربوط به حالت‌های برقراری میدان الکتریکی به مدت ۳۰، ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ ثانیه است. لازم به ذکر است که نتایجی که در این مقاله آورده شده است مربوط به آزمایش‌هایی است که در یک روز و در دما و فشار محیط یکسان صورت گرفته است (تاریخ ۹۱/۴/۱۲، دمای کنترلی محیط آزمایشگاه بیرون محفظه ابر حدود ۲۱ درجه سلسیوس و فشار هوا براساس اندازه‌گیری ایستگاه هواشناسی ژئوفیزیک حدود ۸۵۴ میلی‌بار).

اما با کاهش اندازه بحرانی، قطره‌ها فرصت بیشتری برای رشد میعانی خواهند داشت. به این ترتیب شعاع و جرم قطره افزایش می‌یابد و در مرحله برخورد و هم‌آمیزی قطره‌ها با سرعت بیشتری سقوط می‌کنند. همچنین یونها با ایجاد گروه‌های پایدار مولکولی و هوامیزهای باردار و افزایش خاصیت نم‌گیری ذرات و رشد میعانی (هاریسون و کارسلا، ۲۰۰۳) سبب به وجود آمدن CCN با اندازه بزرگ‌تر می‌شوند.

در شکل ۶ نمودار میانگین غلظت ابر براساس عمق ناوه سیگنال لیزر در لحظه تشکیل ابر نسبت به شماره



شکل ۵. نمودار غلظت ابر برای ۵ سری آزمایش نسبت به شماره آزمایش (افزایش غلظت یونی) (۹۱/۴/۱۲).



شکل ۶. نمودار میانگین غلظت ابر نسبت به شماره آزمایش (افزایش غلظت یونی).

غلظت یون فرایند فراباروری رخ داد و بنابراین قطرکها رشد اندکی داشتند و زمان پاک شدن ابر طولانی تر شد. در نتیجه منحنی عدد بارش که نسبت غلظت ابر به مدت زمان بارش و پاک شدن کامل ابر درون محفظه را نشان می دهد، پس از یک روند صعودی، کاهش می یابد و این به علت افزایش زمان ریزش کامل ابر در آزمایش تولید یون به مدت ۱۲۰ ثانیه است که باعث می شود این نسبت کاهش بیابد و عدد بارش کم شود.

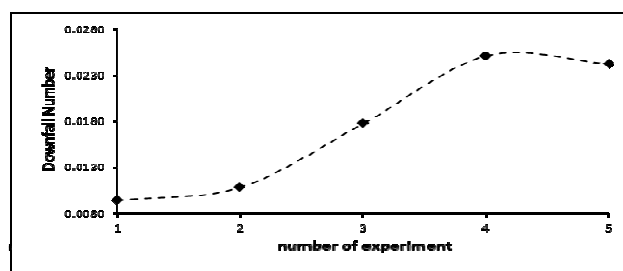
اگر  $C$  غلظت ابر براساس عمق ناوه سیگنال لیزر و  $t$  زمان پاک شدن محفظه ابر در نظر گرفته شود، آنگاه  $K = C / \ln t$  عدد بارش نام دارد که هرچه بزرگتر باشد نشان دهنده این است که یونها نقش موثرتری در تشکیل هومیز و هسته میعان ابر داشته اند. در جدول ۱ غلظت ابر، زمان پاک شدن ابر و عدد بارش برای میانگین ۵ سری آزمایش به ترتیبی که در بالا ذکر شد، آورده شده است. همان طور که در جدول ۱ مشاهده می شود غلظت ابر با افزایش ۳۰ ثانیه ای برقراری میدان الکتریکی به طور میانگین، ۳۰٪ افزایش می یابد.

در شکل ۷ نمودار میانگین عدد بارش نسبت به شماره آزمایش به ترتیب ذکر شده آورده شده است و نشان می دهد که در آزمایش شماره ۴ غلظت یونها برای تشکیل ابر، بهینه است.

