



The comparison of ice nucleation ability of sand with silt-clay fraction of mineral particles and the role of carbonate coatings in ice formation temperature

Nikou Hamzehpour 

Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Maragheh, Maragheh, Iran. E-mail: nhamzehpour@maragheh.ac.ir

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received 24 October 2023

Received in revised form 31

January 2024

Accepted 25 February 2024

Published online 4 May 2024

Keywords:

Aragonite,

Calcite,

Heterogeneous ice nucleation fraction,

Heterogeneous ice nucleation temperature.

ABSTRACT

Mineral dust particles play an important role in the formation of ice and ultimately the amount of precipitation, especially in the middle latitudes. Therefore, understanding the role of each component of dust and their contribution in ice nucleation activity in clouds is of particular importance. Therefore, the objectives of the present research were 1. to compare the ice nucleation activity of sand-sized particles with silt-clay and 2. to determine the role of carbonates in soils in the cloud formation temperature (T_{het}) and in the percentage of heterogeneous nucleation (F_{het}). For this purpose, sixteen soil and dust samples were collected from highly sensitive playa surfaces which are exposed to wind erosion as a consequence of Lake Urmia (LU) recession. The sand particles were separated from the silt-clay section by a 50 μm sieve. Then, carbonates and soluble solutes were removed in each sample and each particle size, and the nucleation activity of the samples was determined by immersion freezing method. Fourier transform infrared spectrum (FTIR) was used to determine both the type of carbonates in natural samples and to confirm the removal of the corresponding bands in carbonate-removed samples. The results showed that in most samples, silt-clay particles have stronger nucleation activity than sand particles. This could be due to their smaller size with higher specific surface area which lead to the presence of more active sites in ice nucleation. The comparison of carbonate removal samples with soluble solute removal samples showed that although solute washing from the samples alone increases the ice nucleation activity, this change is more significant in the carbonate removal samples. T_{het} and F_{het} parameters increased in carbonate removal samples, except for the sample with low carbonate and salt content. The average increase of T_{het} and F_{het} in the sand component was 0.7 Kelvin and 9%, and in the silt-clay component was 1 Kelvin and 15%, respectively. The highest increase in T_{het} after carbonate removal in both particle sizes was observed in D₄ and S₅ samples with carbonate content of 0.43% and aragonite as dominant mineral in D₄ and 0.41% and the dominant mineral of calcite in S₅. The increase in T_{het} in comparison to the natural samples was 3.2 Kelvin in D₄ and 3.3 Kelvin in S₅. However, the highest increase in F_{het} was related to samples D₁ to D₄, which were rich in aragonite mineral. Therefore, it seems that the abundance of aragonite mineral in the studied samples is one of the important factors in reducing the ice nucleation activity of dust samples originated from the LU playa surfaces.

Cite this article: Hamzehpour, N. (2024). The comparison of ice nucleation ability of sand with silt-clay fraction of mineral particles and the role of carbonate coatings in ice formation temperature. *Journal of Natural Environment*, 77 (1), 159-173. DOI: <http://doi.org/10.22059/jne.2024.367175.2612>



مقایسه توان هسته‌زایی یخ توسط ذرات معدنی در اندازه‌شن با سیلت-رس و نقش پوشش‌های کربناته در دمای تشکیل یخ

نیکو حمزه‌پور ✉

گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه مراغه، مراغه ایران. رایانامه: nhamzhepour@maragheh.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	ذرات گردوغبار معدنی نقش مهمی در تشکیل هسته‌های یخی و در نهایت میزان بارندگی به‌خصوص در عرض‌های میانی دارند. از این رو درک نقش هر یک از اجزای تشکیل‌دهنده گردوغبار و میزان مشارکت آن‌ها در فعالیت هسته-زایی یخ (INA) در ابرها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. بنابراین اهداف تحقیق حاضر عبارت از ۱- مقایسه INA در اندازه‌شن با بخش سیلت-رس و ۲- تعیین نقش کربنات‌های موجود در خاک‌ها در دمای تشکیل ابر (T_{het}) و در درصد هسته‌زایی ناهمگن (F_{het}) بودند. بدین منظور ۱۶ نمونه خاک و گردوغبار از اراضی حساس به فرسایش بادی که در نتیجه پسروری دریاچه ارومیه برجای مانده‌اند، تهیه شدند. ذرات شن از بخش سیلت-رس توسط الک ۵۰ میکرومتر جداسازی شد. سپس در هر نمونه و هر اندازه‌ذرات، حذف کربنات‌ها و املاح محلول صورت گرفت و INA نمونه‌ها به روش انجاماد غوطه‌وری تعیین شد. از طیف مادون قرمز تبدیل فوریه (FTIR) برای تعیین نوع کربنات‌ها در نمونه‌های طبیعی و تأیید حذف باندهای مربوطه در نمونه‌های فاقد کربنات‌ها استفاده شد. نتایج نشان داد که در اغلب نمونه‌ها، ذرات سیلت-رس، INA بالاتری نسبت به ذرات شن دارند. این امر می‌تواند ناشی از اندازه کوچکتر و سطح ویژه بالاتر آنها و در نتیجه وجود جایگاه‌های فعال بیشتر در هسته‌زایی یخ باشد. در نمونه‌های حذف کربنات، به استثنای نمونه با میزان کربنات و نمک اندک، پارامترهای F_{het} و T_{het} افزایش داشتند. میانگین افزایش F_{het} و T_{het} در بخش شن به ترتیب ۷۰٪ و ۹٪ و در بخش سیلت-رس ۱ درجه کلوین و ۱۵٪ به دست آمد. بالاترین افزایش در T_{het} در هر دو اندازه‌ذرات، در نمونه‌های D4 و S5 با میزان کربنات معادل ۴۳٪ و کانی غالب آراگونیت و ۴۱٪ و کانی غالب کلسیت مشاهده شد که نسبت به نمونه طبیعی، به ترتیب افزایشی معادل ۲/۵ و ۳/۳ درجه کلوین داشتند. با این حال بالاترین افزایش در F_{het} ، مربوط به نمونه‌های D1 تا D4 بود که نمونه‌های غنی از کانی آراگونیت بودند. بنابراین به نظر می‌رسد فراوانی کانی آراگونیت در نمونه‌های مورد مطالعه، از عوامل مهم در کاهش INA توسط نمونه‌های گردوغبار حاصل از سطوح برجای مانده از پسروری دریاچه ارومیه باشد.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۸/۰۲	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۱۱/۱۱	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۲/۰۶	
تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۰۲/۱۵	
کلیدواژه‌ها: آراگونیت، درصد هسته‌زایی ناهمگن، دمای هسته‌زایی ناهمگن، کلسیت.	

استاد: حمزه‌پور، نیکو (۱۴۰۳). مقایسه توان هسته‌زایی یخ توسط ذرات معدنی در اندازه‌شن با سیلت-رس و نقش پوشش‌های کربناته در دمای تشکیل یخ. محیط

زیست طبیعی، ۷۷ (۱)، ۱۷۳-۱۵۹.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jne.2024.367175.2612>



© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

مقدمه

تشکیل یخ اثرات مختلفی بر ویژگی‌های کلیدی ابرها دارد. وجود یخ به‌طور قابل توجهی بر طول عمر ابر، تشکیل بارش، شیمی ابر و خواص تشعشعی تأثیر می‌گذارد (IPCC, 2013; Field and Heymsfield, 2015; Mülmenstädt *et al.*, 2015). با این حال تا به امروز تمام جنبه‌های مختلف تشکیل یخ در ابرها مشخص نشده‌اند و نیاز به تحقیقات بیشتر برای روشن کردن مکانیسم‌های مختلف هسته‌زایی یخ وجود دارد.

تشکیل یخ از طریق هسته^۱ یا ناهمگن^۲ در قطرات ابر فوق خنک^۳ صورت می‌گیرد. هسته‌زایی یخ^۴ همگن به‌طور خود به خود به‌عنوان یک فرآیند تصادفی رخ می‌دهد که قطرات آب مایع خالص به اندازه میکرومتر تا دمای ۲۳۵ تا ۲۳۸ کلوین فوق‌العاده خنک می‌شوند (Heymsfield and Sabin, 1989) و می‌توان آن را با نظریه^۵ هسته‌سازی کلاسیک توصیف کرد (Lohmann *et al.*, 2016). در مقابل، هسته‌زایی ناهمگن یخ توسط ذرات جامد موجود در آب یا محلول ایجاد می‌شود که به آن‌ها ذرات هسته‌زای یخ (INPs^۶) می‌گویند. به‌طور خاص، هسته‌زایی در مکان‌های فعال بر روی ذرات گردوغبار صورت می‌گیرد که مکان‌های ترجیحی برای هسته‌زایی یخ هستند (Vali *et al.*, 2015; Kaufmann *et al.*, 2017).

بسته به شرایط، حالت‌های مختلفی از هسته‌زایی یخ توسط ذرات معدنی امکان‌پذیر است: الف: انجماد غوطه‌وری^۷؛ فرآیند انجماد را هنگامی که یک ذره در یک قطره فوق‌سردشده غوطه‌ور می‌شود، توصیف می‌کند. ب: انجماد تراکمی^۸؛ زمانی رخ می‌دهد که ذره هسته‌زا با فعال شدن قطرات ابر همزمان شود (Vali *et al.*, 2015; Kanji *et al.*, 2017). ج: انجماد تماسی^۹؛ زمانی رخ دهد که هسته‌زایی توسط یک ذره هسته‌زا که به سطح قطرات نفوذ می‌کند، آغاز شود، به‌عنوان مثال از طریق یک برخورد (Nagare *et al.*, 2016). د: در نهایت، هسته‌زایی رسوبی^۹ اصطلاحی است برای فرآیند انجماد که بدون دخالت فاز آب مایع اتفاق می‌افتد. بنابراین فرض بر این است که بخار آب به‌طور مستقیم در سطح ذره هسته‌زا به یخ تبدیل می‌شود.

