

## برهم کنش هواویزهای ناشی از خودروها و ابرهای سرد در آزمایشگاه

امیر باقری مصلح آبادی<sup>۱</sup>، عباسعلی علی اکبری بیدختی<sup>۲\*</sup> و مریم قراییلو<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> کارشناس ارشد، گروه فیزیک فضا، موسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران

<sup>۲</sup> استاد، گروه فیزیک فضا، موسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران

<sup>۳</sup> استادیار، گروه فیزیک فضا، موسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۲/۲۰، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۵/۲۳)

### چکیده

ذرات آلاینده در هوای شهرها بر سلامت، محیط زیست، اقلیم و دیگر جنبه‌ها اثرگذار هستند. منابع متحرک علت اصلی انتشار هواویزهای اولیه در شهرهای بزرگ نظیر تهران هستند. هواویزهایی که خودروها (بنزینی و دیزلی) تولید می‌کنند، می‌توانند به‌عنوان هسته‌های میعان ابر و هسته‌های یخ بر بارش تأثیرگذار باشند. بارش می‌تواند علاوه بر تأمین منابع آبی به بهبود کیفیت هوای شهرها نیز کمک کند. در ایران اکثر ابرها از نوع ابرهای سرد هستند و مطالعه این ابرها اهمیت ویژه‌ای دارد. در این مقاله با استفاده از روش‌های آزمایشگاهی، نقش این‌گونه هواویزها در توزیع اندازه قطرک‌های آب‌سرد و بلورهای یخ و رشد گویچه‌های برف با به‌کارگیری سازوکار میله چرخان و گشتاور الکترواستاتیکی بلورها بررسی می‌شود. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهند هواویزهای ناشی از خودروها اغلب دوده و خاکستر هستند و با وجود این ذرات، قطر میانگین قطرک‌های آب‌سرد و بلورهای یخ کاهش می‌یابد. با کاهش قطر قطرک‌های آب‌سرد، رشد گویچه‌های برف نیز کاهش می‌یابد که می‌تواند بر برخی پدیده‌ها نظیر آذرخش اثرگذار باشد. براساس این نتایج، ذرات آلاینده تأثیر چندانی بر گشتاور الکترواستاتیکی بلورهای یخ ندارند. شکل بلورهای مشاهده شده در آزمایش‌ها شامل صفحه‌های شش‌ضلعی، ستاره‌ای، قطاعی، ستون‌های توپر و کلاهکی، منشورها، مثلثی شکل‌ها، سوزنک‌ها و دندریت شکل‌ها است. هنگامی که بلورهای یخ در معرض نور قرار می‌گیرند، به رنگ‌های متفاوتی دیده می‌شوند (همانند حباب صابون در معرض نور). با توجه به ضخامت قسمت‌های مختلف بلورهای یخ و طول موج‌های نور مرئی، رنگ‌های متفاوتی در میدان حرکت این بلورها ظاهر می‌شود.

**واژه‌های کلیدی:** بلورهای یخ، هواویزها، خودروها، ابر سرد، قطرک‌ها، گشتاور الکترواستاتیکی

## ۱ مقدمه

در کلان‌شهر تهران وسایل نقلیه موتوری بیشترین منبع آلاینده‌ها هستند و تخمین زده می‌شود تقریباً ۸۵٪ از کل آلودگی هوای تهران ناشی از انتشار ذرات از منابع متحرک باشد. نوع و مقدار آلاینده‌ها به‌طور مستقیم به نوع و کیفیت سوخت مورد استفاده در حمل‌ونقل و صنعت بستگی دارد و سطح فناوری به‌کارگرفته‌شده نیز در ایجاد آنها اهمیت زیادی دارد (هالک و همکاران، ۲۰۰۴ و اسماعیلی و همکاران، ۲۰۱۴). هواویزهای اولیه‌ای که از آگزوز خودروها خارج می‌شوند می‌توانند در فازهای گاز، مایع و جامد انتشار یابند. کربن جامد در طی احتراق تشکیل و پس از آن اکسید می‌شود درحالی‌که کسر کوچکی از سوخت و روغن روان‌کننده موتور به‌صورت ترکیبات آلی فرار (VOC) و ترکیبات آلی نیمه‌فرار (SVOC) از آگزوز در هوا منتشر می‌شود (عالم و همکاران، ۲۰۱۶). در شهرها به‌ویژه شهرهای بزرگ و پرجمعیت، آلودگی ناشی از خودروها سهم عمده‌ای در آلاینده‌های شهری دارد. انتشار هواویزهای اولیه وسایل نقلیه دیزلی معمولاً بیشتر از خودروهای بنزینی است. علاوه‌بر انتشار ذرات اولیه، آگزوز خودروها می‌توانند به‌طور درخور-توجهی در تشکیل آلاینده‌های گازی مانند VOC ها و NO<sub>x</sub> مؤثر باشند. این آلاینده‌های گازی می‌توانند هواویزهای آلی و غیرآلی ثانویه را با فرایند فوتو-اکسیداسیون تولید کنند (دنگ و همکاران ۲۰۱۶ و دنگ و همکاران، ۲۰۱۷). غلظت‌های عددی ذرات در مناطق مختلف مطالعه شده است. در محیط‌های خیلی پاک ممکن است غلظت ذرات تنها  $3 \times 10^3$  cm<sup>-3</sup> و در برخی از مناطق روستایی  $5000 \text{ cm}^{-3}$  باشد درحالی‌که در مناطق شهری و جاذبه‌ها، غلظت‌ها بیشتر در محدوده  $10^4 \text{ cm}^{-3} \times 2$  - و  $10^4 \text{ cm}^{-3} \times 5$  است. معمولاً اندازه ذرات در محدوده ۱۵ تا ۳۰ نانومتر است و به شرایط محیطی مانند دما، رطوبت و سرعت باد نیز وابسته است (گیچسکیل و

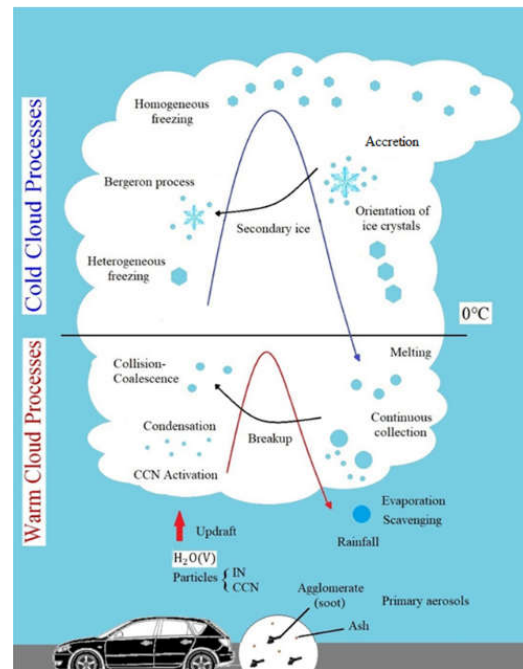
همکاران، ۲۰۰۵). ذراتی که با میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) مشاهده شدند، دوده و خاکستر هستند. خاکستر شامل S، Fe، Zn، Mg، P، Ca و مقدار بسیار کمی ترکیبات Sn است. منشأ بیشتر این عناصر، افزودنی‌های روغن موتور است. Sn و حداقل بخشی از Fe در اثر سایش قطعات موتور تولید می‌شوند. در بین وسایل نقلیه بنزینی و دیزلی و چرخه حرکت آنها، تفاوت معناداری بین ویژگی‌های ذرات منتشرشونده وجود ندارد (لیاتی و همکاران، ۲۰۱۸).