بنابراین در اثر فرایند برخورد و هم آمیزی، سرعت سقوط قطرکها در داخل محفظه افزایش می یابد و در نتیجه زمان استقرار قطرکها در فضای داخل محفظه کاهش می یابد. پس می توان گفت که با افزایش غلظت یونها در داخل محفظه تا یک مقدار بهینه، مدت زمان پاک شدن ابر نیز کاهش می یابد. اما با توجه به اینکه فضای داخل محفظه محدود است، میزان رطوبت و بخار آبراشباع در بالای محفظه نیز محدود است، لذا افزایش غلظت یونها که منجر به افزایش میزان هسته سازی قطرکهای مایع در بخار آبراشباع می شود، باعث می شود رقابت برای جذب رطوبت و رشد میعانی، میان تعداد بیشتری از قطرکها رخ دهد و قطرکها شانس کمتری برای رشد بیشتر داشته باشند. به این ترتیب قطرکهای ریزتری تشکیل خواهند شد که دیرتر ریزش خواهند کرد. در حقیقت پس از تشکیل ابر، نسبت اشباع کاهش می یابد و قطرکهایی که به اندازه بحرانی نرسیده و رشد نکرده اند، در فضای محفظه باقی می ماند و ایجاد غبار می کنند (راجرز و یو، ۱۹۹۸). به همین علت مشاهده شد که با افزایش زمان برقراری میدان الکتریکی تا ۱۲۰ ثانیه و به دنبال آن افزایش غلظت یونها، مدت زمان پاک شدن ابر که در آزمایشهای قبلی روند کاهشی داشت، دوباره افزایش پیدا کرد. بدین معنی که با افزایش بیش از حد

جدول ۱. میانگین غلظت، زمان پاک شدن ابر و عدد بارش برای ۵ آزمایش ذکر شده.

شماره آزمایش	C (A. U.)	t (s)	ln t	K = C / ln t
۱ (بدون حضور یون)	۰/۰۴	۷۰	۴/۲۴۸	۰/۰۰۹۴
۲ (۳۰ ثانیه)	۰/۰۵	۱۰۰	۴/۶۰۵	۰/۰۱۰۹
۳ (۶۰ ثانیه)	۰/۰۸	۹۰	۴/۵۰۰	۰/۰۱۷۸
۴ (۹۰ ثانیه)	۰/۱۱	۸۰	۴/۳۸۲	۰/۰۲۵۱
۵ (۱۲۰ ثانیه)	۰/۱۲	۱۲۰	۴/۹۴۲	۰/۰۲۴۲



شکل ۷. نمودار میانگین عدد بارش ابر نسبت به شماره آزمایش (افزایش غلظت یونی).

فرایندهای برخورد و هم‌آمیزی هم دیرتر اتفاق می‌افتد و میزان بارش نسبت به زمانی که غلظت یون‌ها در محفظه در حالت بهینه وجود داشت کاهش می‌یابد.

بنابراین حالت بهینه برای باروری ابر در یک غلظت بهینه از یون‌ها ایجاد می‌شود. در نتیجه برای ایجاد ابر گرم مناسب برای بارش باید به‌طور مناسبی غلظت یون‌ها را کنترل کرد و برای رسیدن به حالت بهینه برای باروری ابر و بارش مطلوب باید در فرایند یونیده کردن هوا، بسته به شرایط محیط، مدت‌زمان بهینه را برای این منظور به‌دست آورد.

#### تشکر و قدردانی

این پژوهش در آزمایشگاه فیزیک ابر موسسه ژئوفیزیک صورت گرفته است و به‌خاطر کمک‌هزینه اختصاص یافته از سوی شورای پژوهشی دانشگاه تهران، از آن تشکر و قدردانی می‌شود.

بنابر این برای رسیدن به حالت بهینه برای بارش، نیاز به صرف انرژی کمتری نسبت به حالت بیشینه تولید یون است.

#### ۴ نتیجه‌گیری

با مقایسه نتایج آزمایش‌ها در تشکیل ابر گرم بدون حضور یون و با حضور آن، ثابت شد که یون‌ها تأثیر چشمگیری در تشکیل ابر گرم در شرایط آزمایشگاه داشتند. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که غلظت ابر تشکیل شده با غلظت یون‌های موجود در محفظه آزمایش متناسب است؛ به‌طوری‌که با افزایش غلظت یون‌ها در محفظه، غلظت ابر افزایش می‌یابد. ولی با افزایش بیش از حد غلظت یون‌ها، رقابت یون‌ها برای جذب رطوبت باعث تولید قطره‌های کوچک‌تری می‌شود و باروری ابر کاهش می‌یابد. یعنی در مدت‌زمان بیشتری محفظه ابر پاک می‌شود. زیرا سرعت سقوط قطره‌ها کمتر می‌شود و در نتیجه