در میان ذراتی که به‌عنوان ذرات هسته‌زای جوی مهم در نظر گرفته می‌شوند، ذرات گردوغبار معدنی مهم‌ترین آنها هستند. توانایی ذرات گردوغبار معدنی در هسته‌زایی به اندازه ذرات و ترکیب کانی‌شناسی آنها بستگی دارد. در میان کانی‌های موجود در ترکیب گردوغبار (Murray *et al.*, 2012; Boose *et al.*, 2016) کوارتز، فلدسپارها و کانی‌های رسی مانند کائولینیت، مونتموریلونیت و ایلیت فعال از نظر هسته‌زایی به‌شمار می‌آیند (Hoose and Möhler, 2012; Kumar *et al.*, 2019; Harrison *et al.*, 2019). Atkinson *et al.*, 2019 و همکاران (۲۰۱۳) بر بازدهی فوق‌العاده بالای کانی فلدسپار پتاسیم در هسته‌زایی در مقایسه با سایر مواد معدنی تأکید کرده است. در واقع، چندین مطالعه تأیید کردند که فلدسپارهای پتاسیم در دماهای گرم‌تر نسبت به فلدسپارهای کلسیم و سدیم، هسته‌زایی یخ را انجام می‌دهند (Peckhaus *et al.*, 2016; Kumar *et al.*, 2018). در حالی که سایر مواد معدنی رایج مانند کلسیت، دولومیت، INA ناچیزی را نشان می‌دهند (Kaufmann *et al.*, 2016; Kumar *et al.*, 2019).

در حدود یک سوم از سطح زمین را مناطق خشک و نیمه‌خشک تشکیل می‌دهند. از این مقدار، ۲۰ درصد به بیابان‌ها اختصاص می‌یابد که به‌دلیل نبود پوشش در سطح زمین، منشاء اصلی گردوغبار اتمسفری به‌حساب می‌آیند (Middleton, 2017). خاورمیانه با ۲۰-۱۵ درصد مشارکت در گردوغبار جهانی، در جایگاه دوم قرار دارد (Gkikas *et al.*, 2021; Goudie *et al.*, 2021). از جمله منابع مهم گردوغبار در خاورمیانه می‌توان به بیابان‌های گسترده واقع در عربستان سعودی، سوریه، عراق و ایران اشاره کرد (Shao *et al.*, 2011; Al-Hemoud *et al.*, 2022). با وجود آنکه بیابان‌های شنی مهم‌ترین منابع گردوغبار هستند اما امروزه بستر خشک شده دریاچه‌های متعدد در خاورمیانه و به‌خصوص در ایران به یکی از منابع عمده گردوغبار تبدیل شده‌اند (Hamzehpour *et al.*, 2022a; Vahidipour *et al.*, 2022). تقریباً در تمامی منابع گردوغبار، ترکیبات نمکی و کربنات‌ها

¹Homogenous²Heterogeneous³Super cooled⁴Ice nucleation⁵Ice nucleating particles⁶Immersion freezing⁷Condensation freezing⁸Contact freezing⁹Deposition nucleation

به دلیل بارندگی اندک، در سطح خاک به وفور یافت می‌شوند و از این رو از عناصر اصلی تشکیل دهنده گردوغبار به حساب می‌آیند. به طور کلی، کلسیت، کوارتز، کانی‌های رسی و گچ از اجزای اصلی ذرات اتمسفر در غرب ایران گزارش شده‌اند (Ahmady - Birgani *et al.*, 2015). براساس مطالعات دیگر در مناطق خشک و نیمه‌خشک در سراسر جهان، کانی‌های کوارتز و کربناته اجزای غالب گردوغبار جوی هستند (Díaz-Hernández *et al.*, 2011; Al-Dabbas *et al.*, 2012; Rashki *et al.*, 2013). در میان مطالعات محدود، تأثیر کانی‌های کربناته در خاک‌ها در هسته‌زایی یخ ناچیز گزارش شده است (Kaufmann *et al.*, 2019; Kumar *et al.*, 2016). با این حال در یک مطالعه اخیر، Hamzehpour و همکاران (2022b) نشان داده‌اند که ترکیبات کربناته اثر منفی بر هسته‌زایی یخ داشته و منجر به تشکیل یخ در دماهای سردتر می‌شود. از آنجا که با افزایش شوری خاک و کم آبی، هر روزه بر سطح اراضی که به سمت بیابانی شدن می‌روند، افزوده می‌شود و منابع جدید گردوغبار با مقادیر بسیار زیادی از ترکیبات کربناته و نمک در معرض فرسایش بادی قرار می‌گیرند، بیم آن می‌رود که فراوانی ذرات معدنی با INA کم، از اثربخشی ذرات با INA بالا، کاسته و به این ترتیب بتوانند دمای تشکیل ابر و بارندگی را در بخش‌های مختلف جهان تحت تأثیر قرار دهند. از سوی دیگر، در حال حاضر مطالعات بسیار اندکی در خصوص نقش کانون‌های گردوغبار ایجاد شده در کشور در هسته‌زایی یخ انجام شده است و چشم‌اندازی از آنچه ممکن است در آینده در اثر فعال شدن کانون‌های گردوغبار بیشتر در کشور از منظر بارندگی و تغییر اقلیم ممکن است اتفاق بیفتد، موجود نیست. از این رو در تحقیق حاضر به بررسی نقش ذرات در اندازه‌شن و سیلت-رس ساطع شده از سطوح مستعد به فرسایش بادی در نتیجه پسروری دریاچه ارومیه در هسته‌زایی یخ پرداخته شده است. همچنین نقش کربنات‌های موجود در هر دو اندازه‌ذرات شن و سیلت-رس در دمای تشکیل هسته‌های یخی ناهمگن و درصد مشارکت آنها در هسته‌زایی مورد بررسی قرار گرفت.

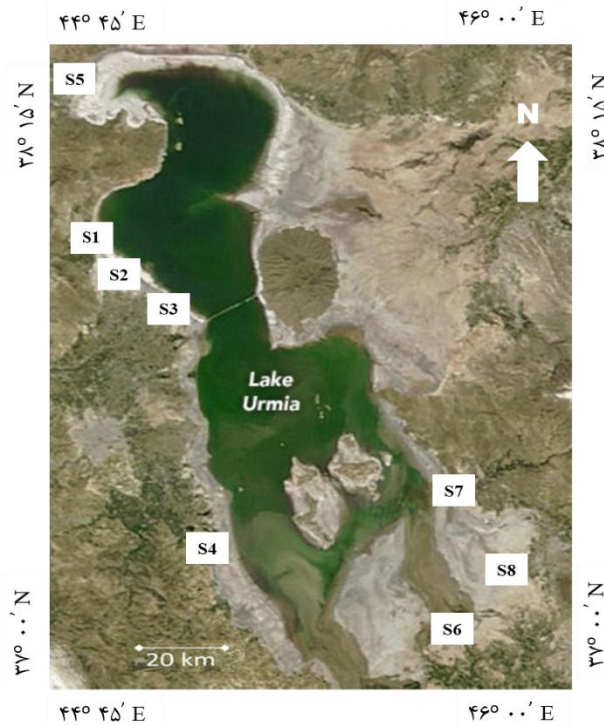
روش‌شناسی پژوهش

نمونه‌برداری از خاک و گردوغبار: نمونه‌های خاک و گردوغبار از اراضی برجای مانده از پسروری دریاچه ارومیه که پیشتر به عنوان کانون‌های احتمالی گردوغبار شناسایی شده‌اند، تهیه شدند. نمونه‌های خاک در مردادماه ۱۳۹۹ جمع‌آوری شدند. موقعیت نقاط نمونه‌برداری خاک‌ها در شکل ۱ ارائه شده است. همچنین مراحل انجام تحقیق در شکل ۲ نمایش داده شده است. نمونه‌ها از عمق پنج سانتی‌متر بالایی خاک تهیه شدند. نمونه‌های گردوغبار نیز در مجاورت این مناطق از ارتفاع یک متری از سطح زمین با تله‌های رسوب‌گیر جمع‌آوری شدند. شایان ذکر است در این مطالعه، نمونه‌های گردوغبار با حرف اختصاری D و نمونه‌های خاک با علامت S نمایش داده شده‌اند. مشابهت در اعداد همراه این حروف نیز نشان می‌دهد کدام نمونه گردوغبار در مجاورت کدام نمونه خاک، جمع‌آوری شده است. به عنوان مثال نمونه گردوغبار D₈، از نزدیکی خاک S₈ تهیه شده است.