دوده و خاکستر به‌دلیل تأثیر در گرمایش جهانی و خطرهایی که برای سلامتی بشر دارند، نگرانی‌های زیادی را برای محیط زیست به‌وجود آورده‌اند (لیاتی و همکاران، ۲۰۱۲ و فوجیتانی و همکاران، ۲۰۱۶). ویژگی‌های ساختاری ذرات منتشرشده به‌ویژه ذرات دوده اولیه، می‌تواند به تعیین رفتار این ذرات در جو کمک کند. ویژگی‌های ساختاری دوده (اندازه، شکل، مساحت سطح و ساختار درونی) بیشتر به شرایط عملکرد موتور و همچنین سوخت استفاده‌شده بستگی دارد. برای تعیین ویژگی‌های ساختاری هواویزهایی که از آگزوز خودروها خارج می‌شوند، علاوه‌بر TEM، از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) نیز استفاده می‌شود. این روش‌ها بزرگ‌نمایی و وضوح بالایی را ایجاد می‌کنند و می‌توانند جزئیات ساختاری ذرات اولیه با اندازه‌های بسیار کوچک را آشکار کنند. انتظار می‌رود با استفاده از این روش‌ها اطلاعات کلیدی برای ارزیابی ارتباط بین ساختار ذرات و ویژگی‌های نوری دوده در جو نیز فراهم شود (لیاتی و همکاران، ۲۰۱۶). برای بررسی نوع ذرات، اندازه و ساختار آنها از SEM جفت‌شده با EDX استفاده شده است (چن و همکاران، ۲۰۰۵ و کریوا و همکاران، ۲۰۰۹). طی فرایند میعان روی این ذرات، قطره‌ها تشکیل می‌شوند. بلورها می‌توانند با فرایندهای هسته‌زایی همگن و ناهمگن تشکیل شوند و با توجه به فرایند برجرن رشد کنند. هنگامی که

در مطالعات پیشین برای شبیه‌سازی رشد گویچه‌های برف از دو میله فولادی با طول ۱۵ سانتی متر، قطر ۰/۴ سانتی متر و شعاع‌های چرخش ۱۵ و ۲۵ سانتی‌متری استفاده کردند. در طول آزمایش‌ها بیشترین عرض مؤثر رشد برفک برابر با ۶ میلی‌متر بود که روی میله با قطر ۴ میل‌متر در سرعت  $12\text{m/s}$  اتفاق افتاد. احتمال یخ زدن قطرک‌های بزرگ‌تر نسبت به قطرک‌های کوچک‌تر بیشتر است (ساندرز و صادقی‌حسینی، ۲۰۰۱). همچنین آزمایش‌هایی برای تشکیل ساختارهای یخی روی میله استوانه‌ای با استفاده از پمپ مکش صورت گرفته است (وارلا و همکاران، ۲۰۰۹). یک گویچه برف در هنگام سقوط خود درون ابر با سرعت چند متر بر ثانیه، همه قطرک‌های واقع در مسیر را جمع‌آوری نمی‌کند. محتوای آب مایع مؤثر (EW)، بخشی از محتوای آب مایع (LWC) است که برف‌گیرها براساس کارایی برخورد جمع‌آوری کرده‌اند؛ بنابراین EW به اندازه برف‌گیرها، طیف قطرک‌ها و سرعت نسبی آنها بستگی دارد (ساندرز و همکاران، ۲۰۱۱).

نخستین بار، شفر از روش محلول فرم‌وار برای مشاهده بلورهای یخ استفاده کرد (شفر، ۱۹۴۱). توزیع اندازه بلورهای یخ برای دماهای مختلف ارزیابی شده است (بورجرس و همکاران، ۲۰۰۶ و پیرا و آیولا، ۲۰۰۲). مطالعه میدانی اثر ذرات کوچک آلی و ذرات حاوی دوده بر تشکیل آب و یخ ابرها در یکی از مکان‌های مرتفع آلپ، جایی که ابر در تماس با زمین و ایستگاه اندازه‌گیری است، در زمان‌های مختلف سال انجام شده است. همچنین در منطقه‌ای که اثر فرارفت آلودگی هوا از شهرهای انگلستان وجود داشت، تحقیقاتی با استفاده از هواپیما صورت گرفته است. نتایج مطالعات میدانی بیانگر این نکته است که اکثر این ذرات آلاینده به‌عنوان هسته‌های میعان ابر عمل کرده و درون قطرک‌ها وجود داشته‌اند. طول عمر هواویزهای آلی محدود است؛ چون به‌صورت بارش یا

بلورها به قدر کافی رشد کردند، می‌توانند در مسیر حرکت خود قطرک‌های ابرسرد را جمع‌آوری کنند و طی فرایند برافزایش، برفکی شوند. این بلورها در ادامه مسیر رشد به گویچه‌های برف تبدیل می‌شوند و در نهایت، می‌توانند تگرگ را تشکیل دهند. بلورهای یخ بزرگ‌تر ممکن است در مسیر حرکتشان خرد شوند و یخ ثانویه را تولید کنند. رشد بلورهای یخ درون ابر، سازوکاری است که سبب شکل‌گیری بیشتر بارش‌های سامانه‌های جبهه‌ای عرض-های میانی می‌شود و به همان اندازه در توسعه بارش در ابرهای همرفتی مهم است (یانگ، ۱۹۹۳). شکل ۱ برخی از فرایندهای خرد-فیزیک ابر را نشان می‌دهد.



شکل ۱. برخی از فرایندهای خردفیزیک ابر.

نخستین بار برای شبیه‌سازی رشد گویچه‌های برف از سازوکار میله چرخان استفاده شد. وقتی قطرک‌های ابرسرد روی زمینه یخی می‌زنند، ذره‌های یخی با دمای بین  $3^{\circ}\text{C}$  و  $8^{\circ}\text{C}$  از آنها می‌جهند که تولید بیشینه آنها در دمای  $5^{\circ}\text{C}$  رخ می‌دهد (هالت و موساپ، ۱۹۷۴).

در مناطق شهری و پیش‌بینی پدیده‌هایی نظیر آذرخش کمک کند.

## ۲ روش تحقیق

شکل و عناصر تشکیل‌دهنده ذراتی که از آگزوز خودرو بنزینی خارج می‌شوند، از روش FESEM/EDX به‌دست آمده است. در این روش لامل آزمایشگاهی به مدت یک دقیقه در جلوی آگزوز خودرو قرار می‌گیرد. هواویزهایی که از آگزوز خارج می‌شوند، روی لامل می‌چسبند. پس از آن برای بررسی، نمونه را با طلا پوشش می‌دهند. در ادامه، برای انجام آزمایش‌های خردفیزیک ابر، از این ذرات در حجم مشخصی نمونه‌برداری می‌شود و سپس به محفظه سرد تزریق می‌شوند. دمای درون محفظه حدود  $20^{\circ}\text{C}$  - است. برای فراهم کردن بخار آب و تشکیل قطره‌ها، جوش‌آور درون محفظه قرار می‌گیرد. طی فرایند میعان روی هواویزها قطره‌ها تشکیل و به دلیل پایین بودن دما، به‌سرعت آبرسرد می‌شوند. برای به‌دست آوردن توزیع اندازه قطره‌ها، از محلول فرم‌وار ۳٪ (۳ گرم پلی‌وینیل‌فرمال-رزین محلول در ۱۰۰ میلی‌لیتر اتیلن‌دی‌کلرید) استفاده شده است. مقداری از این محلول روی لامل پوشش داده می‌شود و درون محفظه سرد قرار می‌گیرد. قطره‌ها روی لامل سقوط می‌کنند. سپس لامل از محفظه بیرون آورده می‌شود و در محیط گرم قرار می‌گیرد. بعد از تبخیر مایع فرار و آب مایع، اثر قطره‌ها روی لامل باقی می‌ماند و با قرار دادن لامل زیر میکروسکوپ نوری، می‌توان توزیع اندازه قطره‌ها را تخمین زد.

وجود هواویزها باعث تغییر در طیف قطره‌ها می‌شود. طیف قطره‌ها بر رشد گویچه‌های برف تأثیرگذار است. با چرخش میله‌های برنجی درون محفظه سرد، سازوکار رشد گویچه‌های برف درون ابر شبیه‌سازی می‌شود. این پژوهش برای سرعت و دمای یکسان انجام شده

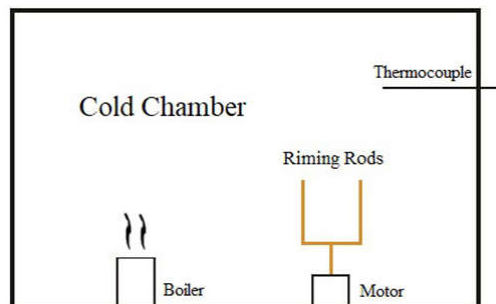
نهشت تر از جو حذف می‌شوند. نتایج مشاهدات هواپیما در ابرهای کومولوس، حالت مشابهی را در قطره‌های آبرسرد و ذرات یخ نشان می‌دهد. (چولارتون و همکاران، ۲۰۰۸). باقری مصلح‌آبادی و همکاران (۱۳۹۷) نقش ذرات آبدوست را بر ابرهای گرم بررسی کردند. نتایج نشان دادند ذرات آبدوست باعث افزایش شعاع مؤثر قطره‌ها می‌شوند و طول عمر مه (ابر) را کاهش می‌دهند که این خود می‌تواند در فرایندهای خردفیزیک ابر مانند برخورد و هم‌امیزی تأثیر مثبت بگذارد و میزان بارش را افزایش دهد.

