

## بررسی تجربی تأثیر ذرات آب‌دوست بر تعدیل مه

امیر باقری مصلح‌آبادی<sup>۱</sup>، عباسعلی علی‌اکبری بیدختی<sup>۲\*</sup>، مریم قرایلو<sup>۳</sup> و رضا خلیفه<sup>۴</sup>

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه فیزیک فضا، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۲. استاد، گروه فیزیک فضا، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۳. استادیار، گروه فیزیک فضا، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۴. دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده ریاضی، آمار و علوم کامپیوتر، دانشگاه تهران، تهران، ایران

(دریافت: ۹۷/۵/۲۷، پذیرش نهایی: ۹۷/۱۰/۱۱)

### چکیده

تشکیل مه باعث کم شدن دید افقی می‌شود و دید افقی پایین می‌تواند باعث بروز مشکلاتی عمدتاً در فرودگاه‌ها و جاده‌ها شود. از این‌رو با تشکیل مه مصنوعی در آزمایشگاه، تأثیر برخی هواویزها بر روی مه بررسی می‌شود. ذرات آب‌دوست می‌توانند به‌عنوان هسته‌های میعان با افزایش شعاع مؤثر و کاهش غلظت قطرک‌ها، در تعدیل مه مؤثر باشند. در این مطالعه، آزمایش‌ها بر روی سدیم هیدروکسید، اوره و نمک انجام شده است که با هواویزهای زمینه مقایسه شده‌اند. ابتدا عمق نوری مه محاسبه و سپس توزیع اندازه قطرک‌های مه تخمین زده می‌شود. همچنین دیگر پارامترها مانند غلظت قطرک‌های مه، محتوای آب مایع و زمان ماندگاری مه، مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. نتایج حاکی از آن است که ذرات آب‌دوست به‌عنوان هسته‌های میعان، نقش به‌سزایی را در تعدیل مه ایفا می‌کنند. به‌طوری‌که در حضور این ذرات، غلظت قطرک‌های مه در مقایسه با هواویزهای زمینه کاهش یافته است و مه رقیق‌تر شده است. در حضور ذرات سدیم هیدروکسید غلظت کل قطرک‌ها کاهش زیادی داشته است و مدت‌زمان ماندگاری مه به ۳۱ ثانیه رسیده است که نشان می‌دهد این ترکیب برای تعدیل مه عملکرد بهتری داشته است. همچنین هنگامی که ذرات سدیم هیدروکسید درون محفظه وجود داشتند، به‌طور مشاهداتی قطرک‌های بسیار کوچکی که در انتهای فرآیند سه آزمایش دیگر بر روی پرتوی لیزر نوسان می‌کردند، برای این ذرات وجود نداشتند.

واژه‌های کلیدی: ذرات آب‌دوست، بررسی تجربی، قطرک‌ها، تعدیل مه.

### ۱. مقدمه

مقاومت ۲۸۰، ۲۷۷ و ۲۷۴ کلوین نیز انجام شد که بر اساس آن تغییرات دمایی تأثیر چندانی بر روی این پارامترها ندارد. تنها با کاهش دما، منحنی توزیع اندازه قطرک‌ها کمی به سمت شعاع‌های بزرگ‌تر میل کرده است و به‌دنبال آن، شعاع مؤثر افزایش یافته است. همچنین اندکی تغییرات در دیگر پارامترها نیز ایجاد شده است. نحوه تشکیل ابر گرم در دمای آزمایشگاه در یک محفظه شیشه‌ای و بارورسازی آن توسط ذرات مختلف مانند هواویزهای موجود در آزمایشگاه، نمک و دود حاصل از اشتعال کبریت بر روی مدت‌زمان پاک شدن ابر مورد بررسی قرار گرفت. زمان پاک شدن ابر تشکیل شده به‌وسیله هسته‌های درشت و نم‌گیر نمک، کمتر از زمان مربوط به هواویزهای نسبتاً ریز محیط آزمایشگاه و ذرات دود است (صادقی حسینی و ارکیان، ۱۳۸۰). نخستین بار

بهبود دید افقی در مه، همواره یکی از چالش‌های بزرگ، در زمینه تعدیل آب و هوا بوده است. در این تحقیق نقش برخی از ذرات آب‌دوست، به‌عنوان هسته‌های میعان با استفاده از روشی که وجیک و همکاران (۲۰۱۴) ارائه کردند به‌صورت تک‌مدی بررسی می‌شود. آنها از این روش به‌طور مثال برای ذرات دود و خاک رس استفاده کردند که یافته‌های آنها نشان می‌داد که ذرات دود به‌عنوان هسته‌های میعان، غلظت قطرک‌های مه (ابر گرم) را به مقدار زیادی بالا می‌برد و همچنین میزان محتوای آب مایع (LWC) را نیز به میزان چشم‌گیری افزایش می‌دهد. اما در حضور ذرات خاک رس غلظت قطرک‌ها و LWC در مقایسه با هواویزهای زمینه کاهش داشته است و شعاع مؤثر قطرک‌ها به بیشترین میزان خود یعنی ۸/۰۸ میکرومتر می‌رسد. آزمایش‌های آنها برای دماهای