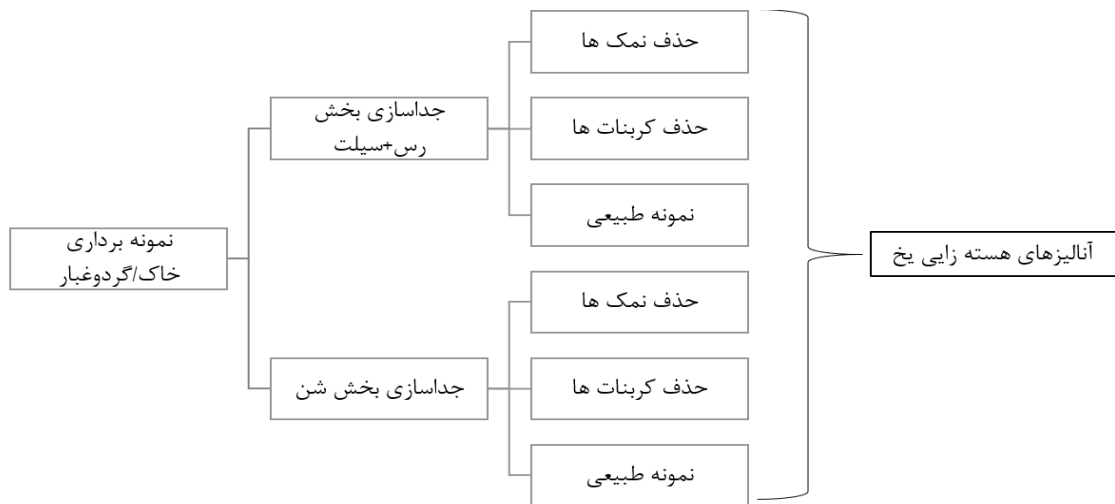
خصوصیات فیزیکوشیمیایی نمونه‌های خاک و گردوغبار: نمونه‌ها پس از انتقال به آزمایشگاه برای حذف ذرات درشت، از الک ۲ میلی‌متر عبور داده شدند. سپس توزیع اندازه‌ذرات با استفاده از دستگاه پراش لیزری مدل LS 13320 تعیین شد. درصد کربن آلی به روش سوزاندن تر (Nelson and Sommers, 1996)؛ قابلیت هدایت الکتریکی (EC¹⁰) و واکنش خاک (pH) در نسبت ۱:۲/۵ خاک به آب به ترتیب با استفاده از دستگاه هدایت‌سنج الکتریکی (Jenway, model 4510) و دستگاه pH متر (VWR Symphony SB70P) و اندازه‌گیری کربنات کلسیم با استفاده از روش تیتراسیون صورت گرفت (Jackson, 2005). برای تعیین نوع کانی‌های غالب موجود در نمونه‌ها، از روش پراش اشعه ایکس (XRD) با استفاده از پراش سنج براگ-برنتانو (D8 Advance, Bruker AXS، آلمان) با استفاده از تابش CoK α (۳۵ کیلوولت، ۴۰ میلی آمپر) استفاده شد. نمونه‌های پودری در دمای اتاق از ۱۰ تا ۶۰ درجه ۲ تتا (عرض مرحله ۰/۰۲ درجه ۲ تتا، زمان شمارش ۲ ثانیه در هر مرحله) اسکن شدند. تجزیه و تحلیل فاز کیفی با بسته نرم‌افزاری (Bruker AXS)DIFFRACplus انجام شد.

تفکیک بخش شن از بخش رس و حذف کربنات‌ها: براساس سیستم طبقه‌بندی USDA، ذرات در اندازه ۲ میلی‌متر الی ۵۰ میکرومتر بخش شن، ذرات بین ۵۰ الی ۲ میکرومتر، سیلت و ذرات کوچکتر از ۲ میکرومتر، بخش رس در نظر گرفته می‌شوند.

¹⁰Electrical conductivity



شکل ۱- موقعیت نقاط نمونه‌برداری خاک از مناطق مستعد تولید گردوغبار (نمونه‌های گردوغبار از مجاورت این مناطق و از ارتفاع یک متری از سطح زمین در طول مرداد ماه ۱۳۹۹ جمع‌آوری شده‌اند)



شکل ۲- فلوچارت مراحل تحقیق

برای تفکیک بخش شن از بخش سیلت-رس، نمونه‌هایی که بیشتر از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شده بودند، به مدت ۱۰ دقیقه سونیکیت^{۱۱} شدند تا عمل پراکنده شدن^{۱۲} نمونه‌ها اتفاق بیفتد (Dane and Topp, 2020). سپس نمونه‌ها از الک ۲۰۰ میکرومتر عبور داده شدند تا ذرات با اندازه ۲ میلی‌متر تا ۲۰۰ میکرومتر که بخش شن درشت محسوب شده و عملاً نقشی در ذرات معلق اتمسفری بازی نمی‌کنند، جدا شوند. سپس نمونه‌های عبور کرده از الک ۲۰۰ میکرومتر، مجدداً از الک ۵۰ میکرومتر عبور داده شدند. بخش عبور کرده از الک ۵۰ میکرومتر هر نمونه به‌عنوان بخش سیلت-رس و نمونه‌های باقی‌مانده روی الک ۵۰ میکرومتر (اندازه ۵۰ الی ۲۰۰ میکرومتر) به‌عنوان بخش شن متوسط و ریز موجود در نمونه‌ها برای آزمایشات بعدی تفکیک شدند.

¹¹Sonication

¹²Disperse

برای بررسی نقش کربنات‌های موجود در خاک‌ها و ذرات گردوغبار در هر دو بخش شن و سیلت-رس در INA ناهمگن، از آنجا که املاح موجود در نمونه‌ها نقش مهمی در به تأخیرانداختن شروع یخ‌زدگی ناهمگن دارند (Kumar *et al.*, 2018; Yun *et al.*, 2020) و در زمان حذف کربنات‌ها، بخش زیادی از املاح شسته می‌شود و این امر می‌تواند بر تفسیر نتایج اثر بگذارد، تمامی نمونه‌ها به سه بخش تقسیم شدند. یک بخش به‌عنوان نمونه دست‌نخورده و طبیعی (N) برای مطالعات بعدی نگهداری شد. در بخش دوم نمونه‌ها، فقط شست‌وشوی املاح انجام شد تا میزان املاح به زیر ۱۰ میلی‌مولار کاهش یافت. در نهایت در بخش سوم، حذف کربنات‌ها با استیک اسید ۱ نرمال و با اسیدیته ۵ طبق روش استاندارد (Dane and Topp, 2020) انجام شد و شست‌وشوی نمونه‌ها تا کاهش میزان املاح به زیر ۱۰ میلی‌مولار ادامه یافت.

از آنالیز FTIR برای شناسایی گروه‌های عاملی مربوط به کربنات‌ها در دامنه ۴۰۰ الی ۴۰۰۰ cm⁻¹ در نمونه‌های طبیعی استفاده شد. همچنین به‌منظور کارایی روش استفاده شده در حذف کربنات‌ها مجدداً از آنالیز FTIR استفاده شد تا حذف باندهای مربوط به کربنات‌ها در نمونه‌ها بررسی شود. این آنالیزها توسط دستگاه اسپکرومتر (Spectrum Two, Perkin Elmer, USA) انجام شد. **اندازه‌گیری فعالیت هسته‌زایی یخ در نمونه‌ها:** به‌منظور مطالعه نقش ذرات در اندازه‌شن متوسط-ریز (۲۰۰ الی ۵۰ میکرومتر)؛ ذرات در اندازه‌سیلت-رس (کوچکتر از ۵۰ میکرومتر) و نیز کربنات‌ها در هسته‌زایی یخ ناهمگن، برای هر نمونه خاک یا گردوغبار، ۳ نمونه برای بخش شن و ۳ نمونه برای بخش سیلت-رس هر کدام با دو تکرار مورد آزمایش قرار گرفت. ۱- نمونه طبیعی (N^{۱۳})، ۲- نمونه با حذف املاح (SF^{۱۴}) و ۳- نمونه با حذف کربنات‌ها و املاح (SF+CF^{۱۵}). در مطالعات هسته‌زایی یخ ناهمگن، از روش انجماد غوطه‌وری^{۱۶} در سطح غلظت ۵ درصد وزنی در سوسپانسیون آبی (آب بسیار خالص^{۱۷}، سیگما آلدريج) و دستگاه کالری‌سنج اسکن تفاضلی^{۱۸} Q10 متعلق به گروه شیمی اتمسفری دانشگاه ETH زوریخ، استفاده شد. در مطالعات هسته‌زایی یخ، قبل از آماده‌سازی سوسپانسیون‌های نمونه، به‌منظور جلوگیری از تجمع ذرات، نمونه‌ها به‌مدت ۵ دقیقه سونیکیت شدند. سپس سوسپانسیون‌ها با مخلوطی از روغن معدنی و لانولین (هر دو سیگما آلدريج) به نسبت ۱:۴ ترکیب شده و با هم‌وزنایز استاتور روتور^{۱۹} به‌مدت ۴۰ ثانیه با ۷۰۰۰ دور در دقیقه هم‌زده شدند. سپس در حدود ۵ الی ۱۰ میلی‌گرم از امولسیون در یک پن آلومینیومی^{۲۰} قرار داده شده، در آن پرس 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}^{۲۱}) و درصد انجماد ناهمگن (F_{het}^{۲۲}) به‌طریقی که در Kumar و همکاران (۲۰۱۸) توضیح داده شده است، استفاده شد. برای آزمایش پایداری امولسیون‌ها، برخی از نمونه‌ها تحت سه چرخه انجماد طبق روشی که توسط Marcolli و همکاران (۲۰۰۷) معرفی شده است، قرار گرفتند. امولسیون‌ها قبل از هر آزمایش به‌صورت تازه آماده شدند و هر آزمایش با دو تکرار انجام شد.

برای تعیین نقش مستقل کربنات‌ها در میزان INA و جداکردن نقش املاح در این فرآیند، از دو پارامتر زیر استفاده شد:

$$\Delta T_{het} = T_{het(SF+CF)} - T_{het(SF)} \quad (1)$$

$$rF_{het} = F_{het(SF+CF)} - F_{het(SF)} \quad (2)$$

که در آنها ΔT_{het} عبارت از تغییر در دمای هسته‌زایی ناهمگن یخ و rF_{het} نسبت تغییرات در درصد هسته‌زایی یخ ناهمگن بین تیمار حذف کربنات+املاح (SF+CF) و تیمار حذف املاح (SF) می‌باشد.