میدان الکتریکی جو بر بلورهای یخ موجود درون ابرهای سرد گشتاور اعمال می‌کند. بلورهای یخ در امتداد خطوط میدان جهت‌گیری می‌کنند. این جهت‌گیری‌ها به گشتاورهای آثرودینامیکی بلورهای یخ نیز وابسته هستند. توزیع اندازه بلورهای صفحه‌ای و تعداد آنها ممکن است در اثر گشتاور الکترواستاتیکی و انعکاس نور مؤثر باشد. جهت‌گیری بلورهای کوچک به دلیل داشتن حرکت براونی، به صورت تصادفی است (در ظاهر چشمک می‌زنند) (فوستر و هالت، ۲۰۰۲). جهت‌دهی الکتریکی به بلورهای یخ در میدان‌های در حدود  $10\text{ kV/m}$  یا بزرگ تر رخ می‌دهد. بلورهای صفحه‌ای که قطری کمی بزرگ تر از  $10\text{ }\mu\text{m}$  دارند، برای جهت‌گیری کردن گشتاورهای آثرودینامیکی به قدر کافی بزرگ هستند. بلورهایی که به اندازه کافی کوچک هستند، اثرهای مربوط به چرخش های براونی را نشان می‌دهند (فوستر و هالت، ۲۰۰۸). به نظر می‌رسد حتی اگر بلورهای صفحه‌ای تعداد کمی از ذرات یخی درون ابر واقعی را تشکیل دهند، این اثر مشاهده شدنی باشد. در این پژوهش سعی می‌شود تأثیر هواویزهای ناشی از خودروها بر توزیع اندازه بلورهای یخ و گشتاور الکترواستاتیکی بلورها در زمان اعمال میدان الکتریکی بررسی شود تا به داشتن دید بهتر درباره بارش

تشکیل بلورهای یخ، با استفاده از یک سرنگ و انبساط بی‌دررو، هوای فشرده داخل سرنگ آزاد می‌شود و دما به صورت محلی به زیر  $36^{\circ}\text{C}$  می‌رسد و بعد از لحظاتی، بلورهای یخ تشکیل می‌شوند. طبق فرایند برجرون، بلورهای یخ قطرک‌ها را مصرف و کم‌کم رشد می‌کنند (لوکه و همکاران، ۲۰۱۶ و سانتاچیارا و همکاران، ۲۰۱۴). حجم سرنگ مورد استفاده ۵ mL است. برای تعیین تأثیر طیف قطرک‌ها بر تشکیل بلورهای یخ، از یک مه‌پاش فراصوت و برای به‌دست آوردن توزیع اندازه بلورهای یخ، همانند قطرک‌ها، از روش محلول فرم‌وار استفاده شده است. مقداری از این محلول روی لامل پوشش داده می‌شود و درون محفظه سرد قرار می‌گیرد. بلورهای یخ روی لامل سقوط می‌کنند. سپس لامل از محفظه بیرون آورده می‌شود و در محیط گرم قرار می‌گیرد. بعد از تبخیر مایع فرار و آب مایع، اثر بلورهای یخ روی لامل باقی می‌ماند و با قرار دادن لامل زیر میکروسکوپ نوری، توزیع اندازه بلورهای یخ تخمین زده می‌شود.

برای مشاهده اثر گشتاور الکترواستاتیکی بلورهای یخ، لامپی با نور سفید قوی به صورت باریکه درون محفظه سرد قرار می‌گیرد. میدان الکتریکی به‌سادگی با مالش میله پلاستیکی روی پارچه خردار تولید می‌شود و میله پلاستیکی بار منفی پیدا می‌کند. میله پلاستیکی باردار با قطر ۲۵ میلی‌متر در حدود ۱۰ سانتی‌متر بالاتر از باریکه، در جهت افقی و عمود بر باریکه قرار گرفته است. دوربین در فاصله ۷۵ سانتی‌متری باریکه و در بالای ابر نگه داشته شده است. بلورهای یخ در راستای خطوط میدان الکتریکی جهت‌گیری می‌کنند. بلورهایی که در زاویه ۴۵ درجه قرار گرفته‌اند، باریکه نور سفید را همانند آینه‌های کوچک به طرف دوربین بازتاب می‌دهند (میدان‌های نزدیک درخش‌های آذرخش که قوی و کوتاه‌مدت هستند، ممکن است باعث جهت‌گیری بلورهای یخ شوند و می‌توانند با رادارها آشکارسازی شوند). عکس‌ها با یک

است و سرعت چرخش میله‌ها و دما به ترتیب حدود  $1\text{ m/s}$  و  $20^{\circ}\text{C}$  است. برف‌گیرها دو میله برنجی به طول ۱۰ cm و قطر  $0.32\text{ cm}$  انتخاب شده‌اند که حول یک محور قائم با شعاع ۵ cm می‌چرخند. این میله‌های استوانه‌ای برنجی، قطرک‌های برخوردکننده با سطح جلویی خود را جمع‌آوری می‌کنند. قطرک‌ها روی میله‌ها به صورت برفک یخ می‌زنند. میله‌ها در مدت زمان ۲ دقیقه درون محفظه سرد می‌چرخند. طرح کلی از شبیه‌سازی رشد گویچه‌های برف در شکل ۲ آمده است.



شکل ۲. طرح کلی از شبیه‌سازی رشد گویچه‌های برف

برای محاسبه EW، وزن اضافه‌شده میله‌ها با یک ترازو با دقت  $0.0001$  گرم اندازه‌گیری می‌شود. EW با رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$EW = \frac{\Delta m}{\Delta t V A} \quad (1)$$

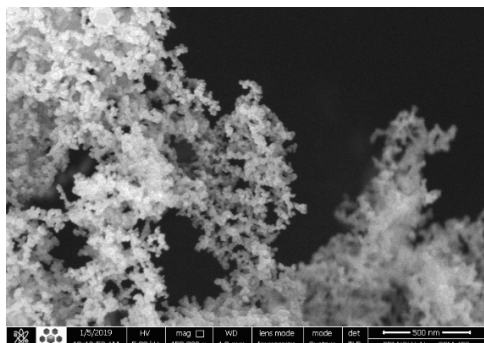
که  $\Delta m$  با وزن کردن برفک جمع‌آوری‌شده روی میله هدف در طول دوره زمانی مشخص  $\Delta t$  به‌دست می‌آید.  $A$  مساحت سطح مقطع میله هدف و  $V$  سرعت چرخش میله‌ها است. این سازوکار به درک بهتر رشد تگرگ در ابرهای کومه‌ای نیز کمک می‌کند.

در دماهای بالاتر از حدود  $36^{\circ}\text{C}$  قطرک‌های آب مایع درون محفظه سرد وجود دارند اما بلور به صورت گسترده وجود ندارد. هنگامی که دما پایین‌تر از  $36^{\circ}\text{C}$  باشد، بلورها به صورت خودبه‌خودی تشکیل می‌شوند ولی قطرک‌های آب‌سرد در این دماها وجود ندارند. برای

قرار می‌گیرد. در نبود میله باردار، فرض می‌شود بلورهای بزرگ‌تر، جهت‌گیری افقی طبیعی خود را دارند و نوری به طرف دوربین بازتاب داده نمی‌شود.

### ۳ نتایج و بحث

هواویزهایی را که از آگروز خودرو بنزینی خارج شده و روی لامل چسبیده‌اند در شکل ۳ می‌توان دید.



شکل ۳. تصویر FESEM هواویزهایی که از آگروز خودرو بنزینی خارج شده‌اند.

همان‌طور که در بخش ۱ اشاره شد، تفاوت معناداری بین ویژگی‌های ذرات خودروی بنزینی و دیزلی وجود ندارد؛ به همین دلیل تنها شکل ذرات مربوط به خودرو بنزینی آورده شده است. این ذرات اغلب ترکیبات دوده و خاکستر هستند، شکل آنها تا حدی کروی است و به صورت انباشت تجمعی درآمده‌اند. بیشترین عنصر تشکیل‌دهنده این ذرات کربن است. عنصر سیلیسیوم مربوط به شیشه لامل است. وجود سایر عناصر مانند سدیم، کلسیم، منیزیم، آلومینیوم، آهن و مس می‌تواند مربوط به افزودنی‌های روغن موتور و سایش قطعات موتور باشد. درصد اتمی و جرمی این عناصر در شکل ۴ آمده است.