گولتپ و میلبرنت (۲۰۰۷)، خیلی نزدیک به نتایج گولتپ و همکاران (۲۰۰۶) بود. این پارامترها برای مه دریایی نیز به دست آمده است که نتایج تفاوت‌های زیادی را نشان می‌دهد (گولتپ و همکاران، ۲۰۰۹). در برخی مطالعات طرح پارامترسازی شده گولتپ و همکاران (۲۰۰۶) با طرح کنکل (۱۹۸۴) که فقط بر مبنای LWC است، مقایسه شده است که نتایج بهتر بودن طرح گولتپ و همکاران (۲۰۰۶) را تأیید می‌کند (ژانگ و همکاران، ۲۰۱۴). ترکیب تصاویر ماهواره‌ای با مدل‌های نظری، امکان مطالعه بر روی مه را در مناطق وسیع‌تری فراهم می‌کند (سرامک و بندیکس، ۲۰۱۱). یون‌های اسیدی بر روی تشکیل قطره‌ها اثرگذار هستند. در آزمایش‌های انجام شده از غلظت‌های مختلف اسید سولفوریک برای به دست آوردن طول عمر ابرهای گرم استفاده شده است. با افزایش غلظت اسید سولفوریک محلول در آب، طول عمر ابر کاهش یافته است. همچنین کوتاه‌ترین طول عمر ابر مربوط به غلظت  $1039/98$  ppm بوده است (مرادی و همکاران، ۲۰۱۴). شوشتری و همکاران (۱۳۹۲) تأثیر یون‌ها را بر تشکیل ابر گرم بررسی کردند. برای تشکیل یون‌ها از دو الکتروود که به ولتاژ بالا متصل هستند، استفاده شده است. یافته‌های آنها به‌طور کیفی نشان می‌داد با افزایش زمان یونیزاسیون، غلظت ابر تشکیل شده بیشتر می‌شود اما افزایش بیش از اندازه غلظت یون‌ها به سبب اثر فراباروری، نقشی کاهنده در باروری ابرهای گرم دارد. نقش مواد سطح فعال بر روی کدورت و زمان ماندگاری ابر برای دو ماده اسید استتاریک و استالدهید نیز به‌صورت آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار گرفته است. آزمایش‌ها برای پنج غلظت ppm (۲/۵، ۵، ۷/۵، ۱۰، ۱۲/۵) انجام شده است که طبق آن به‌طور کیفی با افزایش غلظت مواد سطح فعال، میزان کدورت در تمام غلظت‌ها نسبت به حالت پایه بیشتر است و تا غلظت خاصی روند افزایشی دارد. مدت‌زمان ماندگاری ابر برای اسید استتاریک در تمامی غلظت‌ها نسبت به حالت پایه کمتر است و برای استالدهید در غلظت‌های

هوتن و ردفورد (۱۹۳۸) از ذرات آب‌دوست برای پراکندگی قطرک‌های مه استفاده کردند. همچنین مطالعات مربوط به پراکندگی مه از طریق هسته‌های میعان گولپیکر آب‌دوست توسط جیوستو همکاران (۱۹۶۸) انجام شد. نتایج حاکی از آن بود که استفاده از مقادیر و اندازه کنترل شده ذرات نمک می‌تواند دید افقی را به‌طور قابل توجهی افزایش دهد. همچنین مدل‌های عددی نیز این موضوع را تأیید می‌کردند (سیلورمن و کنکل، ۱۹۷۰). هواویزهای نمک دریا می‌تواند باعث افزایش بارش همرفتی شود (هوان و همکاران، ۲۰۱۸). آزمایش‌ها برای غلظت‌های متفاوت ذرات دوده نیز انجام شده است که نتایج نشان می‌دهد با افزایش غلظت ذرات دوده، شعاع مؤثر قطرک‌ها کاهش می‌یابد که این بدین معنی است که رقابت برای جذب بخار آب بیشتر شده و قطرک‌های کوچک‌تری تشکیل شده‌اند. (باقری و همکاران، ۱۳۹۷). تلاش‌های زیادی برای مطالعه اندازه قطرک‌های ابر از دیدگاه اندازه صورت گرفته است (الکساندروف و همکاران، ۲۰۱۲؛ رامیرز-بلتران و همکاران، ۲۰۰۹). همچنین مطالعاتی در مورد غلظت قطرک‌های ابر انجام شده است (فونتوکیس و همکاران، ۲۰۰۷، پینسکی و همکاران، ۲۰۱۲). مشاهدات ابر استراتوس پایین در (Radiation and Aerosol Cloud, RACE Experiment) نشان می‌دهد غلظت کل قطرک‌ها ( $N_d$ ) و LWC تأثیر مهمی بر دید افقی در این‌گونه ابرها دارند (گولتپ و همکاران، ۲۰۰۱). همین‌طور در این راستا مشاهداتی در شرق کانادا در ماه‌های آگوست و اکتبر بر مبنای داده‌های دید افقی، طیف قطرک‌ها و LWC انجام شده و معادله‌ای بر مبنای هر دو پارامتر  $N_d$  و LWC برای دید افقی پیشنهاد شده است (گولتپ و همکاران، ۲۰۰۶). معادله دید افقی که تنها بر مبنای LWC به دست آمده است، می‌تواند باعث فروتخمین یا فراتخمین در حدود ۵۰ درصد شود که با در نظر گرفتن هر دو پارامتر  $N_d$  و LWC خطای نسبی تا ۳۰ درصد کاهش می‌یابد. مقادیر پارامترهای به دست آمده برای مه قاره‌ای گرم در مطالعات

با تغییرات دما متناسب است و با افزایش فشار، دمای درون محفظه نیز افزایش پیدا می کند:

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

بر اساس این رابطه، مقدار ثابتی دارد و برابر  $0/185$  است. همه آزمایش ها در دمای  $294$  کلوین انجام شده است. فشار درون محفظه سریعاً و به صورت شبه بی دررو کاهش می یابد. در نتیجه دما افت پیدا می کند و قطرک ها بر روی هواویزهای درون محفظه تشکیل می شوند و با عبور پرتوی لیزر، شدت سیگنال ثبت شده کاهش پیدا می کند. بعد از مدتی هنگامی که همه قطرک ها سقوط کردند، شدت سیگنال به مقدار اولیه خود باز می گردد. این فاصله زمانی به عنوان زمان ماندگاری مه در نظر گرفته می شود. خاموشی پرتوی لیزر از طریق رابطه زیر محاسبه می شود (لیو، ۲۰۰۲):

$$I(\lambda) = I_0(\lambda)e^{-\tau(\lambda)} \quad (2)$$

$I_0$  و  $I$  به ترتیب مقادیر شدت پرتوی لیزر اندازه گیری شده و منتشر شده است.  $(\lambda\tau)$  عمق نوری میانگین است که به طول موج بستگی دارد. با انتگرال گیری از سطح مقطع خاموشی همه ذرات مجزا، عمق نوری به دست می آید:

$$\tau(\lambda) = \int_0^m \pi r^2 Q_{ext} \left( \frac{2\pi r}{\lambda}, m \right) N(r) dr \quad (3)$$

