

Original Article



Evaluation of Beryllium-7 Concentration and Its Relationship with Atmospheric Variables (Case Study: Tehran City)

Received: 2025.07.06

Accepted: 2026.01.04

Balal Oroji *

Department of Plant
Sciences, Faculty of
Biological Sciences,
Kharazmi University, Karaj,
Iran

EXTENDED ABSTRACT

Introduction: The present study was conducted to assess the concentration of radionuclide beryllium-7 in the atmospheric air of Tehran and to investigate its relationship with key atmospheric variables including temperature, relative humidity, wind speed, and precipitation. Beryllium-7, as a natural tracer of cosmic origin, is considered a valuable tool for studying atmospheric dynamic processes and vertical exchanges in the troposphere.

Material and methods: Sampling of total suspended particulate matter (TSP) was carried out using a high volume sampler at an altitude of 8 meters above the ground. Sampling was carried out for 6 hours with an average flow rate of 1.5 cubic meters per minute and on fiberglass filters with dimensions of 20 by 25 centimeters and an efficiency of 99.99%.

Results and discussion: The results showed that the concentration of beryllium-7 in the Tehran atmosphere has significant seasonal fluctuations. The total average concentration of this radionuclide during the study period was calculated to be 4.4 ± 0.87 mBq/m³. The maximum monthly average concentration of beryllium-7 was recorded in October with a value of 22.6 ± 0.12 mBq/m³ and its minimum in February with a value of 25.2 ± 0.42 mBq/m³, indicating an increase in the concentration in the hot and dry seasons and a decrease in the cold and humid seasons. There is a nonlinear but physically meaningful pattern between temperature and beryllium-7 concentration. A clear inverse relationship was observed between relative humidity and beryllium-7 concentration. In the months with high humidity (autumn and winter), the efficiency of removal processes (especially wet deposition and hygroscopic growth of particles) increased, reducing the residence time and concentration of beryllium-7 in the atmosphere. There is a relatively weak and dual relationship between wind speed and beryllium-7 concentration. In some cases, an increase in wind speed was accompanied by an increase in concentration (due to enhanced mixing and transport from distant areas), and in some cases it led to dilution and a decrease in concentration. Although precipitation is known to be an effective factor in the removal of particulate matter, the results of this study showed that it does not have a direct and significant effect on changes in the concentration of total particulate matter and beryllium-7. The mean total particulate matter (TSP) concentration fluctuated significantly during the sampling period; its maximum was recorded in October (177.6 ± 10.2 mBq/m³) and its minimum in May (110.6 ± 10.6 mBq/m³). Pearson correlation analysis between total particulate matter concentration and beryllium-7 concentration indicated a positive correlation of moderate strength ($r=0.55$), which was significant at the 90% confidence level ($p=0.066$), although not at the 95% confidence level.

Conclusion: The present study clearly showed that the concentration of beryllium-7 in Tehran air is influenced by a combination of meteorological factors and its seasonal variations are mainly controlled by atmospheric dynamic processes such as vertical mixing, atmospheric stability, and wet deposition efficiency. Although there is a moderate positive correlation between beryllium-7 concentration and particulate matter, beryllium-7 cannot be considered as a function of particulate matter mass alone. Local climatic conditions (such as temperature inversion in winter) play an inhibitory role in the vertical transport of beryllium-7 and lead to a decrease in its concentration at the ground surface.

Keywords: Particulate matter concentration, Beryllium-7, Atmospheric parameters, Air pollution

How to cite this article:
Oroji, B. 2026. Evaluation
of Beryllium-7
Concentration and Its
Relationship with
Atmospheric Variables
(Case Study: Tehran City).
Adv. Environ. Sci. 24 (2):
511-524.

* Corresponding Author Email Address: Balaloroji@khu.ac.ir

DOI: 10.48308/envs.2026.240585.1520



Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.

ارزیابی غلظت بریلیوم-۷ و رابطه آن با متغیرهای جوی (مطالعه موردی: شهر تهران)

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۱۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۰/۱۴

بلال اروچی *

گروه علوم گیاهی، دانشکده علوم
زیستی، دانشگاه خوارزمی، کرج،
ایران

چکیده مبسوط

سابقه و هدف: بریلیوم-۷ به عنوان یک ردیاب طبیعی با منشأ کیهانی، ابزاری ارزشمند برای مطالعه فرآیندهای دینامیکی جو و تبادلات عمودی در تروپوسفر محسوب می‌شود. مطالعه حاضر با هدف ارزیابی غلظت رادیونوکلئید بریلیوم-۷ در هوای اتمسفری شهر تهران و بررسی رابطه آن با متغیرهای کلیدی جوی شامل دما، رطوبت نسبی، سرعت باد و بارش انجام شده است.

مواد و روش‌ها: نمونه‌برداری از کل ذرات معلق اتمسفری (TSP) با استفاده از نمونه‌بردار حجم بالا (High Volume) در ارتفاع ۸ متری از سطح زمین انجام گردید. نمونه‌برداری به مدت ۶ ساعت با دبی متوسط ۱/۵ مترمکعب بر دقیقه و بر روی فیلترهای فایبرگلاس با ابعاد ۲۰ در ۲۵ سانتیمتر و بازدهی ۹۹/۹۹ درصد صورت گرفت.

نتایج و بحث: نتایج نشان داد که غلظت بریلیوم-۷ در اتمسفر تهران دارای نوسانات فصلی معناداری است. میانگین کل غلظت این رادیونوکلئید در دوره مطالعه $4/0 \pm 4/87 \text{ mBq/m}^3$ محاسبه شد. بیشینه میانگین ماهیانه غلظت بریلیوم-۷ در مهرماه با مقدار $6/0 \pm 22/12 \text{ mBq/m}^3$ و کمینه آن در بهمن‌ماه با مقدار $2/0 \pm 25/42 \text{ mBq/m}^3$ ثبت گردید که نشان‌دهنده افزایش غلظت در فصول گرم‌و خشک و کاهش آن در فصول سرد و مرطوب است. یک الگوی غیرخطی، اما فیزیکی معنادار بین دما و غلظت بریلیوم-۷ وجود دارد. در ماه‌های گرم سال (بهار و تابستان)، افزایش دما با افزایش ناپایداری جو و رشد ارتفاع لایه اختلاط همراه بوده و منجر به انتقال مؤثرتر بریلیوم-۷ از لایه‌های بالایی جو به سطح زمین و در نتیجه افزایش غلظت آن شده است. یک رابطه معکوس و مشخص بین رطوبت نسبی و غلظت بریلیوم-۷ مشاهده شد. اگرچه بارش به عنوان عامل مؤثر در حذف ذرات معلق شناخته می‌شود، اما نتایج این مطالعه نشان داد که تأثیر مستقیم و چشم‌گیری بر تغییرات غلظت کل ذرات معلق و بریلیوم-۷ ندارد. میانگین غلظت کل ذرات معلق (TSP) در طول دوره نمونه‌برداری دارای نوسانات قابل‌توجهی بود؛ بیشینه آن در مهرماه ($177/10 \pm 6/2 \text{ mBq/m}^3$) و کمینه آن در اردیبهشت‌ماه ($110/10 \pm 6/6 \text{ mBq/m}^3$) ثبت شد. تحلیل همبستگی پیرسون بین غلظت کل ذرات معلق و غلظت بریلیوم-۷ نشان‌دهنده یک همبستگی مثبت با شدت متوسط ($r=0/55$) بود که در سطح اطمینان ۹۰٪ معنادار ($p=0/066$) بوده، هرچند به سطح اطمینان ۹۵٪ نرسیده است.

نتیجه‌گیری: پژوهش حاضر به‌وضوح نشان داد که غلظت بریلیوم-۷ در هوای تهران تحت تأثیر ترکیبی از عوامل هواشناسی قرار دارد و تغییرات فصلی آن عمدتاً توسط فرآیندهای دینامیکی جو همچون اختلاط عمودی، پایداری جو و کارایی نهشت مرطوب کنترل می‌شود. اگرچه همبستگی مثبت متوسطی بین غلظت بریلیوم-۷ و ذرات معلق وجود دارد، اما بریلیوم-۷ را نمی‌توان صرفاً تابعی از جرم ذرات معلق دانست. شرایط اقلیمی محلی (مانند وارونگی دما در زمستان) نقش بازدارنده در انتقال عمودی بریلیوم-۷ داشته و منجر به کاهش غلظت آن در سطح زمین می‌شود.