¹³Natural

¹⁴Salt free

¹⁵Salt free + Carbonate free

¹⁶Immersion freezing

¹⁷Mili-Q water

¹⁸Differential scanning calorimeter

¹⁹Polytron PT 1300D with a PT-DA 1307/2EC dispersing aggregate

²⁰Hermetic pan

²¹Heterogeneous freezing temperature

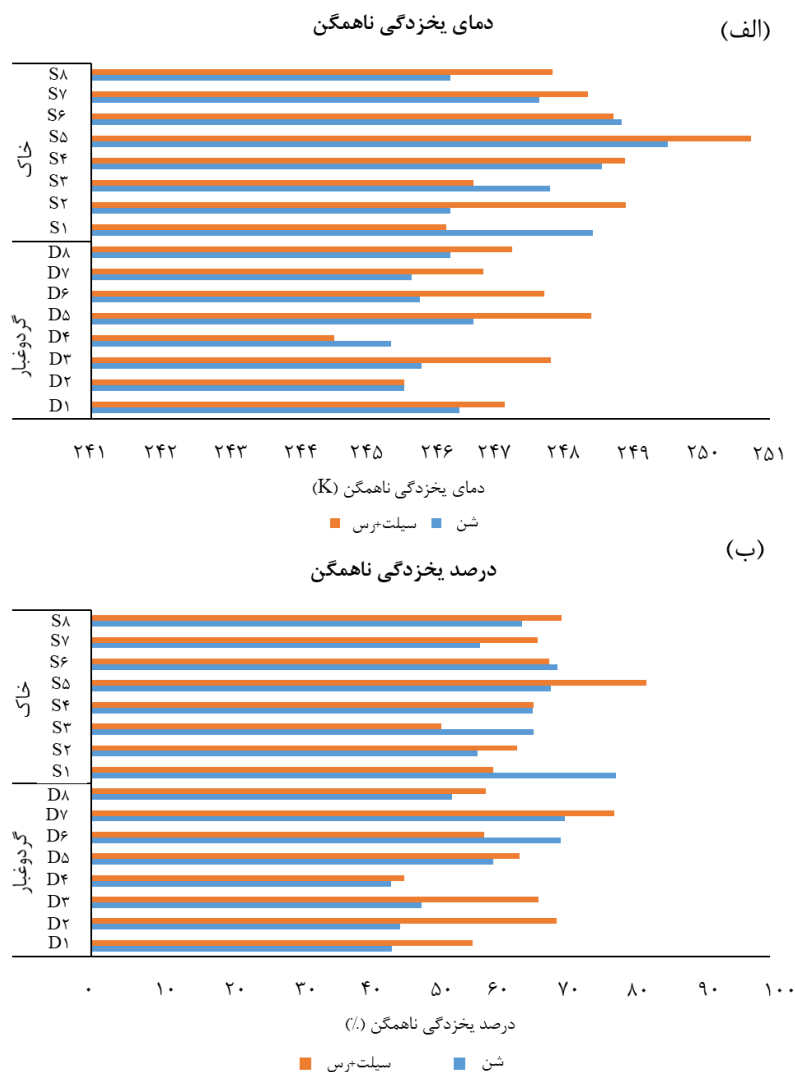
²²Heterogeneous frozen fraction

جدول ۱- خصوصیات فیزیکوشیمیایی نمونه‌های خاک و گردوغبار

نمونه	هدایت لکتریکی	اسیدیته	کربنات کلسیم	ماده آلی	رس		سیلت		شن	
					ریز	متوسط	درشت	ریز	متوسط	درشت
	(dS/m)	-		(%)						
D _۱	۲۶/۰	۸/۶	۲۵/۲	۱/۷	۲/۷	۱/۱	۱/۷	۱/۷	۰/۹	۳۵/۱
D _۲	۳/۶	۸/۳	۴۰/۲	۰/۹	۰/۰	۴/۶	۵/۳	۲۱/۵	۰	۲۱/۵
D _۳	۲/۵	۸/۵	۵۰/۶	۱/۳	۵/۰	۱۰	۰	۵۲/۷	۰	۳۰
D _۴	۴۳/۹	۸/۴	۴۳/۰	۱/۳	۲/۹	۱/۲	۰/۴	۵۱/۰	۰/۴	۴۳/۶
D _۵	۰/۹	۸/۲	۲۱/۱	۵/۳	۱۵/۸	۱۱/۴	۶/۷	۴۴/۹	۲/۱	۱۰/۳
D _۶	۲۰/۰	۸/۲	۱۷/۱	۳/۰	۳/۰	۵/۲	۲/۶	۲۱/۶	۲/۴	۶۱/۶
D _۷	۲۷/۵	۷/۵	۱۴/۴	۲/۶	۵/۷	۲۱/۴	۱۷/۸	۲۰/۱	۲۰/۰	۸/۱
D _۸	۴۵/۷	۷/۲	۷/۶	۰/۶	۰	۱۱/۷	۱۰/۰	۲۳/۳	۰	۵۵/۰
S _۱	۰/۳۹	۸/۶	۴۹/۱	۰	۱/۱	۰/۵	۰/۹	۴۸/۱	۰/۹	۳۶/۱
S _۲	۳۵/۳	۸/۶	۲۸/۵	۱/۰	۸/۱	۲/۴	۱/۰	۷۷/۰	۳/۵	۱۴/۲
S _۳	۲۳/۴	۸/۳	۳۲/۰	۱/۰	۶/۵	۱۰/۵	۵/۳	۶۰/۰	۳/۵	۱۴/۲
S _۴	۴۰	۸/۲	۱۹/۱	۳/۳	۹/۳	۲۲/۴	۱۷/۲	۲۸/۶	۱۹/۶	۲/۳
S _۵	۰/۹	۸/۲	۴۱/۱	۵/۳	۱۵/۸	۱۱/۴	۶/۷	۴۴/۹	۲/۱	۱۰/۳
S _۶	۱۶/۳	۸/۱	۱۳/۱	۱/۲	۳/۰	۷/۵	۲/۹	۶۰/۶	۲/۷	۱۲/۴
S _۷	۰/۶۷	۷/۱	۶/۵	۱/۲	۱۸/۲	۲۲/۳	۱۰/۰	۲۳/۵	۱۴/۰	۱۲/۰
S _۸	۳۴/۶	۷/۰	۴/۷	۰/۸	۸/۸	۱۱/۴	۲۱/۳	۱۶/۸	۰	۲۴/۶