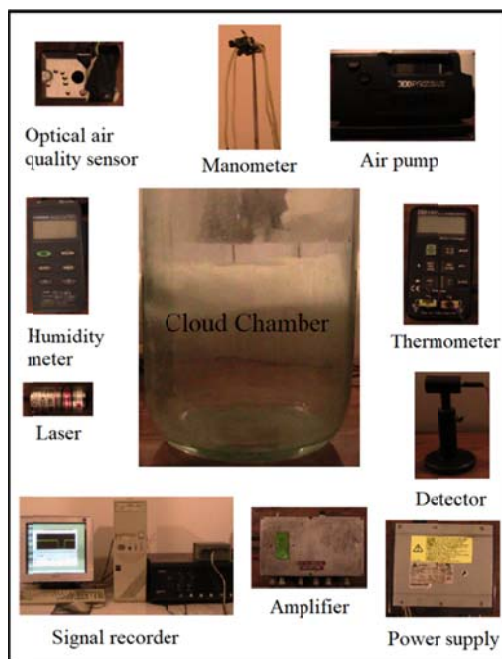
$Q_{ext}$  ضریب کارایی خاموشی است که به شعاع  $r$  طول موج  $\lambda$  و ضریب شکست  $m$  بستگی دارد.  $N(r)dr$  تعداد ذرات بین  $r$  و  $r+dr$  است که در مساحت سطح مقطع پرتوی لیزر، در طول پرتوی لیزر ( $L$ ) که مسیر هندسی پرتوی لیزر درون محفظه است، یافت می شود. شکل ۲ طرحی نمایشی از محفظه ابر را نشان می دهد.

ppm (۷/۵، ۱۰ و ۱۲/۵) نسبت به حالت پایه افزایش پیدا می کند (فهندز سعدی و همکاران، ۱۳۹۴).

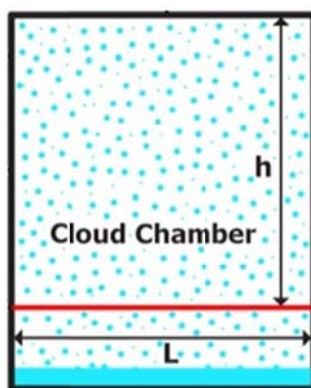
## ۲. روش تحقیق

برای انجام آزمایش ها از یک محفظه ابر شیشه ای به ارتفاع  $41\text{cm}$  و قطر  $28\text{cm}$  استفاده شده است. لیزر و آشکارساز در اطراف محفظه به نحوی قرار داده شده اند که لیزر از میان محفظه عبور کرده و به آشکارساز می رسد. آشکارساز به یک تقویت کننده متصل است و از طریق برد مبدل آنالوگ به دیجیتال، سیگنال توسط یک رایانه ثبت می شود. همچنین فاصله بین لیزر تا بالای محفظه  $28$  سانتی متر است. حسگرهای اندازه گیری دما، رطوبت و غلظت ذرات درون محفظه قرار داده شده اند و این کمیت ها را کنترل می کنند. طرح کلی از محفظه ابر به همراه چیدمان آزمایش در شکل ۱ آمده است.

به منظور فراهم کردن رطوبت لازم برای تشکیل قطرک ها یک لیتر آب درون محفظه وجود دارد. نمک، اوره و سدیم هیدروکسید هر کدام به صورت مجزاً به میزان  $10$  گرم درون آب حل می شوند و سپس با استفاده از روش تشکیل حباب، به مدت  $60$  ثانیه با استفاده از پمپ کردن هوا درون محلول به دست آمده، ذرات درون محفظه پخش می شوند. حسگر اندازه گیری غلظت ذرات که به میکروکنترلر آردوینو متصل است، غلظت جرمی ذرات را مشخص می کند. غلظت برای همه آزمایش ها به طور میانگین برابر  $160 \frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3}$  در نظر گرفته شده است. به وسیله پمپ هوا فشار درون محفظه تا  $120$  میلی بار افزایش می یابد، و میزان این اختلاف فشار با استفاده از یک مانومتر اندازه گیری می شود. طبق رابطه زیر، تغییرات فشار



شکل ۱. طرح کلی از محفظه ابر به همراه چیدمان آزمایش.



شکل ۲. طرح نمایشی از محفظه ابر.

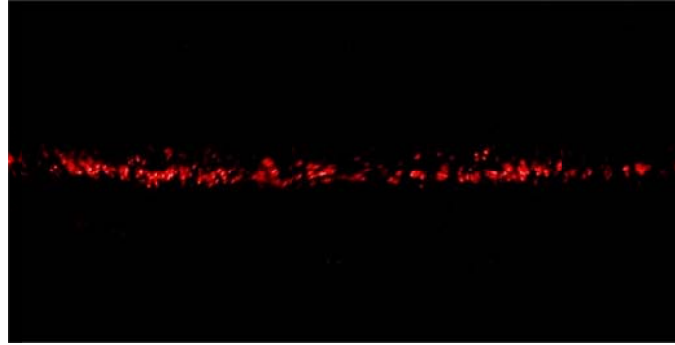
برای محدوده متوسط شعاع قطرک‌های ابر و طول موج پرتوی نوری که در طیف نور قرمز قرار دارد، ضریب کارایی خاموشی خیلی به حد ۲ نزدیک می‌شود:

$$\tau = 2\pi L \int_0^{r_m} r^2 n(r) dr \quad (5)$$

قطرک‌ها با اندازه‌های مختلف از درون پرتوی لیزر عبور می‌کنند و باعث کاهش سیگنال دریافتی می‌شوند. در شکل ۳ عبور قطرک‌ها از درون پرتوی لیزر را می‌توان مشاهده کرد.

