



Golestan University



Journal of the Climate Change Research

Scientific Journal of Golestan University  
Vol. 5, No. 18, Summer 2024



## Ice nucleation activity of the dust blown from sand sheets of the western Lake Urmia and its determining soil factors

Nikou Hamzehpour<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Associated Professor, Faculty of Agriculture, Department of Soil Science and Engineering, University of Maragheh, Iran, Email: nhamzehpour@maragheh.ac.ir

### Article Info

**Article type:**  
Research Full Paper

Article history:  
Received:  
Accepted:

**Keywords:**  
heterogeneous freezing  
temperature  
fraction of heterogeneously  
frozen  
quartz  
Calcite  
electrical conductivity

### ABSTRACT

Dust blown from the exposed sediments after the catastrophic recession of the Lake Urmia (LU), can promote ice nucleation and thus affect cloud formation and its properties. Since desiccation of the LU, the role of the dust originated from its sediments and their role on ice nucleation have not got much of an attention. Therefore, the aim of the present study was to investigate the role of soil-dust on the ice nucleation activity (INA) and its controlling factors. Using high-volume dust samples, dust samples were collected during four time periods throughout the dry season. Soil and dust samples then subjected to the routine physicochemical analysis along with chemical compound (XRF) and mineralogical (XRD) analysis. Later, particle physicochemical properties were compared with their INA activity determined by emulsion freezing experiments in a differential scanning calorimeter (DSC). INA with onset temperatures ranging from 244.6 to 247.8 K and heterogeneous frozen fraction between 46–73 % demonstrates the high potential of dust blown from Sa-sheets to affect cloud properties and precipitation. Freezing onset temperatures ( $T_{het}$ ) and the fraction of heterogeneously frozen ( $F_{het}$ ) droplets in the emulsions revealed variations in INA depending on the physicochemical composition of the samples, negatively influenced by salinity, medium sand,  $Na_2O$ ,  $Cl$ ,  $SO_3$ , Aragonite and Halite. Specifically, IN activity correlated positively with clay, silt (fine, medium, coarse) and fine sand fractions and minerals of Calcite and Quartz. INA of the dust samples showed significant variation over time. Higher INA of dust samples at the end of the dry season (October and November) could be attributed to their lower salt content in comparison to dust July and August. The results from this study revealed that increase in aerosol release from highly saline sediments can significantly reduce INA in comparison to the non-saline aerosols, thus affecting cloud formation and ultimate rainfall in the region.

**Cite this article:** Hamzehpour, N. (2024). Ice nucleation activity of the dust blown from sand sheets of the western Lake Urmia and its determining soil factors. *Journal of the Climate Change Research*, 5 (18), 113-128.



©The author(s)

Publisher: Golestan University

Doi: 10.30488/CCR.2024.450797.1205



نشریه پژوهش‌های تغییرات آب و هوایی



فصلنامه علمی دانشگاه گلستان

سال پنجم / شماره مسلسل هجدهم / تابستان ۱۴۰۳ / صفحات: ۱۲۸-۱۱۳



## فعالیت هسته‌زایی یخ توسط گرد و غبار حاصل از پهنه‌های ماسه‌ای در غرب دریاچه ارومیه و تعیین عوامل خاکی موثر بر آن

نیکو حمزه‌پور<sup>۱\*</sup>

<sup>۱</sup> دانشیار، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران، رایانامه: nhamzehpour@maragheh.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
<p>نوع مقاله: مقاله کامل علمی</p> <p>تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱/۱۴ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۳/۱۵</p> <p>واژه‌های کلیدی: دمای یخ‌زدگی ناهمگن درصد یخ‌زدگی ناهمگن کوارتز کلسیت هدایت الکتریکی</p>	<p>گرد و غبار حاصل از رسوبات برجای مانده از پسروی دریاچه ارومیه، می‌تواند منجر به هسته‌زایی یخ شده و به این طریق خصوصیات ابرهای شکل گرفته را تحت تاثیر قرار دهد. با توجه به این که این جنبه از اثرات طولانی مدت گرد و غبار حاصل از بستر دریاچه ارومیه به ندرت مورد توجه قرار گرفته است، هدف از پژوهش حاضر، مطالعه نقش گرد و غبار حاصل از پهنه‌های ماسه‌ای واقع در غرب دریاچه در هسته‌زایی یخ و تعیین خصوصیات خاکی اثرگذار بر آن می‌باشد. نمونه‌های گرد و غبار در چهار ماه مختلف در طی فصل خشک و با تله‌های رسوب‌گیر جمع‌آوری شدند. خصوصیات فیزیکوشیمیایی نمونه‌ها از جمله توزیع اندازه ذرات، ماده آلی، به همراه ترکیب شیمیایی و کانی‌شناسی نمونه‌ها با روش‌های مرسوم، اندازه‌گیری شدند. برای انجام مطالعات هسته‌زایی یخ، از روش انجماد غوطه‌وری با استفاده از دستگاه کالری‌سنج اسکن تفاضلی استفاده شد. دمای یخ‌زدگی ناهمگن بین ۲۴۴/۶ تا ۲۴۷/۸ درجه کلوین و درصد یخ‌زدگی ناهمگن بین ۴۶ الی ۷۳ درصد در نمونه‌های گرد و غبار، حاکی از پتانسیل بالای گرد و غبار حاصل از پهنه‌های ماسه‌ای در هسته‌زایی یخ است. بر اساس نتایج حاصل از این پژوهش، تغییرات در میزان فعالیت هسته‌زایی یخ در نمونه‌ها تحت تاثیر خصوصیات فیزیکوشیمیایی نمونه‌ها می‌باشد. مقدار فعالیت هسته‌زایی، همبستگی منفی با هدایت الکتریکی، درصد شن متوسط، کانی‌های آراگونیت و هالیت داشت. در مقابل، همبستگی مثبت با درصد رس، سیلت، شن ریز و کانی‌هایی همچون کلسیت و کوارتز دیده شد. بنابراین، فعالیت هسته‌زایی بالاتر در انتهای فصل خشک، می‌تواند ناشی از مقدار شوری کمتر در این نمونه‌ها باشد. افزایش تولید ریزگرد از سطوح با میزان بالای املاح، می‌تواند به میزان چشم‌گیری فعالیت هسته‌زایی یخ را نسبت به گرد و غبار غیرنمکی، کاهش دهد و از این طریق منجر به تغییر در خصوصیات ابرها و در نهایت تغییر در میزان بارندگی در منطقه شود.</p>

**استناد:** حمزه‌پور، نیکو. (۱۴۰۳). فعالیت هسته‌زایی یخ توسط گرد و غبار حاصل از پهنه‌های ماسه‌ای در غرب دریاچه ارومیه و تعیین عوامل خاکی موثر بر آن نشریه پژوهش‌های تغییرات آب و هوایی، ۵ (۱۸)، ۱۲۸-۱۱۳.

Doi: 10.30488/CCR.2024.450797.1205

ناشر: دانشگاه گلستان

© نویسندگان



## مقدمه

ذرات معلق هوا (PM) از منابع مختلف طبیعی و یا انسانی منشا می‌گیرند و دامنه وسیعی از خصوصیات شیمیایی، فیزیکی و مورفولوژیکی را می‌توانند دارا باشند. ذرات معلق هوا، مخلوطی از عناصر معدنی، کربن آلی، آمونیوم، نیترات، سولفات، عناصر سنگین و آب می‌باشند (Qin and Oduyemi, 2003). در مناطقی که منشا گرد و غبار، دریاچه‌ها و پلایاهای نمکی باشد، ذرات معلق هوا می‌توانند مقادیر زیادی نمک داشته باشند که می‌توانند برای اکوسیستم و سلامت جامعه بشری بسیار مضر و خطرناک باشند (Abuduwaili et al., 2010). در مقایسه با گرد و غبار معمول، گرد و غبار نمکی، حاوی مقادیر بسیار زیادی از مواد زیربافت نمکی و قلیایی شامل سولفات سدیم، کلرید سدیم و سایر مواد سمی می‌باشند و می‌توانند منجر به شوری و قلیائیت خاک‌های مناطق مجاور شوند. چنین پدیده‌ای در بسیاری از نقاط جهان از جمله دریاچه آرال و بالخاش در قزاقستان، جنوب غربی استرالیا و دیگر نقاط واقع در اقلیم خشک و نیمه‌خشک مشاهده شده است (Cahill and Gill, 1996; Abuduwaili et al., 2010; Middleton, 2017).