واژه‌های کلیدی: غلظت ذرات معلق، بریلیوم-۷، پارامترهای جوی، آلودگی هوا

استناد به این مقاله: اروچی، ب. ۱۴۰۴. ارزیابی غلظت بریلیوم-۷ و رابطه آن با متغیرهای جوی (مطالعه موردی: شهر تهران). فصلنامه علوم محیطی نوین. ۲۴ (۲): ۵۱۱-۵۲۴.

* Corresponding Author Email Address: Balalorochi@khu.ac.ir

DOI: 10.48308/envs.2026.240585.1520



Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.

مقدمه

آلودگی هوا اثرات سوء متعددی بر سلامت افراد جامعه دارد و به مرگ زودرس، بیماری‌های قلبی عروقی، برونشیت، اختلالات تنفسی و سرطان منجر می‌شود. بر اساس گزارش سازمان جهانی بهداشت، سالانه در سراسر جهان حدود هفت میلیون نفر بر اثر بیماری‌های منتسب به آلودگی هوای آزاد و داخلی، جان خود را از دست می‌دهند (WHO, 2014). همچنین، بر اساس گزارش سازمان جهانی بهداشت در سال ۲۰۱۳، آلودگی هوا به‌ویژه ذرات معلق به‌عنوان ترکیبات سرطان‌زا برای انسان (گروه یک) طبقه‌بندی شده است (Loomis et al., 2013). آلودگی هوا به معضل جدی سلامتی شهروندان در کلان‌شهرهای ایران تبدیل شده است. بسیاری از نقاط شهری کشور به دلایل گوناگون، نظیر تردد خودروهای سبک و سنگین، کارخانه‌های صنعتی، انواع فرایندهای احتراقی و تولید برق یا صنایع شیمیایی، در معرض انواع آلاینده‌های هوا قرار دارند (Abbou et al., 2024) اما در این میان، تنها تعداد اندکی از آلاینده‌های اصلی به‌عنوان آلاینده‌های معیار، پایش و گزارش می‌شوند. تنوع و تعدد ترکیب شیمیایی خطرناک موجود در هوا، بسیار بیشتر از مواردی است که توسط ارگان‌های متولی ارائه می‌شود، اما به دلیل ضعف تحقیقات عملی در شناخت ابعاد رفتاری ذرات معلق متأسفانه به صورت ناشناخته‌ای باقی مانده است (Trechera et al., 2023). از این رو، وجود داده‌های مربوط به ویژگی‌های رفتاری ذرات معلق می‌تواند اتخاذ تصمیمات مناسب را به دنبال داشته باشد. یکی از روش‌های مطالعه در علوم جوی به‌ویژه ذرات معلق، استفاده از ردیاب‌های طبیعی است. این ردیاب‌ها با منشأ زمینی و کیهانی درجه جدیدی را برای مطالعه رفتار ذرات معلق در اتمسفر ایجاد کرده است. یکی از این ردیاب‌های طبیعی با منشأ کیهانی، بریلیوم- ^7Be می‌باشد. بریلیوم به‌عنوان یک رادیونوکلئید کیهانی با

نیمه عمر $53/3$ روز عمدتاً در تروپوسفر بالایی و استراتوسفر پایینی حضور داشته و میزان تولید آن به تشعشعات کیهانی، عرض جغرافیایی، ارتفاع از سطح زمین (عمق جوی) بستگی دارد (Leppänen et al., 2013; Ioannidou et al., 2011; Ioannidou and Papastefanou, 1994; Cannizzaro et al., 1995). با توجه به حداکثر غلظت استراتوسفر ^7Be ، ایزوتوپ کیهانی می‌تواند به‌عنوان یک ردیاب در مقیاس بزرگ، بزرگ‌تر از ردیاب‌های زمینی، بر اساس زنجیره تشکیل، استفاده شود (Długosz-Lisiecka 2021; Yu et al. 2021; Chham et al., 2019). این رادیونوکلئید کیهانی بعد از تشکیل با اتصال به ذرات معلق اتمسفری در حالت‌های تجمعی این ذرات (ذرات با قطر 0.07 تا 2 میلی‌متر) همراه است (Masarik and Beer, 1999) که با توجه به مزیتی همچون نیمه عمر کوتاه و تعیین غلظت آسان آن، به صورت گسترده به‌عنوان ردیاب در مطالعات علوم جوی استفاده می‌شود (Cho et al., 2007; Eleftheriadis et al., 2007; Porstendörfer et al., 1991). نیمه عمر طولانی این رادیونوکلئید باعث شده که امکان جابه‌جایی در مسافت‌های طولانی (هم به صورت افقی و هم به صورت عمودی) فراهم شده و از طرفی هم با توجه به نیمه عمر کوتاه آن نسبت به سایر ذرات پرتوزا، از تجمع طولانی‌مدت آن در جو جلوگیری کند (Usoskin et al., 2009). توزیع منبع ایزوتوپ کیهانی ^7Be مرتبط با ذرات گردوغبار در هوای سطح زمین به طور گسترده شناخته شده است و به‌عنوان ردیابی فرآیندهای انتقال طبیعی که در جو رخ می‌دهند، مورد استفاده قرار می‌گیرد (Ioannidou et al., 2019; Długosz-Lisiecka & Bem, et al., 2020) با توجه به این شرایط مطالعات گسترده‌ای در نقاط مختلف جهان برای استفاده از این ذره پرتوزا جهت مطالعات علوم جوی استفاده می‌شود (Baskaran & Shaw, 2001; Dibb &

خاک اطراف تأسیسات فرآوری بریلیوم، گزارش کردن که به طوری میانگین غلظت بریلیوم در هوای 0.48 ± 0.43 نانوگرم بر مترمکعب و به طور قابل توجهی پایین تر از استاندارد کیفیت هوای محیط (10 نانوگرم بر مترمکعب) است و غلظت این عنصر در خاک بین $1/42 - 2/75$ میکروگرم بر گرم قرار دارد.

Todorovic *et al.* (2005) غلظت ^7Be را در هوای نزدیک سطح زمین بلغراد بررسی کردند و گزارش دادند که غلظت این عنصر بین 0.6 تا $18/3 \text{ mBq.m}^{-3}$ متغیر بوده و بیشترین مقدار در تابستان و اواخر پاییز و کمترین مقدار در زمستان مشاهده شد. در یک طرح تحقیقاتی دیگر (Daish *et al.* (2005)، در منطقه چیلتون انگلستان از نمونه‌های برداشت شده در یک دوره چهارساله غلظت ^7Be را در اتمسفر بررسی کردند. آن‌ها بیشتر غلظت را برای ^7Be در فصل بهار و محاسبه کردند. همچنین (Likuku (2006) عوامل مؤثر بر غلظت ^7Be را در سرتاسر شهر ادینبورگ، به طور مداوم از جولای ۲۰۰۲ تا ژوئن ۲۰۰۳ با نمونه‌برداری حجم بالا و دتکتور طیف سنج اشعه گاما در اتمسفر مورد اندازه‌گیری قرارداد. بر اساس گزارش‌ها غلظت ^7Be بین $6/54 - 0/63 \text{ mBq.m}^{-3}$ بود. نتایج نشان داد که میانگین غلظت برای هر دو ^7Be در اتمسفر منطقه $0/21 \pm 0/01 \text{ mBq.m}^{-3}$ بود که متناظر با اندازه‌گیری‌های اتمسفر در سواحل اروپا است.

Duenas *et al.* (2008) غلظت ^7Be را در اتمسفر نزدیک به زمین در منطقه مالاگا در کشور اسپانیا مورد اندازه‌گیری قراردادند. نتایج این تحقیق نشان داد که متوسط غلظت ماهیانه ^7Be در اتمسفر منطقه مورد مطالعه در حدود $2/47 - 14/9 \text{ mBq.m}^{-3}$ که حداکثر این اندازه‌گیری‌ها در فصل بهار و تابستان و کمترین در تابستان بوده است. (Kikuchi *et al.* (2009) از تغییرات زمانی غلظت ^7Be جهت تعیین جریانات توده‌ها در شهر یاماگاتای ژاپن استفاده کردند. نتایج کار

Jaffrezzo, 1993; Myslek-Laurikainen *et al.*, 2006; (Kulan, 2006)؛ اما وجود متغیرهای جوی، تجهیزات نمونه‌برداری و سایر امکانات در پژوهش‌های مرتبط، محدودیت‌های تحقیقاتی را در این زمینه به‌ویژه در کشور ما ایجاد کرده است. در این تحقیق سعی شده است که میزان غلظت این رادیونوکلئید کیهانی را در شهر تهران برای فصول مختلف سال اندازه‌گیری و روند تغییرات را مورد بررسی قرار دهیم.