- Condensation of a supersaturated vapor IX. Nucleation on ions, *J. of Chemical Physics.*, **101**, 2309-2318.
- Kulmala, M., Pirjola, L. and Makela, J. M., 2000, Stable sulphate clusters as a source of new atmospheric particles, *Nature*, **404**, 66-69.
- Kulmala, M., Vehkama ki, H., Peta ja, T., Dal Maso, M., Lauri, A., Kerminen, V. M., Birmili, W. and McMurry, P. H., 2004, Formation and growth rates of ultrafine atmospheric particles: a review of observations, *J. Aerosol. Sci.*, **35**, 143-176.
- Lee, S. H., Reeves, J. M., Wilson, J. C., Hunton, D. E., Viggiano, A. A., Miller, T. M., Ballenthin, J. O. and Lait, L. R., 2003, Particle formation by ion nucleation in the upper troposphere and lower stratosphere, *Science*, **301**, 1886-1889.
- Raes, F., Janssens, A. and van Dingenen, R., 1986, The role of ion-induced aerosol formation in the lower atmosphere, *J. Aerosol Sci.*, **17**, 466-470.
- Rogers, R. R., Yau, M. k., 1998, A short course in cloud physics, Third Edition, Butterworth-Heinemann, Oxford; New York, USA.
- Seinfeld, J. H., Pandis, S. N., 2006, Atmospheric chemistry and physics, John Wiley & Sons, INC., Hoboken, New Jersey, USA, 526-530.
- Svensmark, H., Pedersen, J. O. P., Marsh, N. D., Enghoff, M. B. and Uggerhøj, U. I., 2007, Experimental evidence for the role of ions in particle nucleation under atmospheric conditions, *Proc. R. Soc.*, **463**, 385-396.
- Turco, R. P., Zhao, J. X. and Yu, F., 1998, A new source of tropospheric aerosols: ion-ion Recombination, *Geophys. Res. Lett.*, **25**, 635-638.
- Wallace, J. M., and Hobbs, P. V., 2006, Atmospheric science an introductory survey, Second edition, Elsevier Academic Press., Amsterdam; Boston, USA, 209-263.
- مراجع  
صادقی حسینی، س. ع. و اרכیان، ف.، ۱۳۸۰، بررسی آزمایشگاهی بارورسازی ابرهای گرم، م. فیزیک زمین و فضا، ۲۲(۲)، ۱۵-۲۳.
- Arnold, F., 1980, Multi-ion complexes in the stratosphere-implications for trace gases and aerosol, *Nature*, **284**, 610-611.
- Berndt, T., Boge, O., Stratmann, F., Heintzenberg, J. and Kulmala, M., 2005, Rapid formation of sulfuric acid particles at near-atmospheric conditions, *Science*, **307**, 698-700.
- Birmili, W., Berresheim, H., Plass-Du"lmer, C., Elste, T., Gilge, S., Wiedensohler, A. and Uhrner, U., 2003, The Hohenpeissenberg aerosol formation experiment (HAFEX): a long-term study including size-resolved aerosol, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, OH, and monoterpenes measurements, *Atmos. Chem. Phys.*, **3**, 361-376.
- Clarke, A. D. , Davis, D., Kapustin, V. N., Eisele, F., Chen, G., Paluch, I., Lenschow, Bandy, D., Thornton, A. R., D., Moore, K., Mauldin, L., Tanner, D., Litchy, M., Carroll, M. A., Collins, J. and Albercook, G., 1998, Particle nucleation in the tropical boundary layer and its coupling to marine sulfur sources, *Science*, **282**, 89-92.
- Harrison, C., Carslaw, K. S., 2003, Ion-aerosol-cloud processes in the lower atmosphere, *Rev. of Geophys.*, **41**, 1012-1038.
- Hoppel, W. A., Frick, G. M., Fitzgerald, J. and Larson, R. E., 1994, Marine boundary-layer measurements of new particle formation and the effects nonprecipitating clouds have on aerosol size distribution, *J. Geophys. Res.*, **99**, 443-459.
- Katz, J. L., Fisk, J. A. and Chacrov, V. M., 1994,