از سوی دیگر، ذرات گرد و غبار در کنار اثراتی که بر روی سلامت انسان‌ها و اراضی کشاورزی دارند، در فعالیت هسته‌زایی یخ (INA<sup>1</sup>) نیز نقش کلیدی بازی می‌کنند. این ذرات، برای تشکیل اولیه یخ و در نهایت بارندگی در عرض‌های میانی بسیار مهم هستند و در صورت نبود، تشکیل ابر و بارندگی اتفاق نخواهد افتاد (Mülmenstädt et al., 2015). در صورت نبود ذرات گرد و غبار در اتمسفر، قطرات آب می‌بایست تا دمای ۴۰- درجه سانتی‌گراد سرد شوند تا تشکیل ابر و بارندگی اتفاق بیفتد. در صورت وجود ذرات گرد و غبار در اتمسفر، قطرات آب می‌توانند از سطح ذرات گرد و غبار به عنوان سطوحی برای متمرکز شدن و متراکم شدن استفاده کنند و در این حالت تشکیل ابر در دماهای گرمتر نیز امکان‌پذیر می‌شود. مطالعات نشان

داده‌اند که ذرات گرد و غبار معدنی، فراوانترین و مهمترین نوع ذرات در هسته‌زایی یخ به حساب می‌آیند که می‌توانند منجر به ایجاد هسته‌های یخی در دماهای زیر ۲۵۸ کلوین شوند (Murray et al., 2012).

نقش ذرات گرد و غبار به‌عنوان INA به ترکیب کانی‌شناسی آنها نیز بستگی دارد. در دماهای بالاتر، ذرات گرد و غبار زیستی، نقش بیشتری بازی می‌کنند (Kanji et al., 2017; Testa et al., 2021). در میان فراوانترین کانی‌های موجود در گرد و غبارها، فلدسپارها بخصوص فلدسپار پتاسیم، مهمترین کانی‌ها در فعالیت هسته‌زایی یخ و تشکیل ابر در دماهای گرمتر می‌باشند (Atkinson et al., 2013). با این حال، نقش چنین کانی‌هایی به شدت تحت تاثیر عوامل دیگری از جمله ترکیب یونی و غلظت کاتیون‌های موجود می‌باشد (Yun, et al., 2021; Klumpp et al., 2022). نتایج مطالعات انجام شده با کانی‌های کوارتز نیز منجر به نتایج مشابه شده است (Kumar et al., 2019). پژوهش‌های اخیر نشان داده است که گرد و غبار حاصل از خاک‌های معمول در مقایسه با خاک-های مناطق بیابانی و خشک، INA بالاتری دارند که می‌توان دلیل آن را وجود املاح کمتر، ماده آلی و موجودات زیستی بیشتر در چنین خاک‌هایی دانست (O'Sullivan et al., 2014; Hill et al., 2016). بنابراین، وجود املاح محلول در ترکیب با گرد و غبار، می‌تواند قابلیت هسته‌زایی یخ ذرات معدنی موجود در گرد و غبار را تحت تاثیر قرار داده و با به تاخیر انداختن آن، بارندگی را نیز تحت تاثیر قرار دهد. پژوهش‌ها نشان داده‌اند که املاح محلول می‌توانند INA را از طریق کاهش فعالیت آب در فاز محلول و یا اشغال جایگاه‌های هسته‌زایی بر روی کانی‌ها، به تاخیر بیندازند (Perkins et al., 2020). با این حال مطالعات بسیار اندکی در خصوص ایجاد رابطه و همبستگی بین خصوصیات هسته‌زایی یخ و تشکیل ابر و نقش منابع اصلی این گرد و غبار (منشاء) صورت گرفته (Kaufmann et al., 2016; Boose et al., 2016) و هنوز پارامترهای اصلی دخیل در قدرت هسته‌زایی

<sup>1</sup> Ice nucleation activity

خاک با عنوان منبع گرد و غبار ۱ (DS<sub>1</sub>) و منبع گرد و غبار ۲ (DS<sub>2</sub>) یاد شده است (Hamzhepour et al., 2024). پیشتر، با آنالیزهای عنصری و کانی‌شناسی کمی و نیز محاسبه فاکتور غنی‌شدن خاک، نشان داده شده است که خاک‌های توسعه یافته در این منطقه، بیشترین مشارکت را در ترکیب گرد و غبار منطقه دارا هستند (Hamzhepour et al., 2022a). بنابراین در طول تابستان ۱۳۹۹، نمونه‌های خاک مرکب از هر کدام از خاک‌های شناسایی شده از عمق ۵-۰ سانتی‌متری خاک سطحی جمع‌آوری شدند. همچنین نمونه‌های گرد و غبار در چهار بازه زمانی مختلف، توسط دستگاه نمونه‌گیر رسوب با حجم بالا، در ماه‌های تیر (D<sub>T</sub>)، مرداد (D<sub>A</sub>)، مهر (D<sub>O</sub>) و آبان (D<sub>N</sub>) جمع‌آوری شده و برای انجام مطالعات بیشتر، به آزمایشگاه خاکشناسی دانشگاه مراغه منتقل گردیدند.

#### خصوصیات شیمیایی نمونه‌های خاک و گرد و غبار:

در نمونه‌های خاک و گرد و غبار جمع‌آوری شده، خصوصیات فیزیکوشیمیایی: درصد کربن آلی به روش سوزاندن تر (Nelson and Sommers, 1996)؛ هدایت الکتریکی (EC<sup>e</sup>) و واکنش خاک (pH) در نسبت ۱:۲/۵ خاک به آب به ترتیب با استفاده از دستگاه هدایت سنج الکتریکی (Jenway, model 4510) و دستگاه pH متر (VWR Symphony SB70P) و اندازه‌گیری کربنات کلسیم به روش تیتراسیون تعیین شد (Jackson, 2005).

**توزیع اندازه ذرات به روش پراش لیزر:** از آنجایی که توزیع اندازه ذرات برای پتانسیل خاک برای ماندن در هوا و حمل و نقل در فواصل طولانی مهم است، از یک آنالیزر پراش لیزری (LDSA<sup>۳</sup>) مدل LS 13320 متعلق به گروه منابع اراضی دانشگاه ETH زوریخ، برای تعیین توزیع اندازه ذرات نمونه‌ها بین اندازه ۰/۴ میکرومتر تا ۲۰۰۰ میکرومتر، استفاده شد. در انجام آنالیزهای توزیع اندازه ذرات، به منظور پراکنده‌سازی نمونه‌ها، قبل از شروع آزمایش، نمونه‌ها به مدت ۵ دقیقه در دستگاه فراصوت قرار داده شدند (Dane and

ذرات یخ نیاز به مطالعات بیشتری دارد. با توجه به ایجاد کانون‌های جدید گرد و غبار در سطوح برجای مانده از پسروری دریاچه‌های نمکی ایران از جمله دریاچه ارومیه، تاکنون هیچ مطالعه‌ای در خصوص نقش گرد و غبارهای نمکی بر روی هسته‌زایی یخ و تشکیل ابر و در نهایت، تاثیری که می‌تواند بر تغییرات اقلیمی در این مناطق بازی کند انجام نشده است. لذا هدف از پژوهش حاضر، مطالعه نقش گرد و غبار حاصل از پهنه‌های ماسه‌ای واقع در غرب دریاچه ارومیه در هسته‌زایی یخ و تعیین خصوصیات خاکی اثرگذار بر آن است.

#### مواد و روش‌ها

**معرفی منطقه مطالعاتی:** منطقه مطالعاتی در غرب دریاچه ارومیه و بخش شمالی شهر ارومیه، در مجاورت روستای جبل‌کندی واقع شده است. مختصات جغرافیایی آن بین طول جغرافیایی ۴۵° ۰۶' و ۲۳° ۴۵' شرقی و عرض جغرافیایی ۳۷° ۵۶' و ۳۷° ۹' شمالی واقع شده است. منطقه مطالعاتی در حدود ۳۰۰ هکتار از اراضی است که در مطالعات قبلی به عنوان پهنه‌های ماسه‌ای طبقه‌بندی شده‌اند (Hamzhepour et al., 2022a,b; Taghizadeh-Mehrjerdi et al., 2021). پهنه‌های ماسه‌ای نه تنها از طریق حرکت به سمت روستاها و زمین‌های کشاورزی مجاور، خطرات زیادی را برای ساکنین منطقه به وجود آورده‌اند، بلکه با دارا بودن بالغ بر ۸۰ درصد مواد سست فرسایش‌پذیر بادی، عامل بخش عمده‌ای از گرد و غبار منطقه‌ای در این بخش از کشور هستند. حرکت این ذرات گرد و غبار در جهت بادهای غالب (با جهت جنوب غربی) در طول فصل خشک (از تیر ماه تا آبان ماه) به سمت شهرهای مجاور از جمله ارومیه، می‌تواند سلامت ساکنین این مناطق را تحت تاثیر قرار دهد (Kheirfam, 2022).