Kownacka (2002) توزیع عمودی عنصر پرتوزای ^7Be در تروپسفر و استراتوسفر پایین شهرهای لهستان را از سطح زمین تا 15 کیلومتر طی یک سال بررسی کرد و نشان داد که غلظت آن در سطح زمین کم است و با افزایش ارتفاع تا 15 کیلومتر افزایش می‌یابد و بیشترین مقدار را در این ارتفاع دارد. این عنصر از گازهای اتمسفری حاصل فرآیندهای هسته‌ای بوده و توسط شستشو، رسوب و حذف در جو کاهش می‌یابد. همچنین Lee and Yu (2002) با بررسی تعداد 14 نمونه طی یک دوره 4 ماهه (نوامبر - مارس) و در ارتفاع 20 متری از سطح زمین در شهر هنگ کنگ در فصول زمستان و بهار، دریافتند که بین غلظت ^7Be و رطوبت نسبی همبستگی معناداری وجود دارد، درحالی‌که این همبستگی همواره با دما دیده نمی‌شود.

Baskaran and McNeary (2003) طی پژوهشی به بررسی رفتار ^7Be در جنوب شرقی میشیگان ایالت متحده آمریکا پرداختند. آن‌ها غلظت این ذرات را دوره 17 ماهه در دیترویت، میشیگان اندازه‌گیری کردند. نتایج کار آن‌ها مشخص کرد که مقدار این ذره بین $3/11$ تا $0/35 \text{ dpm.cm}^{-2}.\text{yr}^{-1}$ است. در مطالعه دیگری در شرق آسیا؛ (Lee *et al.* (2004)، در اتمسفر شهر هنگ کنگ از بررسی 71 نمونه هوا از نوامبر 2001 تا فوریه 2003 با استفاده از یک نمونه‌بردار با حجم بالا، میزان ^7Be را در ذرات $1/11 - 0/22$ میکرومتر اندازه‌گیری کردند. Thorat *et al.* (2001) با بررسی غلظت بریلیوم در هوا و

داد که تغییرات زمانی غلظت ^7Be در طول فصول از سال متفاوت است. این تغییرات برای ^7Be در فصل پاییز <بهار> زمستان <تابستان بود و به طور کلی، میزان نهشت ^7Be در طول تابستان بیشتر بوده است. Pinero-Garcia *et al.* (2015) با استفاده از تحلیل ریاضی، رفتار ذرات معلق رادیواکتیو، به ویژه ^7Be ، در اتمسفر جنوب شرق اسپانیا را بررسی کردند و نشان دادند که ذرات عمدتاً از شمال آفریقا و توسط توده های هوای مدیترانه ای و آفریقایی منتقل شده اند و منشأ آن ها گردوغبار معدنی است. Liu *et al.* (2015) با استفاده از تغییرات زمانی و داده های هواشناسی در محیط GIS، توزیع ^7Be در تروپسفر و استراتسفر را مدل سازی کرده و یک مدل حمل و نقل تروپسفری ارائه دادند. عدم توافق زمان اقامت بین روش ها نشان دهنده حضور این رادیونوکلیدها در ارتفاعات مختلف است؛ به طور مثال ^7Be تولید شده توسط اشعه کیهانی در تروپسفر بالا یا استراتسفر پایین یافت می شود (Papastefanou, 2008).

مواد و روش ها

محدوده مورد مطالعه

شهر تهران از شمال به ارتفاعات البرز، از سمت شرق به کوه های محدوده بی بی شهربانو و از جنوب به حاشیه شمالی کویر مرکزی ایران ختم می شود (Amini & Emami, 2004). در شکل ۱، موقعیت جغرافیایی شهر تهران مشاهده می شود. این استان با وسعتی معادل ۱۹۱۹۴ کیلومتر مربع بین ۳۴ تا ۳۶/۵ درجه عرض شمالی و ۵۰ تا ۵۳ درجه طول شرقی قرار دارد. احاطه شدن تهران از سمت شمال و شمال شرق توسط ارتفاعات، مانع از عبور بادهایی که از سمت غرب و جنوب می وزند، شده و باعث انباشتگی آلاینده ها بر روی سطح منطقه می گردد؛ در نتیجه، پتانسیل آلودگی هوا در مرکز شهر را افزایش می دهد.

آن ها نشان داد که میزان تغییرات ^7Be شرایط بارش ۵٪ است و در طول سال تغییرات آن تحت تأثیر حمل و نقل ^7Be از عرض های جغرافیایی بالاست. Leppanen *et al.* (2010) در پنج منطقه گرمسیری (برزیل)، عرض های میانی در جنوب سوئد و همچنین مناطق شمالی سوئد، جنوب فنلاند و در منطقه قطبی شمال فنلاند به بررسی منابع کیهانی ^7Be در اتمسفر، از تولید تا حمل و نقل آن پرداخته و ارتباط بین فعالیت ^7Be در تروپسفر و شاخص های آب و هوایی بررسی کردند. نتایج نشان داد اختلافات در غلظت این ذره در نقاط مختلف ایستگاه های پایش محسوس بوده و علت آن هم تولید ^7Be در منطقه و حمل و نقل آن بود.

Bourciera *et al.* (2011) روند تطبیقی و تغییرات فصلی غلظت ^7Be بررسی و غلظت بالا را در طول تابستان و غلظت کم را در طول زمستان برای مناطق مرکزی فرانسه محاسبه کردند. اختلاف های زیادی در غلظت ^7Be را به وجود منابع بالایی در استراتسفر ارتباط می دهند. در مطالعه دیگری که Pham *et al.* (2011) در فرانسه انجام دادند، به بررسی ارتباط بین شرایط اقلیمی با تغییرات زمانی غلظت ^7Be پرداخته و طی یک دوره ۱۲ ساله از اتمسفر سطح شهر موناکو نمونه برداری کردند. حداقل و حداکثر غلظت برای ^7Be در طول سال های ۲۰۰۰ و ۲۰۰۹ مشاهده شد که به ترتیب با حداکثر و حداقل فعالیت خورشیدی مطابقت داشت. Ali *et al.* (2011) اثر جریان توده هوا بر غلظت ^7Be را در شهر اسلام آباد پاکستان بررسی و میزان غلظت ^7Be را ۱۷/۳ - ۳ mBq.m^{-3} محاسبه کردند. Kotsopoulou and Ioannidou (2012) به بررسی غلظت ^7Be در منطقه تسالونیک در یونان پرداخته و غلظت میانگین آن را در یک سال ۶ mBq.m^{-3} اعلام کردند.

Pham *et al.* (2013) نهشت خشک و مرطوب از ^7Be را در اتمسفر شهر موناکوی فرانسه برای یک دوره با در نظر گرفتن تغییرات فصلی مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان



روش نمونه برداری

در کشور ما فناوری و دانش مرتبط با مطالعات جوی با محدودیت‌های ابزاری مواجه بوده و این، یکی از عوامل اصلی عدم توجه محققان به انجام تحقیقات در این حوزه است. مطالعه موضوعات مرتبط با اکتیویته طبیعی و اتمسفری یکی از پیچیده‌ترین و متغیرپذیرترین موضوعات مطالعات اتمسفری است (Papastefanou, 2008). در میان مشکلات و محدودیت‌های مطالعات اتمسفری، بررسی عناصر ناپایدار (راديو اکتیویته) به دلیل تأثیرپذیری شدید از پارامترهای محیطی و شرایط منطقه‌ای، همواره با سختی خاصی مواجه بوده است. این محدودیت‌ها در دنیا و به‌ویژه در کشور ما به

نمونه جامد جهت شمارش در سیستم اسپکترومتر گاما قرار می‌گیرد (Papastefanou, 2008; Warwick, 2015).