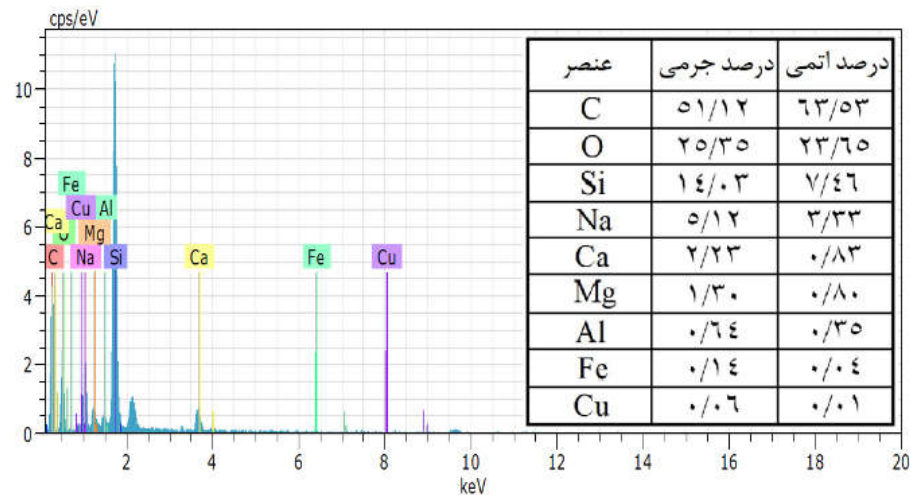
دوربین دیجیتال از بلورها گرفته شده است. قطر نور سفیدی که لامپ ایجاد می‌کند، ۲ سانتی‌متر است. برای تولید قطرک‌ها و بلورها از جوش‌آور استفاده شده است. نیروی یک میدان الکتریکی با استفاده از دو میله کاملاً مشابه تخمین زده می‌شود. هر دو میله به‌طور یکسان با پارچه خردار مالش داده می‌شوند. یکی از میله‌ها روی ترازوی حساس (با دقت ۰/۰۰۰۱ گرم) قرار داده می‌شود و دیگری موازی و با فاصله کم در بالای میله اولی نگه داشته می‌شود. نیروی دافعه الکتریکی بین آنها با خواندن تغییر وزن روی ترازو اندازه‌گیری می‌شود و سپس از طریق رابطه زیر چگالی خطی بار را می‌توان به دست آورد:

$$F/L = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \frac{\lambda^2}{r} \quad (2)$$

که  $F$  نیروی اندازه‌گیری شده و  $L$  طول هر میله است.  $\lambda$  چگالی خطی بار روی میله‌ها است که فرض می‌شود یکسان و یکنواخت است.  $r$  فاصله مرکز به مرکز بین میله‌ها و  $\epsilon_0$  ثابت گذردهی خلأ است. میله‌ها به قدر کافی به یکدیگر نزدیک و به قدر کافی بلند هستند که برای توصیف چگالی خطی بار معتبر باشند. طول لوله‌های پلاستیکی ۴۵ cm است. طول میله بی‌نهایت فرض می‌شود. میدان الکتریکی در نزدیکی میله باردار با رابطه زیر توصیف می‌شود:

$$E = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \frac{\lambda}{r'} \quad (3)$$

که  $E$  میدان الکتریکی و  $r'$  فاصله عمودی از میله است. میدان الکتریکی اندازه‌گیری شده در فاصله ۱۰ سانتی‌متری از مرتبه ۵۰ kV/m است. شواهد نشان می‌دهند که یک قطر بلورهای صفحه‌ای در امتداد جهت میدان الکتریکی

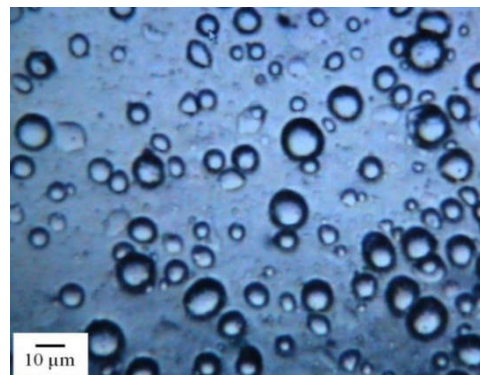


شکل ۴. تحلیل EDX هواویزهای ناشی از خودرو بنزینی.

توزیع اندازه قطره‌های آب‌سرد در هنگام وجود هواویزهای ناشی از خودرو به‌دست‌آمده و با هواویزهای زمینه مقایسه شده است. هر آزمایش تکرار و میانگین همادی آنها محاسبه شده است. شکل ۶- الف هنگامی است که تنها هواویزهای زمینه وجود داشتند و قطره‌ها از طریق جوش‌آور تشکیل شده‌اند. شکل ۶- ب مربوط به زمانی است که هواویزهای زمینه درون محفظه بودند و مه‌پاش فراصوت قطره‌ها را تولید کرده است. در شکل ۶- ج هواویزهای ناشی از خودروی بنزینی به هواویزهای زمینه اضافه شده و بخار آب و قطره‌ها با جوش‌آور فراهم شده‌اند. در شکل ۶- د هواویزهای ناشی از خودروی دیزلی به هواویزهای زمینه اضافه شده‌اند. قطر میانگین قطره‌ها به ترتیب  $12/6 \mu\text{m}$  و  $12/1 \mu\text{m}$  است. با تزریق هواویزهای ناشی از خودرو به درون محفظه سرد، میانگین قطر قطره‌ها کاهش یافته است. مقادیر انحراف معیار نیز در شکل ۶ آمده است.

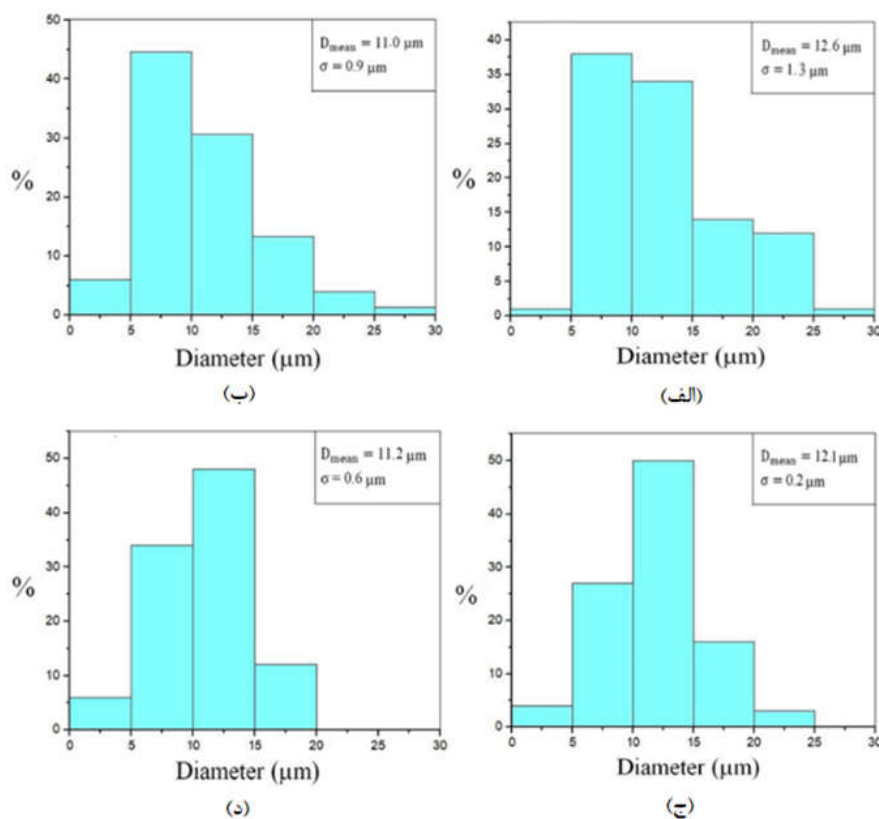
هنگامی که میله U شکل شروع به چرخش می‌کند و با قطره‌های آب‌سرد برخورد می‌کند، روی سطح آن پوششی از بلورهای یخ ایجاد می‌شود که در شکل ۷ می‌توان مشاهده کرد.