**نمونه‌برداری:** بر اساس مطالعات نیمه‌تفصیلی انجام شده در منطقه مطالعاتی، دو نوع خاک غالب در این منطقه به عنوان سطوح اصلی دخیل در تولید گرد و غبار شناسایی شده است. در پژوهش حاضر، از این دو

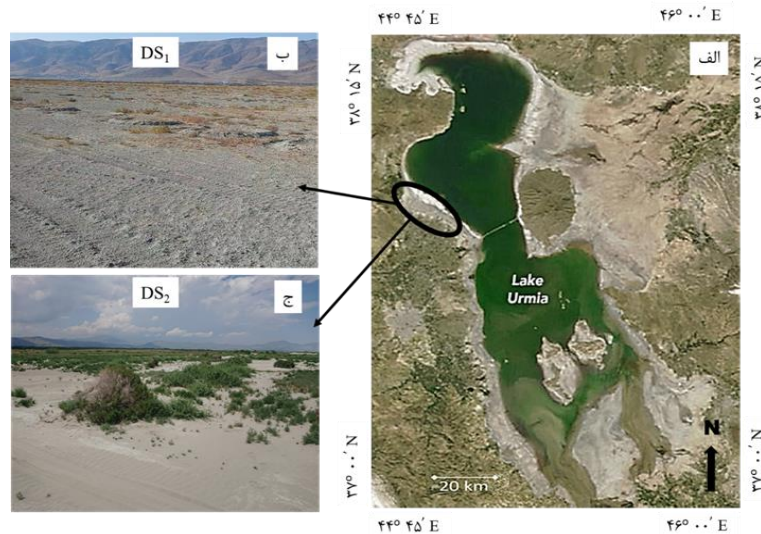
<sup>1</sup> Dust source

<sup>2</sup> Electrical conductivity

<sup>3</sup> Laser Diffraction Size Analyzer

میلی‌متر عبور داده شدند در حالی که نمونه‌های گرد و غبار، بدون الک شدن مورد آزمایش قرار گرفتند.

(Topp, 2020). شایان ذکر است که برای انجام آنالیزهای فیزیکوشیمیایی، نمونه‌های خاک از الک ۲



شکل ۱- الف: منطقه مطالعاتی در غرب دریاچه ارومیه در شمال غرب کشور. ب: منبع گردوغبار ۱ (DS1) و ج: منبع گردوغبار ۲ (DS2).

اندازه نمونه‌ها ابتدا به کمتر از ۵۳ میکرومتر کاهش می‌یابند و سپس در یک طیف‌سنج XRF با پراش انرژی شیماتزو، با یک منبع Rh تجزیه و تحلیل می‌شوند (Prandel et al., 2014).

**اندازه‌گیری فعالیت هسته‌زایی یخ در نمونه‌ها:** برای اندازه‌گیری‌های انجماد غوطه‌وری<sup>۱</sup>، از دستگاه کالری‌سنج اسکن تفاضلی Q10 (DSC) متعلق به گروه شیمی اتمسفری دانشگاه ETH زوریخ استفاده شد. آزمایش‌های انجماد امولسیون برای مشخص کردن میانگین بازده هسته‌زایی یخ نمونه‌های خاک و گرد و غبار انجام شد. همه نمونه‌ها از یک الک ۶۳ میکرومتری عبور داده شدند و در دو سطح غلظت (۲ درصد وزنی و ۵ درصد وزنی) در سوسپانسیون‌های آبی (آب MQW<sup>۳</sup>، سیگما آلدریج) مورد بررسی قرار گرفتند. پس از آماده سازی سوسپانسیون‌های نمونه، نمونه‌ها به مدت ۵ دقیقه به منظور جلوگیری از تجمع ذرات، سونیکیت شدند.

**پراش اشعه ایکس (XRD) و آنالیز فلوروسانس اشعه ایکس (XRF):** اندازه‌گیری پراش اشعه ایکس با استفاده از پراش سنج براگ- برنتانو (D8 Advance, Bruker AXS، آلمان) با استفاده از تابش CoK $\alpha$  (۳۵ کیلوولت، ۴۰ میلی آمپر) انجام شد. این ابزار مجهز به یک تنظیم خودکار بهینه‌سازی پرتو (شکاف جبران کننده واگرایی تتا، صفحه پخش خودکار هوا و یک آشکارساز Lynx-Eye XE-T) بود. نمونه‌های پودری در دمای اتاق از ۲ تا ۸۰ درجه ۲ تا (عرض مرحله ۰/۰۲ درجه ۲ تتا، زمان شمارش ۲ ثانیه در هر مرحله) اسکن شدند. تجزیه و تحلیل فاز کیفی با بسته نرم افزاری DIFFRACplus (Bruker AXS) انجام شد. فازها بر اساس موقعیت‌های اوج و شدت نسبی در مقایسه با پایگاه داده PDF-2 (مرکز بین المللی داده‌های پراش) شناسایی شدند. تجزیه و تحلیل نیمه کمی پراش اشعه ایکس برای کانی‌های رایج توسط نرم‌افزار شناسایی XPert HighScore Plus در پایگاه داده ICDD انجام شد. برای تعیین تجزیه و تحلیل XRF،

<sup>1</sup> Immersion freezing

<sup>2</sup> Differential scanning calorimeter

<sup>3</sup> Mili-Q water

جدول ۱- خصوصیات فیزیکوشیمیایی نمونه‌های خاک و گرد و غبار سفره‌های شنی غرب دریاچه ارومیه.

Sample	EC (dS/m)	TC (%)	OM (%)	pH	Particle size classes (< 2mm)						
					Clay (%)	silt (%)			sand (%)		
						fine	medium	coarse	fine	medium	coarse
Dust source 1	23.4	32.0	1.0	8.3	6.5	10.5	5.3	3.5	60.0	14.2	0
Dust source 2	0.39	49.1	0	8.6	1.1	0.5	0.9	0.9	48.1	36.1	12.4
Dust-July	26.0	25.2	1.7	8.6	2.7	1.1	1.7	0.9	59.2	35.1	2.0
Dust -August	43.9	43.0	1.3	8.4	2.9	1.2	0.4	0.4	51.0	43.6	3.4
Dust - October	2.4	38.6	1.2	8.6	0.0	0.7	1.1	0.6	73.4	21.3	2.9
Dust - November	2.8	52.7	1.3	8.5	1.0	0	0	0	66.7	31	1.3

EC: Electrical Conductivity; TC: Total Carbonates; OM: Organic Material; Clay: < 2  $\mu\text{m}$ ; Silt: 2–50  $\mu\text{m}$ , with fine (2–5  $\mu\text{m}$ ), medium (5–20  $\mu\text{m}$ ) and coarse (20–50  $\mu\text{m}$ ) fractions; Sand: 50–2000  $\mu\text{m}$ , with fine (50–200  $\mu\text{m}$ ), medium (200–500  $\mu\text{m}$ ), and coarse (500–2000  $\mu\text{m}$ ) fractions.

### نتایج و بحث

#### خصوصیات فیزیکوشیمیایی نمونه‌های خاک و

**گرد و غبار:** در جدول ۱ خصوصیات فیزیکوشیمیایی نمونه‌های خاک و گرد و غبار مطالعه شده، ارائه گردیده است. دو نمونه خاک غالب موجود در پهنه‌های ماسه‌ای واقع در منطقه جبل‌کندی، از نظر خصوصیات فیزیکوشیمیایی تفاوت‌های بارزی نشان دادند. خاک  $DS_1$  دارای هدایت الکتریکی (EC) بسیار بالاتر (۲۳/۴ در مقابل ۰/۳۸ دسی‌زیمنس بر متر)، درصد رس (۶/۵ در مقابل ۱/۱ درصد)، سیلت (۱۹/۳ در مقابل ۲/۳ درصد) و درصد ماده آلی (۱/۰ در مقابل صفر درصد) بیشتری نسبت به  $DS_2$  داشت. در مقابل، خاک  $DS_2$  درصد شن متوسط (۳۶/۱ در مقابل ۱۴/۲ درصد) و شن درشت (۱۲/۴ در مقابل صفر درصد) بالاتری نسبت به خاک  $DS_1$  دارا بود.