نتایج و بحث

دما یکی از پارامترهای مهم در مطالعات علوم جوی دما است. در مطالعه غلظت ذرات معلق اتمسفری دمای محیط تأثیرگذار بوده و نیازمند بررسی تأثیر آن در بروز پدیده‌های جوی می‌باشد. در این مرحله هم به موازات برداشت نمونه‌ها، هم‌زمان این پارامتر در کنار سایر متغیرهای جوی برداشت شد. میانگین عددی دمای ماهیانه در منطقه در بهار برای ماه‌های فروردین، اردیبهشت و خرداد به ترتیب؛ ۱۴/۵، ۲۲ و ۲۹/۴ درجه سلسیوس بود. این مقدار در تیرماه ۳۰/۵ و برای ماه‌های مرداد و شهریور به ترتیب ۳۱ و ۲۸/۳ درجه بود، اما روند نزولی دما در منطقه از شهریورماه شروع و در مهرماه به ۲۰/۷ درجه رسید و با کاهشی ۲۶ درصدی، میانگین دما برای آبان ماه به ۱۵/۲ درجه رسید. میانگین عددی دمای ماهیانه در آذرماه ۹/۷ درجه بوده است که در مقایسه با ماه گذشته کاهش قابل‌توجهی را نشان می‌دهد، اما این مقدار با افزایشی حدوداً ۱ درجه‌ای در دی‌ماه به ۱۰ درجه رسید. میانگین عددی دمای ماهیانه برای بهمن‌ماه ۶/۳ درجه بود. میانگین عددی دمای ماهیانه ایستگاه در اسفندماه با افزایش ۲ واحدی به ۸/۵ درجه رسید. رابطه بین غلظت ^7Be و دما نشان‌دهنده یک الگوی غیرخطی اما فیزیکی معنادار است. در ماه‌هایی با دمای بالاتر، به‌ویژه در بهار و تابستان، غلظت ^7Be افزایش می‌یابد که این موضوع به افزایش ناپایداری جو، رشد ارتفاع لایه اختلاط و انتقال مؤثرتر ^7Be از لایه‌های بالایی جو به سطح زمین نسبت داده می‌شود. در مقابل، در ماه‌های سرد سال، کاهش دما با افت محسوس غلظت ^7Be همراه است که بیانگر تضعیف اختلاط عمودی و غلبه فرآیندهای حذف جوی است.

میانگین رطوبت نسبی در فروردین‌ماه ۳۸/۵ درصد ثبت شد که مقدار کمینه آن برای این ماه ۲۶ درصد بود. میانگین رطوبت نسبی در اردیبهشت‌ماه ۳۲ و در خردادماه ۱۷/۶ درصد محاسبه شد. میانگین رطوبت نسبی برای ایستگاه نمونه‌برداری در تیرماه

است. تحقیق حاضر در سال ۱۴۰۱ و طی چهار فصل به صورت ماهیانه و به طور میانگین پنج نوبت در هرماه صورت گرفت. با توجه به ضرورت هماهنگی با آزمایشگاه، دفعات نمونه‌برداری به صورت تصادفی و در طول ساعات شب و روز انجام گرفت. نمونه‌برداری از کل ذرات معلق اتمسفری توسط نمونه‌بردار حجم بالا (High Volume) در ارتفاع ۸ متری از سطح زمین انجام شد. مدت‌زمان نمونه‌برداری ۶ ساعت با دبی متوسط ۱/۵ مترمکعب بر دقیقه در نظر گرفته شد. برای این کار از فیلترهای فایبرگلاس با ابعاد ۲۰ در ۲۵ سانتیمتر با بازدهی ۹۹/۹۹ درصدی جهت جمع‌آوری کل ذرات معلق انجام شد. قبل از هر نمونه‌برداری، فیلتر در دمای ۲۰ تا ۲۳ درجه سانتی‌گراد و در رطوبت نسبی ۳۰ تا ۵۰ درصد به مدت ۲۴ تا ۴۸ ساعت قرار گرفت و سپس قبل از استفاده، با ترازوی دقیق ۴ رقم اعشار توزین شد. اختلاف وزن فیلترها قبل و بعد از نمونه‌برداری مقدار نمونه جمع‌آوری‌شده را نشان خواهد داد. با داشتن حجم هوای عبوری و مقدار نمونه خشک جمع‌آوری‌شده می‌توان غلظت کل ذرات معلق در منطقه را برحسب جرم به حجم محاسبه کرد. پارامترهای محیطی همچون دما، رطوبت و سرعت باد در محل هم‌زمان با نمونه‌برداری انجام شد. ^7Be از آنجا که یک گاما دهنده (با انرژی بالایی ۴۷۷/۶ keV؛ ۱۱٪) است، به راحتی می‌توان آن را در هوای اتمسفری، هم در آب باران و هم در گیاهان آشکارسازی و اندازه‌گیری کرد. متوسط غلظت آن در تروپوسفر در حدود ۱۲/۵ میلی‌بکرل بر مترمکعب (UNSCEAR, 2000) یا در هوای سطح زمین در مناطق معتدل ۳ میلی‌بکرل بر مترمکعب و در آب باران ۷۰۰ بکرل بر مترمکعب است (UNSCEAR, 2000). برای اندازه‌گیری‌های ^7Be با آشکارسازهای گامای هم‌محور ژرمانیوم (HPGe) در میان فتون‌های گاما با انرژی ۴۷۷ keV اندازه‌گیری می‌شود (Papastefanou, 2008). با توجه به این که گامای ساطع‌شده حاصل از واپاشی ذرات قابلیت عبور از سطوح نازک را دارد، از این رو نوکلید پرتوزا محدودیت‌های سایر رادیونوکلئیدها برای شمارش را نداشته و بدون آماده‌سازی شیمیایی و به صورت

با افزایش جزئی نسبت به ماه گذشته در حدود ۱۸/۸ درصد محاسبه شد که مقدار کمینه آن ۱۳/۵ درصد بود. میانگین رطوبت نسبی در ماه‌های مرداد و شهریور به ترتیب ۲۲ و ۱۹/۵ درصد بود. میانگین رطوبت نسبی در مهر و آبان ماه با افزایش نسبی در مقایسه با شهریورماه، به ترتیب حدود ۲۸/۶ و ۳۳ درصد ثبت شد. از طرفی هم کمینه میانگین رطوبت نسبی در این مدت به ترتیب حدود ۱۵ و ۱۹ درصد بود. مقدار رطوبت نسبی در آذرماه به ۴۰ درصد در دی‌ماه با رشد نامحسوس ۴۱ درصد محاسبه شد. همچنین کمترین میانگین رطوبت نسبی در این ماه ۲۸ درصد بوده است. میانگین رطوبت نسبی در بهمن‌ماه ۵۴/۳ درصد و در اسفندماه ۴۵ درصد بود. بین رطوبت نسبی هوا و غلظت ^7Be یک رابطه معکوس مشخص مشاهده می‌شود. در ماه‌های مرطوب سال (پاییز و زمستان)، هم‌زمان با افزایش رطوبت نسبی، غلظت ^7Be کاهش یافته است. این الگو نشان‌دهنده افزایش کارایی فرآیندهای حذف در شرایط مرطوب است، به‌طوری‌که رشد هیگروسکوپیک ذرات و افزایش احتمال رسوب و بارش موجب کاهش زمان اقامت ^7Be در جو می‌شود. از این‌رو، رطوبت نسبی یکی از عوامل کلیدی کنترل‌کننده نوسانات ^7Be محسوب می‌شود.