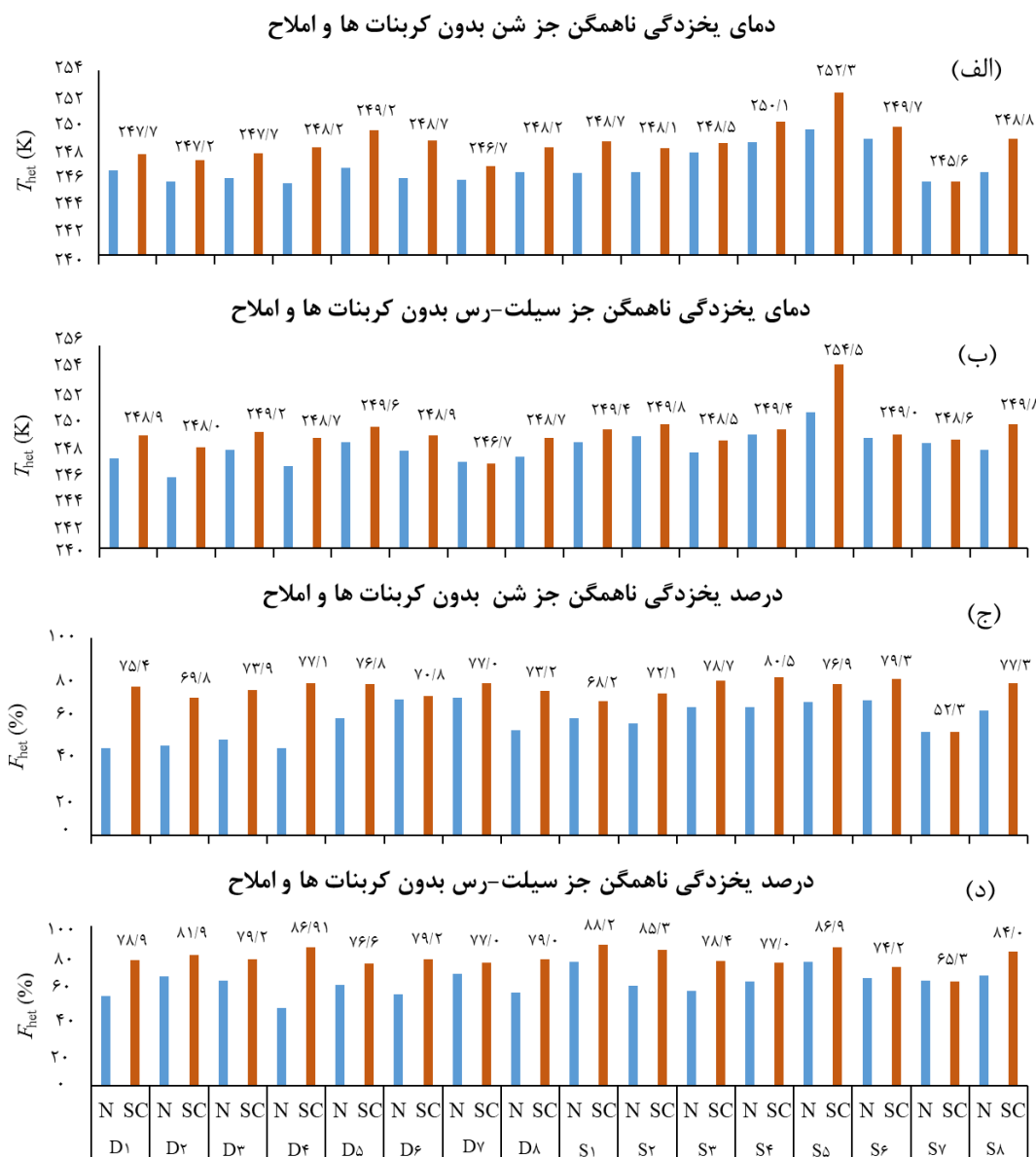
یافته‌های پژوهش

خصوصیات فیزیکوشیمیایی نمونه‌های خاک و گردوغبار: نتایج خصوصیات فیزیکوشیمیایی نمونه‌های خاک و گردوغبار مطالعه شده در تحقیق حاضر در جدول ۱ ارائه شده است. براساس نتایج، حداقل میزان کربنات کلسیم در نمونه‌های خاک و گردوغبار به ترتیب ۴/۷٪ در نمونه S_۸ و ۷/۶٪ در نمونه D_۸ و مقادیر حداکثر در نمونه خاک S_۱ با میزان ۴۹/۱٪ و گردوغبار D_۳ با میزان ۵۰/۶٪ مشاهده شد. این مقادیر با نتایج حداقل و حداکثر به دست آمده برای اسیدیته (pH) خاک منطبق است. به عبارت دیگر، با توجه به اینکه یکی از مهمترین و اصلی‌ترین عوامل تعیین کننده pH در خاک‌ها، میزان کربنات‌های موجود می‌باشد، در نمونه‌های با حداقل کربنات کلسیم (D_۸, S_۷, S_۸)، اسیدیته نزدیک به خنثی (۷~) مشاهده شد در حالی که در نمونه‌های بالاترین درصد کربنات کلسیم، اسیدیته بالای ۸/۳ نیز مشاهده گردید. میزان قابلیت هدایت الکتریکی در نمونه‌ها نیز دامنه وسیعی از مقادیر را در برداشت. حداقل میزان آن در نمونه خاک S_۱ با مقدار ۰/۳۹ دسی‌زیمنس بر متر و حداکثر آن در نمونه ۴۵/۷ دسی‌زیمنس بر متر در نمونه D_۸ مشاهده شد. میزان کم ماده آلی در اکثر نمونه‌های مطالعه شده کم (>۲٪) به دست آمد که با ماهیت نمونه‌های مطالعه شده که به مناطق با فرسایش پذیری بادی زیاد تعلق داشتند هم‌خوانی داشت. به صورت استثنا، در دو نمونه S_۵ و D_۵، میزان ماده آلی در حدود ۵٪ تعیین شد. با توجه به اینکه نمونه S_۵ مربوط به اراضی کشاورزی رها شده بود، ماده آلی موجود در این نمونه مربوط به بقایای گیاهی موجود در این نمونه می‌باشد. به طور کلی وجود ماده آلی زیاد در نمونه‌های خاک، به خاکدانه‌سازی و پایداری آنها در برابر گردوغبار کمک می‌کند. از سوی دیگر از آنجا که نمونه‌ها از سطوح برجای مانده از پسروری دریاچه ارومیه تهیه شده‌اند، میزان املاح زیاد موجود در این مناطق نیز یکی از علل پایین بودن ماده آلی آنها می‌باشد. درصد رس در اکثر نمونه‌های مطالعه شده کم و در مقابل درصد شن ریز و متوسط زیاد بود و منجر به دسته‌بندی نمونه‌ها در کلاس خاک‌های شنی و شنی لومی شد. مشابه اثرات مثبتی که ماده آلی در پایداری خاک‌ها دارد، درصد رس خاک نیز نقشی کلیدی در خاکدانه‌سازی و پایداری سطوح در برابر فرسایش بادی دارد. بنابراین پایین بودن درصد رس به همراه ماده آلی نمونه‌های خاک، از مهمترین عوامل بالا بودن پتانسیل این مناطق به تولید گردوغبار است. از آنجا که نمونه‌های گردوغبار در مجاورت و تنها در ارتفاع یک متری از سطوح مستعد تولید گردوغبار جمع‌آوری شده‌اند، خصوصیات فیزیکوشیمیایی آنها بسیار نزدیک به خاک‌های واقع در نزدیکی آنها می‌باشد.



شکل ۳- الف: دمای شروع هسته زایی یخ به صورت ناهمگن (T_{het}) و ب: درصد هسته زایی ناهمگن (F_{het}) توسط بخش شن و سیلت-رس نمونه‌های خاک و گردوغبار مورد مطالعه

فعالیت هسته‌زایی یخ توسط بخش شن و سیلت-رس در نمونه‌های طبیعی: در شکل ۳، نمودارهای مربوط به دمای شروع یخ‌زدگی ناهمگن (T_{het}) نمونه‌های مطالعه شده به همراه درصد یخ‌زدگی ناهمگن (F_{het})، به روش انجماد غوطه‌وری با دستگاه کالری سنج اسکن تفاضلی در سطح غلظتی ۵٪ وزنی، ارائه شده است. برای درک بهتر نتایج ارائه شده در این قسمت و سایر قسمت‌ها ابتدا توضیح مختصری در خصوص پارامترهای T_{het} و F_{het} داده می‌شود. پارامتر T_{het} نشان می‌دهند که شروع هسته‌زایی ناهمگن در حضور ذرات معدنی در چه دمایی آغاز می‌شود. به‌طور کلی در اتمسفر و تحت فشار کم موجود، در عدم حضور ذرات آلی و یا معدنی، مولکول‌های آب به صورت بخار در دمای در حدود ۲۳۶ درجه کلوین (۴۰- درجه سانتی‌گراد) به هسته‌های یخ در تبدیل می‌شوند. در حضور ذرات آلی و معدنی، هسته‌زایی یخ در دماهای گرم‌تر و سریع‌تر آغاز می‌شود و هسته‌زایی یخ می‌تواند در دماهای تا ۲۰ تا ۲۰- درجه گرم‌تر (تا ۲۰- درجه سانتی‌گراد) نیز مشاهده شود (Kaufmann et al., 2016; Welti et al., 2019). این موضوع از نظر میزان بارش‌های سالیانه به‌خصوص در عرض‌های میانی بسیار مهم می‌باشد. بنابراین هرچه دمای هسته‌زایی یخ در دماهای گرم‌تر (درجه کلوین بیشتر) صورت گیرد، نشان از توان هسته‌زایی بالاتر آن نمونه دارد. در مقابل، پارامتر F_{het} نشان می‌دهد که سهم ذرات معدنی در مقابل انجماد همگن مولکول‌های آب چقدر بوده است. هرچقدر پارامتر F_{het} بیشتر باشد، نشان می‌دهد که ذرات معدنی نقش بیشتری در هسته‌زایی یخ به صورت همگن داشته‌اند. براساس نتایج به‌دست آمده (شکل ۳)، به‌طور کلی هر دو پارامتر مورد مطالعه T_{het} و F_{het} در عمده نمونه‌ها در ذرات با اندازه سیلت-رس بیش از بخش شن تعیین شد. به‌جز در دو نمونه S1



شکل ۴- دما (T_{het}) و درصد یخ‌زدگی ناهمگن (F_{het}) در دو بخش شن و سیلت-رس در نمونه‌های طبیعی (N) و پس از حذف کربنات‌ها (SC). الف: دمای یخ‌زدگی ناهمگن در بخش شن؛ ب: دمای یخ‌زدگی ناهمگن در بخش سیلت-رس؛ ج: درصد یخ‌زدگی ناهمگن در بخش شن و د: درصد یخ‌زدگی ناهمگن در بخش سیلت-رس

و S_3 ، که این اتفاق را می‌توان به میزان بسیار اندک رس در این نمونه‌ها مرتبط دانست (جدول ۱). میانگین T_{het} در ذرات با اندازه شن و سیلت-رس به ترتیب ۲۴۶/۹ و ۲۴۷/۶ درجه کلوین و میانگین F_{het} در این دو بخش به ترتیب ۵۹/۷ و ۶۳/۵ به دست آمد. در این بین، تحقیقات متعدد نشان داده‌اند که ذرات در اندازه رس و حضور کانی‌های رسی از جمله مونتموریلونیت و کائولینیت و نیز کانی میکروکلین در بخش سیلت و رس نقش بسیار فعالی در هسته‌زایی یخ بازی می‌کنند (Hoose and Möhler, 2012; Pinti et al., 2012; Hiranuma et al., 2015; Kumar et al., 2019a; 2019b; Harrison et al., 2019). در مقابل، کوارتز که بخش عمده تشکیل‌دهنده بخش شن در خاک‌ها می‌باشد، از نظر هسته‌زایی یخ می‌تواند نقش قدرتمندی ایفا نماید (Zolles et al., 2015; Hamzehpour et al., 2022b). در نمونه‌های مطالعه شده، با وجود درصد بسیار پایین ذرات با اندازه سیلت-رس در مقایسه با بخش شن، همین مقدار اندک نیز توانسته است نقشی برابر و حتی قوی‌تر از شن در هسته‌زایی یخ داشته باشد.

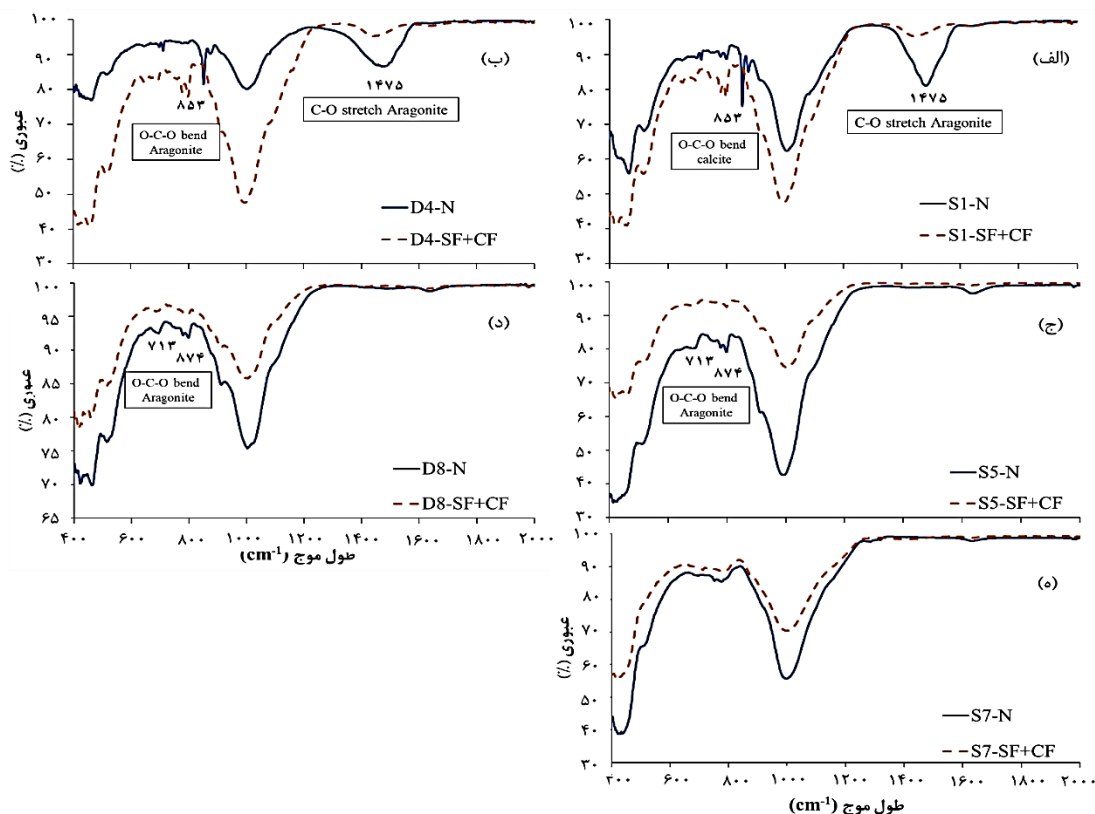
پارامتر T_{het} در ذرات با اندازه شن، در دمایی بین ۲۴۵/۴ الی ۲۴۹/۵ درجه کلوین و در بخش سیلت-رس بین ۲۴۴/۶ الی ۲۵۰/۷ درجه کلوین شروع شد. در هر دو بخش، مقادیر حداقل متعلق به نمونه D_4 و مقادیر حداکثر مربوط به نمونه S_5 بود. به نظر می‌رسد که شوری بالای نمونه D_4 (۴۳/۹ دسی‌زیمنس برمتر) به همراه مقادیر زیاد کربنات کلسیم (۴۳٪) از عوامل اثرگذار در تأخیر در شروع هسته‌زایی یخ در مجاورت این نمونه باشد. در حالی که میزان املاح کم در نمونه S_5 به همراه ماده آلی زیاد (۵/۳٪) می‌تواند دلیل تسریع در شروع هسته‌زایی یخ ناهمگن و از دماهای گرمتر در این نمونه نسبت به سایر نمونه‌ها باشد (O'Sullivan *et al.*, 2014; 2015; Huang *et al.*, 2021). مشابه نتایج به‌دست آمده برای شروع دمای هسته‌زایی یخ ناهمگن، مقادیر حداقل درصد هسته‌زایی یخ ناهمگن (F_{het}) در هر دو اندازه ذرات شن و سیلت-رس مربوط به نمونه D_4 بود (برای شن و سیلت-رس، مقدار F_{het} برابر ۴۴/۲٪ به‌دست آمد). حداکثر مقدار F_{het} در بخش شن در نمونه S_1 (۷۷/۴٪) و در بخش سیلت-رس، در نمونه S_5 (۸۱/۹) به‌دست آمد.