نمونه‌های گرد و غبار نیز تغییرات قابل توجهی را در طول زمان نشان دادند. بالاترین مقادیر EC در ابتدای فصل خشک (تیر و مرداد) با مقدار میانگین ۳۵ دسی‌زیمنس بر متر بود که این مقدار در انتهای فصل خشک، به میزان متوسط ۲/۶ دسی‌زیمنس بر متر کاهش یافت. وجود درصد رس (۲/۸ در مقابل ۰/۵ درصد) و درصد ماده آلی (۱/۵ در مقابل ۱/۲ درصد) بیشتر در ابتدای فصل خشک نسبت به انتهای آن به همراه مقادیر EC نشان دادند که خاک  $DS_1$  در ابتدای فصل خشک مشارکت بالاتری در ترکیب گرد و غبار بازی می‌کند و به سمت انتهای فصل خشک، به دلیل تبخیر زیاد، حرکت کاپیلاری نمک به سمت سطح این

سپس سوسپانسیون‌ها با مخلوطی از روغن معدنی و لانولین (هر دو سیگما آلدریج) به نسبت ۴:۱ ترکیب شده و با هموژنایزر استاتور روتور<sup>۱</sup> به مدت ۴۰ ثانیه با ۷۰۰۰ دور در دقیقه هم‌زده شدند. سپس در حدود ۵ الی ۱۰ میلی‌گرم از امولسیون در یک سینی آلومینیومی<sup>۲</sup> قرار داده شده، در آن فشرده شده و در دستگاه DSC قرار گرفتند. چرخه‌های سرمایش و گرمایش با سرعت ۱ کلوین در دقیقه (K/min) در محدوده دمایی برای انجماد و ذوب اجرا شدند. از این نتایج برای ارزیابی دمای شروع انجماد قله‌های انجماد ناهمگن ( $T_{het}^3$ )، همگن ( $T_{hom}$ ) و درصد انجماد ناهمگن ( $F_{het}^4$ ) به طریقی که Kumar et al. (2018) توضیح داده شده است، استفاده شد. برای آزمایش پایداری امولسیون‌ها، برخی از نمونه‌ها تحت سه چرخه انجماد طبق روشی که توسط Marcolli et al. (2007) معرفی شده است، قرار گرفتند. امولسیون‌ها قبل از هر آزمایش به صورت تازه آماده شدند و هر آزمایش با دو تکرار انجام شد. همبستگی بین خصوصیات خاکی و فعالیت هسته‌زایی یخ از طریق محاسبه ضرایب پیروسون بین خصوصیات خاکی و پارامترهای هسته زایی یخ ( $F_{het}$  و  $T_{het}$ ) در دو سطح ۲ درصد و ۵ درصد وزنی و با استفاده از نرم افزار SPSS 16 انجام شد.

<sup>1</sup> Polytron PT 1300D with a PT-DA 1307/2EC dispersing aggregate

<sup>2</sup> Hermetic pan

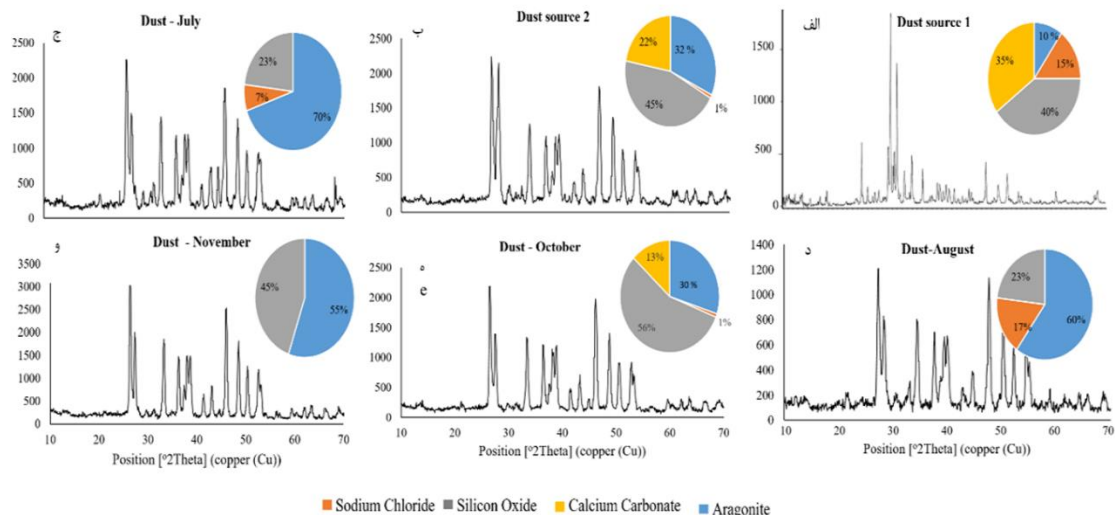
<sup>3</sup> Heterogenous freezing temprature

<sup>4</sup> Heterogenous frozen fraction

کربنات‌ها از اجزای اصلی تشکیل دهنده گرد و غبار (Díaz-Hernández et al., 2011; Al-Dabbas et al., 2012; Rashki et al., 2013; Ahmady-Birgani et al., 2015). با این حال، با وجود آنکه کانی‌های کربناته کلسیت و آراگونیت در دو خاک  $DS_1$  و  $DS_2$  وجود دارد، کانی آراگونیت بخش عمده ترکیب کربناته را در گرد و غبار به خود اختصاص می‌دهد. از آنجایی که آراگونیت در خاک‌ها بیشتر منشا زمین‌شناسی دارد، اندازه درشت‌تر آن، می‌تواند منجر به واکنش‌پذیری کمتر آن با دیگر اجزای خاک شده و در نتیجه منجر به جداسدن آسانتر آن از سطح خاک توسط باد، گردد.

خاک و تشکیل یک پوسته نمکی در سطح، منجر به پایداری بیشتر این منطقه شده و در نتیجه خاک  $DS_2$  به کانون اصلی گرد و غبار تبدیل می‌شود.

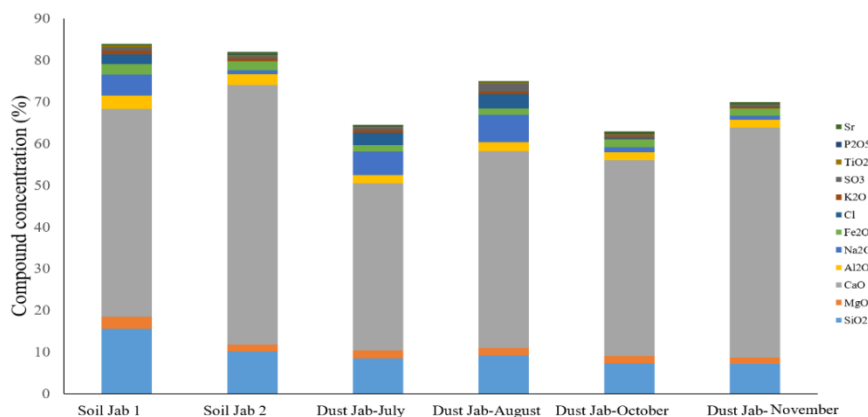
**کانی‌شناسی نمونه‌های خاک و گرد و غبار و ترکیب شیمیایی آنها:** در شکل ۲ نتایج کانی‌شناسی نیمه‌کمی نمونه‌های خاک و گرد و غبار مطالعه شده که فراوان‌ترین مقادیر را دارا بودند، نمایش داده شده است. کانی‌های کوارتز، کلسیت، آراگونیت و هالیت به عنوان غالب‌ترین کانی‌های غیرفلوروسیلیکاته تشکیل دهنده خاک‌ها و گرد و غبار حاصل از پهنه‌های ماسه‌ای شناسایی شدند. مطالعات متعدد در بخش‌های مختلف جهان نیز نشان داده‌اند که کانی‌های کلسیت و



شکل ۲- پراش اشعه ایکس نمونه‌های خاک و گرد و غبار پهنه‌های ماسه‌ای غرب دریاچه ارومیه. تجزیه و تحلیل نیمه‌کمی پراش اشعه ایکس برای کانی‌های رایج توسط نرم افزار شناسایی XPert HighScore Plus در پایگاه داده ICDD انجام شد.

می‌باشند. این نتایج مشابه نتایج به دست آمده در بخش کانی‌شناسی نمونه‌ها می‌باشد. همچنین مقادیر  $Na_2O$  و  $Cl$  نیز در انطباق با نتایج هدایت الکتریکی و کانی‌شناسی بود. اکسیدهای آهن و آلومینیوم، منیزیم، تیتانیوم و نیز استرانسیوم نیز از ترکیبات تشکیل دهنده نمونه بودند.