همان‌طور که در بخش ۲ اشاره شد، در اثر تزریق هواویزهای ناشی از خودروهای بنزینی (پژو ۲۰۶) و دیزلی (اتوبوس درون‌شهری) به درون محفظه سرد و وجود بخار آبی که جوش‌آور تولید می‌کند، قطره‌ها تشکیل می‌شوند. شکل ۵ اثر به‌جای‌مانده از این قطره‌ها را روی لامل در زیر میکروسکوپ نشان می‌دهد.



شکل ۵. اثر به‌جای‌مانده قطره‌های آب‌سرد روی لامل در زیر میکروسکوپ نوری.

با استفاده از مقیاس ۱۰ میکرومتری که در پایین تصویر شکل ۵ وجود دارد، می‌توان توزیع اندازه قطره‌های آب‌سرد را تخمین زد. برای بررسی بیشتر،



شکل ۶. توزیع اندازه قطره‌های آب‌سرد به همراه مقادیر میانگین و انحراف معیار قطر قطره‌ها در هنگام وجود (الف) هواویزهای زمینه و جوش‌آور (ب) هواویزهای زمینه و مه پاش فراصوت (ج) هواویزهای ناشی از خودروی بنزینی + هواویزهای زمینه و جوش‌آور (د) هواویزهای ناشی از خودروی دیزلی + هواویزهای زمینه و جوش‌آور.



شکل ۷. برفکی شدن یکی از میله‌های برنجی در اثر چرخش در محیطی که قطره‌های آب‌سرد وجود دارند.

مقادیر EW به همراه انحراف معیار در هنگام وجود هواویزهای مختلف در جدول ۱ آمده است. بیشترین مقدار EW مربوط به هنگامی است که تنها هواویزهای زمینه درون محفظه سرد وجود داشتند و مقدار آن برابر با  $1/87 \text{ g/m}^3$  است. با تزریق هواویزهای ناشی از خودروی بنزینی، EW کاهش یافته و مقدار آن به  $1/51 \text{ g/m}^3$  رسیده است. همچنین پس از تزریق هواویزهای ناشی از خودروی دیزلی به درون محفظه آب‌سرد، مقدار EW به کمترین مقدار خود یعنی  $1/19 \text{ g/m}^3$  رسیده است. کاهش میانگین قطر قطره‌ها در هنگام وجود هواویزهای ناشی از خودروها می‌تواند در کاهش مقدار EW مؤثر بوده باشد.



تشکیل شوند. در مطالعات پیشین، میانگین قطر قطرک‌های تولیدشده پیش از تشکیل بلورهای یخ و یخ زدن قطرک‌ها به روش جوش آور، ۹ میکرومتر و به روش مه‌پاش فراصوت، ۷/۴ میکرومتر بوده است (پدرنرا و آویلا، ۲۰۱۸).

در شکل ۹ توزیع اندازه بلورهای یخ به همراه میانگین قطر بلورها و انحراف معیار آنها نشان داده شده است. در شکل ۹- الف میانگین قطر بلورهای یخ  $25/3 \mu\text{m}$  و محدوده قطر بلورها بین  $10 \mu\text{m}$  تا  $60 \mu\text{m}$  است. در شکل ۹- ب قطر نزدیک به  $70\%$  بلورها، در محدوده بین  $10 \mu\text{m}$  تا  $20 \mu\text{m}$  قرار دارد. میانگین قطر بلورها  $19/5 \mu\text{m}$  و محدوده قطر بلورها بین  $10 \mu\text{m}$  تا  $50 \mu\text{m}$  است. در شکل‌های ۹- ج و ۹- د میانگین قطر بلورها به ترتیب برابر با  $21/1 \mu\text{m}$  و  $20/4 \mu\text{m}$  است. همچنین محدوده قطر بلورها به ترتیب بین  $0$  تا  $50 \mu\text{m}$  و  $10 \mu\text{m}$  تا  $60 \mu\text{m}$  است. در طی انجام آزمایش‌ها به ندرت قطر بلوری در محدوده بین  $0$  تا  $10 \mu\text{m}$  بود که شکل ۹ نیز این موضوع را تأیید می‌کند.

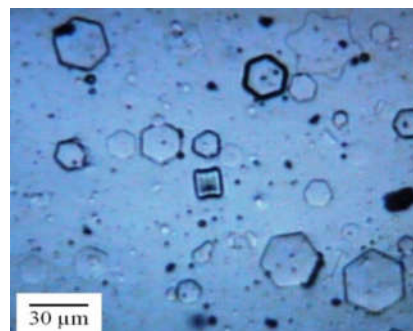
شکل بلورها تنها نسبت به دما و ابراشباع‌های مختلف تغییر می‌کند. البته تغییر شکل‌ها بیشتر وابسته به دما هستند و افزایش ابراشباع می‌تواند شکل آنها را پیچیده‌تر کند. در شکل ۱۰ همه شکل‌های بلورهای مشاهده‌شده در آزمایش‌ها آورده شده است.

صفحه‌های شش‌ضلعی بیشترین بلورهایی بودند که در آزمایش‌ها وجود داشتند. صفحه‌های ستاره‌ای و قطاعی از انواع دیگر صفحه‌ها هستند. ستون‌ها شامل ستون‌های توپیر و ستون‌های کلاهکی هستند. منشورهای ساده، بلورهایی بسیار کوچک هستند. سوزنک‌های ساده، شکل باریک‌تر ستونی‌ها هستند و در دمای حدود  $5^\circ\text{C}$  دیده می‌شوند. مثلی شکل‌ها نیز اغلب بلورهایی کوچک هستند. ستاره‌های ساده هم شکل دیگری از بلورها را تشکیل می‌دهند.

جدول ۱. مقادیر EW در زمان وجود هواویزهای زمینه و هواویزهای ناشی از خودرو که به هواویزهای زمینه اضافه شده‌اند.

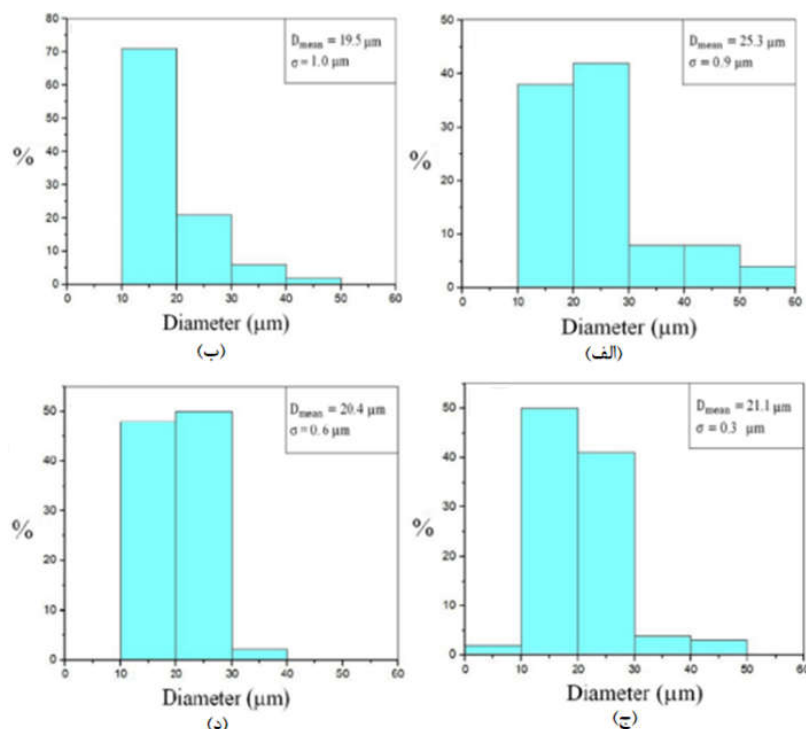
انواع هواویزها	EW(g/m <sup>3</sup> )
زمینه	$0/26 \pm 1/87$
خودروی بنزینی + زمینه	$1/51 \pm 0/15$
خودروی دیزلی + زمینه	$1/19 \pm 0/29$

بلورهای بزرگ‌تر می‌توانند نقش مؤثرتری در بارش داشته باشند؛ بنابراین با افزایش میانگین قطر بلورهای یخ درون ابر، احتمال بارش افزایش پیدا می‌کند. شکل ۸ اثر بلورهای یخ به‌جای‌مانده روی لامل را در زیر میکروسکوپ نشان می‌دهد. با توجه به مقیاس  $30 \mu\text{m}$  که در شکل وجود دارد، می‌توان توزیع اندازه بلورهای یخ را تخمین زد.