همواره از سرعت باد و وزش نسیم در مناطق مسکونی به عنوان پارامتر تأثیرگذار در برون‌رفت مقطعی از آلودگی‌های فصلی یاد می‌شود. این پارامتر بیش از سایر متغیرهای جوی در حذف و پراکنش ذرات معلق اتمسفری نقش دارد. میانگین سرعت باد در فروردین‌ماه ۱۵/۷ متر بر ثانیه و جهت آن ۲۶۰ درجه، برای اردیبهشت‌ماه ۹/۵ متر بر ثانیه و در جهت ۱۳۰ درجه و برای خردادماه ۱۶ متر بر ثانیه بود. میانگین سرعت باد در ماه‌های تیر، مرداد و شهریور به ترتیب ۱۴/۷، ۱۵/۲ و ۱۳/۶ متر بر ثانیه بود. جهت وزش در ماه‌های تیر، مرداد و شهریور از دوره بررسی به ترتیب ۲۲۰، ۲۷۰ و ۲۴۰ درجه بود. در فصل پاییز بیشینه سرعت باد برای مهرماه ۱۸/۲ متر بر ثانیه با جهت ۲۷۰ درجه، برای آبان‌ماه ۱۵/۵ متر بر ثانیه با جهت ۲۹۰ درجه و برای آذرماه ۱۳/۲ متر بر ثانیه با جهت ۲۳۰ درجه بود. اندازه‌گیری این پارامتر برای فصل زمستان برای

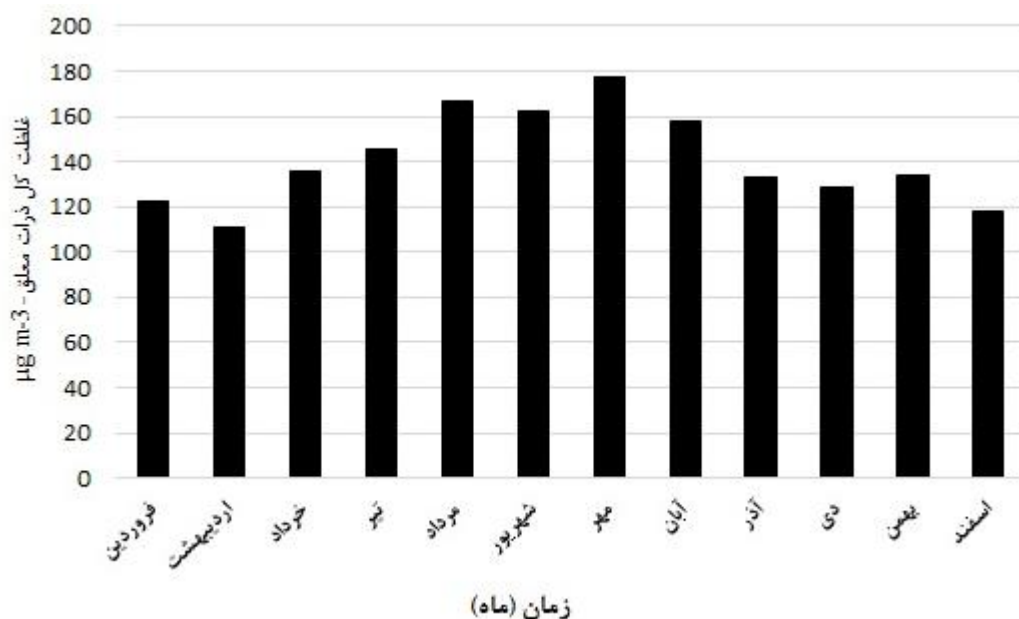
ماه‌های بررسی نزدیک به هم بوده و متوسط ۱۵/۲ متر بر ثانیه و در جهت ۲۸۰ درجه بود. میانگین ثبت‌شده برای ماه‌های دی، بهمن و اسفند به ترتیب ۱۶/۵، ۱۴ و ۱۵/۲ متر بر ثانیه بود. تحلیل داده‌ها نشان می‌دهد که رابطه بین سرعت باد و غلظت ^7Be نسبتاً ضعیف اما قابل تفسیر است. در برخی ماه‌ها، افزایش سرعت باد با افزایش غلظت ^7Be همراه بوده که می‌تواند ناشی از تقویت اختلاط افقی و عمودی و انتقال ^7Be از نواحی دوردست باشد. با این حال، این رابطه یکنواخت نیست، زیرا باد می‌تواند در برخی شرایط موجب رقیق‌سازی آلاینده‌ها و کاهش غلظت آن‌ها نیز شود؛ بنابراین، نقش باد در کنترل ^7Be دوگانه و وابسته به شرایط جوی حاکم است.

یکی دیگر از متغیرهای جوی که در حذف ذرات معلق اتمسفری نقش داشته و در کنار سرعت باد قابلیت رفع آلودگی قابل‌توجهی را دارد، بارش است. طی نتایج به‌دست‌آمده از بررسی میزان نزولات جوی در منطقه، برای فروردین‌ماه، میانگین عددی بارش سالیانه ۱۱۳ میلی‌متر ثبت شد که این مقدار برای اردیبهشت‌ماه ۸۸/۴ میلی‌متر به ثبت رسید. همچنین میانگین عددی بارش ماهیانه برای خردادماه ۲ میلی‌متر محاسبه شد. در تیرماه، میانگین عددی بارش ماهیانه ۴/۲ میلی‌متر و در مردادماه ۰ میلی‌متر بود. این مقدار برای شهریورماه ۰/۶ ثبت شد. در مهرماه میانگین عددی بارش ماهیانه ۵/۸ میلی‌متر بود که این مقدار در آبان ماه به ۴ رسید. همچنین میانگین عددی بارش در آذرماه ۷/۷ میلی‌متر بود که با افزایشی ۰/۳ میلی‌متری به ۸ میلی‌متر در دی‌ماه رسید. برای بهمن‌ماه دوره بررسی، مقدار میانگین عددی بارش ۵/۵ میلی‌متر بود که طی روند افزایشی نسبی به ۷۱/۵ میلی‌متر در اسفندماه رسید.

با توجه به شرایط اقلیمی حاکم و تغییرات جوی در طول سال برای یک منطقه و همچنین حجم منابع تولید آلاینده-های اتمسفری، تغییرات غلظت ائروسول‌ها ممکن است با پیش‌بینی‌ها پیروی نکند (Seinfeld & Pandis, 2016). نتایج بررسی به‌عمل‌آمده از تغییرات غلظت ائروسول‌های اتمسفری در منطقه، در طول سال و فصول گرم و خشک که

وقوع پدیده‌های گردوغبار محلی را شاهد هستیم، افزایش قابل توجهی در غلظت ذرات معلق مشاهده می‌شود که انتظار می‌رود این روند در طول فصول سرد و مرطوب با ریزش نزولات جوی کاهش یابد. این روند کاهشی را در این فصول شاهد هستیم اما نه آن‌گونه که شاهد ایجاد وضعیت نامناسب در کیفیت هوا نباشیم. میانگین غلظت کل ذرات معلق در فروردین ماه $122/5 \pm 12/4$ میلی‌گرم بر مترمکعب که تقریباً با میانگین کل فصل بهار هم‌مقدار بود. کمترین مقدار اندازه‌گیری شده در فصل بهار به میزان $110/6 \pm 10/6$ میلی‌گرم بر مترمکعب مربوط به اردیبهشت‌ماه بود که کمترین مقدار ثبت‌شده برای کل دوره نمونه‌برداری محسوب می‌شود. همچنین بیشترین مقدار ثبت‌شده برای این فصل به میزان $135/7 \pm 13/14$ میلی‌گرم بر مترمکعب برای خردادماه بود. بالا بودن مقادیر اندازه‌گیری شده در فصل تابستان عمدتاً به علت تأثیرپذیری منطقه از طوفان‌های گردوغبار محلی و جریانات شدید باد بوده و روند افزایشی آن تا اواسط فصل پاییز ادامه داشته و با شیب کمی تا انتهای سال روند نزولی خواهد داشت. بیشترین میانگین کل ذرات فصل تابستان در مردادماه به میزان

$166/15 \pm 7/6$ میلی‌گرم بر مترمکعب به ثبت رسید که در حدود ۸ واحد از میانگین کل فصل بیشتر بود. این مقدار برای تیر و شهریورماه به ترتیب $145/8 \pm 13$ و $162/4 \pm 12$ میلی‌گرم بر مترمکعب بود. بیشترین مقدار میانگین کل ماهیانه ذرات معلق در طول نمونه‌برداری در مهرماه به مقدار $177/6 \pm 10/2$ میلی‌گرم بر مترمکعب بود که اختلاف محسوسی را با مقادیر دیگر در فصل پاییز داشت. این مقدار برای ماه‌های آبان و آذر به ترتیب $158/2 \pm 11/5$ و $133/4 \pm 12/7$ میلی‌گرم بر مترمکعب به ثبت رسید. البته پایداری جوی در فصول سرد سال و وقوع پدیده وارونگی دمایی از دلایل افزایش ذرات معلق در سطح شهر تهران است. میانگین کل ذرات معلق در فصل زمستان $126/9 \pm 15$ میلی‌گرم بر مترمکعب بود که برای اسفندماه کمترین و بهمن‌ماه بیشترین مقدار به ثبت رسید. دی‌ماه با مقدار $128/7 \pm 11$ میلی‌گرم بر مترمکعب بعد از آذرماه، دارای بیشترین تعداد روزها با پایداری جوی بود. این مقادیر برای بهمن‌ماه و اسفندماه به ترتیب $133/6 \pm 10$ و $118/11 \pm 4$ میلی‌گرم بر مترمکعب بود. شکل ۲ میانگین غلظت ماهیانه ذرات معلق اتمسفری را در ایستگاه نمونه‌برداری نشان می‌دهد.