مشابه نتایج به دست آمده در اندازه‌گیری هدایت‌الکتریکی نمونه‌ها، در نمونه‌های با میزان شوری بالاتر ( $DS_1$ ،  $DS_2$ ،  $DA$  و  $DI$ ) کانی هالیت بیش از سایر نمونه‌ها مشاهده شد. در شکل ۳ نتایج مربوط به آنالیز نمونه‌ها با روش آنالیز فلوروسانس اشعه ایکس (XRF) ارائه شده است. براساس این شکل،  $CaO$ ،  $SiO_2$  و در مواردی  $Na_2O$  ترکیبات اصلی تشکیل دهنده نمونه‌ها



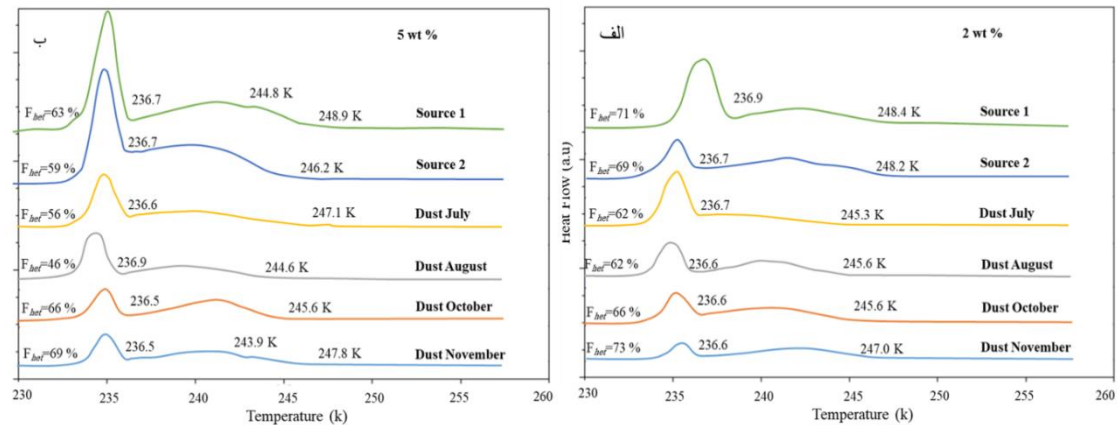
شکل ۳- نتایج آنالیز فلوروسانس اشعه ایکس (XRF) و شناسایی ترکیبات شیمیایی موجود در نمونه‌ها.

سطح ۵ درصد وجود داشت که در سطح غلظتی ۲ درصد، در هر دوی این پیک‌ها، ناپدید شدند. دلیل از بین رفتن پیک دوم در این دو نمونه، می‌تواند مربوط به وجود ذرات با پتانسیل هسته‌زای یخ معدودی باشد که در این نمونه‌ها وجود دارد و با کاهش غلظت نمونه به ۲ درصد، اثرگذاری آنها بر هسته‌زایی یخ و در نتیجه مشاهده سیگنال وجود آنها، از بین می‌رود. به جز نمونه‌های  $DS_2$  و  $DA$ ، دمای یخزدگی ناهمگن با مقادیر بیشتر، در سطح غلظتی ۵ درصد دیده شد. در مقابل در غلظت‌های کمتر، مقادیر بالاتر  $F_{het}$  مشاهده شد. این اتفاق نشان می‌دهد که برهمکنش‌ها و اثرات بازدارندگی بین اجزای تشکیل دهنده نمونه‌ها وجود دارد که منجر به کاهش درصد یخزدگی در سطوح غلظتی بالاتر می‌شود.

در میان نمونه‌های گرد و غبار، هر دوی پارامترهای  $T_{het}$  و  $F_{het}$  از شروع فصل خشک (تیر ماه) به سمت انتهای آن (آبان ماه) در سطح غلظتی ۲ درصد وزنی، افزایش یافتند. این امر می‌تواند به دلیل کاهش غلظت املاح در نمونه‌های گرد و غبار در انتهای فصل خشک باشد. در نتیجه حذف اثرات بازدارنده املاح، منجر به افزایش فعالیت هسته‌زایی یخ توسط ذرات موجود در نمونه بخصوص کوارتز می‌شود (Hamzehpour et al., 2022b).

فعالیت هسته‌زایی یخ در نمونه‌ها و نقش خصوصیات خاکی در دمای یخ‌زدگی: در شکل ۴ ترموگرام‌های مربوط به دمای یخ‌زدگی همگن ( $T_{hom}$ ) و ناهمگن ( $T_{het}$ ) نمونه‌های مطالعه شده به همراه درصد یخ‌زدگی ناهمگن ( $F_{het}$ )، به روش انجماد غوطه‌وری با دستگاه کالری‌سنج اسکن تفاضلی در دو سطح غلظتی ۲ و ۵ درصد وزنی، ارائه شده است. بر اساس این نتایج، شروع یخ‌زدگی همگن در نمونه‌ها در دمایی بین  $236/5$  الی  $236/9$  درجه کلوین شروع شد. با این حال، دمای آغازین یخ‌زدگی ناهمگن، در دامنه وسیعی از دماها مابین  $244/6$  الی  $248/9$  درجه کلوین در غلظت ۵ درصد وزنی و  $245/3$  الی  $248/4$  درجه کلوین در غلظت ۲ درصد وزنی اتفاق افتاد. در هر دو سطح غلظتی، نمونه خاک  $DS_1$ ، بالاترین دمای یخ‌زدگی ناهمگن با مقادیر  $248/4$  و  $248/9$  درجه کلوین به ترتیب در سطح ۲ درصد و ۵ درصد وزنی را دارا بود. این در حالی بود که  $F_{het}$  با مقادیر  $73/2$  و  $68/6$  درصد، به ترتیب در سطح ۲ و ۵ درصد وزنی، متعلق به نمونه گرد و غبار نوامبر ( $DN$ ) بود. حداقل  $T_{het}$  در سطح ۲ درصد، در نمونه  $D_I$  با مقدار  $245/3$  درجه کلوین و در سطح ۵ درصد، در نمونه  $DA$  با مقدار  $244/6$  درجه کلوین تعیین شد.

تنها در دو نمونه  $DS_1$  و  $DN$ ، دومین پیک یخ‌زدگی ناهمگن در دمایی در حدود  $244$  کلوین و در



شکل ۴- ترموگرام‌های DSC مربوط به دو نمونه خاک از پهنه‌های ماسه‌ای و چهار نمونه گرد و غبار جمع آوری شده در طی ماه‌های تیر، مرداد، مهر و آبان از مجاورت پهنه‌های ماسه‌ای غرب دریاچه ارومیه. الف: غلظت ۲ درصد وزنی و ب: غلظت ۵ درصد وزنی. اعداد نمایش داده شده در سمت چپ به صورت درصد انجماد ناهمگن ( $F_{het}$ ) هستند. دمای یخزدگی ناهمگن ( $T_{het}$ ) در نقطه شروع پیک‌های انجماد ناهمگن، ارائه شده‌اند.

نمونه‌ها در فعالیت هسته‌زایی توسط آنها، ضرایب همبستگی پیرسون ( $CC^1$ ) بین مقادیر  $F_{het}$  و  $T_{het}$  اندازه‌گیری شده در هر دو سطح غلظتی با تمامی خصوصیات فیزیکوشیمیایی تعیین شده در این پژوهش، محاسبه شده و در جدول ۲ ارائه شده‌اند. از میان خصوصیات فیزیکوشیمیایی پایه‌ای خاک، EC در هر دو سطح ۲ و ۵ درصد وزنی، همبستگی منفی با  $F_{het}$  نشان داد (مقادیر CC به ترتیب  $-0.064$  و  $-0.083$ ). این امر به خوبی مقادیر کم  $F_{het}$  در نمونه‌های  $D_A$  و  $D_A$  که مقدار EC بالایی داشتند را توجیه می‌کند (مقادیر EC به ترتیب  $26/0$  و  $43/9$  دسی‌زیمنس بر متر). با این حال، نمونه  $DS_1$  با مقدار EC برابر با  $23/4$  دسی‌زیمنس بر متر، همچنان نمونه فعال تری از بقیه نمونه‌ها بود.

در میان کلاس‌های توزیع اندازه ذرات،  $T_{het}$  همبستگی مثبت با درصد رس نمونه‌ها در سطح ۵ درصد وزنی نشان داد (CC برابر  $0/55$ ). همچنین  $T_{het}$  همبستگی مثبت با تمام رده‌های اندازه‌گیری شده برای سیلت در هر دو سطح غلظتی داشت، با مقادیر میانگین CC به ترتیب  $0/54$  و  $0/64$ . در حالی که شن ریز همبستگی مثبت با  $F_{het}$  در سطح ۵ درصد وزنی نشان داد (CC برابر  $0/72$ )، شن متوسط، اثر منفی بر

در سطح غلظتی ۵ درصد وزنی، اندکی تفاوت در مقادیر  $T_{het}$  و  $F_{het}$  دیده شد. در حالی که  $D_A$  کمترین مقدار  $T_{het}$  را در سطح ۲ درصد وزنی ( $234/3$  درجه کلون) داشت، در سطح ۵ درصد، مقدار  $T_{het}$  آن به  $247/1$  درجه کلون افزایش یافت. دلیل این امر می‌تواند بالاتر بودن ماده آلی در این نمونه در میان تمامی نمونه‌های مطالعه شده باشد (ماده آلی برابر  $1/7$  درصد بود). از آنجایی که ماده آلی می‌تواند منجر به افزایش شدید INA در نمونه‌های گرد و غبار شود (Klumpp et al., 2022)، در سطح ۵ درصد وزنی، احتمالاً به دلیل وجود ذرات آلی بیشتر در مقایسه با سطح ۲ درصد، فعالیت هسته‌زایی یخ به طرز معناداری افزایش نشان داده است. نمونه  $D_A$  کمترین مقدار  $F_{het}$  در هر دو سطح غلظتی را دارا بود و همچنین کمترین مقدار  $T_{het}$  ( $244/6$  درجه کلون در سطح ۲ درصد) را نیز در بین نمونه‌ها به خود اختصاص داد. بالاترین مقدار EC ( $43/9$  دسی‌زیمنس بر متر) و آهک (۴۳ درصد) می‌توانند از عوامل اصلی فعالیت هسته‌زایی ضعیف در این نمونه باشد.