شکل ۸. اثر بلورهای یخ به‌جای‌مانده روی لامل در زیر میکروسکوپ

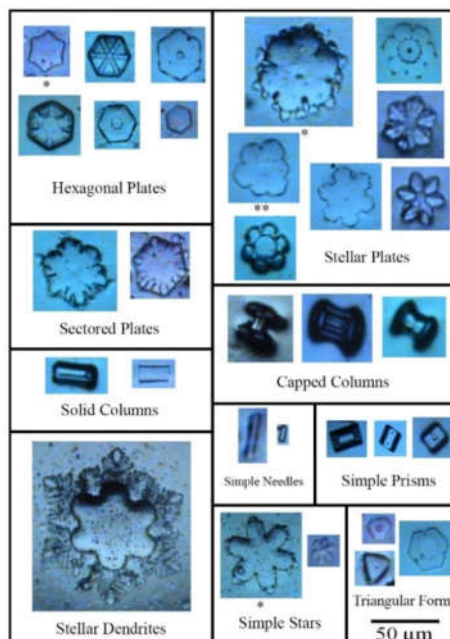
با تزریق هواویزهای مختلف به درون محفظه سرد، طیف بلورهای یخ تغییر می‌کند. برای بررسی این طیف، چهار حالت با هم مقایسه شده‌اند. حالت اول مربوط به بلورهایی است که در زمان وجود هواویزهای زمینه و جوش آور تشکیل شده‌اند. حالت دوم بلورهایی هستند که در هنگام وجود مه‌پاش فراصوت ایجاد شده‌اند. حالت سوم و چهارم به ترتیب هنگامی است که هواویزهای ناشی از خودروی بنزینی و دیزلی به محفظه سرد تزریق شده‌اند و جوش آور باعث شده است میعان روی این ذرات رخ دهد و بلورها



شکل ۹. توزیع اندازه بلورهای یخ به همراه مقادیر میانگین و انحراف معیار قطر بلورها در هنگام وجود (الف) هواویزهای زمینه و جوش‌آور (ب) هواویزهای زمینه و مه‌پاش فراصوت (ج) هواویزهای ناشی از خودروی بنزینی + زمینه و جوش‌آور (د) هواویزهای ناشی از خودروی دیزلی + زمینه و جوش‌آور

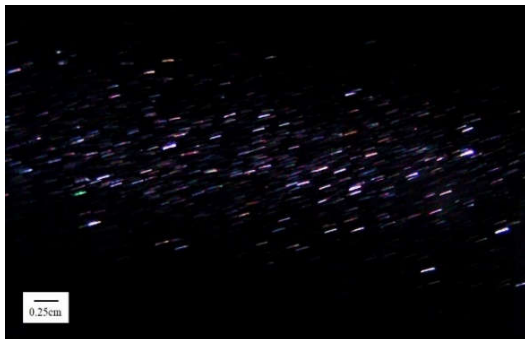
دندریت شکل‌ها بزرگ‌ترین بلورها هستند؛ قطر بلوری که در شکل ۱۰ وجود دارد، بیش از ۱۰۰ میکرومتر است و از آن به‌عنوان آبربلور یاد می‌شود. بلورهایی که با \* مشخص شده‌اند، بلورهای در حال رشد و تبدیل به شاخه‌ای شدن هستند و بلوری که با \*\* مشخص شده، شکلی بی‌قاعده به خود گرفته است.

بلورهای یخ تازه تشکیل شده هنگامی که در معرض نور سفید قرار می‌گیرند، به رنگ‌های مختلف دیده می‌شوند. بعضی از این بلورها همانند آینه، نور را به طرف دوربین واقع در بالای محفظه منعکس می‌کنند درست مانند حباب صابون در معرض نور که با توجه به ضخامت قسمت‌های مختلف آن و طول موج‌های نور مرئی، رنگ‌های متفاوتی روی آن ظاهر می‌شود. شکل ۱۱ بازتاب نور بلورهای یخ را به‌صورت دایره‌های رنگی نشان



شکل ۱۰. انواع مختلف بلورهای به‌دست‌آمده در دماها و ابراشباع‌های متفاوت (رک. متن)

با تلاطم کم، سرعت حرکت بلورها از مرتبه  $1 \text{ cm/s}$  است.



شکل ۱۲. قرارگیری بلورهای یخ درون باریکه نور سفید همراه با تأخیر زمانی  $0/20 \text{ s}$

نقاط یا خطوط تاریک و روشن برای بعضی از مسیرها نشان‌دهنده این است که بلورها نسبت به حالت تعادلی که جهت‌گیری کرده‌اند، در حال نوسان هستند. این نوسان‌ها مربوط به حرکت‌های براونی است. بلورها به قدر کافی بزرگ نیستند که در اثر حرکت نسبی هوا در مسیرشان افت‌وخیز داشته باشند و برای مثال مسیرهای زیگزاگی ایجاد کنند. غلظت بلورها به قدر کافی زیاد نیست که انتظار برخورد داشته باشیم. خطوط رنگی با و بدون میدان‌های الکتریکی و در هنگام بودن و نبودن هواویزهای ناشی از خودروها دیده شدند؛ بنابراین منشأ به وجود آمدن آنها، مربوط به میدان‌های الکتریکی یا آلاینده‌های ناشی از خودروها نیست. بلورهای صفحه‌ای با اندازه بزرگ‌تر تمایل دارند به صورت صفحه‌های افقی سقوط کنند؛ این در حالی است که بلورهای کوچک‌تر با اندازه از مرتبه  $10$  میکرومتر، به علت وجود حرکت‌های براونی، به صورت تصادفی جهت‌گیری می‌کنند. در زمان وجود یک میدان الکتریکی عمودی که به اندازه کافی قوی باشد، بلورهای صفحه‌ای روی یک قطر در امتداد خطوط میدان جهت‌گیری می‌کنند. ظاهر شدن طیف مختلف رنگ‌ها در بلورهای یخی که در جلوی باریکه نور سفید قرار دارند،

می‌دهد. برای مثال، بلوری که نور را به رنگ زرد بازتاب داده است، ضخیم‌تر است از بلوری که نور را به رنگ سبز بازتاب داده است. دایره‌های بزرگ‌تر نشان‌دهنده بلورهای بزرگ‌تر نیستند بلکه به این معنا هستند که آن بلورها در فاصله‌های نزدیک‌تر از مقابل دوربین عکاسی عبور کرده‌اند. در این شکل، بلورهای بنفش نازک‌ترین و بلورهایی که رنگ آنها به قرمز نزدیک‌تر است، ضخیم‌ترین بلورها هستند. هنگامی که بخار آب و قطره‌های بیشتری در دسترس بلورهای یخ قرار می‌گیرند، این بلورها رشد می‌کنند و به صورت ذرات سفیدرنگ، با سرعت بیشتری به سقوط درون محفظه ادامه می‌دهند.



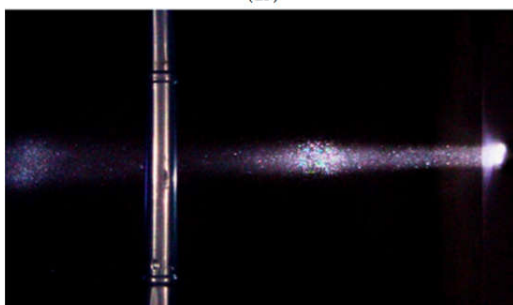
شکل ۱۱. بازتاب نور به رنگ‌های مختلف از بلورهای یخ

شکل ۱۲ قرارگیری بلورهای یخ رشدیافته در مقابل باریکه نور سفید را نشان می‌دهد. این تصویر با اندکی تأخیر زمانی در حدود  $0/20$  ثانیه تهیه شده است. در برخی از مسیرهای مجزا تغییرات رنگ مشاهده می‌شود و برخی هم رنگ ثابتی دارند که احتمالاً می‌تواند به رشد ضخامت بلورها مربوط شود. چون روی بلورها در عکس به‌طور یکنواخت بزرگ‌نمایی و تمرکز نشده است، نمی‌توان دقیقاً عرض هر مسیر را به‌عنوان قطر بلورها در نظر گرفت. طول مسیرهای رنگی نشان می‌دهد که در جریان‌های هوا