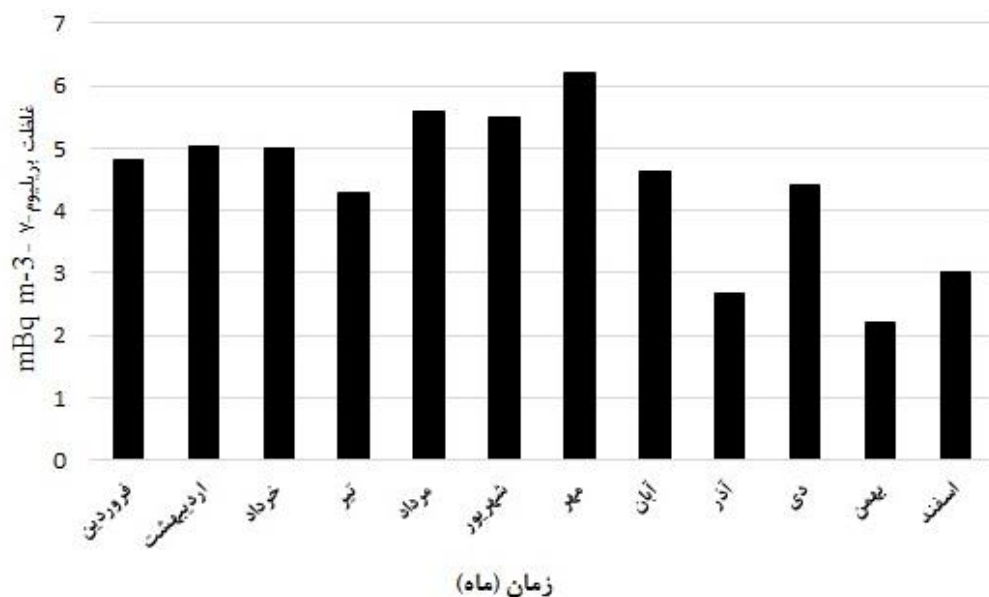
شکل ۲- تغییرات ماهیانه کل غلظت ذرات معلق در ایستگاه نمونه‌برداری
Fig. 2- Seasonal variations in particle concentrations in the sampling station

نتایج تغییرات غلظت ذرات نسبت به پارامترهای محیطی متفاوت بود. در میان این پارامترها، سرعت باد تأثیرگذارترین عامل در انتقال ذرات معلق در طول فصول سال بوده و رابطه معکوسی را با غلظت ذرات ایجاد کرده است. بر اساس این نتایج ارتباط منفی بین غلظت و سرعت باد کاملاً مشهود و بالا است. این ارتباط در رطوبت نسبی کمتر محسوس بوده و تأثیر آن در کنار عامل سرعت باد بیشتر نمود پیدا می‌کند. درواقع، افزایش رطوبت نسبی به‌خودی‌خود، چندان در حذف ذرات معلق مؤثر نیست. بررسی نتایج تغییرات رطوبت ارتباط کم‌رنگی را به صورت مستقیم با غلظت ذرات معلق نشان می‌دهد. برخلاف تصورات این ارتباط چندان مشهود نبوده و تأثیرگذاری کمتری را در نتایج شاهد بودیم. البته کیفیت و کمیت تغییرات در آزمایش توزیع بیشتر قابل رصد بود. با توجه به این نتایج، تغییرات غلظت در زمان بارش در غلظت کل ذرات کمتر مشهود بود و این، نشان‌دهنده این موضوع است که پارامتر بارش تغییر اساسی را در حذف ذرات معلق اتمسفری ندارد. همچنین، نتایج نشان داد در مواقعی که با افزایش دما مواجه هستیم کاهش جزئی در غلظت ذرات معلق محسوس بود. طبق نتایج به‌دست‌آمده در این تحقیق، شرایط اقلیمی حاکم در منطقه می‌تواند بر مقدار متغیرهای موردنظر (به‌ویژه غلظت ذرات معلق اتمسفری) تأثیر قابل‌توجهی داشته باشد. از این‌رو بررسی فصلی و ماهیانه پارامترها و متغیرهای موردنظر می‌تواند عمق تأثیرگذاری بر کیفیت هوای را نشان دهد.

نتایج اندازه‌گیری غلظت ^{7}Be ذرات معلق اتمسفری در شکل ۳ ارائه شده است. براین اساس، غلظت این رادیونوکلئید در فصول مرطوب سال دارای کمترین مقدار و در فصول خشک سال بیشترین غلظت را دارا بود. این تغییرات با در نظر گرفتن ماهیت حضور ^{7}Be در اتمسفر سطح زمین، همخوانی دارد. با توجه به منشأ کیهانی آن، حضور این رادیونوکلئید در سطح زمین در نتیجه تبادلات و جریان‌های عمودی در لایه‌های اتمسفری بوده و شرایط مناسب برای انجام این تبادلات در فصول گرم و آفتابی همچون تابستان بیشتر

خواهد بود (Papastefanou, 2008). از طرفی در فصول سرد و ابری که امکان انجام این جریان‌ها کمتر است، غلظت این رادیونوکلئید روند نزولی پیدا می‌کند. میانگین غلظت برای ^{7}Be در بهمن‌ماه با $25/42 \pm 2/0 \text{ mBq.m}^{-3}$ به‌عنوان کمترین مقدار میانگین ماهیانه و در مهرماه با $12/12 \pm 6/0 \text{ mBq.m}^{-3}$ به‌عنوان بیشترین مقدار میانگین ماهیانه اندازه‌گیری شد. البته به دلیل وقوع پدیده‌های وارونگی دمایی در زمستان و پایداری طولانی‌مدت شرایط جوی، این مقدار تا $0/5 \text{ mBq.m}^{-3}$ نیز رسید. میانگین کل دوره برای این رادیونوکلئید $41/87 \pm 4/0 \text{ mBq.m}^{-3}$ محاسبه شد. بررسی میانگین فصلی هم حکایت از این موضوع دارد که میانگین غلظت در تابستان بیش از سایر فصول بوده و در زمستان کمترین مقدار آن را شاهد بودیم.

بررسی آماری داده‌های ماهانه نشان می‌دهد که بین غلظت کل ذرات معلق و غلظت ^{7}Be یک همبستگی مثبت با شدت متوسط وجود دارد. نتایج آزمون همبستگی پیرسون مقدار $r=0/55$ را نشان می‌دهد که بیانگر افزایش نسبی غلظت ^{7}Be هم‌زمان با افزایش بار ذرات معلق در جو است. این رابطه از نظر آماری در سطح اطمینان ۹۰٪ معنی‌دار بوده است ($0/066$). هرچند در سطح متعارف ۹۵٪ به آستانه معنی‌داری نرسیده است. از دیدگاه فیزیکی، این همبستگی مثبت را می‌توان به اتصال ترجیحی ^{7}Be به ذرات ریز آئروسول نسبت داد؛ به‌گونه‌ای که افزایش غلظت ذرات معلق ظرفیت بیشتری برای جذب و حمل ^{7}Be فراهم می‌کند. با این حال، عدم معنی‌داری کامل آماری و پراکندگی داده‌ها نشان می‌دهد که تغییرات غلظت ^{7}Be صرفاً تابع جرم ذرات معلق نبوده و فرآیندهای جوی نظیر اختلاط عمودی، انتقال از لایه‌های بالایی جو و کارایی حذف (رسوب و بارش) نقش تعیین‌کننده‌ای در رفتار آن دارند. به‌طور کلی، می‌توان نتیجه گرفت که اگرچه افزایش غلظت ذرات معلق زمینه لازم برای افزایش غلظت ^{7}Be را فراهم می‌کند، اما کنترل اصلی نوسانات ^{7}Be در مقیاس زمانی فصلی، تحت تأثیر فرآیندهای دینامیکی و هواشناسی جو قرار دارد و نه صرفاً تغییرات بار آئروسول.