تا این مرحله از مطالعه، نتایج نشان داد که در طی یک بازه زمانی کوتاه مدت چندماهه، قدرت هسته‌زایی ذرات گرد و غبار می‌تواند تحت تاثیر تغییرات در خصوصیات فیزیکوشیمیایی آنها، به شدت تغییر کند. به منظور تعیین نقش هر یک از اجزای تشکیل دهنده

<sup>1</sup> Pearson correlation coefficients

مونتموریونیت، کانی‌های فعال از نظر هسته‌زایی یخ به حساب می‌آیند (Pinti et al., 2012; Atkinson et al., 2013; Kumar et al., 2018; 2019). همانطور که پیشتر نیز اشاره شد، حداکثر مقدار  $F_{het}$  در نمونه  $D_N$  اندازه‌گیری شد. براساس یافته‌های حاصل از این پژوهش، مقدار EC کم، همراه با مقدار بالای شن ریز در این نمونه، میتواند بخشی از INA بالای این نمونه را توجیه کند.

$F_{het}$  و  $T_{het}$  در هر دو سطح غلظتی داشت (جدول ۴). نمونه  $DS_1$  بالاترین مقدار رس و سیلت را در بین نمونه‌ها دارا بود (جدول ۱) و همچنین کمترین مقدار شن متوسط نیز در این نمونه دیده شد. همبستگی مثبت مقادیر رس و سیلت با  $T_{het}$  و  $F_{het}$  و همبستگی منفی شن متوسط با آنها، می‌تواند دلیلی بر فعالیت هسته‌زایی بالا در نمونه  $DS_1$  (شکل ۴)، علی‌رغم وجود املاح زیاد در این نمونه باشد. مطالعات متعدد نشان داده‌اند که کانی‌های رسی همانند کائولینیت، ایلیت و

جدول ۲- ضرایب همبستگی پیرسون بین  $F_{het}$  و  $T_{het}$  (با درصد‌های وزنی ۲ و ۵ درصد وزنی) و ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی و کانی‌شناسی خاک و نمونه‌های گرد و غبار.

Physicochemical properties											
	EC	TC	OM	pH	Clay	Silt-fine	Silt-medium	Silt-coarse	Sand-fine	Sand-medium	Sand-coarse
$F_{het}$ 5%	-0.83	0.21	-0.1	0.19	-0.24	0.09	0.13	0.1	0.72	-0.69	-0.18
$T_{het}$ 5%	-0.22	-0.23	0.06	-0.36	0.55	0.64	0.66	0.63	0.23	-0.64	-0.41
$F_{het}$ 2%	-0.64	0.51	-0.37	-0.22	0.06	0.28	0.2	0.24	0.26	-0.51	-0.03
$T_{het}$ 2%	-0.37	0.32	-0.73	-0.38	0.39	0.55	0.49	0.58	-0.29	-0.4	0.31
Chemical compounds											
	SiO <sub>2</sub>	MgO	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cl	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Sr
$F_{het}$ 5%	-0.07	0.03	0.31	-0.04	-0.76	0.43	-0.77	-0.15	-0.85	0.62	0.58
$T_{het}$ 5%	0.55	0.59	0.08	0.46	-0.06	0.55	-0.10	0.52	-0.53	0.32	0.21
$F_{het}$ 2%	0.25	0.18	0.66	0.32	-0.63	0.66	-0.67	0.14	-0.52	0.13	0.76
$T_{het}$ 2%	0.68	0.45	0.76	0.78	-0.32	0.90	-0.38	0.63	-0.26	0.06	0.69
Minerals											
	Calcite	Aragonite	Quartz	Halite							
$F_{het}$ 5%	0.29	-0.44	0.81	-0.68							
$T_{het}$ 5%	0.46	-0.37	0.14	-0.03							
$F_{het}$ 2%	0.43	-0.51	0.62	-0.39							
$T_{het}$ 2%	0.79	-0.71	0.37	-0.04							

توان هسته‌زایی ذرات گرد و غبار، همچنین به ترکیب کانی‌شناسی آن نیز مربوط می‌شود. در حالی که کوارتز، فلدسپار (بخصوص از نوع پتاسیم‌دار)، و کانی‌های رسی از جمله کائولینیت، ایلیت و مونتموریونیت از نظر هسته‌زایی یخ فعال به حساب می‌آیند (Kumar et al., 2018; 2019). کانی‌هایی همچون کلسیت و دولومیت اثر منفی بر INA ذرات گرد و غبار دارند (Kaufmann et al., 2016; Hmazehpour et al., 2022b). ضرایب همبستگی بین  $F_{het}$  و  $T_{het}$  نمونه‌ها با ترکیب کانی‌شناسی و عنصری آنها در جدول ۲ نمایش داده شده‌اند. براساس این نتایج، همبستگی مثبت بین  $T_{het}$  و  $SiO_2$ ،  $MgO$ ،  $Al_2O_3$  و  $K_2O$  دیده شد. به استثنای  $MgO$ ، بالاترین مقادیر CC در سطح غلظت ۲ درصد وزنی دیده شد.

با وجود آنکه در پژوهش حاضر، همبستگی معناداری بین INA و ماده آلی مشاهده نشد و حتی همبستگی منفی بین آن و  $T_{het}$  در سطح ۲ درصد وزنی دیده شد، بر اساس پژوهش‌های متعدد، ماده آلی اثر مثبت و معناداری بر فعالیت هسته‌زایی یخ دارد (O'Sullivan et al., 2014; Hill et al., 2016). بنابراین، INA بالا در نمونه  $DS_1$ ، می‌تواند ماحصل برآیند مقدار رس و سیلت و ماده آلی بالاتر در این نمونه نسبت به  $DS_2$  باشد. همانطور که پیشتر اشاره شد، با وجود آنکه املاح محلول اثر کاهندگی بر INA دارد، درصد بالاتر رس و سیلت و ماده آلی در نمونه  $DS_1$  بر اثرات منفی EC بالاتر در این نمونه نسبت به  $DS_2$  غلبه کرده است.

بیوتیت در نمونه‌های خاک و گرد و غبار مربوط به پهنه‌های ماسه‌ای، تایید شده است (Hamzhepour et al., 2022b).

در میان کانی‌های با فراوانی زیاد، کلسیت و کوارتز همبستگی مثبت و هالیت و آراگونیت، همبستگی منفی با INA نمونه‌ها نشان دادند. این نتایج در انطباق با نتایج مربوط به آنالیز شیمیایی نمونه‌ها است که در آن نشان داده شد که  $\text{SiO}_2$  و  $\text{CaO}$  به صورت مثبت و  $\text{Na}_2\text{O}$  و  $\text{Cl}$ ، به صورت منفی بر فعالیت هسته‌زایی نمونه‌ها اثر می‌گذارند. (Hamzheppur et al., 2022a). نیز نشان داده‌اند که INA نمونه‌های خاک و گرد و غبار از بخش‌های مختلف پلایای دریاچه ارومیه، همبستگی مثبت با مقدار کلسیت و همبستگی منفی با مقدار آراگونیت دارد. دلیل این امر می‌تواند شکل شبکه بلوری این دو کانی و وجود مناطق با توان هسته‌زایی بیشتر در کانی کلسیت با شبکه بلوری مکعبی نسبت به آراگونیت با شبکه بلوری استوانه‌ای یا سوزنی است. نقش منفی آراگونیت در هسته‌زایی یخ می‌تواند دلیلی بر INA کمتر در نمونه‌های گرد و غبار در مقایسه با نمونه‌های خاک در منطقه مطالعاتی باشد.