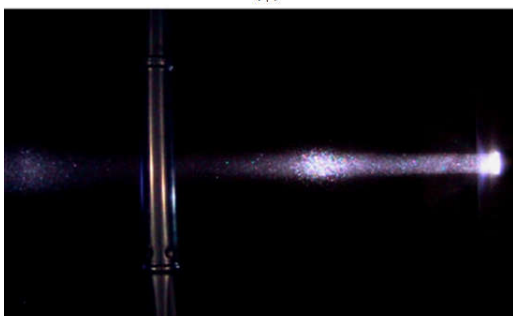
خطی، باری حدود  $50\text{ C}$  می‌تواند در امتداد یک درخش با طول  $1000$  متر توزیع شود.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۱۳. اثر گشتاور الکترواستاتیکی بر بلورهای واقع در معرض باریکه نور سفید (الف) در نبود میدان الکتریکی (ب) در زمان وجود میدان الکتریکی و هواویزهای زمینه (ج) در زمان وجود میدان الکتریکی و هواویزهای ناشی از خودروها

با گذشت زمان و سقوط بلورها، از روشنایی ناحیه ذکر شده کاسته می‌شود. عکس‌ها در زمان‌های یکسان تهیه شده‌اند. نواحی روشن در شکل‌ها تفاوت چندانی با هم ندارند و می‌توان با تقریب خوبی این اثر را برای محیط‌های پاک‌تر که غلظت هواویزها کم است و محیط‌های شهری که تعداد خودروها زیاد است و ذرات

نشان می‌دهد ضخامت بلورهای یخ صفحه‌ای از مرتبه ۱ میکرومتر است. تصاویر مسیر حرکت بلورها با تأخیر زمانی تقریبی ۱ ثانیه نیز به دست آمده که تأییدکننده این نتایج است (فوستر و هالت، ۲۰۰۸).

با توجه به وجود و تغییرات میدان الکتریکی درون ابرهای همرفتی، بلورهای یخی موجود درون این ابرها می‌توانند در راستای خطوط میدان جهت‌گیری کنند. در شکل ۱۳ اثر گشتاور الکترواستاتیکی بر بلورهای یخ مشاهده می‌شود. تفاوت ظاهری در بلورهای یخ ابر، هنگامی که یک شیء باردار در نزدیکی ابر حرکت می‌کند، به خوبی قابل مشاهده است. شکل ۱۳-الف برای زمانی است که میدان الکتریکی درون محفظه سرد وجود ندارد؛ بنابراین تغییری در بلورها مشاهده نمی‌شود و مسیر باریکه نور یکنواخت است. شکل ۱۳-ب هنگامی است که هواویزهای زمینه درون محفظه وجود داشته‌اند و سپس با استفاده از جوش‌آور، قطرک‌ها روی این هواویزها تولید و با کاهش دما، بلورهای یخ تشکیل شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با اعمال میدان الکتریکی، یک ناحیه روشن در سمت راست میله به وجود آمده است که ناشی از گشتاور الکترواستاتیکی بلورهای یخ است که با زاویه  $45^\circ$  درجه جهت‌گیری کرده‌اند و نور را به سمت بالا (دوربین) بازتاب می‌دهند. در شکل ۱۳-ج هواویزهای ناشی از خودروها به محفظه تزریق شده‌اند و سپس قطرک‌ها با استفاده از جوش‌آور تشکیل و به دنبال آن بلورها با کاهش دما ایجاد شده‌اند. با توجه به اینکه تغییرات خیلی محسوس نبود، تنها یک شکل به عنوان وجود هواویزهای ناشی از خودروها آورده شده است.

از میدان الکتریکی اطراف یک ضربه نردبانی آذرخش واقعی می‌توان به عنوان سازوکار طبیعی این اثر نام برد. به‌طور مثال در مورد جو،  $E$  با اعمال میدان  $3\text{ MV/m}$  در حدود  $80$  می‌شود؛ یعنی می‌توان این اثرها را در فاصله  $80$  متری مشاهده کرد. در یک درخش

ضلعی، ستاره‌ای، قطاعی، ستون‌های توپر و کلاهکی، منشورها، مثلثی شکل‌ها، سوزنک‌ها و دندریت شکل‌ها بودند. همانند حباب صابون در معرض نور که با توجه به ضخامت قسمت‌های مختلف آن و طول موج‌های نور مرئی، رنگ‌های متفاوت روی آن ظاهر می‌شود، هنگامی که بلورهای یخ در معرض نور قرار می‌گیرند، به رنگ‌های متفاوتی دیده می‌شوند. البته هنگام رشد کافی، اغلب در نور سفید، سفیدرنگ ظاهر می‌شوند. هنگام اعمال میدان الکتریکی درون ابر، ناحیه روشنی دیده می‌شود که در زمان وجود هواویزهای ناشی از خودروها تفاوت چندانی مشاهده نمی‌شود. به نظر می‌رسد ناحیه روشن مربوط به وجود هواویزهای ناشی از خودروها، روشن‌تر و منسجم‌تر از زمان وجود هواویزهای زمینه است و علت آن این است که چون با بودن هواویزهای ناشی از خودروها، میانگین قطر بلورها کاهش یافته است پس باید تعداد آنها افزایش یافته باشد تا بتواند سبب ایجاد اندکی روشنایی و انسجام بیشتر شوند. به‌طور کلی می‌توان نتیجه گرفت در مناطقی که تراکم خودروها زیاد است (مناطق شهری)، بارش سرد می‌تواند کاهش یابد.

#### سپاسگزاری

از استاد گرانقدر فیزیک ابر، زنده‌یاد سید علیرضا صادقی حسینی تقدیر و تشکر می‌شود.

#### منابع

- باقری مصلح آبادی، ا.، علی اکبری بیدختی، ع. و قرایلو، م.، ۱۳۹۷، بررسی تجربی تأثیر ذرات آبدوست بر تعدیل مه: مجله فیزیک زمین و فضا، 10.22059/jesphys.2019.262718.1007027
- Alam, M.S., Zeraati-Rezaei, S., Stark, C.P., Liang, Z., Xu, H., and Harrison, R.M., 2016., The characterisation of diesel exhaust particles—composition, size distribution and

معلق غلظت بیشتری دارند، یکسان فرض کرد. تغییرات اندکی در میزان روشنایی شکل‌های ۱۳-ب و ۱۳-ج مشاهده می‌شود و به نظر می‌رسد ناحیه روشن مربوط به وجود هواویزهای ناشی از خودروها، روشن‌تر و منسجم‌تر از ناحیه مربوط به وجود هواویزهای زمینه است که این موضوع را می‌توان این چنین توجیه کرد که با توجه به اینکه در زمان وجود هواویزهای ناشی از خودروها، میانگین قطر بلورها کاهش یافته است، بنابراین باید تعداد آنها افزایش یافته باشد تا بتواند اندکی روشنایی و انسجام بیشتر ایجاد کنند. اثر گشتاور الکترواستاتیکی بر بلورهای یخ در زمان وجود هواویزهای زمینه یا اشیای دیگر و زاویه ۴۵ درجه نیز نشان داده شده است (فوستر و هالت، ۲۰۰۸).

#### ۴ نتیجه‌گیری

نتایج تحلیل FESEM/EDX نشان می‌دهد عمده ذراتی که از آگروز خودرو خارج می‌شوند، ترکیبات دوده و خاکستر هستند که دوده به‌صورت انباشت درآمده است. بیشترین عنصر، کربن است که در طی احتراق ناقص تشکیل شده است. عناصر دیگر مانند سیلیسیم، سدیم، کلسیم، منیزیم، آلومینیم، آهن و مس نیز مربوط به افزودنی‌های روغن موتور و سایش قطعات موتور هستند. با تزریق هواویزهای ناشی از خودروها به درون محفظه اَبرسرد، میانگین قطر قطرک‌ها و EW کاهش یافته است. توزیع اندازه بلورهای یخ در زمان وجود هواویزهای مختلف تغییر می‌کند. هواویزهای ناشی از خودروها باعث کوچک‌تر شدن میانگین قطر بلورهای یخ می‌شوند. کوچک‌ترین میانگین قطر بلورهای یخ مربوط به هنگامی بود که مه‌پاش فراصوت درون محفظه سرد قرار داشت. بلورهای یخ شکل‌های متفاوتی دارند که به دما و رطوبت ابراشباع وابسته هستند. شکل‌هایی که در آزمایش‌های مختلف مشاهده شدند شامل صفحه‌های شش