حد بالای شعاع ذرات است و ضریب کارایی خاموشی از طریق پراکندگی مای توصیف می‌شود. در آزمایش‌های محفظه ابر، یکی از پارامترهای اصلی، توزیع اندازه حجمی قطرک‌ها است، که با  $n(r)$  نشان داده می‌شود. این کمیت از طریق شعاع تعداد ذرات بین  $r$  و  $r+dr$  تعریف می‌شود که در واحد حجم،  $n(r)dr$  می‌شود. از طرفی  $N(r)=L \times n(r)$  است. بنابراین عمق نوری از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\tau(\lambda) = L \int_0^{r_m} \pi r^2 Q_{ext}\left(\frac{2\pi r}{\lambda}, m\right) n(r) dr \quad (4)$$



شکل ۳. عبور قطرک‌ها از درون پرتوی لیزر.

کاهش تدریجی حد بالای شعاع قطرک‌هایی است که در این حجم حضور دارند (سرعت سقوط ذرات با شعاع کوچک‌تر در مقایسه با ذرات بزرگ‌تر، خیلی کمتر است). در نتیجه حد بالای انتگرال معادله (۵) به زمان وابسته می‌شود،  $r_m(t)$  و  $\tau$  به‌طور یکنواخت، با زمان کاهش می‌یابند.  $I$  و  $\tau$  در معادله (۵) کمیت‌های وابسته به زمان هستند. بنابراین با اندازه‌گیری تغییرات زمانی سیگنال آشکارساز  $I(t)$  و ترکیب معادله‌های (۲) و (۵) معادله‌ای برای توزیع اندازه حجمی یا  $n(r)$  به دست می‌آید:

$$2\pi L \int_0^{r_m} r^2 n(r) dr = -\ln \frac{I(t)}{I_0} \quad (8)$$

برای محاسبه وابستگی زمان سمت راست معادله، حد بالای انتگرال به میان می‌آید. با تفکیک کردن هر دو طرف معادله، مشتق‌گیری از دو طرف رابطه و همچنین لحاظ کردن وابستگی زمانی می‌توان آسان‌تر به توزیع اندازه قطرک‌ها رسید:

$$2\pi L r_m'(t) r_m^2 n(r_m) = -\frac{I'(t)}{I(t)} \quad (9)$$

با در نظر گرفتن  $r \equiv r_m(t)$  می‌توان زمان را از معادله حذف کرد:

$$2\pi L r^2 n(r) = -\frac{1}{I(r)} \frac{dI_r}{dr} \quad (10)$$

با کمی جابه‌جایی به معادله زیر می‌رسیم:

$$n(r) = -\frac{1}{2\pi L r^2} \left[ \frac{1}{I(r)} \frac{dI(r)}{dr} \right] \quad (11)$$

که بیانگر توزیع حجمی قطرک‌ها است. با استفاده از این معادله دیگر پارامترهای حائز اهمیت که در توصیف

در معادله (۵) عمق نوری مستقل از طول موج است. زمانی که قطرک‌های مه در محفظه ابر تشکیل می‌شوند، آنها بر اثر گرانش شروع به سقوط کردن می‌کنند. سقوط قطرک‌ها همیشه از طریق جریان‌های همرفتی تحت تأثیر قرار می‌گیرد. این حرکت‌ها ممکن است خیلی اوضاع را پیچیده‌تر کند. بنابراین فرض می‌شود که محیط مه کاملاً ساکن است. در یک همرفت آزاد جو سقوط یک قطرک ممکن است از طریق برخورد با ذرات زیرین آشفته شوند (اثرات فرونشینی). البته در هنگام سقوط همه قطرک‌ها با قطرک مجاورشان برهم‌کنش نمی‌کنند. این فرض فقط برای مه‌های با چگالی پایین‌تر صادق است.

قطرک‌ها با شعاع  $r$ ، با سرعت حدی ثابت سقوط می‌کنند:

$$v(r) = \frac{2g}{9\eta} (\rho - \rho_a) r^2 \quad (6)$$

$\rho$  و  $\rho_a$  به ترتیب چگالی قطرک‌ها و چگالی هوای اطراف،  $g$  شتاب سقوط آزاد و  $\eta$  و شکسانی هوا در دمای مربوطه است. زمانی که برای یک قطرک با شعاع  $r$  نیاز است، تا در ارتفاع  $h$  سقوط کند از طریق رابطه زیر بیان می‌شود:

$$t(r) = \frac{9\eta}{2g} \frac{h}{\rho - \rho_a} r^{-2} \quad (7)$$

با این فرض هیچ قطرکی فرآیند هم‌آمیزی و دلمه‌شدگی را تجربه نمی‌کند. بنابراین قطرک‌ها به‌صورت مستمر و مستقل سقوط می‌کنند. بعد از این حالت، توزیع اندازه در حجم نور به‌طور مستمر تغییر خواهد کرد که علتش

ویژگی‌های مه به کار می‌روند، مانند شعاع مؤثر، غلظت کل قطرک‌ها و LWC قابل محاسبه خواهند بود. با استفاده از معادله (۷) حد بالای انتگرال یا شعاع قطرک‌ها از طریق رابطه زیر به دست می‌آید:

$$r_m(t) = \sqrt{\frac{9\eta h}{2g(\rho - \rho_a)}} t^{-1} \quad (12)$$

در نتیجه شعاع مؤثر قطرک‌ها که در واقع میانگین وزنی توزیع حجمی قطرک‌هاست، می‌تواند به آسانی از طریق معادله زیر محاسبه شود:

$$r_{eff}(t) = \frac{\int_0^{r_m} r^3 n(r) dr}{\int_0^{r_m} r^2 n(r) dr} \quad (13)$$

علت روند کاهشی شعاع مؤثر قطرک‌ها این است که با گذشت زمان، قطرک‌های بزرگ‌تر خودشان را به زیر پرتوی لیزر یا خط  $L$  می‌رسانند، پس شعاع مؤثر رفته رفته کاهش پیدا می‌کند. برای یافتن شعاع مؤثر آغازین مه باید  $r_{eff}(t=0)$  محاسبه شود.