### نتیجه گیری

مطالعه خاک و گرد و غبار حاصل از پهنه‌های ماسه‌ای واقع در غرب دریاچه ارومیه به منظور بررسی نقش آنها در هسته‌زایی یخ و تشکیل ابر و عوامل خاکی اثرگذار بر شدت فعالیت هسته‌زایی ذرات گرد و غبار صورت گرفت. بدین منظور، دو خاک غالب از پیش شناسایی شده از پهنه‌های ماسه‌ای به همراه چهار نمونه گرد و غبار در طی فصل خشک (تیر ماه تا آبان ماه) سال ۱۳۹۹ جمع‌آوری شدند. خصوصیات فیزیکوشیمیایی پایه‌ای از جمله هدایت الکتریکی، pH و بافت خاک توسط روش‌های مرسوم مطالعات تعیین شدند. کانی‌شناسی جز غالب نمونه‌های گرد و غبار به همراه آنالیز ترکیب شیمیایی آنها نیز انجام شد و فعالیت هسته‌زایی یخ نمونه‌ها در دو سطح غلظتی ۲ و ۵ درصد وزنی توسط دستگاه کالری‌سنج اسکن

همچنین INA ذرات، همبستگی مثبت با  $\text{CaO}$  (در سطح ۲ درصد وزنی)،  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  و  $\text{Sr}$  (در هر دو سطح غلظتی ۲ و ۵ درصد وزنی) نشان داد. این درحالی است که INA همبستگی منفی با  $\text{Na}_2\text{O}$ ،  $\text{Cl}$  و  $\text{SO}_3$  داشت. همبستگی مثبت و بالای بین اکسیدهای آهن و آلومینیوم با  $T_{\text{het}}$  در سطح ۲ درصد وزنی (CC) به ترتیب برابر ۰/۷۸ و ۰/۹ (نشان داد که وجود چنین ترکیباتی در نمونه‌های گرد و غبار، می‌تواند دمای یخ‌زدگی ناهمگن را افزایش داده (به سمت دماهای گرمتر) و به این ترتیب هسته‌زایی یخ را تسهیل کنند (Chong et al., 2021).

وجود پتاسیم در خاک‌ها یا منشا زمین شناسی دارد که از طریق تجزیه رسوبات یا سنگ‌های غنی از کانی‌های پتاسیم‌دار مثل میکا یا فلدسپار، در خاک‌ها آزاد می‌شوند و یا محصل استفاده از ترکیبات حاوی پتاسیم همچون کودهای پتاسیمی در خاک‌ها می‌باشد. از آنجایی که در بخش زیادی از منطقه مطالعاتی، کشت و کار انجام نمی‌شود، منشا کودهای پتاسمی به‌عنوان منبع پتاسیم منتفی می‌شود و به احتمال زیاد، مقادیر  $\text{K}_2\text{O}$  در نمونه‌ها، مربوط به کانی‌های خاک است. بنابراین، همبستگی مثبت بین  $\text{K}_2\text{O}$  و  $T_{\text{het}}$  هر دو سطح غلظتی با مقادیر CC به ترتیب ۰/۵۲ و ۰/۶۳، مربوط به کانی‌های خاک است. نتایج پژوهش‌های متعدد نشان داده‌اند که فلدسپار پتاسیم بخصوص میکروکلین منجر به هسته‌زایی یخ در دماهای بالاتری نسبت به فلدسپار کلسیم و سدیم می‌شوند (Peckhaus et al., 2016; Kumar et al., 2018; Kaufmann et al., 2016). از این رو فلدسپار پتاسیم به عنوان یکی از عناصر کلیدی در هسته‌زایی یخ در نظر گرفته می‌شوند (Atkinson et al., 2013). متأسفانه به دلیل عدم انجام کانی‌شناسی بخش رس در نمونه‌ها و همچنین تنها تعیین کانی‌های با بالاترین غلظت در نمونه‌ها، امکان شناسایی دقیق کانی‌های فلدسپار و نیز کانی‌های رسی موجود، فراهم نشد. با این حال، در یک مطالعه دقیق در غرب دریاچه ارومیه، وجود کانی‌های رسی مثل کائولینیت و مونتموریونیت و نیز کانی فلدسپار پتاسیم مثل میکروکلین و کانی

آراگونیت در نمونه‌های گرد و غبار، نمونه‌های خاک منطقه از نظر هسته‌زایی یخ، فعال‌تر از نمونه‌های گرد و غبار بودند. بالا بودن درصد رس و سیلت در نمونه خاک  $DS_1$  نسبت به نمونه  $DS_2$  منجر شده است که اثرات بازدارندگی شوری در این نمونه تا حدود زیادی مرتفع شود.

به عنوان جمع‌بندی از این پژوهش می‌توان گفت ترکیب شیمیایی گرد و غبار در طول زمان متغیر بوده و فعالیت هسته‌زایی آنها بسیار تحت تاثیر کانون‌های گرد و غباری است که از آنها منشا گرفته‌اند. گرد و غبارت نمکی حاصل از بستر دریاچه ارومیه در کل فعالیت هسته‌زایی کمتری نسبت به گرد و غبارت غیرنمکی دارند. صحبت از اثرات نهایی گرد و غبار حاصل از این منطقه یا دیگر کانون‌های گرد و غبار واقع در حاشیه دریاچه ارومیه در اقلیم منطقه و بارندگی، خارج از مطالعات انجام شده در این پژوهش است. با این حال، به دلیل وجود ذرات فعال از نظر هسته‌زایی یخ در رسوبات برجای مانده از پسروری دریاچه ارومیه، اثراتی که ممکن است این گرد و غبارت بر میزان فعالیت هسته‌زایی یخ در منطقه بگذارند، در صورتی که جریان‌ات اتمسفری اجازه حرکت آنها به لایه‌های بالای اتمسفر را بدهد، ممکن است امکان ایجاد هسته‌های یخی و تشکیل ابر و در نهایت بارندگی را در حضور بخارات آب تشدید کند.

### تشکر و قدردانی

آزمایشات هسته‌زایی یخ و اندازه‌گیری توزیع اندازه ذرات در نمونه‌ها، با استفاده از دستگاه‌های موجود در دپارتمان علوم محیط زیستی (Environmental System Science)، و در گروه‌های شیمی اتمسفری (Department of Atmospheric Science) و گروه منابع اراضی (Land Resources) دانشگاه ETH و حمایت مالی آن دانشگاه انجام شده‌اند و به این طریق تشکر و قدردانی می‌گردد. همچنین از سازمان منابع طبیعی استان آذربایجان غربی برای همکاری در تهیه نمونه‌های گرد و غبار قدردانی می‌گردد.

تفاضلی (DSC) صورت گرفت. نتایج این پژوهش نشان داد که فعالیت هسته‌زایی ذرات گرد و غبار حاصل از پهنه‌های ماسه‌ای، در طول زمان ثابت نبوده و در بازه‌های زمانی مختلف و تحت تاثیر ترکیب فیزیکوشیمیایی نمونه، افزایش یا کاهش می‌یابد. بر اساس یافته‌های این پژوهش، خاک‌هایی که پیشتر به عنوان منشا گرد و غبار در منطقه شناسایی شده‌اند، تفاوت‌هایی در توزیع اندازه ذرات، ماده آلی و ترکیب شیمیایی با یکدیگر دارند. بسته به میزان مشارکت هر کدام از این خاک‌ها در ترکیب گرد و غبار، فعالیت هسته‌زایی نمونه‌ها تغییر می‌کند. به‌طور کلی نمونه‌های خاک، فعالیت هسته‌زایی بالاتری نسبت به نمونه‌های گرد و غبار منشا گرفته از آنها، داشتند. دمای یخزدگی همگن آب ( $T_{hom}$ ) در حدود  $236/5$  درجه کلونین اتفاق می‌افتد. در حضور نمونه‌های مورد مطالعه، حداقل افزایش دمای یخزدگی ناهمگن ( $T_{het}$ ) (شروع یخزدگی در دماهای گرمتر) در حضور گرد و غبار مرداد ماه با دمای  $245/6$  و  $244/6$  درجه کلونین به ترتیب در سطح ۲ و ۵ درصد وزنی دیده شد که در حدود ۹ درجه کلونین گرمتر از شرایط نبود ذرات گرد و غبار است. بالاترین دمای یخزدگی و درصد یخ‌زدگی ناهمگن ( $F_{het}$ ) در بین نمونه‌های گرد و غبار، در نمونه خاک آبان ماه اندازه‌گیری شد که به ترتیب و به‌طور متوسط بین  $247/5$  درجه کلونین و ۷۱ درصد بود که  $11/5$  درجه گرمتر از شرایط نبود این گرد و غبار بود. بررسی همبستگی پارامترهای  $T_{het}$  و  $F_{het}$  با خصوصیات فیزیکوشیمیایی و کانی‌شناسی نمونه‌ها نشان داد که هدایت الکتریکی (EC)، شن متوسط،  $Na_2O$ ، کانی هالیت و آراگونیت همبستگی منفی و میزان رس و سیلت، شن ریز،  $Al_2O_3$ ،  $Fe_2O_3$ ، کانی کوارتز و کلسیت، همبستگی مثبت با فعالیت هسته‌زایی نمونه‌ها دارد. از ابتدای فصل خشک (تیر ماه) به سمت انتهای آن (آبان ماه) به دلیل کاهش مشارکت نمونه خاک با شوری بالاتر ( $DS_1$ )، بر شدت فعالیت هسته‌زایی نمونه‌های گرد و غبار افزوده می‌شود. همچنین به‌طور کلی به دلیل غلبه کانی کلسیت در نمونه‌های خاک و در مقابل، فراوانی کانی