فعالیت هسته‌زایی یخ توسط بخش شن و سیلت-رس در عدم حضور کربنات‌ها: نتایج مربوط به T_{het} و F_{het} نمونه‌های شن و سیلت-رس پس از حذف کربنات‌ها (SC) و مقایسه آنها با نمونه‌های طبیعی (N) در شکل ۴ ارائه شده است. تقریباً در تمامی نمونه‌ها چه در بخش شن و چه در بخش سیلت-رس (به‌استثناى نمونه S_7 که نمونه‌ای بدون املاح و با حداقل کربنات‌ها بود)، پس از حذف کربنات‌ها، دمای آغاز هسته‌زایی ناهمگن و درصد آن افزایش یافت. حداکثر میزان T_{het} و F_{het} در نمونه‌های شن و بدون حضور کربنات‌ها به ترتیب برابر ۲۵۲/۳ کلوین و ۸۳/۷٪ تعیین شد که نسبت به نمونه‌های طبیعی بخش شن (۲۴۹/۵ درجه کلوین و ۷۷/۴٪)، افزایشی معادل ۲/۸ درجه کلوین و ۸٪ داشت. میانگین این دو پارامتر نیز نسبت به نمونه‌های طبیعی، افزایشی برابر ۰/۷ درجه کلوین و ۹٪ داشت. همچنین مقادیر حداکثر T_{het} و F_{het} در نمونه‌های سیلت-رس بدون حضور کربنات‌ها، برابر ۲۵۴/۵ درجه کلوین و ۸۸/۲٪ به‌دست آمد و در مقایسه با نمونه‌های طبیعی (۲۵۰/۷ درجه کلوین و ۸۱/۹٪)، افزایشی برابر ۳/۸ درجه کلوین و ۸٪ داشت. افزایش در مقادیر میانگین در مقایسه با نمونه‌های طبیعی نیز برابر ۱/۰ درجه کلوین و ۱۵٪ بود. این نتایج به‌خوبی تأیید می‌کنند که حضور کربنات‌ها در خاک‌ها چه در بخش شن و چه در اندازه‌های سیلت-رس، می‌تواند باعث به تأخیر افتادن تشکیل یخ و میزان آن در ابرها گردد.

بحث و نتیجه‌گیری

نقش نوع کربنات‌ها و املاح در توان هسته‌زایی یخ: براساس نتایج به‌دست آمده در بخش پیشین، نمونه‌های با بیشترین افزایش در T_{het} در بخش شن شامل نمونه‌های D_4 ، S_1 ، S_5 و S_8 و در بخش سیلت-رس، نمونه‌های D_4 و S_5 بودند. بالاترین میزان افزایش در F_{het} نیز مربوط به نمونه‌های D_4 و D_1 در هر دو بخش بود (شکل ۴). در بین این نمونه‌ها، D_4 حداقل INA را در هر دو اندازه ذرات شن و سیلت-رس در نمونه طبیعی دارا بود (شکل ۳) و حذف کربنات‌ها منجر به افزایش قابل توجه در توان هسته‌زایی این نمونه شد (شکل ۴). به‌منظور بررسی نقش نوع کربنات‌های موجود در نمونه‌ها در میزان INA و همچنین میزان اثربخشی روش استفاده شده در حذف کربنات‌ها، طیف FTIR در حالت طبیعی و بعد از حذف کربنات‌ها در تعدادی از نمونه‌ها (D_4 ، S_1 و S_5) در شکل ۵ ارائه شده‌اند. همچنین برای مقایسه، طیف FTIR دو نمونه با میزان کم کربنات‌ها، اولی با شوری زیاد (D_8 ، شکل ۵د) و دیگری با شوری کم (S_7 ، شکل ۵ه) نمایش داده شده‌اند.

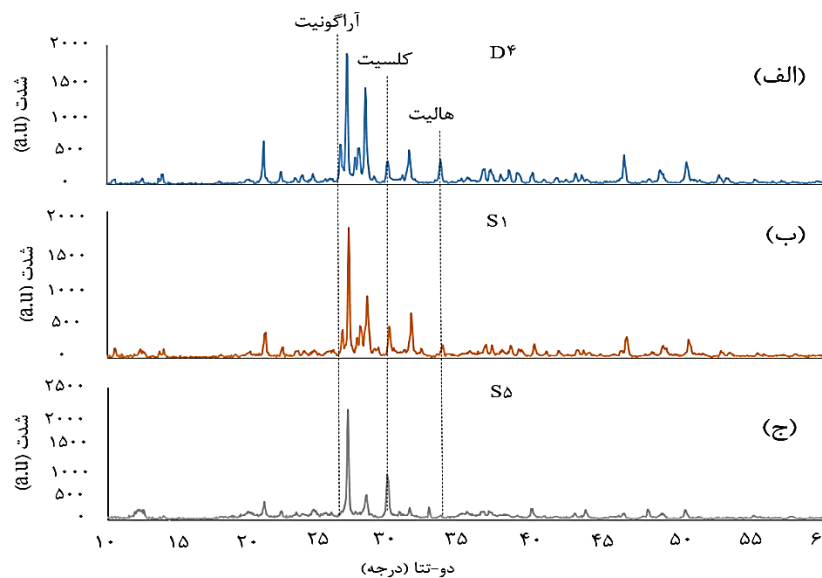
براساس طیف FTIR مربوط به نمونه‌های طبیعی، دو نمونه S_1 و D_4 ، دارای مقادیر زیادی کانی آراگونیت در محدوده cm^{-1} ۸۷۳ و cm^{-1} ۱۴۷۵ می‌باشند (شکل ۵، الف؛ ب). گراف‌های XRD این دو نمونه نیز نشان‌دهنده وجود کانی‌های کربنات‌ها از نوع آراگونیت و کلسیت می‌باشد (شکل ۶، الف؛ ب). این در حالی‌است که نمونه S_5 که بالاترین مقادیر T_{het} و F_{het} را در هر دو بخش اندازه ذرات و همچنین پس از حذف کربنات‌ها داشت، تنها کانی کلسیت در محدوده cm^{-1} ۷۱۳ و cm^{-1} ۸۷۴ مشاهده شد. طیف XRD نمونه S_5 نیز عدم وجود کانی آراگونیت و حضور کانی کلسیت در این نمونه را تأیید کرد (شکل ۶، ج). نمونه D_4 در هر دو بخش در حالت طبیعی، کمترین INA را از خود نشان داد. این نتایج در خصوص نمونه‌های D_1 ، D_2 و D_3 که حاوی مقادیر زیادی کانی آراگونیت می‌باشند، نیز صادق است (شکل ۳).