غلظت کل قطرک‌ها که همان مساحت زیر نمودار توزیع اندازه قطرک‌هاست با رابطه زیر بیان می‌شود:

$$N_{total} = \int n(r) dr \quad (14)$$

LWC بیانگر توزیع جرم حجمی قطرک‌هاست که از طریق رابطه زیر قابل محاسبه است:

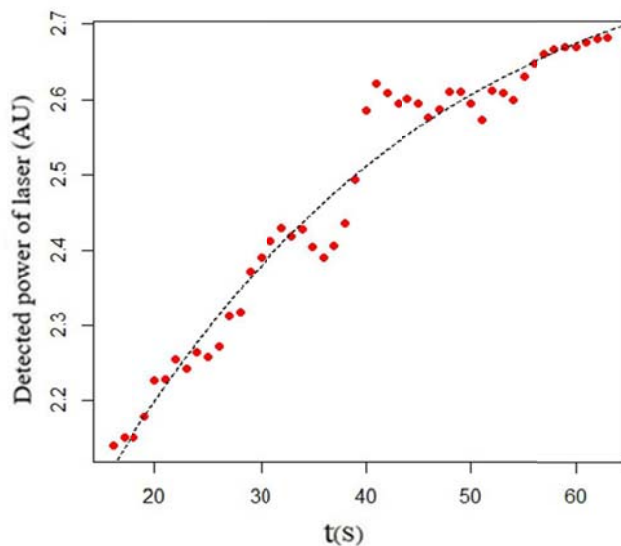
$$LWC = \int \frac{4}{3} \pi r^3 \rho n(r) dr \quad (15)$$

با محاسبه این پارامترها می‌توان ساختار مه را دقیق‌تر مورد ارزیابی قرار داد که این می‌تواند به مطالعاتی که در راستای تعدیل مه، از طریق هسته‌های میعان انجام می‌شود، کمک شایانی کند.

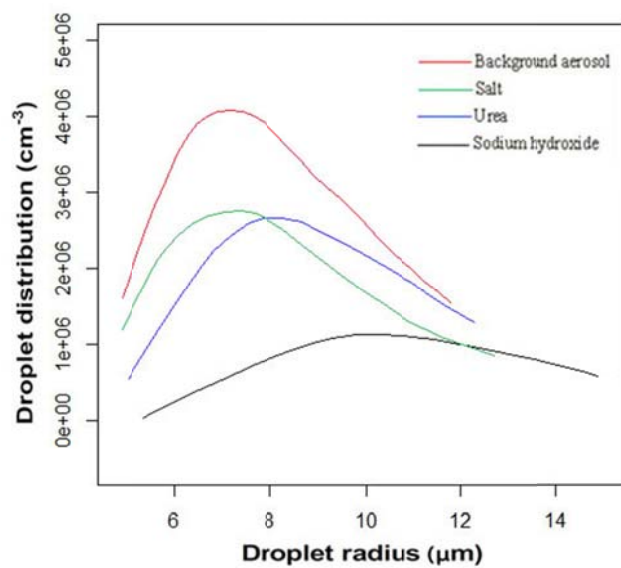
### ۳. نتایج و بحث

در آزمایش‌هایی که صورت گرفت، داده‌ها به ازای هر ۰/۲۵ ثانیه ثبت می‌شدند. پس از آن میانگین‌گیری انجام

داده شده و از بیشترین تا کمترین میزان عمق نوری، یک مدل غیرخطی با نرم‌افزار R بر روی داده‌ها برازش داده شده است. شکل ۴ نشان دهنده منحنی برازش داده شده به ازای حضور هواویزهای زمینه درون محفظه است. نوساناتی که در شکل ۴ مشاهده می‌شود ناشی است از نوفه‌هایی که در دریافت سیگنال وجود داشته است. شیب‌های منفی کوچکی که به صورت محلی در ساختار سیگنال دریافتی وجود دارد، می‌تواند در محاسبات تأثیرگذار باشد. با برازش دادن مدل غیرخطی و به دست آوردن معادله مربوط به منحنی همواره صعودی و یکنوایی که وجود دارد، این مشکل برطرف می‌شود. شکل ۵ بیانگر منحنی‌های توزیع اندازه قطرک‌های مه است. این منحنی‌ها ممکن است، ساختارهای پارازیتی در آنها وجود داشته باشد که هموار شده‌اند. همان‌طور که در تصویر مشخص است بیشترین غلظت قطرک‌ها در حضور هواویزهای زمینه اتفاق افتاده که غلظت جرمی آن  $70 \mu g/m^3$  اندازه‌گیری شده است و مساحت زیر نمودار بزرگ‌تری دارد. طبق جدول ۱ این میزان به  $21/20 \text{ cm}^{-3}$  می‌رسد. کمترین مساحت زیر نمودار، مربوط به هنگامی است که ذرات سدیم هیدروکسید به هواویزهای زمینه‌ای که درون محفظه حضور دارند، اضافه شده‌اند و غلظت کل ذرات برابر با  $160 \mu g/m^3$  است. در این شرایط غلظت قطرک‌ها  $7/65 \text{ cm}^{-3}$  به دست آمده است. منحنی نمک و اوره تقریباً مساحت‌های یکسانی را در خود جای داده‌اند که غلظت‌های آنها به ترتیب برابر با  $14/40 \text{ cm}^{-3}$  و  $15/01 \text{ cm}^{-3}$  است. نکته دیگری که در شکل ۵ می‌توان به آن اشاره کرد این است که اوج منحنی مربوط به سدیم هیدروکسید به میزان قابل توجهی در مقایسه با سه منحنی دیگر، به سمت شعاع‌های بزرگ‌تر حرکت کرده است که می‌تواند تأییدکننده بزرگ بودن شعاع مؤثر قطرک‌ها، در حضور این ذرات باشد.