- partitioning: *Faraday Discussions*, **189**, 69-84.
- Bürgesser, R.E., Pereyra, R.G., and Avila, E.E., 2006, Charge separation in updraft of convective regions of thunderstorm: *Geophysical Research Letters*, **33**(3).
- Chen, Y., Shah, N., Braun, A., Huggins, F.E., and Huffman, G.P., 2005, Electron microscopy investigation of carbonaceous particulate matter generated by combustion of fossil fuels: *Energy and Fuels*, **19**(4), 1644-1651.
- Choularton, T.W., Bower, K.N., Weingartner, E., Crawford, I., Coe, H., Gallagher, M.W., Flynn, M., Crosier, J., Connolly, P., Targino, A., and Alfarra, M.R., 2008, The influence of small aerosol particles on the properties of water and ice clouds: *Faraday Discussions*, **137**, 205-222.
- Deng, W., Hu, Q., Liu, T., Wang, X., Zhang, Y., Ding, X., Sun, Y., Bi, X., Yu, J., Yang, W., and Huang, X., 2016, Chamber simulation on the formation of secondary organic aerosols (SOA) from diesel vehicle exhaust in China: *Atmospheric Chemistry and Physics Discussion*, in Review.
- Deng, W., Hu, Q., Liu, T., Wang, X., Zhang, Y., Song, W., Sun, Y., Bi, X., Yu, J., Yang, W., and Huang, X., 2017, Primary particulate emissions and secondary organic aerosol (SOA) formation from idling diesel vehicle exhaust in China: *Science of the Total Environment*, **593**, 462-469.
- Esmaili, N., Khashman, S., Lamehi-Rachti, M., Aligol, D.A., Shokouhi, F., Oliayi, P., and Farahani, M.F., 2014, Elemental analysis of aerosols in Tehran's atmosphere using PIXE and identification of pollution sources: *Environmental Monitoring and Assessment*, **186**(11), 7505-7512.
- Foster, T.C., and Hallett, J., 2002, The alignment of ice crystals in changing electric fields: *Atmospheric Research*, **62**(1-2), 149-169.
- Foster, T.C., and Hallett, J., 2008, Enhanced alignment of plate ice crystals in a non-uniform electric field: *Atmospheric Research*, **90**(1), 41-53.
- Fujitani, Y., Saitoh, K., Kondo, Y., Fushimi, A., Takami, A., Tanabe, K., and Kobayashi, S., 2016, Characterization of structure of single particles from various automobile engines under steady-state conditions: *Aerosol Science and Technology*, **50**(10), 1055-1067.
- Giechaskiel, B., Ntziachristos, L., Samaras, Z., Scheer, V., Casati, R., and Vogt, R., 2005, Formation potential of vehicle exhaust nucleation mode particles on-road and in the laboratory: *Atmospheric Environment*, **39**(18), 3191-3198.
- Halek, F., Kavouci, A., and Montehaie, H., 2004, Role of motor-vehicles and trend of air borne particulate in the Great Tehran area, Iran: *International Journal of Environmental Health Research*, **14**(4), 307-313.
- Hallett, J., and Mossop, S.C., 1974, Production of secondary ice particles during the riming process: *Nature*, **249**(5452), p. 26.
- Kireeva, E.D., Popovicheva, O.B., Persiantseva, N.M., Timofeyev, M.A., and Shonija, N.K., 2009, Fractionation analysis of transport engine-generated soot particles with respect to hygroscopicity: *Journal of Atmospheric Chemistry*, **64**(2-3), 129-147.
- Liati, A., Schreiber, D., Dasilva, Y.A.R., and Eggenchwiler, P.D., 2018, Ultrafine particle emissions from modern Gasoline and Diesel vehicles: An electron microscopic perspective: *Environmental Pollution*, **239**, 661-669.
- Liati, A., Schreiber, D., Eggenchwiler, P.D., Dasilva, Y.A.R., and Spiteri, A.C., 2016, Electron microscopic characterization of soot particulate matter emitted by modern direct injection gasoline engines: *Combustion and Flame*, **166**, 307-315.
- Liati, A., Spiteri, A., Eggenchwiler, P.D., and Vogel-Schäuble, N., 2012, Microscopic investigation of soot and ash particulate matter derived from biofuel and diesel: implications for the reactivity of soot: *Journal of Nanoparticle Research*, **14**(11), 1224.
- Luque, M.Y., Bürgesser, R., and Avila, E., 2016, Thunderstorm graupel charging in the absence of supercooled water droplets: *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **142**(699), 2418-2423.
- Pedernera, D.A., and Ávila, E.E., 2018, Frozen droplets aggregation at temperature below  $-40^{\circ}\text{C}$ : *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **123**(2), 1244-1252.
- Santachiara, G., Belosi, F., and Prodi, F., 2014, The mystery of ice crystal multiplication in a laboratory experiment: *Journal of the Atmospheric Sciences*, **71**(1), 89-97.
- Saunders, C.P.R., and Hosseini, A.S., 2001, A laboratory study of the effect of velocity on Hallett-Mossop ice crystal multiplication: *Atmospheric Research*, **59**, 3-14.

- Saunders, C.P.R., Keith, W.D., and Mitzeva, R.P., 1991, The effect of liquid water on thunderstorm charging: *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **96**(D6), 11007-11017.
- Schaefer, V.J., 1941, A method for making snowflake replicas: *Science*, **93**(2410), 239-240.
- Varela, G.G.A., Castellano, N.E., and Ávila, E.E., 2009, Formation and sublimation of ice structures over cylindrical collectors: *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **52**(21-22), 5167-5172.
- Young, K.C., 1993, *Microphysical Processes in Clouds*: Oxford University Press

## Interaction of vehicles produced aerosols and cold clouds in the laboratory

Amir Bagheri Moslehabadi <sup>1</sup>, Abbasali Aliakbari Bidokhti <sup>2\*</sup> and Maryam Gharylo

<sup>1</sup> MSc, Space physics Department, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran

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

<sup>3</sup> Assistant Lecturer, Space Physics Department, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran

(Received: 11 March 2019, Accepted: 14 August 2019)

### Summary

Particulate pollutants in urban areas affect human health, environment clouds and climate. With rapid growth of the population and increase in the number of vehicles, in urban areas, air pollution also in large cities has increased substantially. Mobile sources of air pollution have a major contribution to the pollutant levels in urban areas. For example, motor vehicles (gasoline and diesel) play a major role in air pollution in large cities such as Tehran and in fact, they are the main sources of primary aerosols emissions. Aerosols can act as cloud condensation nuclei (CCN) and ice nuclei (IN) and impact on precipitation of different regions. Precipitation can also supply water resources and help to improve the air quality of cities. In Iran, most clouds are cold clouds and ice crystals play a major role in cold precipitation. Using field emission scanning electron microscopy and energy dispersive X-ray spectroscopy (FESEM/EDX) methods, morphology and elements composition of aerosols from the vehicle exhaust pipes were investigated. In this study, we injected such aerosols into a cold cloud chamber in laboratory to get a better understanding of microphysics processes on interaction of urban aerosols and clouds. The experimental simulations include growth of graupels through rotating rods mechanism in the presence of vehicles produced aerosols and supercooled droplets. In order to obtain size distribution of supercooled droplets we used replicas method. Also we focused on ice crystals and the impact of pollutant particles on the ice crystals in cloud microphysics. The size distribution of ice crystals was evaluated from images of fallen crystals on a lamella under a microscope. By creating an electric field inside the cloud, the effect of these particles on the electrostatic torque of the ice crystals has been tested. It can provide a better view of predicting the short term lightning. The results show that vehicles produced aerosols are mainly soot and ash and in the presence of these particles, the average diameter of supercooled droplets decreases. By decreasing diameter of supercooled droplets, the growth of the graupel also decreases. Besides, the average diameter of the ice crystals in the presence of vehicles produced aerosols was reduced. However, pollutant particles do not have much effect on the electrostatic torque of ice crystals. The shape of the observed crystals in the experiments included hexagonal, stellar and sectored plates, solid and capped columns, prisms, triangular shapes, needles and dendrites. Because of the different thickness of various parts of the ice crystal exposed to light, different wavelengths of dispersed visible light with different colors appear and then, it can be seen in different colors (like a soap bubble exposed to light). When the crystals are grown large enough, they appear white. With more sophisticated mentoring system, one may distinguish between the formed crystals in different aerosol types.

**Keywords:** Ice crystals, aerosols, vehicles, cold cloud, droplets, electrostatic torque

\*Corresponding author:

bidokhti@ut.ac.ir