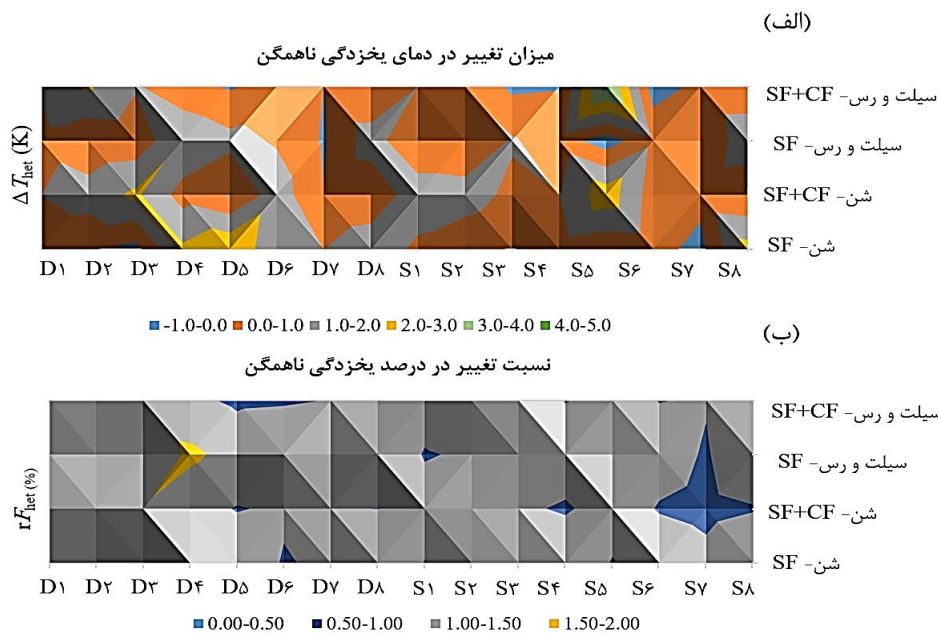
شکل ۵- طیف FTIR تعدادی از نمونه‌های مطالعه شده در حالت طبیعی و بعد از حذف کربنات‌ها. الف: نمونه خاک S1 با فراوانی آراگونیت و کلسیت و شوری کم؛ ب: نمونه گردوغبار D4 با فراوانی آراگونیت و کلسیت و شوری زیاد؛ ج: نمونه خاک S5 دارای کانی کلسیت و شوری کم؛ د: نمونه با مقدار کم کانی کلسیت و شوری زیاد و ه: نمونه با میزان بسیار کم کلسیت و شوری اندک

بعد از حذف کربنات‌ها از این نمونه‌ها، فعالیت هسته‌زایی آنها به میزان قابل توجهی افزایش یافت (شکل ۴). در مقابل نمونه S5 در حالت طبیعی و پیش از حذف کربنات‌ها نیز INA زیادی از خود نشان داد که می‌تواند بیانگر بازدارندگی کمتر کانی کلسیت در مقابل کانی آراگونیت در میزان فعالیت هسته‌زایی نمونه‌های گردوغبار باشد.

همان‌طور که پیشتر نیز اشاره شد، وجود املاح محلول در ذرات گردوغبار نقش مهمی در کاهش INA دارند (Maeda, 2021). از این‌رو، به دلیل حذف املاح هم‌زمان با حذف کربنات‌ها در نمونه‌های با شوری بالا، بخشی از افزایش در INA در اثر حذف کربنات‌ها می‌تواند ناشی از حذف املاح نیز باشد. این نتایج مشابه نتایج به دست آمده توسط سایر محققان است که گزارش کرده‌اند افزایش املاح محلول موجود در نمونه‌های گردوغبار، منجر به کاهش فعالیت هسته‌زایی یخ می‌گردد (Kumar et al., 2018; Yun et al., 2020; Hamzhepour et al., 2022b). بنابراین، تغییر در هسته‌زایی یخ (ΔT_{het} ; rF_{het}) در هر دو بخش شن و سیلت-رس در اثر حذف املاح (SF) نسبت به نمونه‌های طبیعی (N) محاسبه و با مقادیر مربوط به تغییر در هسته‌زایی یخ در اثر حذف کربنات‌ها (SF+CF) نسبت به نمونه‌های بدون نمک (SF) مقایسه شد (شکل ۷). براساس نتایج ارائه شده در شکل ۷، الف)، در عمده نمونه‌ها و در هر دو بخش شن و سیلت-رس، نمونه‌های SF+CF نسبت به نمونه‌های SF افزایش دمایی بین ۰ الی ۲ درجه کلوین داشتند. با این حال این افزایش در نمونه‌های D4 و S5 در بخش شن، تا سه درجه کلوین مشاهده شد. این امر می‌تواند به دلیل حذف پوشش‌های کربناته موجود در دور ذرات شن باشد. تحقیقات دیگر نیز نشان داده‌اند که ذرات کوارتز در اندازه‌شن، نقش فعالی در هسته‌زایی یخ دارند (Zolles et al., 2015; Hamzhepour et al., 2022a). در بخش سیلت-رس، این افزایش برای نمونه S5 بالاترین مقدار مشاهده شده در نمونه‌ها و برابر ۴ درجه کلوین بود. این نتایج نشان می‌دهد که وجود کربنات‌ها در ترکیب گردوغبار مستقل از املاح، نقش مهمی در کاهش INA دارد.



شکل ۶- طیف XRD مربوط به سه نمونه قبل از حذف کربنات‌ها. این نمونه‌ها حداکثر افزایش در فعالیت هسته‌زایی یخ در هر دو بخش شن و سیلت-رس پس از حذف کربنات‌ها را نشان دادند. الف: D₄؛ ب: S₁؛ ج: S₅.



شکل ۷- تغییر در الف: میزان دمای یخ‌زدگی (ΔT_{het})؛ و ب: نسبت یخ‌زدگی (rF_{het}) ناهمگن در تیمار حذف کربنات‌ها و املاح (SF+CF) نسبت به تیمار حذف املاح به تنهایی (SF)

در تیمار SF نمونه‌های غیرشور و با میزان املاح اندک (S₅ و S₇) (جدول ۱)، ΔT_{het} منفی به دست آمده نشان داد که شست‌وشوی زیاد نمونه‌های غیرشور احتمالاً به دلیل از دست رفتن بخشی از ترکیبات آلی و ذرات در اندازه رس، منجر به کاهش در INA توسط نمونه شد (بخش‌های آبی روشن در تیمارهای SF).

مقایسه تغییر در نسبت یخ‌زدگی در تیمارهای SF+CF نسبت به SF (rF_{het}) در هر دو بخش شن و سیلت-رس نیز نشان داد که در عمده تیمارهای SF+CF، افزایشی تا ۱/۵ برابر در درصد یخ‌زدگی ناهمگن مشاهده شد (شکل ۷، ب). با این حال بالاترین افزایش در تیمار D₄ در بخش سیلت-رس (افزایش ۱/۸ برابری) مشاهده شد. مشابه نتایج ΔT_{het} ، در تیمارهای غیرشور (S₁، S₅، S₇)، rF_{het} کاهش یافت و این کاهش در تیمار S₇ که تیماری با میزان شوری و کربنات کم بود، بیش از سایر نمونه‌ها مشاهده شد. تحقیقات دیگر نیز نشان داده‌اند که بخش رس-سیلت به دلیل حضور کانی‌هایی مثل مونتموریلونیت، کائولینیت و میکروکلین نقش

فعال‌تری در هسته‌زایی یخ در مقایسه با بخش شن دارند (Kumar et al., 2019; Harrison et al., 2019). همچنین مطالعات نشان داده است که وجود کانی‌هایی مثل کلسیت و دولومیت کاهنده فعالیت هسته‌زایی یخ هستند بنابراین با حذف کربنات‌ها، بر شدت هسته‌زایی یخ افزوده می‌شود (Kaufmann et al., 2016; Hamzehpour et al., 2022b).

به‌منظور بررسی نقش ذرات در اندازه‌شن و سیلت-رس و همچنین بررسی دقیق‌تر نقش ترکیبات کربناته در INA، هشت نمونه خاک و هشت نمونه گردوغبار تحت مطالعات هسته‌زایی یخ (IN) به روش انجماد غوطه‌وری با استفاده از دستگاه کالری سنج اسکن تفاضلی قرار گرفتند. نمونه‌های مطالعه شده، عمدتاً حاوی املاح محلول و کربنات‌های زیاد بوده و از سطوح مستعد فرسایش بادی که در نتیجه پس‌روی دریاچه ارومیه برجای مانده‌اند، جمع‌آوری شده‌اند. مطالعه حاضر نشان داد که در عمده نمونه‌ها، ذرات با اندازه سیلت-رس، فعالیت هسته‌زایی یخ (INA) بیشتری نسبت به بخش شن دارند. افزایش در INA از طریق شروع دمای یخ‌زدگی ناهمگن (T_{het}) از دماهای گرم‌تر و نیز درصد یخ‌زدگی ناهمگن بیشتر (F_{het}) مورد ارزیابی قرار گرفت. این نتایج درحالی‌به‌دست آمد که مجموع سیلت و رس موجود در نمونه‌ها، کمتر از ۳۰٪ وزنی را به‌خود اختصاص داده و بیش از ۷۰٪ نمونه‌ها از ذرات با اندازه‌شن تشکیل شده است. دلیل این امر می‌تواند اندازه کوچک به‌همراه سطح ویژه زیاد در بخش سیلت-رس باشد که در نهایت می‌تواند منجر به وجود جایگاه‌های فعالتر بیشتر در هسته‌زایی یخ گردد. همچنین نتایج تحقیق حاضر نشان داد که پس از حذف کربنات‌ها از هر دو اندازه ذرات شن و سیلت-رس (به‌جز در نمونه‌های با میزان بسیار اندک کربنات‌ها)، افزایش یافت. بررسی دقیق‌تر نمونه‌های حاوی کانی آراگونیت با نمونه‌های حاوی کانی کلسیت نشان داد که نمونه‌های با میزان زیاد کانی آراگونیت، کمترین INA را از خود نشان دادند (نمونه‌های D_1 تا D_4 ، S_1). این درحالی‌است که نمونه حاوی کلسیت، جزو نمونه‌های فعال از نظر هسته‌زایی یخ شناسایی شد (نمونه S_5). با این حال، در هر دو حالت، حذف کانی‌های کربناته منجر به افزایش در INA توسط نمونه گردید. براساس نتایج به‌دست آمده از مطالعه حاضر، بخشی از افزایش در INA در نمونه‌ها پس از حذف کربنات‌ها، ناشی از شسته شدن املاح محلول موجود در نمونه‌ها بود. با این حال، شدت افزایش در INA در هر دو بخش شن و سیلت-رس در نمونه‌های بدون کربنات‌ها و املاح (SF+CF)، بیش از نمونه‌های بدون املاح (SF) تعیین شد. این مطالعه به روشنی نشان داد که کانون‌های گردوغبار ایجاد شده در نتیجه پس‌روی دریاچه ارومیه، با وجود دارا بودن مقادیر زیاد کانی‌های کربناته و نمک، می‌توانند نقش مهمی در فعالیت هسته‌زایی ناهمگن یخ در بخش‌های بالایی اتمسفر ایفا کنند و با وجود میزان نسبتاً کم ذرات در اندازه رس-سیلت در این خاک مناطق، می‌توانند نقش قابل توجهی در ایجاد بلورهای یخ و بارندگی داشته باشند. با این حال، به‌دلیل آنکه تحقیق حاضر به‌صورت مطالعه آزمایشگاهی و تحت شرایط کنترل شده صورت گرفته است، به‌منظور دستیابی به نتایج واقعی‌تر، نیاز به تحقیقات بیشتر در خصوص تأثیر اجزای گردوغبار در تشکیل هسته‌های یخی، زمان تشکیل ابر و ماندگاری آن، در اتاقک‌های تشکیل ابر القایی ضروری است.