شکل ۳- تغییرات ماهیانه غلظت بریلیوم-7 در ایستگاه نمونه برداری
Fig. 3- Seasonal variations in ⁷Be concentrations in the sampling station

می‌شود. تغییرات فصلی دما منجر به نوسانات مشخصی در غلظت ⁷Be می‌شود؛ اغلب بیشینه آن در تابستان و کمینه آن در زمستان ثبت شده است (Dibb & Jaffrezo, 1993؛ Papastefanou, 2008). رطوبت بالا معمولاً با افزایش بارندگی همراه است. بارندگی منجر به حذف ذرات معلق حامل ⁷Be از جو به صورت نهشت مرطوب می‌شود. لذا در فصولی با دمای پایین و بارندگی زیاد، کاهش غلظت ⁷Be در لایه‌های نزدیک به سطح زمین مشاهده می‌شود. رطوبت بالا به تشکیل ابر کمک می‌کند. ابرها می‌توانند هم باعث افزایش بارش و در نتیجه کاهش ⁷Be شوند و هم از طریق انتقال اتمسفری موجب تغییر توزیع مکانی آن در جو باشند. از این رو هرگونه اختلاف بین نتایج گزارش شده توسط محققان مختلف را می‌توان توضیح داد؛ زیرا همه این اندازه‌گیری‌ها در مکان‌های مختلف و تحت شرایط آب و هوایی و جوی متفاوت انجام شده‌اند. توزیع اندازه فعالیت ⁷Be گزارش شده توسط محققان مختلف، رفتار ⁷Be را در محل تحقیق و هر مکان دیگری با ویژگی‌های مشابه مشخص می‌کند. به نظر می‌رسد که شرایط هواشناسی محلی بر توزیع اندازه فعالیت نهایی ⁷Be تأثیر می‌گذارد (Kotsopoulou Ioannidou, 2012).

توزیع اندازه فعالیت رادیونوکلیدهای متصل به ذرات معلق نتیجه ترکیبی از فرآیندهای جوی مانند انعقاد ذرات بسیار ریز، تشکیل قطرات مه و ابر، تبخیر و میعان، شستشو، باران و سهم طوفان‌های گردوغبار و محصولات احتراق در مخلوط ذرات تروپوسفری است (Papastefanou, 2008). به‌ویژه برای رادیونوکلیدهایی مانند ⁷Be با نیمه عمر بیش از یک روز، فرآیندهای حذف (رسوب خشک و مرطوب) از جو بر غلظت فعالیت تأثیر می‌گذارند، درحالی‌که فرآیند انعقاد به طور قابل توجهی توزیع اندازه فعالیت ذرات معلق رادیواکتیو اصلی را تغییر می‌دهد؛ بنابراین توزیع اندازه فعالیت نهایی ذرات معلق رادیواکتیو منعکس‌کننده همه این فرآیندهای مستقل است و به پارامتر غالب برای رفتار رادیونوکلیدها در هوای محیط تبدیل می‌شود (Papastefanou, 2008). تأثیر پارامترهای هواشناسی و الگوهای انتقال جرم هوا بر توزیع اندازه ذرات معلق حامل غلظت ⁷Be در ذرات معلق جوی مستقیماً تحت تأثیر شرایط هواشناسی و گردش‌های جوی قرار دارد. در فصل‌های سرد، لایه‌بندی پایدار جو و پدیده وارونگی دما انتقال عمودی هوا را محدود می‌کند. این شرایط مانع از رسیدن ⁷Be از لایه‌های بالایی جو به سطح زمین شده و باعث کاهش غلظت آن در اتمسفر پایین

نتیجه گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که تغییرات غلظت ذرات معلق و رادیونوکلئید کیهانی ^7Be در منطقه مورد مطالعه به طور مستقیم تحت تأثیر برهم کنش پیچیده پارامترهای جوی و شرایط اقلیمی فصلی قرار دارد. دما با تقویت ناپایداری جو و افزایش ارتفاع لایه اختلاط در فصول گرم، موجب افزایش انتقال عمودی و در نتیجه افزایش غلظت ^7Be در سطح زمین شده، درحالی که در فصول سرد با تضعیف اختلاط عمودی و غلبه فرآیندهای حذف، کاهش غلظت این رادیونوکلئید مشاهده شده است. رطوبت نسبی بالا و بارش، به ویژه در پاییز و زمستان، نقش مؤثری در حذف ^7Be از طریق نهشت مرطوب ایفا کرده و با کاهش زمان اقامت آن در جو همراه بوده است. از سوی دیگر، سرعت باد به عنوان مهم ترین عامل پراکنش، رابطه معکوس و نسبتاً قوی با غلظت ذرات معلق نشان داد، هرچند نقش آن در تغییرات ^7Be دوگانه و وابسته به شرایط انتقال و اختلاط جوی بوده

است. تحلیل آماری نیز وجود همبستگی مثبت متوسط بین غلظت ذرات معلق و ^7Be ($r \approx 0.55$) را تأیید کرد که بیانگر اتصال ترجیحی ^7Be به آئروسول های ریز است، با این حال نتایج نشان می دهد که کنترل اصلی نوسانات ^7Be در مقیاس زمانی فصلی نه صرفاً بار آئروسول، بلکه فرآیندهای دینامیکی جو، انتقال عمودی و کارایی حذف جوی است. به طور کلی، این مطالعه تأکید می کند که تفسیر رفتار ^7Be و ذرات معلق نیازمند رویکردی فرآیندمحور و در نظر گرفتن هم زمان پارامترهای هواشناسی و اقلیمی است.

سپاسگزاری

از جناب آقای مهندس محمد کریمی، دانشگاه جامع، به دلیل همکاری ارزشمند در انجام نمونه برداری های میدانی، آماده سازی و آنالیز نمونه ها و همچنین حمایت های فنی ایشان در مراحل مختلف این پژوهش، کمال تشکر و قدردانی را دارم.

References

- Abbou, G., Ghersi, V., Gaie-Levrel, F., Kauffmann, A., Reynaud, M., Debert, C. ... & Baudic, A. 2024. Ultrafine Particles Monitoring in Paris: From Total Number Concentrations to Size Distributions Measurements. *Aerosol and Air Quality Research*, 24, 240093.
- Ali, N., Khan, E.U., Akhter, P., Khattak, N.U., Khan, F. and Rana, M.A. 2011. The effect of air mass origin on the ambient concentrations of ^7Be and ^{210}Pb in Islamabad, Pakistan. *Journal of environmental radioactivity*. 102(1): 35-42
- Amini, S. and Emami, A. 2004. Report on the One Hundred Thousand Sheet of Tehran Plain, Geological and Mineral Exploration Organization of Iran.
- Baskaran, M. and Shaw, G.E. 2001. Residence time of arctic haze aerosols using the concentrations and activity ratios of ^{210}Po , ^{210}Pb and ^7Be . *Journal of Aerosol Science*. 32(4):443-452.
- Bourciera, L., Massonb, O., Laja, J., Pichona, P., Paulatb, P., Freneya, E. and Sellegria K. 2011. Comparative trends and seasonal variation of ^7Be , ^{210}Pb and ^{137}Cs at two altitude sites in the central part of France. *Journal of Environmental Radioactivity*. 102(3): 294-301.

منابع

- Cannizzaro, F., Greco, G., Raneli, M., Spitale, M.C., Tomarchio, E., 1995. Behaviour of ^7Be air concentration observed during a period of 13 years and comparison with sun activity. *Nucl. Geophys.* 9, 597e607
- Chham, E., Milena-Pérez, A., Piñero-García, F., Hernández-Ceballos, M.A., Orza, J.A.G., Brattich, E., El Bardouni, T., Ferro-García, M.A., 2019. Sources of the seasonal-trend behaviour and periodicity modulation of ^7Be air concentration in the atmospheric surface layer observed in southeastern Spain, 1352-2310 Atmos. Environ. 213, 148-158. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.06.011>
- Daish, S.R., Dale, A.A., Dale, C.J., May, R. and Rowe, J.E. 2005. The temporal variations of ^7Be , ^{210}Pb and ^{210}Po in air in England. *Journal of Environmental Radioactivity*. 84(3): 457-467.
- Dibb, J.E., Jaffrezo, J.-L. 1993. Beryllium-7 and lead-210 in aerosol and snow in the Dye 3 Gas, Aerosol and Snow Sampling Program. *Atmos. Environ.* 27A: 2751-2760.
- Długosz-Lisiecka, M., Bem, H., 2020. Seasonal fluctuation of activity size distribution of ^7Be , ^{210}Pb , and ^{210}Po radionuclides in urban aerosols. *J. Aerosol Sci.* 144, 105544 <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2020.105544>.