شکل ۴. نمودار شدت سیگنال دریافتی بر حسب زمان.



شکل ۵. نمودار توزیع اندازه قطره‌ها برای هواویزهای زمینه، نمک، اوره و سدیم هیدروکسید.

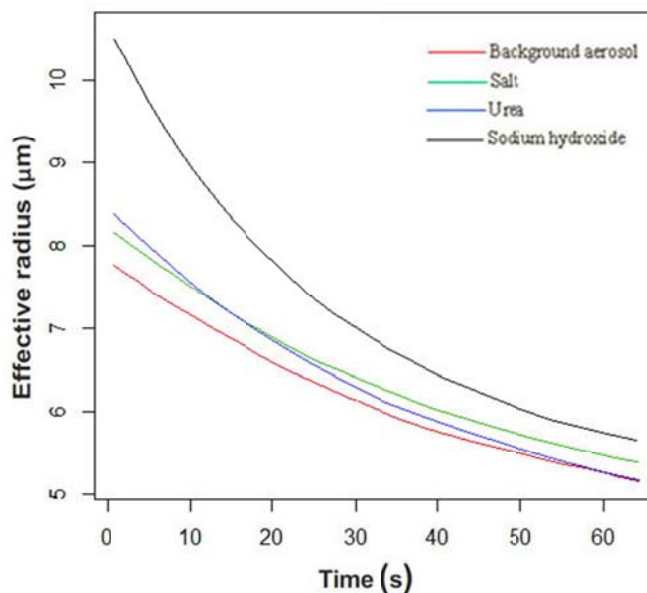
جدول ۱. مقادیر پارامترهای مختلف مه مصنوعی برای هواویزهای مختلف.

| ذرات درون محفظه | شعاع مؤثر ( $\mu\text{m}$ ) | محتوای آب مایع ( $\text{g}/\text{m}^3$ ) | غلظت کل قطره‌ها ( $\text{cm}^3$ ) | زمان ماندگاری مه (s) | عمق نوری ابر |
|-----------------|-----------------------------|--|-----------------------------------|----------------------|--------------|
| هواویزهای زمینه | ۷/۷۷                        | ۰/۰۱۰۸                                   | ۲۱/۲۰                             | ۶۳                   | ۰/۲۳۱        |
| نمک             | ۸/۱۵                        | ۰/۰۰۶۹                                   | ۱۴/۴۰                             | ۵۵                   | ۰/۱۸۲        |
| اوره            | ۸/۳۷                        | ۰/۰۱۰۳                                   | ۱۵/۰۱                             | ۵۸                   | ۰/۱۸۹        |
| سدیم هیدروکسید  | ۱۰/۴۸                       | ۰/۰۰۸۵                                   | ۷/۶۵                              | ۳۱                   | ۰/۱۳۷        |

هواویزهای زمینه شعاع مؤثر کوچکی دارند اما غلظت بالای قطرک‌های آن باعث شده است تا LWC مقدار زیادی را نشان دهد. درحالی‌که برای سدیم هیدروکسید، با وجود شعاع مؤثر بزرگ، غلظت کم قطرک‌ها باعث شده است LWC مقدار بزرگی نداشته باشد.

زمان ماندگاری مه و میزان عمق نوری برای هر ۴ حالت نیز در جدول ۱ آمده است. در مطالعات آزمایشگاهی خطاهایی نیز وجود دارد که اولین خطا نادیده گرفتن فرآیند هم‌آمیزی است که امکان دارد در سقوط قطرک‌ها رخ دهد. در نتیجه قطرک‌ها در عبور از پرتوی لیزر در اندازه بزرگ‌تری ظاهر می‌شوند، که این می‌تواند تخمین را به فراتخمین تبدیل کند. همچنین خطای مربوط به نوفه‌های دستگاه و مدلی که بر روی داده‌ها برازش داده می‌شود را می‌توان به‌عنوان دومین خطای آزمایش در نظر گرفت که با حضور قطرک‌های کوچک و تعداد بالای آنها، افزایش پیدا می‌کند. پخش غیریکنواخت هسته‌های میعان، درون محفظه را می‌توان سومین خطای آزمایش معرفی کرد.

در شکل ۶ منحنی‌های شعاع مؤثر بر حسب زمان رسم شده‌اند که هر ۴ نمودار با گذشت زمان روند کاهشی را نشان می‌دهند که طبیعتاً با گذشت زمان قطرک‌های بزرگ‌تر می‌توانند سریع‌تر خودشان را به زیر پرتوی لیزر برسانند و کاهش شعاع مؤثر را ناشی شوند که این می‌تواند توجه این روند کاهشی باشد. در لحظه اولی که مه مصنوعی تشکیل می‌شود کمترین شعاع مؤثر مربوط به زمانی است که تنها هواویزهای زمینه درون محفظه وجود دارند و میزان آن  $7/77 \mu\text{m}$  است. همچنین اوره در لحظه اول، شعاع مؤثر بیشتری را در مقایسه با نمک نشان می‌دهد که میزان آن به ترتیب برابر با  $8/37 \mu\text{m}$  و  $8/15 \mu\text{m}$  است. اما به دلیل کاهش سریع‌تر با گذشت زمان، شعاع مؤثر مقادیر کمتری را نشان می‌دهد. همان‌طور که شکل ۵ هم نشان می‌دهد، بیشترین شعاع مؤثر در لحظه اول، مربوط به سدیم هیدروکسید است که مقدار آن  $10/48 \mu\text{m}$  است. طبق جدول ۱ میزان LWC برای این ۴ ترکیب نیز می‌تواند جالب‌توجه باشد. به‌طوری‌که بیشترین مقدار با  $0/108 \text{g}/\text{m}^3$  مربوط به هواویزهای زمینه است. اگرچه



شکل ۶. نمودار شعاع مؤثر قطرک‌ها بر حسب زمان.