سپاسگزاری

آنالیزهای هسته‌زایی یخ در گروه شیمی اتمسفر دانشگاه ETH زوریخ، در کشور سوئیس انجام شده است و به این ترتیب از پروفیسور توماس پیتر و دکتر کلادیا مارکولی برای فراهم آوردن زمینه این مطالعه تشکر و قدردانی می‌گردد.

References

- Ahmady-Birgani, H., Mirnejad, H., Feiznia, S., 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., Al-Khafaji, R.M., 2012. Dust storms loads analyses—Iraq. *Arabian Journal of Geosciences* 5, 121-131.
- Al-Hemoud, A., Al-Dashti, H., Al-Saleh, A., Petrov, P., Malek, M., Elhamoud, E., Al-Khafaji, S., Li, J., Koutrakis, P., Doronzo, D., Middleton, N., 2022. Dust storm 'hot spots' and transport pathways affecting the Arabian Peninsula. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 238-239, 105932.
- Boose, Y., Welti, A., Atkinson, J., Ramelli, F., Danielczok, A., Bingemer, H.G., Plötze, M., Sierau, B., Kanji, Z.A., 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.
- Dane, J.H., 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., 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.
- Field, P.R., Heymsfield, A.J., 2015. Importance of snow to global precipitation. *Geophysical Research Letters* 42(21), 9512-9520.
- Gkikas, A., Proestakis, E., Amiridis, V., Kazadzis, S., Di Tomaso, E., Marinou, E., Hatzianastassiou, N., Kok, J.F., García-Pando, C.P., 2022. Quantification of the dust optical depth across spatiotemporal scales with the MIDAS global dataset (2003-2017). *Atmospheric Chemistry and Physics* 22(5), 3553-3578.
- Goudie, A.S., Goudie, A.M., Viles, H.A., 2021. The distribution and nature of star dunes: A global analysis. *Aeolian Research* 50, 100685.
- Hamzeshpour, N., Marcolli, C., Pashai, S., Klumpp, K., Peter, T., 2022a. Measurement report: The Urmia playa as a source of airborne dust and ice-nucleating particles–Part 1: Correlation between soils and airborne samples. *Atmospheric Chemistry and Physics* 22(22), 14905-14930.
- Hamzeshpour, N., Marcolli, C., Klumpp, K., Thöny, D., Peter, T., 2022b. The Urmia playa as a 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(22), 14931-14956.
- Harrison, A.D., Lever, K., Sanchez-Marroquin, A., Holden, M.A., Whale, T.F., Tarn, M.D., McQuaid, J.B., Murray, B.J., 2019. The ice-nucleating ability of quartz immersed in water and its atmospheric importance compared to K-feldspar. *Atmospheric Chemistry and Physics* 19(17), 11343-11361.
- Heymsfield, A.J., Sabin, R.M., 1989. Cirrus crystal nucleation by homogeneous freezing of solution droplets. *Journal of the Atmospheric Sciences* 46(14), 2252-2264.
- Hiranuma, N., Augustin-Bauditz, S., Bingemer, H., Budke, C., Curtius, J., Danielczok, A., Diehl, K., Dreischmeier, K., Ebert, M., Frank, F., Hoffmann, N., 2015. A comprehensive laboratory study on the immersion freezing behavior of illite NX particles: a comparison of 17 ice nucleation measurement techniques. *Atmospheric Chemistry and Physics* 15(5), 2489-2518.
- Hoose, C., Möhler, O., 2012. Heterogeneous ice nucleation on atmospheric aerosols: a review of results from laboratory experiments. *Atmospheric Chemistry and Physics* 12(20), 9817-9854.
- Huang, S., Hu, W., Chen, J., Wu, Z., Zhang, D., Fu, P., 2021. Overview of biological ice nucleating particles in the atmosphere. *Environment International* 146, 106197.
- IPCC: *Climate change 2013: The physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*, Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 1535.
- 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., Cziczo, D.J. and Krämer, M., 2017. Overview of ice nucleating particles. *Meteorological Monographs* 58, 1-33.
- Kaufmann, L., Marcolli, C., Hofer, J., Pinti, V., Hoyle, C.R., Peter, T., 2016. Ice nucleation efficiency of natural dust samples in the immersion mode. *Atmospheric Chemistry and Physics* 16(17), 11177-11206.
- Kaufmann, L., Marcolli, C., Luo, B., Peter, T., 2017. Refreeze experiments with water droplets containing different types of ice nuclei interpreted by classical nucleation theory. *Atmospheric Chemistry and Physics* 17(5), 3525-3552.
- Koop, T., Luo, B., Tsiaras, A., Peter, T., 2000. Water activity as the determinant for homogeneous ice nucleation in aqueous solutions. *Nature* 406(6796), 611-614.
- Kumar, A., Marcolli, C., Peter, T., 2019a. Ice nucleation activity of silicates and aluminosilicates in pure water and aqueous solutions–Part 2: Quartz and amorphous silica. *Atmospheric Chemistry and Physics* 19(9), 6035-6058.
- Kumar, A., Marcolli, C., Peter, T., 2019b. Ice nucleation activity of silicates and aluminosilicates in pure water and aqueous solutions–Part 3: Aluminosilicates. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 19(9), 6059-6084.

- Kumar, A., Marcolli, C., Luo, B., 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(10), 7057-7079.
- Lohmann, U., Lüönd, F., Mahrt, F., 2016. *An introduction to clouds: From the microscale to climate*. Cambridge University Press.
- Maeda, N., 2021. Brief overview of ice nucleation. *Molecules* 26(2), 392.
- Marcolli, C., Gedamke, S., Peter, T., Zobrist, B., 2007. Efficiency of immersion mode ice nucleation on surrogates of mineral dust. *Atmospheric Chemistry and Physics* 7(19), 5081-5091.
- Middleton, N.J., 2017. Desert dust hazards: A global review. *Aeolian research*, 24, 53-63.
- Mülmenstädt, J., Sourdeval, O., Delanoë, J., 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.
- Murray, B.J., O'Sullivan, D., Atkinson, J.D., Webb, M.E., 2012. Ice nucleation by particles immersed in supercooled cloud droplets. *Chemical Society Reviews* 41(19), 6519-6554.
- Nagare, B., Marcolli, C., Welti, A., Stetzer, O., Lohmann, U., 2016. Comparing contact and immersion freezing from continuous flow diffusion chambers. *Atmospheric Chemistry and Physics* 16(14), 8899-8914.
- Nelson, D.W., Sommers, L.E., 1996. Total carbon, organic carbon, and organic matter. *Methods of soil analysis: Part 3 Chemical Methods* 5, 961-1010.
- O'Sullivan, D., Murray, B.J., Malkin, T.L., Whale, T.F., Umo, N.S., Atkinson, J.D., Price, H.C., Baustian, K.J., Webb, M.E., 2014. Ice nucleation by fertile soil dusts: relative importance of mineral and biogenic components. *Atmospheric Chemistry and Physics* 14(4), 1853-1867.
- O'Sullivan, D., Murray, B.J., Ross, J.F., Whale, T.F., Price, H.C., Atkinson, J.D., Umo, N.S., Webb, M.E., 2015. The relevance of nanoscale biological fragments for ice nucleation in clouds. *Scientific Reports* 5(1), 8082.
- Peckhaus, A., Kiselev, A., Hiron, T., Ebert, M., 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.
- Pinti, V., Marcolli, C., Zobrist, B., Hoyle, C.R., Peter, T., 2012. Ice nucleation efficiency of clay minerals in the immersion mode. *Atmospheric Chemistry and Physics* 12(13), 5859-5878.
- Rashki, A., Eriksson, P.G., Rautenbach, C.D.W., Kaskaoutis, D.G., Grote, W., Dykstra, J., 2013. Assessment of chemical and mineralogical characteristics of airborne dust in the Sistan region, Iran. *Chemosphere* 90(2), 227-236.
- Shao, Y., Wyrwoll, K.H., Chappell, A., Huang, J., Lin, Z., McTainsh, G.H., Mikami, M., Tanaka, T.Y., Wang, X., Yoon, S., 2011. Dust cycle: An emerging core theme in Earth system science. *Aeolian Research* 2(4), 181-204.
- Vahidipour, M., Raeisi, E., van der Zee, S.E., 2022. Potentially toxic metals in sediments, lake water and groundwater of the Ramsar wetlands Bakhtegan–Tashk, South Iran: Distribution and source assessment. *Environmental Technology & Innovation* 28, 102789.
- Vali, G., DeMott, P.J., Möhler, O., Whale, T.F., 2015. A proposal for ice nucleation terminology. *Atmospheric Chemistry and Physics* 15(18), 10263-10270.
- Welti, A., Lohmann, U., Kanji, Z.A., 2019. Ice nucleation properties of K-feldspar polymorphs and plagioclase feldspars. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 19(16), 10901-10918.
- Yun, J., Link, N., Kumar, A., Shchukarev, A., Davidson, J., Lam, A., Walters, C., Xi, Y., Boily, J.F., Bertram, A.K., 2020. Surface composition dependence on the ice nucleating ability of potassium-rich feldspar. *ACS Earth and Space Chemistry* 4(6), 873-881.
- Zolles, T., Burkart, J., Häusler, T., Pummer, B., Hitzemberger, R., Grothe, H., 2015. Identification of ice nucleation active sites on feldspar dust particles. *The Journal of Physical Chemistry A* 119(11), 2692-2700.