## منابع

- Abuduwaili, J., Dong Wei, L.I.U. and GuangYang, W.U., 2010. Saline dust storms and their ecological impacts in arid regions. *Journal of arid land*, 2(2), 144-150.
- Ahmady-Birgani, H., Mirnejad, H., Feiznia, S., and McQueen, K.G., 2015. Mineralogy and geochemistry of atmospheric particulates in western Iran. *Atmospheric Environment*, 119, 262-272.
- Al-Dabbas, M.A., Ayad Abbas, M., and Al-Khafaji, R.M., 2012. Dust storms loads analyses—Iraq. *Arabian Journal of Geosciences*, 5(1), 121-131.
- Atkinson, J.D., Murray, B.J., Woodhouse, M.T., Whale, T.F., Baustian, K.J., Carslaw, K.S., Dobbie, S., O’Sullivan, D. and Malkin, T.L., 2013. The importance of feldspar for ice nucleation by mineral dust in mixed-phase clouds, *Nature*, 498, 355–358.
- Boose, Y., Welti, A., Atkinson, J., Ramelli, F., Danielczok, A., Bingemer, H. G., ... and Lohmann, U., 2016. Heterogeneous ice nucleation on dust particles sourced from nine deserts worldwide—Part 1: Immersion freezing. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 16(23), 15075-15095.
- Cahill, T. A., Gill, T.E., Reid, J.S., Gearhart, E.A., and Gillette, D. A., 1996. Saltating particles, playa crusts and dust aerosols at Owens (dry) Lake, California. *Earth Surface Processes and Landforms*, 21(7), 621-639.
- Chong, E., Marak, K.E., Li, Y., and Freedman, M.A., 2021. Ice nucleation activity of iron oxides via immersion freezing and an examination of the high ice nucleation activity of FeO. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 23(5), 3565-3573.
- Dane, J.H., and Topp, C. G. (Eds.), 2020. *Methods of soil analysis, Part 4: Physical methods (Vol. 20)*. John Wiley & Sons.
- Díaz-Hernández, J.L., Martín-Ramos, J.D., and López-Galindo, A., 2011. Quantitative analysis of mineral phases in atmospheric dust deposited in the south-eastern Iberian Peninsula. *Atmospheric Environment*, 45(18), 3015-3024.
- Hamzehpour, N., Marcolli, C., Pashai, S., Klumpp, K., and Peter, T., 2022a. The Urmia Playa as source of airborne dust and ice nucleating particles—Part 1: Correlation between soils and airborne samples. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 22, 14905-14930.
- Hamzehpour, N., Marcolli, C., Klumpp, K., Thöny, D., and Peter, T., 2022b. The Urmia Playa as source of airborne dust and ice nucleating particles—Part 2: Unraveling the relationship between soil dust composition and ice-nucleation activity. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 22, 14931-14956.
- Hamzehpour, N., Mahdavinia, G.H., and Rahmati, M. 2024. Sand sheets - the major dust source in the western Lake Urmia playa - A comprehensive study of the soil-dust properties and stabilization. *International Journal of Sediment Research*, <https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2024.04.003>.
- Hill, T.C.J., DeMott, P.J., Tobo, Y., Fröhlich-Nowoisky, J., Moffett, B.F., Franc, G.D., and Kreidenweis, S.M., 2016. Sources of organic ice nucleating particles in soils, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 16, 7195–721.
- Jackson, M.L., 2005. *Soil chemical analysis: advanced course*. UW-Madison Libraries parallel press.
- Kanji, Z.A., Ladino, L.A., Wex, H., Boose, Y., Burkert-Kohn, M., Cziczó, D.J., and Krämer, M. 2017. Overview of ice nucleating particles. *Meteorological Monographs*, 58,1-1.
- Kaufmann, L., Marcolli, C., Hofer, J., Pinti, V., Hoyle, C.R., and Peter, T., 2016. Ice nucleation efficiency of natural dust samples in the immersion mode. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 16(17): 11177-11206.
- Kheirfam, H., 2022. Spatial prioritization of wind-erosion-prone areas in the dried-up beds of Lake Urmia; using field sampling and in-vitro measurement. *CATENA*, 217, 106507.

18. Klumpp, K., Marcolli, C., and Peter, T., 2022. The impact of (bio-) organic substances on the ice nucleation activity of the K-feldspar microcline in aqueous solutions. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 22(5), 3655-3673.
19. Kumar, A., Marcolli, C., and Peter, T., 2019. Ice nucleation activity of silicates and aluminosilicates in pure water and aqueous solutions – Part 2: Quartz and amorphous silica, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 19, 6035–6058.
20. Kumar, A., Marcolli, C., Luo, B., and Peter, T., 2018. Ice nucleation activity of silicates and aluminosilicates in pure water and aqueous solutions – Part 1: The K-feldspar microcline, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 18, 7057–7079.
21. Marcolli, C., Gedamke, S., Peter, T., and Zobrist, B., 2007. Efficiency of immersion mode ice nucleation on surrogates of mineral dust. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 7(19), 5081-5091.
22. Middleton, N.J., 2017. Desert dust hazards: A global review. *Aeolian research*, 24, 53-63.
23. Mülmenstädt, J., Sourdeval, O., Delanoë, J., and Quaas, J., 2015. Frequency of occurrence of rain from liquid-, mixed-, and ice-phase clouds derived from A-Train satellite retrievals. *Geophysical Research Letters*, 42(15), 6502-6509.
24. Murray, B.J., O'sullivan, D., Atkinson, J.D., and Webb, M.E., 2012. Ice nucleation by particles immersed in supercooled cloud droplets. *Chemical Society Reviews*, 41(19), 6519-6554.
25. Nelson, D.W., and Sommers, L.E. 1996. Total carbon, organic carbon, and organic matter. *Methods of soil analysis: Part 3 Chemical methods*, 5, 961-1010.
26. O'Sullivan, D., Murray, B.J., Malkin, T.L., Whale, T.F., Umo, N.S., Atkinson, J.D., Price, H.C., Baustian, K.J., Browse, J. and Webb, M.E., 2014. Ice nucleation by fertile soil dusts: relative importance of mineral and biogenic components, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 14, 1853-1867.
27. Peckhaus, A., Kiselev, A., Hiron, T., Ebert, M., and Leisner, T., 2016. A comparative study of K-rich and Na/Ca-rich feldspar ice-nucleating particles in a nanoliter droplet freezing assay. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 16(18), 11477-11496.
28. Perkins, R.J., Gillette, S.M., Hill, T.C., and DeMott, P.J., 2019. The labile nature of ice nucleation by Arizona Test Dust. *ACS Earth and Space Chemistry*, 4(1), 133-141.
29. Pinti, V., Marcolli, C., Zobrist, B., Hoyle, C.R., and Peter, T., 2012. Ice nucleation efficiency of clay minerals in the immersion mode. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 12(13), 5859-5878.
30. Prandel, L.V., Saab, S.C., Brinatti, A.M., Giarola, N.F.B., Leite, W.C., and Cassaro, F.A.M., 2014. Mineralogical analysis of clays in hardsetting soil horizons, by X-ray fluorescence and X-ray diffraction using Rietveld method. *Radiation Physics and Chemistry*, 95, 65-68.
31. Qin, Y., and Oduyemi, K., 2003. Atmospheric aerosol source identification and estimates of source contributions to air pollution in Dundee, UK. *Atmospheric Environment*, 37(13), 1799-1809.
32. Rashki, A., Eriksson, P.G., Rautenbach, C.D.W., Kaskaoutis, D.G., Grote, W., and Dykstra, J., 2013. Assessment of chemical and mineralogical characteristics of airborne dust in the Sistan region, Iran. *Chemosphere*, 90(2), 227-236.
33. Taghizadeh-Mehrjardi, R., Hamzeshpour, N., Hassanzadeh, M., Heung, B., Goydaragh, M.G., Schmidt, K., and Scholten, T., 2021. Enhancing the accuracy of machine learning models using the super learner technique in digital soil mapping. *Geoderma*, 399, 115108.
34. Testa, B., Hill, T.C., Marsden, N.A., Barry, K.R., Hume, C.C., Bian, Q., ... and DeMott, P.J., 2021. Ice nucleating particle connections to regional Argentinian land surface emissions and weather during the Cloud, Aerosol, and Complex Terrain Interactions experiment. *Journal of Geophysical*

- Research: Atmospheres, 126(23), e2021JD035186.
35. Yun, J., Kumar, A., Removski, N., Shchukarev, A., Link, N., Boily, J.F., and Bertram, A.K., 2021. Effects of inorganic acids and organic solutes on the ice nucleating ability and surface properties of potassium-rich feldspar. ACS Earth and Space Chemistry, 5(5), 1212-1222.