## ۴. نتیجه‌گیری

می‌توان در استحصال آب بهره برد. پیشنهاد می‌شود که در مطالعات بعدی که برای مه (ابره‌های گرم) صورت می‌گیرد با به‌دست آوردن غلظت عددی این گونه ذرات یک مقدار بهینه را به‌دست آورد و اثرات زیستی محیطی که این ترکیبات آب‌دوست ممکن است ایجاد کنند، بررسی شوند.

## مراجع

باقری مصلح‌آبادی، ا.، علی‌اکبری بیدختی، ع. ع.، قرایلو، م. و خلیفه، ر.، ۱۳۹۷، مطالعه آزمایشگاهی تخمین توزیع اندازه قطره‌های ابر در حضور هواویز دوده، هجدهمین کنفرانس ژئوفیزیک ایران.

شوشتری، م. ح.، ناجی، ف. و علی‌اکبری بیدختی، ع. ع.، ۱۳۹۲، بررسی آزمایشگاهی نقش یون‌ها در تشکیل ابر گرم، م. فیزیک زمین و فضا، ۳۹(۴)، ۱۲۳-۱۳۴.

صادقی حسینی، س. ع. و ارکیان، ف.، ۱۳۸۰، بررسی آزمایشگاهی بارورسازی ابرهای گرم، م. فیزیک زمین و فضا، ۲۷(۲)، ۱۵-۲۳.

فهندژ سعدی، ح.، علی‌اکبری بیدختی، ع. ع.، قرایلو، م. و شوشتری، م. ح.، ۱۳۹۴، مطالعه تجربی نقش مواد سطح فعال بر تشکیل ابر گرم در آزمایشگاه، ن. پژوهش‌های اقلیم‌شناسی، ۲۳(۶)، ۲۳ و ۲۴.

با استفاده از روشی که معرفی شد، می‌توان ساختار مه (ابره‌های گرم) را دقیق‌تر مورد تجزیه و تحلیل قرار داد. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دادند که ذرات آب‌دوست به‌عنوان هسته‌های میعان به منظور تعدیل مه، نقشی مهم را ایفا می‌کنند. به‌طوری‌که به ازای همه این ذرات، غلظت قطره‌های مه در مقایسه با هواویزهای زمینه کاهش چشم‌گیری را نشان دادند. بهترین عملکرد مربوط به سدیم هیدروکسید بود گرچه نمی‌توان از تأثیر ذرات نمک و اوره چشم‌پوشی کرد. هنگامی که ذرات سدیم هیدروکسید درون محفظه وجود داشتند، به‌طور مشاهداتی قطره‌های بسیار کوچکی که در انتهای فرآیند سه آزمایش دیگر بر روی پرتوی لیزر نوسان می‌کردند، برای این ذرات وجود نداشتند. بیشترین میزان این قطره‌های بسیار کوچک زمانی بود که تنها هواویزهای زمینه درون محفظه وجود داشتند. دیگر پارامترها نیز مؤید این موضوع بودند که این حضور این ذرات در مکان‌هایی که مستعد پدیده مه با غلظت بالا هستند، می‌تواند باعث بهبود دید افقی شود و از مشکلاتی که این پدیده ایجاد می‌کند به ویژه در مناطقی که اهمیت بیشتری دارند، تا حدی جلوگیری کند. همچنین از این ترکیبات می‌توان در بارورسازی ابرهای گرم نیز استفاده کرد و از این طریق

- Alexandrov, M. D., Cairns, B., Emde, C., Ackerman, A. S. and van Diedenhoven, B., 2012, Accuracy assessments of cloud droplet size retrievals from polarized reflectance measurements by the research scanning polarimeter. *Remote sensing of environment*, 125, 92-111.
- Cermak, J. and Bendix, J., 2011, Detecting ground fog from space—a microphysics-based approach. *International Journal of Remote Sensing*, 32(12), 3345-3371.
- Fountoukis, C., Nenes, A., Meskhidze, N., Bahreini, R., Conant, W. C., Jonsson, H. and Flagan, R. C., 2007, Aerosol-cloud drop concentration closure for clouds sampled during the International Consortium for Atmospheric Research on Transport and Transformation 2004 campaign. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 112(D10).
- Gultepe, I., Isaac, G. A. and Strawbridge, K. B., 2001, Variability of cloud microphysical and optical parameters obtained from aircraft and satellite remote sensing measurements during RACE. *International journal of climatology*, 21(4), 507-525.
- Gultepe, I., Müller, M. D. and Boybeyi, Z., 2006, A new visibility parameterization for warm-fog applications in numerical weather prediction models. *Journal of applied meteorology and climatology*, 45(11), 1469-1480.
- Gultepe, I. and Milbrandt, J. A., 2007, Microphysical observations and mesoscale model simulation of a warm fog case during FRAM project. *Fog and Boundary Layer Clouds: Fog Visibility and Forecasting*, 1161-1178.
- Gultepe, I., Hansen, B., Cober, S. G., Pearson, G., Milbrandt, J. A., Platnick, S. and Oakley, J. P.,