- Długosz-Lisiecka, M., 2021. Aerosol removal coefficients based on ⁷Be, ²¹⁰Pb, and ²¹⁰Po radionuclides in the urban atmosphere. *J. Atmos. Chem.* 78 (3), 209–218. <https://doi.org/10.1007/s10874-021-09422-z>.
- Dueñas, C., Fernández, M.C., Cañete, S. and Pérez, M., 2009. ⁷Be to ²¹⁰Pb concentration ratio in ground level air in Málaga (36.7° N, 4.5° W). *Atmospheric Research*, 92(1), pp.49-57.
- Eleftheriadis, K., Karanasiou, A.A., Siskos, P.A., Psomiadou, C., 2007. On the comparison of ⁷Be activity, trace metal and aerosol mass size distribution. In: *European Aerosol Conference EAC2007, September 9e14/2007, Salzburg, Austria*.
- Ioannidou, A., Eleftheriadis, K., Gini, M., Gini, L., Manenti, S., Groppi, F., 2019. Activity size distribution of radioactive nuclide ⁷Be at different locations and under different meteorological conditions. *Atmos. Environ.* 212, 272–280. <https://doi.org/10.12681/hnps.1850>.
- Ioannidou, A., Papastefanou, C., 1994. Atmospheric Beryllium-7 concentrations and sun spots. *Nucl. Geophys.* 8, 539e543.
- Ioannidou, A., Kotsopoulou, E., Papastefanou, C., 2011. ⁷Be in the lower atmosphere at a mid-latitude (40° N) during the year 2009 of a particular minimum of solar activity. *J. Radioanal. Nucl. Chem.* 289 (2), 395e400.
- Ioannidou, A., 2011. Activity size distribution of ⁷Be in association with trace metals in the urban area of the city of Thessaloniki, Greece. *Atmos. Environ.* 45 (6), 1286e1290.
- Kikuchi S., Sakurai H., Gunji S. and Tokanai F. 2009. Temporal variation of ⁷Be concentrations in atmosphere for 8 y from 2000 at Yamagata, Japan: solar influence on the ⁷Be time series. *Journal of Environmental Radioactivity*. 100(6): 515–521.
- Kotsopoulou, E. and Ioannidou, A. 2012. ⁷Be atmospheric concentration at mid-latitudes (40°N) during a year of solar minimum. (EPJ Web of Conferences)EDP Sciences. Pp. 9.
- Kownacka, Ludwika 2002. Vertical distributions of beryllium-7 and lead-210 in the tropospheric and lower stratospheric air. *NUKLEONIKA*; 47(2):79–82
- Kulan, A., 2006. Seasonal ⁷Be and ¹³⁷Cs activities in surface air before and after the Chernobyl event. *J. Environ. Radioact.* 90, 140e150.
- Lee, L.Y.L., Kwok, R.C.W., Cheung, Y.P. and Yu, K.N., 2004. Analyses of airborne ⁷Be concentrations in Hong Kong using back-trajectories. *Atmospheric Environment*, 38(40): 7033-7040.
- Leppänen, A.-P., Pacini, A.A., Usoskin, I.G., Aldahan, A., Echer, E., Evangelista, H., S., Kovaltsov, G.A., Mursula K. and Possnert G. 2010. Cosmogenic ⁷Be in air: A complex mixture of production and transport. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 72(13): 1036–1043.
- Leppänen, A.-P., Paatero, J., 2013. ⁷Be in Finland during the 1999e2001 solarmaximum and 2007e2009 solar minimum. *J. Atmos. Solar Terrestrial Phys.* 97, 1e10.
- Liu, H., Considine, D.B., Horowitz, L., Crawford, J.H., Rodriguez, J., Strahan, S., Damon, M. and Steenrod, S., 2015. Using beryllium-7 to assess cross-tropopause transport in global models. *Atmospheric Chemistry and Physics*.
- Likuku, A.S 2006. Factors influencing ambient concentrations of ²¹⁰Pb and ⁷Be over the city of Edinburgh (55.9°N, 03.2°W). *Journal of Environmental Radioactivity*. 87(3): 289–304.
- Loomis, D., Grosse, Y., Lauby-Secretan, B., El Ghissassi, F., Bouvard, V., Benbrahim-Tallaa, L., Guha, N., Baan, R., Mattock, H. and Straif, K., 2013. The carcinogenicity of outdoor air pollution. *The lancet oncology*. 14(13): 1262-1263.
- Masarik, J., Beer, J., 1999. Simulation of particle fluxes and cosmogenic nuclide production in the earth's atmosphere. *J. Geophys. Res. D* 104 (10), 12099e13012.
- McNeary D. and Baskaran M. 2003. Depositional characteristics of ⁷Be and ²¹⁰Pb in southeastern Michigan (2003). *Journal of Geophysical Research*. 108(D7): 4210
- Papastefanou, C. 2008. *Radioactive Aerosols*. ELSEVIER. 187 p.
- Piñero-García, F., Ferro-García, M.A., Chhama, E., Cobos-Díaz, M. and González-Rodelas, P. 2015. A cluster analysis of back trajectories to study the behaviour of radioactive aerosols in the south-east of Spain. *Journal of Environmental Radioactivity*. 147: 142–152.
- Pham, M., Povinec, P., Nies, H. and Betti, H. 2013. Dry and wet deposition of ⁷Be, ²¹⁰Pb and ¹³⁷Cs in Monaco air during 1998-2010: Seasonal variations of deposition fluxes. *Journal of Environmental Radioactivity*. 120: 45-57.
- Pham, M. K., Betti, M., Nies, H., & Povinec, P. P. (2011). Temporal changes of ⁷Be, ¹³⁷Cs and ²¹⁰Pb activity concentrations in surface air at Monaco and their correlation with meteorological parameters. *Journal of environmental radioactivity*, 102(11), 1045-1054.
- Porstendörfer, J., Butterweck, G., Reineking, A., 1991. Diurnal variation of the concentrations of radon and its short-lived daughters in the atmosphere near the ground. *Atmos. Environ.* 25A (3/4), 709e713.

Seinfeld, J.H. and Pandis, S.N., 2016. Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change. John Wiley & Sons.

Thorat, D.D., Mahadevan, T.N., Ghosh, D.K. and Narayan, S., 2001. Beryllium concentrations in ambient air and its source identification. Environmental monitoring and assessment, 69(1), pp.49-61.

Todorovic, D., Popovic, D., Djuric, G. and Radenkovic, M. 2005. 7Be to 210Pb concentration ratio in ground level air in Belgrade area. Journal of Environmental Radioactivity. 79(3): 297–307

Trechera, P., Garcia-Marlès, M., Liu, X., Reche, C., Pérez, N., Savadkoobi, M., Beddows, D., Salma, I., Vörösmarty, M., Casans, A., Casquero-Vera, J.A., Hueglin, C., Marchand, N., Chazeau, B., Gille, G., Kalkavouras, P., Mihalopoulos, N., Ondracek, J., Zikova, N., Niemi, J.V., et al. 2023. Phenomenology of ultrafine particle concentrations and size distribution across urban Europe. Environ. Int. 172, 107744. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2023.107744>

UNSCEAR 2000: Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. The report of the Committee without its annexes appears as Official Records of the General Assembly, Fifty-fifth Session. Supplement No. 46 (A/55/46).

Usoskin, I.G., Field, C.V., Schmidt, G.A., Leppanen, A., Aldahan, A., Kovaltsov, G.A., Possnert, G., Ungar, R.K., 2009. Short-term production and synoptic influences on atmospheric 7Be concentrations. J. Geophys. Res. 114, D06108. <http://dx.doi.org/10.1029/2008JD011333>.

Warwick, P. ed., 2015. Environmental radiochemical analysis V. royal Society of Chemistry.

WHO 2014. Burden of disease from ambient and household air pollution.

Yu, K.N., Lee, L.Y.L. 2002. Measurement of atmospheric 7Be properties using high efficiency gamma spectroscopy. Appl. Radiat. Isotopes 57: 941–946.

Yu, S.Y., Kang, C.-M., Liu, M., Koutrakis, P., 2021. PM2.5 sources affecting particle radioactivity in Boston, Massachusetts. Atmos. Environ. 259, 118455 <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2021.118455>. ISSN 1352-2310.