- 2009, The fog remote sensing and modeling field project. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 90(3), 341-359.
- Huan, L., Baolin, J., Fangzhou, L. and Wenshi., L., 2018, Simulation of the effects of sea-salt aerosols on the structure and precipitation of a developed tropical cyclone, *Journal of Atmospheric Research*, Accepted.
- Houghton, H. G. and Radford, W. H., 1938, On the local dissipation of natural fog. *Massachusetts Institute of Technology and Woods Hole Oceanographic Institution*.
- Justo, J. E., Pilie, R. J. and Kocmond, W. C., 1968, Fog modification with giant hygroscopic nuclei. *Journal of Applied Meteorology and applied meteorology*, 7(5), 860-869.
- Kunkel, B. A., 1984, Parameterization of droplet terminal velocity and extinction coefficient in fog models. *Journal of Climate and applied meteorology*, 23(1), 34-41.
- Liou, K. N., 2002, *An Introduction to Atmospheric Radiation*, Second Edition Academic Press, Amsterdam.
- Moradi, S., Bidokhti, A. A., Gharaylou, M., Jalaie, S. and Shoushtari, M. H., 2014, Study of the Effects of Acidic Ions on Cloud Droplet Formation Using Laboratory Experiments. *APCBEE procedia*, 10, 246-250.
- Pinsky, M., Khain, A., Mazin, I. and Korolev, A., 2012, Analytical estimation of droplet concentration at cloud base. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 117(D18).
- Ramirez-Beltran, N. D., Kuligowski, R. J., Cardona, M. J. and Cruz-Pol, S. 2009, Warm rainy clouds and droplet size distribution. *WSEAS Transaction on Systems*, 8(1), 75-85.
- Silverman, B. A. and Kunkel, B. A., 1970, A numerical model of warm fog dissipation by hygroscopic particle seeding. *Journal of Applied Meteorology*, 9(4), 627-633.
- Vâjâiac, S. N., Filip, V., Ștefan, S. and Boscornea, A., 2014, Assessing the size distribution of droplets in a cloud chamber from light extinction data during a transient regime. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 109, 29-36.
- Zhang, J., Xue, H., Deng, Z., Ma, N., Zhao, C. and Zhang, Q., 2014, A comparison of the parameterization schemes of fog visibility using the in-situ measurements in the North China Plain. *Atmospheric environment*, 92, 44-50.

## Experimental study of the effect of hydrophilic particles on fog modification

Bagheri Mosleh-Abadi, A.<sup>1</sup>, Aliakbari-Bidokhti, A. A.<sup>2\*</sup>, Gharaylou, M.<sup>3</sup> and Khalife, R.<sup>4</sup>

1. M.Sc. Student, Department of Space Physics, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran

2. Professor, Department of Space Physics, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran

3. Assistant Professor, Department of Space Physics, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran

4. M.Sc. Student, Department of Statistics, Faculty of mathematics, statistics & computer Science, University of Tehran, Tehran, Iran

(Received: 18 Aug 2018, Accepted: 1 Jan 2019)

### Summary

Fog formation reduces the visibility, and low visibility cause problems mainly in airports and roads. Fog modification or even clearance can reduce such problems. Here, in the laboratory the effects of some aerosols on the modification of artificial fog have been investigated. This research is carried out using the method used in the work of Vajaiac et al. (2014), for hydrophilic particles. These particles, as the fog modification factor, can be effective as condensation nuclei by increasing the effective radius of the droplets and reducing the concentrations of the fog droplets in the fog. We used a glass chamber with a height of 41cm and diameter of 28 cm in which a red laser and a detector were placed on both sides of the chamber. We dissolved water-soluble compounds in water and by pumping the air into water of the chamber, the bubbles are formed and their breaking led to formation of particles. Then the particles are dispersed inside the chamber, while the pressure inside the chamber was increased with an air pump, and so the temperature was rised. Then suddenly or quasi-adiabatically, the pressure is released and hence, the air temperature was dropped creating the fog (cloud). The cloud droplets are mainly formed on these particles. With the formation of droplets, the received laser signal was decreased and after falling all of droplets, the received laser signal reached its primary level. Hence, by measuring the level of drop in the signal and its duration some properties to the cloud structure can be found.

In this study, we used sodium hydroxide, urea, and salt particles that was compared with background aerosols affecting the cloud. First, the optical depth of fog was calculated and then size distribution of fog droplets was estimated. Also other parameters like the concentration of the fog droplets, liquid water content and fog lifetime were evaluated. The results show that hydrophilic particles as condensation nuclei played a significant role in fog modification. So, in the presence of these particles, the concentration of fog droplets in comparison with that of the background aerosols, was decreased and the fog was diluted significantly. The maximum of fog lifetime was observed in the presence of background aerosols as 63 s, also these particles have had the lowest effective radius of 7.77 $\mu$ m. In the presence of sodium hydroxide particles, the concentration of total droplets was decreased significantly. In addition, the maximum effective radius was 10.48  $\mu$ m for these particles. Also, fog lifetime was reduced to 31s which suggests that this component for fog modification has a better performance. The area under the curve's of the size distribution of droplets for salt and urea were nearly identical, that indicated the concentration of the droplets was close to each other. Parasitic structures might appear in curves of the size distribution of droplets that were smoothed. As the time passed all of the effective radius curves showed decreasing trends due to the fact that, the larger droplets can dropped out of the laser beam, so gradually the effective radius should be decreased. In comparison with other compounds, when sodium hydroxide particles were used in the cloud chamber, observationally small droplets that moved up an down in the laser beam weren't present, hence no oscillations were seen in the laser signal. Considering experimental errors, while neglecting the process of coalescence that might occur in the falling stage of the droplets, when the droplets were passing the laser beam, they appeared at larger sizes, which could lead to an overestimation. The signal noises and non-uniform distribution of condensation nuclei could also be considered as experimental errors.

**Keywords:** Hydrophilic particles, Experimental study, Droplets, Fog modification.

---

\*Corresponding author:

bidokhti@ut.ac.ir